

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**EVALUACIÓN MEDIANTE ENSAYO NO DESTRUCTIVO RADIOGRÁFICO  
APLICADO A LA REPARACIÓN EN MOLDES DE ACERO GRADO  
HERRAMIENTA H13 MEDIANTE EL PROCESO GTAW**

**POR**

**ING. EDGAR PINELO ZÚÑIGA**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO COAHUILA, 21 DE DICIEMBRE DE 2017**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**EVALUACIÓN MEDIANTE ENSAYO NO DESTRUCTIVO RADIOGRÁFICO  
APLICADO A LA REPARACIÓN EN MOLDES DE ACERO GRADO  
HERRAMIENTA H13 MEDIANTE EL PROCESO GTAW**

**POR**

**ING. EDGAR PINELO ZÚÑIGA**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO COAHUILA, 21 DE 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 monografía **“EVALUACIÓN MEDIANTE ENSAYO NO DESTRUCTIVO RADIOGRÁFICO APLICADO A LA REPARACIÓN EN MOLDES DE ACERO GRADO HERRAMIENTA H13 MEDIANTE EL PROCESO GTAW”**, realizada por el alumno **EDGAR PINELO ZÚÑIGA**, con número de matrícula **17ES-227** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

---

**Dra. Gladys Yerenia Pérez  
Medina**  
Tutor Académico

---

**MTSI Leonardo Adrián  
Carrasco González**  
Asesor

---

**Dra. Argelia Fabiola Miranda  
Pérez**  
Asesora

---

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 especialización del alumno **EDGAR PINELO ZÚÑIGA**, una vez leída y revisada la monografía llamada **“EVALUACIÓN MEDIANTE ENSAYO NO DESTRUCTIVO RADIOGRÁFICO APLICADO A LA REPARACIÓN EN MOLDES DE ACERO GRADO HERRAMIENTA H13 MEDIANTE EL PROCESO GTAW”**, aceptamos que la monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 21 de Diciembre de 2017.

---

**Dr. Carlos Rodrigo Muñiz  
Valdez**  
Presidente

---

**Dra. Alejandra Hernández  
Rodríguez**  
Secretario

---

**Dra. Gladys Yerania Pérez  
Medina**  
Vocal

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de posgrado, de igual manera a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA) por haberme brindado la oportunidad de cursar la especialización en tecnología de la soldadura industrial para así abrirme paso, tanto en el ámbito profesional como laboral.

Agradezco a mi tutora académica, Dra. Gladys Yerenia Pérez Medina por su apoyo y recomendaciones que me sirvieron para la realización de la monografía, por las facilidades brindadas hasta la terminación de mis estudios de especialización.

Agradezco a los doctores y maestros que formaron parte de mi formación y que transmitieron su conocimiento para mi crecimiento profesional, por sus enseñanzas y recomendaciones brindadas durante mi estancia en la corporación.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, María Elena Zúñiga García y Gerardo Francisco Pinelo Márquez, por la confianza depositada y por creer en mi en el momento que decidí cursar un programa de posgrado, por los sacrificios que han hecho para que pueda crecer profesionalmente y cumplir mis objetivos. A ustedes y más que a ustedes, ya que, sin su apoyo, no me encontraría en donde estoy y porque siempre estaré en deuda eterna por lo brindado.

A mi núcleo familiar que siempre ha estado ahí apoyándome a la distancia, que no me dejan solo y por los sabios consejos que me han servido en mi diario vivir.

# ÍNDICE

<b>SÍNTESIS</b> -----	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> -----	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES</b> -----	<b>2</b>
1.1 ANTECEDENTES-----	2
1.2 OBJETIVOS-----	4
1.2.1 <i>Objetivo general</i> -----	4
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> -----	4
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA-----	4
1.4 JUSTIFICACIÓN-----	6
1.6 APORTACIÓN INDUSTRIAL-----	7
1.7 ALCANCE Y DELIMITACIONES-----	7
<b>CAPÍTULO 2</b> -----	<b>8</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> -----	<b>8</b>
2.1 SOLDADURA GTAW -----	8
2.2 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL PROCESO GTAW-----	9
ENTRE LAS LIMITACIONES SE ENCUENTRAN LAS SIGUIENTES:-----	10
2.3 TIPOS DE CORRIENTE USADAS-----	10
2.3.1 <i>Corriente directa</i> -----	11
2.3.2 <i>Soldadura con corriente continua a pulsos</i> -----	12
2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE ELECTRODO DE TUNGSTENO -----	14
2.4.1 <i>Clasificación de electrodos EWP</i> -----	14
2.4.2 <i>Electrodos EWTh.</i> -----	15
2.4.3 <i>Electrodos EWCe.</i> -----	15
2.4.4 <i>Electrodos EWLa.</i> -----	15
2.4.5 <i>Electrodos EWZr.</i> -----	15
2.4.6 <i>Electrodos EWG</i> -----	16
2.5 GASES DE PROTECCIÓN-----	16
2.6 CONSIDERACIONES DE CALIDAD EN EL PROCESO GTAW -----	18
2.6.1 DISCONTINUIDADES EN SOLDADURAS DE ARCO -----	18
2.7 ACEROS GRADO HERRAMIENTA -----	25
2.7.1 <i>Clasificación de los aceros grado herramienta</i> -----	25
2.7.2 <i>Aceros grado herramienta H13</i> -----	29
2.7.3 <i>Soldabilidad de los aceros grado herramienta</i> -----	31
2.7.4 <i>Reparación de moldes por soldadura</i> -----	32
2.8 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS-----	33
2.9 ENSAYO RADIOGRÁFICO (RT) -----	34
2.9.1 <i>Ventajas del ensayo radiográfico</i> -----	37
2.9.2 <i>Desventajas del ensayo radiográfico</i> -----	38
2.9.3 <i>Limitaciones del ensayo radiográfico</i> -----	38
2.10 AWS B2.1 -----	39
2.10.1 <i>Alcance</i> -----	39
2.10.2 <i>Procedimiento de examen radiográfico</i> -----	40
2.10.3 <i>Criterios de aceptación</i> -----	41
<b>CAPÍTULO 3</b> -----	<b>43</b>
<b>ESTADO DEL ARTE</b> -----	<b>43</b>

<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>53</b>
<b>CASO DE ESTUDIO</b>	<b>53</b>
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>59</b>
<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>59</b>
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>74</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>74</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>75</b>
<b>LISTADO DE FIGURAS</b>	<b>77</b>
<b>LISTADO DE TABLAS</b>	<b>79</b>



# SÍNTESIS

En el presente trabajo se estudia la factibilidad del uso del ensayo no destructivo radiográfico como método de identificación y cuantificación de defectos originados en la recuperación de insertos de acero AISI H13 mediante el proceso de soldadura por arco de tungsteno protegido por gas (GTAW, por sus siglas en inglés). Dichas piezas son constituyentes de moldes para vaciado de aluminio en el proceso de conformado de piezas automotores de combustión interna.

El estado del arte aborda puntos descriptivos del empleo de la radiografía para verificar la sanidad interna de componentes soldados mediante el proceso GTAW, así como problemáticas relacionadas a la falla de elementos de acero grado herramienta.

El caso de estudio de este documento se enfoca al empleo del ensayo no destructivo radiográfico como método de detección y cuantificación de discontinuidades generadas durante el proceso GTAW aplicado a la reparación de moldes de acero AISI H13, determinando un criterio de aceptación o rechazo mediante la correlación de los resultados con el anexo 5 de la norma Americana AWS B 2.

**PALABRAS CLAVE:** GTAW, Radiografía, Rayos X, recuperación de moldes.

**CAMPO ESPECÍFICO:** Ensayos no destructivos.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

### 1.1 Antecedentes

En la industria metal-mecánica, los aceros grado herramienta, gracias a los elementos aleantes que contienen, brindan propiedades específicas, lo que se traduce como una amplia gama de aplicaciones, entre las más comunes se encuentran: extrusión, laminado, cizallado, troquelado, moldeo, inyección de plásticos, entre otras. Estos aceros, son ampliamente usados para trabajo en caliente (la serie H) ya que brindan una buena estabilidad de sus propiedades mecánicas a altas temperaturas, como tenacidad, dureza y resistencia a la tensión [1].

El proceso de manufactura de piezas involucra varios procesos, que van desde el fundido y vaciado del material a moldes, y otros procesos de acabado como la rectificación dimensional mediante maquinado. Tal es el caso de las cabezas y/o monobloques empleados en automóviles. Durante el proceso de conformado de los mismos, los moldes son expuestos a diferentes ciclos de trabajo en los que los mismos experimentan algún daño estructural y/o dimensional, lo que impacta en la morfología de las piezas moldeadas, pudiendo ocasionar así la falla del funcionamiento de los motores de combustión interna. Por esta razón, es de suma importancia el reemplazo o la reparación de dichos

componentes para no impactar en la calidad de la producción, y por tiempo y costos, la opción más factible es la reparación del herramental [1].

En la industria, la soldadura es un proceso que ocupa un papel importante en el proceso de recuperación, restauración y/o mantenimiento de piezas debido a la rapidez y a la relación calidad-costos. En la reparación de componentes se utiliza una amplia gama de procesos de soldadura, siendo un factor crítico el tipo de falla y las propiedades funcionales requeridas. En el caso particular de reparación de moldes, entre los procesos más utilizados debido a las buenas propiedades que ofrece, se encuentra el proceso GTAW, debido a la alta calidad de los cordones de soldadura depositados, libres de escoria, con un buen acabado superficial y una alta estabilidad estructural.

Todas las soldaduras tienen una serie de discontinuidades, que muchas veces no son perceptibles al ojo humano y que dependiendo su dimensión y su origen se pueden considerar como defectos, ya sean rechazables o no; el aseguramiento de la calidad de las piezas recuperadas por soldadura es de vital importancia para asegurar la integridad mecánica dependiendo a las condiciones de servicio a las cuales se encuentre expuestas, por ejemplo el desgaste, la abrasión, impacto, altas temperaturas, entre otras. Es necesario realizar un ensayo no destructivo a las zonas recuperadas antes de llevarlas a proceso de maquinado, así detectaremos la cantidad y el tipo de discontinuidades presentes, así mismo se disminuirán los costos de reprocesamiento de piezas, debido a que si se lleva a maquinado algún herramental previamente reparado sin antes haberse examinado mediante un ensayo no destructivo para asegurar su integridad (para darle el acabado superficial final) ya que al ser maquinadas las zonas reparadas, las discontinuidades serán destapadas, generando un mal acabado que a su vez, estando en operación, ocasionan desprendimiento de material durante el desmoldeo de la pieza, por consecuencia, las partes tendrán que llevarse a proceso de soldadura y por ende tiempos muertos en la operación de la planta.

## **1.2Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Aplicar ensayo no destructivo radiográfico a las zonas recuperadas de moldes de acero grado herramienta H13 mediante proceso GTAW para determinar las discontinuidades internas presentes.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Aplicar el método radiográfico para determinar la factibilidad de uso en la evaluación de moldes reparados de acero AISI H13, con base a lo establecido a la especificación AWS B 2.1
- Correlacionar resultados de la evaluación radiográfica con los requerimientos de la especificación AWS B 2.1 para determinar los criterios de aceptación y rechazo de las piezas recuperadas.

## **1.3Planteamiento del problema**

Se ha detectado la existencia de porosidad en zonas sujetas a recuperación utilizando el proceso de soldadura GTAW, en moldes de acero AISI H13, lo que impacta en tiempos muertos y paro de línea por reprocesamiento del mismo.

A consecuencia de que los moldes son sujetos a ciclos de trabajo en caliente por la manufactura de piezas metálicas, experimentan daños que afectan principalmente su morfología y/o estructura, lo que implica la generación de defectos dimensionales en las piezas. Por esa razón, lo más factible, debido a tiempo y costos, es la rehabilitación de las zonas dañadas mediante proceso de soldadura. Debido a las buenas propiedades estructurales, el proceso GTAW es usado para la rehabilitación de moldes utilizados para el conformado de piezas metálicas.

La sanidad de dichas zonas recuperadas es de vital importancia en el proceso de recuperación, debido a que todas las soldaduras presentan discontinuidades generadas por el propio proceso de soldadura. El proceso GTAW puede generar discontinuidades presentadas en la Tabla 1

Tabla 1: Discontinuidades comúnmente encontradas en el proceso GTAW [2]

Proceso de soldadura	Porosidad	Escoria	Fusión incompleta	Penetración incompleta	Traslape	Grietas
GTAW	X		X	X		X

El ensayo no destructivo radiográfico es ampliamente utilizado para detectar la porosidad subsuperficial en soldaduras [2].

Determinar un criterio de aceptación y rechazo respaldado por un código y/o especificación aplicable de las discontinuidades presentes en las zonas recuperadas mediante proceso de soldadura, es una medida de calidad necesaria, ya que, con ello, se evitaría el reprocesamiento de piezas que presenten discontinuidades que impacten en la integridad mecánica del herramental.

## 1.4 Justificación

Las discontinuidades originadas durante los procesos de soldadura están estrechamente ligados a la configuración de parámetros utilizados, entre los cuales se encuentran amperaje, intensidad de corriente, gas de protección, velocidad de enfriamiento, así como el factor humano, factores climáticos, calidad de materiales, desgaste de equipo, entre otros. Éstos se deben controlar y monitorear para asegurar uniones soldadas de buena calidad que cumplan con estándares de calidad.

Actualmente existen diversos tipos de ensayos no destructivos, los cuales permiten localizar y dimensionar la serie de imperfecciones que se presentan en los procesos de soldadura. La radiografía es capaz de detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales que no pueden ser detectadas mediante otros tipos de ensayos no destructivos (líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido, etc.) [3].

## **1.6 Aportación industrial**

La aportación industrial que ofrece esta monografía es proponer el ensayo radiográfico como la opción idónea para la evaluación de discontinuidades presentes en la rehabilitación de moldes de acero AISI H13 recuperados mediante el proceso GTAW, evaluando las discontinuidades presentes en las zonas soldadas, estableciendo mediante la especificación Americana AWS B 2.1 un criterio de aceptación y rechazo para descartar los moldes recuperados que no cumplan con los requerimientos previamente establecidos.

## **1.7 Alcance y delimitaciones**

El alcance de la presente monografía se enfoca en la evaluación mediante ensayo no destructivo radiográfico de las zonas rehabilitadas de moldes de acero AISI H13 por el proceso de soldadura GTAW y se delimita a la correlación de los resultados de la examinación radiográfica de las zonas recuperadas con los requerimientos de la especificación AWS B 2.1, para determinar un criterio de aceptación y/o rechazo de las imperfecciones propias del proceso GTAW.

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO

### **2.1 Soldadura GTAW**

El proceso GTAW utiliza un arco eléctrico entre un electrodo no consumible y la pieza de trabajo. La protección se logra mediante un gas inerte o una mezcla de gases inertes, mismos que protegen al charco de soldadura y al mismo electrodo de la degradación por efecto de la oxidación. El proceso también puede implicar la alimentación mecanizada de material de relleno. Entre las aplicaciones importantes se utiliza para unir acero inoxidable y metales ligeros como aleaciones de magnesio y cobre, también es aplicado para reparar moldes y herramienta. Un ejemplo de soldadura GTAW se puede representar en la Fig. 1 [3,4].



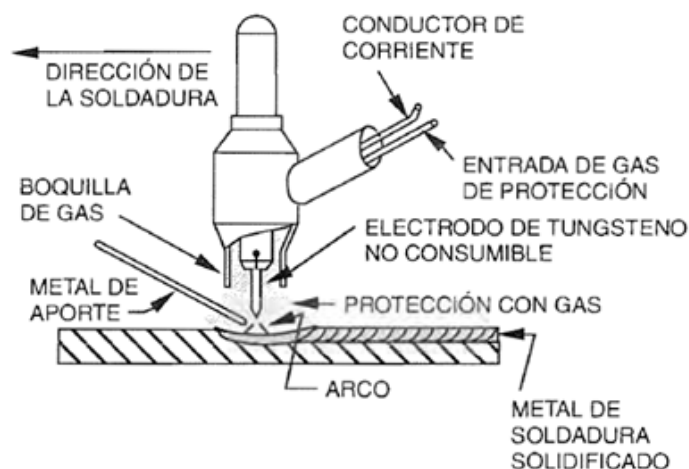


Fig. 1: Proceso de soldadura GTAW [3]

Este tipo de soldadura es el método más adecuado para unir placas delgadas de acero, así como metales ligeros, entre los cuales se encuentra el aluminio, magnesio y algunas aleaciones de cobre. Dicho proceso se puede realizar por métodos manuales, mecanizados o automáticos. La alimentación con alambre frío y caliente son versiones automatizadas de esa técnica [3,5].

El material de relleno se suministra por separado por medio de alambre o varilla. La combinación entre calentamiento lento y bajas temperaturas con las bajas tasas de enfriamiento son características del proceso, que mejoran las propiedades mecánicas del metal y de la zona afectada por el calor (HAZ). El electrodo de tungsteno proporciona las condiciones para iniciar el arco. La fusión es lenta, tanto las velocidades de penetración y deposición en comparación con otros procesos, lo cual permite que la mayor parte de los gases generados puedan escapar del charco de soldadura antes de que se solidifique [3,6].

## 2.2 Ventajas y limitaciones del proceso GTAW

Como todo proceso de soldadura, presenta una serie de ventajas, así como de limitaciones, las cuales se citan a continuación [3,7]:

- Las soldaduras producidas son de buena calidad, por lo regular libre de defectos.
- Soldaduras con bajo índice de distorsión.
- Puede usarse para unir casi todos los metales, incluso materiales disímiles.
- Libre de salpicaduras, en comparación a otros procesos.
- Se puede usar con o sin material de aporte.
- Se puede tener control sobre el calor aportado por el arco.
- No hay humos que limiten la visibilidad del proceso

Entre las limitaciones se encuentran las siguientes [3,7]:

- Presencia de inclusiones de tungsteno si el electrodo hace contacto con el charco de soldadura.
- Poca o nula contaminación tanto del material base y aporte.
- Contaminación del charco de soldadura si no se usan caudales de gas apropiados.
- Bajas velocidades de deposición.

### **2.3 Tipos de corriente usadas**

El proceso TIG puede ser utilizado en varios modos de corriente, según la aplicación y los resultados deseados, aunque también depende directamente de la fuente de energía. Los modos que incluye corriente continua (DC), corriente continua con electrodo negativo (DCEN), corriente continua con electrodo

positivo (DCEP) o corriente alterna y actualmente la corriente pulsada. Estos tipos de corriente le brindan características específicas al arco y lógicamente a los cordones de soldadura [4,8]

### **2.3.1 Corriente directa**

Cuando se usa corriente directa, el proceso brinda la posibilidad de conectar el electrodo a la terminal positiva (polaridad recta) o negativa (polaridad inversa) de la fuente de potencia [8,9].

Por lo general, se elige que el electrodo sea negativo. Con esta polaridad, los electrones fluyen de la pieza de trabajo al electrodo, en el caso contrario, cuando el electrodo se conecta positivamente, los electrones fluyen del electrodo hacia la pieza, así como se muestra en la Fig. 2 [8,9].

