

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Sección Ingeniería Mecánica



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### ESTUDIO DE LA FISURACIÓN EN CALIENTE EN EL SOLDEO DE LA ALEACIÓN AA6063-T6 MEDIANTE PROCESO GTAW SIN MATERIAL DE APORTE

Tesis a fin de optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el  
bachiller:

**JHORDANN ESPINOZA HURTADO**

**ASESOR: Paul Pedro Lean Sifuentes**

**Lima, Mayo de 2014**

## RESUMEN

El presente trabajo estudia de forma comparativa la tendencia a la fisuración en caliente de la aleación de aluminio AA6063-T6 de 2.8 milímetros de espesor mediante el proceso GTAW sin metal de aporte empleando tres condiciones de enfriamiento.

Se elaboraron diferentes procedimientos de soldadura para analizar la soldabilidad del material mediante la obtención de cupones con descarga de líneas de calor sometidos a bajo aporte térmico (menor a 325 KJ/m), mediano aporte térmico (350 KJ/m), y a alto aporte térmico (mayor a 400 KJ/m); modificando en cada caso la velocidad de disipación del calor mediante el uso de un respaldo de acero, un respaldo de cobre y un respaldo de cobre refrigerado con agua, con la finalidad de analizar su relación con la tendencia a la fisuración en caliente.

La inspección visual y los ensayos microestructurales realizados sobre los cupones con descarga de líneas de calor mostraron que bajo condiciones normales de soldeo no se logra evitar la aparición de fisuración en caliente. No obstante, si aseguramos que la soldadura presente una velocidad de enfriamiento superior al que normalmente se produce en procesos de soldadura, se podrá eliminar la aparición de fisuración en caliente. Ello se puede conseguir utilizando un respaldo de cobre, el cual presentó buenos resultados a bajo y mediano aporte térmico. Si bien es cierto, el respaldo de cobre refrigerado con agua logra eliminar la fisuración en caliente incluso para alto aporte térmico, no se recomienda su uso en soldadura debido a que este es un método poco práctico y difícil de utilizar en construcciones soldadas.

Por otro lado, se realizaron cupones soldados a tope sin el empleo de metal de aporte y con enfriamiento mediante respaldo de cobre. Estos cupones fueron sometidos a ensayos de líquidos penetrantes, doblado y tracción, comprobándose su integridad y obteniendo una resistencia promedio de 145 MPa. Estos resultados fueron comparados y cumplieron con las exigencias del código de soldeo estructural de aluminio AWS D1.2, concluyéndose que cuando se desee soldar la aleación de aluminio AA6063-T6 de 2.8 milímetros de espesor mediante el proceso GTAW y sin el uso de metal de aporte, se deberá garantizar una velocidad de enfriamiento superior al que se obtiene normalmente en procesos de soldadura, lo que se consigue asegurando un buen contacto entre el metal base y el respaldo de cobre a fin de favorecer una buena disipación de calor.

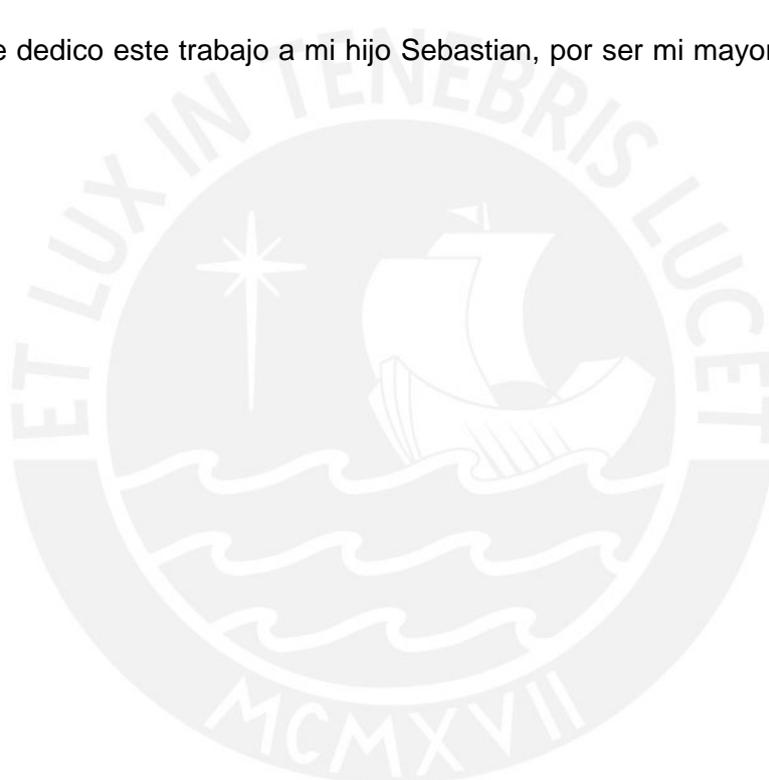
## DEDICATORIA

Deseo agradecer a mi madre, por todo su esfuerzo y total desprendimiento, por permitirme esta carrera que tanto estoy aprendiendo a querer.

A mi tío Tito, por despertar en mí el interés por la investigación.

A mí querida Luz, por el apoyo constante, depositando su entera confianza en cada reto que me propuse.

Finalmente dedico este trabajo a mi hijo Sebastian, por ser mi mayor motivación en la vida.



## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación, no hubiera sido posible sin el apoyo y motivación de varias personas. A todas ellas les expreso mis más sinceros agradecimientos:

A mi buen amigo, el Dr. Paúl Pedro Lean Sifuentes por ofrecerme su desinteresado apoyo, brindándome recomendaciones pertinentes durante el desarrollo de los ensayos de soldadura y por guiarme constantemente en la elaboración y redacción de mi tesis.

Al Ing. Raúl Hurtado Espejo, por facilitarme el uso de las instalaciones del Laboratorio de Materiales de la Universidad.

Al Ing. Rolando Nuñez Monrroy, por su apoyo en la inspección microestructural de las probetas.

A mi amigo Elvis Bello por trabajar junto a mí en horarios extra curriculares.

Mi entero agradecimiento a todos quienes trabajan en el Laboratorio de Materiales, por su amistad y por asistirme desinteresadamente durante los ensayos mecánicos.

Por último, deseo agradecer a todos mis familiares, por ser lo más grande que Dios me dio y por ser mi soporte anímico a lo largo de la carrera.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE .....	iv
INTRODUCCIÓN .....	1
1. ESTADO DEL ARTE .....	3
1.1. Aluminio puro .....	3
1.2. Aleaciones de aluminio .....	3
1.2.1. Aleaciones no tratables térmicamente .....	5
1.2.1.1. Serie AA1XXX .....	5
1.2.1.2. Serie AA3XXX .....	6
1.2.1.3. Serie AA4XXX .....	7
1.2.1.4. Serie AA5XXX .....	8
1.2.2. Aleaciones tratables térmicamente .....	8
1.2.2.1. Serie AA2XXX .....	9
1.2.2.2. Serie AA6XXX .....	10
1.2.2.3. Serie AA7XXX .....	11
1.3. Procesos de soldadura en aluminio y aleaciones .....	11
1.3.1. Proceso de soldadura oxiacetilénica .....	12
1.3.2. Soldadura por arco eléctrico manual con electrodos revestidos (SMAW) .....	13
1.3.3. Proceso de soldadura GMAW .....	14
1.3.4. Proceso de soldadura GTAW .....	16
1.4. Soldabilidad de aluminio y sus aleaciones .....	17
1.4.1. Limpieza superficial .....	18
1.4.2. Conductividad térmica .....	19
1.4.3. Dilatación térmica .....	19
1.5. Elección del material de aporte .....	19
1.6. Fisuración en caliente .....	20
1.7. Formas de reducir la fisuración en caliente .....	23
1.7.1. Control mediante elección de metales de baja sensibilidad a la fisuración en caliente .....	24
1.7.2. Control de la estructura de solidificación .....	24

1.7.3. Condiciones de soldadura favorables .....	26
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	29
2.1. Metodología .....	29
2.2. Materiales y proceso de soldadura .....	32
2.2.1. Metal base .....	32
2.2.2. Proceso de soldadura .....	33
2.2.2.1. GTAW .....	33
2.2.2.2. Gas de protección .....	34
2.2.2.3. Welding car .....	34
2.2.2.4. Variación de parámetros de soldeo .....	35
2.2.2.5. Intensidad de soldeo .....	36
2.2.2.6. Velocidad de soldeo .....	36
2.2.2.7. Longitud de arco .....	36
2.2.2.8. Descarga de líneas de calor .....	37
2.2.2.9. Equipo de protección personal .....	38
2.3 Elaboración de cupones de ensayo .....	38
2.3.1. Elaboración de juntas .....	38
2.3.2. Limpieza superficial .....	40
2.3.3. Ensayos iniciales .....	41
2.3.4. Descarga de líneas de calor sobre planchas .....	43
2.3.4.1. Enfriamiento mediante respaldo de acero .....	43
2.3.4.2. Enfriamiento mediante respaldo de cobre .....	44
2.3.4.3. Enfriamiento mediante respaldo de cobre refrigerado con agua .....	45
2.3.5. Inspección visual en cupones con descarga de líneas de calor .....	45
2.3.6. Ensayos microestructurales a cupones con descarga de líneas de calor .....	45
2.3.6.1. Ensayos macrográficos .....	47
2.3.6.2. Ensayos metalográficos .....	48
2.3.7. Uniones a tope sin metal de aporte con enfriamiento mediante respaldo de cobre .....	48
2.3.8. Ensayos de líquidos penetrantes en cupones soldados tope .....	49
2.3.9. Ensayos mecánicos .....	49
2.3.9.1 Ensayo de tracción .....	49

2.3.9.2. Ensayo de doblado .....	55
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	57
3.1. Descarga de líneas de fusión .....	57
3.2. Uniones a tope .....	57
3.3. Inspección visual a cupones con descarga de líneas de calor .....	58
3.3.1. Enfriamiento mediante respaldo de acero .....	59
3.3.2. Enfriamiento mediante respaldo de cobre .....	60
3.3.3. Enfriamiento mediante respaldo de cobre refrigerado con agua .....	62
3.4. Ensayo de líquidos penetrantes a cupones soldados a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre .....	63
3.5. Ensayos mecánicos .....	66
3.5.1. Ensayo de tracción .....	66
3.5.1.1. Metal base .....	66
3.5.1.2. Cupón soldado a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre .....	66
3.5.2. Ensayo de doblado a cupones soldados a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre .....	68
3.6. Ensayos microestructurales a cupones con descarga de líneas de calor .....	68
3.6.1. Ensayo macrográfico .....	68
3.6.1.1. Enfriamiento mediante respaldo de acero .....	69
3.6.1.2. Enfriamiento mediante respaldo de cobre .....	70
3.6.1.3. Enfriamiento mediante respaldo de cobre refrigerado con agua .....	71
3.6.2. Ensayo metalográfico .....	72
3.6.2.1. Enfriamiento mediante respaldo de acero .....	72
3.6.2.2. Enfriamiento mediante respaldo de cobre .....	73
3.6.2.3. Enfriamiento mediante respaldo de cobre refrigerado con agua .....	74
CONCLUSIONES .....	75
BIBLIOGRAFÍA .....	77

## INTRODUCCION

En los últimos tiempos, el uso del aluminio va ganando mayor difusión entre los países industriales. Actualmente es el metal más empleado después del acero. El aluminio y sus aleaciones. Poseen características importantes como peso liviano y buena resistencia a la corrosión y oxidación.

El aluminio tiene mayor demanda en aplicaciones donde el ahorro de peso entre las partes es necesario. Por ejemplo, en el automovilismo, la aviación comercial, en la industria aeroespacial, en embarcaciones y en el diseño y montaje de estructuras livianas. No obstante, y pese a los avances y estudios realizados al respecto, en nuestro medio el aluminio es un material poco difundido y su uso se limita generalmente a aplicaciones de mínima o media importancia.

El presente trabajo busca contribuir con el conocimiento y la difusión de las aleaciones de aluminio desde el punto de vista de su soldabilidad y los problemas que se presentan, realizando un estudio más detallado acerca de la fisuración en caliente, debido a que es uno de los defectos más frecuentes que se presentan en aleaciones de aluminio cuando son soldadas.

La fisuración en caliente es un fenómeno que se presenta durante la ejecución de la soldadura, produciéndose a temperaturas elevadas durante la última etapa de la solidificación y es de carácter intergranular [1]. Dicho defecto, aparece cuando las fases sólida y líquida coexisten en un rango de temperaturas por encima de la fase sólida, o cuando el enfriamiento produce tensiones de tracción a nivel intergranular que ocasionan fisuras a lo largo del cordón de soldadura.

Siendo la fisuración en caliente uno de los defectos más frecuentes en las aleaciones de aluminio, el presente trabajo estudia la soldabilidad de la aleación AA6063-T6, de 2.8 milímetros de espesor, mediante el uso del proceso de soldadura GTAW semiautomático, empleando gas de protección argón sin metal de aporte. Cabe resaltar que esta aleación es propensa a sufrir fisuración en caliente.

Para el desarrollo de la presente investigación, inicialmente se realizaron ensayos de descarga de líneas de calor a bajo, medio y alto aporte térmico, para poder encontrar la relación que existe entre el aporte de calor con la sensibilidad a la fisuración en

caliente bajo tres condiciones de enfriamiento, para lo cual se empleó respaldo de acero, respaldo de cobre y respaldo de cobre refrigerado con agua.

Además, se realizó un estudio microestructural a los cupones con descarga de líneas de calor con la finalidad de analizar la relación que existe entre la sensibilidad a la fisuración en caliente con el aporte térmico, a diferentes condiciones de enfriamiento.

Posteriormente se realizaron uniones soldadas a tope sin metal de aporte enfriadas mediante respaldo de cobre, debido a que este fue el método de enfriamiento que presentó mejores resultados en los ensayos de soldabilidad, para bajo y medio aporte de calor. A dichas uniones soldadas se les sometió a ensayos mecánicos para verificar si cumplen con las exigencias del código de soldeo estructural de aluminio AWS D1.2.

Por todo lo antes expuesto, el presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

**Objetivo general:**

El objetivo general de la presente tesis es la identificación de las condiciones de soldadura que propician la aparición de la fisuración en caliente, con la finalidad de establecer condiciones de soldeo que disminuyan o mitiguen este problema.

**Objetivos específicos:**

Los objetivos específicos del trabajo de investigación desarrollado son:

- Analizar las condiciones que propician la tendencia a la fisuración en caliente para determinar los parámetros de soldadura que proporcionan uniones soldadas libres de fisuración en caliente en la aleación de aluminio AA6063-T6, de 2.8 milímetros de espesor, empleando el proceso GTAW sin metal de aporte.
- Realizar cupones de ensayo de descarga de líneas de calor a bajo aporte térmico (menor a 325 KJ/m), medio aporte de calor (350 KJ/m) y alto calor de aporte (mayor a 400 KJ/m), utilizando tres métodos de enfriamiento para estudiar las condiciones que propician la mitigación la fisuración en caliente.
- Obtener cupones de soldadura que satisfagan las exigencias del código de soldeo estructural en aluminio AWS D1.2.
- Contribuir con la difusión, conocimiento y el uso de aleaciones de aluminio en nuestro medio.

## Capítulo 1

### 1. ESTADO DEL ARTE

#### 1.1. El aluminio puro

El aluminio es el metal más utilizado luego del acero. Es un buen conductor del calor y la electricidad y de peso liviano (densidad =  $2.69 \text{ g/cm}^3$ ). Razones por las cuales el aluminio reemplaza al cobre en aplicaciones como cableado de alta tensión.

Es de color plateado y posee un bajo punto de fusión ( $660 \text{ }^\circ\text{C}$ ). El aluminio es un material que endurece moderadamente por deformación en frío y es de fácil maquinabilidad. Se encuentra usualmente en diversas aplicaciones, como por ejemplo almacenamiento de productos perecibles (latas de gaseosas o jugos), envoltorios de chocolates y dulces, entre otras. Posee valores de esfuerzo de fluencia que van desde los 28 a 125 MPa, esfuerzo de tracción desde 69 a 130 MPa, un alargamiento que va del 43 al 6 por ciento (%) y una dureza Brinell de entre 19 y 35 HB.

El aluminio posee buena resistencia a la corrosión gracias a que se forma una capa de óxido de aluminio llamado alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en su superficie, la cual cumple la función de capa protectora frente a los medios corrosivos.

Los aluminios más comunes son el AA1050 (%Al: 99.50 mín.) y el AA1060 (%Al: 99.60 mín.), las cuales contienen normalmente como impurezas al hierro y al silicio. Cabe mencionar que el aluminio de más alta pureza estandarizado es el AA1098 (%Al: 99.98 mín.).

#### 1.2. Aleaciones de aluminio

Los principales elementos aleantes del aluminio son el cobre (Cu), el manganeso (Mn), el silicio (Si), el magnesio (Mg), y el Zinc (Zn). Cuando se alean con el aluminio, forman series de aleaciones, las cuales se agrupan de acuerdo al elemento aleante que predomina según la Asociación de Aluminio (tabla 1.1).

Los elementos aleantes se adicionan cuando se requiere obtener características particulares en el aluminio; con lo cual se puede alcanzar propiedades que superan, incluso, a la de algunos aceros estructurales.

**Tabla 1.1.** Designación del aluminio y sus principales elementos aleantes [4].

Serie AA	Principal elemento aleante
1XXX	%Al>99.00
2XXX	Cobre
3XXX	Manganeso
4XXX	Silicio
5XXX	Magnesio
6XXX	Magnesio-Silicio
7XXX	Zinc
8XXX	Otros elementos

El aluminio se agrupa, según su estado de suministro, como aleaciones de fundición y aleaciones de forja, siendo este último el de mayor difusión en la industria.

El método de unión más empleado en las aleaciones de forja es la soldadura, razón por la cual el presente trabajo hará énfasis en su estudio. La adición de los elementos aleantes principales proporciona diversas características y logran determinar si el aluminio puede ser tratable o no térmicamente (tabla 1.2).

**Tabla 1.2.** Cualidades de las series.

Serie AA	¿Tratable térmicamente?	Características
1XXX	NO	Buena resistencia a la corrosión. Buena conductividad eléctrica y térmica.
2XXX	SI	Baja resistencia a la corrosión. Mejora resistencia mecánica y dureza.
3XXX	NO	Moderada resistencia a la corrosión atmosférica. Elevada ductilidad. Buena soldabilidad
4XXX	NO	Disminuye punto de fusión. Mejora fluidez
5XXX	NO	Buena resistencia mecánica y dureza. Buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos. Buena soldabilidad.
6XXX	SI	Resistencia moderada. Buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos. Mediana soldabilidad.
7XXX	SI	Mayores resistencias de las aleaciones.
8XXX	SI/NO	Depende de elementos aleantes.

### 1.2.1. Aleaciones no tratables térmicamente

Comprenden las series 1XXX, 3XXX, 4XXX y 5XXX. Este grupo de aleaciones, como su nombre lo indica, no son tratables térmicamente. Si se desea incrementar su resistencia mecánica, se debe deformar en frío al aluminio. Esto permitirá un incremento en la resistencia a la tracción, pero producirá una pérdida en la ductilidad del material.

Son varios los estudios acerca de la relación entre porcentaje de deformación en frío versus el endurecimiento (figura 1.1).

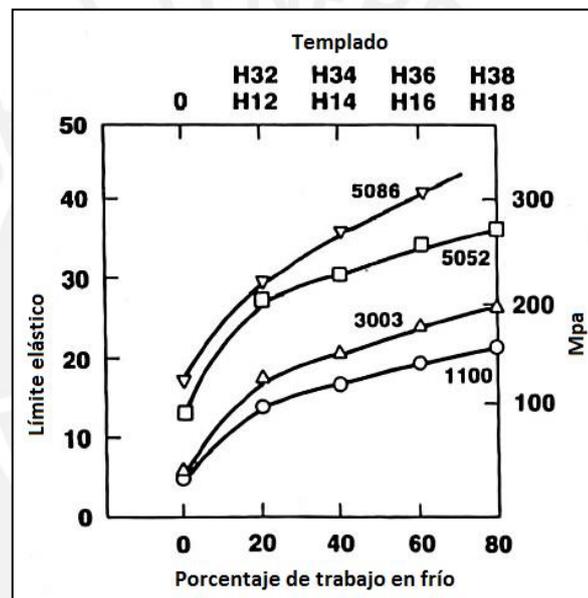


Figura 1.1. Curva deformación en frío versus endurecimiento [2]

Las aleaciones no tratables térmicamente no pueden formar precipitados de segunda fase, esto llega a ser beneficioso desde la óptica de la soldadura, ya que los elementos aleantes utilizados para el endurecimiento por tratamiento térmico de solución pueden ocasionar fisuración en caliente durante la soldadura.

#### 1.2.1.1. Serie AA1XXX

Este grupo no comprende estrictamente a aleaciones de aluminio; sino que por conveniencia son llamados aleaciones. En realidad corresponde al aluminio y su pureza, teniendo como principales impurezas al hierro y al silicio, pudiendo encontrarse cobre o zinc en cantidades muchas veces inferiores a 0.1% y otros

elementos en cantidades inferiores al 0.5%; sin embargo, en algunos casos se puede agregar algún elemento en pequeñas cantidades para mejorar alguna de sus características.

