

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**REDUCCIÓN DE POROSIDAD EN MOLDES DE ACERO H13 DESPUÉS DE
RECUPERACIÓN POR SOLDADURA GTAW**

POR

BRENDA YUVISELA RUBYANG MORALES CASTRO

TESIS

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2017

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**REDUCCIÓN DE POROSIDAD EN MOLDES DE ACERO H13 DESPUÉS DE
RECUPERACIÓN POR SOLDADURA GTAW**

POR

BRENDA YUVISELA RUBYANG MORALES CASTRO

TESIS

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2017

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la tesis **“REDUCCIÓN DE POROSIDAD EN MOLDES DE ACERO H13 DESPUÉS DE RECUPERACIÓN POR SOLDADURA GTAW”**, realizado por la alumna **BRENDA YUVISELA RUBYANG MORALES CASTRO** con número de matrícula **16-MS052** sea aceptado para su defensa como Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dra. Gladys Yerania Pérez Medina

Tutor Académico

Ing. Lázaro Cortinas

Tutor en Planta

Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez

Asesor

Vo.Bo.

Dr. Pedro Pérez Villanueva

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 Maestría de la alumna **BRENDA YUVISELA RUBYANG MORALES CASTRO**, una vez leído y revisada la Tesis titulada “**REDUCCIÓN DE POROSIDAD EN MOLDES DE ACERO H13 DESPUÉS DE RECUPERACIÓN POR SOLDADURA GTAW**”, aceptamos que la referida Tesis revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la tesis correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 19 días de diciembre del 2017

**Dr. Francisco Fernando
Curiel López**
Presidente

**Dr. Felipe de Jesús
García Vázquez**
Secretario

**Dra. Gladys Yerania Pérez
Medina**
Vocal

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA) por la oportunidad de formarme en el posgrado de Tecnología de la Soldadura Industrial, así como a la plantilla de investigadores que integran esta Institución por brindarme las herramientas necesarias para el desarrollo de mi maestría.

Al comité tutorial Dra. Gladys Pérez, Dra. Argelia Miranda y Dr. David González por el soporte ofrecido en la revisión, seguimiento y asesorías para el desarrollo y presentación de este trabajo.

A la empresa Nematik Saltillo por permitir el desarrollo del proyecto en sus instalaciones y a los integrantes del taller de herramientas por el apoyo brindado durante la experimentación con material, personal, horas de maquinado y asesorías para que el desarrollo del trabajo fuera posible.

Finalmente, a Dios y a mi familia por el apoyo, paciencia y confianza en mi trabajo y proyecto de vida.

ÍNDICE

SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1	3
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Objetivo general.....	5
1.3 Objetivos específicos.....	5
1.4 Justificación	6
1.5 Planteamiento del problema	6
1.6 Aportación tecnológica	7
1.7 Definición de hipótesis.....	8
1.8 Alcances	8
CAPÍTULO 2.....	9
MARCO TEÓRICO	9
2.1 Soldadura GTAW.....	9
2.2 Ventajas de proceso GTAW	13
2.3 Consideraciones de calidad para soldadura GTAW	14
2.4 Parámetros de proceso de soldadura GTAW	15
2.4.1 Influencia del gas de protección sobre la unión soldada	17
2.5 Influencia de parámetros de soldadura en proceso GTAW sobre propiedades mecánicas.....	19
2.6 Aceros grado herramienta	21
2.7 El efecto de los carburos en los aceros de grado herramienta	23
2.8 Aceros grado herramienta H13.....	23

2.9 Propiedades mecánicas de aceros H13	24
2.10 Soldadura de los aceros de grado herramienta	24
2.11 Reparación de moldes por soldadura	26
2.12 Técnicas de reparación de moldes	27
2.13 Soldadura de cordones múltiples.....	29
2.14 Material de aporte para aceros de grado herramienta.....	30
2.14.1 Eureka 31 (material de aporte utilizado en la soldadura de aceros grado herramienta H13)	33
2.15 Tratamiento térmico a aceros de grado herramienta	34
2.16 Carburos en aceros de grado herramienta	35
2.17 Tratamiento térmico a aceros de grado herramienta después de soldadura	36
2.18 Defectos de soldadura.....	38
2.18.1 Porosidad en soldadura.....	38
2.19 Ensayos no destructivos para verificar sanidad de soldadura	40
2.19.1 Ultrasonido	41
2.19.2 Líquidos penetrantes	42
2.19.3 Procedimiento de inspección con líquidos penetrantes.....	43
2.19.4 Ventajas y desventajas de inspección con líquidos penetrantes.....	45
2.20 Modelos de regresión lineal.....	46
2.20.1 Distribución de Poisson	47
CAPÍTULO 3	48
METODOLOGÍA	48
CAPÍTULO 4	50
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	50

CAPÍTULO 5	56
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
4.1 Caracterización de porosidad	56
4.2 Comparativo de microdureza en inserto soldado y material base	59
4.3 Resultados de ensayo no destructivo de líquidos penetrantes	60
4.4 Resultados de ensayos no destructivos de ultrasonido y caracterización microestructural	61
4.5 Modelo de regresión y algoritmo genético de optimización de parámetros	63
4.6 Resultados de ensayos no destructivos de líquidos penetrantes de insertos soldados con optimización de parámetros.....	64
4.7 Resultados de ensayos no destructivos de ultrasonido y caracterización microestructural de insertos soldados con optimización de parámetros.....	66
CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ÍNDICE DE FIGURAS.....	74
ÍNDICE DE TABLAS	75

SÍNTESIS

El objetivo de este trabajo es determinar la causa principal de formación de porosidad durante la recuperación con soldadura de moldes de acero H13 utilizados en la producción de piezas de aluminio para el sector automotriz. La soldadura es aplicada por el proceso de Gas Tungsten Arc Welding en el metal base usando como material de aporte acero base cromo y molibdeno conocido comercialmente como Eureka 31, por medio de un electrodo de tungsteno para la formación del arco eléctrico y argón como gas de protección.

La primera etapa de la investigación comprendió la toma de datos de las variables del proceso original de soldadura directamente en el área al soldar insertos de acero H13. Se realizó inspección visual con líquidos penetrantes y ultrasonido de los insertos soldados bajo las condiciones de producción normal, para determinar la cantidad de poros en la superficie después de maquinarlos, los datos obtenidos de este estudio fueron analizados por medio de un modelo de regresión basado en la distribución de Poisson para determinar los parámetros con mayor influencia en la aparición de poros, de acuerdo a este modelo las variables más considerables son el flujo de gas, amperaje y velocidad de avance. Después de identificar dichos parámetros, los datos fueron analizados con el software de Matlab para realizar una optimización y obtener el valor más apropiado en el que se debe de trabajar para minimizar la aparición de poros en la zona de fusión o soldadura.

La segunda etapa del trabajo consistió en unir considerando como base los datos obtenidos de la optimización para validar el modelo.

En ambas etapas, se seleccionaron insertos para verificar por medio de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido las fases presentes en el material antes y después de la soldadura, así como la inspección de microdureza de las diferentes zonas de las uniones soldadas para verificar el comportamiento de las propiedades mecánicas de los insertos antes y después de la soldadura.

El trabajo se complementa con la caracterización de material base, acero H13, para obtener su microestructura, dureza y composición química, así como la caracterización de poros presentados en insertos soldados para comprobar su origen, apoyándonos en la técnica de espectroscopía de electrones dispersos (EDS).

Los resultados muestran que las variables de mayor influencia en la aparición de poros son el amperaje y la velocidad de avance, dejando como constante el flujo del gas de argón en 25 l/min. Los insertos soldados con los parámetros de optimización presentan una reducción considerable de poros oscilando de 0 a 1, así como un mejor acabado en la zona de fusión respecto a las condiciones originales.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1 Antecedentes

Actualmente los aceros de grado herramienta son utilizados ampliamente en el campo de la manufactura de moldes, los cuales son sometidos a trabajo en caliente para la fabricación de piezas metálicas o plásticas, esto debido a la estabilidad de propiedades mecánicas como dureza, resistencia a la tensión y tenacidad a altas temperaturas, resultado de su composición química, centrada en la combinación de bajo carbono y moderado contenido de elementos de aleación que permiten la formación de carburos.

Durante el proceso de fabricación de piezas los moldes son expuestos a diferentes condiciones o medios en los que pueden sufrir daños como golpes o agrietamiento y erosiones o desgaste producto del continuo trabajo, que resultan en la pérdida de dimensiones, morfología y generación de defectos en piezas, debido a ello, es vital la regeneración o reemplazo de la zona dañada para no poner en riesgo la calidad de la producción, siendo la opción más factible debido a costo y tiempo, la regeneración o reparación.

Para reparar un molde la industria utiliza diferentes procesos de soldadura, siendo uno de los más comunes, el proceso de arco eléctrico con

electrodo de tungsteno (GTAW, por sus siglas en inglés) , ya que ofrece alta estabilidad estructural, el cuál basa su funcionamiento en el uso de un electrodo no consumible de tungsteno, debido a las altas temperaturas que es capaz de soportar (arriba de 3000°C) y cuya función principal es la formación de un arco eléctrico contra el metal base para lograr su fusión y posterior unión, así como el uso de un gas inerte para proteger el charco líquido de la oxidación que puede usarse opcionalmente material de aporte en forma de varilla para facilitar la soldadura. El proceso utiliza una fuente eléctrica de corriente continua que canaliza el calor en una zona específica a través de una antorcha, donde los parámetros a vigilar son la longitud de arco e intensidad de corriente.

Después del proceso de soldadura las zonas de los moldes que fueron sometidos a este proceso son llevados a maquinado para brindarle un mejor acabado que tenga las mismas características de rugosidad del resto del herramental, ya que, en la mayoría de los casos, estas zonas serán la figura de la pieza a vaciar y por lo tanto debe de cumplir con ciertas especificaciones dimensionales. De igual manera, será de alta relevancia evitar la generación o formación de porosidad durante el proceso de soldado, ya que, al ser maquinado el molde, estos defectos serán descubiertos, generando mal acabado y en el peor de los casos se convierten en iniciadores de grietas, que a su vez ocasionan arranques y agrietamiento de material durante el desmoldeo de la pieza. Debido a ello, si este tipo de defectos aparecen en los moldes, las partes deberán ser llevadas nuevamente a proceso de soldadura, generando reprocesamiento y por ende tiempos muertos para la operación.

A continuación, se presentan los parámetros actuales utilizados en planta en la soldadura y recuperación de moldes H13:

Tabla 1.1 Parámetros actuales usados en la soldadura de moldes H13

Parámetros	Valor o condición
Gas de protección	Argón (100%)
Flujo de gas de protección	15 a 30 lt/min
Amperaje	130 a 200 A dependiendo de la zona
Voltaje	17.5 a 18.5 V
Tipo de corriente	CDEN
Longitud de arco	Menor a 6.0 mm
Preparación de muestra	Con alcohol y/o herramienta abrasiva
Tipo de material de aporte	Eureka 31 o H13
Tipo de electrodo	Tungsteno (sin cambio controlado de vida útil, inspección visual antes de iniciar soldadura)

1.2 Objetivo general

Determinar la causa principal de formación de porosidad al soldar acero H13 durante la recuperación por el proceso de GTAW.

1.3 Objetivos específicos

- Determinar las variables de soldadura que tienen mayor incidencia en la formación de porosidad en uniones soldadas de acero H13 por el proceso GTAW.
- Reducir la cantidad de poros en partes soldadas después del proceso de reparación por soldadura en moldes de acero H13.
- Definir el rango óptimo mediante distribución de Poisson para soldar acero H13 por GTAW con la menor porosidad presente en las uniones.
- Realizar análisis de detección de porosidad interna en zonas recuperadas por soldadura mediante método de ultrasonido y líquidos penetrantes.

1.4 Justificación

Durante el proceso de soldadura GTAW es necesario el cuidado y monitoreo de variables como intensidad de corriente, estabilidad del arco, naturaleza del gas de protección, aleantes presentes en el electrodo, consideraciones de precalentamiento del material, velocidad de enfriamiento e incluso, método de aplicación, entre otras, para asegurar uniones soldadas de buena calidad que cumplan con las características y propiedades que el material requiere de acuerdo con su funcionalidad.

Actualmente, el proceso de recuperación de zonas en moldes de acero grado herramienta H13 para el trabajo con aluminio en fundición se realiza mediante el proceso GTAW y posteriormente se lleva a un proceso de maquinado para alcanzar el acabado y rugosidad que la parte requiere para ser llevada a producción, sin embargo, durante este proceso se destapan poros que quedaron alojados por el previo proceso de soldadura, y que se encuentran repartidos en la superficie. Debido a que los poros no son aceptados por considerarse como iniciadores de grietas, o factor para promover un desgaste prematuro del molde y dimensiones fuera de especificación de la pieza, los dados deben ser retrabajados generando un mayor costo de manufactura y tiempo muerto en las líneas por falta de disponibilidad de herramientas. Hoy en día, 8 de cada 10 moldes soldados bajo el proceso de GTAW en la recuperación de moldes en la empresa Nematik deben ser retrabajados, ya que presentan porosidad en la superficie.

En base a ello, se requiere identificar las variables que tienen mayor incidencia en la generación de poros en proceso de soldadura GTAW sobre aceros H13, para detectar la principal causa del problema para evitar retrabajo.

1.5 Planteamiento del problema

Se observa la existencia de porosidad en zonas sometidas a proceso de soldadura GTAW para recuperación, debido a desgaste, en moldes de acero grado

herramienta H13, lo que reditúa en tiempos muertos y paro de línea por reprocesamiento de la parte.

A continuación, se presenta tabla con los datos de retrabajo de herramientas por problema de porosidad en soldadura:

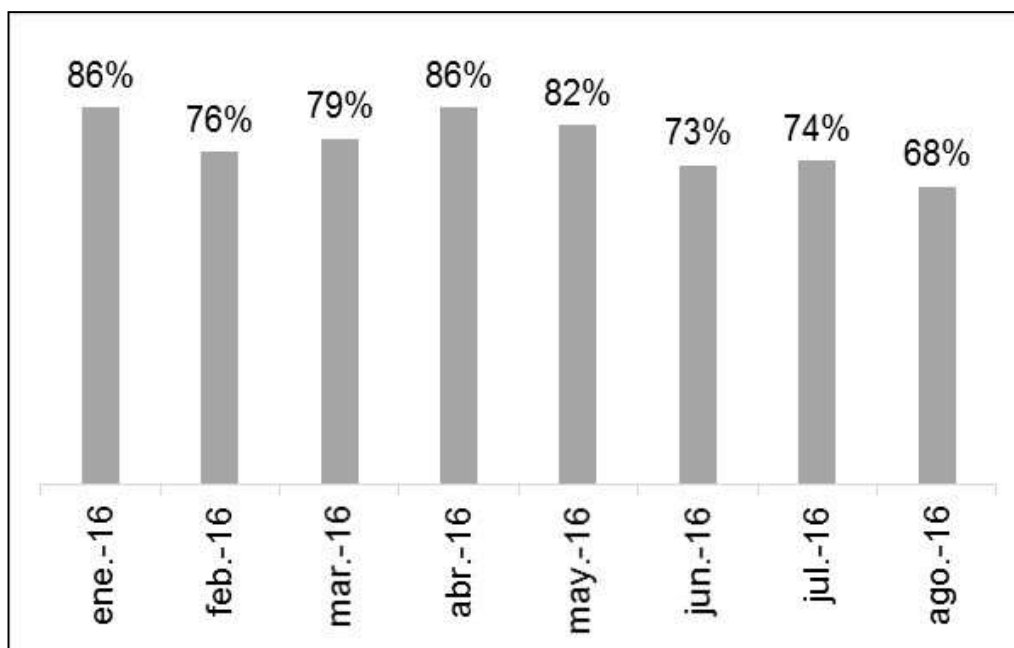


Figura 1. Retrabajo en herramientas debido a problemas de porosidad asociados a soldadura durante 2016 (1)

1.6 Aportación tecnológica

La aportación científica y tecnológica que ofrece esta investigación es realizar una propuesta de parámetros para soldadura GTAW en acero grado herramienta H13 para reducir problema de porosidad en zonas recuperadas por este proceso, evaluando mediante inspección visual por líquidos penetrantes y ultrasonido la porosidad presente en las uniones, e identificar mediante un diseño de experimentos las variables de mayor incidencia para la generación de este defecto.

1.7 Definición de hipótesis

El problema de porosidad que presentan las zonas de moldes H13 sometidas a proceso de soldadura GTAW está relacionado con el grado de protección que ofrecen los gases, velocidad de avance, incorrecto flujo de alimentación de gas, variación de la longitud de arco y contaminación del material base.

1.8 Alcances

El trabajo de la presente investigación estará enfocado al proceso de soldadura GTAW en acero grado herramienta H13 para reducir problema de porosidad en partes soldadas de moldes para trabajo en caliente para vaciado de aluminio. Mediante modelo de regresión y optimización se realizará propuesta de parámetros para reducir problema de aparición de inclusiones después de la soldadura.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Soldadura GTAW

La soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno utiliza un gas de protección (helio, argón, dióxido de carbono) para cuidar el charco de metal fundido. El material de aporte se adiciona de manera separada en forma de alambre, en la Figura 2.1 podemos observar un esquema con la representación de este tipo de soldadura (2).