La corriente alterna pasa por una inversión de su polaridad, de electrodo negativo a positivo y así sucesivamente. Usualmente su aplicación es para soldar aceros inoxidables y aleaciones de magnesio, los cuales causan una distorsión del arco y por consiguiente una reducción en la calidad de la soldadura [8,10].

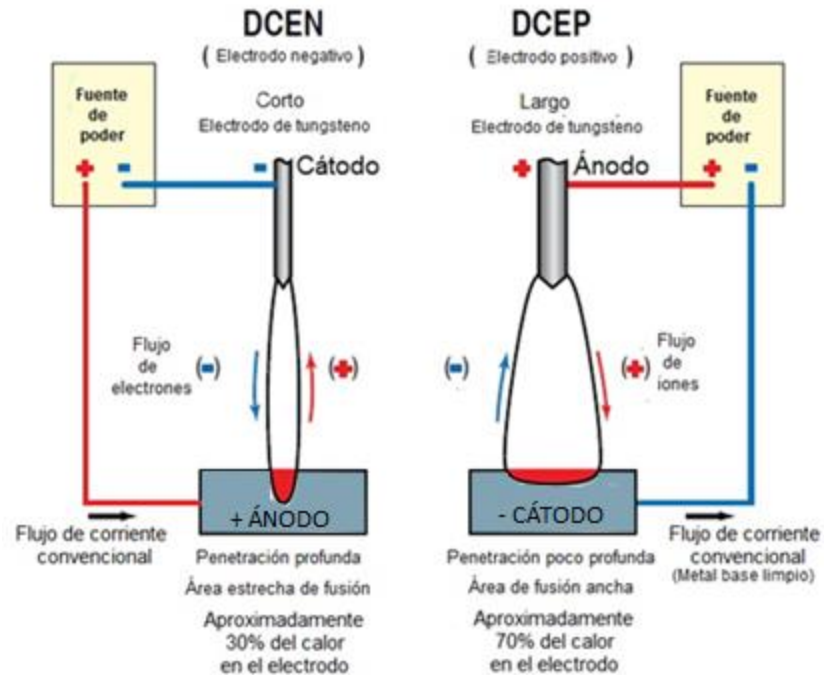


Fig. 2: Polaridades del proceso GTAW [9]

### 2.3.2 Soldadura con corriente continua pulsada

En esta variante del proceso, la corriente oscila de forma repetitiva desde un valor bajo (fondo) hasta un valor alto (pico). Los equipos de corriente continua pulsada permiten modificar todos estos parámetros para que tengamos un mejor control del arco, según la aplicación. Por lo regular se utiliza en el modo de electrodo negativo (CCEN). La forma en cómo se comportan estos parámetros se muestra en la Fig. 3 [9].

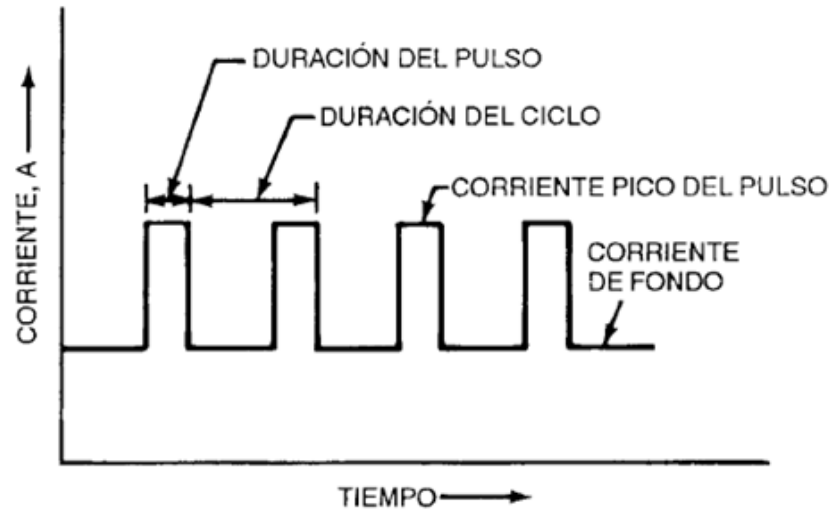


Fig. 3: Corriente pulsada [9]

Produce cordones de soldadura continuos los cuales consisten en puntos de arco superpuestos. En la Fig. 4 se muestra una soldadura producida por arco pulsado, en el cual cada punto se produce por la corriente de alto nivel mientras que el nivel inferior permite que el punto de soldadura solidifique parcialmente, dando lugar a que siga habiendo corriente para que no haya problemas de re-ignición [8].



Fig. 4: Soldadura producida por arco pulsado [8]

## 2.4 Clasificación de los tipos de electrodo de tungsteno

El proceso GTAW usa un electrodo que no es consumible y que no se funde, pero eso depende mucho del empleo que se le dé. Están hechos de tungsteno puro o acompañado de aleaciones como el torio, el zirconio, el cerio y lantano los cuales funden a los 3400°C el cual es el punto de fusión más alto entre todos los materiales, por lo que alea al tungsteno con los materiales antes mencionados, propicia a que los electrodos tengan una mayor eficiencia [9,10].

En la Tabla 2 se muestra el contenido de las aleaciones contenidas en los diferentes tipos de electrodos usados para el proceso.

Tabla 2: Composición química de electrodos de tungsteno [9]

Símbolo de clasificación (ISO 6848)	Requerimientos de composición química				Código, valor y muestra de color RGB
	Adición de óxido		Porcentaje de impurezas	Porcentaje de tungsteno	
	Óxido principal	Porcentaje en masa			
EWP (WP)	Ninguno	N.A. <sup>b</sup>	0.05 max	99.5 min	Verde #008000
EWCe-2 (WCe 20)	CeO <sub>2</sub>	1.8 – 2.2	0.05 max	Balance	Gris #808080
EWLa-1 (WLa 10)	La <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	.08 – 1.2	0.05 max	Balance	Negro #000000
EWLa-1.5 (WLa 15)	La <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1.3 – 1.7	0.05 max	Balance	Dorado #FFD700
EWLa-2 (WLa20)	La <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1.8 – 1.2	0.05 max	Balance	Azul #0000FF
EWTh-1 (WTh 10)	ThO <sub>2</sub>	.08 – 1.2	0.05 max	Balance	Amarillo #FFFF00
EWTh-2 (WTh 20)	ThO <sub>2</sub>	1.7 – 2.2	0.05 max	Balance	Rojo #FF0000
(WTh 30)	La <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	2.8 – 3.2	0.05 max	Balance	Violeta #EE82EE
EWZr-1 (WZr 3)	ZrO <sub>2</sub>	.015 – 0.50	0.05 max	Balance	Café #A52A2A
EWZr-8 (wzR8)	ThO <sub>2</sub>	.08 – 1.2	0.05 max	Balance	Blanco #FFFFFF
EWG	<sup>c</sup>	<sup>d</sup>	0.05 max	Balance	<sup>e</sup>

**2.4.1 Clasificación de electrodos EWP.** Los electrodos de tungsteno puro (EWP) contienen por lo menos 99.5% de tungsteno, y ningún elemento de aleación. La capacidad de los electrodos de tungsteno puro de conducir la corriente eléctrica es menor que la de los aleados. Los electrodos de tungsteno

puro se emplean principalmente con CA para soldar aleaciones de aluminio y magnesio [9].

**2.4.2 Electrodo EWTh.** La emisión termiónica del tungsteno puede mejorarse aleándolo con óxidos metálicos que tienen funciones de trabajo muy bajas. A consecuencia, estos electrodos pueden manejar corrientes más elevadas sin fallar. El óxido de torio es uno de estos elementos aditivos; aumenta en cerca del 20% la capacidad de transporte de corriente y hace al electrodo más duradero [9].

**2.4.3 Electrodo EWCe.** Los electrodos de tungsteno con cerio se crearon como una alternativa a los de torio ya que el cerio no es un elemento radioactivo. En comparación con los electrodos de tungsteno puro, estos tienen menores velocidades de vaporización o quemado. Trabajan con CA o CC [9].

**2.4.4 Electrodo EWLa.** Los electrodos EWLa-i se inventaron por la razón que, el lantano es un material no radiactivo. Contienen 1 % de óxido de lantano ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ), conocido como *lantana*. Las ventajas y características de operación de estos electrodos son muy similares a las de los electrodos de tungsteno aleados con cerio [9].

**2.4.5 Electrodo EWZr.** Los electrodos de tungsteno con zirconio (EWZr) contienen una pequeña cantidad de óxido de zirconio, como se indica en la Tabla 2. Estos electrodos tienen características que generalmente están entre las del tungsteno puro y las del tungsteno con torio. Son los electrodos preferidos para soldar con CA porque combinan las características deseables de estabilidad del arco y el extremo del electrodo en forma de bola típicas del tungsteno puro con las características de capacidad de corriente y encendido del arco del tungsteno con torio [9].

**2.4.6 Electrodo EWG.** Contiene una adición de óxidos no especificada (tierras raras). En esta clasificación se incluye electrodo con adición de óxido de itrio u óxido de magnesio. También se incluyen electrodos con cerio o lantano [9].

## 2.5 Gases de protección

El tipo de gas protector empleado para un proceso de soldadura en específico tiene una incidencia considerable en la calidad de los cordones. Su función principal es brindarle protección al charco de soldadura del oxígeno y nitrógeno que se encuentra en la atmósfera, a su vez promueve una transferencia de material de aporte uniforme y estabiliza el arco. El entender la interacción del gas de protección durante el proceso de soldadura ayudará a la selección correcta del gas y/o una mezcla de ellos para así mejorar las propiedades. El gas utilizado debe de ser inerte, es decir, no debe reaccionar con el medio o con los materiales involucrados en el proceso, normalmente dicho gas debe ser seleccionado de acuerdo a la aplicación y al material a soldar [7].

Los gases más comúnmente usados como protección son el helio (He) y el argón (Ar) o una mezcla de ambos, y en aplicaciones específicas se usa una mezcla de hidrógeno y argón [11].

**Argón.** Por presentar un bajo potencial de ionización, propicia a un inicio rápido y la estabilidad del arco. Su baja conductividad térmica favorece la transferencia de tipo “spray” como la que se presenta en el proceso GMAW. Este gas se usa en aplicaciones en donde se requiere que la distorsión del material base sea controlada.

El argón presenta las siguientes ventajas [11]:



- I. Ofrece menor penetración
- II. Favorece una acción de limpieza
- III. Con bajo flujo de gas se logra una buena protección
- IV. Mayor resistencia a ráfagas cuando se trabaja al aire libre

**Helio.** Presenta una baja densidad, tiene un peso atómico de 4. Al igual que el argón, es un gas inerte. Las mezclas de helio y argón se usan cuando se requiere combinar las propiedades de ambos gases, así como reducir los costos, debido a que el helio tiene un costo más elevado respecto al argón [11].

El helio presenta las siguientes ventajas:

- I. Alta conductividad térmica
- II. Mayor penetración del arco
- III. Altas velocidades de soldadura
- IV. Capacidad de soldar placas gruesas

**Nitrógeno.** Debido a que el nitrógeno es diatómico, es capaz de reasociarse en la superficie de la pieza, por ende, transfiere más energía que el helio y el argón. La desventaja es que debido a la absorción de nitrógeno en el charco de soldadura, no es recomendable para uso en aceros debido a que lo anterior representa una reducción en sus propiedades, entre ellas, la dureza [12].

El nitrógeno presenta las siguientes ventajas:

- I. Se usa para soldar materiales de alta conductividad
- II. Alta transferencia de energía

## 2.6 Consideraciones de calidad en el proceso GTAW

La soldadura GTAW puede producir cualquiera de las discontinuidades comunes. Como todo proceso de soldadura, a pesar de que el proceso GTAW es muy limpio, genera ciertos tipos de discontinuidades, las cuales se mencionan en la Tabla 1, anteriormente mencionada [2].

### 2.6.1 Discontinuidades en Soldaduras de Arco

Las discontinuidades se pueden dividir en tres grandes clasificaciones: relacionadas con el diseño, con el proceso de soldadura y metalúrgicas. Las discontinuidades de diseño incluyen problemas con los detalles estructurales, la elección del tipo incorrecto de junta de soldadura para una aplicación determinada o cambios indeseables en la sección transversal. Las discontinuidades resultantes del proceso de soldadura incluyen [13]:

1. Socavado: ranura fundida en el metal base adyacente a la raíz de una soldadura y dejada sin carga por metal de soldadura (Fig. 5).

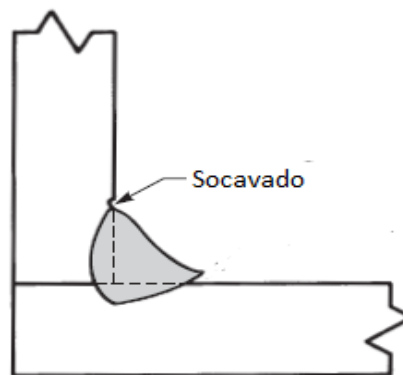


Fig. 5: Socavado [13]

2. Superposición: Es una protuberancia de metal de soldadura más allá del pie, la cara o la raíz de la soldadura (Fig. 6).

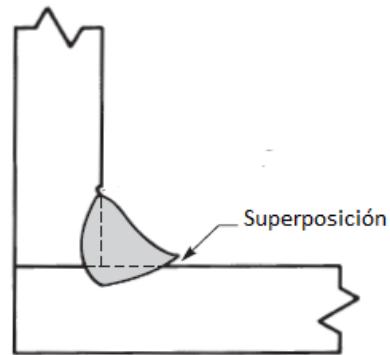


Fig. 6: Superposición [13]

3. Inclusiones de escoria: material sólido no metálico atrapado en el metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base (Fig. 7).

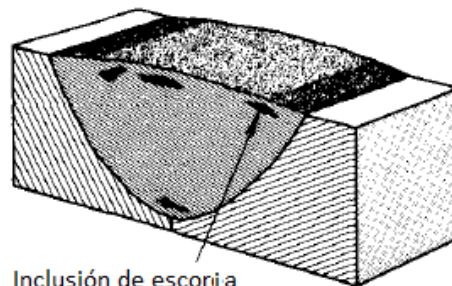


Fig. 7: Inclusión de escoria [13]

4. Inclusiones de tungsteno: Partículas de electrodos de tungsteno que resultan de procedimientos inadecuados durante el proceso (Fig. 8).



Fig. 8: Inclusiones de tungsteno [fuente propia]

5. Rechupe: discontinuidades de tipo cavidad normalmente formadas por contracción durante la solidificación (Fig. 9).



Fig. 9: Rechupe [fuente propia]

6. Inclusiones de óxido: Partículas de óxidos de la superficie que no se han fundido y se han mezclado en el metal de soldadura (Fig. 10).

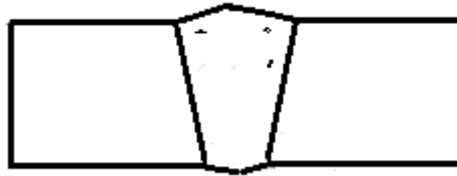


Fig. 10: Inclusiones de óxido [fuente propia]

7. Fusión incompleta: condición en la cual la fusión es menos que completa (Fig. 11).

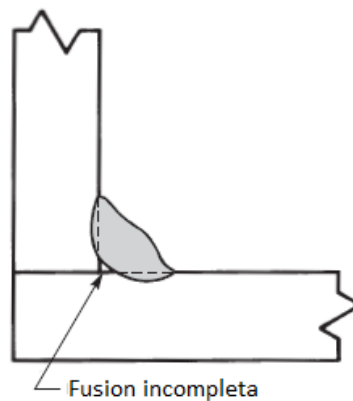


Fig. 11: Fusión incompleta [13]

8. Falta de penetración: condición en la que la penetración de la junta es menor que la especificada (Fig.12).

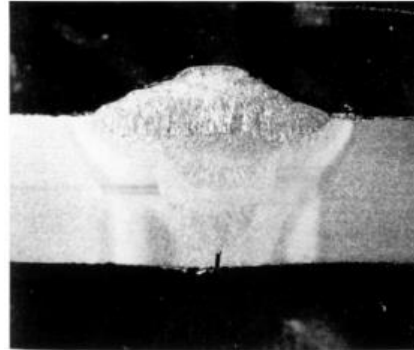


Fig. 12: Falta de penetración [13]

9. Cráteres: depresiones en la terminación de un cordón de soldadura o en el conjunto de soldaduras (Fig.13).



Fig. 13: Defecto identificado como cráter, según la literatura [13]

10. Salpicaduras: partículas de metal expulsadas durante la soldadura ajenas al charco, las cuales han solidificado fuera del cordón y quedan fusionadas al metal base (Fig.14).



Fig. 14: Salpicaduras [13]

11. Golpe de arco (quemaduras de arco): Discontinuidades consistentes en cualquier metal fundido localizado, zona afectada por el calor, o cambio en el perfil de la superficie de cualquier parte de una soldadura o metal base resultante de un arco (Fig. 15).



Fig. 15: Golpe de arco [13]

La concurrencia de discontinuidades detectadas y sus cantidades relativas depende en gran medida del proceso de soldadura utilizado, el método de inspección, el diseño de la unión, el ajuste de parámetros, el material utilizado y las condiciones de trabajo, así como las ambientales.

La porosidad por gas puede ocurrir en o justo debajo de la superficie de una soldadura. Los poros se caracterizan por una forma de lágrima redondeada o alargada con o sin una punta afilada. Los poros pueden distribuirse uniformemente a lo largo de la soldadura o agruparse en pequeños grupos; también pueden concentrarse en la raíz o la punta de la soldadura. La porosidad en las soldaduras es causada por el atrapamiento de gas en el metal fundido, por demasiada humedad en la base o el metal de relleno, o por una limpieza inadecuada de la junta durante la preparación para la soldadura. El tipo de porosidad dentro de una soldadura generalmente se designa por la cantidad y distribución de los poros. Algunos de los tipos se clasifican de la siguiente manera [13]:

- Porosidad uniformemente dispersa: caracterizada por poros dispersos uniformemente a lo largo de la soldadura (Fig. 16 a).
- Porosidad agrupada: caracterizada por grupos de poros separados por áreas libres de porosidad (Fig. 16 b).
- Porosidad lineal: caracterizada por poros que están linealmente distribuidos (Fig. 16 c). La porosidad lineal generalmente ocurre en el pase de raíz y se asocia con la penetración de la articulación incompleta.
- Porosidad alargada: caracterizada por poros muy alargados inclinados a la dirección de soldadura. La porosidad alargada ocurre en un patrón de espiga (Fig. 16 d).
- Porosidad de agujero de gusano: caracterizada por vacíos alargados con una forma y textura de tipo gusano (Fig. 17).