Esta serie posee buena soldabilidad; no obstante es un proceso dificultoso, debido a que el aluminio posee elevada conductividad térmica y poca resistencia a la deformación; además posee un estrecho rango de fusión, lo cual puede ocasionar falta de fusión en el material como principal defecto de soldadura, entre otros [2].

Son utilizados principalmente en estructuras sometidas a bajos esfuerzos, en las que se requiere un peso liviano y en la que se quiera aprovechar la buena resistencia a la corrosión que posee. También se utiliza en transmisión de electricidad de alta tensión o en tuberías. La tabla 1.3 muestra la composición química de algunas aleaciones representativas.

**Tabla 1.3.** Composición química nominal de aluminios de la serie AA1XXX [9].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros		Aluminio mín.
										c/u	Total	
1050	0.25	0.4	0.05	0.05	0.05	-	-	0.05	0.03	0.03	-	99.5
1060	0.25	0.35	0.05	0.05	0.03	-	-	0.05	0.03	0.03	-	99.6
1100	1.0 (Si + Fe)		0.05-0.20	0.05	-	-	-	0.1	-	0.05	0.15	99
1145	0.55 (Si + Fe)		0.05	0.05	0.05	-	-	0.05	0.03	0.03	-	99.45
1175	0.15 (Si + Fe)		0.1	0.1	0.02	-	-	0.04	0.02	0.02	-	99.75
1200	1.0 (Si + Fe)		0.05	0.05	-	-	-	0.1	0.05	0.05	0.15	99

#### 1.2.1.2. Serie AA3XXX

Posee manganeso como principal elemento de aleación, gracias a ello la serie 3XXX posee moderada resistencia a la corrosión atmosférica. La adición de manganeso comprende entre el 0.5% y 1.82% de contenido en peso (tabla 1.4).

Todas las aleaciones de esta serie pueden ser soldables satisfactoriamente, no son propensos a la fisuración en caliente y presentan elevada ductilidad.

Es de resistencia mecánica media y se comercializa principalmente como planchas para su aplicación en paneles en los edificios, para techos y paredes; se emplea en la

fabricación de utensilios domésticos, recipientes que almacenan sustancias químicas, radiadores, condensadores de aire acondicionado, entre otras.

**Tabla 1.4.** Composición química nominal de aleaciones de forja, serie AA3XXX [9].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros		Aluminio mín.
										c/u	Total	
3003	0.6	0.7	0.05-0.20	1.0-1.5	-	-	-	0.1	-	0.05	0.15	El resto
3004	0.3	0.7	0.25	1.0-1.5	0.8-1.3	-	-	0.25	-	0.05	0.15	El resto
3005	0.6	0.7	0.3	1.0-1.5	0.20-0.6	0.1	-	0.25	0.1	0.05	0.15	El resto
3105	0.6	0.7	0.3	0.30-0.8	0.20-0.8	0.2	-	0.4	0.1	0.05	0.15	El resto

### 1.2.1.3. Serie AA4XXX

Comprende las aleaciones que poseen silicio como elemento de aleación principal. Este elemento aleante reduce la fragilidad en un intervalo de temperaturas de trabajo en caliente, reduce el punto de fusión e incrementa la fluidez. Por este motivo es muy utilizado en procesos de fundición. Además de ello, estas características también se requieren en el material de aporte para soldadura por fusión.

La principal aplicación de esta serie la componen los materiales de aporte para soldadura de aleaciones de aluminio y también para la fabricación de fundiciones. Las composiciones de algunas aleaciones se muestran en la tabla 1.5.

**Tabla 1.5.** Composición química nominal de algunas aleaciones de la serie AA4XXX [9].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros		Aluminio mín.
										c/u	Total	
4032	11.0-13.5	1	0.50-1.3	-	0.8-1.3	0.1	0.50-1.3	0.25	-	0.05	0.15	El resto
4043	4.5-6.0	0.8	0.3	0.05	0.05	-	-	0.1	0.2	0.05	0.15	El resto
4045	9.0-11.0	0.8	0.3	0.05	0.05	-	-	0.1	0.2	0.05	0.15	El resto
4047	11.0-13.0	0.8	0.3	0.15	0.1	-	-	0.2	-	0.05	0.15	El resto

La aleación AA4043 es una de las más utilizadas como material de aporte para aleaciones de la serie AA3XXX, AA5XXX y AA6XXX en aplicaciones estructurales y automovilismo, debido a que posee un muy buen acabado superficial y mayor

penetración; sin embargo, se pueden originar perforaciones en planchas de aluminio de bajo espesor.

#### 1.2.1.4. Serie AA5XXX

Posee como elemento de aleación principal al magnesio (tabla 1.6), el cual proporciona buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos.

**Tabla 1.6.** Composición química nominal de algunas aleaciones de la serie AA5XXX [9].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros		Aluminio mín.
										C/u	Total	
5052	0.25	0.4	0.1	0.1	2.2-2.8	0.15-0.35	-	0.1	-	0.05	0.15	El resto
5252	0.08	0.1	0.1	0.1	2.2-2.8	-	-	0.05	-	0.05	0.15	El resto
5356	0.50 (Si + Fe)		0.1	0.05-0.20	4.5-5.5	0.05-0.20	-	0.1	0.06-0.20	0.05	0.15	El resto
5456	0.40 (Si + Fe)		0.1	0.50-1.0	4.7-5.5	0.05-0.20	-	0.25	0.2	0.05	0.15	El resto

El magnesio puede adicionarse en un rango de 0.5% a 7%, siendo las aleaciones que contienen más de 2.5% de Mg quienes poseen resistencia mecánica más elevada de las aleaciones no tratables térmicamente.

Esta serie es el que más endurece por solución sólida entre las aleaciones no tratables térmicamente y además posee buena soldabilidad. Se puede soldar por fusión y obtener pequeñas pérdidas de resistencia mecánica dependiendo del estado de suministro.

Debido a sus características, se recomienda su uso en aplicaciones estructurales, en la fabricación de puentes, recipientes a presión, recipientes criogénicos, entre otros.

#### 1.2.2. **Aleaciones tratables térmicamente**

Comprende las series AA2XXX, AA6XXX, AA7XXX y algunas de la serie AA8XXX. Dichas series pueden mejorar su resistencia mecánica y ductilidad mediante el tratamiento térmico controlado.

El proceso de tratamiento térmico consiste en calentar el material a una elevada temperatura para poner los elementos de aleación en solución sólida, luego se procede al enfriamiento a una velocidad que produzca solución sobresaturada y luego

manteniéndolo a baja temperatura el tiempo suficiente para conseguir una buena dispersión. Esto se denomina tratamiento térmico de templado y envejecimiento. Se utiliza para obtener mayor dureza y resistencia mecánica elevadas [2].

El tratamiento térmico más utilizado es el que involucra un envejecimiento artificial, debido a que se logra una dispersión más fina de los precipitados con respecto al envejecimiento natural. Sin embargo, se debe elegir si realizar envejecimiento natural o artificial tomando en consideración las propiedades que se requiere alcanzar.

### 1.2.2.1. Serie AA2XXX

La serie la comprenden las aleaciones que tienen como elemento de aleación principal al cobre y su contenido está comprendido entre 2% y 10% en peso (tabla 1.7).

**Tabla 1.7.** Composición química nominal de aleaciones de forja, serie AA2XXX [9].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros		Aluminio mín.
										C/u	Total	
2011	0.4	0.7	5.0-6.0	-	-	-	-	0.3	-	0.05	0.15	El resto
2014	0.50-1.2	0.7	3.9-5.0	0.40-1.2	0.20-0.8	0.1	-	0.25	0.15	0.05	0.15	El resto
2017	0.20-0.8	0.7	3.5-4.5	0.40-1.0	0.40-0.8	0.1	-	0.25	0.15	0.05	0.15	El resto
2018	0.9	1	3.5-4.5	0.2	0.45-0.9	0.1	1.7-2.3	0.25	-	0.05	0.15	El resto

Mediante tratamiento térmico se pueden obtener muy buenas características de resistencia mecánica y dureza; sin embargo, debido al contenido de cobre poseen pobre resistencia a la corrosión, razón por la cual muchas veces son pintadas o recubiertas cuando se exponen a diferentes medios corrosivos durante el trabajo.

Debido a sus cualidades, algunas aleaciones de esta serie son muy utilizadas en aviación, en la industria aeroespacial y en automovilismo, especialmente en camiones; estas aplicaciones se suelen unir por pernos o remaches y también por soldadura.

Muchas de estas aleaciones poseen pobre soldabilidad por procesos que impliquen fusión, debido a que son susceptibles a la fisuración en caliente; sin embargo, aleaciones como la AA2014, AA2219 y AA2519 son fácilmente soldables.

El contenido de cobre es el que determina la sensibilidad a la fisuración en caliente. La serie es más propensa a la fisuración en caliente entre los valores de 3% y 4.5% de Cu.

### 1.2.2.2. Serie AA6XXX

La serie posee como elementos de aleación principales silicio y magnesio, los cuales se encuentran en composiciones que van desde 0.2% hasta 1.6% de silicio y 0.3% hasta 1.5% de magnesio.

Posee alta resistencia a la corrosión en ambientes marinos y es de resistencia mecánica moderada (menores resistencias que las series AA2XXX y AA7XXX). La tabla 1.8 muestra la composición química de algunas aleaciones de la serie.

**Tabla 1.8.** Composición química nominal de aleaciones de forja, serie AA6XXX 9].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros		Aluminio mín.
										C/u	Total	
6061	0.40-0.8	0.7	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	-	0.25	0.15	0.05	0.15	El resto
6063	0.20-0.6	0.35	0.1	0.1	0.45-0.9	0.1	-	0.1	0.1	0.05	0.15	El resto
6070	1.0-1.7	0.5	0.15-0.40	0.40-1.0	0.50-1.2	0.1	-	0.25	0.15	0.05	0.15	El resto
6101	0.30-0.7	0.5	0.1	0.03	0.35-0.8	0.03	-	0.1	-	0.03	0.1	El resto

Debido a sus características, son muy empleadas en estructuras metálicas, automovilismo y navegación marítima. Posee buen comportamiento en el conformado por extrusión, por lo cual suelen ser usadas para la fabricación de perfiles y forman una serie complementaria a las aleaciones AA5XXX en forma de plancha.

Pese a que esta serie es muy propensa a presentar fisuración en caliente es considerado como una serie soldable; no obstante, si se desea soldar y evitar defectos, se debe seleccionar adecuadamente el material de aporte, el tipo de junta y se debe tener los cuidados respectivos.

### 1.2.2.3. Serie AA7XXX

Comprende a las aleaciones que tienen como elemento de aleación principal al Zinc. La tabla 1.9 presenta algunas aleaciones representativas de la serie.

**Tabla 1.9.** Composición química nominal de aleaciones de forja, serie AA7XXX [9].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros		Aluminio mín.
										C/u	Total	
7001	0.35	0.4	1.6-2.6	0.2	2.6-3.4	0.18-0.35	-	6.8-8.0	0.2	0.05	0.15	El resto
7011	0.15	0.2	0.05	0.10-0.30	1.0-1.6	0.05-0.20	-	4.0-5.5	0.05	0.05	0.15	El resto
7075	0.4	0.5	1.2-2.0	0.3	2.1-2.9	0.18-0.35	-	5.1-6.1	0.2	0.05	0.15	El resto
7079	0.3	0.4	0.40-0.8	0.10-0.30	2.9-3.7	0.10-0.25	-	3.8-4.8	0.1	0.05	0.15	El resto

Posee las mayores resistencias de las series anteriormente mencionadas. Esta serie, junto con la AA2XXX, contiene aleaciones que pueden ser soldables por fusión de material y otras que no. Debido a esta cualidad, fue muy difundida en la industria aérea, con lo cual se buscó a lo largo del tiempo aleaciones de mayor pureza y mejor composición química, para elevar la resistencia mecánica de las aleaciones.

No es muy difundida la unión por método de soldadura por fusión en esta serie, pues posee una soldabilidad muy pobre, por lo cual, el método de unión más usual es el remache.

### 1.3. Procesos de soldadura en aluminio y aleaciones

Existen diferentes motivos por el cual el aluminio presenta algunos problemas en cuanto a su soldabilidad. Por un lado, se debe mencionar que cuando la alúmina ( $Al_2O_3$ ) está presente en el aluminio, no fundiría junto al metal base, debido a que posee un punto de fusión mucho mayor que este (2 030 °C) y tiene menor densidad.

Se recomienda efectuar la limpieza del óxido superficial haciendo uso de cepillo de alambres de acero inoxidable, con la finalidad de no ocasionar desprendimiento de material y óxidos para que no haya inconvenientes en el proceso de soldeo.

El aluminio, contrariamente a lo que muchos piensan, se puede soldar mediante varios métodos de soldadura (ver tabla 1.10).

**Tabla 1.10.** Procesos de soldadura en aluminio y aleaciones [5].

<b>Soldadura por fusión</b>	Oxiacetilénico
	Arco eléctrico manual
	GMAW
	GTAW
	Laser
	Haz de electrones
<b>Soldadura por resistencia</b>	Costura por puntos
	Inducción de alta frecuencia
<b>Soldadura en fase sólida</b>	Fricción
	Explosión
	Ultrasónica
	Soldadura por presión

### 1.3.1. Proceso de soldadura oxiacetilénica

La soldadura oxiacetilénica (OFW) se produce al quemar una mezcla de acetileno y oxígeno por medio de un soplete, con el cual se llega a temperaturas superiores a los 3000°C. Si el oxígeno y el acetileno se encuentran en relación de 1 a 1 se dice que se obtiene una llama neutra, pero si hay mayor porcentaje de oxígeno se le llama oxidante, y si hay mayor porcentaje de acetileno se le llama carburante.

Debido a que es un proceso que puede proporcionar algunos defectos a la soldadura como grandes deformaciones y mal acabado superficial, debe utilizarse para aplicaciones que no estén sometidos a trabajos de mucha importancia; no obstante, la simplicidad del equipo de soldeo resulta una buena ventaja. Los componentes principales para realizar el soldeo oxiacetilénico se muestran en la figura 1.2.

Cuando se procede a realizar la soldadura de aluminio es necesario tomar algunas medidas, por ejemplo utilizar llama carburante y efectuar una buena limpieza superficial sobre el material base para retirar óxidos y contaminantes haciendo uso de fundentes y un cepillo de alambre de acero inoxidable.

Se requerirá realizar un precalentamiento de los materiales base, sobre todo alrededor de los bordes de la unión.

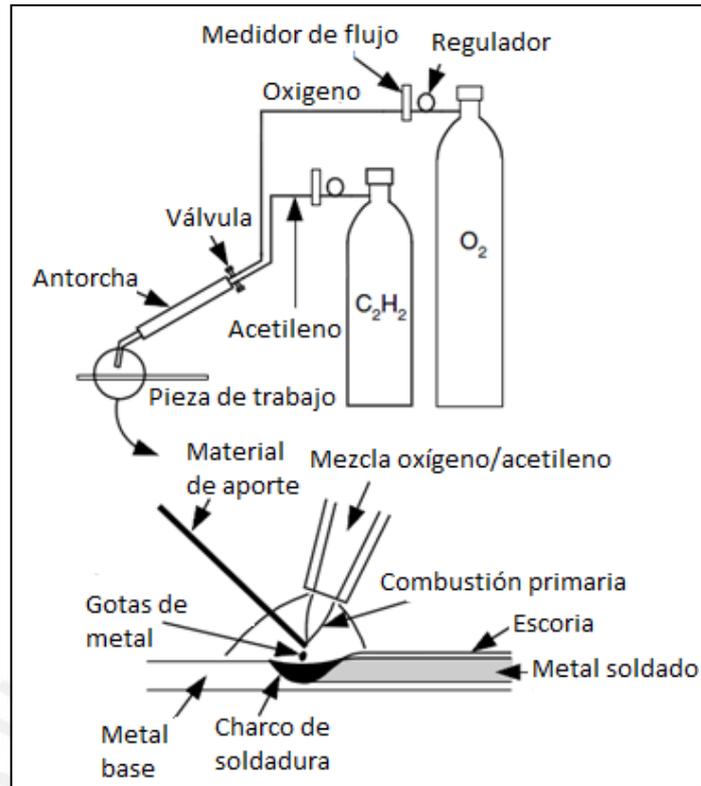


Figura 1.2. Componentes para proceso de soldadura oxiacetilénica. [6]

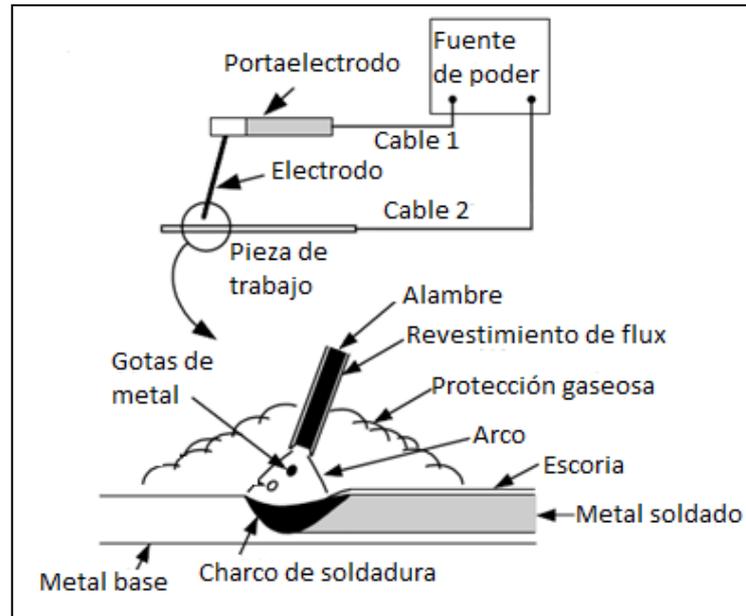
### 1.3.2. Soldadura por arco eléctrico manual con electrodos revestidos (SMAW)

El proceso de soldadura por eléctrico manual con electrodos revestidos SMAW (Shielded Metal Arc Welding) hace uso del calor generado por el arco eléctrico sobre el electrodo y el metal base para fusionar ambos materiales.

Se utilizan electrodos, los cuales son varillas de aleación de aluminio revestidas con fundente. El fundente tiene la función de disolver el óxido presente en la capa del metal base y del electrodo.

Durante la descomposición del recubrimiento se produce la protección gaseosa y escoria fundida sobre el baño de soldadura que luego pasará a solidificar. Ambas descomposiciones protegen la soldadura. El proceso es representado en la figura 1.3.

Es un procedimiento poco utilizado en el soldeo del aluminio y sus aleaciones debido a la falta de homogeneidad del cordón obtenido y se suele utilizar para soldaduras de pequeño tamaño y de poca importancia.



**Figura 1.3.** Proceso de soldadura SMAW. [6]

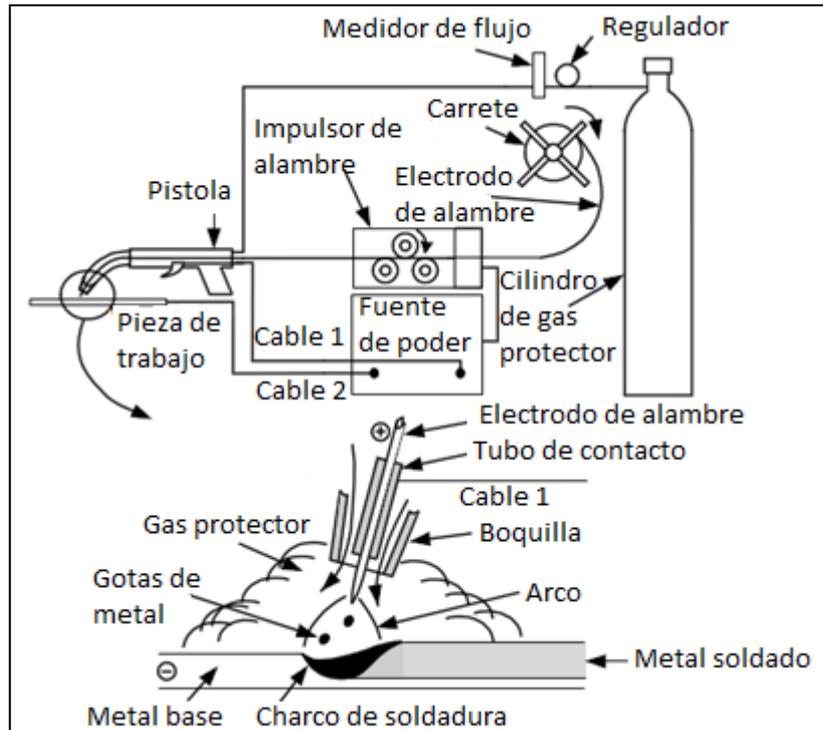
La ventaja de este proceso es que utiliza un equipo sencillo, portátil, relativamente económico y no requiere de gases auxiliares.

Se puede emplear en cualquier posición; sin embargo, es un proceso lento que requiere que el soldador tenga cierta experiencia y habilidad para poder efectuarla.

### 1.3.3. Proceso de soldadura GMAW

En el proceso de soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding) Se utiliza un electrodo continuo en forma de alambre, siendo protegido junto al metal de aporte, el arco y baño de soldadura por gas inerte que usualmente es argón y en algunos casos mezclas de argón y helio (figura 1.4).

El proceso GMAW se caracteriza porque puede ofrecer mayores ventajas que la soldadura GTAW, como por ejemplo mayores velocidades en la soldadura y remueve mejor la película de óxido del metal. Por tal motivo, dicho proceso es el más utilizado en la actualidad para el soldeo de aluminio, en especial en mayores espesores.