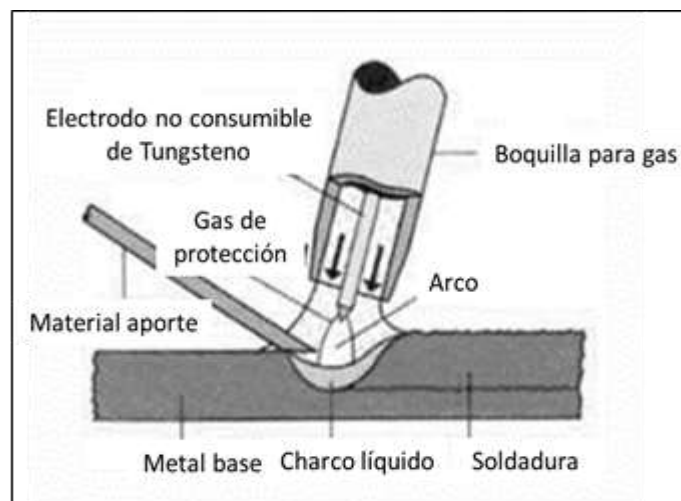


Figura 2. 1 Esquema de soldadura GTAW (2)

El arco en la soldadura actúa como fuente de calentamiento y es estable aún a muy baja corriente. Se pueden soldar componentes delgados mediante este proceso y ofrece una muy buena calidad en metales como aluminio, magnesio, titanio, acero inoxidable, níquel y hierro vaciado. El arco se inicia con una alta frecuencia (AC) para evitar la contaminación del electrodo de tungsteno, esto es subsecuentemente mantenido por una corriente DC que provee un mejor control de la penetración (3).

El equipo básico para la soldadura por GTAW comprende una fuente de poder, antorcha para soldar, proveedor de gas inerte, proveedor de material de aporte y sistema de enfriamiento de agua.

Para la mayoría de los materiales este proceso utiliza corriente directa con el electrodo conectado al polo negativo de la fuente de poder, si éste es conectado sobre el polo positivo, la acción resultará en la fusión del electrodo.

Las fuentes de poder pueden ser ajustadas para variar la frecuencia de onda y el balance de corriente positiva y negativa acortando o extendiendo la longitud del tiempo dedicado en el ciclo. El incremento de la frecuencia resulta en un arco más enfocado, incremento de la penetración, aumento de la velocidad de avance y reducción de la distorsión. Al soldar debemos considerar el espesor del material, ya que de esto dependerá el amperaje a usar con la finalidad de obtener una buena penetración en la unión, en la Figura 2.2 observamos la corriente sugerida en base al espesor del material a soldar.

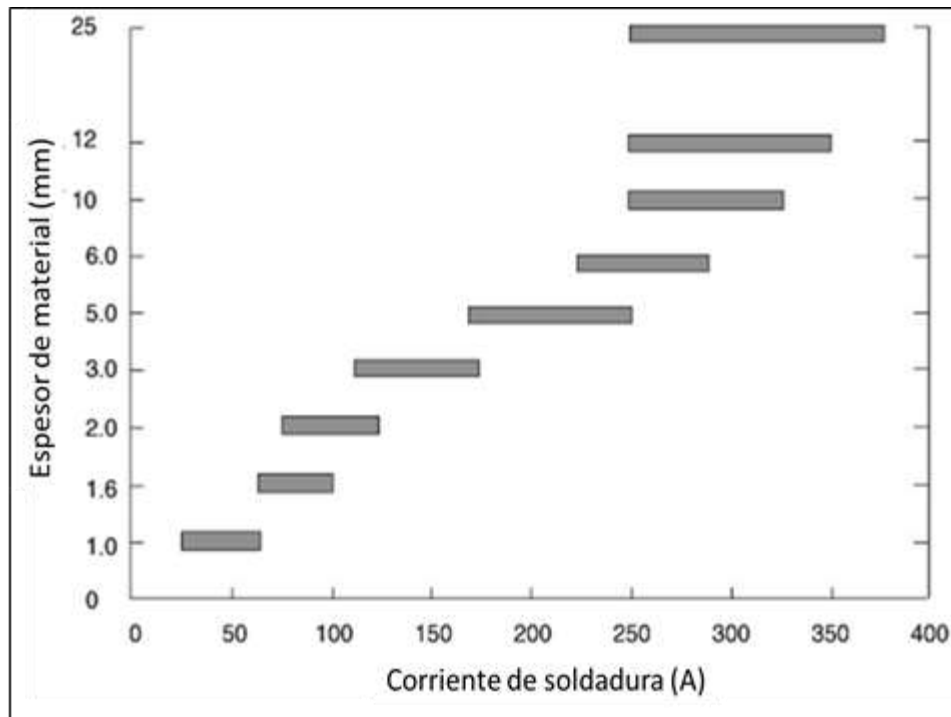


Figura 2. 2 Rango de corriente típica para diferentes espesores (3)

En el caso de los gases de protección, el argón provee una ancha capa superficial sobre el cordón de soldadura, pero deja una apariencia brillante. Un arco más estable, así como la facilidad para iniciar la ignición en el arco son alcanzados mediante el argón. El helio incrementa el voltaje del arco y el nivel de la penetración, pero reduce el efecto del arco, su estabilidad y el inicio de la ignición. Algunos equipos modernos tienen la capacidad de iniciar la soldadura usando argón y una vez que el arco es estable se realiza un cambio automático a helio. Sin embargo, debido al costo, el helio es menos usado en comparación al argón. La adición de argón en helio mejora la estabilidad de arco. La velocidad de avance y penetración son reducidas si se disminuye la cantidad de helio, pero se mejora con el argón. Es posible controlar el ancho de cordón y la penetración variando la cantidad de argón en la mezcla. La mezcla más popular es 25% de helio en argón.

La fuente de poder debe proveer flujo de gas de protección antes y después de la soldadura. Al inyectarse antes se utiliza como una purga para las boquillas y

para proteger el electrodo cuando el arco es establecido. Al inyectarse después de que la soldadura es terminada se utiliza para proteger el charco de soldadura y el electrodo de la oxidación durante el enfriamiento. El flujo de gas es importante para asegurar la correcta cobertura (3).

Hay varios tipos de electrodos disponibles para la soldadura por GTAW. Estos incluyen a los de tungsteno, tungsteno aleado con thorio o zirconia. La punta del electrodo asume una forma semiesférica durante la soldadura. Es importante que su forma se mantenga si un arco estable se desea alcanzar. Un electrodo demasiado pequeño ocasionará un sobrecalentamiento y posible fusión, resultando en una contaminación de tungsteno del charco de metal. Un electrodo demasiado grande reditúa en problemas de estabilidad de arco y charco de metal muy grande, en la Figura 2.3 tenemos representado las dimensiones recomendadas para el electrodo para garantizar una soldadura de buena calidad. De igual forma se recomienda realizar un precalentamiento del electrodo antes de iniciar la soldadura (3).

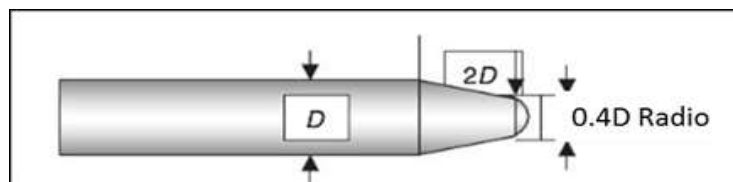


Figura 2. 3 Dimensión de punta de electrodo recomendada (3)

En resumen, los principales componentes de un equipo para soldadura GTAW son la fuente de poder, tanque de gas de protección, boquilla y electrodo, los cuales pueden observarse en la Figura 2.4,

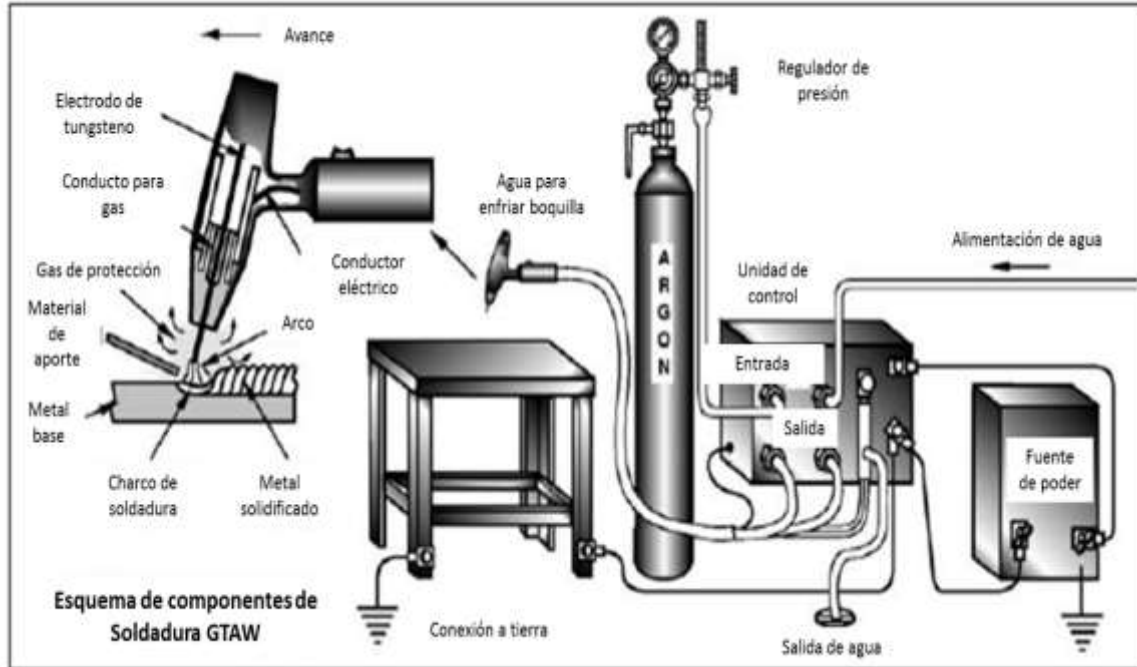


Figura 2. 4 Esquema de principales componentes de soldadura GTAW (2)

2.2 Ventajas de proceso GTAW

Una de las principales ventajas de este proceso es la alta calidad en la soldadura de metales y aleaciones, esto debido a que el gas inerte protege a las zonas soldadas, charco líquido y arco de la contaminación. Otra de las grandes ventajas, es que el material de aporte puede ser adicionado al charco líquido de forma independiente a la corriente de arco.

Puede ser usado en aceros inoxidable, aluminio, magnesio, titanio, aceros al carbono, aceros de baja aleación, así como superaleaciones base níquel, donde se requiere alta calidad de la soldadura con respecto a niveles de porosidad y fisuras.

Se adapta para trabajar con espesores delgados porque puede ser controlado a muy bajos amperajes (2 a 5 amperes) y la soldadura puede ser realizada en cualquier posición.

Ventajas adicionales son la baja salpicadura, el equipo es portable y adaptable a variedades de aplicaciones automáticas y semiautomáticas (4).

2.3 Consideraciones de calidad para soldadura GTAW

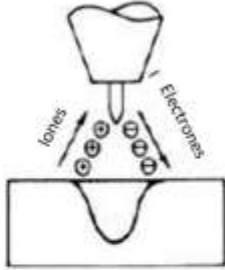
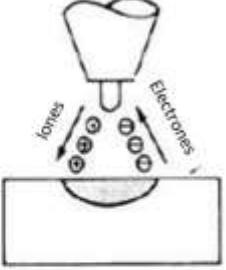
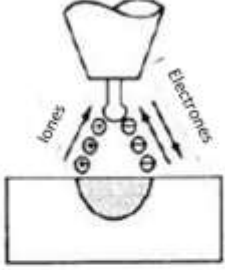
Al soldar materiales por el proceso de GTAW se debe de tener ciertas consideraciones para obtener una unión con buena calidad y libre de discontinuidades. A continuación, se presenta una lista de recomendaciones a seguir (5).

- Es importante considerar la limpieza de la superficie. Los contaminantes deben ser removidos para evitar porosidad o inclusiones, no soldar si el metal base está húmedo.
- El calor otorgado al material puede generar distorsiones, para evitar este efecto, la liberación de esfuerzos puede realizarse para que el material cuente con las propiedades físicas iniciales.
- No se recomienda soldar al aire libre, ya que las corrientes del viento pueden reducir el efecto del gas protector.
- Es importante cuidar la longitud de arco para asegurar buena penetración y propiedades.
- Para perfiles largos es necesario el soporte de estructuras para mantener sujetas las juntas y evitar distorsión o deformación durante el enfriamiento.

- La pieza a soldar y el material de aporte deben mantenerse alejados del electrodo de tungsteno para evitar contaminación o un arco inestable.
- La habilidad del soldador juega un papel muy importante, ya que este establecerá la longitud del arco y de ello dependerá la calidad y estabilidad.
- Para evitar daño del electrodo se recomienda mantener el flujo de gas durante 10 a 15 segundos después de apagar el arco.
- Para evitar contaminación de la pieza con el electrodo, es necesario mantenerlo fuera del charco líquido.

2.4 Parámetros de proceso de soldadura GTAW

- Corriente: Es una de las más importantes consideraciones durante el proceso de soldadura, ya que está relacionada con la penetración, velocidad de soldadura, grado de deposición y calidad de la junta. Existen 3 tipos a considerar, corriente directa conectada al electrodo negativo (DCEN), corriente directa conectada al electrodo positivo (DCEP) y corriente alterna (6). En la Figura 2.5 podemos observar el efecto en la unión soldada con los 3 tipos de corriente.

Tipo de corriente	DCEñ	DCEP	AC Balanceado
Polaridad del electrodo	Negativo	Positivo	
Flujo de iones y electrones			
Características de penetración			
Acción de limpieza	No	Si	Si- No Cada mitad de ciclo
Balace de calor en el arco	70% en material 30% en electrodo	30% en material 70% en electrodo	50% en material 50% en electrodo
Penetración	Profunda, delgado	Superficial y ancho	Media
Capacidad del electrodo	Excelente e.g., 1/8 in. (3.2 mm) 400 A	Pobre e.g., 1/4 in. (6.4 mm) 120 A	Buena e.g., 1/8 in. (3.2 mm) 225 A

Características de tipos de corriente para soldadura de GTAW

Figura 2. 5 Características de tipos de corriente para soldadura GTAW (5)

La elección de la polaridad debe hacerse en base al material a soldar, las intensidades de corriente son del orden de 50 a 500 Amperios.

El uso de corriente alterna se caracteriza por un cambio constante en la polaridad cada cierto tiempo y la corriente se mantiene fluyendo del polo negativo al positivo. Este tipo de corriente provee un efecto de limpieza para remoción de óxido, muy útil en la soldadura de magnesio y aluminio, debido al rápido cambio en la polaridad, esto también genera un sobrecalentamiento del electrodo, por lo que se deberá utilizar un electrodo más largo. Es muy útil para el trabajo con espesores delgados, ya que provee un calor uniforme que reduce la posibilidad de perforación y fusión del metal de soldadura. La corriente directa conectada al electrodo negativo es la alternativa más usada, ya que el calor de la soldadura se concentra en la pieza y no en el electrodo.

La corriente continua con polaridad inversa se caracteriza por que el electrodo se encuentra a potencial positivo respecto a la pieza, por lo que la relación de corriente es mayor en la pieza de trabajo, la pieza se calienta el 30 por ciento y el electrodo el 70 por ciento, las intensidades oscilan entre 5 y 60 amperios. Con este tipo de corriente el baño de fusión es mayor pero la penetración es muy poca y ancha. En la práctica el método de polaridad inversa no tiene mucha aplicación (7).

- Gases de protección: Hoy en día, el gas de protección más usado en este proceso es el argón. Este gas posee un bajo potencial de ionización que facilita la formación del arco, es aproximadamente 1.4 veces más pesado que el aire, lo que resulta en un excelente gas para la protección del charco de soldadura.
- Flujo de gas: Debido a la densidad más baja del helio, este debe ser usado con flujos más altos que el argón. Típicamente los flujos del argón oscilan entre 7 l/min (15 ft³/h) y 14 l/min (30 ft³/h) para el helio.
- Materiales de aporte: El espesor del material determinará si el material de aporte debe ser usado. Para materiales con espesores menores a 3.2 mm no es necesario adicionar material de aporte. Cuando sea necesario, el material de aporte se adiciona de forma manual como alambre y frío, solo se utiliza caliente para aplicaciones automáticas.
- Oscilaciones en el arco: Permite enfocar el calor en zonas localizadas, esto es ventajoso cuando se sueldan figuras no uniformes. El número de pasadas y calor entrante puede ser reducido cuando se utiliza esta modalidad (6).

2.4.1 Influencia del gas de protección sobre la unión soldada

Los gases de protección son un componente fundamental en los procesos de soldadura por arco. Su principal función es proteger al metal transferido y al metal líquido de la contaminación por los gases de la atmósfera. Aunque el gas estándar

utilizado es el argón, también son muy utilizadas diferentes mezclas de gases que tienen como base los siguientes, helio, dióxido de carbono y oxígeno, estos se caracterizan porque mejoran la transferencia de calor, ayudan a la formación del arco, mejoran la cobertura y soldabilidad. Se han realizado diferentes experimentaciones a través del tiempo trabajando con diversas mezclas de gases e incluso se han adaptado los equipos de soldadura, como las boquillas, para permitir la alternancia de gases.

La técnica de alternancia de gases con argón y helio en una mezcla 50-50, llevada a cabo por Bitharas I. y colaboradores (8) muestra un incremento del 3% en la cobertura de la soldadura y en la penetración (aumento del 13%). A diferentes flujos de gas (5 y 10 l/min) se puede garantizar una soldadura de calidad libre de imperfecciones, esto garantizando la distancia contra el material base y la boquilla y el diámetro de esta. De esta manera se comprueba que la mezcla de gases optimiza el desempeño del proceso de soldadura.