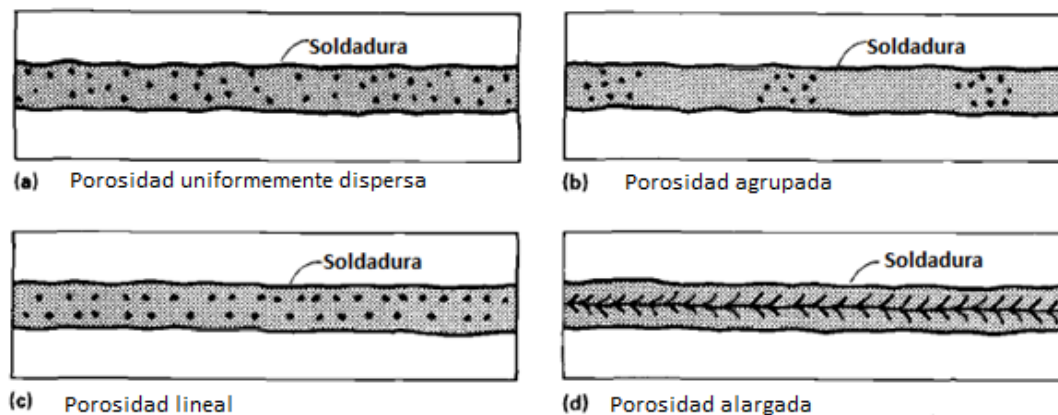


Fig. 16 a, b, c y d: Diferentes tipos de porosidades [13]



Fig. 17: Porosidad agujero de gusano, corte longitudinal 20x [13]

La imagen radiográfica obtenida de la porosidad redonda aparece como manchas redondas u ovals con bordes lisos, y la porosidad alargada aparece como manchas ovals con el eje mayor varias veces más largas que el eje menor. La imagen radiográfica de la porosidad de gusano depende en gran medida de la orientación de la cavidad alargada con respecto al haz de rayos X. La presencia de refuerzo en la superficie o en la raíz afecta la sensibilidad de la inspección y la presencia de material extraño, flujo o salpicaduras de soldadura, puede interferir con la interpretación de los resultados [13].



## **2.7 Aceros grado herramienta**

Un acero grado herramienta es cualquier acero utilizado para fabricar herramientas de corte, conformado o bien para darle forma a un material introduciéndolo en un componente adaptado para producir una pieza, por lo tanto, se diseñan para tener alta dureza y durabilidad bajo severas condiciones de servicio [14].

Los aceros grado herramienta son de acero al carbono, de alta velocidad o aleación y para obtener propiedades específicas pueden templarse y endurecerse. La demanda de este tipo de aceros es creciente y actualmente tienen aleaciones complejas con alto contenido de elementos aleantes como son: tungsteno, molibdeno, vanadio, manganeso y cromo, entre otros. Estos materiales aleantes permiten un incremento en las propiedades del material para satisfacer un servicio [14].

La adición de elementos aleantes brinda propiedades específicas, lo que favorece distintos tipos de aplicaciones en donde se pueden utilizar, como son: estampado, troquelado, corte, cizallado, estirado, laminado, extrusión, entre otras [14].

### **2.7.1 Clasificación de los aceros grado herramienta**

Los distintos tipos de aceros grado herramienta se categorizan en clases en concordancia con la clasificación que realiza el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI, por sus siglas en inglés) y la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, por sus siglas en inglés). Se identifican por una letra que representa la

química, una característica única de esa clase de acero. El primer dígito indica la categoría del acero, y el segundo indica el porcentaje aproximado del elemento aleante predominante. Los dos últimos dígitos de la designación identifican el contenido de carbono en centésimas de uno por ciento [14,15].

La Tabla 3 lista las composiciones químicas nominales y las distintas clases de aceros grado herramienta que existen.

Los aceros para herramientas endurecibles en agua, AISI tipo W, (water-hardening tool steel) tienen el menor contenido de aleantes y, por lo tanto, la menor templabilidad de todos los tipos. Como resultado, los aceros tipo W frecuentemente requieren temple en agua y las secciones grandes endurecen sólo hasta una mínima profundidad [16].

Los aceros para herramientas trabajados en caliente, AISI tipo H, (hot work tool steels) están dentro de los grupos que tienen Cr, Mo o W como aleantes principales. Los aceros H se utilizan para forjado en caliente, extrusión y matrices de fundiciones a presión de metales [16].

Tabla 3: Composición química de los aceros grado herramienta [16]

<b><i>Identificación de elementos (% e.p.)</i></b>
--

<b>AISI</b>	<b>UNS</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Mo</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>
<b>Acero enfriado en agua</b>										
W1	T72301	0.60-1.40 (a)	...	...	...	...	...	...	...	...
W2	T72302	0.60-1.40 (a)	...	...	...	0.25	...	...	...	...
W5	T72305	1.10	...	...	0.50	...	...	...	...	...
<b>Acero resistente al impacto</b>										
S1	T41901	0.50	...	...	1.50	...	2.50	...	...	...
S2	T41902	0.50	...	1.00	...	...	...	0.50	...	...
S5	T41905	0.55	0.80	2.00	...	...	...	0.40	...	...
S6	T41906	0.45	1.40	2.25	1.50	...	...	0.40	...	...
S7	T41907	0.50	...	...	3.25	...	...	1.40	...	...
<b>Acero enfriado en aceite</b>										
O1	T31501	0.90	1.00	...	0.50	...	0.50	...	...	...
O2	T31502	0.90	1.60	...	...	...	...	...	...	...
O6(b)	T31506	1.45	0.80	1.00	...	...	...	0.25	...	...
O7	T31507	1.20	...	...	0.75	...	1.75	...	...	...
<b>Acero enfriado al aire</b>										
A2	T30102	1.00	...	...	5.00	...	...	1.00	...	...
A3	T30103	1.25	...	...	5.00	1.00	...	1.00	...	...
A4	T30104	1.00	2.00	...	1.00	...	...	1.00	...	...
A6	T30106	0.70	2.00	...	1.00	...	...	1.25	...	...
A7	T30107	2.225	...	...	5.25	4.75	1.00(C)	1.00	...	...
A8	T30108	0.55	...	...	5.00	...	1.25	1.25	...	...
A9	T30109	0.50	...	...	5.00	1.00	...	1.40	...	1.50
A10(b)	T30110	1.35	1.80	1.25	...	...	...	1.50	...	1.80

<b>Alto contenido de carbono y cromo</b>										
D2	T30402	1.50	...	...	12.00	1.00	...	1.00	...	...
D3	T30403	2.25	...	...	12.00	...	...	...	...	...
D4	T30404	2.25	...	...	12.00	...	...	1.00	...	...
D5	T30405	1.50	...	...	12.00	...	...	1.00	3.00	...
D7	T30407	2.35	...	...	12.00	4.00	...	1.00	...	...
<b>Aceros especiales de baja aleación</b>										
L2	T61202	0.50-1.10(a)a	...	...	1.00	0.20	...	...	...	...
L6	T61206	0.70	...	...	0.75	...	...	0.25(c)	...	1.50
<b>Aceros al cromo trabajados en caliente</b>										
P2	T51602	0.07	...	...	2.00	...	...	0.20	...	0.50
P3	T51603	0.10	...	...	0.60	...	...	...	...	1.25
P4	T51604	0.07	...	...	5.00	...	...	0.75	...	...
P5	T51605	0.10	...	...	2.25	...	...	...	...	...
P6	T51606	0.10	...	...	1.50	...	...	...	...	3.50
P20	T51620	0.35	...	...	1.70	...	...	0.40	...	...
P21	T51621	0.20	1.20(AI)	...	...	...	...	...	...	4.00
H10	T20810	0.40	...	...	3.25	0.40	...	2.50	...	...
H11	T20811	0.35	...	...	5.00	0.40	...	1.50	...	...
H12	T20812	0.35	...	...	5.00	0.40	1.50	1.50	...	...
H13		0.035	.20-.50	1.0	5.00	1.00	...	1.5	...	0.30 máx
H14	T20814	0.40	...	...	5.00	...	5.00	...	...	...
H19	T20819	0.40	...	...	4.25	2.00	4.25	...	4.25	...
<b>Aceros al molibdeno</b>										
H42	T20842	0.60	...	...	4.00	2.00	6.00	5.00	...	...
6G	...	0.55	0.80	0.25	1.00	0.10	...	0.45	...	...
6F2	...	0.55	0.75	0.25	1.00	...	...	0.30	...	1.00
6F3	...	0.55	0.60	0.85	1.00	0.10	...	0.75	...	1.80
<b>Aceros al tungsteno para alta velocidad</b>										
T1	T12001	0.75(a)	...	...	4.00	1.00	18.00	...	...	...
T2	T12002	0.80	...	...	4.00	2.00	18.00	...	...	...
T4	T12004	0.75	...	...	4.00	1.00	18.00	...	5.00	...
T5	T12005	0.80	...	...	4.00	2.00	18.00	...	8.00	...
T6	T12006	0.80	...	...	4.50	1.50	20.00	...	12.00	...
T8	T12008	0.75	...	...	4.00	2.00	14.00	...	5.00	...
T15	T12015	1.50	...	...	4.00	5.00	12.00	...	5.00	...
<b>Aceros al molibdeno para alta velocidad</b>										
M1	T11301	0.80(a)	...	...	4.00	1.00	1.50	8.00	...	...
M2	T11302	0.85-1.00(a)	...	...	4.00	2.00	6.00	5.00	...	...
M3 C1	T11313	1.05	...	...	4.00	2.40	6.00	5.00	...	...
M3 C2	T11323	1.20	...	...	4.00	3.00	6.00	5.00	...	...
M4	T11304	1.30	...	...	4.00	4.00	5.50	4.50	...	...
M6	T11306	0.80	...	...	4.00	2.00	4.00	5.00	12.00	...
M7	T11307	1.00	...	...	4.00	2.00	1.75	8.75	...	...

M10	T11310	0.85-1.00(a)	...	...	4.00	2.00	...	8.00	...	...
M30	T11330	0.80	...	...	4.00	1.25	2.00	8.00	5.00	...
M33	T11333	0.90	...	...	4.00	1.15	1.50	9.50	8.00	...
M34	T11334	0.90	...	...	4.00	2.00	2.00	8.00	8.00	...
M36	T11336	0.80	...	...	4.00	2.00	6.00	5.00	8.00	...
<b>Aceros de alta velocidad</b>										
M41	T11341	1.10	...	...	4.25	2.00	6.75	3.75	5.00	...
M42	T11342	1.10	...	...	3.75	1.15	1.50	9.50	8.00	...
M43	T11343	1.20	...	...	3.75	1.60	2.75	8.00	8.25	...
M44	T11344	1.15	...	...	4.25	2.00	5.25	6.25	12.00	...
M46	T11346	1.25	...	...	4.00	3.20	2.00	8.25	8.25	...
M47	T11347	1.10	...	...	3.75	1.25	1.50	9.50	5.00	...

- (a) Pueden estar disponibles otros contenidos de carbono
- (b) Contiene grafito en la microestructura para mejorar la maquinabilidad
- (c) Opcional

## 2.7.2 Aceros grado herramienta H13

El acero AISI H13 es un acero con contenido del 5% de Cr (Tabla 4) de ultra alta resistencia. El contenido de vanadio conduce a una mayor dispersión de carburos de vanadio, lo que propicia a un aumento en la resistencia al desgaste. Dependiendo del productor, el contenido de carbono puede variar (dentro de los rangos de aceptación) y el tratamiento térmico aplicado son factores determinantes que conllevan a una variación en sus propiedades (resistencia y ductilidad). La Tabla 5 muestra las propiedades mecánicas del mismo. Posee la característica de mantener una alta dureza y resistencia a temperaturas elevadas, así como una buena resistencia al impacto y a la fatiga térmica (Tabla 6). Al acero endurecido por aire, entre sus aplicaciones de trabajo en caliente, es aplicado en troqueles de fundición, herramientas de moldeo por inyección de plástico y herramientas de forja. Se usan principalmente para fundición a presión de aluminio y magnesio, insertos, émbolos, matrices de forjado, matrices de

extrusión, así como para la fabricación de piezas de construcción o piezas automotrices, respectivamente [15,17].

Tabla 4: Composición química del acero AISI H13 [17]

Designación	Composición % en peso						
AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
	0.32-0.35	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.50	0.30 máx.	1.10-1.75	0.80-1.20

Tabla 5:: Propiedades mecánicas del acero AISI H13 [17]

Esfuerzo de tensión MPa	Esfuerzo de cedencia MPa	Elongación %	Reducción de área %	Energía de impacto (Charpy) J	Dureza (HRC)
1960	1570	13	46.2	16	52

Tabla 6: Resistencia al reblandecimiento durante exposición a temperatura elevada [17]

Temperatura de exposición (°C)	Dureza en escala Rockwell C después de una exposición por			
	4 hrs	10 hrs	50 hrs	100 hrs
Dureza inicial: 55 HRC				
1000	55	54	50	48
1100	50	46	34	30
1150	41	36	28	27
1200	35	31	27	26

Este acero es fácilmente tratado térmicamente para mejorar y homogeneizar su microestructura. Dicha homogeneidad da como resultado que su vida útil se prolongue [18].

### **2.7.3 Soldabilidad de los aceros grado herramienta**

La destreza del soldador es un factor importante al momento de soldar un acero. La omisión de los procesos de precalentamiento, postcalentamiento, el alivio de las tensiones provocadas por el propio proceso y el templado es la causa principal de los problemas de agrietamiento aunado a la mala preparación y la eliminación parcial de las grietas antes de soldar [19].

Cuando la soldabilidad de aceros grado herramienta implica un proceso de soldadura por arco, a menudo involucra la adición de material de aporte en el charco de soldadura. El arco es protegido con gas inerte o una mezcla de los mismos, fundente o un revestimiento de electrodo que se descompone durante la soldadura.

Los aceros grado herramienta se sueldan para lograr uno o más de los siguientes objetivos [20]:

- Ensamblar componentes para formar herramientas o moldes
- Fabricar una herramienta o molde usando técnicas de recubrimiento que brinden propiedades específicas
- Corregir y/o mejorar las propiedades de rectificado o maquinado
- Reparación de grietas o áreas dañadas.

## 2.7.4 Reparación de moldes por soldadura

A nivel industrial, la soldadura es la opción más adecuada para la reparación de herramental que presenta algún daño estructural debido a los ciclos y/o condiciones de trabajo a los cuales están expuestos los componentes.

Para llevar a cabo una reparación de cualquier tipo de herramental, se deben considerar los siguientes criterios [20]:

- Determinar el tipo de material a soldar y su condición relacionada al tratamiento térmico.
- Realizar cualquier tratamiento térmico necesario para preparar a la pieza de trabajo para soldar.
- Preparar la superficie con el herramental necesario.
- Seleccionar el proceso de soldadura apropiado y el material de relleno que satisfaga los requisitos de aplicación.
- Seleccionar el electrodo y/o alambre del que según las necesidades, ofrezca las mejores propiedades.
- Precalentar el acero a una temperatura adecuada, asegurando que la pieza se caliente de manera uniforme.
- Durante el proceso de soldadura, mantener la temperatura entre pasadas
- Post calentar inmediatamente después de la aplicación de la soldadura para minimizar la diferencia de temperatura entre el depósito de soldadura y el metal base.
- Propiciar un enfriamiento más rápido que a temperatura ambiente y posteriormente aplicar post tratamiento térmico para lograr propiedades deseadas.



Cuando se practica una reparación de troqueles utilizados en la industria automotriz, se debe tener un especial cuidado con la preparación de la pieza a recuperar para garantizar una buena adherencia del metal de soldadura al material base, el área a reparar se debe desbastar lo suficiente como para depositar al menos dos capas de material de aporte [20].

## **2.8 Ensayos no destructivos**

La integridad estructural de los materiales, componentes y/o estructuras es de suma importancia evaluarse para el control de la calidad mediante normas aplicables, con el objetivo de cumplir con las especificaciones del producto. Actualmente existen numerosas técnicas de inspección que han sido desarrolladas para el evaluar la condición y mantenimiento de las mismas. Estas técnicas se han clasificado en dos clases: ensayos destructivos, basados en la alteración irreversible de su composición química, propiedades mecánicas o dimensionales y ensayos no destructivos (NDT, por sus siglas en inglés) los cuales dejan intacto al espécimen inspeccionado [21].

A nivel mundial existen asociaciones que se dedican a la capacitación de personal en ensayos no destructivos, por ejemplo la Asociación Americana de Ensayos no Destructivos (ASNT, por sus siglas en inglés) o la Asociación Española de Ensayos No Destructivos.

Los ensayos no destructivos son relevantes para la inspección de componentes grandes y costosos. Las industrias aeroespacial, nuclear, automotriz e hidrocarburos son solo algunos ejemplos que ocupan determinados ensayos no destructivos para cerciorar la integridad mecánica de sus productos. Los métodos de ensayo no destructivo más comúnmente utilizados incluyen

inspección visual, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, ultrasonido, radiografía, y corrientes de Eddy [21].

Ejemplos de la aplicación de estas técnicas se mencionan a continuación [21]:

- Detección de discontinuidades.
- Evaluación estructural de un componente.
- Metrología y propósitos dimensionales (medición de espesores, alineación).
- Determinación de propiedades físicas de un material (eléctricas, magnéticas o mecánicas).

El objetivo principal de un examen no destructivo es proporcionar al inspector información cuantitativa y cualitativa, esto se logra ubicando y dimensionando cualquier imperfección detectada. Estos defectos comienzan como fallas menores que pueden ocurrir como resultado del propio proceso de manufactura, maquinado, tensiones externas y del mecanismo de daño. La cuantificación de defectos requiere una experiencia y/o destreza considerables y a menudo demanda del empleo de más de un método NDT, debido a que cada método es capaz de proporcionar información limitada sobre una categoría específica de defectos [21].

## **2.9 Ensayo Radiográfico (RT)**

El ensayo radiográfico es un método de examen no destructivo que utiliza la radiación para penetrar en una variedad de elementos de grabación, tales como una película o papel fotosensible. Es una “imagen de sombra” o imagen producida por la radiación que pasa a través del objeto a examinar, efecto de los rayos X o de la acción de isótopos radioactivos [22,23].

La energía de radiación tiene propiedades que le permiten atravesar materiales además de ionizarlos, están estrechamente ligadas a la longitud de onda que poseen, aproximadamente de  $1/10000$  de la luz visible, lo cual se aprovecha para obtener buenas imágenes radiográficas ya que la radiación emitida de ambas fuentes se comporta de manera similar [24].

La densidad del material en una discontinuidad (es decir, el aire en el caso de una grieta, fusión incompleta o porosidad) es menor que la del metal sólido. La diferencia en la densidad de materiales atenúa la radiación a diferentes niveles y, en consecuencia, produce variaciones de densidad óptica en la película o placa. Como consecuencia, las áreas del elemento que les falta metal de soldadura son reveladas por una imagen mucho más oscura que el área soldada en la película de visualización (Fig. 18) [3,25].