**Figura 1.4.** Proceso de soldadura GMAW. [6]

Es un proceso más económico que el proceso GTAW. No obstante, para lograr un adecuado trabajo de soldadura se deben de considerar distintos parámetros intrínsecos al método.

En primer lugar, la polaridad, la cual influye sobre la penetración, la velocidad de fusión y la temperatura, alcanzándose mayor temperatura en el alambre cuando es conectado al positivo y, además, se dispersan las partículas de óxido. En segundo lugar, la tensión del arco para determinar la forma de transferencia del metal a la pieza. En tercer lugar, la velocidad de alimentación del alambre. Por último, la naturaleza del gas inerte, ya que este influye sobre la forma de transferencia del metal, penetración y aspecto de la junta.

Se suele utilizar una técnica de soldeo hacia delante de forma que comience la limpieza antes de la fusión de metal base, con una inclinación de pistola de  $7^\circ$  a  $12^\circ$  hacia la dirección del soldeo (figura 1.4).

#### 1.3.4. Proceso de soldadura GTAW

El proceso de soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) es un proceso de soldadura por fusión que utiliza un electrodo no consumible de tungsteno y un gas inerte con propósito de proteger la zona de fusión.

Tiene como ventaja principal que las uniones poseen muy buena calidad y puede ser llevado a cabo de manera manual, semiautomática y automática.

Se puede realizar mediante corriente continua con polaridad directa o invertida y con corriente alterna. La corriente alterna se utiliza, en su mayoría de veces, cuando se efectúa soldadura manual. Con este tipo de corriente se puede remover la alúmina, durante el ciclo positivo, que posee alta dureza y que es refractario.

El caudal de gas de protección suele ser mayor al empleado en el soldeo del acero al carbono y el caudal incrementa junto al incremento del espesor de la junta.

Los gases inertes que se utilizan en la actualidad son argón y helio. El helio posee mayor poder de penetración en comparación con el argón, ya que requiere de un voltaje mayor para una misma longitud de arco, con lo cual produce más calor. No obstante el argón es el gas inerte más utilizado en soldadura GTAW debido a su bajo costo y su mayor densidad. Mezclas helio-argón son utilizados cuando se requiere soldar materiales de gran espesor. A mayor espesor, mayor cantidad de helio en la mezcla [10].

Se puede emplear o no material de aporte y el proceso se representa en la figura 1.5.

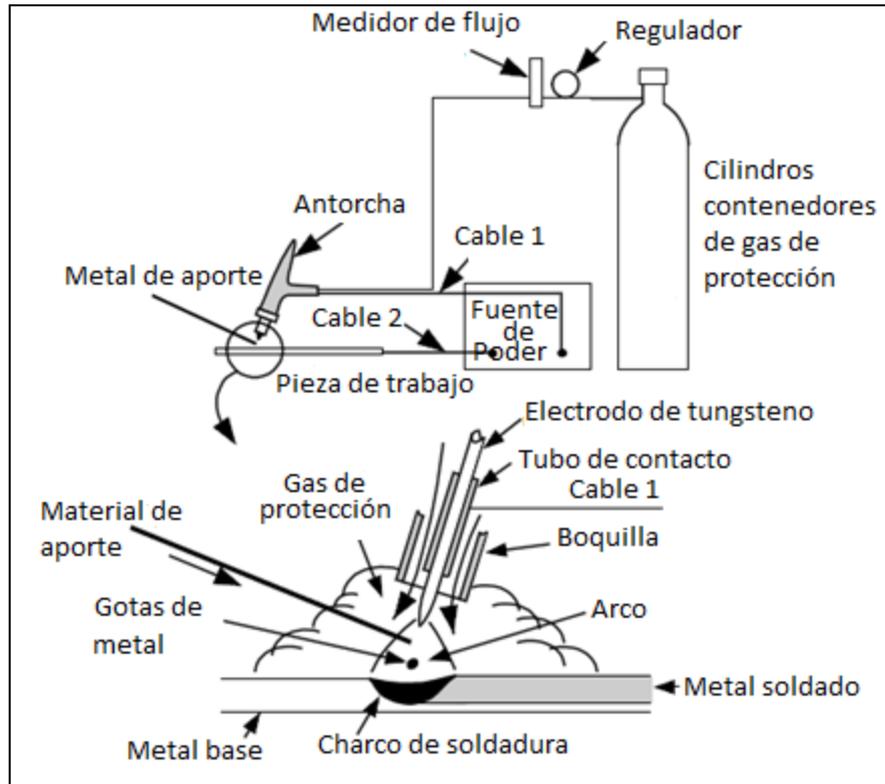


Figura 1.5. Proceso de soldadura GTAW. [6]

**1.4. Soldabilidad del aluminio y sus aleaciones**

La soldabilidad del aluminio es materia principal de estudio en el presente trabajo. La tabla 1.11 muestra el código alfanumérico que va a continuación de la designación de la aleación, indicando el estado en que se encuentra. Mientras que la tabla 1.12 presenta algunas las aleaciones de aluminio de forja y su soldabilidad mediante algunos de los procesos de soldadura.

Tabla 1.11. Nomenclatura de tratamientos básicos [7].

Designación	Estado
F	Tal como sale de fabricación
O	Recocido, recristalizado (productos Forjados)
H	Endurecido por deformación en frío
W	Tratado térmico de solución (solubilizado)
T	Tratado térmicamente

**Tabla 1.12.** Soldabilidad de aleaciones de forja. Tabla modificada de [4].

Aleación	GTAW	GMAW	Soldadura por resistencia	Soldadura por presión	Soldadura Fuerte
1060-O	A	A	B	A	A
1060-H14	A	A	A	A	A
1100-O	A	A	B	A	A
1100-H18	A	A	A	A	A
3003-O	A	A	B	A	A
3003-H18	A	A	A	A	A
3004-O	A	A	B	A	B
3004-H38	A	A	A	B	B
2011-T3	D	D	D	D	D
2014-T4	D	C	B	C	D
2017-T4	D	C	B	D	D
2219-T31	D	A	A	C	D
2219-T81	D	A	A	C	D
4032-T6	D	B	C	C	D
5005-O	A	A	B	A	B
5005-H38	A	A	A	B	B
5154-O	C	A	B	A	D
5154-H38	C	A	A	B	D
5454-O	C	A	B	B	D
5454-H34	C	A	A	B	D
6053-T4	A	A	A	B	A
6061-T6	A	A	A	B	A
6062-T4	A	A	A	B	A
6070-T4	D	A	A	B	B
6071-T6	D	A	A	B	B
X7006-T63	D	A	B	D	C
7075-T6	D	C	B	D	D
Alclad 7075-T6	D	C	B	D	D

#### 1.4.1. Limpieza superficial

La limpieza previa en la zona a soldar es de suma importancia para evitar defectos en la soldadura.

Se deben remover los contaminantes que pueden existir en el material base, incluyendo grasas, humedad, óxidos, suciedad, pintura, entre otros, teniendo especial

cuidado en la remoción de los óxidos, pues estos disminuyen la fluidez del metal de la soldadura en la solidificación.

#### **1.4.2. Conductividad térmica**

El aluminio presenta una conductividad térmica tres veces mayor que el acero, por lo cual se requerirá de un mayor calor de aporte para el soldeo.

Las aleaciones de aluminio llegan a dilatarse dos veces más que el acero cuando se calienta, lo cual ocasiona tensiones internas y deformaciones durante el soldeo. Si se procede a soldar a una velocidad baja, no adecuada como procedimiento, esto ocasionará defectos y agrietamientos.

#### **1.4.3. Dilatación térmica**

El calor aportado durante el soldeo puede ocasionar deformaciones en la plancha soldada, debido a que el aluminio posee elevada dilatación térmica (el doble que el acero). Entre los defectos más usuales tenemos, desalineación entre planchas o “high low”, deformación angular, entre otros. Por este motivo, es necesario realizar una adecuada sujeción de las planchas a soldar. También se debe realizar apuntalamiento entre los bordes de las planchas para evitar defectos en la soldadura.

#### **1.5. Elección del material de aporte**

El buen desempeño de una junta soldada depende de varios factores, como lo son la elección del material de aporte, el metal base, el diseño de la junta, el proceso de soldadura, las condiciones en que se procede a soldar, y el tratamiento térmico posterior a la soldadura..

Cuando se sueldan aleaciones no tratables térmicamente se suele utilizar metales de aporte con afinidad química al metal base. Al depositar el material de aporte, este se combina al metal base y determinan así las propiedades que poseerá la junta como son la ductilidad, resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, dureza, susceptibilidad a la fisuración en caliente, entre otros. En la tabla 1.13 se muestra algunas aleaciones de forja que son comúnmente soldables

**Tabla 1.13.** Composición nominal en aleaciones de aluminio de forja comúnmente soldables [2]

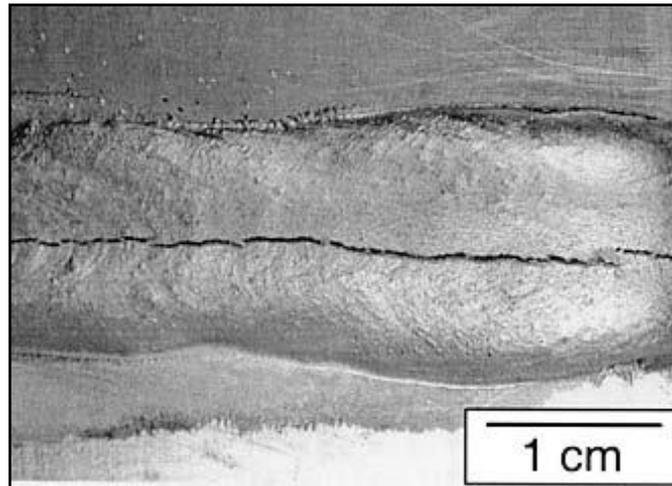
Aleación	Cu	Mg	Mn	Si	Zn	Cr	Zr	Ti	Al
1060	-	-	-	-	-	-	-	-	99.60 min
1100	0.12	-	-	-	-	-	-	-	99.00 min
1350	-	-	-	-	-	-	-	-	99.50 min
2219	6.3	-	0.3	-	-	-	0.18	0.1	el resto
3003	-	-	1.25	-	-	-	-	-	el resto
3004	-	1	1.25	-	-	-	-	-	el resto
5052	-	2.5	-	-	-	0.25	-	-	el resto
5454	-	2.7	0.75	-	-	0.12	-	-	el resto
5083	-	4.45	0.7	-	-	0.15	-	-	el resto
5086	-	4	0.45	-	-	0.15	-	-	el resto
5456	-	5.1	0.75	-	-	0.12	-	-	el resto
6101	-	0.6	-	0.5	-	-	-	-	el resto
6061	0.27	1	-	0.6	-	0.2	-	-	el resto
6063	-	0.7	-	0.4	-	-	-	-	el resto
7004	-	1.5	0.45	-	4.2	-	0.15	-	el resto
7005	-	1.4	0.45	-	4.5	0.13	0.14	-	el resto
7039	-	2.8	0.25	-	4	0.2	-	-	el resto

### 1.6. Fisuración en caliente

La fisuración en caliente es un fenómeno en el que juegan factores térmicos, mecánicos y metalúrgicos. Se presenta mayormente en las aleaciones tratables térmicamente y en menor frecuencia en las no tratables térmicamente. Se produce normalmente en el centro del cordón, y se propaga a través de los límites de grano (figura 1.6).

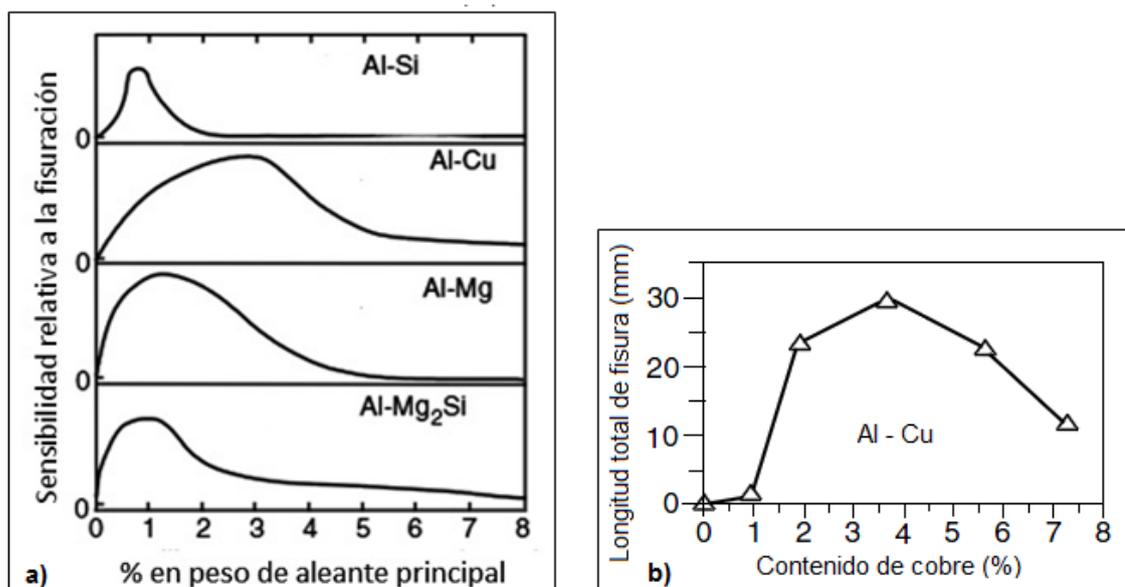
Ocurre en la última fase de la solidificación de la unión soldada, en la que hay una porción que ya solidificó y otra que va solidificando.

Ocurre cuando las tensiones que se generan por efecto de la temperatura exceden a la tensión que puede soportar el metal que está solidificado, originándose, de este modo, la fisuración en caliente.



**Figura 1.6.** Fisuración en caliente de aleación AA6061. Método de soldadura GMAW. [8]

La sensibilidad a la fisuración en caliente varía según la composición química de las aleaciones. Se puede observar en la figura 1.7 (a) la tendencia a la fisuración en caliente de las aleaciones AA2XXX (Al-Cu), AA4XXX (Al-Si), AA5XXX (Al-Mg) y AA6XXX (Al-Mg<sub>2</sub>Si); mientras que la figura 1.7 (b) muestra las longitudes de fisuración, obtenidas en el estudio de sensibilidad a la fisuración en caliente, para diferentes concentraciones del elemento aleante principal en la serie AA2XXX.



**Figura 1.7.** Sensibilidad a la fisuración en caliente en aleaciones de aluminio. [6]

Estas curvas de sensibilidad a la fisuración en caliente representan una herramienta útil cuando se desea verificar la tendencia a la fisuración en caliente de una aleación, tomando en cuenta su porcentaje de aleante principal.

La mayoría de aleaciones de aluminio que poseen composición química que se encuentra cercano a los picos de sensibilidad a la fisuración, suelen considerarse como “insoldables” debido a su alta tendencia a la fisuración en caliente.

Se observa que hay un rango de composición química en la que una serie dada tiene mayor sensibilidad a la fisuración en caliente. Por ejemplo, en las aleaciones de la serie 2XXX (Al-Cu) se tiene elevada tendencia a la fisuración en caliente cuando el porcentaje en peso del Cu se encuentra entre 0.5% a 5%.

Para entender tal fenómeno, la figura 1.8 muestra en (a) cuatro zonas en la curva de sensibilidad. En primer lugar, en la zona I se tiene al metal base y este casi no presenta tendencia a fisuración en caliente debido a que el metal puro presenta bajo punto de fusión eutéctica presente en el límite de grano para ocasionar agrietamiento durante la solidificación, y se aprecia en (b) que en la solidificación se tendrá poco límite de grano en fase líquida, por lo cual la tendencia a la fisuración en caliente será baja. Cuando se va agregando metal aleante, la tendencia incrementa hasta volverse máxima en la zona II y se observa en (c) que la susceptibilidad aumentará debido a la presencia de granos columnares gruesos, siendo la parte central del cordón la última en solidificar, incrementándose la tendencia a la fisuración. Pero cuando se le agrega más aleante, la tendencia irá reduciendo (zona III) y se va teniendo presencia de granos equiaxiales finos (d) hasta hacerse menor la tendencia a la fisuración en la zona IV en la cual se posee poca cantidad de granos columnares y mayor presencia de granos equiaxiales.

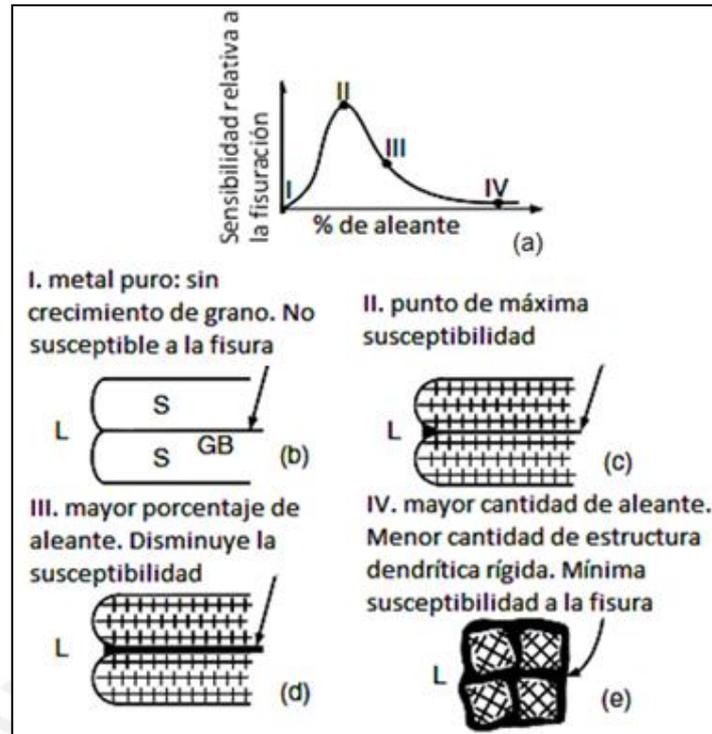


Figura 1.8. Efecto de la composición sobre la fisuración en caliente [6]

Son varios los factores que incrementan la tendencia a la fisuración en caliente de los aluminios, como son el rango de temperaturas a la que solidifican los elementos aleantes, la cantidad de líquido y sólido presente en la última fase de solidificación, las tensiones generadas en los límites de grano y la estructura del grano, y las tensiones producidas en el proceso de soldadura.

Por estos motivos, antes de proceder a efectuar la soldadura, se debe tomar en consideración los efectos que pueden ocasionar los elementos aleantes en sus diversas composiciones en peso.

### 1.7. Formas de reducir la fisuración en caliente

Como se mencionó previamente, la fisuración en caliente es un fenómeno muy frecuente en la soldadura de aluminio. Sin embargo, existen diferentes métodos para inhibir o minimizar la fisuración en caliente.

### **1.7.1 Control mediante elección de metales de baja sensibilidad a la fisuración en caliente**

Se debe evitar principalmente materiales que presenten elevada susceptibilidad a la fisuración en caliente.

Cuando se desee emplear soldadura GTAW sin material de aporte se debe seleccionar el metal base con baja o nula susceptibilidad a la fisuración en caliente, pues la susceptibilidad a la fisuración en caliente en la soldadura será de la propia aleación de aluminio base.

Si la soldadura se efectúa con material de aporte, este debe ser seleccionado adecuadamente teniendo en consideración su composición química, la cual se fusionará con la del metal base y deberá disminuir o inhibir la susceptibilidad.

La tabla 1.14 muestra una guía sobre la selección de materiales de aporte con las cuales se puede minimizar o mitigar la fisuración en caliente durante la solidificación de una soldadura.

### **1.7.2. Control de la estructura de solidificación**

Para evitar el fenómeno estudiado, se puede optar también por controlar la estructura del grano, debido a que si el metal de soldadura presenta estructura de granos columnares gruesos será más susceptible que aquellos metales con granos equiaxiales finos, los cuales presentan mayor ductilidad y soportan mejor las tensiones generadas durante la solidificación.

Durante la solidificación, si se tiene aparición de granos columnares gruesos en el baño de fusión, estos irán creciendo hacia el centro del cordón, incrementando la tendencia a la aparición de fisuración. La figura 1.9 muestra la influencia de la estructura de grano para la fisuración en caliente.