En la Figura 2.6, se muestra el impacto de la mezcla de gases a diferentes flujos sobre la cobertura de la unión soldada resultado del estudio de Bitharas I. y colaboradores (8) :

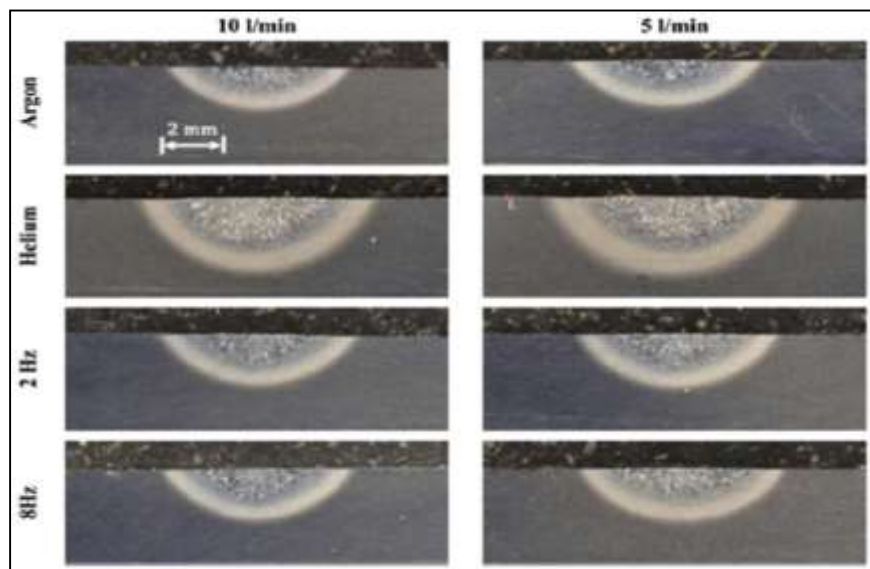


Figura 2. 6 Macrografías de soldaduras mostrando el efecto de la configuración de los gases de protección. La mezcla de gases Ar-He y 8 Hz provee un estándar útil de mezcla 50/ 50 (8)

2.5 Influencia de parámetros de soldadura en proceso GTAW sobre propiedades mecánicas.

La calidad de la soldadura depende altamente de los parámetros del proceso, por lo tanto, muchas investigaciones se han enfocado en la optimización para obtener los valores de propiedades mecánicas más favorables.

Debido a que la optimización empírica representa un proceso muy tardado y alto en costo, la aplicación de técnicas de estadística juega un papel muy importante, una de las más aplicadas es la de superficie de respuesta.

Resultados obtenidos por Kiaee N. y Khafri Aghaie (9) muestran los siguientes límites de trabajo como los más apropiados para garantizar buena resistencia a la tensión y dureza, así como buena calidad en la unión soldada. Corriente menor a 110 A, ocasiona incompleta penetración o falta de fusión, si la corriente es mayor a 150 A, puede presentarse socavado y salpicaduras, si la velocidad de soldadura es menor a 5 cm/min, también puede observarse socavado debido a que hay un incremento en la entrada de calor, si la velocidad excede 13 cm/min habrá falta de fusión y falta de penetración. Si el flujo de gas de protección es menor a 13 l/min, se presentarán porosidades e inclusiones de tungsteno, si el flujo es mayor a 17 l/min habrá formación de inclusiones debido a la agitación del gas.

El efecto de los parámetros ya mencionados (flujo de gas, corriente y velocidad de avance) sobre la microestructura, resistencia a la tensión y dureza, pueden ser explicados por un simple parámetro (voltaje * corriente / velocidad de avance). Este parámetro corresponde a la energía por unidad de longitud y muestra la energía transferida durante la soldadura. La característica más importante de la entrada de calor es que gobierna las velocidades de enfriamiento y por tanto afecta la microestructura, por ejemplo, cuando la entrada de calor es alta, la dureza disminuye debido al crecimiento de los granos en la microestructura.

Al incrementar la velocidad de avance, se disminuye la energía proporcionada a la soldadura, por lo que el charco líquido de metal se enfría rápidamente y resulta en una microestructura fina con valores más altos de dureza, los resultados de la investigación de Kiaee N., Aghaie-Khafri M., acerca de la optimización del proceso de soldadura de GTAW por el diseño experimental de superficie de respuesta (9), muestran que pasando de una velocidad de avance de 5 a 13 cm/min, la dureza incrementa de 178 a 202 HV.

En la Figura 2.7, se muestran gráficas de contorno donde se representan los valores óptimos de flujo de gas, amperaje y velocidad de avance para obtener los valores más altos de resistencia a la tensión (526 MPa) y dureza (200 HV):

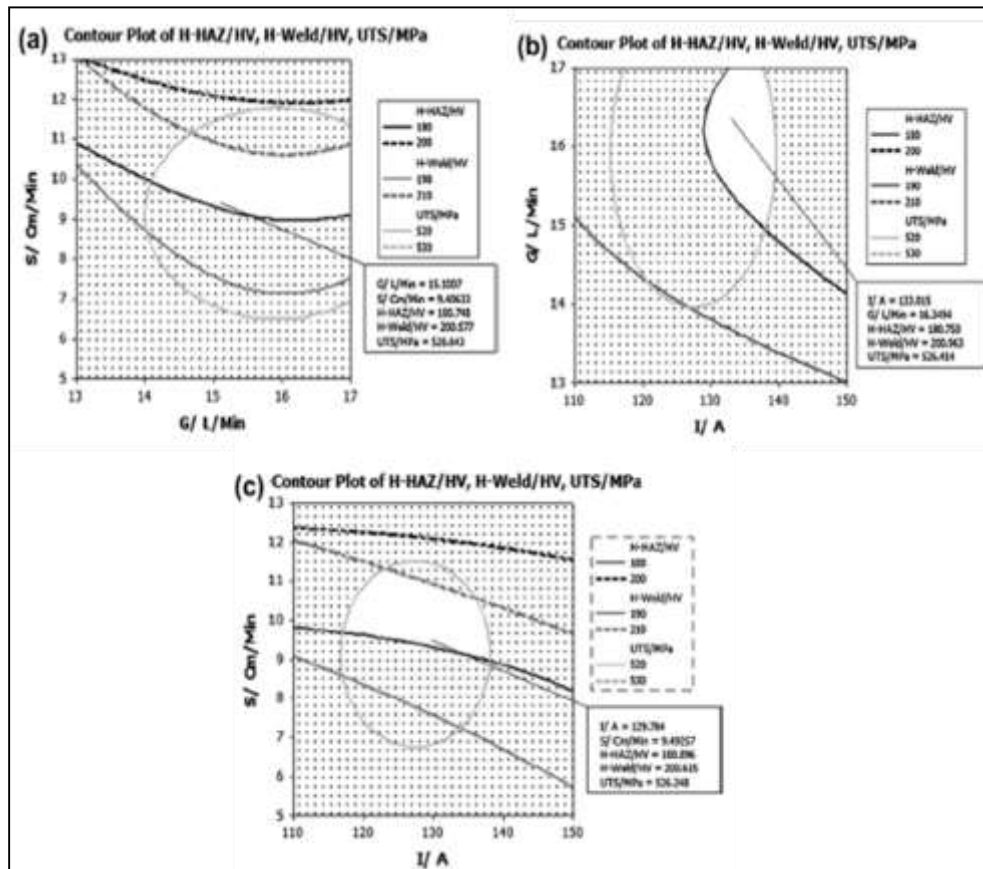


Figura 2. 7 Gráficos de contorno a) Flujo de gas de y velocidad de avance (16 l/min y 9.4 cm/min como valores óptimos), b) Corriente y flujo de gas (133 A y 16 l/min como valores óptimos), c) Corriente y velocidad de avance (129.7 A y 9.4 cm/min valores óptimos) (9)

2.6 Aceros grado herramienta

Los aceros para herramienta son aleaciones que proveen alta resistencia al desgaste y tenacidad combinada con alta resistencia mecánica. Básicamente son aceros de alto carbono, cuya composición proporciona la combinación deseada de tenacidad y resistencia al desgaste.

Para clasificar los aceros para herramienta se han aplicado varios criterios, unos basados en la composición química y otros en el método de temple y característica mecánica principal. En el sistema adoptado por la AISI-SAE se emplean letras para designar la calidad con base al método de temple, aplicación principal y características particulares.

Los aceros para herramienta al carbono templables en agua (grado W) son altamente usados debido en parte a su bajo costo. Estos aceros deben templarse en agua para conseguir una dureza alta, pero, a causa de su poca templabilidad, si se quiere que el temple penetre totalmente se utiliza en espesores no muy gruesos. En aquellos casos en que se desea una mayor tenacidad junto a una gran dureza y resistencia, suelen añadirse pequeñas cantidades de manganeso, silicio y molibdeno. Es frecuente añadir 0.20% de vanadio para formar carburos estables fuertes que retengan un tamaño de grano fino durante el tratamiento térmico. Se añade silicio y níquel para aumentar la tenacidad y reducir agrietamiento debido a su mayor templabilidad. El cromo es adicionado entre 0.5 a 5.0% para mejorar templabilidad y tenacidad (10).

Los aceros de herramienta resistentes al choque (S) se han desarrollado para que resistan impactos en frío y caliente. Para darles tenacidad se reduce el contenido de carbono (0.5%) y se añaden aleantes formadores de carburos para darles resistencia a la abrasión, templabilidad y trabajo en caliente.

Los aceros rápidos al molibdeno (M) son altamente usados, tienen un alto contenido de carbono para aumentar propiedades mecánicas.

Los aceros de herramienta para trabajar en caliente (H) destinados para trabajo a temperaturas altas por tiempos prolongados. Contienen aleantes como cromo y molibdeno para formar carburos. Usualmente se utilizan en la fabricación de moldes y operaciones de extrusión. La combinación de bajo carbono y medio contenido de aleantes proveen buena tenacidad y dureza en caliente.

En la Tabla 2.1 observamos la clasificación de los aceros grado herramienta de acuerdo a AISI-SAE estándar.

Tabla 2. 1. Clasificación de aceros grado herramienta de acuerdo s AISI-SAE estándar (10)

Clasificación de los aceros grado herramienta e identificación por AISI	
Grupo	Símbolo de identificación
Aceros templados en agua	W
Aceros resistentes al impacto	S
Aceros deformados templados en aceite	O
Aceros deformados templados en aire de media aleación	A
Aceros alto carbono y cromo deformados	D
Aceros para moldes	P
Aceros deformados con Cr, W y Mo	H
Aceros de alto grado de Tungsteno	T
Aceros de alto grado de Molibdeno	M

Los aceros de grado herramienta son aceros al carbono o aleados, que pueden ser endurecidos o templados. Son usualmente fundidos en hornos eléctricos. Son utilizados para la fabricación de ciertas herramientas o sistemas de sujeción para corte, maquinado y forjado de materiales a temperatura ambiente o

alta temperatura. Son utilizados en amplias aplicaciones que implican resistencia al desgaste, resistencia a la tensión, tenacidad u otras de alto desempeño como fabricación de resortes o imanes (11).

2.7 El efecto de los carburos en los aceros de grado herramienta

Los carburos juegan un papel dominante en el control de las propiedades mecánicas de los aceros de grado herramienta. Durante el calentamiento a altas temperaturas de aceros que contienen carburos, la austenita se formará y los carburos presentes en el acero original comenzarán a volverse más pequeños, ya que los carburos se disuelven en la austenita, algunas veces quedan retenidos en la matriz y los elementos aleantes también son disueltos. Algunos carburos presentes son M_3C , resultan de la combinación de manganeso, cromo, vanadio, tungsteno y molibdeno; M_7C_3 , contiene principalmente cromo; M_6C , M_2C , MC , constituidos principalmente de molibdeno, tungsteno y vanadio (12).

2.8 Aceros grado herramienta H13

Los aceros de grado herramienta H13 se caracterizan por su alto contenido de carbono y elementos de aleación como cromo y molibdeno principalmente, lo que le otorga sus principales características mecánicas y físicas, en la Tabla 2.2 se observa la composición química típica de este tipo de acero,

Tabla 2. 2. Composición química de acero grado herramienta H13 (11)

Elementos	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
%e.p.	0.32-0.45	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	1.10-1.75	0.8-1.20

Los aceros de grado herramienta H13 poseen alta resistencia al desgaste, esto debido a su alto contenido de vanadio (0.80 a 1.20), por esta razón este tipo

de acero tiene una mayor dispersión de carburos endurecedores de vanadio. Es capaz de mantener una alta dureza y resistencia a altas temperaturas. Es enfriado con aire, la aleación es tratada térmicamente para aumentar su resistencia arriba de 2070 MPa (300 ksi), de igual manera posee una buena ductilidad y resistencia al impacto, así como buena termofluencia. Sin embargo, presenta fragilidad por hidrógeno (11).

2.9 Propiedades mecánicas de aceros H13

Las propiedades mecánicas de los aceros grado herramienta, en este caso del acero H13, pueden variar en base a la temperatura de temple y tipo de tratamiento térmico que se le haya dado, los cuales típicamente se eligen de acuerdo con la aplicación en la que vayan a ser utilizados, en la Tabla 2.3 se observan las propiedades mecánicas del acero H13.

Tabla 2. 3. Propiedades mecánicas de acero H13 con diferentes temperaturas de temple (11)

Temperatura de temple		Resistencia a la tensión		Elongación (%)	Ensayo Charpy (energía de impacto)		Dureza HRC
°C	°F	MPa	Ksi		J	ft-lbf	
527	980	1969	284	13	16	12	52
555	1030	1835	266	13.1	24	18	50
575	1065	1730	251	13.5	27	20	48
593	1100	1580	229	14.4	28.5	21	46
605	1120	1495	217	15.4	30	22	44

2.10 Soldadura de los aceros de grado herramienta

En la reparación de moldes los procesos de soldadura más utilizados son TIG (Gas inerte por Tungsteno) y MIG (Gas inerte por metal), aunque la soldadura por TIG es preferentemente más usada por su alta velocidad de avance. En cuanto al proceso de MIG, este permite depositar grandes cantidades de material de forma rápida.

Antes de iniciar la reparación de un molde se recomienda realizar un precalentamiento para eliminar la estructura martensítica a la temperatura indicada por el proveedor, nunca debe soldarse un material frío y la temperatura debe mantenerse por debajo de la temperatura de temple. Para el caso de los aceros de grado de herramienta en la mayoría de los casos se requiere llevar a cabo un precalentamiento y postcalentamiento.

Para elegir el material de aporte, se debe considerar que tenga una composición química muy similar al material base al igual que su dureza.

Se debe preparar la superficie limpiando en forma adecuada para eliminar residuos, de igual manera al soldar una grieta, esta debe pulirse y dejarse la cavidad en forma de "U" y no de "V". La soldadura debe realizarse con el mínimo de amperaje y voltaje, así como velocidad de avance lenta.

En caso de que se produzca escoria, es necesario eliminarla cuando el material está todavía caliente, alrededor de 370°C dando pequeños golpes (13).

La reparación de moldes por soldadura en la industria es una técnica muy utilizada ya que ofrece una importante ventaja en costo en comparación a la compra de nuevos componentes o insertos de los moldes dañados. Los moldes frecuentemente necesitan ser reparados para corregir daños o implementar cambios de ingeniería o diseño. Es importante que la zona reparada presente las mismas características del resto del molde, de otra manera estas uniformidades se reflejarán en las piezas vaciadas.

Durante la soldadura es importante evitar la producción de grietas o generación de fragilidad que puede ser consecuencia de la formación de martensita, de igual manera, los parámetros de soldadura deben ser cuidados para evitar la generación de esfuerzos residuales y distorsión dimensional.

Puede decirse entonces, que cuando se emplea mayor entrada de calor o mayor voltaje se obtendrá una zona afectada por el calor (ZAC) más amplia, ya que se alcanzan temperaturas arriba de Ac_1 (600 a 700°C), lo que promueve también

el templado del material base, de acuerdo a lo obtenido por Suarez Alexci y colaboradores, que se ejemplifica en la Tabla 2.4 (14).

Tabla 2. 4. Parámetros de la fuente de calor calculados desde la isoterma A_{c1} (relación de parámetros de soldadura con nivel de penetración) (14)

Parámetros de soldadura				Penetración isotérmica (mm)	
Energía	Corriente (A)	Voltaje (v)	Velocidad (cm/min)	Penetración (mm)	Ancho (mm)
Baja	124.0	11.5	10.0	4.0	10.0
Alta	248.0	13.6	10.0	6.8	17.8

2.11 Reparación de moldes por soldadura

El proceso de soldadura TIG es frecuentemente usado para la recuperación de moldes porque permite la deposición de pequeñas cantidades de material sin salpicaduras, de tal manera que puede realizarse sobre geometrías complejas. La calidad de la soldadura es importante no solo para cumplir con las propiedades mecánicas, sino también para lograr que la zona afectada por el calor (ZAC) tenga el mismo comportamiento que el material base (MB), de igual manera la superficie debe tener la geometría correcta, sin ondulaciones, libre de poros, inclusiones o defectos. La superficie final debe ser evaluada, uno de los métodos principales es la inspección visual (15).

El material de aporte a utilizar por lo general se toma de la recomendación del proveedor fabricante del acero en base a su composición química y al proceso. Lo recomendable es utilizar un material de aporte con la composición química más similar al material base.

Los siguientes parámetros son propuestos por Suarez Alexci, Miyer Suarez Albert y Tafur Preciado Wilson (14) para la soldadura de aceros para la fabricación de moldes, VP50IM y AISI P20:

- Temperatura de precalentamiento: 225 +/- 25°C

- Gas de protección: Argón, 12 l/min
- Electrodo: W + 2% ThO₂, diámetro 2.4 mm, 60° de ángulo en la punta
- Longitud de arco: 4 mm
- Diámetro de alambre: 1.2 mm
- Diámetro de boquilla: 10 mm
- Ángulo de alimentación de alambre: 25° en relación a la superficie
- Ángulo de incidencia de la antorcha: 15° en relación a la superficie normal

2.12 Técnicas de reparación de moldes

Para elegir el método adecuado para soldar un molde debemos considerar el tipo de material y conocer su composición química, ya que de ello dependerá el material de aporte a usar y las temperaturas de precalentamiento y postcalentamiento a las que debe someterse.

- Para desgaste, el primer paso será limpiar la zona a soldar, ya sea con un cepillo metálico, aplicando algún solvente o desbastando con alguna lija, ya que debido al uso se encuentra contaminada, con la finalidad de evitar atrapamiento de impurezas durante la soldadura, o generación de escoria, lo cual puede reeditar en la aparición de poros, asegurando esta parte procedemos a soldar. Para superficies planas, en las que solo se ha presentado desgaste superficial la secuencia utilizada para aplicar la soldadura debe ser de los extremos al centro, lo cual está representado en la Figura 2.8.