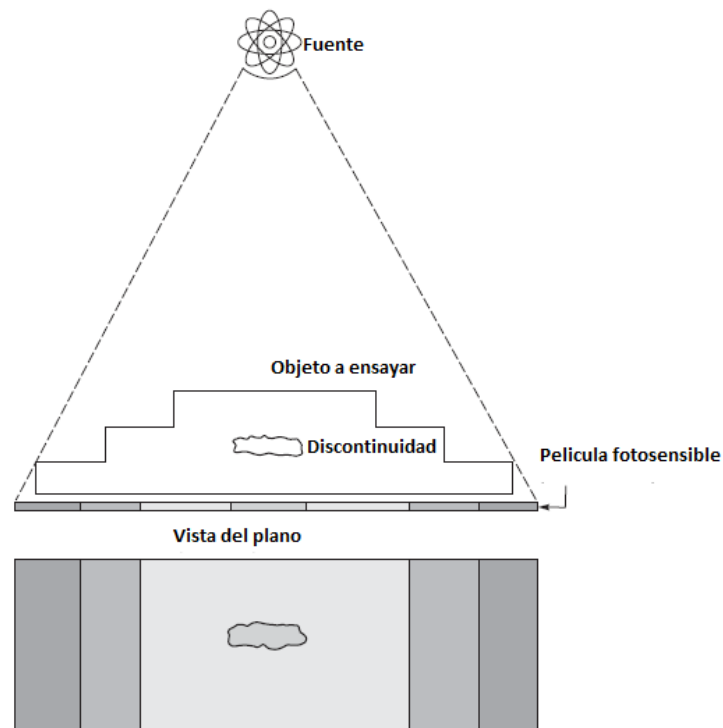


Fig. 18: Esquema de pieza radiada [25]

La densidad del material puede afectarse por el propio material (por ejemplo, el tungsteno es mucho más denso que el acero o el aluminio, por lo tanto, es mejor evitar que la radiación pase a través de él, lo cual resulta en una indicación de baja densidad en la película) o por el espesor de un material dado (por ejemplo, cuanto más grueso es el material, más detiene la radiación y produce una imagen más clara sobre la película). La selección de la fuente de radiación (rayos x o gamma) y el potencial de la misma, es un factor crítico a considerar para un determinado espesor de soldadura. Si la energía de la fuente es demasiado alta o demasiado baja para un determinado espesor de material, el resultado puede ser un contraste bajo y sensibilidad radiográfica deficiente. Por este motivo, el uso de un negatoscopio con variación de la intensidad de la luz es útil para la visualización y el análisis de las radiografías [3].

Para determinar la densidad de la película en varios puntos, es necesario contar con un dispositivo denominado densitómetro. Para indicar la sensibilidad adquirida de una radiografía se emplea un dispositivo denominado indicador de calidad de imagen (IQI, por sus siglas en inglés) que se coloca adyacente a la zona de interés. Existen dos tipos de indicadores IQI, el primer tipo es una plaqueta de un espesor determinado (basado en el espesor de la pieza de prueba) que contiene una serie de agujeros de diferentes diámetros. El segundo tipo de IQI es el alambre, compuesto por alambres de diámetros especificados. La sensibilidad de la radiografía se determina al reconocer cuál de los orificios, o cuál diámetro de alambre, es visible en la imagen (Fig. 19). [3]

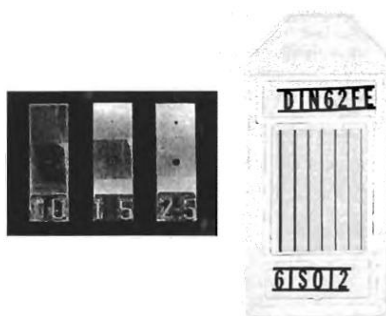


Fig. 19: Penetrámetros, indicadores de calidad de imagen en forma de plaqueta y alambre [3]

Algunos de los defectos que se pueden llegar a presentar son [26]:

- Defectos planares
- Grietas
- Falta de fusión
- Penetración incompleta
- Cavidades
- Agujeros de gusano
- Cavidades superficiales
- Inclusiones de escoria

Posteriormente de la identificación de los defectos presentes, es pertinente decidir si es demasiado grande como para rechazar la junta [26].

### **2.9.1 Ventajas del ensayo radiográfico**

La radiografía puede detectar discontinuidades superficiales (socavación, penetración incompleta de la junta, refuerzo de soldadura excesivo, falta de llenado, etc.) y subsuperficiales, que no pueden detectarse mediante inspección visual, por partículas magnéticas o métodos de tinte penetrante, y que podrían no ser detectadas por métodos ultrasónicos debido a la geometría de la pieza y la preparación previa para interpretar los resultados. [3].

El equipo para realizar la inspección radiográfica es portátil, lo cual significa una ventaja sobre otros ensayos no destructivos. Todos los materiales pueden ser examinados mediante este ensayo. La técnica suele ser eficiente para detectar defectos volumétricos.[27]

### **2.9.2 Desventajas del ensayo radiográfico**

- Se requieren radiólogos calificados y experimentados para poder realizar la prueba.
- Consideraciones de salud; los radiólogos calificados deben ser monitoreados debido a la exposición a la radiación.
- La profundidad y la dimensión del espesor de un defecto es difícil de determinar.
- Existe una limitación en el espesor que se puede radiografiar, todo depende de la técnica de inspección radiográfica que se utilice y de la orientación de la fuente de rayos x con respecto a la pieza a examinar [27].

### **2.9.3 Limitaciones del ensayo radiográfico**

El costo de la radiografía generalmente aumenta a medida que la complejidad de la junta incrementa, y la cantidad de información que se puede obtener es mucho más limitada. Las discontinuidades deben estar aproximadamente alineadas con el haz de radiación. No es un problema en el caso de discontinuidades como porosidad o escoria ya que la sección transversal es redonda y se alinean con el haz desde cualquier dirección. Por otra parte, las grietas, la fusión incompleta y la penetración incompleta de la junta deben estar alineadas con el haz para que se puedan localizar [3].

El ensayo radiográfico requiere de un espacio y una atmósfera controlada para que la radiación no sea perjudicial para el personal. El alto costo de las máquinas con las que se realizan los rayos X, los isótopos radioactivos y licencias, el control de dosimetría de exposición y equipos de procesamiento de películas suelen ser una limitante para dicho ensayo [22].

## **2.10 AWS B2.1**

Esta especificación define y establece variables de calificación; el criterio para determinar si una condición de soldadura va más allá de la tolerancia permisible, si afecta las propiedades de una soldadura sana en la medida en que las propiedades pueden no cumplir con el mínimo especificado [28].

Los metales base y los metales de relleno se han agrupado en categorías que minimizarán el número de pruebas requeridas. La sustitución de un metal base o metal de aporte por otro, incluso cuando esté dentro de las reglas permitidas, solo debe hacerse después de una evaluación de los factores involucrados. Los materiales que no figuran en la Tabla IV-1 del anexo IV de la especificación en cuestión requieren una calificación por separado [28].

### **2.10.1 Alcance**

El propósito de esta especificación es ser destinada para ser utilizada cuando se hace referencia a ella por un producto o código de fabricación, especificación,

documento de contrato o documentos internos, como control de calidad o manuales de garantía de calidad [28].

Esta especificación está diseñada para usarse con los siguientes procesos de soldadura [28]:

- Soldadura Oxiacetilénica (OFW)
- Soldadura manual por arco con electrodo revestido (SMAW)
- Soldadura de arco, tungsteno y gas (GTAW)
- Soldadura por arco sumergido (SAW)
- Soldadura de arco metálico con gas (GMAW)
- Soldadura de arco con núcleo fundente (FCAW)
- Soldadura por plasma (PAW)
- Soldadura por electro escoria (ESW)
- Soldadura electrogás (EGW)
- Soldadura por haz de electrones (EBW)
- Soldadura láser (LBW)
- Soldadura de pernos (SW)

### **2.10.2 Procedimiento de examen radiográfico**

Las radiografías se realizarán ya sea por rayos X u otros métodos de fuente de radiación de alta energía. La película debe estar limpia y libre de artefactos y defectos de procesamiento de película en el área de interés [28].

Se examinará toda la soldadura, excepto el descarte en la placa. Cuando la prueba de calificación es una soldadura de prueba estándar, se debe examinar un mínimo de 6 pulgadas de longitud de soldadura, excepto para las tuberías, se debe examinar toda la soldadura [28].



Cuando la calificación se basa en una pieza soldada de producción, el criterio para la aceptación de la soldadura debe ser el requerido por el documento de referencia. Los criterios para la aceptación del soldador o del operador de soldadura deben estar de acuerdo con los criterios de aceptación [28].

### **2.10.3 Criterios de aceptación**

Según la especificación, la aceptación debe estar de acuerdo con los siguientes requisitos [28]:

(1) No debe haber grietas, penetración incompleta de la junta o fusión incompleta. Se permite la concavidad de la raíz en la soldadura de prueba, siempre que la densidad de la película a través de la soldadura no sea inferior a la del metal base.

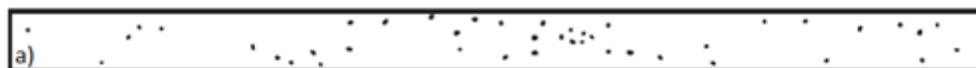
(2) Las indicaciones lineales aceptables serán las que se muestran en la Tabla 7. Las discontinuidades lineales son aquellas en las que la longitud es más de tres veces el ancho.

(3) Las indicaciones redondeadas aceptables serán las que se muestran en la Tabla 8 y como gráfico la Fig. 20 a, b, c y d en el caso de que las soldaduras a examinar cumplan con las dimensiones ahí descritas. Las discontinuidades redondeadas son aquellas que tienen una longitud inferior a tres veces el ancho y pueden ser de forma circular, elíptica o irregular.

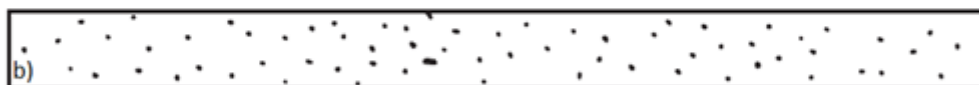
Tabla 7: Discontinuidades lineales permisibles en RT [28]

Espesor del metal de soldadura (t), in.	Tamaño máximo de discontinuidades (in)	Indicaciones alineadas con la longitud máxima <sup>(1)</sup>
Hasta 3/8	1/8	t en una longitud de 12t
De 3/8 hasta 2-1/4	1/3t	t en una longitud de 12t
Más de 2-1/4	3/4	t en una longitud de 12t

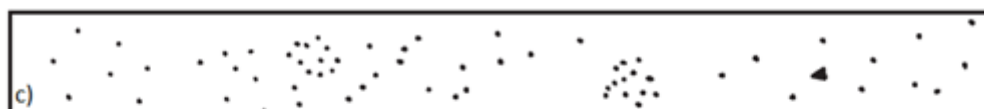
(1) Indicaciones alineadas son aquellas donde la distancia entre la indicación sucesiva es menor que 6L, donde L es la longitud de la indicación más larga en el grupo.



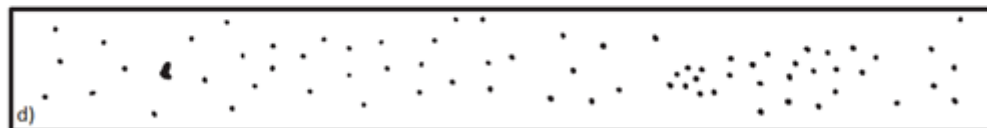
Cantidad y tamaño permitidos en 6" de longitud de soldadura de 1/8" a 1/4" de espesor



Cantidad y tamaño permitidos en 6" de longitud de soldadura de 1/4" a 1/2" de espesor



Cantidad y tamaño permitidos en 6" de longitud de soldadura de 1/2" a 1" de espesor



Cantidad y tamaño permitidos en 6" en una longitud de soldadura de 1" de espesor

Fig. 20 a, b, c y d: Descripción gráfica discontinuidades redondeadas permisibles en RT [28]

Tabla 8: Discontinuidades redondeadas permisibles en RT [28]

Espesor del metal de soldadura (t)	Máximo de discontinuidades permisibles	
	Individual	Múltiple
Menor que 1/8	20% de t	Un máximo de 12 indicaciones aceptables en 6 in (150mm) de soldadura
1/8 o espesor <sup>(1)</sup>	Menos de 20% de t ò 1/8 in (3.2mm)	Por gráfico, Fig. 20 a, b, c y d.

(1) Las indicaciones redondeadas de menos de 1/32 de diámetro máximo no se deben considerar en este rango de espesor. Se permite la concavidad de la raíz siempre que la densidad de la película a través del área de interés no sea inferior a la del metal base.

## CAPÍTULO 3

# ESTADO DEL ARTE

El trabajo realizado por el investigador D. Papageorgiou y colaboradores en el año 2013 [29], a cargo del departamento de física, química y tecnología de materiales del Instituto Tecnológico Educativo del Pireo en Grecia, se analizó la fractura de un molde empleado para la inyección de plástico. Dicho molde fue fabricado en acero AISI H13, el cual su objetivo era la producción de copas de plástico usados en el cierre exterior de latas cilíndricas de aluminio destinadas al empaque de café.

La indagatoria comienza a partir de la examinación dimensional del molde; el lado lateral tiene una vía de refrigeración periférica, este cambio de la sección transversal no fue consecutivo a radios adecuados.

La prueba de dureza fue realizada en lados del espécimen libre de corrosión (en el área de inyección), la cual no presenta alteración, el resultado es 50 HRC.

El material se examinó metalográficamente el cual reveló su microestructura martensítica, se puede observar en la Fig. 21. El agua de enfriamiento es de mala calidad, con alto contenido en sales el cual es un indicio de la generación de corrosión. Las irregularidades de las superficies pueden provocar un flujo turbulento. Como resultado, una parte del agua puede quedarse estancada, lo cual se interpreta en mala refrigeración, por consecuente el enfriamiento es insuficiente y ello detona una expansión del espécimen. En las áreas con buena circulación el enfriamiento se lleva a cabo de manera correcta, representando una contracción del material. Debido a ello, se puede diferir que la pieza se encontraba en esfuerzos cíclicos de contracción y expansión, provocando la iniciación de la grieta (Fig. 22).

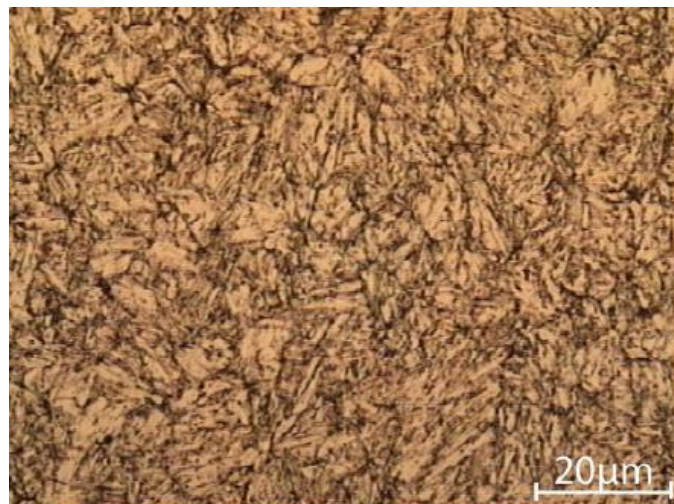


Fig. 21: Microestructura martensítica presente en acero AISI H13 [29]



Fig. 22: Grieta en el espécimen producida por esfuerzos de expansión-compresión [29]

La deficiencia del diseño y las condiciones de enfriamiento inadecuadas generaron un complejo mecanismo de fractura por fatiga y corrosión lo cual impacta en el daño del molde después de la mitad de la vida útil estimada.

Una investigación realizada en enero del año 2016 por investigadores del departamento de Ingeniería Mecánica e Ingeniería de Maquinaria Minera del Instituto Indio de Tecnología [30], se basa en el análisis de la fuerza de compresión de una junta soldada mediante el proceso GTAW utilizando un electrodo de tungsteno al zirconio de 3.4 mm y aluminio ER 2219 como material de relleno. La probeta consiste en un tubo de aluminio comercial soldada a una placa de aluminio 2025, a los cuales se autenticaron sus propiedades mecánicas y metalúrgicas después de haber sido sometidas al proceso de unión. Un total de 25 piezas fueron ensayadas mediante compresión y posteriormente se obtuvo su dureza para evaluar la resistencia de la articulación. Para asegurar la calidad de las juntas soldadas en términos de seguridad y fiabilidad se realizan pruebas radiográficas. La resistencia a la compresión y dureza se midieron para verificar la resistencia óptima de la junta.

Para los resultados, se prepararon 20 especímenes, los cuales se soldaron mediante una técnica de cordones multipaso, y limpieza entre cordón y cordón

con un cepillo especial. Posteriormente se sometieron a esfuerzo de compresión para obtener la resistencia a la compresión de las juntas soldadas (Fig. 23). El valor de compresión más alto es un valor aproximado de 174.846 MPa para una probeta en la que los parámetros fueron los siguientes:

- Corriente 120 Amps
- Velocidad de alimentación 70 mm / s
- Stick out: 8 mm

La máxima resistencia a la compresión (Fig. 24) se logra principalmente debido al alto flujo de corriente durante el proceso de soldadura y el paso múltiple del electrodo en la interfaz de soldadura. Se puede verificar por el refinamiento de grano en la unión, causando impacto sobre las propiedades mecánicas de la articulación, ofreciendo así una buena resistencia a la tensión.

Se tomaron dos muestras que poseen la resistencia a la compresión más baja y más alta. Las diferencias entre estas dos muestras se comparan realizando una prueba radiográfica para visualizar las discontinuidades que se hayan podido generar durante el proceso de soldadura. El ensayo se llevó a cabo mediante rayos gamma con una fuente de cobalto. En los resultados de la examinación radiográfica (Fig. 25 a y b) no se mostraron discontinuidades presentes en la unión de la placa con el tubo [30].