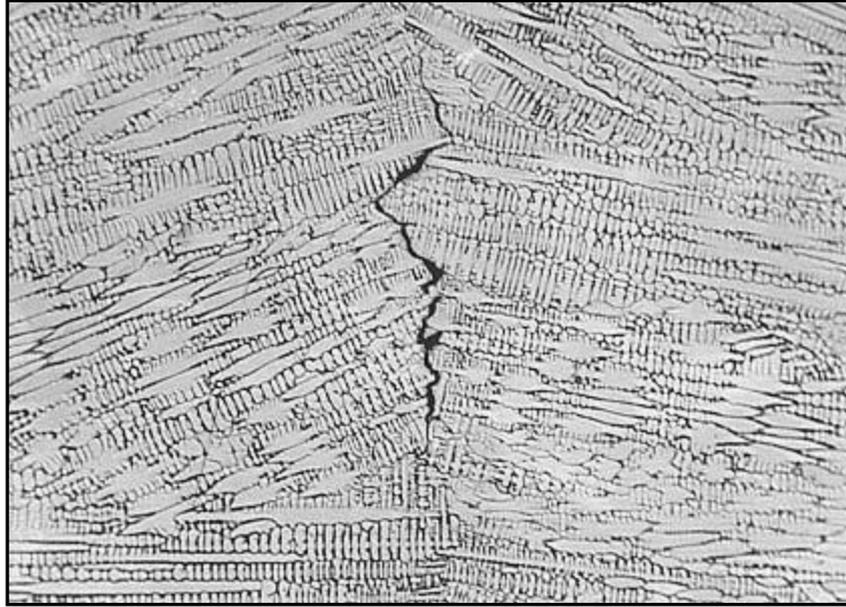
**Table 4.2**  
**Recommended Aluminum Alloy Filler Metals for Structural Welding of Various Base Aluminum Alloys (see 4.3.1)**

Base Metal to Base Metal	1060, 1100, 3003, Alclad 3003	2219, A201.0	3004, Alclad 3004	5005, 5050	5052, 5652	5083, 5456	5086, 514.0, 535.0	5154, 5254	5454	6005, 6005A, 6061, Alclad 6061, 6063, 6082, 6351	7005	354.0 C355.0	356.0, A356.0, 357.0, A357.0, 359.0, 443.0, A444.0
356.0, A356.0, 357.0, A357.0, 359.0, 443.0, A444.0	4043	4145	4043	4043	4043	5356	5356	4043	4043	4043	4043	4145	4043
354.0, C355.0	4145	4145	4145	4145	4043	NR	NR	NR	4043	4145	4145	4145	
7005	5356	4145	5356	5356	5356	5556	5356	5356	5356	5356	5356		
6005, 6005A, 6061, Alclad 6061, 6063, 6082, 6351	4043	4145	5356	4043, 5356	4043, 5356	5356	5356	5356	5356	4043, 5356			
5454	4043	4043	5356	5356	5356	5356	5356	5356	5554				
5154, 5254	4043	NR	5356	5356	5356	5356	5356	5356					
5086, 514.0, 535.0	5356	NR	5356	5356	5356	5356							
5083, 5456	5356	NR	5356	5356	5356	5183, 5556							
5052, 5652	4043	4043	4043	4043, 5356	5356								
5005, 5050	4043	4145	4043	4043, 5356									
3004, Alclad 3004	4043	4145	4043										
2219, A201.0	4145	2319											
1060, 1100, 3003, Alclad 3003	1100												

Notes:

1. The filler alloy shown is the best choice for most structural applications. Where two filler alloys are shown, either is acceptable.
2. Whenever 4043 is shown, 4047 is an acceptable alternate.
3. Whenever 5356 is shown, 5183 or 5556 are acceptable alternates.
4. Al-Mg alloys containing more than 3% Mg should not be used in applications where long-term exposures above 150°F are encountered
5. There are applications where specific requirements make the selection of filler alloys other than those shown above necessary.

**Tabla 1.14.** Tabla guía para la selección de materiales de aporte. [2]



**Figura 1.9.** Efectos de la estructura del grano para la aparición de fisuración en caliente [6]

Tanto el titanio como el zirconio son aleantes refinadores de grano, por lo cual los metales de aporte con presencia en pequeñas cantidades de Ti y Zr minimizan la tendencia a la fisuración como ocurre, por ejemplo, los metales de aporte 4043, 5356.

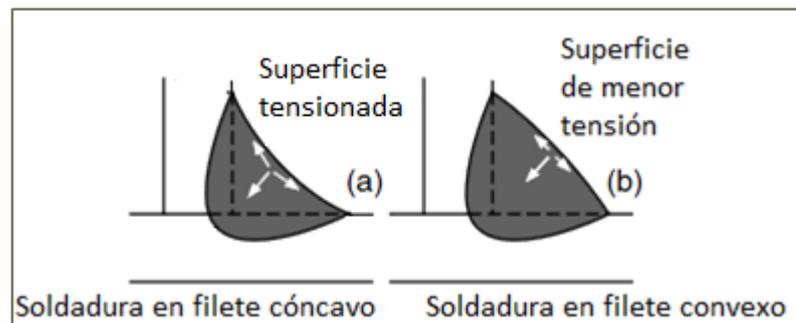
La velocidad de enfriamiento influye también sobre la forma del grano. Si se tiene velocidad de soldeo lento, la junta tendrá un mayor tiempo para solidificar, con ello se incrementará la aparición de granos columnares gruesos, incrementándose así la tendencia a la fisuración en caliente. No obstante, si se efectúa el soldeo con pasadas rápidas, el enfriamiento también será más rápido, con lo cual se tendrán granos finos y se reducirá la tendencia a la fisuración en caliente.

### **1.7.3 Condiciones de soldadura favorables**

Si no se tiene cuidado al proceder a soldar aleaciones de aluminio, las condiciones dadas pueden favorecer la tendencia a la fisuración en caliente; debido a esto, controlar las condiciones de soldadura ayudará a disminuir dicha tendencia.

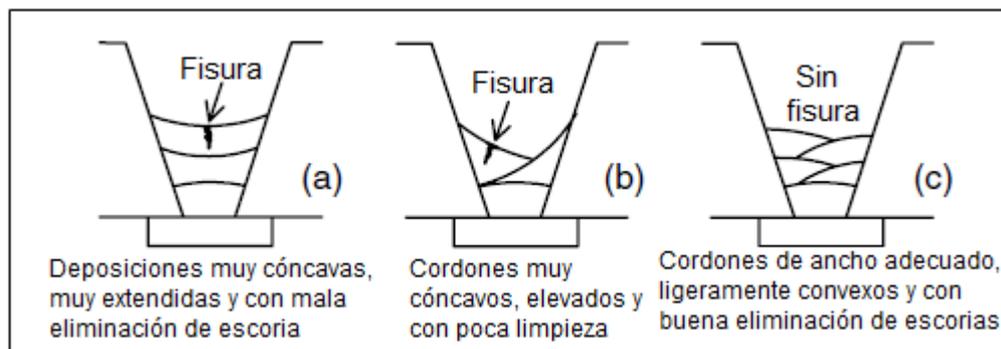
Por un lado, se puede reducir las tensiones generadas durante la soldadura mediante el precalentamiento del metal base. Por otro lado, la forma de la junta y la concavidad o convexidad influirán en el alivio de tensiones.

Si se observa la figura 1.10, en una unión soldada en filete se podrá ver que si la soldadura es cóncava (a), se generarán tensiones en la superficie y al no haber buena disipación de estas tensiones, incrementará la probabilidad de fisuración en caliente durante la solidificación. Sin embargo, si se tiene una soldadura convexa (b), la tensión se distribuye mejor hacia los extremos del cordón, de esta manera los esfuerzos generados serán menores y se disminuirá en cierta medida la tendencia a la fisuración en caliente.



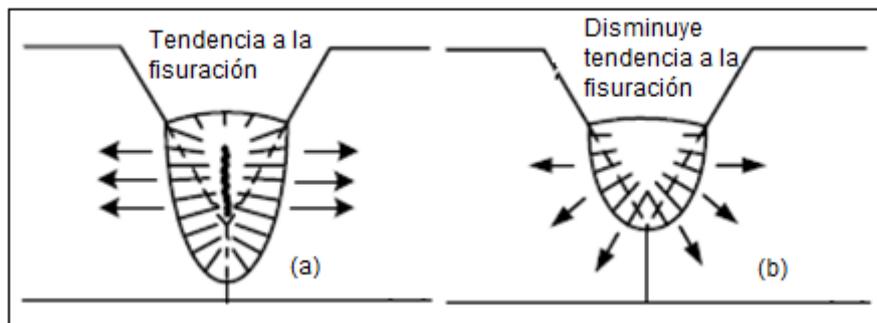
**Figura 1.10.** Influencia de la forma del cordón en la fisuración en caliente [6]

Si se tienen pasadas múltiples como en la figura 1.11, se observa que si los cordones entre pasada y pasada son extendidos y muy cóncavos se tendrá probabilidad de aparición de fisuración en caliente (a) y (b), por lo cual se prefiere que las pasadas sean convexas y poco extendidas (c).



**Figura 1.11.** Influencia de la forma del cordón en la fisuración en caliente [6]

Otro de los factores que también influye sobre la fisuración en caliente se presenta en la figura 1.12. Se observa que si los cordones son muy profundos y estrechos puede ser susceptible a la fisuración en caliente, ya que se tiene mayor probabilidad de crecimiento de granos columnares que crecen desde los lados opuestos del baño fundido. Este fenómeno se llega a disminuir cuando se tiene una penetración adecuada, como la mostrada en la figura 1.12 (b).



**Figura 1.12.** Efecto de la profundidad y ancho del cordón sobre la fisuración en caliente [6]

## Capítulo 2

### 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El presente capítulo muestra el procedimiento empleado en la realización de cupones con descarga de líneas de calor, cupones soldados a tope sin metal de aporte, y la preparación de probetas para los diferentes ensayos. De igual forma, se describen las metodologías de ensayo empleadas para la caracterización y determinación de las propiedades de los cupones y el metal base.

#### 2.1. Metodología

Para la obtención de los cupones de soldadura se utilizó el proceso de soldadura GTAW semiautomático, empleando gas de protección argón sin metal de aporte. El material base empleado fue la aleación de aluminio AA6063-T6 de 2.8 milímetros de espesor.

Si se observa la figura 2.1, se puede apreciar que, por ejemplo, si el material base AA6061 es soldado haciendo uso de la aleación AA4043 como material de aporte, la tendencia a la fisuración en caliente será disminuida significativamente; sin embargo, si el soldeo se realiza sin metal de aporte, este presentará una elevada tendencia a la fisuración en caliente. La tabla 2.1 muestra la composición química de la aleación AA6061; mientras que la tabla 2.2, muestra sus propiedades físicas y mecánicas.

**Tabla 2.1.** Composición química de la aleación AA6061 [13].

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	otros	Al
<b>Máx.</b>	0.8	0.7	0.4	0.15	1.2	0.35	-	0.25	0.15	0.15	El resto
<b>Mín.</b>	0.4	-	0.15	-	0.8	0.04	-	-	-	-	El resto

**Tabla 2.2.** Propiedades físicas y mecánicas de la aleación AA6061-T6 [13].

<b>Propiedades físicas</b>	
Densidad	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Conductividad térmica	167 W/(m-K)
Conductividad eléctrica	37 (%IACS)
<b>Propiedades mecánicas</b>	
Esfuerzo máximo a la tracción	310 MPa
Esfuerzo de fluencia	276 MPa
Alargamiento en 50 mm, mín	12%
Dureza Brinell (500 Kgf carga)	85

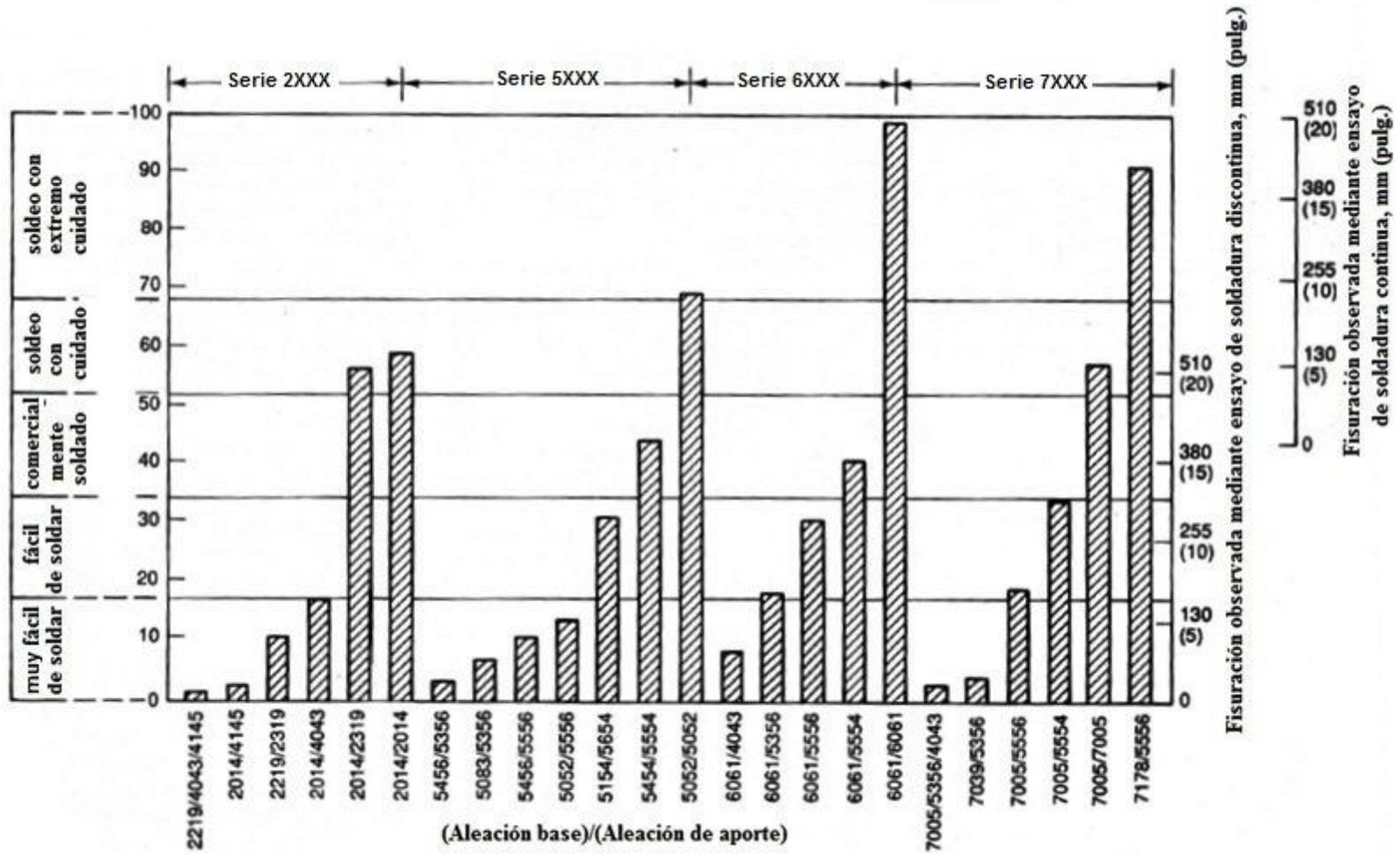


Figura 2.1. Sensibilidad relativa a la fisuración en caliente debido a la combinación de (aleación base/aleación de aporte) [13].

Debido a que la aleación AA6063-T6 posee características similares al de la aleación AA6061-T6, la aleación AA6063-T6 presentará similares problemas de fisuración en caliente en el soldeo sin metal de aporte.

Se eligió la aleación de aluminio AA6063-T6 debido a que es bastante difundida en nuestro medio; además de ello, presenta elevada tendencia a la fisuración en caliente y no se recomienda su soldeo mediante proceso GTAW sin material de aporte.

En general, cuando en el soldeo se utiliza metal de aporte resistente a la fisuración en caliente debido a su composición química, la tendencia a la fisuración en caliente se inhibe. No obstante, para el presente trabajo se eligió el proceso de soldadura GTAW sin material de aporte, para analizar la respuesta propia del material base a la fisuración en caliente.

Los ensayos de soldadura fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Manufactura de la Sección Ingeniería Mecánica de nuestra universidad, con el uso del *welding car* o carrito de soldadura.

Inicialmente se elaboró un procedimiento de soldadura para someter a los cupones de metal base a descarga de líneas de calor y así analizar la soldabilidad del material bajo condiciones normales de soldeo empleando aproximadamente 350 KJ/m, según recomendaciones de bibliografía. Con este ensayo se logró comprobar que bajo condiciones normales de enfriamiento, producidos por un proceso de soldeo de acuerdo a las recomendaciones, se produce fisuración en caliente.

Se realizaron ensayos de descarga de líneas de calor modificando la velocidad de disipación del aporte térmico, con la finalidad de analizar la tendencia a la fisuración en caliente bajo condiciones más rápidas de disipación de calor que normalmente se presentan en procesos de soldadura. De este modo, se efectuó la descarga de líneas de calor, empleando 350 KJ/m, sobre planchas con enfriamiento mediante respaldo de cobre y con enfriamiento empleando respaldo de cobre refrigerado con agua, bajo parámetros de soldadura similares al anterior.

Luego se realizaron cupones con descarga de líneas de calor enfriadas mediante respaldo de acero, respaldo de cobre y respaldo de cobre refrigerado con agua,

empleando bajo aporte término (inferior a 325 KJ/m); y a su vez, también se realizaron cupones empleando alto aporte térmico (superior a 400 KJ/m).

Se efectuaron ensayos microestructurales a todos los cupones con descarga de líneas de calor con la finalidad de analizar la relación que existe entre la profundidad de la fisuración en caliente con el aporte de calor a diferentes condiciones de enfriamiento.

Luego se procedió a realizar cupones soldados a tope sin metal de aporte con enfriamiento mediante respaldo de cobre, debido a que este método presentó buenos resultados en los ensayos de descarga de líneas de calor sobre planchas para bajo y medio aporte térmico; además de ello, este es un método práctico y sencillo de utilizar en construcciones soldadas.

Posteriormente se sometió a estos cupones a ensayos de líquidos penetrantes, a fin de encontrar indicaciones y discontinuidades en el cordón soldado. Así como también se realizaron ensayos microestructurales con la finalidad de cuantificar la profundidad de las fisuras encontradas y así analizar su relación con el aporte térmico. Por último se realizaron ensayos mecánicos para verificar la integridad de los cupones y comprobar si el esfuerzo máximo a la tracción obtenido en los cordones cumple con las exigencias del código de soldeo estructural de aluminio AWS D1.2.

Con el estudio y análisis de los resultados se busca brindar sugerencias para eliminar o disminuir la tendencia a la fisuración en caliente cuando se requiera emplear soldadura GTAW sin metal de aporte en aleaciones de este tipo, en planchas de 2.8 milímetros de espesor.

## **2.2. Materiales y proceso de soldadura**

### **2.2.1. Metal base**

Para la realización de los cupones de soldadura de aleación de aluminio AA6063-T6 se utilizó planchas rectangulares de 100 x 150 x 2.8 mm. La composición química y propiedades mecánicas nominales del metal base se muestran en las tablas 2.3 y 2.4 respectivamente.

**Tabla 2.3.** Composición química de la aleación AA6063-T6 [13].

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	otros	Al
<b>Máx.</b>	0.6	0.35	0.1	0.1	0.9	0.1	-	0.1	0.1	0.15	El resto
<b>Mín.</b>	0.2	-	-	-	0.45	-	-	-	-	-	El resto

**Tabla 2.4.** Propiedades físicas y mecánicas de la aleación AA6063-T6 [13].

<b>Propiedades físicas</b>	
Densidad	2.69 g/cm <sup>3</sup>
Conductividad térmica	201 W/(m-K)
Conductividad eléctrica	53 (%IACS)
<b>Propiedades mecánicas</b>	
Esfuerzo máximo a la tracción	241 MPa
Esfuerzo de fluencia	214 MPa
Alargamiento en 50 mm, mín	12%
Dureza Brinell (500 Kgf carga)	73

Dicha aleación es difundida en el mercado nacional y extranjero debido a que es un metal muy utilizado en construcciones estructurales. Ofrecen buen comportamiento a la corrosión en atmósferas industriales y marinas. Se recomienda utilizar soldadura GMAW y GTAW con material de aporte.

El metal base empleado presentó tratamiento superficial de anodizado, el cual es un proceso electrolítico que incrementa notablemente la capa de óxido de aluminio en el material, con lo cual la resistencia a la corrosión del metal también aumenta, siendo necesario realizar una buena limpieza superficial para retirar la capa de óxido protectora debido a que es un aislante eléctrico y no permite establecer un arco eléctrico de soldadura.

## 2.2.2. Proceso de soldadura

### 2.2.2.1. GTAW

Para el proceso de soldadura GTAW, utilizado en la obtención de cupones soldados de aleaciones de aluminio AA6063-T6 sin metal de aporte, se utilizó el equipo portátil PRESTOTIG 200 AC/DC mostrado en la figura 2.2, cuyos datos técnicos aparecen en la tabla 2.5.



Figura 2.2. Fuente de poder PRESTOTIG 200 AC/DC.

Tabla 2.5. Datos técnicos del equipo PRESTOTIG 200 AC/DC.

PRESTOTIG 200 AC/DC	
Voltaje de suministro	230 V (+/-10%), 50/60 Hz
Poder absorbido en máxima intensidad	6.5 kVA
Rango de regulación	5 a 200 A
Peso neto	16.5 Kg
Clase de protección	IP 23
Dimensiones externas (L x W x H)	410 x 180 x 390 mm
Normas	EN 60974-1;-10

#### 2.2.2.2. Gas de protección

Se utilizó gas argón al 100% como gas de protección para el soldeo de los cupones con un caudal de 9 litros/min para todos los ensayos. El caudal de argón es mayor al empleado en el soldeo de acero al carbono e incrementa a medida que el espesor aumenta.

#### 2.2.2.3. Welding car

Cuando la soldadura es ejecutada por un soldador calificado de forma manual, no se podrá realizar un correcto control de la velocidad de avance y de la longitud de arco, y no se conocerá con precisión si la velocidad entre dos cordones distintos se mantuvo constante para su estudio; además, la velocidad a lo largo de un solo cordón puede variar tanto al inicio como al final de cada cordón de soldadura.