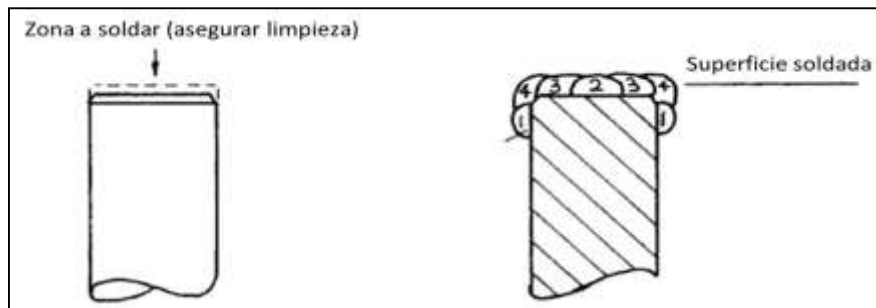


Figura 2. 8 Representación de método a soldar cuando se presenta desgaste en un molde (16)

- Para reparar grietas es necesario verificar la causa del origen, esto nos ayudará principalmente para conocer si la fractura puede volver a generarse, en el caso en que se deba a fallas por mal diseño. De igual manera antes de reparar la grieta se recomienda aplicar líquidos penetrantes para entender su extensión. Es importante entender su tamaño, ya que para repararlas se debe excavar hasta quitarla y al mismo tiempo crear acceso para aplicar la soldadura, si la preparación es muy pequeña, no tendremos acceso a soldar y si es muy grande tardaremos más tiempo en soldar y podríamos generar distorsión (16). La soldadura en este caso de realizarse asegurando la colocación desde adentro hacia fuera tapando cada espacio, esto se representa en la Figura 2.9.

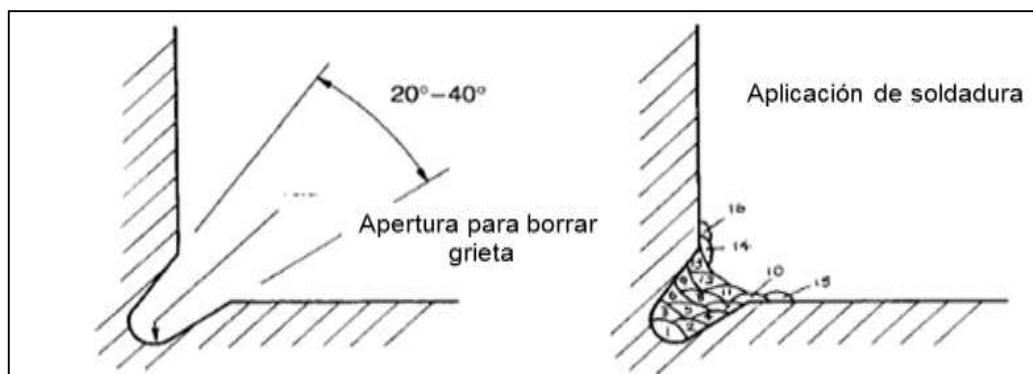


Figura 2. 9 Método para reparación de grietas en moldes (16)

- Para reparar moldes con fractura y evitar problemas de rechupes, distorsiones y exceso de soldadura debemos mantener las partes juntas y soldarlas en secuencias alternadas, como se representa en la Figura 2.10. La parte que se utilice para juntar las zonas fracturadas deberá ser calentada y mantener la misma temperatura que la pieza a soldar para que ambas presenten la misma expansión y contracción térmica (16).

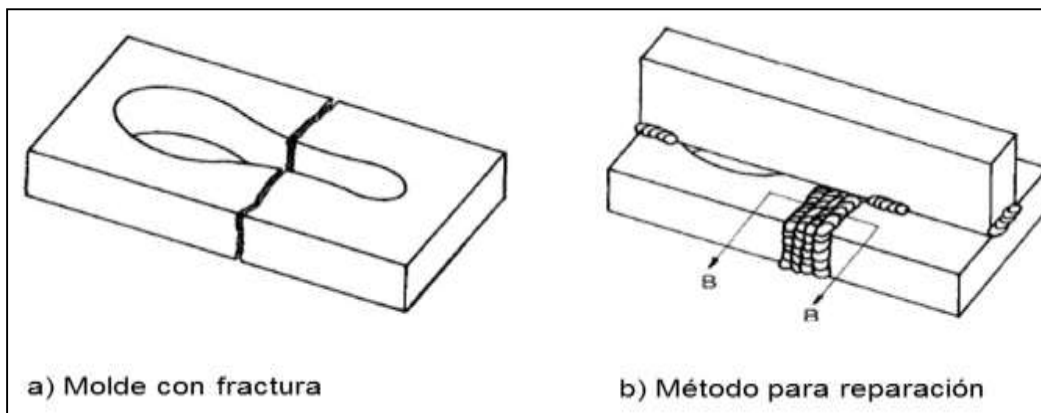


Figura 2. 10 Método para reparar moldes con fractura (16)

2.13 Soldadura de cordones múltiples

Primeramente, las superficies de la junta se cubren al crear un número apropiado de cordones. Esta capa inicial deberá realizarse con un electrodo MMA de pequeño diámetro (máxima 3.25 mm) o mediante soldadura TIG (corriente máxima 120 A). La segunda capa debe realizarse con el mismo diámetro de electrodo y la misma intensidad de corriente que en la primera capa, a fin de que la zona afectada por el calor no sea demasiado amplia. La idea aquí es que cualquier microestructura dura y frágil que se pueda formar en la zona afectada por el calor en el material base de la primera capa, será revenida por el calor de la segunda capa y la posibilidad de aparición de grietas se verá por tanto reducida. El resto del cuerpo de la junta puede ser soldado con una corriente más alta y con electrodos de mayor diámetro. Los cordones finales deberían realizarse bastante por encima

de la superficie del utillaje, tal como se aprecia en la Figura 2.11. Soldaduras de tamaño pequeño deberán de comprender un mínimo de dos cordones (17).

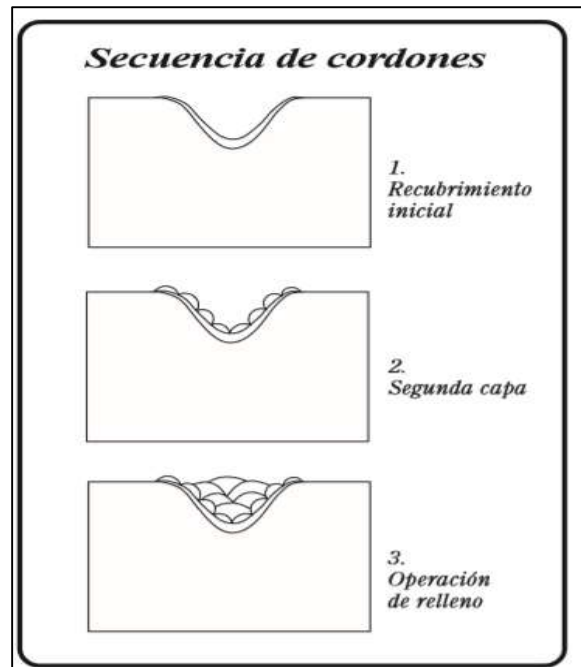


Figura 2. 11 Secuencia de aplicación de cordones de soldadura (17)

2.14 Material de aporte para aceros de grado herramienta

La composición química de un depósito de soldadura viene determinada por la composición del consumible (metal de aportación), la composición del acero base y la cantidad de material que se ha fundido durante la operación de soldadura. El electrodo o la varilla debería mezclarse fácilmente con el acero base fundido, resultando en un depósito con:

- Una composición uniforme, dureza y respuesta al tratamiento térmico.
- Libre de inclusiones no metálicas, porosidades o roturas.
- Propiedades adecuadas para la aplicación del utillaje en cuestión.

Dado que la soldadura en acero para herramientas cuenta con una alta dureza, ésta es particularmente susceptible a roturas que se pueden originar a partir de partículas de escoria o poros. Por tanto, el consumible a utilizar debería ser capaz de producir una soldadura de alta calidad. De modo similar, es también necesario que los consumibles se fabriquen con un control de análisis muy estrecho, a fin de que la dureza de la soldadura y la respuesta de ésta al tratamiento térmico sean similares entre pasada y pasada. El material de relleno de alta calidad es asimismo esencial si el molde debe ser pulido o fotograbado, después de aplicar la soldadura.

En general, el consumible utilizado para la soldadura de acero para herramientas debe ser similar en composición al material base. Al soldar en condición de recocido, por ejemplo, si un molde o matriz debe ser ajustado durante el proceso de producción, es de vital importancia que el material de relleno cuente con las mismas características de tratamiento térmico que el material base, si no fuera así, la zona soldada en el utillaje terminado contaría con una dureza distinta. Las grandes diferencias en composición son también asociadas a un incremento de riesgo de aparición de grietas, en conexión con la dureza.

Los metales de soldadura de los utillajes soldados requerirán distintas propiedades para cada distinta aplicación. Para los tres principales segmentos de aplicación de aceros para herramientas (trabajo en frío, trabajo en caliente y moldes de plástico), las propiedades más importantes del metal de soldadura son:

Trabajo en frío:

- Dureza
- Tenacidad
- Resistencia al desgaste

Trabajo en caliente:

- Dureza

- Resistencia al revenido
- Tenacidad
- Resistencia al desgaste
- Resistencia a la fatiga térmica

Moldes de plástico:

- Dureza
- Resistencia al desgaste
- Capacidad de fotograbado

A continuación, se describen algunas de las principales propiedades mecánicas con las que deben de contar los aceros de grado herramienta soldados que son trabajados en caliente.

- Dureza. Si el molde o matriz es soldado en condición de temple y revenido, es importante que la soldadura cuente con la misma dureza que el material base, una vez realizada la soldadura. En la Figura 2.12 se observa la variación en la dureza en la unión soldada, lo cual puede contrarrestarse con un postcalentamiento o pueden realizarse pequeñas soldaduras sin necesidad de revenir el utillaje con la finalidad de regular la entrada de calor.

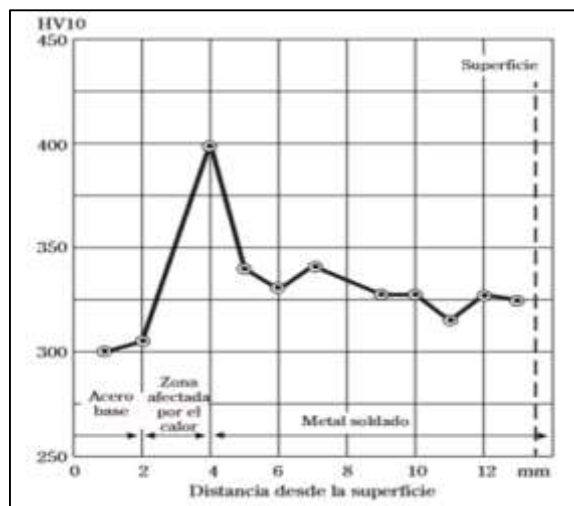


Figura 2. 12 Perfil de microdureza obtenidos para acero grado herramienta (17)

- Tenacidad. A pesar del hecho de que estamos tratando con lo que esencialmente sería una fusión, el metal soldado en el acero para utillajes puede ser sorprendentemente tenaz, como resultado de la relativamente fina microestructura derivada del alto nivel de solidificación. Aunque, en general, la tenacidad se verá mejorada con el consecuente tratamiento térmico. Por tanto, grandes reparaciones de soldadura en un utillaje templado deberán siempre someterse a un revenido una vez aplicada la soldadura, aunque la dureza del metal de soldadura y la del acero base sean compatibles en la condición de soldadura. En acero para aplicaciones de trabajo en frío, donde se requiere una alta dureza, es importante tener en cuenta utilizar un metal de relleno más blando en las capas iniciales y terminar con un electrodo más duro en la superficie de trabajo del utillaje. Este procedimiento creará una reparación más tenaz que si se hubiera utilizado el electrodo duro para todas las capas.
- Resistencia al desgaste. Al igual que ocurre con el acero para herramientas, la resistencia al desgaste de un metal soldado aumenta con su dureza y contenido en aleación.
- Resistencia a la fatiga térmica. La soldadura aplicada en moldes para trabajo en caliente sufre normalmente de fatiga térmica de forma más rápida que el acero base, esto es debido a su pobre resistencia al calor, resistencia al revenido, o tenacidad (ductilidad). Aunque, si se utiliza un consumible que aporte un metal de soldadura con una resistencia al calor y dureza en caliente superior, entonces la resistencia a la fatiga térmica será igual o incluso mejor que la del acero base (17).

2.14.1 Eureka 31 (material de aporte utilizado en la soldadura de aceros grado herramienta H13)

Este tipo de material de aporte es utilizado en la soldadura de aceros grado herramienta H-11, H-12 y H-13 utilizados para el trabajo en caliente y la fabricación de moldes.

Algunas de sus principales características son la alta resistencia a la fatiga térmica cuando el material es sometido a ciclos alternados de calentamiento y enfriamiento, además de que esta aleación puede mantener la dureza a altas temperaturas de trabajo, ofrece excelente resistencia a la abrasión.

Es utilizado ampliamente en el campo de la reparación de moldes para vaciado e inyección que han sufrido daño o erosión.

Puede encontrarse disponible como varilla, electrodo, alambre recubierto y alambre recubierto con fundente. Su dureza oscila entre 49 a 54 HRC (18).

A continuación, se muestra en la tabla su composición química:

Tabla 2. 5 Composición química (%e.p.) de material de aporte Eureka 31, (18)

C	Mn	Si	Cr	Mo	V
0.4	0.8	0.8	5.0	1.5	1.0

2.15 Tratamiento térmico a aceros de grado herramienta

Las propiedades de los aceros dependen fuertemente del tratamiento térmico al que sean sometidos, el cual dependerá de su composición química y aplicaciones. Básicamente consiste en 3 etapas: (1) calentamiento del acero hasta alcanzar la región de austenita, (2) enfriamiento desde la temperatura de austenización para transformar la austenita a martensita y (3) revenido para eliminar esfuerzos residuales y formar carburos que se encuentren dispersos en la matriz de martensita.

Después de su procesamiento o trabajado en caliente, el tratamiento térmico puede incluir normalizado, envejecido, maquinado o liberación de esfuerzos por endurecimiento. El conformado final de los aceros debe de realizarse antes de la última etapa de tratamiento térmico, ya que si se realiza después su manejo o maquinado será muy difícil debido a la alta dureza.

Dos aspectos son de vital importancia para los aceros de grado herramienta; la primera es la homogenización para la reducción de segregación formada durante la solidificación, y la segunda es el refinamiento de grano, que mejora considerablemente la resistencia mecánica. El envejecido para homogenizar la microestructura se basa en el fenómeno de difusión. Este tratamiento térmico consiste en mantener el acero a cierta temperatura por un periodo de tiempo para posteriormente enfriar en forma controlada, un engrosamiento de grano puede resultar de este tratamiento.

El tratamiento térmico para los aceros de grado herramienta es realizado para alcanzar los siguientes objetivos (19):

- Obtener la microestructura y las propiedades deseadas para poder deformarlos en frío o maquinarlos.
- Para eliminar esfuerzos residuales acumulados y austenita retenida.
- Para homogeneizar la microestructura con carburos globulares y volverlos esferoidales.
- Para disolver por medio de normalizado los carburos intergranulares los cuales reducen las propiedades mecánicas de los aceros.

2.16 Carburos en aceros de grado herramienta

La microestructura de aceros grado herramienta sometidos a envejecido consiste en ferrita y carburos. La naturaleza de estos carburos depende de la composición química del acero. Algunos tipos de carburos y sus características se enlistan a continuación:

- M_3C , carburo ortorrómbico. M podría ser hierro, manganeso o cromo o W, Mo o Vanadio. Está presente en aceros con bajo contenido de aleación utilizados para trabajo en frío y en aceros de alto contenido de aleantes que se usan para trabajo en caliente.

- M_7C_3 , carburo de tipo hexagonal frecuentemente presente en aceros con alto contenido de cromo. Se caracterizan por su alta resistencia a la abrasión. Este tipo de carburos es encontrado en aceros revenidos a altas velocidades.
- $M_{23}C_6$, del tipo de carburos con arreglo FCC, pueden observarse en aceros con alto contenido de cromo. El cromo puede ser reemplazado por hierro.
- M_6C , carburos con arreglo FCC con carburos ricos en Mo y W, pueden contener Cr, V y Co. Este tipo de aceros es altamente resistente a la abrasión.

En los aceros hipoeutectoides utilizados para el trabajo en frío se recomienda contar con una microestructura rica en perlita, mientras que para aceros hipereutectoides se recomienda tener cementita.

Todos los aceros cuentan con carburos globulares como resultado de un envejecido, sin embargo, una estructura fina globular mejora las propiedades mecánicas, esto se logra reduciendo la segregación

Durante el envejecido la formación de carburos proeutectoides en los límites de grano debe ser evitado, ya que estos carburos no se disuelven durante la austenización (19).

2.17 Tratamiento térmico a aceros de grado herramienta después de soldadura

Dependiendo de la condición inicial del utillaje, los siguientes tratamientos térmicos pueden ser realizados después de aplicar la soldadura.

- Revenido. Los utillajes templados reparados mediante soldadura deberían, si es posible ser revenidos después de soldar. El revenido mejora la tenacidad del metal de soldadura, y es particularmente importante cuando la zona soldada está sujeta a grandes tensiones durante el trabajo, (por ejemplo, en utillajes para aplicaciones de trabajo en frío y trabajo en caliente). La temperatura de revenido debería seleccionarse para que la dureza del metal de soldadura y el acero base

sean compatibles. Una excepción de esta regla aparece cuando el metal de soldadura exhibe de forma apreciable, una mejorada resistencia al revenido sobre el material base.