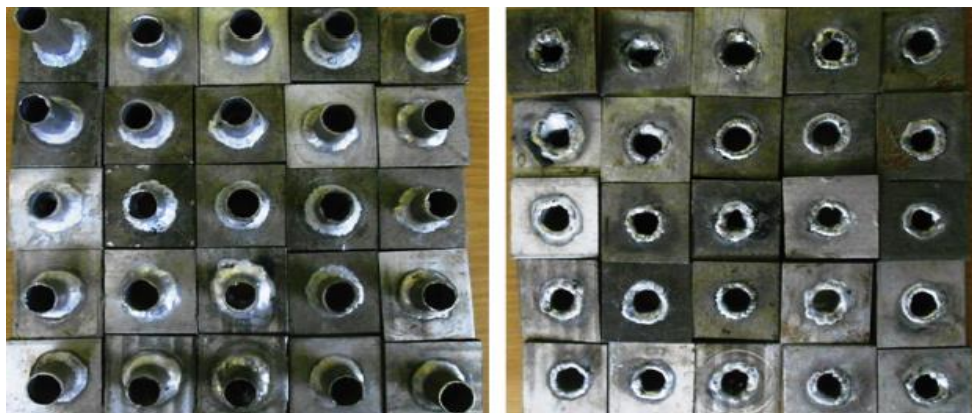


Fig. 23: Muestras soldadas [30]

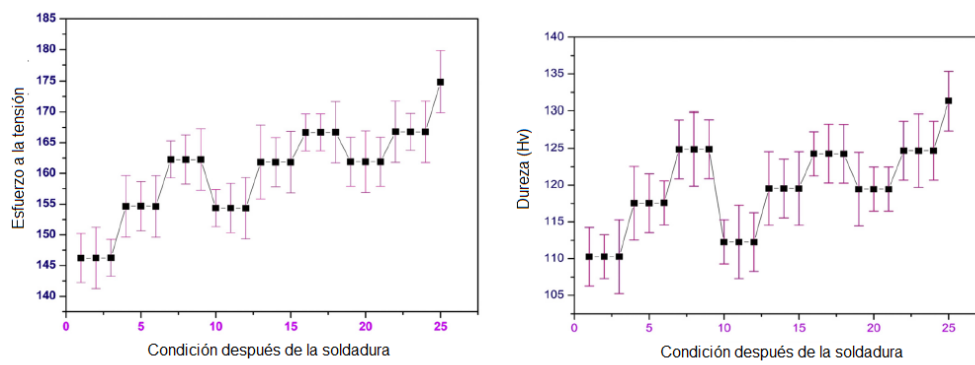


Fig. 24: Resultado del ensayo de las probetas [30]

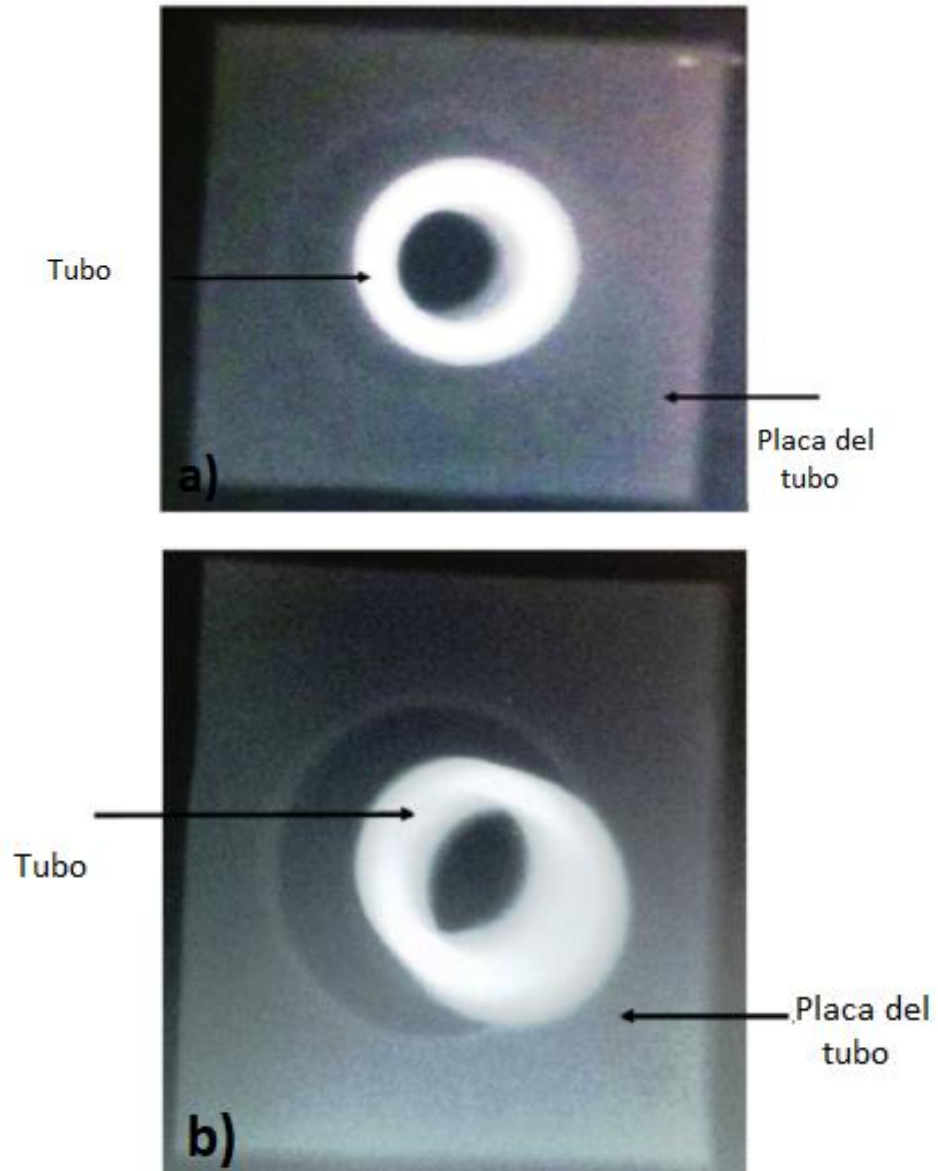


Fig. 25 a y b: a) mínima resistencia a la compresión, b) máxima resistencia a la compresión [30]



La nitruración gaseosa se ha convertido en un popular tratamiento difusional superficial para mejorar las propiedades superficiales, tanto propiedades de desgaste como de fatiga térmica y mecánica del hierro y del acero.

En el presente año 2017, un estudio realizado por el investigador Bo Wang y colaboradores [31], en donde llevaron a cabo la nitruración de acero AISI H13 con un flujo de gas  $\text{NH}_3$  a  $550^\circ\text{C}$  con una permanencia de 10 hrs. Se usaron tres capas nitruradas, las cuales mostraron una excelente resistencia al desgaste bajo cargas de 100N, pero mostró un funcionamiento deteriorado grave bajo condiciones de 300N.

El proceso difusional se llevó a cabo mediante tres potenciales de nitrógeno, de 0.18, 0.88 y 2.8 durante 10 hrs. En la Fig. 26a se muestra que no hay ninguna capa blanca como indicador del compuesto sobre la superficie nitrurada. En la Fig. 26b se observa dicha capa blanca solo que es demasiado superficial lo que denota que no fue suficiente el potencial de hidrógeno. En la Fig. 26c observamos la pieza nitrurada con un potencial de 2.8 durante dos horas, se puede observar un nivel general de mejora del espesor de la capa nitrurada.

La experimentación demostró que el potencial de hidrógeno usado en cada uno de los casos aumentó la dureza superficial de cada uno de los especímenes, los cuales a bajas cargas (100N) demuestran una buena resistencia al desgaste, mientras que a altas cargas (300N) sus propiedades mecánicas se ven comprometidas y no ofrecen una muy buena resistencia al desgaste superficial [31].

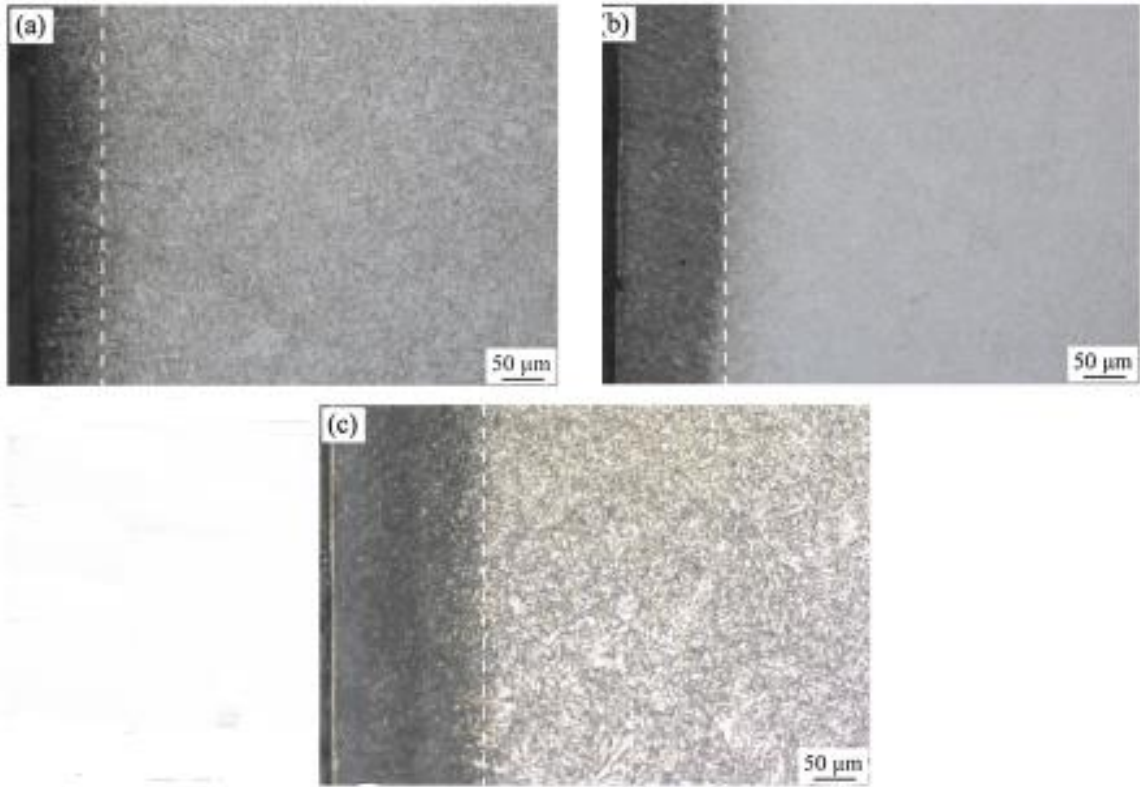


Fig. 26 a, b y c: Sección transversal de las piezas nitruradas [31]

El desgaste que experimentan los materiales es proporcional al tipo de condiciones a las cuales se someten y al servicio que se les encomiende. En los procesos de trabajo en caliente, la carga mecánica y térmica es cíclica, lo cual difiere en un daño superficial que se genera en los aceros que se someten a estas condiciones, por ejemplo el acero AISI H13. Se ha demostrado que el desgaste es un factor limitante en la vida útil de las piezas. Mejorar las propiedades mecánicas que propicien resistencia al desgaste, y por lo tanto, prologar la vida útil es uno de los desafíos de los investigadores. Generalmente, la resistencia al desgaste se encuentra estrechamente ligada a la microestructura del acero y a los tratamientos térmicos con los cuales se llegue a tratar dichos componentes.

Se ha demostrado que el comportamiento al desgaste de un acero AISI H13 depende del tamaño y distribución de la martensita. El comportamiento de desgaste y el mecanismo de desgaste del acero H13 se estudiaron sistemáticamente con un rango de carga normal de 50-200 N a un intervalo de temperatura ambiente de 25-40 °C en un estudio realizado por S. Q. Wang y colaboradores [32]. En la Fig. 27, se observan los resultados obtenidos a partir de la experimentación realizada. Se denota que la resistencia al desgaste se correlacionaba estrechamente con las condiciones de templado y el mecanismo de desgaste. El acero primeramente se austenizó a 1040°C durante 20 minutos y se enfrió lentamente para así obtener una pequeña cantidad de austenita retenida. Después de ello se templó a 200, 440, 500, 600 y 700°C durante 2 hrs y el mecanismo de enfriamiento fue al aire. Se consiguió un endurecimiento secundario con una dureza de 56 HRC a 500°C. Para la resistencia al impacto, apareció una tendencia inversa en comparación con la variación de la dureza, debido a que en el acero con mayor dureza la ductilidad decreció y se volvió más frágil, por lo tanto más susceptible al trabajo de impacto.

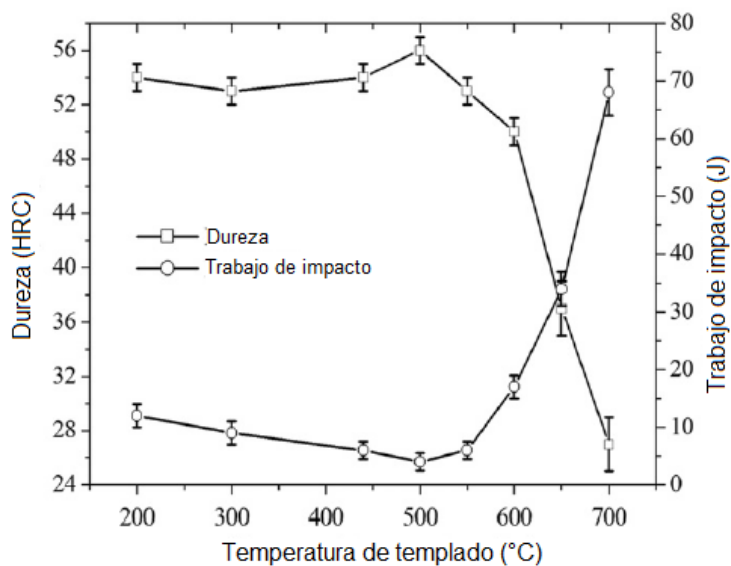


Fig. 27: Variación de la dureza y trabajo de impacto [32]

En conclusión, durante el proceso, un desgaste mecánico prevaleció a 25°C, los especímenes de alta dureza (templado a 200, 440 y 600°C) presentaron las mejores resistencias al desgaste y los especímenes de baja dureza (templado en 650 y 700°C) la menor. La baja resistencia al desgaste de la muestra de alta dureza (templada a 500 ° C) podría atribuirse a su menor resistencia a la fractura [32].

## CAPÍTULO 4

### CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se presenta el desarrollo de la metodología que se utilizó para la rehabilitación de insertos de AISI H13 mediante el proceso GTAW. Dichos insertos (Fig. 28) pertenecen a moldes que sirven para el vaciado de aluminio y formado de cabezas que son usadas para motores de automóviles, las piezas pertenecen a una empresa dedicada a la industria metal-mecánica ubicada en Saltillo, Coahuila México.

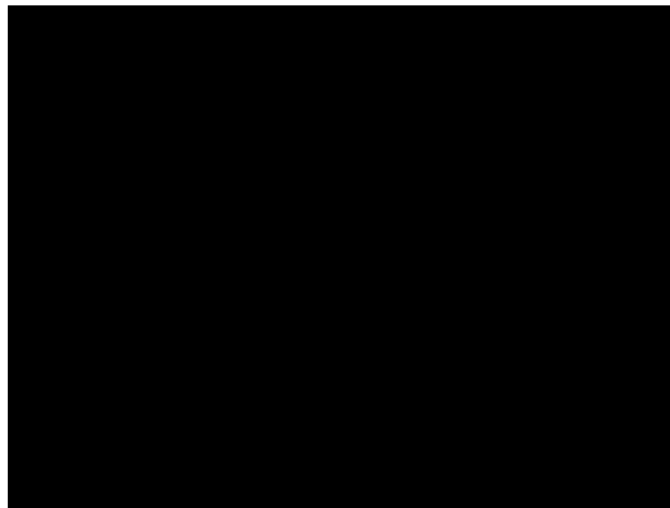


Fig. 28: Inserto erosionado de acero AISI H13 [cortesía empresa metal-mecánica]

Posterior a la rehabilitación de los insertos erosionados por el propio proceso de vaciado y moldeado (Fig. 29), se sometieron a ensayo no destructivo

radiográfico para identificar las discontinuidades generadas durante el proceso de soldadura, los resultados obtenidos se correlacionarán con la especificación AWS B 2.1 para determinar si las piezas recuperadas cuentan con los criterios de aceptación y pasan a proceso de maquinado o se rechazan y se vuelven a soldar.

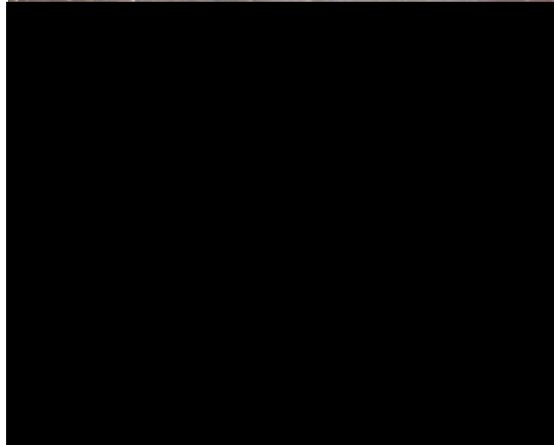


Fig. 29: Inserto rehabilitado [cortesía empresa metal-mecánica]

El problema radica en la presencia de porosidad en la zona del inserto recuperado (Fig. 30), generando con esto el desgaste prematuro de los especímenes y la generación de otro tipo de defectos como cuarteaduras, grietas, erosión, desprendimiento de material, por otro lado, propician al dimensionamiento erróneo de la pieza vaciada.

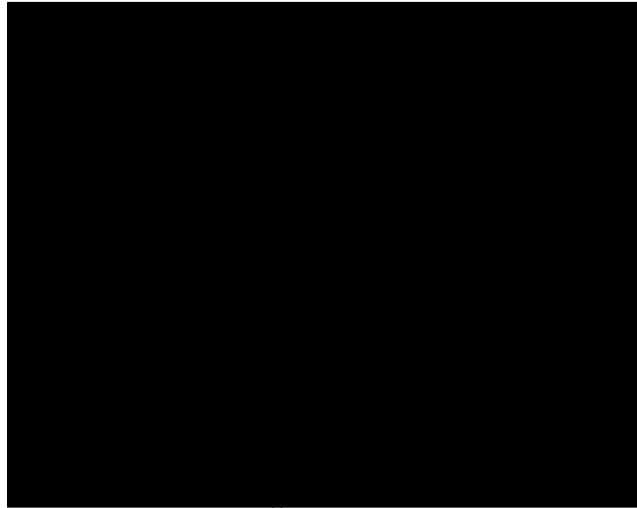


Fig. 30: Inserto con porosidad [cortesía empresa metal-metálica]

#### 4.1 Materiales y equipo

En la actualidad, los aceros grado herramienta son empleados en el área de la producción de piezas plásticas y/o metálicas, dicho trabajo representa constantes ciclos de calentamiento y enfriamiento, lo cual demanda materiales con estabilidad mecánica a altas temperaturas. El acero AISI H13, gracias a que es un acero de medio carbono y a los elementos aleantes presentes en su composición química brindan las características necesarias para que cumplan la función anteriormente descrita. Como material de aporte se usaron electrodos tipo Eureka (eureka 31), el cual tiene buena resistencia a la fatiga térmica cuando se somete a ciclos alternativos de calentamiento y enfriamiento.

En la Tabla 9 se muestra la composición química del acero AISI H13 y a su vez en la Tabla 10 se presentan las propiedades mecánicas, en la Tabla 11 se muestra la composición química del material de aporte tipo eureka 31.