Por esta razón es necesario utilizar un método semiautomático para analizar la influencia de la variación de algunos parámetros, manteniéndolos constantes a lo largo de un cordón de soldadura. Es por esto que se utilizó el carro de soldadura (*Welding car*) modelo MAGNETIC MOGGY de la marca GULLCO (figura 2.3).



Figura 2.3. *Welding car* modelo MAGNETIC MOGGY.

Con este equipo se puede mantener constante el ángulo de inclinación de la antorcha en  $90^\circ$ , la longitud de arco a lo largo del cordón y principalmente mantener constante la velocidad de soldeo, incrementando la confiabilidad de los resultados para su posterior análisis.

La mesa de trabajo debe ser de acero, ya que el *welding car* se asegura magnéticamente y realiza su recorrido sobre esta. Es necesario que la mesa de trabajo sea completamente plana, ya que si presenta algunas deformaciones, las ruedas que se apoyan sobre la mesa de trabajo pueden transitar sobre algún tipo de irregularidad, con lo cual la longitud de arco puede verse afectada.

#### **2.2.2.4. Variación de parámetros de soldeo**

Entre los parámetros de soldadura que fueron variados, tenemos la velocidad de soldeo, la intensidad de corriente y la longitud de arco.

Finalmente, se explicó que cuando se utiliza soldadura GTAW sin metal de aporte se debe elegir un material base que posea poca tendencia a la fisuración en caliente,

pues la tendencia será la del propio material. En el presente trabajo se analizará la aleación AA6063-T6, la cual posee elevada tendencia a la fisuración en caliente. Por lo cual se espera encontrar un adecuado rango de parámetros dentro de los cuales la tendencia a la fisuración en caliente se minimice o mitigue.

#### **2.2.2.5. Intensidad de soldeo**

El aporte de calor en una soldadura es directamente proporcional a la intensidad de corriente en una soldadura. Al aportar demasiado calor, el tiempo que tomará el cupón soldado en enfriar la junta será mayor, con lo cual se incrementa la probabilidad de obtener granos columnares gruesos, y con ello obtener fisuración en caliente.

En teoría, si se aporta demasiado calor, la tendencia a la fisuración incrementará, por lo cual una manera de disminuir dicha tendencia sería disminuyendo la intensidad de corriente; no obstante, si se disminuye demasiado la corriente y se mantiene elevada velocidad de soldeo, se corre el riesgo de no lograr penetrar la plancha; por lo cual, si se disminuye la intensidad de corriente también se debe disminuir la velocidad de soldeo para garantizar la penetración adecuada en la soldadura.

#### **2.2.2.6. Velocidad de soldeo**

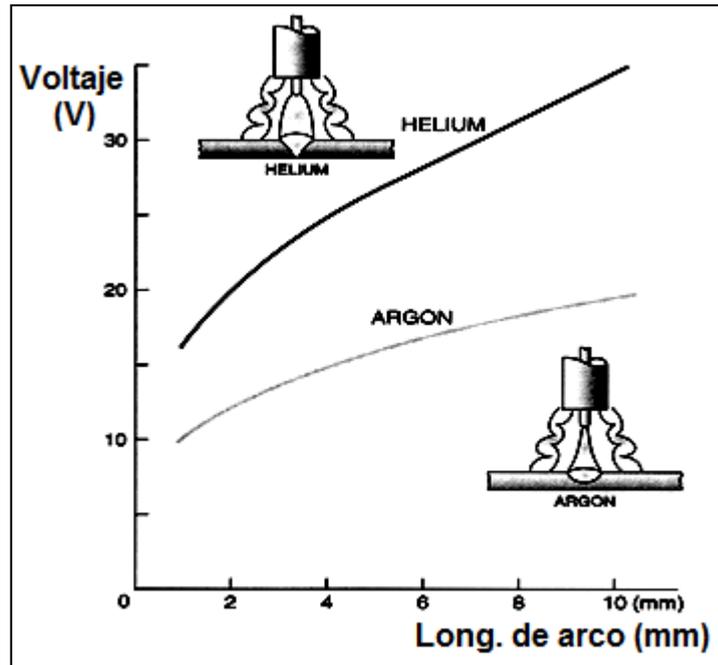
La velocidad de soldeo también influye sobre el calor de aporte, ya que si se efectúan pasadas muy lentas, el calor aportado será elevado. Esto ocasionará una mayor tendencia a la fisuración en caliente.

Por otro lado, si se realizan pasadas rápidas se corre el riesgo de que el metal no funda completamente y se presente penetración parcial. Debido a este motivo, es necesario encontrar un rango de velocidades bajo los cuales se pueda minimizar la tendencia a la fisuración en caliente y se obtenga penetración completa en la junta.

No obstante, la velocidad de soldeo también influye sobre el calor de aporte, pues a mayor velocidad de soldeo el tiempo de solidificación será más rápido, y con ello la tendencia a la fisuración en caliente disminuirá.

#### **2.2.2.7. Longitud de arco**

Se debe tener un buen control de la longitud de arco, pues como muestra la figura 2.4 el voltaje de aporte varía en relación al tipo de gas de protección y la longitud de arco.



**Figura 2.4.** Variación del voltaje con la longitud de arco para He y Ar en soldeo GTAW.

Si el voltaje varía, también lo hará el calor de aporte, pues ambos son directamente proporcionales; de esta manera, si no hay uniformidad en la longitud de arco se puede obtener un cordón con menor calor de aporte cuando hay mayor acercamiento y sucederá lo contrario durante el alejamiento, creando así distorsiones en el resultado de un solo cordón.

Debido a que esta es una relación teórica, se debe comprobar el valor real que arroja la fuente de poder durante cada ensayo para poder determinar el real calor aportado al cordón.

#### **2.2.2.8. Descarga de líneas de calor**

La descarga de líneas de calor, o líneas de fusión, fue utilizada para estudiar la soldabilidad del metal base, con la finalidad de analizar la facilidad o dificultad del soldeo de la aleación AA6063-T6 sin el uso de metal de aporte.

Este tipo de ensayo consiste en la formación de una zona fundida sobre una plancha de metal, mediante el uso de un arco eléctrico que realiza un avance sobre esta, con la finalidad de llevar al punto de fusión a una línea a lo largo de la longitud de la plancha. Esta zona fundida simula a un cordón de soldadura efectuado sin depósito de

metal de aporte. De esta manera se puede analizar la relación entre los resultados obtenidos con los parámetros de soldadura.

#### **2.2.2.9. Equipo de protección personal**

Cada uno de los ensayos se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma ANSI Z49.1 denominada “Seguridad en soldadura”, con la finalidad de elevar la seguridad del soldador durante el soldeo de cupones, para lo cual se utilizaron los siguientes Equipos de Protección Personal (EPP):

Uso de careta para protección del rostro y los ojos, ya que existe la posibilidad de que se produzcan chispas a lo largo del soldeo, además se debe proteger de la intensa luminosidad inherente al proceso de soldadura GTAW.

Respiradores-filtros de partículas, ya que en el proceso de preparación de cupones, la alúmina será eliminada por método mecánico y se obtendrán partículas en suspensión en el ambiente, los cuales podrían ser inhalados.

Ropas de seguridad de algodón con mangas largas, debido a presencia de chispas que pueden impactar contra la piel causando lesiones; además, como protección contra la radiación ultravioleta.

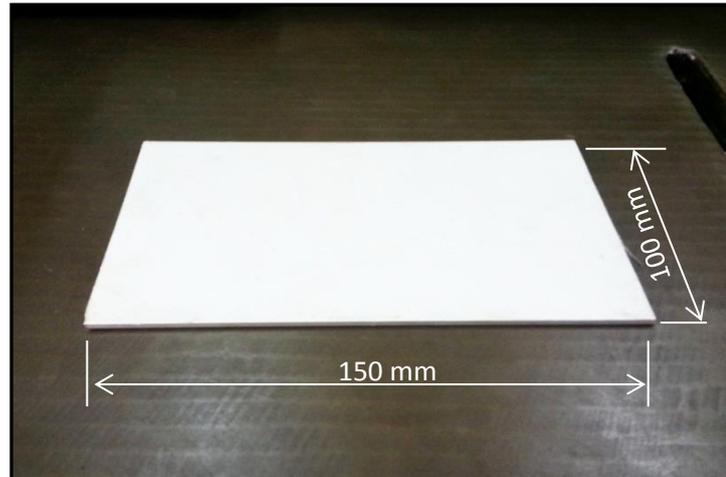
### **2.3 Elaboración de cupones de ensayo**

#### **2.3.1. Elaboración de juntas**

Se preparó planchas de 100 x 150 x 2.8 mm tanto para los ensayos de soldeo con descarga de líneas de calor, así como la obtención de los cupones de soldadura a tope, como muestra la figura 2.5.

Los bordes de las planchas donde se realizará la soldadura deben ser limpiados adecuadamente según recomendaciones efectuadas, con la finalidad de eliminar la alúmina de la superficie del metal base y quitar cualquier rastro de grasa o suciedad en la superficie.

En el caso de ensayos iniciales (descarga de líneas de calor) se realizaron dos líneas de calor por cada cupón con separación de 2 pulgadas entre líneas, con la finalidad de que las tensiones generadas en el primer cordón no influya sobre la tendencia a la fisuración en caliente del segundo cordón (figura 2.6).



**Figura 2.5.** Planchas de aleación AA6063-T6 para la fabricación de cupones



**Figura 2.6.** Líneas de fusión en cupones.

En el segundo caso, se soldaron dos planchas para el soldeo de uniones a tope como muestra la figura 2.7. Se puede observar en dicha figura que las planchas presentan deformación angular, debido a las tensiones generadas por efectos térmicos durante el soldeo a tope de planchas. Debido a este problema, se tuvo que modificar el diseño del respaldo de acero, para incluir unas platinas de sujeción de los materiales a unir. Este respaldo será detallado en el punto 2.3.3.



**Figura 2.7.** Soldeo a tope de planchas.

### 2.3.2. Limpieza superficial

Las planchas de aleación de aluminio AA6063-T6 se encuentran anodizadas, esto generó un inconveniente con la limpieza superficial con cepillo de alambres de acero inoxidable, pues la capa de alúmina era gruesa y presentaba fuerte adherencia.

El código AWS D1.2 menciona que si se tienen estos problemas, se puede hacer uso de discos cerámicos para retirar la capa de alúmina, seguido de una adecuada limpieza con cepillo de alambres de acero inoxidable, para retirar los restos de alúmina y material cerámico atrapado entre las imperfecciones. La mala limpieza ocasionará porosidades, pero no influirá sobre la aparición de fisuración en caliente. La zona de limpieza fue como mínimo 20 mm desde el borde de la zona de unión (figura 2.8).



**Figura 2.8.** Bordes de planchas limpios para su soldeo.

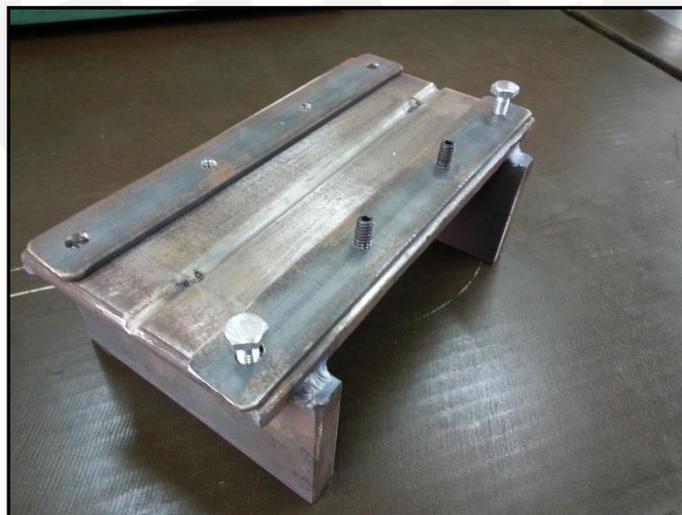
### 2.3.3. Ensayos iniciales

Se verificó los parámetros de soldadura que más conviene variar para obtener mejores resultados mediante el uso de cupones de prueba, a los que se le realizó descarga de líneas de calor.

Se realizaron los primeros ensayos sobre 3 cupones, con la finalidad de analizar la respuesta del material ante los diferentes parámetros. Con esto se pudo afinar mejor el rango en el que variaron los parámetros que son estudiados en el capítulo 3.

Luego de observar que a menor aporte de calor se obtuvo menor porcentaje de fisuración en caliente equivalente, se tomó la decisión de buscar métodos que aceleren el enfriamiento del cordón con la finalidad de tener un mejor control sobre la sensibilidad a la fisuración en caliente del material estudiado.

En este sentido, se efectuaron ensayos mediante tres métodos de enfriamiento, el primero de ellos fue mediante el empleo de un respaldo de acero, el cual es mostrado en la figura 2.9.



**Figura 2.9** Respaldo de acero

La figura 2.9 muestra dos platinas de sujeción. Estas fueron utilizadas únicamente durante el soldeo a tope de planchas, con la finalidad de prevenir que se produzcan defectos como desalineación (high low), deformación angular, entre otros, a causa del aporte térmico. En el caso de la elaboración de cupones con líneas de fusión, no se

utilizó las platinas de sujeción, y la descarga de líneas de fusión se realizó sobre el respaldo de acero.

También se diseñó un respaldo de cobre refrigerado con la finalidad de que el cobre (mejor disipación de calor) incremente la velocidad de solidificación del cordón. Este respaldo también cuenta con dos platinas de sujeción para soldeo a tope (figura 2.10), mientras que en la descarga de líneas de fusión empleando respaldo de cobre, no se utilizó sujeción con estas platinas.



**Figura 2.10** Respaldo de cobre

Además de ello se empleó un tercer método de enfriamiento utilizado únicamente en los ensayos de descarga de líneas de calor, el cual utiliza agua de enfriamiento que cubrirá al respaldo de cobre (figura 2.11). Este es el método de enfriamiento más rápido que se consigue entre los tres ensayados.



Figura 2.11 Respaldo de cobre refrigerado con agua de enfriamiento

#### 2.3.4. Descarga de líneas de calor sobre planchas

Se realizaron líneas de calor (fusión) con el uso de los tres métodos de enfriamiento sometidos a aporte de calor bajo, medio y alto, con la finalidad de determinar las condiciones de soldadura que favorecen la disminución o mitigación de fisuración en caliente en el metal base empleado. Para cada ensayo, las planchas fueron apoyadas sobre los respaldos y se sujetaron con el uso de laines dobladas a manera de “clips”.

Luego de finalizado cada soldeo, se procedió a efectuar ensayos de inspección visual a los cupones para observar la aparición y propagación de fisuración en caliente. Con ello se pudo elegir, de acuerdo a la influencia de cada parámetro sobre la aparición de fisuración en caliente, los parámetros para el soldeo de los cupones. Por tal motivo, se pudo mejorar continuamente en la elección de los parámetros de soldadura que más convinieron en el desarrollo de la investigación.

##### 2.3.4.1. Enfriamiento mediante respaldo de acero

En cuanto a la realización de líneas de fusión en cupones con enfriamiento mediante respaldo de acero, se realizaron un total de 9 ensayos con 12.75 Voltios (dado por la longitud de arco) y 9 litros/min de argón, cuyos parámetros se pueden apreciar en la tabla 2.6.

**Tabla 2.6.** Parámetros de soldeo empleados.

Cupón N°	Intensidad (A)	Velocidad de soldeo (cm/min)
1	100	20
2	110	15
3		15
4		15
5		20
6		20
7	112	22
8	120	26
9		30

Los ensayos de inspección visual confirmaron la relación entre la fisuración en caliente con los parámetros de soldeo. No obstante no se pudo obtener probetas sin presencia de fisuración en caliente. Esto servirá de guía al momento de elegir los parámetros de soldeo a tope.

#### **2.3.4.2. Enfriamiento mediante respaldo de cobre**

Los ensayos de descarga de líneas de calor empleando enfriamiento con respaldo de cobre fueron realizados a 12.75 Voltios y con 9 litros/min de gas argón.

Los valores de los parámetros que se utilizaron durante el proceso de soldadura con respaldo de cobre son mostrados en la tabla 2.7.

**Tabla 2.7.** Parámetros de soldeo empleados.

Cupón N°	Intensidad (A)	Velocidad de soldeo (cm/min)
1	110	30
2		26
3		20
4		20
5		20
6		15
7	115	20
8		26
9		30
10	120	26

Se utilizó el respaldo de cobre en vista de que este material incrementa la velocidad de disipación del aporte de calor, con lo cual se podrá obtener un mejor control sobre la aparición de fisuración en caliente.

#### **2.3.4.3. Enfriamiento mediante respaldo de cobre refrigerado con agua**

Para estos ensayos se utilizó 9 litros/min de argón y 12.75 Voltios. Los valores de los parámetros que se utilizó durante la descarga de líneas de fusión empleando respaldo de cobre refrigerado con agua de enfriamiento se muestran en la tabla 2.8.

**Tabla 2.8.** Parámetros de soldeo empleados.

Cupón N°	Intensidad (A)	Velocidad de soldeo (cm/min)
1	110	15
2		20
3	120	26
4		30
5	125	20
6		26

#### **2.3.5. Inspección visual en cupones con descarga de líneas de calor**

Se realizó inspección visual en los cupones obtenidos luego de la descarga de líneas de calor, con la finalidad de observar la aparición y crecimiento de la fisuración en caliente.

Posteriormente se realizó la medición de las fisuras encontradas y se registró la longitud de las mismas para poder estimar el índice de fisuración en caliente presente en las planchas soldadas.

#### **2.3.6. Ensayos microestructurales a cupones con descarga de líneas de calor**

Las probetas con descarga de líneas de calor fueron sometidas a ensayos microestructurales para analizar la profundidad, espesor, etc. de las fisuras encontradas, buscando su relación con los parámetros de soldeo para cada método de enfriamiento analizado en el presente trabajo de investigación.

### a) Equipos y materiales empleados

- **Microscopio:** Para caracterizar la microestructura de los cupones se utilizó el microscopio confocal Leica TCS SP5 (figura 2.12) y el estereoscopio Leica S8 APO (figura 2.13), que se encuentran en el Laboratorio de Materiales.



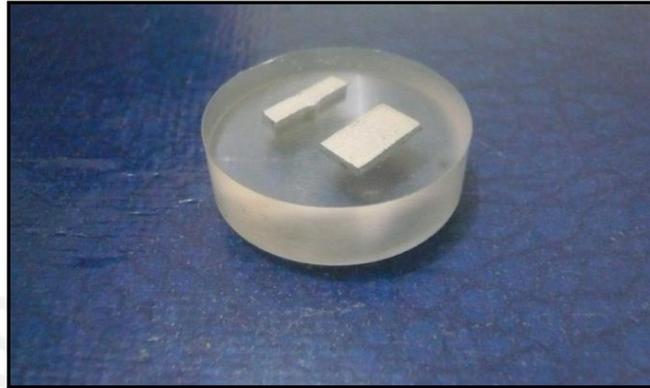
Figura 2.12. Microscopio confocal Leica TCS SP5 para inspección metalográfica.



Figura 2.13. Estereoscopio Leica S8 APO para inspección macrográfica.

Ambos equipos incorporan cámaras digitales para la captura de imágenes a través de la computadora. El microscopio permite aumentos de 50X, 100X, 200X, 500X y 1000X y es usado para ensayos metalográficos; mientras que el estereoscopio es de bajos aumentos (hasta 40X, regulable) y se utiliza para ensayos macroscópicos.

- **Briquetas:** Se fabricaron briquetas a partir de los cupones con líneas de calor (figura 2.14). En cuanto a la preparación superficial, se utilizó un método similar al del acero. Se utilizó las recomendaciones del ASM handbook “Aluminum and aluminum alloys”, que recomienda un desbaste con lijas #180, #220, #320, #400 y #600. Posteriormente, para el pulido se utilizó alúmina de  $1\mu$ .



**Figura 2.14.** Briquetas para ensayos microestructurales.

Se presentaron dificultades en cuanto a la preparación superficial y pulido de las briquetas, ya que el aluminio es un material blando y se raya con facilidad. Estos rayones se hacían más apreciables a los aumentos requeridos por los ensayos microestructurales, dificultando la apreciación de los defectos o indicaciones que son de interés en este trabajo. Por este motivo, se tuvo que realizar un pulido muy cuidadoso para lograr que los rayones no se hicieran visibles a 50 aumentos.

Se utilizó ácido fluorhídrico al 0.5% como atacante químico, según ASTM 407-07

### **2.3.6.1. Ensayos macrográficos**

Se realizaron ensayos macrográficos a la sección transversal de la línea de fusión con el fin de visualizar de mejor manera la fisuración en caliente, ver su profundidad y relacionar los resultados obtenidos con los parámetros de soldeo con enfriamiento con respaldo de acero y cobre.

Se seleccionó dos cupones con descarga de líneas de fusión con penetración completa enfriados mediante respaldo de acero, respaldo de cobre y respaldo de

cobre refrigerado con agua. La inspección se realizó a la sección transversal del cordón de soldadura.

### **2.3.6.2. Ensayos metalográficos**

Se realizaron ensayos metalográficos a la sección longitudinal de líneas de fusión con la finalidad de apreciar fisuración intergranular.

Se seleccionó dos cupones con descarga de líneas de fusión con penetración completa enfriados por respaldo de acero, respaldo de cobre y respaldo de cobre refrigerado con agua. La inspección se realizó a la sección longitudinal del cordón de soldadura.