- Recocido blando, luego temple + revenido como de costumbre. Los utillajes soldados para acoplar unos cambios de diseño concretos, o por causa de errores de mecanizado durante la fabricación del utillaje, y que se encuentran en condición de recocido blando, necesitarán ser tratados térmicamente después de aplicar la soldadura. Puesto que el metal de soldadura se habrá templado durante el enfriamiento de la soldadura siguiente, es muy deseable recocer la soldadura antes de templar y revenir el utillaje. El ciclo de recocido blando utilizado es el recomendado para el acero base. La zona soldada puede ser entonces mecanizada y el utillaje puede acabarse y tratarse térmicamente en la forma habitual. Aunque, el utillaje pueda acabarse simplemente rectificando la soldadura, se recomienda realizar el recocido blando a fin de mitigar el riesgo de grietas durante el tratamiento térmico.

- Liberación de tensiones (estabilizado). En algunas ocasiones, el estabilizado se lleva a cabo después de realizar la soldadura a fin de eliminar las tensiones residuales. Para reparaciones grandes de soldadura, o en las que ha habido grandes tensiones, es una precaución importante. Si la soldadura tiene que ser revenida o debe realizarse un recocido blando, entonces no se requiere normalmente aplicar un estabilizado. De todas formas, el acero pretemplado, deberá someterse a un estabilizado después de realizar la soldadura puesto que no se aplica normalmente ningún tratamiento térmico. La temperatura de estabilizado debe seleccionarse de modo que ni el acero base ni el área soldada queden demasiado blandos durante el proceso (17).

2.18 Defectos de soldadura

Los defectos que pueden ser apreciados en piezas sometidas a soldadura son clasificados en 2 categorías, aquellos que se forman durante el proceso y los que aparecen cuando la pieza está trabajando o se encuentra en servicio. Los defectos durante la fabricación incluyen (20):

- Grietas
- Porosidad
- Fusión incompleta
- Distorsiones
- Imperfecciones como inclusiones sólidas
- Los defectos que aparecen cuando la parte está en servicio son:
- Fracturas por fragilidad
- Fracturas por fatiga
- Corrosión
- Grietas por recalentamiento

2.18.1 Porosidad en soldadura

La porosidad se debe al atrapamiento de gases como hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, etc., durante la solidificación del metal (ver Figura 2.13), las causas de la porosidad incluyen (20):

- Pérdida del gas de protección. La contaminación con oxígeno o nitrógeno son el resultado de una pérdida en el gas de protección, un poco de aire (alrededor de 1%) entrando en el gas de protección puede causar poros.
- Fugas en las mangueras del gas de protección o un incorrecto flujo puede ocasionar la aparición de este defecto.
- Contaminación del electrodo o fundentes. El hidrógeno puede quedar atrapado en el charco de soldadura al usar fundente o electrodos con humedad, es decir que no fueron perfectamente secados antes de ser usados.
- Longitud del arco demasiado grande.
- Contaminación del material base y falta de limpieza en él.

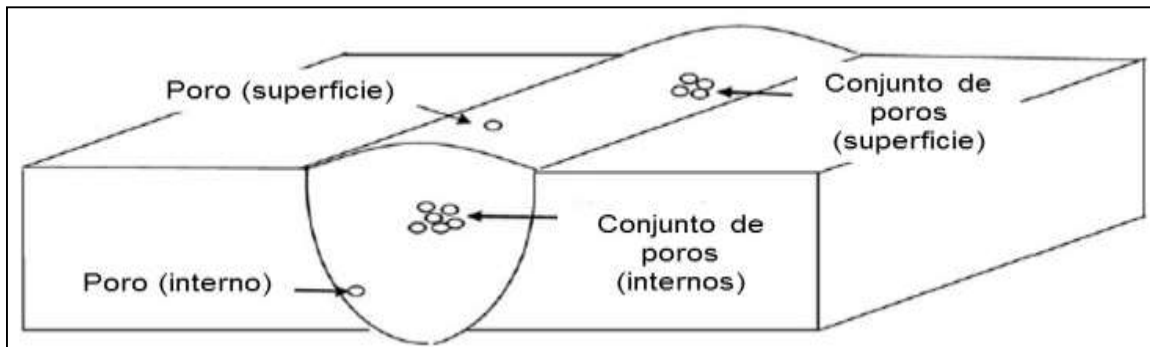


Figura 2. 13. Porosidad en pieza soldada (20)

Al igual que en los procesos de vaciado, el gas puede ser introducido a las uniones soldadas cuando se tiene el charco líquido, este posteriormente será liberado dejando rastro en forma de poros.

Moléculas de hidrógeno pueden incorporarse a la estructura en forma de burbujas que tenderán a alojarse en los límites de grano, si la aleación es muy dúctil, esto resultará en una deformación plástica y si es lo suficientemente fuerte resistirá

la formación de burbujas en primera instancia, pero esto causará estrés redituando en fracturas (20).

2.19 Ensayos no destructivos para verificar sanidad de soldadura

Para asegurar la calidad de la soldadura, los ensayos no destructivos son aplicados después de este proceso tales como rayos X, ultrasonido y espectrometría. Las pruebas son realizadas con el objetivo de detectar poros, inclusiones de escoria, grietas y otros defectos.

Consisten en una verificación, prueba o evaluación desarrollada en algún material sin ocasionarle daño en alguna forma con el objetivo de determinar la presencia de defectos o discontinuidades que puedan afectar la vida útil o desempeño de este durante el servicio.

Las pruebas más recurrentes son rayos X y ultrasonido, sin embargo es difícil distinguir entre una inclusión de escoria y un poro, por lo que se ha trabajado en desarrollar nuevas técnicas más especializadas, una de ellas es la espectrometría con software propuesta por Yiming Huang, Di Wu, Zhifen Zhang, Huabin Chen y Shanben Chen (21) para el análisis en soldadura GTAW, que permite en tiempo real coleccionar y procesar información espectral durante la soldadura para determinar la cantidad de hidrógeno adicionado que será la causa de la formación de poros.

En la Figura 2.14, se muestra la sección de una soldadura analizada por rayos X para la detección de defectos y un comparativo contra la técnica de espectrometría propuesta en el estudio de modo de descomposición empírico en proceso de soldadura TIG pulsada para la detección y diagnóstico de defectos (21):

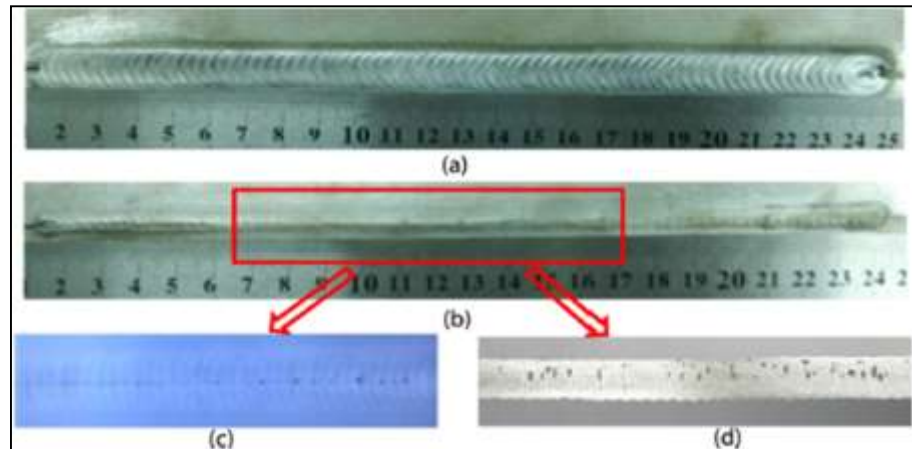


Figura 2. 14. Apariencia de soldadura: a) Vista superior, b) Vista lateral, c) Resultado de radiografía, d) Sección longitudinal (21)

2.19.1 Ultrasonido

El ensayo de ultrasonido (ver Figura 2.15), es utilizado para la detección de discontinuidades internas en el material, durante la inspección, no se causa ningún daño, por lo que está considerado dentro de los análisis no destructivos. Ondas bajas de ultrasonido son utilizadas con un rango de frecuencia entre 0.1 a 15 MHz y algunas veces alcanzan hasta 50 MHz. El equipo se compone de un transductor, patrones de calibración y dispositivo para desplegar análisis. Es una técnica altamente usada en diferentes campos como industria automotriz, aeroespacial, transportación y petrolera (22).

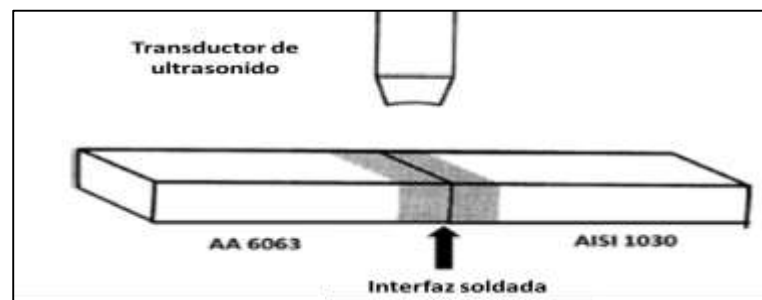


Figura 2. 15. Esquema del arreglo de la prueba de ultrasonido sobre una unión soldada (22)

El transductor convierte la porción de onda reflejada en una señal eléctrica que es alimentada a un dispositivo de análisis que despliega el resultado, este proceso es utilizado para la medición en un intervalo de tiempo entre la transmisión y la recepción de la señal. La conversión de los pulsos eléctricos en vibraciones mecánicas y viceversa son la base del ensayo de ultrasonido. El elemento activo es la parte más importante del transductor, ya que convierte la señal eléctrica en acústica, está hecho básicamente de un material polarizado como el cuarzo o titanio de bario, que producen una señal eléctrica cuando el material cambia de dimensiones como resultado de una fuerza mecánica impuesta.

La Figura 2.16 muestra señales grabadas por ultrasonido en un estudio realizado por Tabatabaeipour M. y colaboradores (23):

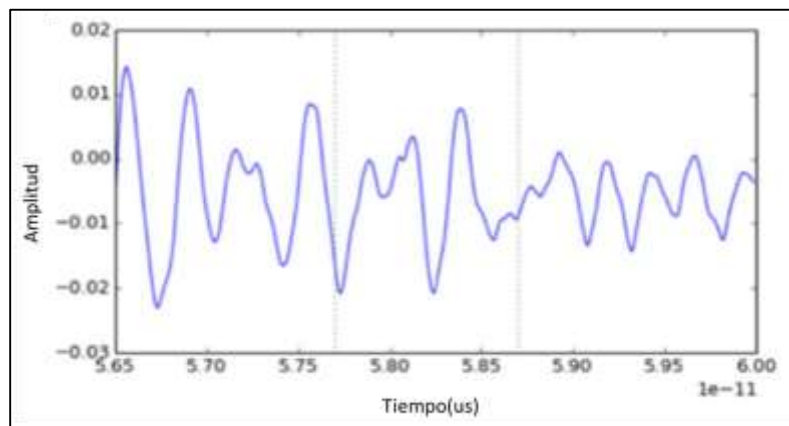


Figura 2. 16. Señales grabadas por ultrasonido para verificar discontinuidades (23)

2.19.2 Líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes es uno de los ensayos más frecuentemente utilizados para la detección de discontinuidades y materiales sólidos. Este ensayo consiste en la aplicación de un líquido sobre la superficie del cuerpo a examinar, que penetra por capilaridad en las imperfecciones de la soldadura. Una vez limpiado el exceso, nos revelará el que ha quedado retenido en la imperfección (poros, fisuras, etc.).

Existen dos tipos de líquidos penetrantes, los fluorescentes y los no fluorescentes, aunque los más utilizados son los no fluorescentes. La característica distintiva principal entre los dos tipos es:

1. Los líquidos penetrantes fluorescentes contienen un colorante que destella bajo la luz negra o ultravioleta.
2. Los líquidos penetrantes no fluorescentes contienen un colorante de alto contraste bajo luz blanca.

Ambos líquidos se aplican igual y constan de las siguientes fases (24):

- Limpieza inicial de la pieza
- Aplicación del líquido penetrante
- Medida del tiempo de penetración
- Eliminación del líquido sobrante
- Aplicación del líquido revelador
- Examen de la pieza
- Limpieza final de la pieza

2.19.3 Procedimiento de inspección con líquidos penetrantes

- Limpieza Inicial. Necesario para remover de la superficie a examinar los contaminantes como se aprecia en la Figura 2.17. Después de la limpieza es necesario que todos los limpiadores se evaporen y que la superficie esté completamente seca antes de aplicar el penetrante.

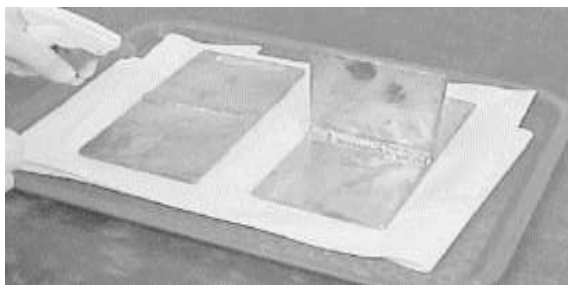


Tabla 2. 17 limpieza de superficie a examinar (24)

- Aplicación de penetrante. El penetrante puede ser aplicado de diversas formas desde cepillado, inmersión, espray o simplemente colocando directamente sobre la zona en forma manual como se observa en la Figura 2.18. Lo más importante durante esta etapa es asegurar que la tinta penetre y no se escurra. Es importante tener en cuenta las especificaciones para conocer los tiempos mínimos de permanencia, sin embargo, la mayoría oscilan entre 10 a 15 minutos.

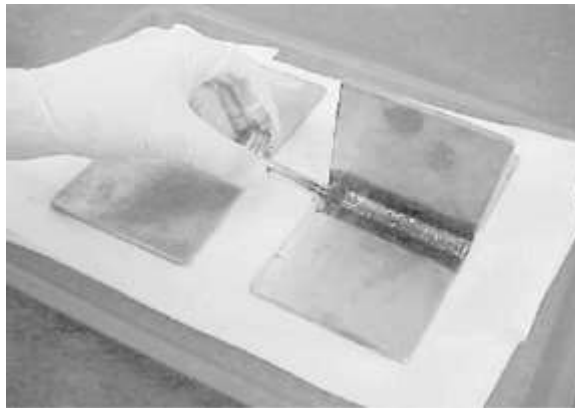


Figura 2.18 Aplicación de penetrante sobre superficie a examinar (24)

- Remoción de penetrante. El método de remoción depende del tipo de penetrante aplicado, los más comunes son con agua y solventes. Para remover líquidos fluorescentes usualmente se proyecta sobre la superficie luz para conocer las zonas exactas donde se encuentra el líquido aplicado.
- Aplicación de revelador. La mayoría de los reveladores son secos o suspensiones. La zona por examinar deberá ser empapada de esta sustancia y la aplicación deberá ser uniforme.
- Tiempo de revelación. Se debe de asegurar en esta etapa que el revelador seque sobre la superficie, la mayoría de los códigos recomiendan un tiempo entre 7 a 30 minutos, en algunos casos hasta 60 minutos para permitir que la tinta, normalmente de color rojo sobresalga del revelador como se observa en la Figura 2.19. Después de este tiempo se deberá realizar inspección visual para encontrar las discontinuidades resaltadas.



Figura 2.19 Discontinuidad revelada (24)

- Limpieza posterior. Consiste en eliminar los residuos de penetrante y revelador sobre la superficie examinada para regresar nuevamente la parte a servicio o a una siguiente evaluación.

2.19.4 Ventajas y desventajas de inspección con líquidos penetrantes

El método de inspección visual por líquidos penetrantes para la detección de discontinuidades es altamente utilizado en la industria como una herramienta sencilla y de rápida respuesta, sin embargo, cuenta con ventajas y desventajas como cualquier método de inspección, las cuales se detallan a continuación (24):

Ventajas de la técnica de líquidos penetrantes:

- Costo
- Sensibilidad de detección de discontinuidades
- Versatilidad
- Efectiva en la inspección de grandes cantidades de producción
- Ensayo no destructivo
- Fácil de transportar y desarrollar

Desventajas de ensayo:

- Solo discontinuidades abiertas hacia la superficie pueden ser detectadas
- Efecto en variación de la temperatura
- Resultados pueden variar de acuerdo con la superficie y configuración de la muestra a analizar
- Se debe preparar o limpiar la superficie antes de realizar el ensayo.

2.20 Modelos de regresión lineal

La relación que existe entre variables dependientes e independientes se caracteriza por un modelo matemático llamado modelo de regresión que se ajusta a un conjunto de datos muestra. El modelo de regresión brinda una base para dirigir la experimentación o investigación hacia cierto rumbo, se utiliza con frecuencia para analizar datos obtenidos de la observación de un fenómeno no controlado.

Es común llamar a las variables independientes regresores (variables de regresión) y se utiliza el término lineal porque la variable depende de una función lineal y el modelo describe un plano en el espacio bidimensional, por lo que cada cambio en los regresores afectará la respuesta.

A menudo el ajuste de los modelos de regresión se realiza por medio de un paquete de software de estadística como Matlab para obtener rápidamente resultados como la ecuación de regresión, la influencia de los parámetros y la confiabilidad del modelo (25).

2.20.1 Distribución de Poisson

Es frecuentemente usada para modelar datos continuos, puede representarse de la siguiente manera,

$$f(y) = \frac{\mu^y e^{-\mu}}{y!}, y= 0, 1, 2, ..$$

Donde " μ " es el número en promedio de ocurrencias y "y" es el número de ocurrencia (26).

Este tipo de distribución se emplea para describir el número de veces que un evento ocurre en un espacio finito de observación.

Una variable sigue una distribución de Poisson si se cumplen las siguientes condiciones:

- Los datos son conteos de eventos (enteros no negativos, sin límite superior).
- Todos los eventos son independientes.
- La tasa promedio no cambia durante el período de interés (27).