Tabla 9: Composición química del acero AISI H13

Designación	<i>Composición % en peso</i>						
AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
	0.32-0.35	.20-.50	.80-1.20	4.75-5.50	0.30 máx.	1.10-1.75	0.80-1.20

Tabla 10: Propiedades mecánicas del acero AISI H13

Esfuerzo de tensión MPa	Esfuerzo de cedencia MPa	Elongación %	Reducción de área %	Energía de impacto (Charpy) J	Dureza (HRC)
1960	1570	13	46.2	16	52

Tabla 11: Composición química del material de aporte tipo Eureka 31 [cortesía empresa metal-mecánica]

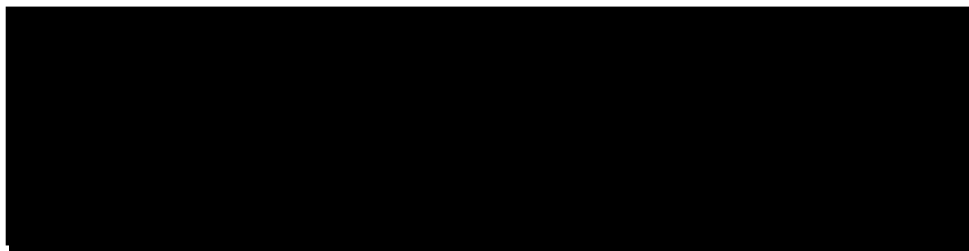
<i>Composición % en peso</i>						<i>Dureza (HRC)</i>
C	Mn	Si	Cr	Mo	V	49 - 54
0.35	.80	.80	5.0	1.5	1.0	

La caracterización microestructural de las zonas de interés se llevó a cabo mediante microscopía óptica, se usó un microscopio de platina invertida de la marca Nikon modelo Eclipse MA200 y microscopía electrónica de barrido con un equipo Bruker Xsense modelo Tescan Mira 3. Para los perfiles de microdureza se utilizó un microdurómetro de la marca Wilson Wardness, modelo Tukon 2500, empleando 500 gr de carga por cada indentación.







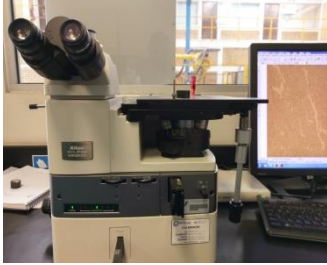



Se repararon 3 especímenes que presentaban erosión con diferentes características como dimensiones, geometría, profundidad, material desprendido. Para la recuperación se utilizó un equipo para GTAW de la marca Miller modelo Syncrowave 350 LX series, los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Datos de los especímenes rehabilitados [cortesía empresa metal-mecánica]



Los equipos utilizados para la realización de la experimentación se ilustran en la Tabla 13, que van desde el corte de las muestras hasta la caracterización y toma de metalografías.

Tabla 13: Equipos usados en el desarrollo de la experimentación [Cortesía Comimsa]

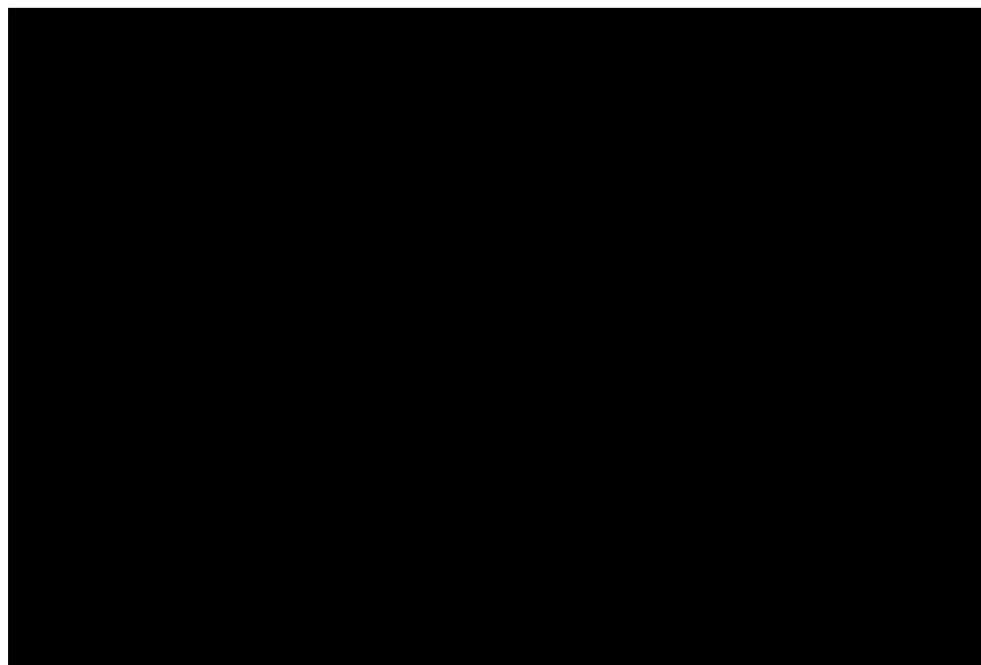
			
<p>Cortadora: Struers Modelo: Discotom - 10</p>	<p>Montadora: Struers Modelo: Cito Press - 20</p>	<p>Pulidora: DEMP2020 Lijas: 240, 320, 400, 600</p>	<p>Pulidora: DEM P1020 Paño: Microcloth</p>
			
<p>Microscopio Nikon Eclipse MA200</p>	<p>Estereoscopio Nikon SMZ 745T</p>	<p>Microdurómetro Wilson Hardness Tukon 2500</p>	<p>Oxford Instruments PMI Master Smart</p>

## CAPÍTULO 5

# RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para ratificar la composición química del material base de las muestras, se realizó un análisis químico por chispa, se le hicieron 4 pruebas, el promedio de las cuatro se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14: Resultado del análisis químico por chispa

A large black rectangular area representing a redacted table. The table content is completely obscured by a solid black fill.

Se realizó el corte del espécimen número 1 (Fig. 31), se montó y se preparó la muestra para una examinación metalográfica con el fin de revelar la microestructura presente, mostrar las regiones de interés y una prueba de microdureza de forma transversal (se ilustra mediante puntos rojos el área en donde se realizó cada indentación), verificando de esa manera si hubo afectación en las propiedades mecánicas del material base respecto a la ZAC y a la zona de fusión.



Fig. 31: Macrografía del corte transversal del espécimen 1

Se tomaron metalografías a 50x y 100x del material base (Fig. 32 a y b) para corroborar su estructura martensítica. Dicha muestra se cortó, se montó en baquelita y posteriormente se desbastó con lijas de granulometría 240, 320, 400 y 600, posteriormente se pulió sobre un paño microcloth y se procedió a la inspección (bajo norma ASTM E-3). Para revelar la microestructura del metal base (MB), la zona afectada por el calor (ZAC) y la zona de fusión (ZF), se realizó un ataque por inmersión en un vidrio de reloj durante 2 segundos con nital (ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  + etanol  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ ) en una concentración del 2%, posteriormente se neutralizó el nital, se secó y se volvió a atacar con berahas (3 gr de metabisulfito de potasio  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$  + 10 gr de disulfito de sodio  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  +  $\text{H}_2\text{O}$ ) durante 5 segundos (bajo norma ASTM E-407). Resultados se observan en las metalografías que corresponden a las Fig. 33 a y b, en donde se muestra claramente la presencia de ferrita widmanstätten en la zona de fusión.

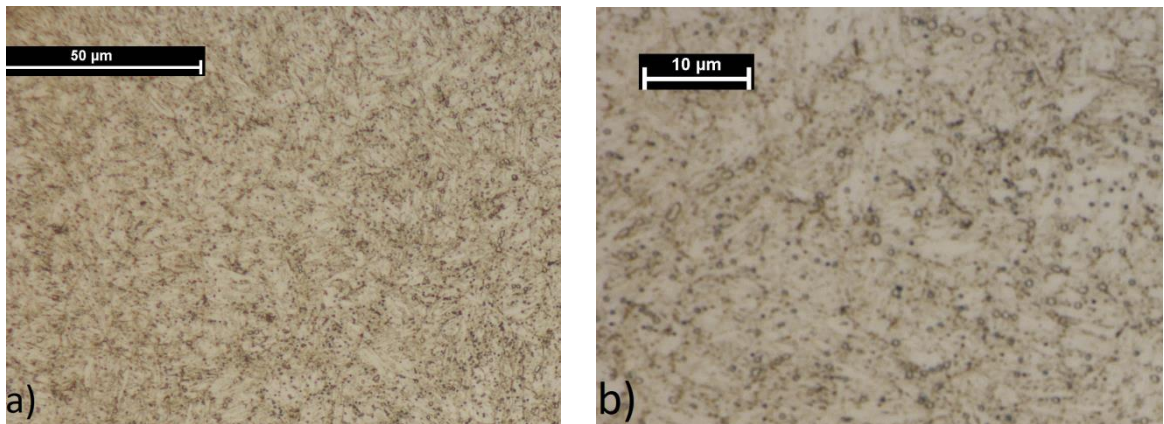


Fig. 32 a y b: Microestructura martensítica del material base a 50x y 100x

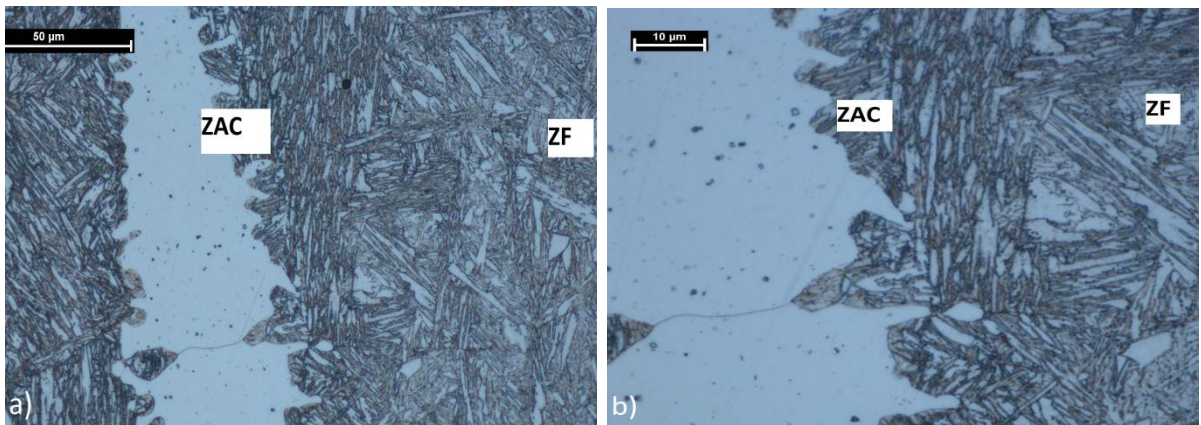


Fig. 33 a y b: Microestructura de la ZAC y la zona de fusión a 50x y 100x

De igual manera, se llevó dicha muestra al microscopio electrónico de barrido (MEB) y se muestran imágenes obtenidas mediante electrones secundarios de las 3 zonas de interés, se ilustran en la Fig. 34 a, b y c. En la Fig. 34a se puede observar una estructura martensítica con carburos dispersos, en la 34b durante el proceso de soldadura y en la 34 c en la zona de fusión encontramos la presencia de ferrita widmanstatten.

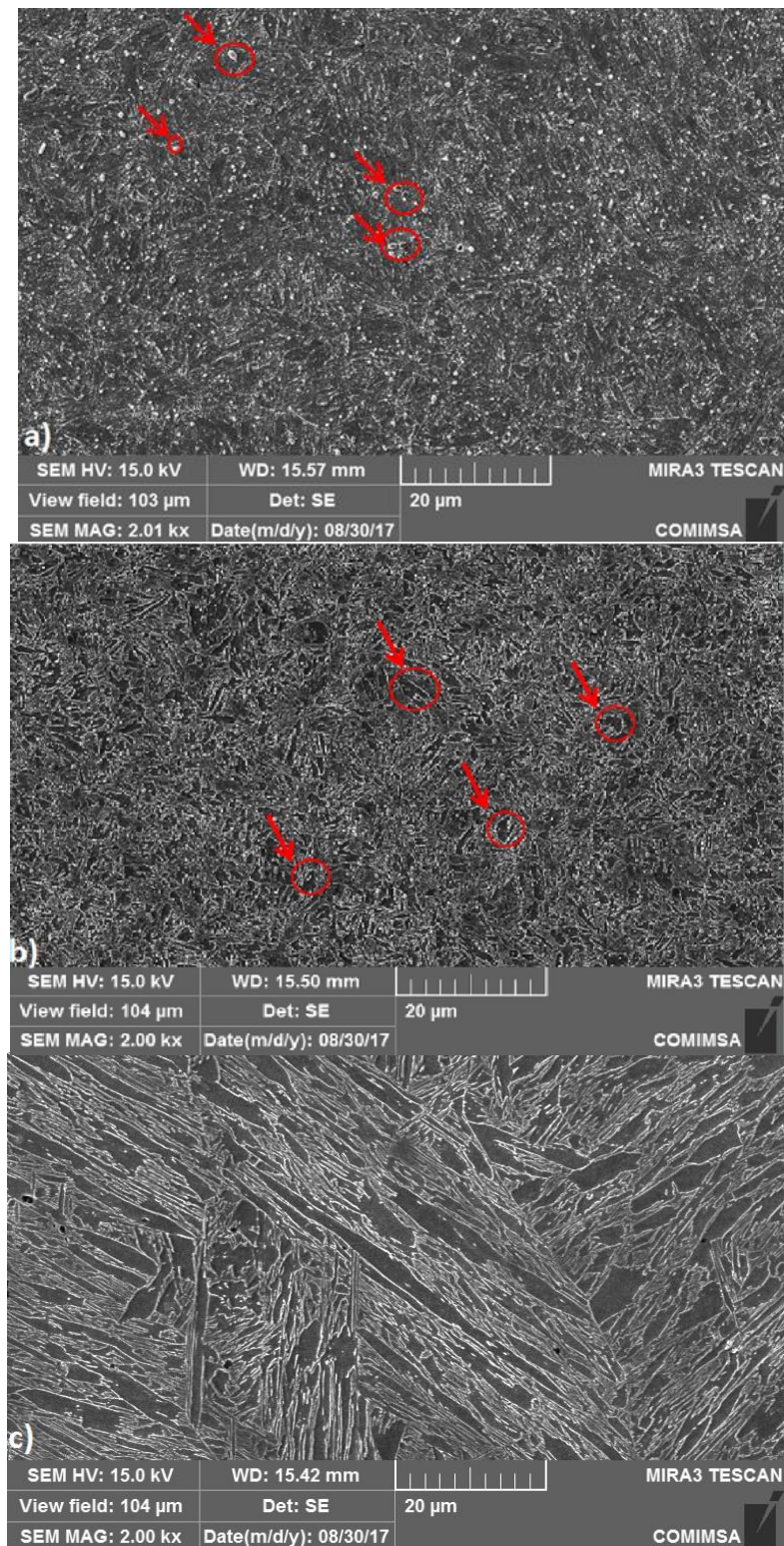


Fig. 34 a, b, y c: Imágenes obtenidas mediante electrones secundarios: a) metal base, b) ZAC, c) zona de fusión

Para el espécimen número 2, se llevó acabo la preparación de igual manera que la pieza anterior, puliendo y atacando con los mismos reactivos, los resultados se presentan en las Fig. 35. En las Fig. 36 a y b se muestran los resultados de las metalografías del material base mientras que en las Fig. 37 a y b las metalografías de la zona afectada por el calor, en las Fig. 38 a y b las de la zona de fusión y finalmente en la Fig. 39 a,b y c imágenes de MEB de dicho espécimen.