### **2.3.7. Uniones a tope sin metal de aporte enfriados mediante respaldo de cobre**

Se pudo observar durante los ensayos de descarga de líneas de calor, que debido a que no hubo un buen método de sujeción entre la plancha y el respaldo, las tensiones generadas por el aporte de calor ocasionaron deformación en el metal, perdiéndose contacto íntimo entre ambos; esto originó disminución en la transferencia de calor entre materiales. Por este motivo se mejoró el diseño del respaldo de cobre y se utilizó las platinas de sujeción mostrados en la figura 2.10 para garantizar buena transferencia de calor entre la plancha y el respaldo, logrando con ello incrementar la velocidad de disipación de calor.

En vista de que el respaldo de cobre fue el método de enfriamiento que obtuvo mejor respuesta frente a la mitigación de fisuración en caliente en el análisis de la soldabilidad del metal base, se realizaron ensayos de soldeo a tope sin metal de aporte a bajo y medio aporte de calor haciendo uso de este método.

Si bien es cierto, el enfriamiento mediante el uso del respaldo de cobre refrigerado con agua es el que genera la condición de enfriamiento más efectiva, no se efectuaron ensayos de soldeo a tope haciendo uso este método, debido a que es poco práctico y difícil de utilizar en construcciones soldadas.

Las planchas que fueron soldadas con el uso del respaldo de cobre fueron sujetadas por pernos prisioneros para evitar que las tensiones generadas por efectos térmicos ocasionen defectos no estudiados en el presente trabajo. La figura 2.15 muestra la forma de sujeción de las planchas a manera de embridamiento.



**Figura 2.15.** Sujeción a tope de planchas mediante platinas y pernos prisioneros

Gracias a la inspección visual de los cupones obtenidos en la tabla 2.7 se obtuvo la combinación de los parámetros que ofrecen una mejor calidad en el cordón.

Los ensayos fueron realizados variando la intensidad de corriente y velocidad de soldeo, entre los máximos y mínimos valores recomendados, cuya combinación resultará en aporte de calor bajo y medio. Los parámetros de soldadura son mostrados en la tabla 2.9.

**Tabla 2.9.** Parámetros de soldeo empleados.

Cupón N°	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Velocidad de soldeo (cm/min)
1	110	13.4	21
2	140	13.8	34
3	170	15.3	49

### 2.3.8. Ensayo de líquidos penetrantes en cupones soldados a tope

Debido a que el ensayo de líquidos penetrantes permite detectar continuidades superficiales en materiales sólidos no porosos abiertos a la superficie, se utilizó los líquidos penetrantes con la finalidad de cuantificar la longitud de fisuración en caliente expuesta a la superficie y así poder estimar el índice de fisuración en caliente presente en las planchas soldadas.

### a) Equipos y materiales utilizados

Se utilizó el líquido penetrante penetrante visible (coloreado) remobile con solvente SKL-SPD2, el removedor SKC-S y el revelador SKD-S2 (figura 2.16).



**Figura 2.16.** materiales utilizados para inspección de líquidos penetrantes, Spotcheck®

### b) Metodología de ensayo

Los cupones soldados son limpiados superficialmente con el uso del removedor y un paño limpio. Seguidamente, se aplica el líquido penetrante sobre el área de interés y se deja por cinco minutos (tiempo requerido para la penetración del líquido penetrante en el aluminio). Pasado este tiempo se procede a limpiar la superficie del cordón de soldadura, retirando el líquido penetrante que no penetró en la discontinuidad, con un paño humedecido con removedor, para luego aplicar el revelador.

Las discontinuidades superficiales encontrados en los cupones son registrados para su respectivo análisis.

### 2.3.9. Ensayos mecánicos

Se realizó ensayos mecánicos a las uniones a tope soldadas sin metal de aporte enfriadas mediante respaldo de cobre para comprobar si cumplen con las exigencias del código de soldadura AWS D1.2.

#### 2.3.9.1 Ensayo de tracción

Se realizó ensayos de tracción tanto a los cupones soldados a tope, así como también al material base en su forma de suministro.

#### a) Equipos y materiales utilizados

- **Máquina de tracción:** Los ensayos de tracción se realizaron con la máquina de tracción universal marca Zwick Roell modelo Special Metal Testing Machina SP de 60 KN de capacidad, en tracción, que se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la Sección Ingeniería Mecánica de la PUCP mostrado en la figura 2.17.



Figura 2.17. Máquina de tracción Zwick Roell Special Metal Testing Machina SP.

- **Probetas de material base:** Se fabricó tres probetas del material base según norma ASTM E8-12 “norma para métodos de ensayos de tracción para materiales metálicos”. En la figura 2.18 se muestran las tres probetas de metal base para ensayo a tracción, cuyas dimensiones se observa en la figura 2.19.

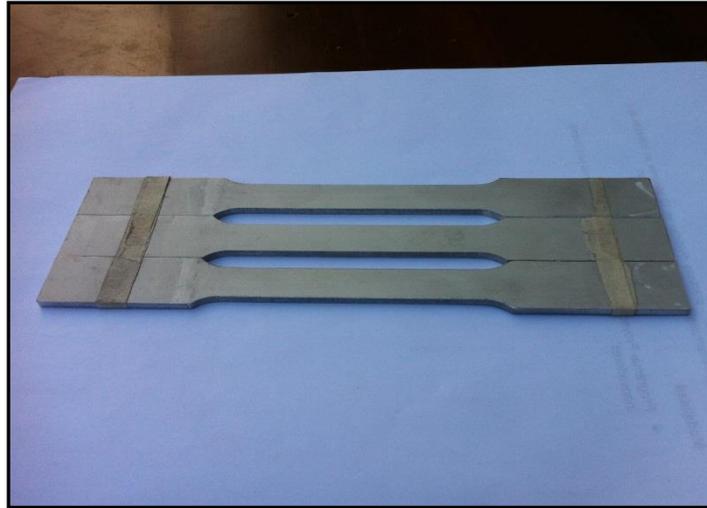


Figura 2.18. Probetas de material base para ensayo a tracción.

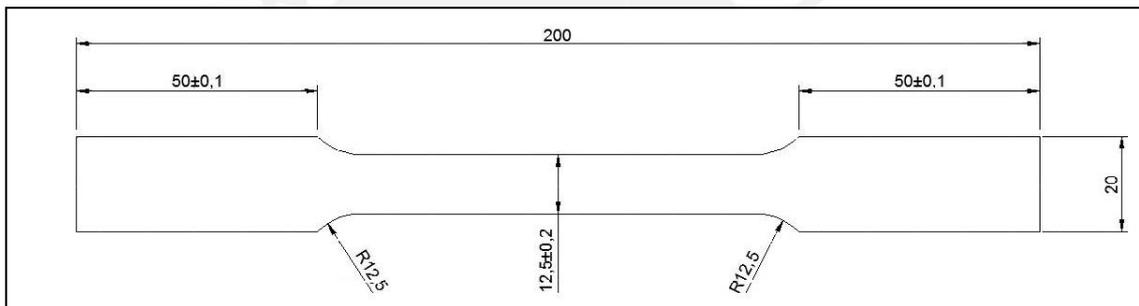


Figura 2.19. Dimensiones del cupón de metal base para ensayo a tracción según ASTM E8-12.

El ensayo de tracción a las probetas de material base se efectúa para caracterizar el material; es decir, se desea conocer las propiedades mecánicas (tracción y ductilidad) mediante el ensayo a tres cupones. En la tabla 2.10 se puede encontrar las dimensiones que presentó las probetas de material base.

Tabla 2.10. Probetas de material base para ensayo de tracción

Probeta	Sección transversal		
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
MB1	12.60	2.74	34.52
MB2	12.64	2.82	35.64
MB3	12.66	2.76	34.94

- **Probetas de cupones soldados a tope:** Los ensayos de tracción fueron realizados con la finalidad de verificar la resistencia de los cupones soldados con enfriamiento mediante respaldo de cobre, los cuales no presentaron fisuración en caliente en ningún caso.

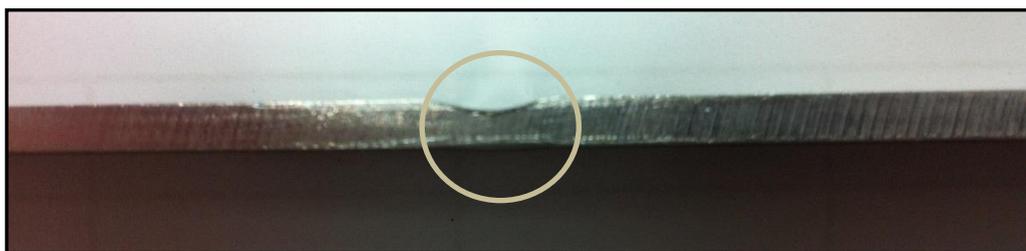
Se fabricó 2 probetas a partir de cada cupón. Estas probetas también fueron ensayadas según la norma ASTM E8-12 según se muestra en la figura 2.20.



**Figura 2.20.** Probeta para ensayo de tracción de un cupón soldado a tope.

Las probetas de cupones soldados no requieren tener sección reducida debido a que no se pretende caracterizar los cupones, sino que se desea obtener valores de resistencia en la unión soldada y además observar la zona de rotura.

Debido a que no se utilizó metal de aporte no habrá sobremonta en la unión. No obstante, se puede encontrar cordones muy cóncavos, tal como muestra la figura 2.21.



**Figura 2.21.** Concavidad en las probetas de cupón soldado para ensayo a tracción.

Si se tiene cupones con cordones cóncavos, será muy probable que la zona de rotura en el ensayo de tracción se dé en el cordón, ya que representa un concentrador de tensiones y posee la menor área transversal resistente.

Debido a este motivo, no se podrá hacer un buen análisis sobre la zona en que rompe la probeta, pero si se puede de analizar el esfuerzo máximo antes de la rotura; si se obtiene un resultado muy por debajo de la resistencia mínima que admite el código AWS D1.2, se puede sospechar que el cordón presentaba discontinuidades al interior.

La tabla 2.11 recoge las dimensiones de los cupones soldados a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre.

**Tabla 2.11.** Probetas de cupones soldados por respaldo de cobre

N° cupón	Probeta	Sección transversal			Observación
		Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	
1	1.1	12.36	2.30	28.43	Cordón cóncavo
	1.2	12.31	2.10	25.85	Cordón cóncavo
2	2.1	12.31	2.32	28.56	Cordón cóncavo
	2.2	12.31	2.48	30.53	Cordón cóncavo
3	3.1	12.31	2.35	29.02	Cordón cóncavo
	3.2	12.34	2.65	32.70	Cordón cóncavo

### b) Metodología de ensayo

Se hará uso de las recomendaciones de la norma ASTM E8-12 para efectuar los ensayos de tracción. La figura 2.22 muestra una probeta colocada entre las mordazas para su respectivo ensayo a tracción.

Las probetas para ensayo de tracción son colocadas en la máquina de tracción y sujetadas por las mordazas (una fija y otra móvil), para ser sometidas a carga axial con incremento progresivo de la carga hasta alcanzar la rotura de la probeta.



**Figura 2.22.** Probeta de material base puesta en máquina de tracción lista para ensayar.

### **2.3.9.2. Ensayo de doblado**

Los ensayos de doblado fueron realizados sobre las probetas fabricadas a partir de los cupones soldados a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre. Este ensayado no solo muestra la ductilidad de las probetas en la zona de estudio, sino que también muestra la integridad del cupón soldado.

El código de soldeo estructural de aluminio AWS D1.2 menciona que la longitud admisible de grieta que puede ser producida por las tensiones del doblado debe ser de 3 mm como máximo.

#### **a) Equipos y materiales empleados**

- **Punzón para doblado**

De acuerdo al código AWS D1.2, se debe utilizar un punzón de diámetro 4 veces el espesor del aluminio, por lo tanto se utilizó un punzón de 12 mm.

$$D_p=4t$$

Dónde:

D<sub>p</sub>: Diámetro del punzón

t: Espesor de la plancha

- **Probetas para ensayo de doblado**

Se fabricó probetas de planchas soldadas a tope sin material de aporte, con enfriamiento mediante respaldo de cobre. Las probetas fueron tomadas transversalmente de las uniones soldadas, según el código AWS D1.2.

**b) Metodología del ensayo**

Para los ensayos de doblado se sometieron las probetas a deformación plástica con un punzón de 12 mm de diámetro.

Se realizó doblado de cara en las probetas en un ángulo de doblado de 180° de doblez. Posteriormente se procedió a efectuar inspección visual para el análisis de resultados obtenidos (ver figura 2.23).



**Figura 2.23.** Ensayo de doblado a cupones soldados a tope.

## Capítulo 3

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Descarga de líneas de fusión

Las tensiones generadas en los cupones ocasionaron deformaciones en las planchas durante la descarga de líneas de fusión. Por tal motivo, las planchas fueron aseguradas a los respaldos con unas laines a manera de “clips”, con la finalidad de que estas permanezcan en contacto. No obstante a ello, no se pudo evitar que la plancha se deforme y pierda contacto íntimo con el respaldo, dificultando la transferencia de calor e incidiendo sobre la disipación del aporte de calor. De esta manera, se obtuvo dispersión en algunos resultados.

#### 3.2. Uniones a tope

La elevada dilatación térmica que posee el aluminio puede ocasionar desalineación entre planchas (high low) por efecto del calor aportado. Para evitar este defecto, se realizó apuntalamiento entre los bordes de las planchas a unir. No obstante, se tuvo demasiadas complicaciones debido a que todo apuntalamiento presentaba fisuración en caliente, aun cuando se realizó apuntalamiento con metal de aporte ER 4043 (ver figura 3.1).



**Figura 3.1.** Dificultades en el apuntalamiento. Presencia de fisuración en caliente.

Ante esta dificultad, se optó por colocar dos platinas de sujeción empernadas al respaldo de cobre para la sujeción de cada plancha durante el soldeo a tope, tal como se muestra en la figura 2.10. De esta forma se pudo asegurar la unión entre ambas planchas; además de ello, se pudo evitar que el aporte térmico ocasione defectos en la soldadura como desalineación o deformación angular.

Se logra apreciar en la figura 3.2, que como resultado de esta sujeción se obtiene menores deformaciones en el cupón.



**Figura 3.2.** Posicionamiento de cupones para soldeo a tope.

### **3.3. Inspección visual a cupones con descarga de líneas de calor**

Se empleó inspección visual sobre los cupones obtenidos con los tres métodos de enfriamiento para cuantificar la longitud de fisuración en caliente presente.

Con los resultados obtenidos se pudo estimar el índice de fisuración en caliente en cada cupón. Este índice relaciona la sumatoria de longitudes de las fisuras encontradas en un cordón sobre la longitud total del mismo.

De esta forma se puede efectuar un mejor análisis en cuanto a la relación entre los resultados obtenidos con los parámetros de soldeo y los métodos de enfriamiento.

### 3.3.1. Enfriamiento mediante respaldo de acero

En la tabla 3.1 se muestra el calor aportado, que está relacionado con los parámetros de soldeo, y el índice de fisuración en caliente que se obtuvo en los cupones.

**Tabla 3.1.** Resultados obtenidos en descarga de líneas de fusión con respaldo de acero.

Cupón N°	I.F.C. (%)	Q (KJ/m)
1	50	382.50
2	50	561.00
3	75	561.00
4	54	561.00
5	50	420.75
6	47	420.75
7	85	389.45
8	37	353.08
9	32	306.00

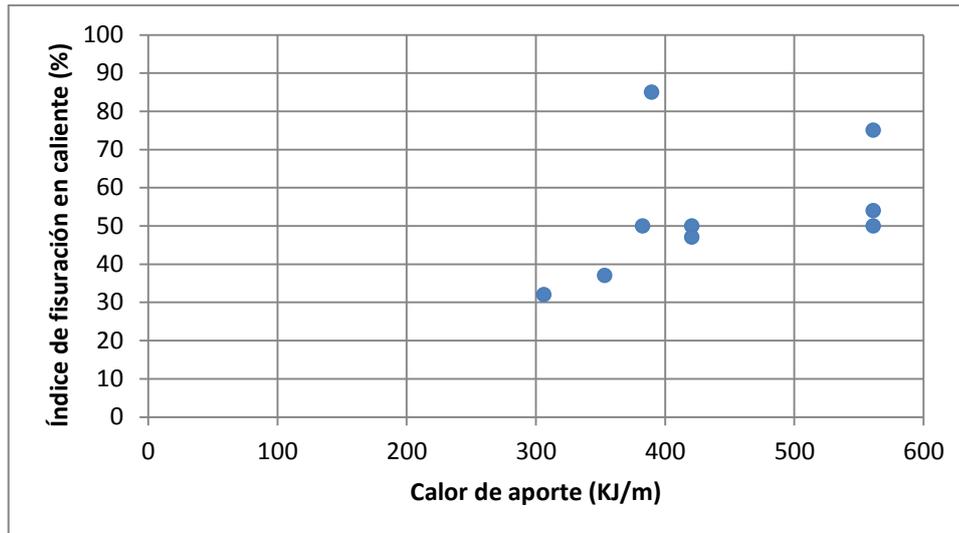
$$\text{I.F.C.} = \frac{\sum \text{longitud de fisuras}}{\text{longitud total del cordón de soldadura}} * 100\%$$

$$\text{Q: Calor de aporte} = \frac{\text{voltaje} * \text{intensidad}}{\text{velocidad de soldeo}}$$

Debido a la alta probabilidad de obtener fisuración en caliente bajo condiciones de soldeo normalmente empleados, no se pudo obtener cupones sin presencia de fisuración en caliente.

Con la finalidad de observar de mejor manera los resultados obtenidos en los ensayos, se hará uso del gráfico 3.1 para analizar la relación entre el calor de aporte con el índice de fisuración en caliente. Los valores obtenidos en la dispersión ayudaron a tener un mejor panorama en cuanto a la combinación de parámetros de soldadura utilizados en los demás ensayos, realizados con los diferentes métodos de enfriamiento.

Se observa que no solo se tiene alta tendencia a la fisuración en caliente, sino que no se pudo mitigar su aparición mediante el uso de los parámetros de soldadura. No obstante, se puede apreciar que cuando el calor de aporte disminuye, la tendencia a la fisuración disminuye también.



**Gráfico 3.1.** Relación entre el I.F.C. con el calor de aporte.

### 3.3.2. Enfriamiento mediante respaldo de cobre

La tabla 3.2 recoge los resultados que se obtuvieron en los cupones con descarga de líneas de calor con enfriamiento con respaldo de cobre.

**Tabla 3.2.** Resultados obtenidos en descarga de líneas de fusión con respaldo de cobre.

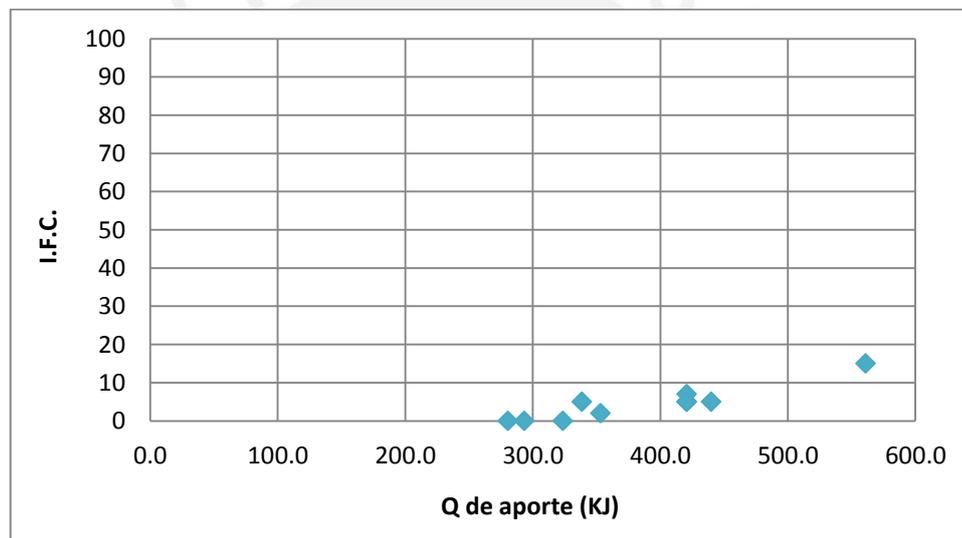
Cupón N°	I.F.C. (%)	Q (KJ/m)
1	0	280.5
2	0	323.7
3	7	420.8
4	5	420.8
5	5	420.8
6	15	561
7	5	439.9
8	5	338.4
9	0	293.3
10	2	353.1

$$I.F.C. = \frac{\sum \text{longitud de fisuras}}{\text{longitud total del cordón de soldadura}} * 100\%$$

$$Q: \text{ Calor de aporte} = \frac{\text{voltaje} * \text{intensidad}}{\text{velocidad de soldeo}}$$

Se observa que la tendencia a la fisuración en caliente disminuyó notablemente con respecto a los ensayos en los que se empleó respaldo de acero, debido a que se utilizó un mejor método de enfriamiento. Por ejemplo, si observamos los resultados obtenidos en los cupones 5 y 6 de la tabla 3.1 (enfriamiento mediante respaldo de acero), se aprecia que tienen 50% de índice de fisuración en caliente. No obstante, los cupones número 3, 4 y 5 de la tabla 3.2 (enfriados mediante respaldo de cobre) presentaron en promedio 5.5% de índice de fisuración en caliente. Los cupones mencionados fueron ensayados mediante parámetros de soldadura similares.