Esta distribución es una de las más importantes distribuciones de variable discreta. Sus principales aplicaciones hacen referencia a la modelización de situaciones en las que nos interesa determinar el número de hechos de cierto tipo que se pueden producir en un intervalo de tiempo o de espacio, bajo presupuestos de aleatoriedad y ciertas circunstancias restrictivas.

A partir de las hipótesis del proceso, se obtiene una ecuación diferencial de definición del mismo que puede integrarse con facilidad para obtener la función de cuantía de la variable "número de hechos que ocurren en un intervalo unitario de tiempo o espacio, cuya representación gráfica se asemeja a una campana de Gauss (28).

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto se divide en dos etapas para garantizar la obtención de resultados que permitan conocer las principales variables en soldadura GTAW que promueven la formación de poros al recuperar moldes de acero H13.

La primera etapa se enfoca en realizar un análisis del proceso actual de soldadura tomando en consideración todos los parámetros como el flujo de gas de protección, velocidad de avance, amperaje, limpieza de los insertos, etc. Se soldarán 16 insertos que se llevarán a maquinado para contar con una superficie lisa para realizar inspección visual por líquidos penetrantes para verificar la cantidad de poros presentes en las uniones para posteriormente enlazar cada inserto con el resultado de porosidad y los parámetros usados en la soldadura. Para comprobar los datos obtenidos por líquidos penetrantes 2 insertos serán llevados a análisis por ultrasonido. Los resultados serán analizados por medio de la distribución de Poisson para verificar la probabilidad de que aparezcan poros y determinar el rango óptimo en el que se deberá de trabajar para disminuir su presencia.

La segunda etapa se basa en soldar nuevamente insertos con parámetros optimizados para verificar sanidad de las uniones por inspección visual con líquidos penetrantes y ultrasonido para comprobar si este rango de las variables elegidas como críticas tiene efecto en la disminución de porosidad.

La metodología por seguir para reducir problema de porosidad en aceros H13 por proceso GTAW, se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 3.1,

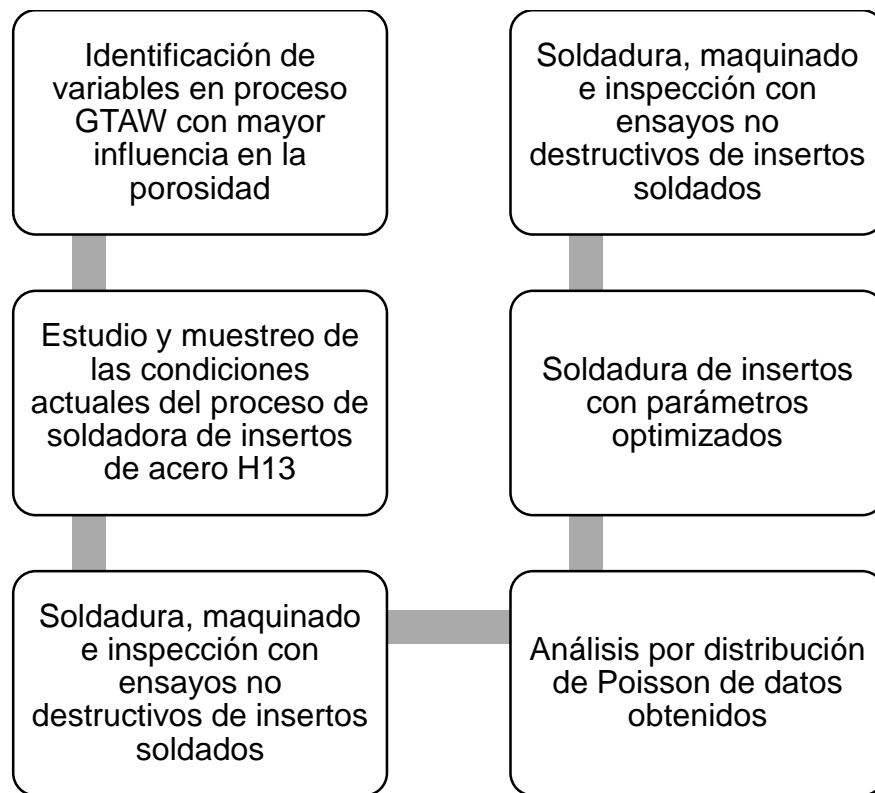


Figura 3. 1 Esquema de metodología para resolver el problema

CAPÍTULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El material de análisis es un acero H13 grado herramienta, cuya composición química (%e.p.) obtenida por espectro por chispa se muestra en la Tabla 4.1:

Tabla 4. 1 Composición química (%e.p.) de acero grado herramienta H13

%C	%Mn	%Cr	%Si	%Mo	%V
0.5	0.43	5.0	1.1	1.1	0.8

El material de aporte utilizado para realizar la unión es Eureka 31, en la Tabla 4.2 observamos su composición química,

Tabla 4. 2 Composición química (%e.p.) de material de aporte, Eureka 31

Material aporte	% C	%Mn	%Cr	%Si	%Mo	%V
Eureka 31	0.35	0.80	5.0	0.80	1.5	1.0

La microestructura del material base utilizado en la experimentación se presenta en la Figura 4.1, tomada mediante microscopía óptica.



Figura 4. 1 Imagen de microestructura de acero H13 vista a 100x con presencia de carburos (a) y martensita (b)

La Tabla 4.3 muestra las propiedades mecánicas típicas del acero:

Tabla 4. 3 Propiedades mecánicas de acero H13 (11)

Resistencia a la tensión		Elongación	Energía de impacto		Dureza
MPa	Ksi	(%)	J	ft-lbf	HRC
1969	284	13	16	12	52

Dentro de las cuales podemos destacar la resistencia al desgaste y la dureza, que le permiten al acero soportar la abrasión del aluminio durante el trabajo en caliente.

Actualmente, las condiciones operativas para la soldadura de moldes de acero H13 utilizadas en la compañía se muestran en la Tabla 4.4:

Tabla 4. 4 Parámetros actuales usados en la soldadura de moldes H13 (1)

Parámetros	Valor o condición
Gas de protección	Argón (100%)
Flujo de gas de protección	15 a 30 lt/min
Amperaje	130 a 200 A dependiendo de la zona
Voltaje	17.5 a 18.5 V
Tipo de corriente	CDEN
Longitud de arco	Menor a 6.0 mm
Preparación de muestra	Con alcohol y/o herramienta abrasiva
Tipo de material de aporte	Eureka 31
Tipo de electrodo	Tungsteno (sin cambio controlado de vida útil, inspección visual antes de iniciar soldadura)

Al considerar las variables de preparación de muestra, tipo de material de aporte, tipo de electrodo, longitud de arco, tipo de gas y tipo de corriente como constantes, el trabajo de experimentación se enfocará en un modelo que contemple variaciones en flujo de gas, amperaje y velocidad de avance.

La preparación que se le dio a cada inserto antes de ser soldado consistió en la limpieza con una herramienta abrasiva de acero dedicada a esta operación, cada área sobre la que se aplicó soldadura además de ser limpiada fue sometida a remoción de una pequeña cantidad de material para permitir la deposición del material de aporte.

Los insertos de acero H13 sobre los que se realizaron las pruebas y análisis, presentan dimensiones en promedio de 130 mm x 100 mm, Figura 4.2, inciso a. En la Figura 4.2, inciso b, observamos un corte transversal de un inserto soldado, donde se aprecian los cordones de soldadura (ZF) y el material base (MB).

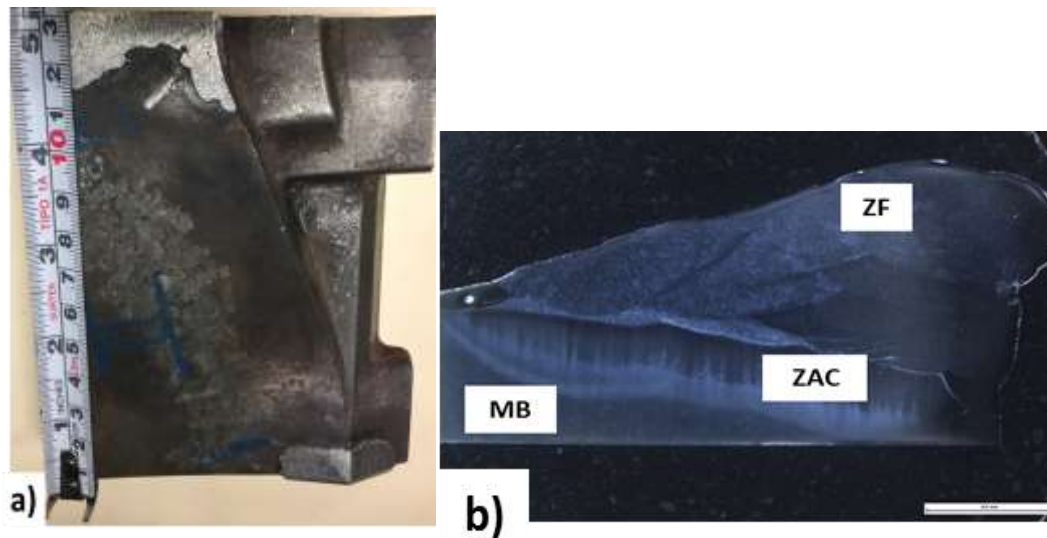


Figura 4. 2 a) Inserto soldado, b) Corte transversal de inserto observado por microscopio óptico

Se realizó el conteo de poros dispersos en la superficie mediante el ensayo no destructivo por líquidos penetrantes utilizando un kit de Spotcheck SKD-S2, SKL-SP2, SKC-S de la marca Magnaflux con tiempo de revelado de 10 minutos como recomendación del proveedor, así como también una inspección volumétrica mediante ultrasonido con equipo marca Omniscan mx2 con sonda de 5 MHz, con 60° de inclinación sobre plano medido. Estas técnicas fueron seleccionadas, ya que los insertos soldados formaban parte de moldes productivos usados en la línea de moldeo, por lo tanto, no se podían realizar ensayos destructivos para verificar la sanidad de la unión. Las inspecciones mencionadas fueron realizadas después de que los insertos se maquinaron con la finalidad de contar con una superficie regular, en la Figura 4.3 podemos observar la aplicación de líquidos penetrantes ejecutada en los insertos para la detección de discontinuidades, en este caso poros y en la Figura 4.4 la medición con ultrasonido.

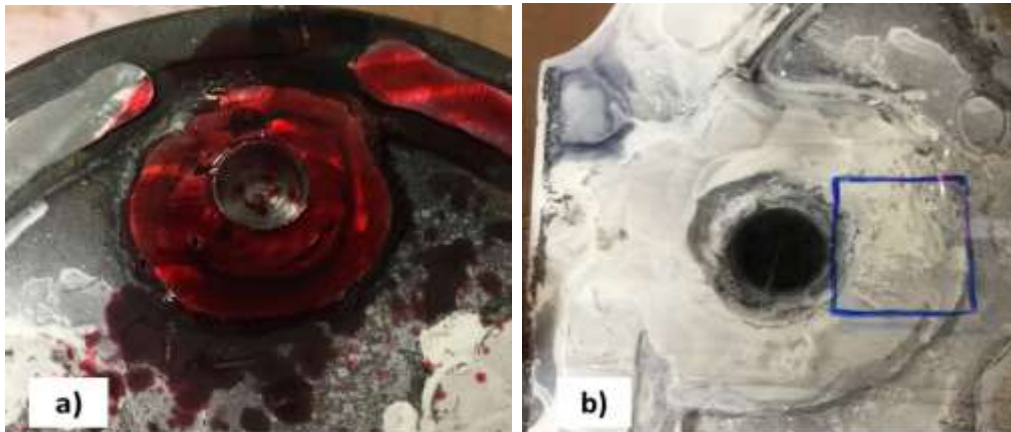


Figura 4. 3 a) Aplicación de líquido penetrante sobre zona soldada, b) Aplicación de líquido revelador para observar discontinuidades presentes en soldadura



Figura 4. 4 Inspección de inserto soldado con ultrasonido

En la Tabla 4.5 tenemos los datos obtenidos directamente de las condiciones reales del proceso de soldadura utilizado en la reparación de insertos, los cuales, junto con la cantidad de poros observados por medio de inspección visual con líquidos penetrantes, se analizaron por medio de la distribución de Poisson de variable discreta debido al tipo de resultado obtenido, de este punto partimos para realizar la optimización de parámetros que se llevarán a probar para verificar la cantidad de poros obtenidos y con ello determinar su confiabilidad.

Tabla 4. 5 Parámetros de soldadura usados en la experimentación de 16 muestras

#PIEZA	FLUJO DE GAS (lt/min)	AMPERAJE (A)	TEMPERATURA AL SOLDAR (°C)	VOLTAJE (V)	VELOCIDAD AVANCE (mm/seg)
1	25	160	155	14.2	0.80
2	25	170	182	14.2	0.77
3	25	160	175	12.75	1.48
4	25	160	192	13.95	1.25
5	25	235	185	18.75	0.62
6	25	235	195	18.5	0.76
7	25	153	185	13.5	1.06
8	25	153	195	13.9	1.40
9	20	130	180	15.6	0.67
10	20	130	112	14.85	0.36
12	25	180	180	16.5	0.63
13	25	180	210	17	0.69
14	25	180	190	17.5	0.82
15	25	180	189	17.5	0.71
16	20	210	210	18.25	1.86

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Caracterización de porosidad

En la Figura 5.1 se observa el análisis realizado por microscopía electrónica de barrido de un poro localizado justo entre 2 cordones de soldadura en la zona de fusión y en la Figura 5.2 y en la Tabla 5.1 el resultado de una espectroscopía de dispersión de electrones para caracterizar uno de los poros presentes en una de las uniones soldadas para verificar su origen por medio de información de su composición química, en los cuales podemos detectar la presencia de carbono, oxígeno y nitrógeno principalmente.

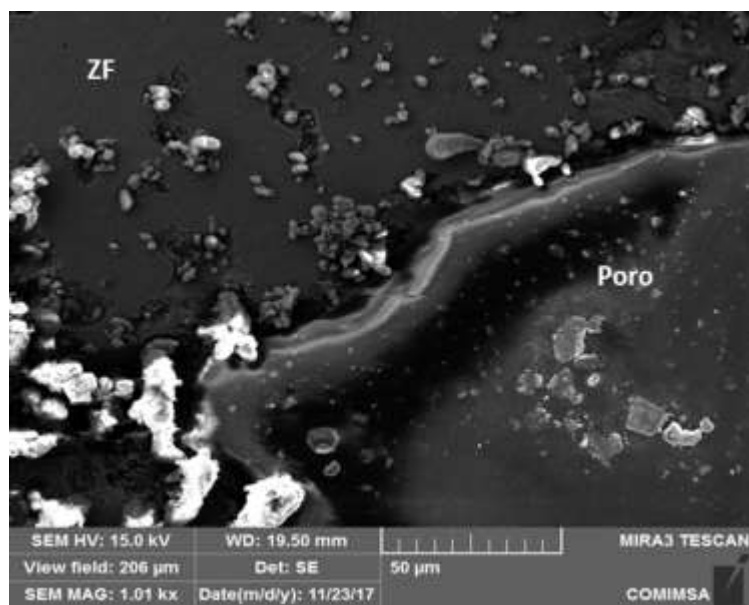


Figura 5. 1 Imagen de electrones secundarios que muestra la presencia de porosidad

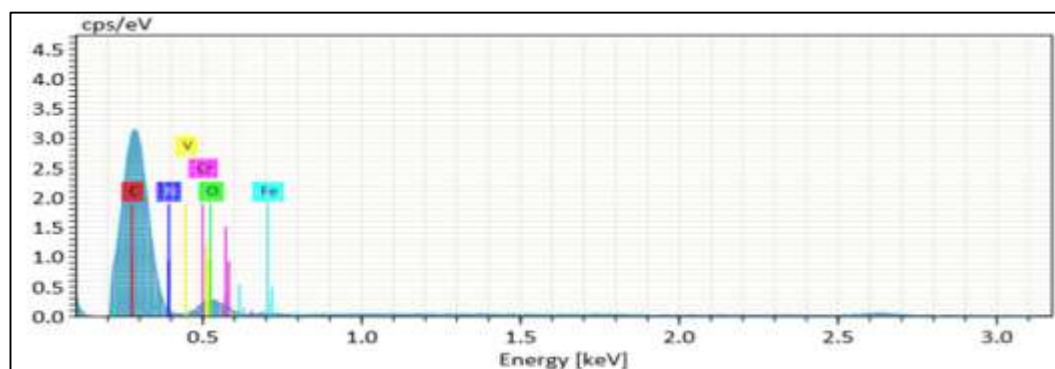


Figura 5. 2 Análisis de composición química de poro presente en unión soldada obtenida por espectroscopía de dispersión de electrones (EDS)

Tabla 5. 1 Composición química de poro analizada por espectroscopía de dispersión de electrones (EDS)

Elementos	C	N	O	Fe
% e.p.	52.4	32.3	14.8	0.5

Se realizó también el análisis del poro por medio del microscopio óptico después del ataque de la muestra con Nital al 2.0% por 3 minutos y Beraha's por 5 minutos, en la Figura 5.3 observamos la imagen,

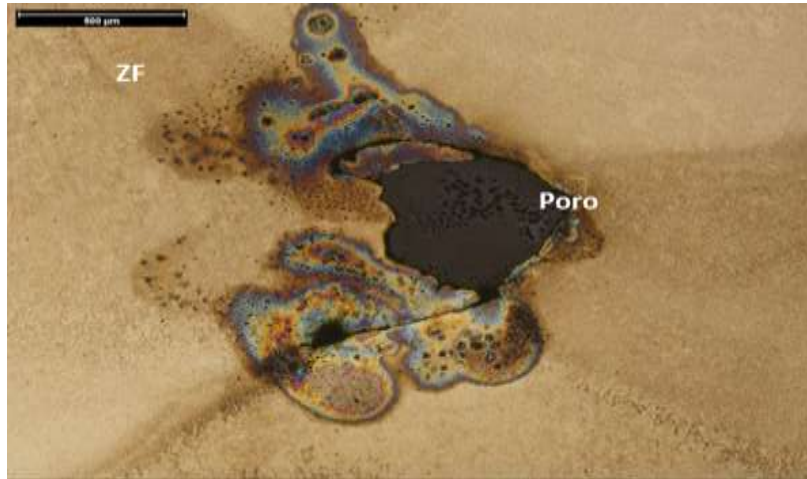


Figura 5. 3 Imagen tomada por microscopio óptico a 100x que muestra la presencia de porosidad en el inserto soldado

En la Figura 5.4 observamos una imagen tomada por microscopio óptico de un inserto soldado con parámetros de la Tabla 4.5, sobre el cual se realizó la medición de la longitud de la zona de fusión o cordones de soldadura que oscilan en promedio en 5.5 mm, así como de la zona afectada por el calor que tiene una longitud de 2.2 mm.