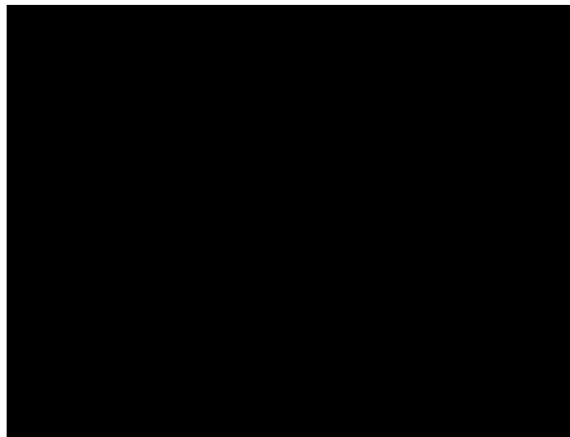


Fig. 35: Macrografía del corte transversal del espécimen 2

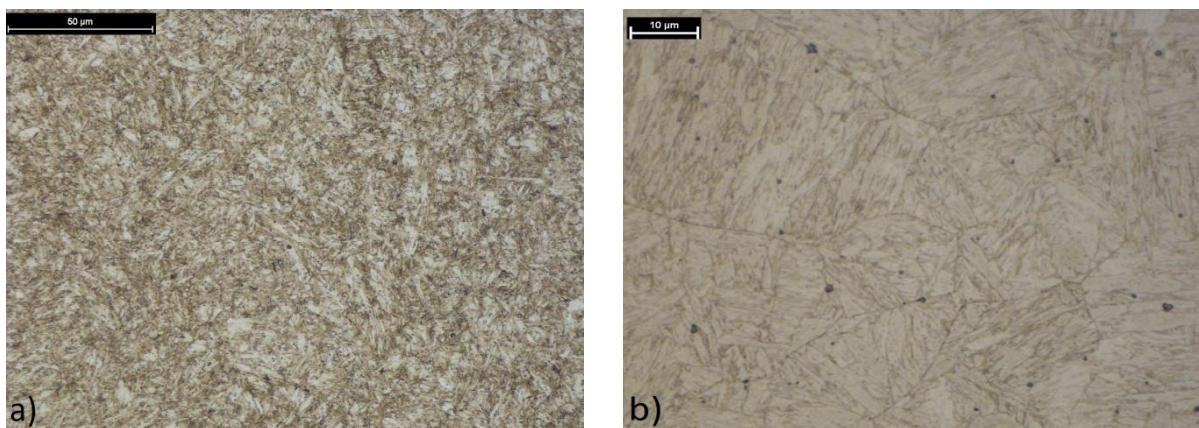


Fig. 36 a y b: Metalografías del material base a 50x y 100x respectivamente

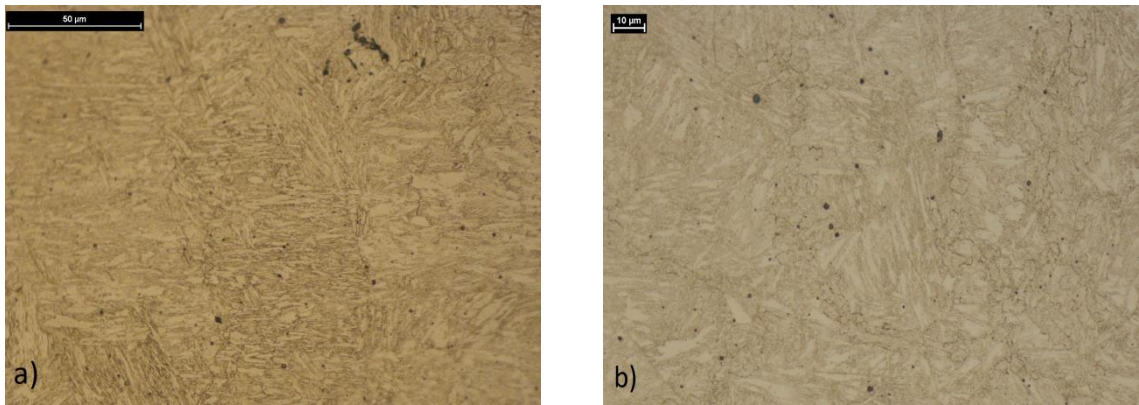


Fig. 37 a y b: Metalografías de la ZAC a 50x y 100x respectivamente

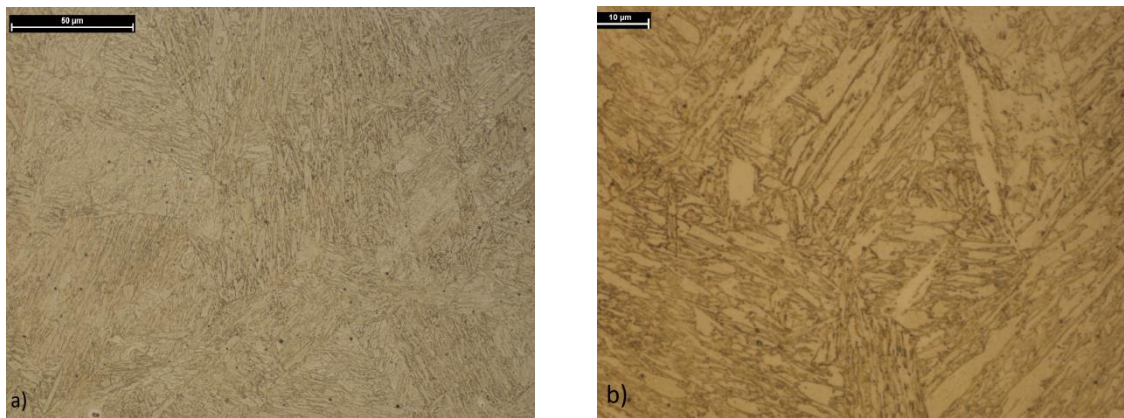


Fig. 38 a y b: Metalografías de la zona de fusión a 50x y 100x respectivamente



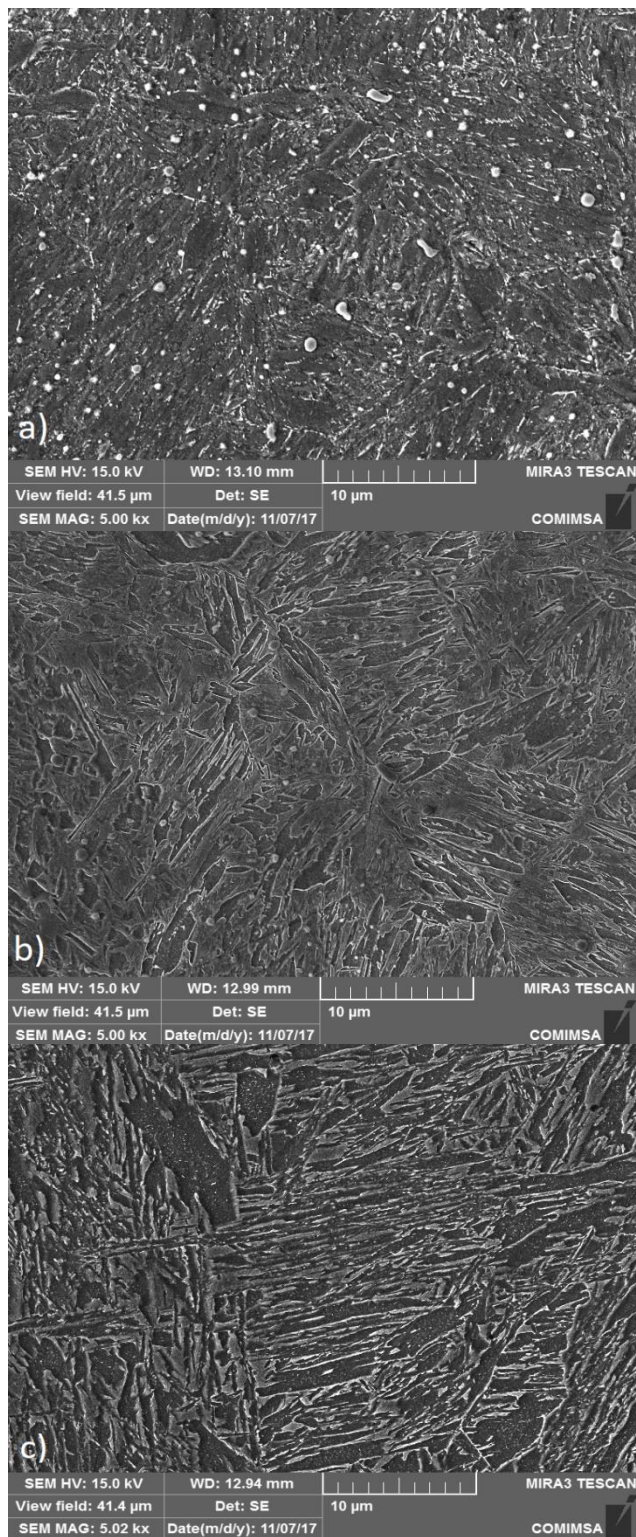


Fig. 39 a, b y c: Imágenes obtenidas mediante electrones secundarios: a) metal base, b) ZAC, c) zona de fusión

Para la tercera muestra soldada, se repitió el mismo proceso de preparación metalográfica que las dos anteriores, de la misma forma se le practicó un perfil de microdureza realizando 5 indentaciones por cada zona (metal base, zona afectada por el calor y la zona de fusión), en donde cada punto rojo de la macrografía hace una referencia de la ubicación de cada indentación (Fig. 40), los resultados de las diferentes zonas se muestran en las Fig. 41-44.

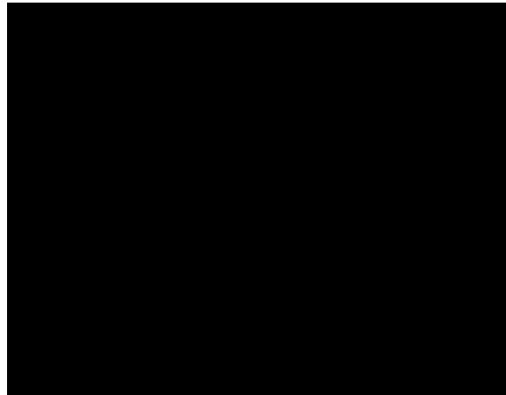


Fig. 40: Macrografía del corte transversal del espécimen 3

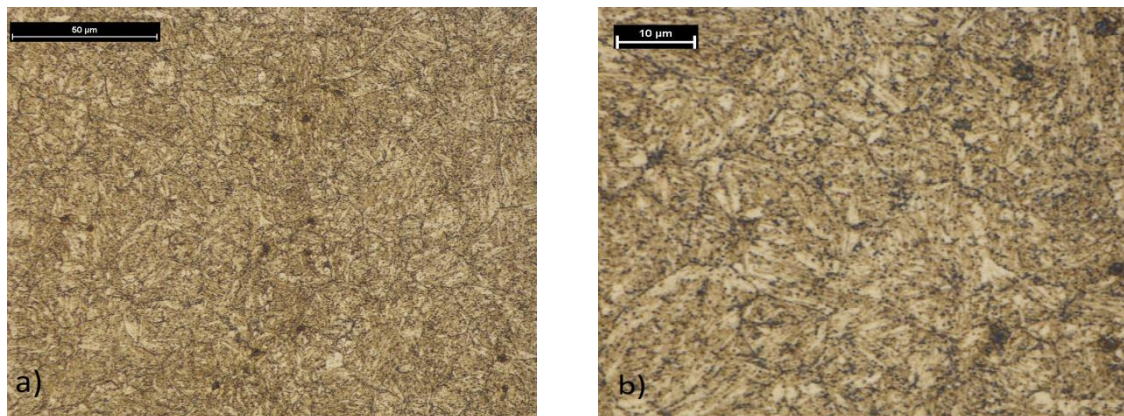


Fig. 41 a y b: Metalografías del material base a 50x y 100x respectivamente

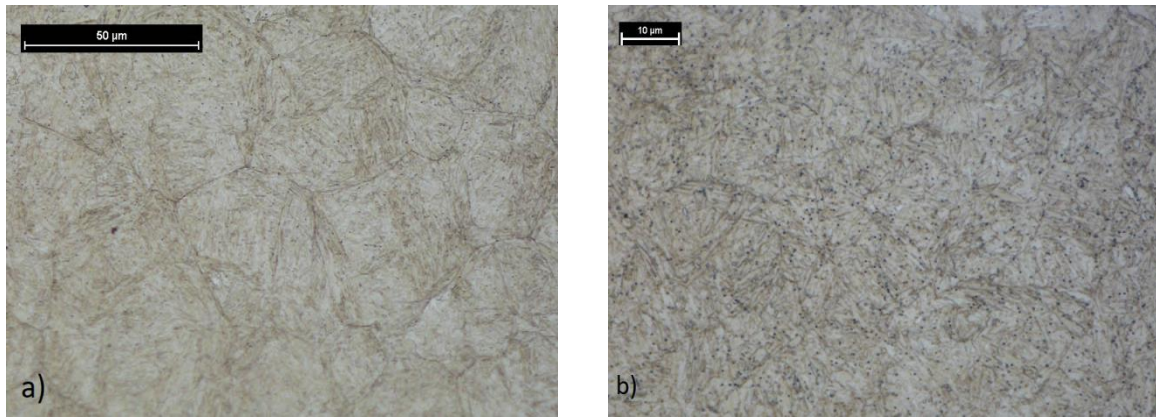


Fig. 42 a y b: Metalografías de la ZAC a 50x y 100x respectivamente

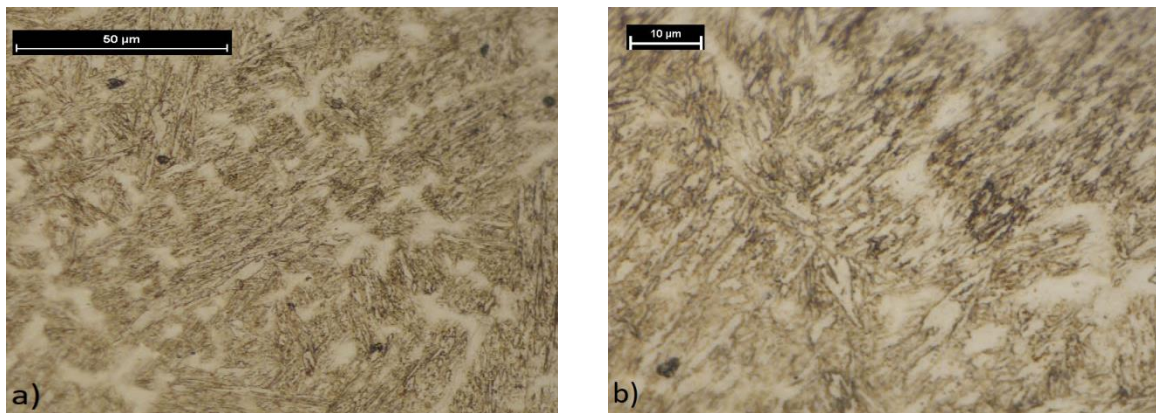


Fig. 43 a y b: Metalografías de la zona de fusión a 50x y 100x respectivamente

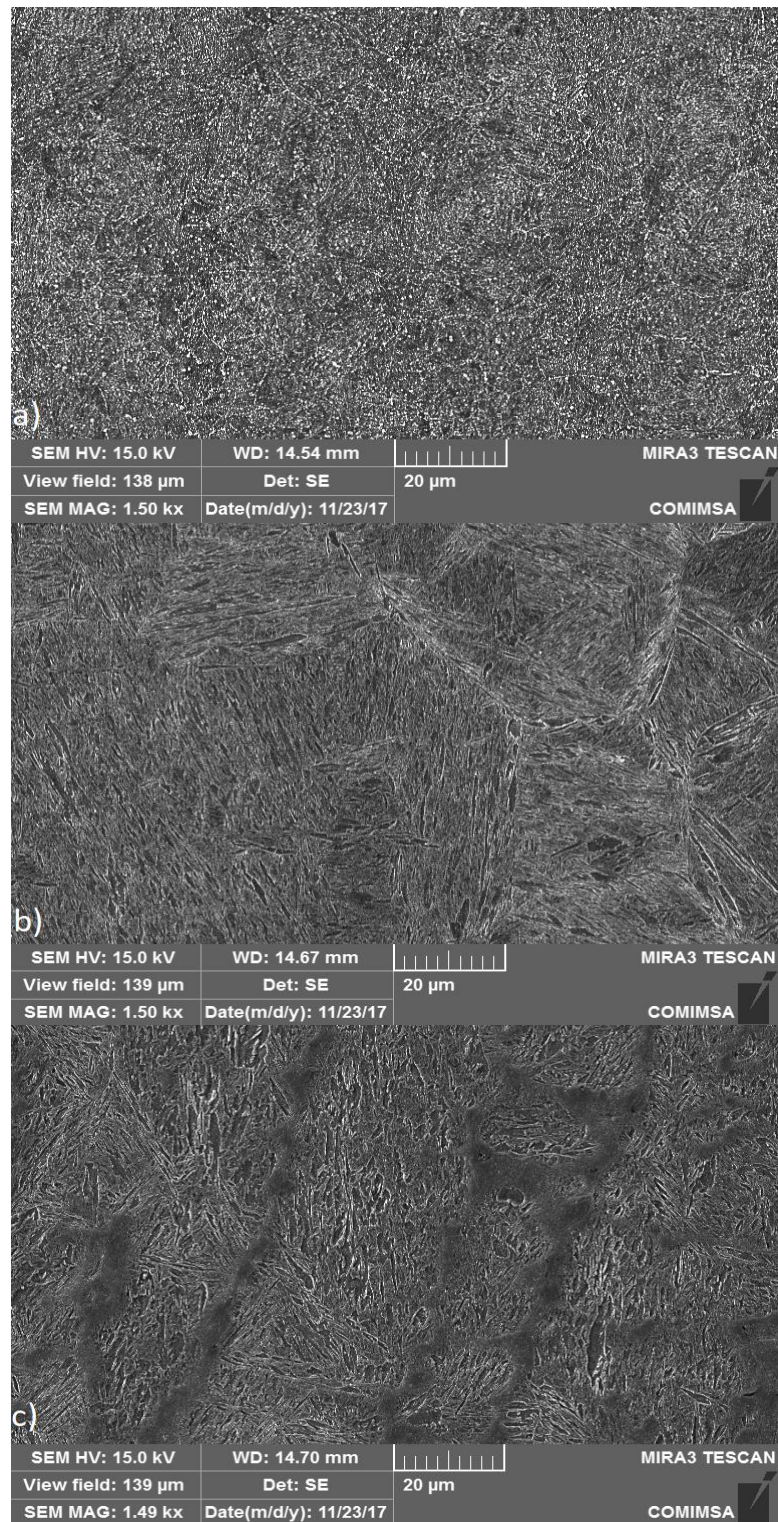


Fig. 44: Imágenes obtenidas mediante electrones secundarios, a) metal base, b) ZAC, c) zona de fusión

Según la ecuación, el calor de entrada (HI por sus siglas en inglés) se calcula mediante la ecuación 1 [33]:

Ecuación 1: Calor de entrada

$$CE = \frac{(Amperaje)(Voltaje)(60)}{(Velocidad\ de\ avance)(1000)} = \text{kJ/mm}$$

Dónde:

CE= Calor de entrada

kJ= Kilojoules

Tomando en cuenta la ecuación 1 y los valores de los parámetros con los que se soldaron las piezas (Tabla 12), el cálculo del calor aportado por el proceso de soldadura a los especímenes rehabilitados son los siguientes:

Espécimen 1: CE= [REDACTED] = [REDACTED]

Espécimen 2: CE= [REDACTED] = [REDACTED]

Espécimen 3: CE= [REDACTED] = [REDACTED]

Cuando el metal depositado por un proceso de soldadura solidifica a temperatura ambiente existen dos mecanismos de transformación, denominados de reconstrucción y desplazamiento; el mecanismo de reconstrucción es un proceso difusional de baja velocidad llevado a cabo a temperaturas relativamente altas, se rige por la transformación de la ferrita y la perlita. Posteriormente se

encuentra la transformación por desplazamiento en donde la transformación tiende a ser rápida y a baja temperatura y las fases características de este fenómeno son la ferrita Widmanstatten, ferrita acicular, bainita y la cementita [34,35].

Tomando en cuenta la cita anterior y los valores de las entradas de calor de cada espécimen, podemos decir que en el primer espécimen recuperado, debido a la entrada de calor, el enfriamiento fue relativamente lento y propició a la formación de ferrita Widmanstatten (Fig. 34 c) en la zona de fusión y ocurrió un refinamiento de grano en la zona afectada por el calor (Fig. 34 b). Lo mismo sucedió con el espécimen 2, la entrada de calor propició a un enfriamiento lento y la formación de ferrita Widmanstatten (Fig. 39 c) y un refinamiento de grano (Fig. 39b); por otra parte, la tercera muestra debido a los parámetros con los que se soldó, el aporte de calor fue menor, de tal manera que el enfriamiento fue rápido en comparación a los dos anteriores especímenes, lo que dio lugar a la formación de martensita en la zona de fusión (Fig. 44 c) y al consecuente refinamiento de grano en la zona afectada por el calor (Fig. 44 b).

De manera gráfica (Fig. 45) se puede observar el comportamiento en cuanto a microdurezas en las zonas de interés de los 3 especímenes, de los cuales los dos primeros se nota un decremento de la dureza en la zona de fusión con respecto a la ZAC y en el tercer espécimen no se nota discrepancia entre las mismas dos áreas, denotando la dureza alcanzada en la zona de fusión debido al rápido enfriamiento por el bajo calor aportado por el proceso de soldadura.