El gráfico 3.2 muestra la relación entre el índice a la fisuración en caliente con el calor de aporte.



**Gráfico 3.2.** Relación entre el I.F.C. con el calor de aporte

Al realizar una comparación con los resultados obtenidos en los ensayos de soldeo con enfriamiento mediante respaldo de acero, se puede observar que no solo el índice a la fisuración en caliente disminuyó notablemente, sino que también se pudo obtener resultados con poca dispersión, para calores de aporte bajos, medios y altos.

Debido a que no se sujetaron los cupones con descarga de líneas de calor mediante el uso de platinas de sujeción, mostrados en la figura 2.10, y solo fueron aseguradas con laines dobladas a manera de “clips”, se podría sospechar que no hubo total contacto entre la plancha y el respaldo de cobre, con lo cual se cree que pudo haber ingresado

aire entre estos elementos. Siendo el aire un aislante térmico, se dificultó la transferencia de calor entre estos elementos. Como resultado se tuvo pequeñas longitudes de fisuración en caliente para medio aporte de calor.

### 3.3.3. Enfriamiento mediante respaldo de cobre refrigerado con agua

La tabla 3.3 recoge los resultados obtenidos en los ensayos de descarga de líneas de calor mediante el enfriamiento con respaldo de cobre refrigerado con agua, siendo este el método más rápido de disipación de calor. Para este caso, no se tuvo fisuración en caliente en ninguno de los ensayos realizados.

**Tabla 3.3.** Resultados obtenidos en descarga de líneas de fusión con respaldo de cobre refrigerado con agua.

Cupón N°	I.F.C. (%)	Q (KJ/m)
1	2	561
2	0	420.8
3	0	353.1
4	0	407.4
5	0	282.9
6	0	367.8

$$\text{I.F.C.} = \frac{\sum \text{longitud de fisuras}}{\text{longitud total del cordón de soldadura}} * 100\%$$

$$\text{Q: Calor de aporte} = \frac{\text{voltaje} * \text{intensidad}}{\text{velocidad de soldeo}}$$

De igual manera, el gráfico 3.3 muestra la relación entre el índice de fisuración en caliente con el calor de aporte.

Se puede confirmar con este gráfico que cuando se tiene un buen método de disipación de calor, la fisuración en caliente puede ser mitigado bajo parámetros de soldeo similares al de los cupones con descarga de líneas de calor con enfriamiento mediante respaldos de acero y cobre, para aporte de calor bajo, medio y alto.

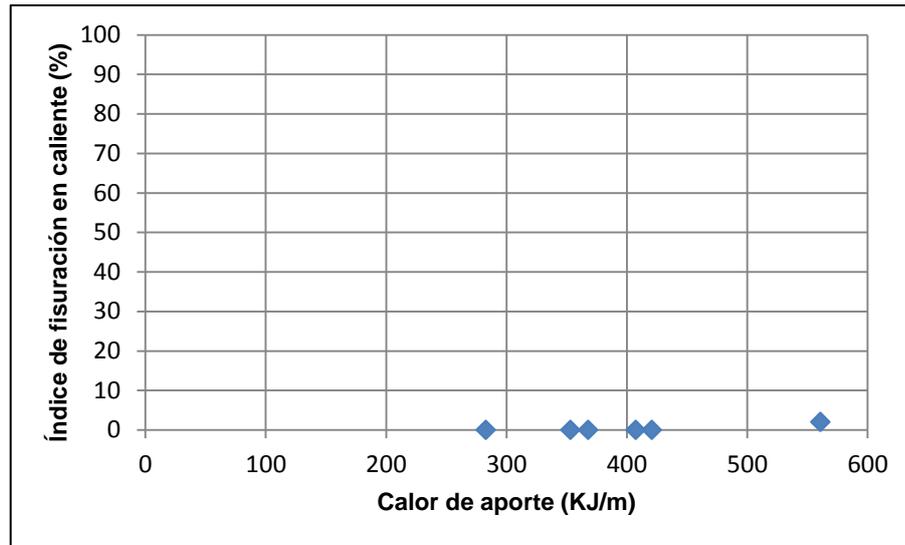


Gráfico 3.3. Relación entre el I.F.C. con el calor de aporte

#### 3.4. Ensayo de líquidos penetrantes a cupones soldados a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre

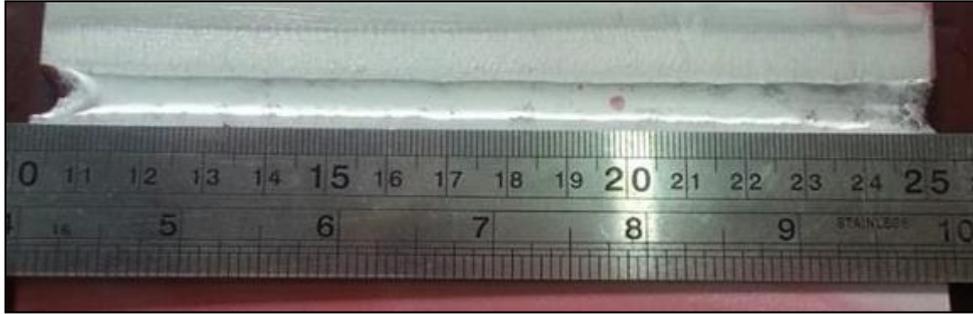
Los resultados de la inspección realizada sobre los cupones con enfriamiento mediante respaldo de cobre, se muestran a continuación en las figura 3.3, 3.4, y 3.5.



Figura 3.3. Inspección en cupón N°1.



Figura 3.4. Inspección en cupón N°2.



**Figura 3.5.** Inspección en cupón N°3.

La inspección de líquidos penetrantes muestra que, para aporte de calor bajo y medio, la fisuración en caliente pudo ser mitigada con el uso de respaldo de cobre.

Por este motivo se tomó la decisión de no realizar los ensayos de soldeo a tope de planchas con enfriamiento mediante respaldo de cobre refrigerado con agua debido a dos motivos. En primer lugar, este método es el más rápido entre los estudiados, por lo cual se esperarían resultados similares. En segundo lugar, este es un método de enfriamiento poco práctico y difícil de aplicar en construcciones soldadas.

La tabla 3.4 recoge los resultados obtenidos con la inspección de los cupones.

**Tabla 3.4.** Resultados de la inspección de líquidos penetrantes.

Cupón	Indicaciones encontradas	Evaluación
1	Porosidad dispersa	Aprueba
2	Fisuración en caliente en el cráter Porosidad individual	Aprueba
3	Porosidad individual	Aprueba

La tabla 3.5 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de uniones a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre.

Se puede observar que no hay presencia de fisuración en caliente en ninguna de las planchas soldadas con enfriamiento mediante respaldo de cobre, a bajo y medio aporte de calor.

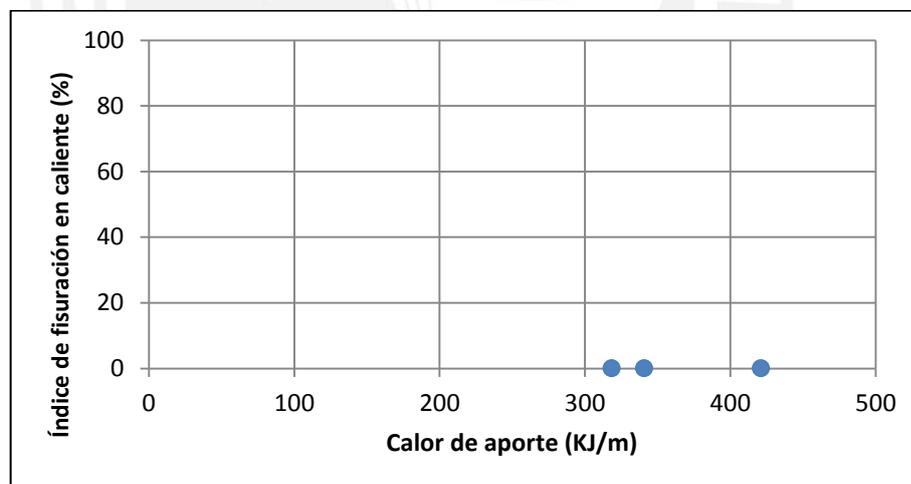
**Tabla 3.5.** Resultados obtenidos en la unión a tope de planchas con respaldo de cobre.

Cupón N°	I.F.C. (%)	Q (KJ/m)
1	0	421.1
2	0	340.9
3	0	318.5

$$\text{I.F.C.} = \frac{\Sigma \text{longitud de fisuras}}{\text{longitud total del cordón de soldadura}} * 100\%$$

$$\text{Q: Calor de aporte} = \frac{\text{voltaje} * \text{intensidad}}{\text{velocidad de soldeo}}$$

Se pudo comprobar, además, que al asegurar el contacto entre las planchas y el respaldo de cobre se logra eliminar la dispersión obtenida como resultado de los ensayos de descarga de líneas de calor mediante enfriamiento con el uso del respaldo de cobre. De esta forma, se puede mitigar la aparición de fisuración en caliente bajo similares condiciones de soldadura y aporte de calor. El gráfico 3.4 indica la relación entre el índice de fisuración en caliente con el calor de aporte.

**Gráfico 3.4.** Relación entre el I.F.C. con el calor de aporte

Gracias a que se tuvo la experiencia previa de los ensayos de descarga de líneas de calor con enfriamiento mediante respaldo de cobre, se pudo realizar una mejor selección de los parámetros de soldadura que ocasionan menor impacto en la aparición de fisuración en caliente. Además de ello, se mejoró el diseño del respaldo de cobre, incrementándose la velocidad de disipación de calor. Gracias a estos

factores, se consiguió obtener cupones en los cuales se pudo mitigar la aparición de fisuración en caliente.

### 3.5. Ensayos mecánicos

Se realizó ensayos mecánicos a las uniones soldadas a tope soldadas sin metal de aporte enfriadas mediante respaldo de cobre para comprobar si cumplen con las exigencias del código de soldadura AWS D1.2. De igual manera, se realizó ensayos mecánicos al material base para su caracterización mecánica.

#### 3.5.1. Ensayo de tracción

##### 3.5.1.1. Metal base

Los ensayos de tracción realizados en las probetas de material base AA6063-T6 en su estado de suministro, se efectuaron bajo norma ASTM E8.12. Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Resultados ensayo de tracción a probetas de material base.

Probeta	Área (mm <sup>2</sup> )	F <sub>fluencia</sub> (KN)	F <sub>máxima</sub> (KN)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{máx}$ (MPa)	L <sub>0</sub> (mm)	L <sub>f</sub> (mm)	Deformación (%)
MB1	34.52	7.11	8.25	205.9	239.0	50.0	56.3	12.6
MB2	35.64	7.42	8.45	208.2	237.1	50.0	56.3	12.6
MB3	34.94	7.29	8.30	208.6	237.6	50.0	56.2	12.4
<b>Promedio</b>		7.34	8.33	207.6	237.9			12.5

Se observa que el esfuerzo máximo promedio es de 237.9 MPa y 207.6 MPa de esfuerzo de fluencia promedio, con un alargamiento de rotura promedio de 12.5%. Los valores encontrados fueron utilizados para comparar los resultados obtenidos del ensayo de tracción a los cupones soldados a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre. Los cupones soldados a tope con enfriamiento mediante respaldo de acero no fueron ensayados, debido a la presencia de fisuración en caliente.

##### 3.5.1.2. Cupón soldado a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre

Se realizó ensayo de tracción a las probetas fabricadas a partir de los 3 cupones soldados mediante enfriamiento con respaldo de cobre. Los resultados de los ensayos

de tracción, efectuados sobre las probetas de cupones soldados a tope sin metal de aporte, son mostrados en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7.** Resultados ensayo de tracción a probetas con enfriamiento con respaldo de cobre.

Cupón N°	Probeta	Área (mm <sup>2</sup> )	F <sub>máxima</sub> (KN)	σ <sub>máx</sub> (MPa)	Zona de rotura
1	1.1	28.43	3.90	137.2	En el cordón
	1.2	25.85	3.52	136.2	En el cordón
<b>Promedio</b>			3.71	136.7	
2	2.1	28.56	4.25	148.8	En el cordón
	2.2	30.53	4.25	139.2	En el cordón
<b>Promedio</b>			4.25	144.0	
3	3.1	29.02	4.48	154.4	En el cordón
	3.2	32.70	5.05	154.4	En el cordón
<b>Promedio</b>			4.77	154.4	

Cada una de estas probetas presentó la zona de rotura en el cordón. Esto se debió a que las uniones fueron cóncavas. Esta zona se convirtió en un concentrador de tensiones y de menor área resistente, por lo cual la rotura se generó allí.

Se observa que el cupón N°1 posee el menor valor de esfuerzo máximo con 136.7 MPa en promedio. Este valor es menor en 42.4% con respecto al del material base.

En cuanto al cupón N°2, el valor del esfuerzo máximo en promedio es de 144.0 MPa, siendo menor en 39.5% a la resistencia máxima antes de la rotura del metal base; mientras que para el cupón N°3 se tiene 154.4 MPa de esfuerzo máximo promedio, cayendo en 35.2% respecto a la resistencia máxima promedio del metal base.

El código AWS D1.2 indica que para aleaciones de aluminio AA6063-T6, el valor mínimo que debe poseer una junta soldada debe de ser 115 MPa, por lo cual se puede inferir que las probetas cumplen lo mínimo requerido por el código.

### 3.5.2. Ensayo de doblado a cupones soldados a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre

En las figuras 3.12 y 3.13, se muestra los resultados obtenidos en los ensayos de doblado de cara, efectuados sobre las probetas elaboradas a partir de cupones soldados a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre.



**Figura 3.12.** Doblado de cara en la probeta del cupón N°2.



**Figura 3.13.** Doblado de cara en la probeta del cupón N°3.

El código de soldeo estructural de aluminio AWS D1.2 indica que la longitud de grieta admisible ocasionado por los esfuerzos generados con el ensayo de doblado es de 3 milímetros como máximo. Se puede apreciar que en ninguno de los dos casos, se tuvo grietas o fisuras posteriores al ensayo de doblado. De este modo, estos cupones cumplen con lo exigido por el código AWS D1.2.

## 3.6. Ensayos microestructurales a cupones con descarga de líneas de calor

### 3.6.1. Ensayo macrográfico

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la caracterización macrográfica efectuada a la sección transversal de las líneas de calor en los cupones, realizados a diferentes parámetros, con enfriamiento mediante respaldo de acero, respaldo de cobre y respaldo de cobre refrigerado con agua.

Dichos ensayos fueron realizados con la finalidad de analizar la relación que existe entre la profundidad de la fisuración en caliente con los parámetros de soldadura. Las imágenes fueron tomadas con aumentos de 10X y 16X.

### 3.6.1.1. Enfriamiento mediante respaldo de acero

En las figuras 3.14 y 3.15 se muestra a 16 aumentos dos secciones transversales de líneas de fusión, enfriadas por respaldo de acero.

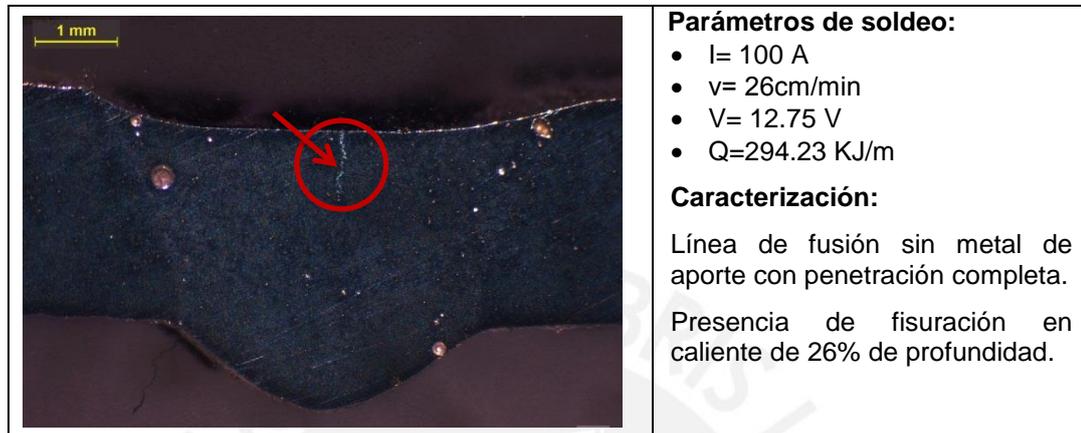


Figura 3.14. Sección transversal de la línea de fusión cupón N°2 (16X)

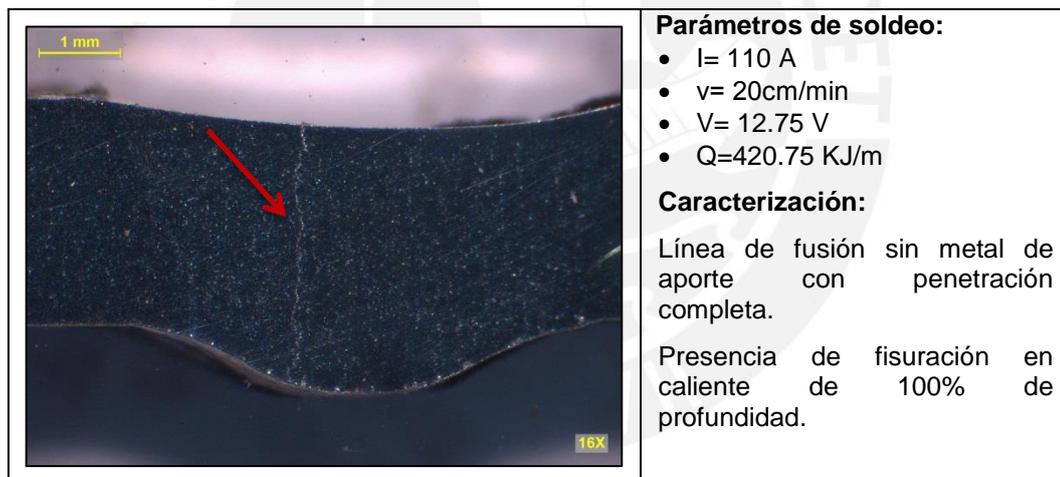
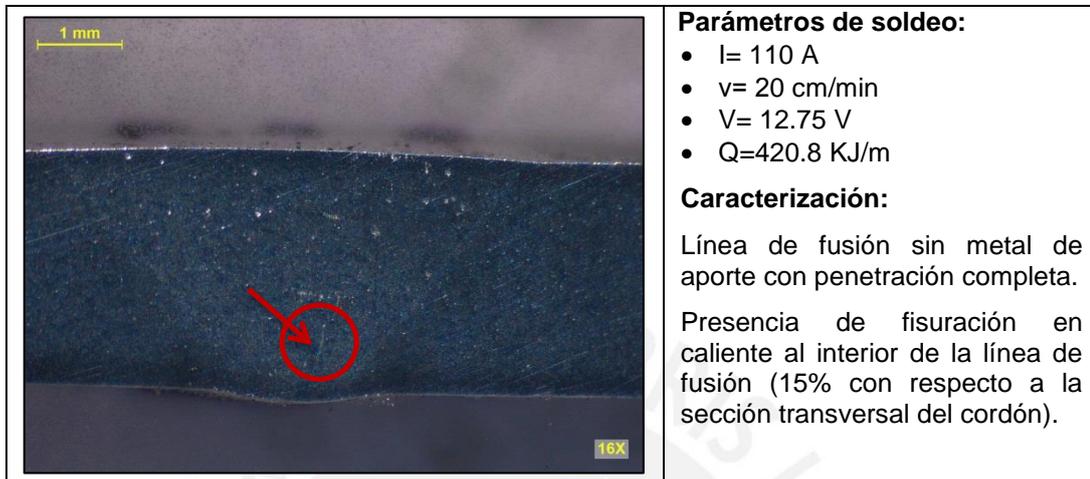


Figura 3.15. Sección transversal de la línea de fusión cupón N°7 (16X)

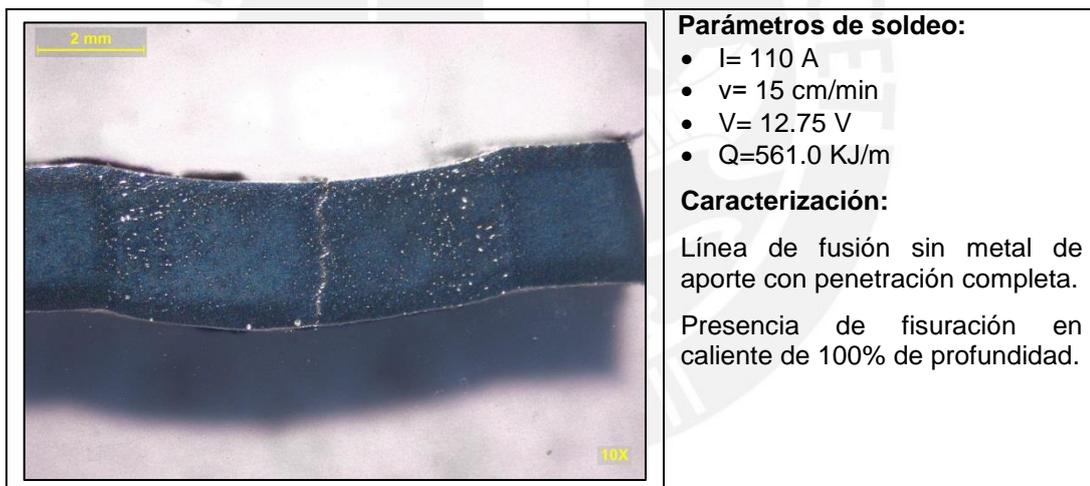
Se puede apreciar que al aumentar la intensidad de corriente y disminuir la velocidad de soldeo, el calor de aporte incrementará, con lo cual la tendencia a la aparición de fisuración en caliente será mayor. Se observa que el cupón de la figura 3.14 posee fisuración en caliente con un porcentaje de profundidad inferior al del cupón de la figura 3.15. Esto guarda estrecha relación con los parámetros de soldeo, pues si se realizan los ensayos con una combinación de parámetros que incrementen el aporte de calor, la profundidad de la fisura será mayor.