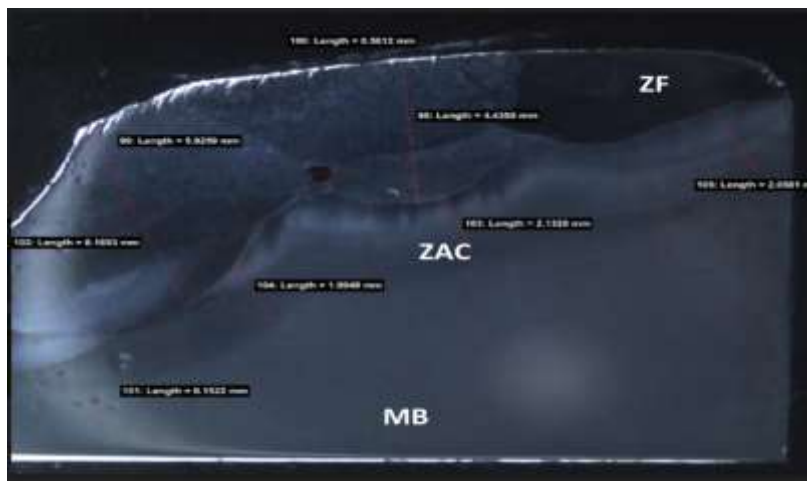


Figura 5. 4 Imagen tomada por microscopio óptico a 100x de soldadura vista transversal para observar longitudes de ZF y ZAC

5.2 Comparativo de microdureza en inserto soldado y material base

Se realizó inspección de microdureza a un inserto en metal base y zona soldada de un parámetro seleccionado correspondiente a la muestra 10 para verificar su condición después de aplicar la soldadura, esto para determinar si se tenía alguna afectación en las propiedades mecánicas, los resultados se muestran en la Tabla 5.2, en donde se observa que existe una mayor disminución de dureza en la zona soldada, esto es atribuido principalmente a la diferencia en la microestructura, para el material base tenemos martensita revenida con carburos dispersos en el acero, (Figura 4.1), mientras que para la zona de fusión, (Figura 5.5), la microestructura obtenida es ferrita Widmanstätten.

Tabla 5. 2 Comparativo de microdurezas en MB y ZF tomadas con una carga de 500 g

Muestra	Zona	Dureza (HV)	Zona	Dureza (HV)
10	Metal base (MB)	434	Zona de fusión (ZF)	419
		466		415
		508		416
		542		402
		520		402

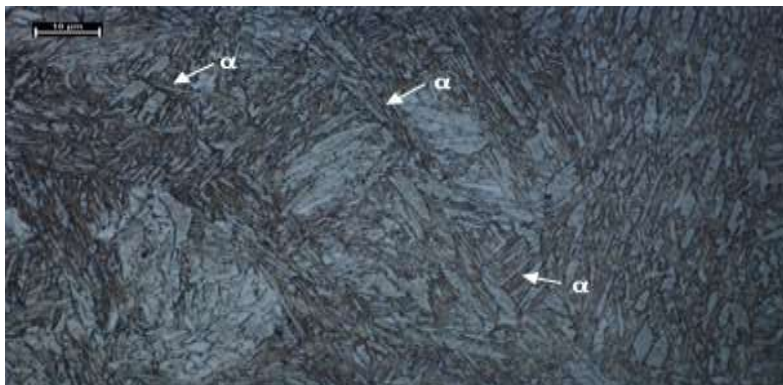


Figura 5. 5 Micrografía de acero H13 en zona de fusión a 100x, se observa la presencia de ferrita Widmanstätten (α)

5.3 Resultados de ensayo no destructivo de líquidos penetrantes

Para la medición de la cantidad de poros encontrados por el maquinado en la zona soldada de cada inserto después de ser reparados, se aplicaron líquidos penetrantes para realizar el conteo de los mismos, considerando 2 zonas de 12 mm² de área, tal como se aprecia en la Figura 5.6.

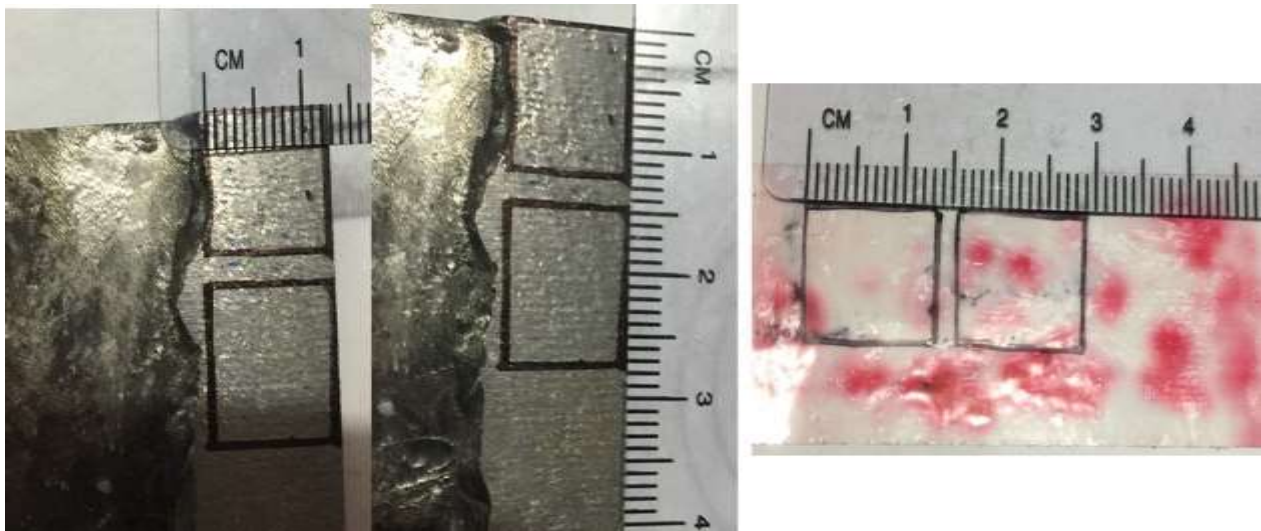


Figura 5. 6 Método de medición de poros utilizando líquidos penetrantes sobre los insertos de acero H13 soldados

En la Tabla 5.3, pueden observarse los resultados obtenidos mediante el monitoreo de parámetros de soldadura de GTAW ligados con la cantidad de poros observados mediante inspección visual y líquidos penetrantes en la superficie de la zona soldada, encontrando que el número de poros varía desde 0 a 15 y que la porosidad se encuentra dispersa a lo largo de la zona soldada, pero ésta aparece solo a nivel superficial. Por lo tanto, la inspección con líquidos penetrantes es confiable y ofrece una respuesta rápida en el análisis de discontinuidades superficiales, en este caso de poros.

Tabla 5. 3 Conteo de poros por medio de inspección visual y líquidos penetrantes realizados en la superficie de insertos de acero H13 después de ser soldados

#PIEZA	ENTRADA DE CALOR (Valor inferior J/mm)	POROS (Conteo visual y con líquidos penetrantes)
1	2840.00	0
2	3138.20	0
3	1377.00	3
4	1785.60	1
5	7094.06	5
6	5706.09	8
7	1947.47	0
8	1519.07	0
9	3042.00	0
10	5362.50	1
12	4695.43	3
13	4458.86	4
14	3840.00	5
15	4440.00	8
16	2063.65	15

5.4 Resultados de ensayos no destructivos de ultrasonido y caracterización microestructural

Para verificar la cantidad de poros contabilizada por medio de la aplicación de líquidos penetrantes, se tomó una muestra representativa, correspondiente a los parámetros de la muestras número 1 y 2 de la Tabla 5.3 de los insertos soldados para ser analizados por ultrasonido, y de esta manera verificar la sanidad total de la zona soldada, en la Tabla 5.4 observamos el número de poros detectados por esta inspección, para el caso de la pieza 1, se detectó 1 poro a una profundidad de 0.9 mm de la superficie, en la pieza 2, no se detectó ninguna discontinuidad, a la par de los resultados obtenidos con líquidos penetrantes. La Figura 5.7 muestra la detección de la discontinuidad con profundidad de 0.9 mm como se observa en la pantalla de ultrasonido.

En la Figura 5.8 puede observarse la microestructura del metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y zona de fusión (ZF) de inserto recuperado mediante GTAW observado por microscopia electrónica de barrido, donde encontramos una diferencia marcada en el tamaño de grano y la microestructura, ya que el material base se caracteriza por la presencia de martensita revenida y la zona de fusión por ferrita Widmanstätten, donde observamos las agujas típicas de este tipo de microestructura.

Tabla 5. 4 Resultados de inspección por ultrasonido en insertos soldados comparado contra el número de poros obtenidos por líquidos penetrantes

#Pieza	Número de poros (Ultrasonido)	Número de poros (líquidos penetrantes)
1	1	0
2	0	0

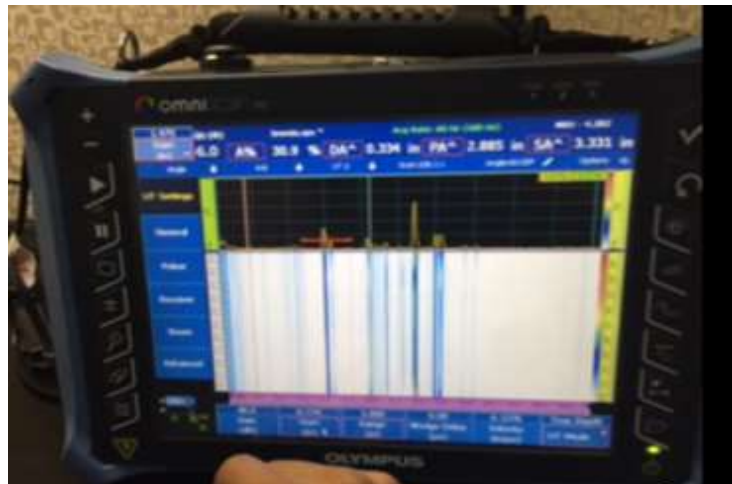


Figura 5. 7 Discontinuidad observada en inserto soldado en pantalla de ultrasonido

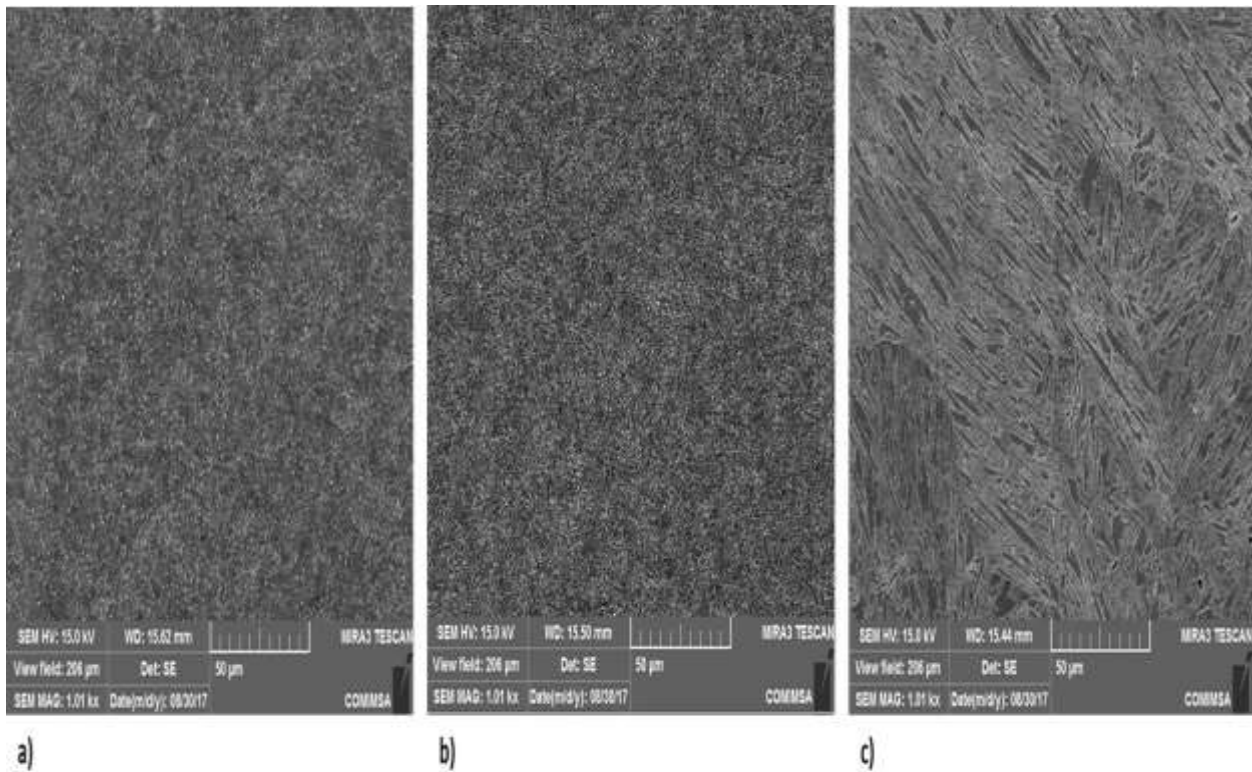


Figura 5. 8 a) Imagen de electrones secundarios de material base (MB), b) zona afectada por el calor (ZAC) y c) zona de fusión (ZF), analizadas por MEB

5.5 Modelo de regresión y algoritmo genético de optimización de parámetros

Los datos obtenidos de la toma de valores de las variables del proceso de soldadura directamente de piso, es decir, considerando los datos reales en planta junto con los resultados de poros son llevados a análisis por medio de la distribución de Poisson de variable discreta obteniendo un modelo de regresión que nos indica que las variables de mayor significancia son el amperaje, velocidad de avance y flujo de gas con un grado de confianza del 75%, la descripción del modelo analizada con el software Matlab se muestra a continuación,

- Modelo de regresión lineal: $\log(y) \sim 1 + x_1 + x_2 + x_3$
- 15 observaciones y 11 grados de libertad
- Dispersión equivalente a 1

- Chi²-estadística contra constante del modelo: 40.8, p-value = 7.15e-09

La estimación de coeficientes se observa en la Tabla 5.5:

Tabla 5. 5 Estimación de coeficientes por distribución de Poisson

Variables	Estimación	SE	Tstat	PValue
(Intercept)	-1.2938	2.6963	-0.47983	0.63135
X1	-0.10009	0.09286	-1.0778	0.2811
X2	0.023814	0.004304	5.533	3.15E-08
X3	0.49807	0.41656	1.1957	0.23181

Después de la identificación de las variables con mayor impacto en la generación de poros, se realiza la optimización por medio del software Matlab, obteniendo los siguientes resultados,

X1 (flujo de gas) =25

X2 (amperaje) =130

X3 (velocidad de avance) =0.36

Pudiendo detectar con esos valores ente 0 a 2 Poros.

Se soldaron 6 insertos utilizando los datos obtenidos del proceso de optimización, los resultados se describen en los apartados 5.6 a 5.7.

5.6 Resultados de ensayos no destructivos de líquidos penetrantes de insertos soldados con optimización de parámetros

En la Tabla 5.6, pueden observarse los parámetros utilizados en la soldadura de 6 insertos, en base al resultado del diseño de experimentos, el cual señala como parámetros críticos en la formación de poros al flujo de gas, amperaje y velocidad de avance.

Tabla 5. 6 Parámetros utilizados en la soldadura de insertos en base a la optimización realizada por distribución de Poisson

#PIEZA	FLUJO DE GAS (lt/min)	AMPERAJE (A)	VOLTAJE (V)	VELOCIDAD AVANCE (mm/seg)
1	25	127	11.2	0.85
2	25	127	11.4	1.0
3	25	127	16.4	0.70
4	25	126	16.6	0.83
5	25	127	15.9	0.66
6	25	127	15.2	0.83

Después de la soldadura, al igual que los insertos tomados para análisis de las condiciones reales en planta (Tabla 4.5), los insertos con parámetros optimizados se llevaron a maquinado e inspección por líquidos penetrantes para obtener la cantidad de poros presentes en la superficie, los resultados del análisis se muestran en la Tabla 5.7, puede observarse que la cantidad máxima de poros obtenida es 1, mostrando una disminución considerable respecto a las condiciones de soldadura normales.

Tabla 5. 7 Resultado de porosidad en insertos soldados con parámetros óptimos

#PIEZA	ENTRADA DE CALOR (J/mm)	POROS (Conteo visual y con líquidos penetrantes)
1	1659.47	0
2	1447.80	0
3	2903.30	0
4	2535.27	0
5	3059.55	1
6	2339.88	1

5.7 Resultados de ensayos no destructivos de ultrasonido y caracterización microestructural de insertos soldados con optimización de parámetros

Se verificaron 2 muestras con ultrasonido correspondientes a los números 1 y 2 de la Tabla 5.6 para verificar la cantidad de poros contabilizada por medio de la aplicación de líquidos penetrantes, en la Tabla 5.8 colocamos el número de poros detectados por esta inspección, para ambas piezas no se detectaron discontinuidades, con lo cual se puede decir que los resultados obtenidos con líquidos penetrantes empatan con los del ultrasonido.