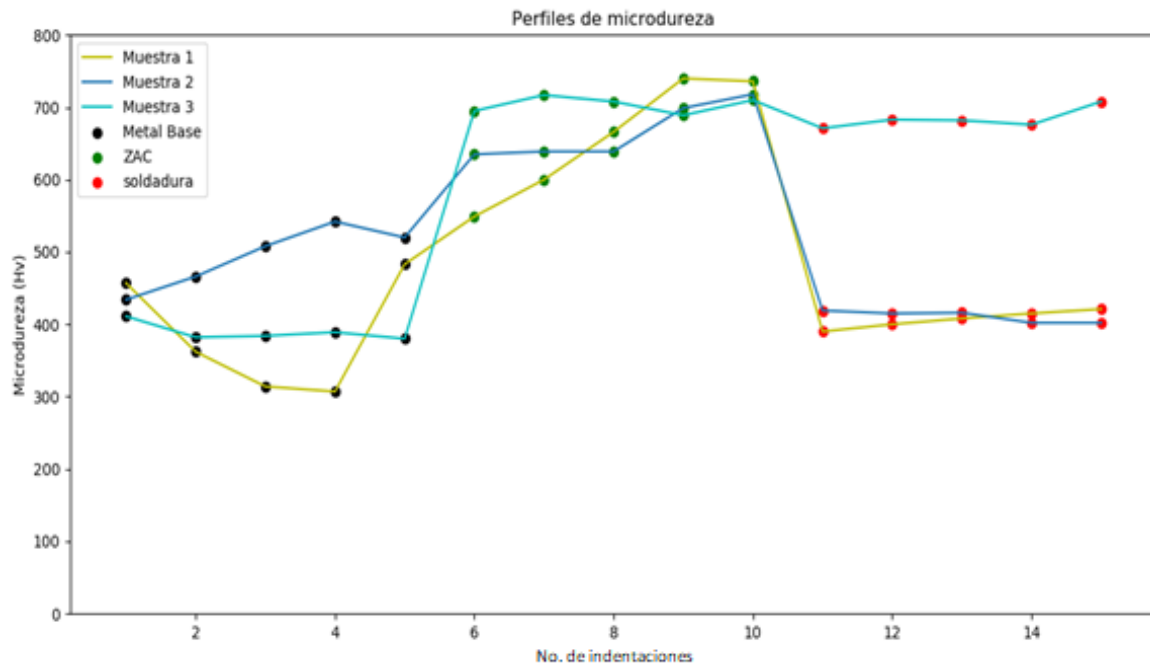


Fig. 45: Gráfica de los perfiles de microdureza de los 3 especímenes reparados

Se examinaron las 3 probetas soldadas mediante ensayo no destructivo radiográfico, los resultados se muestran en las Figuras 46-48. La figura 48 a y b corresponden a la misma muestra, se le practicó un corte transversal para poderla observar de manera adecuada debido a su geometría. En las primeras dos muestras que corresponden a parámetros de soldadura usados comúnmente en la empresa metal-mecánica, se puede observar porosidad dispersa, inclusiones de tungsteno, porosidad alargada, las cuales se cuantificaron, se midieron y se aplicó el criterio de aceptación de la especificación AWS B 2.1.

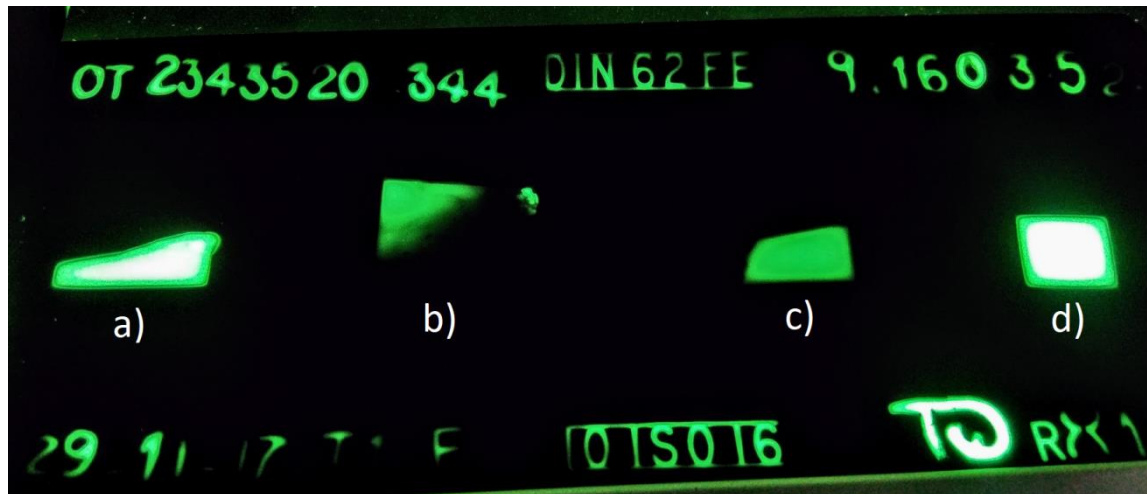


Fig. 46: Resultados del ensayo radiográfico a insertos recuperados [fuente propia]



Fig. 47 a, b, c y d: Geometría y ubicación de las discontinuidades presentes [fuente propia]

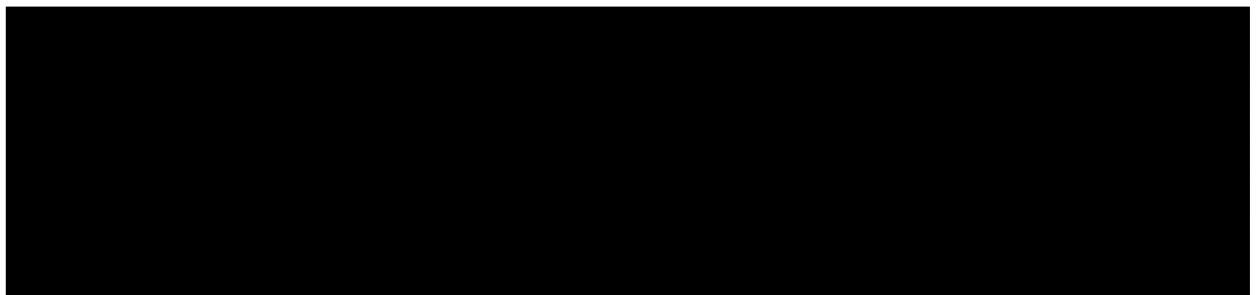


Fig. 48 a, b, c y d: Ubicación de las discontinuidades y dimensionamiento de piezas recuperadas [fuente propia]

La radiografía fue tomada con una fuente de rayos x de marca conocida, 160 Kv, 3.5 mA y un tiempo de exposición de 2.5 minutos. Las discontinuidades grabadas en la radiografía mostrada en la Fig. 46 se compararon de acuerdo a



la Tabla 8 de los criterios de aceptación de la especificación AWB B2.1; según el criterio 1 del Anexo 5, los tres especímenes (1 a-b, c y d) carece de grietas, penetración y fusión incompleta, por lo tanto las 3 muestras aprueban el mismo.

Mediante el segundo criterio, se descarta que alguna de las 3 muestras presente discontinuidades lineales, debido a que son elípticas, según sus dimensiones, por lo tanto el segundo criterio de igual manera las piezas están dentro del mismo.

Según el criterio 3 de la especificación, se puede establecer una aceptación o rechazo según la Fig. 20 y la Tabla 8, en este caso se evaluó por la segunda debido a que los especímenes carecen de las dimensiones de referencia que se especifican. La máxima dimensión de indicaciones individuales redondeadas es de 1/8"; en este caso, la más grande revelada en la placa radiográfica no excede el 18", mientras que el resultado del tercer espécimen reveló estar libre de discontinuidades, por lo tanto las 3 quedan dentro de los criterios de aceptación de la especificación.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES

La consulta y análisis bibliográfico permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- ✓ Los aceros grado herramienta H13 a pesar de ser aceros para trabajo en caliente, sufren erosión, fracturas, cuarteaduras, desprendimiento de material debido a los constantes ciclos de trabajo a los que son sometidos, por ende es importante saber de qué manera se repara dicho herramental.
- ✓ De acuerdo a las dimensiones, geometría y discontinuidades presentes en los especímenes examinados se llega a la conclusión de que el examen radiográfico permite determinar el nivel de calidad interno de las soldaduras y a su vez la disposición ya sea de aceptación o rechazo de acuerdo a los requerimientos aplicables de la especificación AWS B2.1.
- ✓ El cuidado de la temperatura entre cada paso, el precalentamiento de la pieza y el post tratamiento térmico (si se requiere), refleja soldaduras de buena calidad, homogéneas y libres de defectos que pudiesen impactar en las propiedades mecánicas de los especímenes. Uno de los parámetros en los que no se puede tener control en absoluto (ya que el proceso de soldadura es manual) es la habilidad del soldador.
- ✓ El recurso humano es un factor determinante para una interpretación de imágenes radiográficas para un diagnóstico certero.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Morales B. 2017, "Reduccion de Porosidad en Moldes de Acero AISI H13 Después de Recuperación por Soldadura GTAW". [Tesis] [Saltillo, Coahuila, México], Corporación Mexicana de Investigación en Materiales.
- [2] American Welding Society, " Guide For The Nondestructive Examination of Welds, AWS B1.10M", American Welding Society, 4<sup>th</sup> Edition, 550 N.W. LeJeune Road, Miami FL 33126, 2009.
- [3] American Welding Society, "Certification Manual For Welding Inspectors." American Welding Society, Doral, FL., 2013.
- [4] R. W. Messler and R. W. Messler, "Joining of materials and structures," *Join. Mater. Struct.*, pp. 285–348, 2004.
- [5] K. Weman, "6 - TIG welding," *Woodhead Publ. Ser. Weld. Other Join. Technol.*, pp. 63–69, 2012.
- [6] M. Ashby and K. Johnson, "Materials and Design," vol. 2, pp. 275–297, 2010.
- [7] D. L. Olson *et al.*, "Welding, Brazing, and Soldering," in *ASM Handbook*, 6th ed., vol. 6, T. B. Zorc, F. Reidenbach, and L. A. Harrison, Eds. ASM International, 2007.
- [8] Hobart Institute Of Welding Technology, "Gas Tungsten Arc Welding," vol. 1, p. 45373, 2012.
- [9] American Welding Society, *Manual de soldadura*, Octava Edi. Miami, FL 33126: Prentice Hall.
- [10] E. Oberg, F. D. J., H. H. Ryffel, and H. L. Horton, "Machinery ' s Handbook," vol. 29th Editi, pp. 1453–1458, 2012.
- [11] Industrial Press Inc., "Welding Essentials: Questions & Answers" 2nd Edition, William L. Galvery, Jr., Frank M. Marlow, PE., U.S.A. 2006.
- [12] Elsevier Science, "Electrical Engineer's Reference Book, 16<sup>th</sup> Edition, M.A. Laughton CEng., FIEE, D.J. Warne CEng., FIEE, British Library, Great Britain, 2003.
- [13] ASM Handbook, "Nondestructive Evaluation and Quality Control", ASM Handbook, Volume 17, Joseph R. Davis, Kathleen M. Mills, pp. 512-550, A ASM International, 1989.
- [14] S. H. Avner, "Introducción a la metalurgia fisica (Segunda edición)," in *Introducción a la metalurgia fisica (Segunda edición)*, Mc. Graw H., 1998.
- [15] I. T. Grades, "Tooling Material Selection."
- [16] R. A. Mesquita and C. A. Barbosa, "Failure Analysis in Tool Steels," pp.311–350, 2008.
- [17] The Minerals, Metals & Society, "Materials Processing and Interfaces", TMS 2012, 141 Annual Meeting & Exhibition, Volume 1, p.p 349-359, A John Wiley & Sons, Inc Publication, Orlando California, USA, 2012.
- [18] ASM International, "Alloy Digest". On and W. Wide, "Thermold h13 -," pp. 5–6, 1972.
- [19] Welding Handbook, "Materials and Applications, Part 1", Welding

- Handbook Committee, p.p. 221-260, Annette O'Brien, Carlos Guzman, Volume 4, 550 N.W. LeJeune Road Miami, FL 33126.
- [20] Society of Manufacturing Engineers, "Tool and Die Making Troubleshooter", Richard M. Leed, p.p 109-154, Association for Forming & Fabricating Technologies/SME, Dearborn, Michigan, 2003.
- [21] Hodder Headline Group, "Non-destructive Testing Techniques", Independent NDT Centre, France, John Wiley & Sons, Inc., New York, Toronto, 1997.
- [22] American Welding Society, "Chapter 15 Nondestructive Examination Methods," no. 2, pp. 141–238.
- [23] S. Radium, "A term applied to the angle at the center of a circle where the arc of the circumference is equal to the radius of the circle. Expressed as an angle, the radian is 57.3'." 1th Edition, 225 Wyman Street, Waltham MA 02451, U.S.A., 2012.
- [24] Elsevier Science, "Applied Welding Engineering: Processes, Codes and Standards", Ramesh Singh,
- [25] American Welding Society, "*Welding Processes, Part 1*", Ninth Edit., vol. 1, no. 1980. Miami, FL 33126: American Welding Society, 2004.
- [26] P. Commissioning, "Lees' Loss Prevention in the Process Industries," *Hazard Identification, Assess. Control*, vol. 1, pp. 2–48, 2012.
- [27] G. Mathers, "Weld defects and quality control," in *The welding of aluminium and its alloys*, CRC Press., Abington Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2002, pp. 199–215.
- [28] American Welding Society, "Specification for Welding Procedure and Performance Qualification, B 2.1:2005", American Welding Society, p.p. 1-274, 550 N.W. Lejeune Road, Miami Florida 33126.
- [29] D. Papageorgiou, C. Medrea, and N. Kyriakou, "Failure analysis of H13 working die used in plastic injection moulding," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 35, pp. 355–359, 2013.
- [30] S. Kannan, S. S. Kumaran, and L. A. Kumaraswamidhas, "An investigation on compression strength analysis of commercial aluminium tube to aluminium 2025 tube plate by using TIG welding process," *J. Alloys Compd.*, vol. 666, pp. 131–143, 2016.
- [31] B. Wang, X. Zhao, W. Li, M. Qin, and J. Gu, "Effect of nitrided-layer microstructure control on wear behavior of AISI H13 hot work die steel," pp. 3–7, 2017.
- [32] M. X. Wei, S. Q. Wang, L. Wang, X. H. Cui, and K. M. Chen, "Tribology International Effect of tempering conditions on wear resistance in various wear mechanisms of H13 steel," *Tribology Int.*, vol. 44, no. 7–8, pp. 898–905, 2011.
- [33] Melfi, Teresa, "New Code Requirements for Calculating Heat Input", American Welding Society, pp. 61-63, 2010.
- [34] Leonard E. Samuels, "Optical Microscopy of Carbon Steels", American Society for Metals, 1980, pp. 255-277, 293-308.
- [35] G. Thewlis, "Classification and Quantification of Microstructures in Steels", 2013

# LISTADO DE FIGURAS

Fig. 1: Proceso de soldadura GTAW [2] .....	9
Fig. 2: Polaridades del proceso GTAW [9].....	12
Fig. 3: Corriente pulsada [9].....	13
Fig. 4: Soldadura producida por arco pulsado [8] .....	13
Fig. 5: Socavado [13 ] .....	18
Fig. 6: Superposición [13 ] .....	19
Fig. 7: Inclusión de escoria [13] .....	19
Fig. 8: Inclusiones de tungsteno .....	19
Fig. 9: Rechupe.....	20
Fig. 10: Inclusiones de óxido .....	20
Fig. 11: Fusión incompleta [13 ].....	20
Fig. 12: Falta de penetración [13] .....	21
Fig. 13: Cráter [13].....	21
Fig. 14: Salpicaduras [13] .....	22
Fig. 15: Golpe de arco [13] .....	22
Fig. 16 a, b, c y d: Diferentes tipos de porosidades [13] .....	24
Fig. 17: Porosidad agujero de gusano, corte longitudinal 20x [13].....	24
Fig. 18: Esquema de pieza radiada [25] .....	35
Fig. 19: Penetrámetros, indicadores de calidad de imagen en forma de plaqueta y alambre [2] .....	36
Fig. 20 a, b, c y d: Descripción gráfica discontinuidades redondeadas permisibles en RT [28] .....	42
Fig. 21: Microestructura martensítica presente en acero AISI H13 [29].....	44
Fig. 22: Grieta en el espécimen producida por esfuerzos de expansión-compresión [29] .....	45
Fig. 23: Muestras soldadas [30].....	47
Fig. 24: Resultado del ensayo de las probetas [30] .....	47

Fig. 25 a y b: a) mínima resistencia a la compresión, b) máxima resistencia a la compresión [30] .....	48
Fig. 26 a, b y c: Sección transversal de las piezas nitruradas [31].....	50
Fig. 27: Variación de la dureza y trabajo de impacto [32] .....	51
Fig. 28: Inserto erosionado de acero AISI H13 [cortesía empresa metal-mecánica] .....	53
Fig. 29: Inserto rehabilitado [cortesía empresa metal-mecánica].....	54
Fig. 30: Inserto con porosidad [cortesía empresa metal-metálica].....	55
Fig. 31: Macrografía del corte transversal del espécimen 1 .....	60
Fig. 32 a y b: Microestructura martensítica del material base a 50x y 100x.....	61
Fig. 33 a y b: Microestructura de la ZAC y la zona de fusión a 50x y 100x.....	61
Fig. 34 a, b, y c: Imágenes obtenidas mediante electrones secundarios .....	62
Fig. 35: Macrografía del corte transversal del espécimen 2.....	63
Fig. 36 a y b: Metalografías del material base a 50x y 100x respectivamente .	63
Fig. 37 a y b: Metalografías de la ZAC a 50x y 100x respectivamente .....	64
Fig. 38 a y b: Metalografías de la zona de fusión a 50x y 100x respectivamente .....	64
Fig. 39 a, b y c: Imágenes obtenidas mediante electrones secundarios .....	65
Fig. 40: Macrografía del corte transversal del espécimen 3.....	66
Fig. 41 a y b: Metalografías del material base a 50x y 100x respectivamente .	66
Fig. 42 a y b: Metalografías de la ZAC a 50x y 100x respectivamente .....	67
Fig. 43 a y b: Metalografías de la zona de fusión a 50x y 100x respectivamente .....	67
Fig. 44: Imágenes obtenidas mediante electrones secundarios .....	68
Fig. 45: Gráfica de los perfiles de microdureza de los 3 especímenes reparados .....	71
Fig. 46: Resultados del ensayo radiográfico a insertos recuperados.....	72
Fig. 47: Geometría y ubicación de las discontinuidades presentes .....	72
Fig. 48 a, b, c y d: Ubicación de las discontinuidades y dimensionamiento de piezas rehabilitadas .....	72

# LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Discontinuidades comúnmente encontradas en el proceso GTAW [2] .	5
Tabla 2: Composición química de electrodos de tungsteno [9].....	14
Tabla 3: Composición química de los aceros grado herramienta [16] .....	26
Tabla 4: Composición química del acero AISI H13 [17].....	30
Tabla 5:: Propiedades mecánicas del acero AISI H13 [17].....	30
Tabla 6: Resistencia al reblandecimiento durante exposición a temperatura elevada [17] .....	30
Tabla 7: Discontinuidades lineales permisibles en RT [28].....	42
Tabla 8: Discontinuidades redondeadas permisibles en RT [28].....	43
Tabla 9: Composición química del acero AISI H13.....	56
Tabla 10: Propiedades mecánicas del acero AISI H13.....	56
Tabla 11: Composición química del material de aporte tipo Eureka 31 [cortesía empresa metal-mecánica].....	56
Tabla 12: Datos de los especímenes rehabilitados [cortesía empresa metal-mecánica] .....	57
Tabla 13: Equipos usados en el desarrollo de la experimentación [Cortesía Comimsa].....	58
Tabla 14: Resultado del análisis químico por chispa .....	59