Tabla 5. 8 Resultados de inspección por ultrasonido en insertos soldados con parámetros óptimos comparado contra el número de poros obtenidos por líquidos penetrantes

#Pieza	Número de poros (Ultrasonido)	Número de poros (líquidos penetrantes)
1	0	0
2	0	0

La Figura 5.9 puede observarse la microestructura del inserto 2 correspondiente a los parámetros de soldadura óptimos mostrados en la Tabla 5.6 de la zona de fusión (ZF) observado por microscopio óptico y en la Figura 5.10 el mismo inserto analizado también por microscopía electrónica de barrido, puede decirse que la microestructura que se presenta es martensita, ya que la entrada de calor al soldar este inserto (Tabla 5.7) es baja, lo cual promueve que el enfriamiento sea rápido, originando este tipo de microestructura, esto se confirma también con los datos de microdureza obtenidos en la zona de fusión, mostrados en la Tabla 5.9.

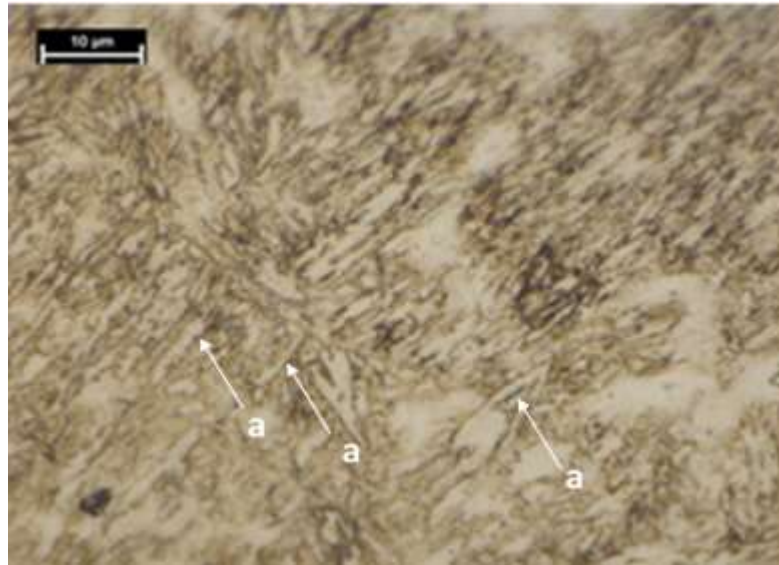


Figura 5. 9 Imagen tomada por microscopio óptico a 100x de zona de fusión de inserto soldado con parámetros óptimos donde se observa martensita (a)

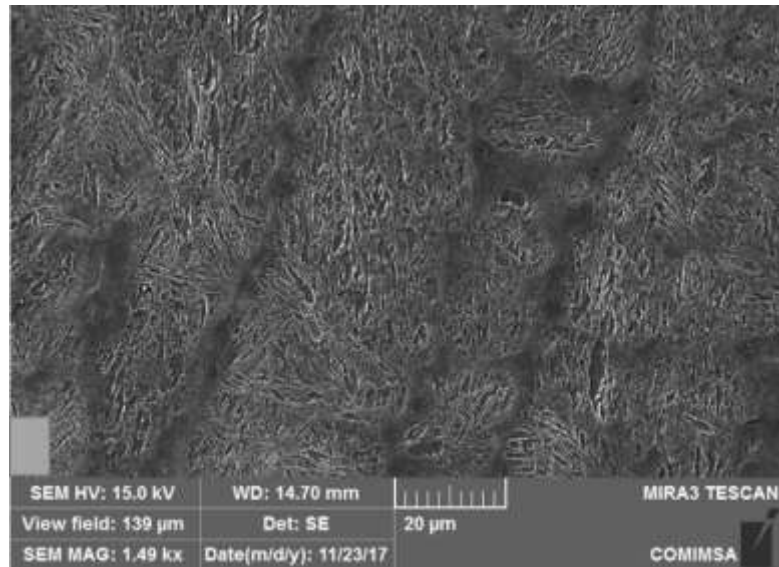


Figura 5. 10 Imagen tomada por MEB a 100x de zona de fusión de inserto soldado con parámetros óptimos donde se observa martensita

Tabla 5. 9 Comparativo de microdureza entre material base y zona de fusión en inserto soldado con parámetros óptimos

Muestra	Zona	Dureza (HV)	Zona	Dureza (HV)
		411		670
2	Metal base (MB)	382	Zona de fusión (ZF)	670
		384		670
		380		665
		380		680

CONCLUSIONES

El presente trabajo se encuentra enfocado en el proceso de soldadura por arco eléctrico, GTAW para atender la problemática de la aparición de poros después de soldar insertos de acero H13 usados como partes constituyentes de moldes para el vaciado de piezas de aluminio, con el objetivo de proponer un rango de trabajo óptimo para soldar y reducir el porcentaje de poros.

El resumen de las conclusiones de la investigación se muestra a continuación:

1. El método de limpieza de los insertos antes del inicio de la soldadura y el flujo de gas de protección pueden considerarse como constantes, es decir, no tener afectación en la aparición de poros, siempre y cuando se estandarice la operación y se utilicen herramientas abrasivas dedicadas solo a esa actividad y para el caso del flujo se trabaje a 25 lt/min.

2. Las variables de mayor contribución en la formación de poros son velocidad de avance y amperaje en base a los resultados obtenidos de la inspección visual son la velocidad de avance es directamente proporcional al amperaje, es decir si el amperaje aumenta o disminuye la velocidad de avance hará lo mismo.

3. La porosidad en las zonas soldadas (recubrimientos o reparaciones) al trabajar con amperajes arriba de 130 A se aumenta.

4. La dureza de las uniones soldadas de acero H13 por GTAW en uno de los casos se ve afectada al presentar una disminución de 100 HV respecto al material base, esto puede explicarse, ya que la zona de fusión presenta una microestructura de ferrita Widmanstätten, ya que después de soldar, el inserto se deja a temperatura ambiente y la soldadura colocada solidifica en esas condiciones, adicional a que la entrada de calor al soldar es alta (arriba de 5000 J/mm) lo que promueve un enfriamiento lento, otro inserto soldado con parámetros óptimos muestra una microestructura con martensita, que se obtiene debido a un enfriamiento rápido, ya

que la entrada de calor al soldar es baja (1400 J/mm) y el material base presenta una microestructura de martensita revenida.

5. Para mejorar las propiedades mecánicas, en este caso de dureza se propone la realización de un tratamiento térmico posterior o la solidificación de la soldadura en un medio diferente al aire.

6. El conteo de poros por medio de inspección por líquidos penetrantes, a pesar de ser una técnica capaz de detectar solo discontinuidades superficiales es confiable, ya que los resultados no presentan variación significativa respecto a ultrasonido.

7. La porosidad obtenida en insertos soldados con parámetros optimizados oscila entre 0 a 1, con lo que se comprueba que el modelo de regresión usado y los parámetros de optimización son confiables.

BIBLIOGRAFÍA

1. Nematik, Cortesía.
2. Johnson, Mike Ashby & Kara. Materials and design. The art and science of material selection in production design. Burlington, Estados Unidos : Elsevier, 2010. 978-1-85617-487-8.
3. Mathers, Gene. The Welding of aluminum and its alloys. s.l. : CRC Press LLC, 2002. 1855735679.
4. Smith Ricky, R. Keith Mobley. Rules of thumb for maintenance and reliability engineers. s.l. : Elsevier, 2008. 978-0-7506-7862-9.
5. O'Brien, R.L. Manual de soldadura Tomo I . s.l. : American Welding Society , 1996. ISBN 968-880-767-2.
6. David LeRoy Olson, Thomas A. Siewert, Stephen Liu, Glen R. Edwards. Handbook Volumen 6, soldadura, brazing y soldering. s.l. : ASM International, Febrero 2007. ISBN-10: 0-87170-382-3.
7. María, Rojas Gutiérrez Ana. Problemas frecuentes en soldadura GTAW - TIG. Metal Actual. [En línea] file:///E:/ARTICULOS%20PROYECTO/Soldadura_TIG.pdf.
8. Visualisation of alternating shielding gas flow in GTAW. Heriot-Watt University, Edinburgh : Elsevier, 2015. 91 (2016) 424-431.
9. Optimization of gas tungsten arc welding process by response surface methodology. N. Kiaee, M. Aghaie-Khafri. Tehran, Iran : Elsevier , 2013. 54 (2014) 25-31|.
10. George Roberts, George Krauss, Richard Kennedy. Tool steels (fifth edition). Estados Unidos de América : ASM International , 1998. ISBN 0-87170-599-0.
11. Chandlev, Harry. Heat treater's guide. Practices & procedures for irons and steels. Segunda edición. s.l. : ASM International, 1995. ISBN 0-87170-520-6.
12. Leed, Richard M. Welding of tool steels . Dearborn, Michigan : Society of manufacturing engineers, 2003. ISBN 0-87263-643-7.
13. E., Bryson William. Tratamiento térmico, selección y aplicación de aceros grado herramienta. Alemania : Hanser Publications, Segunda edición, 2009. 978-3-446-41941-4.
14. Arc Welding procedures on steels for molds and dies. Suarez Alexci, Miyer Suarez Albert y Tafur Preciado Wilson. Colombia : Elsevier, 2014. 100 (2015) 584-591.

15. Soldadura de reparación para moldes de inyección de polímeros de aceros AISI P20 y VP50IM. Wilson Tafur Preciado, Carlos Enrique Niño Bohorquez. Florianópolis, SC, Brasil : Elsevier, 2006. 179 (2006) 244–250.
16. Thompson, Steve. Handbook del molde y soldadura para reparación de moldes. Inglaterra : Abington Publishing, 1999. ISBN 1-884207-82-0..
17. UDDEHOLM. Soldadura de acero para matrices y utillajes. [En línea] https://www.acerosuddeholm.com/spanish/files/soldadura_spa_950108.pdf.
18. alloys, Eureka Welding. Filler Metal Selector Guide for Specialty Tool & Die and Maintenance Welding Products. 2000 East Avis Drive • Madison Heights, MI 48071 : s.n.
19. George, Totten E. Tratamientos térmicos a aceros. Metalurgia y tecnologías. Portland State University, Portland, Oregon, U.S.A : Taylor & Francis, 2007. ISBN-13: 978-0-8493-8455-4.
20. Matthews, Clifford. A quick guide to welding and weld inspection. s.l. : Woodhead Publishing Limited, 2009. ISBN 978-0-7918-5950-641-2.
21. Modo de descomposición empírico en proceso de soldadura TIG pulsada para la detección y diagnóstico de defectos usando GA-SVM. Yiming Huang, Di Wu, Zhifen Zhang, Huabin Chen y Shanben Chen. Shanghai, China : Elsevier, 2016. 179 (2006) 244–250.
22. Ultrasonic evaluation of friction stud welded AA 6063 /AISI 1030 steel joints. Rajesh Jesudoss N., Nagaraj P., Jennifa Sujana J. India : Elsevier, 2014. 62 (2014) 118-123.
23. Non-destructive ultrasonic examination of root defects in friction stir welded butt-joints. Tabatabaeipour M., Hettler J., Delrue S., Van Den Abeele K. Bélgica : Elsevier, 2016. 80 (2016) 23-34.
24. Charles, Hellier. Handbook de Evaluación no destructiva. Estados Unidos de América : Mc Graw-Hill, 2003. ISBN 0-07-028121-1.
25. C., Montgomery Douglas. Diseño y análisis de experimentos. Arizona : Limusa Wiley, 2004. ISBN 968-18-6156-6.
26. J., Dobson Annette. Una introducción a modelos lineales generalizados. Florida, USA : Chapman & Hall, 2002. ISBN 1-58488-165-8.
27. 18, Soporte de Minitab. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/distributions/poisson-distribution/>. [En línea] 2017.

28. <https://www.uv.es/ceaces/base/modelos%20de%20probabilidad/poisson.htm>. Distribución de Poisson. [En línea]
29. Hellier, Charles. Handbook de ensayos no destructivos. Estados Unidos : Mc Graw Hill. 0-07-028121-1.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Retrabajo en herramientas debido a problemas de porosidad asociados a soldadura durante 2016 (1)	7
Figura 2. 1 Esquema de soldadura GTAW (2)	9
Figura 2. 2 Rango de corriente típica para diferentes espesores (3).....	11
Figura 2. 3 Dimensión de punta de electrodo recomendada (3).....	12
Figura 2. 4 Esquema de principales componentes de soldadura GTAW (2).....	13
Figura 2. 5 Características de tipos de corriente para soldadura GTAW (5)	16
Figura 2. 6 Macrografías de soldaduras mostrando el efecto de la configuración de los gases de protección. La mezcla de gases Ar-He y 8 Hz provee un estándar útil de mezcla 50/ 50 (8).....	18
Figura 2. 7 Gráficos de contorno a) Flujo de gas de y velocidad de avance (16 l/min y 9.4 cm/min como valores óptimos), b) Corriente y flujo de gas (133 A y 16 l/min como valores óptimos), c) Corriente y velocidad de avance (129.7 A y 9.4 cm/min valores óptimos) (9).....	20
Figura 2. 8 Representación de método a soldar cuando se presenta desgaste en un molde (16)	28
Figura 2. 9 Método para reparación de grietas en moldes (16).....	28
Figura 2. 10 Método para reparar moldes con fractura (16).....	29
Figura 2. 11 Secuencia de aplicación de cordones de soldadura (17)	30
Figura 2. 12 Perfil de microdureza obtenidos para acero grado herramienta (17) 32	
Figura 2. 13. Porosidad en pieza soldada (20).....	39
Figura 2. 14. Apariencia de soldadura: a) Vista superior, b) Vista lateral, c) Resultado de radiografía, d) Sección longitudinal (21).....	41
Figura 2. 15. Esquema del arreglo de la prueba de ultrasonido sobre una unión soldada (22)	41

Figura 2. 16. Señales grabadas por ultrasonido para verificar discontinuidades (23)	42
Figura 3. 1 Esquema de metodología para resolver el problema	49
Figura 4. 1 Imagen de microestructura de acero H13 vista a 100x con presencia de carburos (a) y martensita (b)	51
Figura 4. 2 a) Inserto soldado, b) Corte transversal de inserto observado por microscopio óptico	53
Figura 4. 3 a) Aplicación de líquido penetrante sobre zona soldada, b) Aplicación de líquido revelador para observar discontinuidades presentes en soldadura	54
Figura 4. 4 Inspección de inserto soldado con ultrasonido	54
Figura 5. 1 Imagen de electrones secundarios que muestra la presencia de porosidad	57
Figura 5. 2 Análisis de composición química de poro presente en unión soldada obtenida por espectroscopía de dispersión de electrones (EDS)	57
Figura 5. 3 Imagen tomada por microscopio óptico a 100x que muestra la presencia de porosidad en el inserto soldado	58
Figura 5. 4 Imagen tomada por microscopio óptico a 100x de soldadura vista transversal para observar longitudes de ZF y ZAC	58
Figura 5. 5 Micrografía de acero H13 en zona de fusión a 100x, se observa la presencia de ferrita Widmanstätten (α)	59
Figura 5. 6 Método de medición de poros utilizando líquidos penetrantes sobre los insertos de acero H13 soldados	60
Figura 5. 7 Discontinuidad observada en inserto soldado en pantalla de ultrasonido	62
Figura 5. 8 a) Imagen de electrones secundarios de material base (MB), b) zona afectada por el calor (ZAC) y c) zona de fusión (ZF), analizadas por MEB	63

- Figura 5. 9 Imagen tomada por microscopio óptico a 100x de zona de fusión de inserto soldado con parámetros óptimos donde se observa martensita (a) 67
- Figura 5. 10 Imagen tomada por MEB a 100x de zona de fusión de inserto soldado con parámetros óptimos donde se observa martensita..... 67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Parámetros actuales usados en la soldadura de moldes H13.....	5
Tabla 2. 1. Clasificación de aceros grado herramienta de acuerdo s AISI-SAE estándar (10).....	22
Tabla 2. 2. Composición química de acero grado herramienta H13 (11)	23
Tabla 2. 3. Propiedades mecánicas de acero H13 con diferentes temperaturas de temple (11)	24
Tabla 2. 4. Parámetros de la fuente de calor calculados desde la isoterma Ac_1 (relación de parámetros de soldadura con nivel de penetración) (14).....	26
Tabla 2. 5 Composición química (%e.p.) de material de aporte Eureka 31, (18) ..	34
Tabla 4. 1 Composición química (%e.p.) de acero grado herramienta H13	50
Tabla 4. 2 Composición química (%e.p.) de material de aporte, Eureka 31	50
Tabla 4. 3 Propiedades mecánicas de acero H13 (11)	51
Tabla 4. 4 Parámetros actuales usados en la soldadura de moldes H13 (1)	52
Tabla 4. 5 Parámetros de soldadura usados en la experimentación de 16 muestras	55
Tabla 5. 1 Composición química de poro analizada por espectroscopía de dispersión de electrones (EDS)	57
Tabla 5. 2 Comparativo de microdurezas en MB y ZF tomadas con una carga de 500 g	59
Tabla 5. 3 Conteo de poros por medio de inspección visual y líquidos penetrantes realizados en la superficie de insertos de acero H13 después de ser soldados ...	61
Tabla 5. 4 Resultados de inspección por ultrasonido en insertos soldados comparado contra el número de poros obtenidos por líquidos penetrantes	62
Tabla 5. 5 Estimación de coeficientes por distribución de Poisson	64

Tabla 5. 6 Parámetros utilizados en la soldadura de insertos en base a la optimización realizada por distribución de Poisson	65
Tabla 5. 7 Resultado de porosidad en insertos soldados con parámetros óptimos	65
Tabla 5. 8 Resultados de inspección por ultrasonido en insertos soldados con parámetros óptimos comparado contra el número de poros obtenidos por líquidos penetrantes	66
Tabla 5. 9 Comparativo de microdureza entre material base y zona de fusión en inserto soldado con parámetros óptimos.....	68