### 3.6.1.2. Enfriamiento mediante respaldo de cobre

A continuación se muestran en las figuras 3.16 y 3.17 la macrografía de dos secciones de líneas de fusión en cupones enfriados por respaldo de cobre.



**Figura 3.16.** Sección transversal de la línea de fusión cupón N°3 (16X)

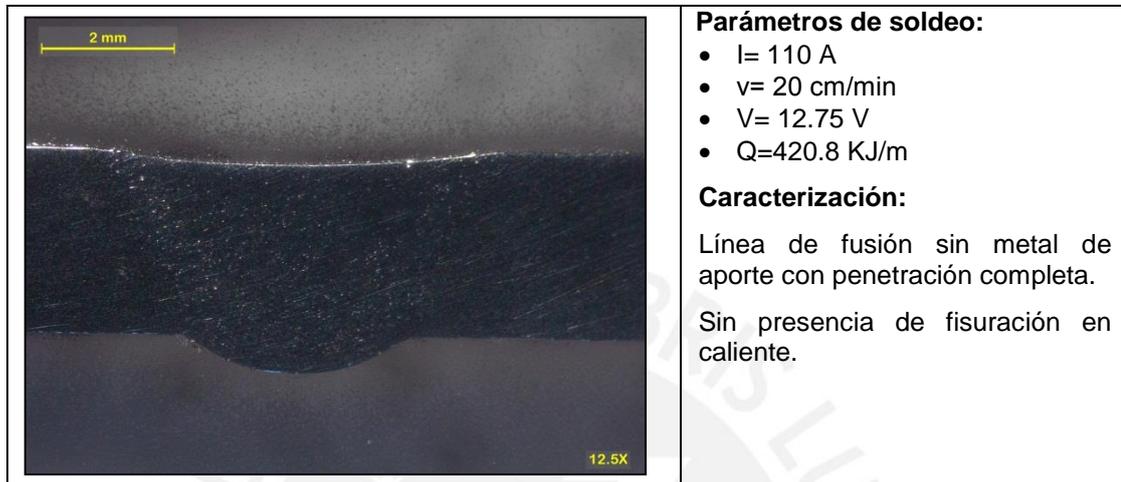


**Figura 3.17.** Sección transversal de la línea de fisura (ensayo N°6 tabla 2.7) (10X)

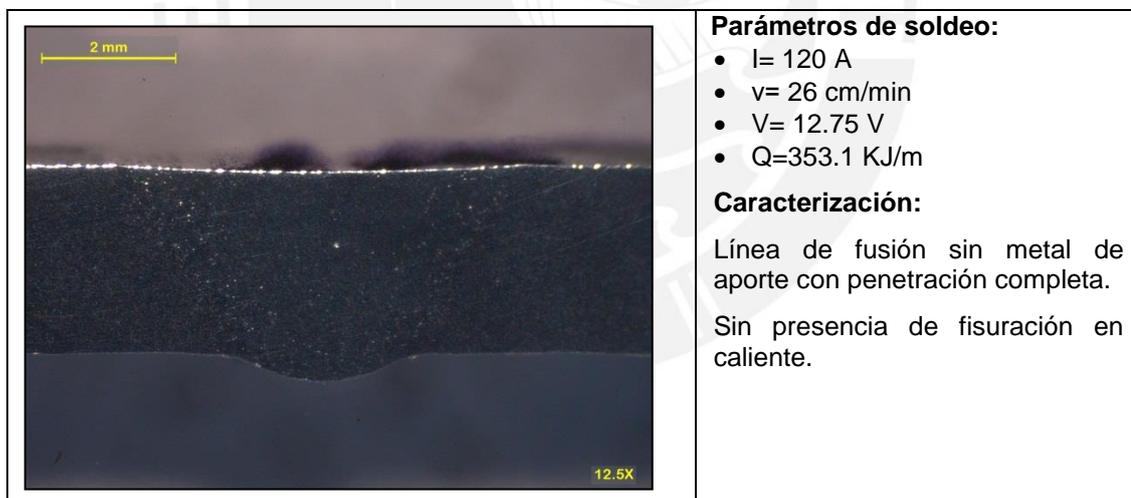
Se puede observar en las figuras 3.15 y 3.16, que para parámetros de soldeo similares se logra obtener una disminución en cuanto a la aparición de fisuración en caliente cuando se tiene un mejor método de enfriamiento (cobre). No obstante, en la figura 3.17 se aprecia que por más que se tenga un buen método de disipación de calor, al disminuir la velocidad de soldeo, el elevado aporte de calor incrementará la susceptibilidad a la aparición de fisuración en caliente. Por este motivo, el enfriamiento con respaldo de cobre no garantiza la mitigación de fisuración en caliente para alto aporte de calor.

### 3.6.1.3. Enfriamiento mediante respaldo de cobre refrigerado con agua

En las figuras 3.18 y 3.19 se muestra la macrografía de dos secciones de líneas de fusión en cupones enfriados por respaldo de cobre refrigerado con agua.



**Figura 3.18.** Sección transversal de la línea de fusión (ensayo N°1 tabla 2.8) (12.5X)



**Figura 3.19.** Sección transversal de la línea de fusión (ensayo N°3 tabla 2.8) (12.5X)

Si se observa los resultados obtenidos en las figuras 3.16 y 3.18, se aprecia que bajo condiciones similares de soldadura, no hay ningún signo de fisuración en caliente, para el caso del enfriamiento mediante respaldo de cobre refrigerado con agua. Esto se debe a que cuando hay un mejor método de enfriamiento, se pueden generar las condiciones adecuadas para mitigar la aparición de fisuración en caliente.

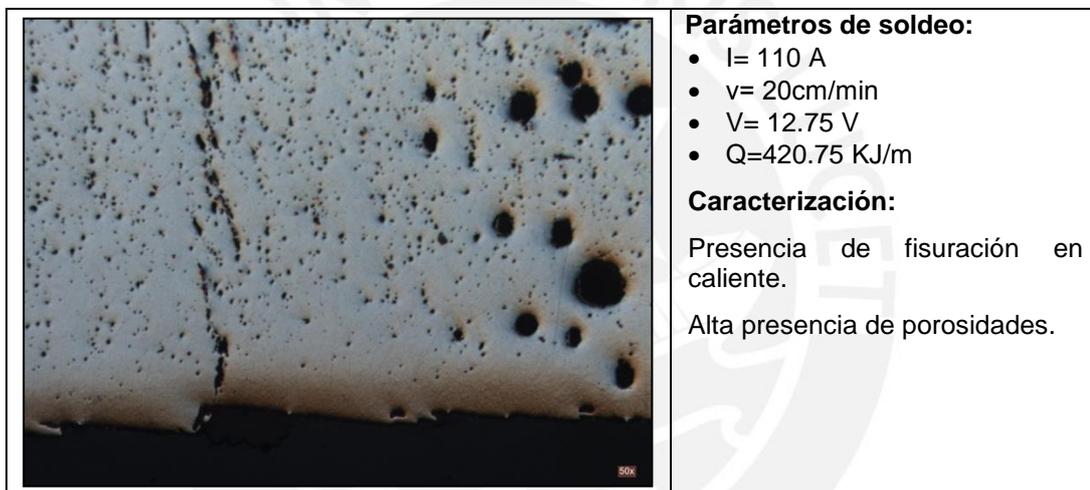
### 3.6.2. Ensayo metalográfico

En el caso de los ensayos metalográficos, se observó la sección longitudinal de la línea de fusión de cupones con descarga de líneas de calor, enfriados mediante el uso de respaldos de acero, cobre y cobre con agua, con la finalidad de observar longitudinalmente la fisura.

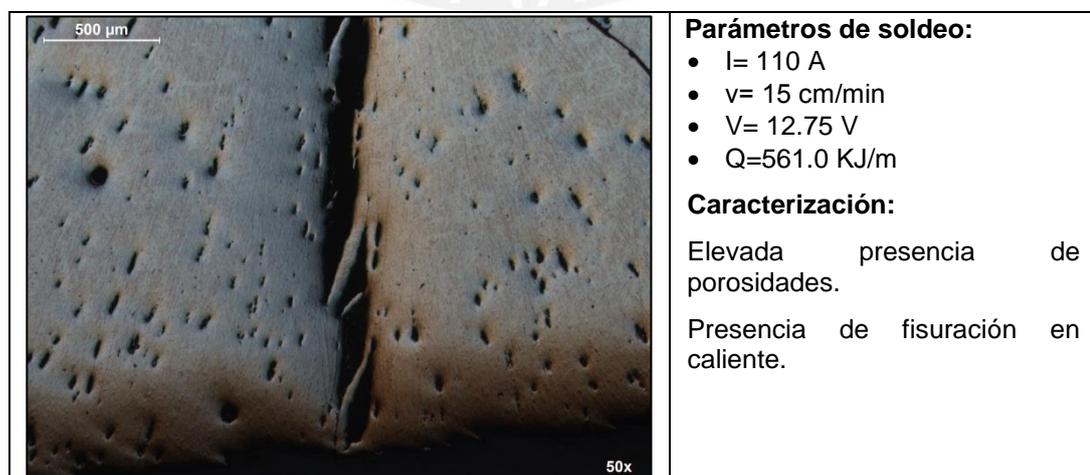
Los ensayos metalográficos fueron efectuados a 50 aumentos.

#### 3.6.2.1. Enfriamiento mediante respaldo de acero

Se muestra, en las figuras 3.20 y 3.21, la sección longitudinal de las líneas de fusión de dos cupones enfriados con respaldo de acero.



**Figura 3.20.** Vista en planta de la línea de fusión en cupón N°6 (50X)



**Figura 3.21.** Sección transversal de la línea de fusión en cupón N°3 (50X)

La presencia de porosidad es un defecto muy común en el soldeo de aleaciones de aluminio mediante proceso de soldadura GTAW. Esto se debe principalmente a la filtración de humedad del ambiente, que es rica en hidrógeno, en el baño fundido.

Si bien es cierto, se puede observar elevada presencia de porosidades en las muestras, estas no influyen en cuanto a la tendencia de la aparición de fisuración en caliente, debido a que son fenómenos independientes el uno del otro.

### 3.6.2.2. Enfriamiento mediante respaldo de cobre

Se muestran en las figuras 3.22 y 3.23, la metalografía de dos secciones de líneas de fusión en cupones enfriados por respaldo de cobre.

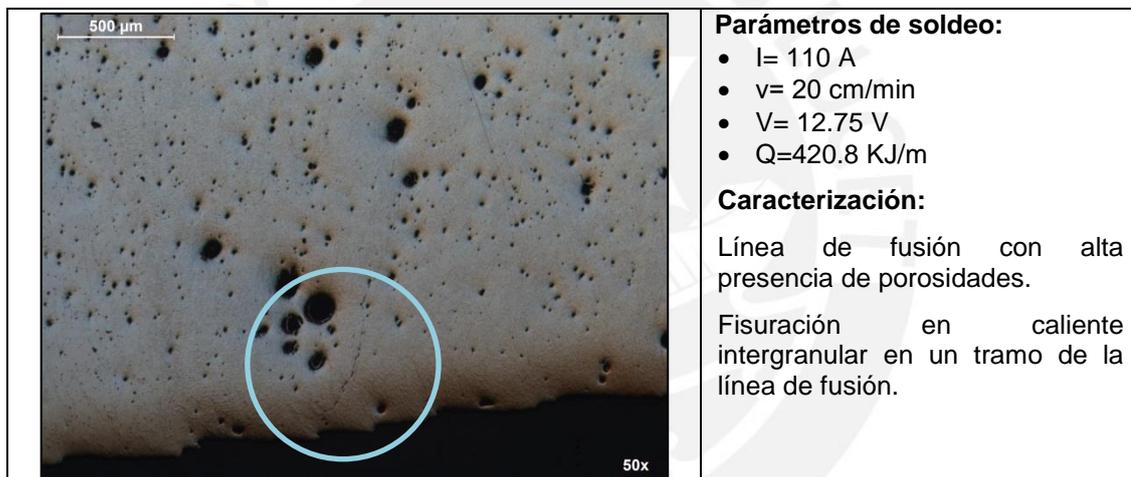


Figura 3.22. Sección transversal de la línea de fusión en cupón N°3 (50X)

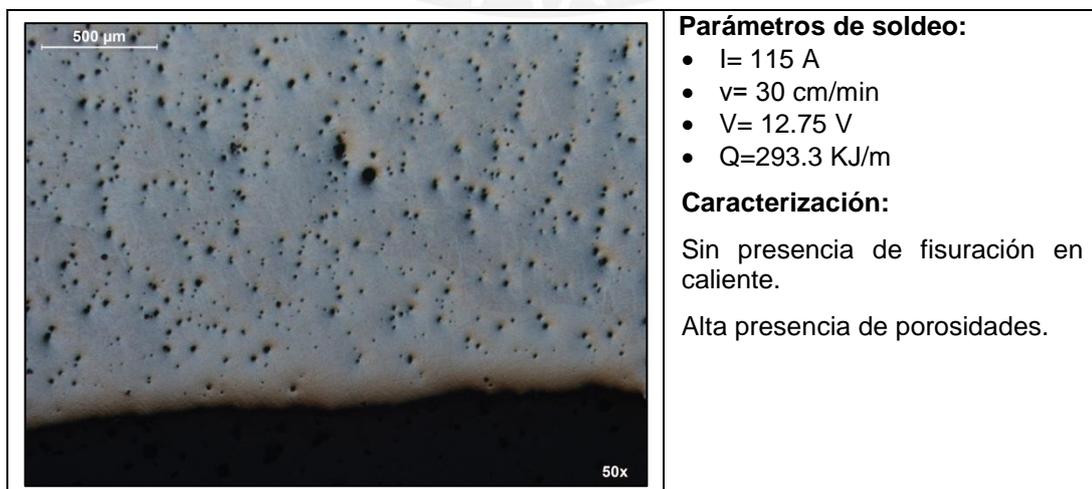
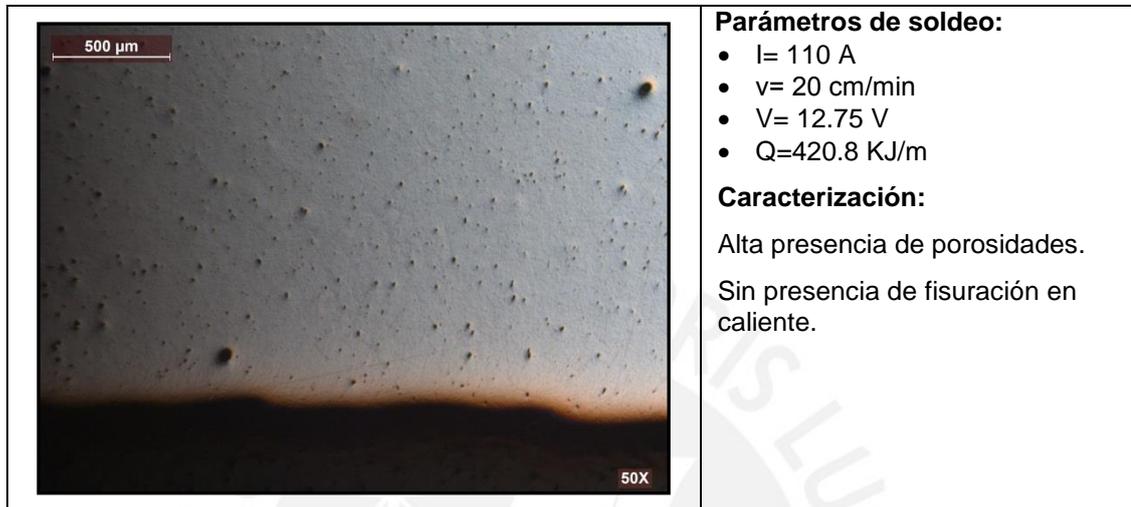


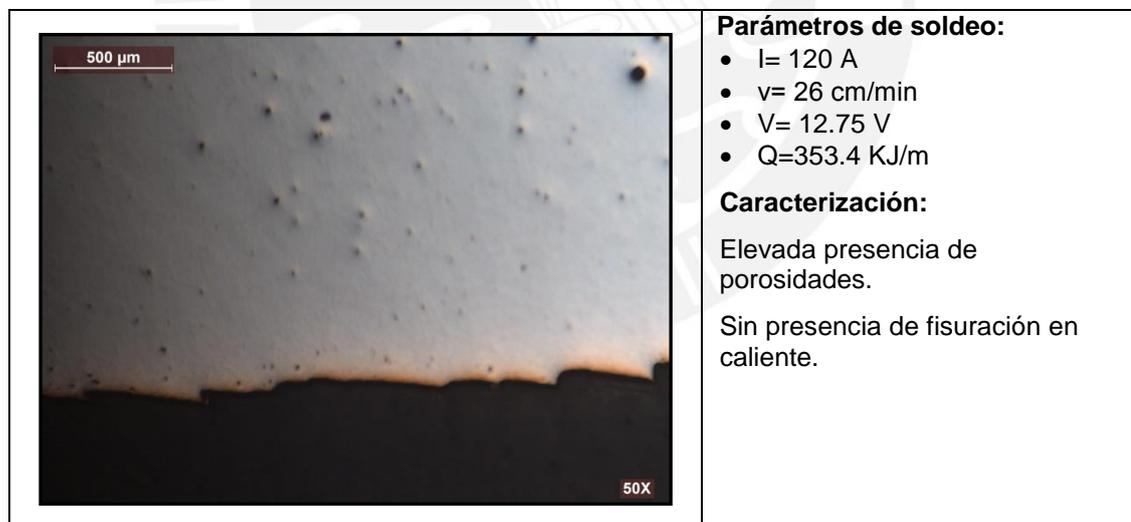
Figura 3.20. Vista en planta de la línea de fusión en cupón N°9 (50X)

### 3.6.2.3. Enfriamiento mediante respaldo de cobre refrigerado con agua

Se puede apreciar en las figuras 3.24 y 3.25 la metalografía de dos secciones de líneas de fusión en cupones enfriados por respaldo de cobre refrigerado con agua.



**Figura 3.24.** Sección transversal de la línea de fusión (ensayo N°1 tabla 2.8) (50X)



**Figura 3.25.** Sección transversal de la línea de fusión (ensayo N°6 tabla 2.8) (50X)

Ambas imágenes son representativas de la muestra, pues se realizó un barrido sobre la totalidad de la briqueta y no se encontró presencia de fisuración en caliente intergranular. Esto puede dar muestra de que con el método más efectivo de enfriamiento, existe menor probabilidad de aparición de fisuración en caliente.

## CONCLUSIONES

1. Se ha logrado obtener uniones soldadas en aleaciones de aluminio AA6063-T6, de 2.8 milímetros de espesor, empleando el proceso GTAW sin metal de aporte, libres de fisuración en caliente, básicamente debido al control de la velocidad de enfriamiento. Por ello, si se desea soldar aleaciones de este tipo, se deberá asegurar que la unión presente una mayor velocidad de enfriamiento a la que normalmente se presenta en los procesos de soldadura, ello se puede conseguir utilizando un respaldo de cobre. Además, se deberá asegurar que se presente un buen contacto entre el metal base y el respaldo a fin de garantizar una buena transferencia de calor y con ello conseguir una buena disipación de calor.
2. La inspección visual de los cupones en los que se realizó la descarga de líneas de calor empleando los tres métodos de enfriamiento, utilizados en la investigación, muestran que si se simulan condiciones normales de soldeo no se podrá controlar la aparición de fisuración en caliente. No obstante, si se asegura un buen método de enfriamiento, se podrá mitigar e incluso eliminar la aparición de fisuración en caliente bajo parámetros de soldeo similares.
3. Se obtuvo como resultado de los ensayos de descarga de líneas de calor, que siendo el respaldo de cobre refrigerado con agua el método de enfriamiento más efectivo, se logran generar las condiciones propicias para mitigar la aparición de fisuración en caliente para bajo aporte térmico (menor a 325 KJ/m), medio aporte de calor (aproximadamente 350 KJ/m) y alto calor de aporte (mayor a 400 KJ/m). No obstante, este método de enfriamiento es poco práctico y difícil de aplicar en construcciones soldadas.
4. En relación al aporte térmico, si el calor aportado es muy elevado se tiene mayor probabilidad de obtener fisuración en caliente, y conforme incrementa el aporte de térmico, mayor será la profundidad y longitud de la fisura. Por este motivo, no solo se debe buscar un buen método de disipación de calor para mitigar la aparición de fisuración en caliente, sino que también es necesario elegir la combinación de parámetros de soldadura que provean bajo calor de aporte, pero que al mismo tiempo sea suficiente como para obtener penetración completa en el material.
5. Los cupones soldados a tope con enfriamiento mediante respaldo de cobre presentaron una resistencia promedio de 145 MPa. Estos cupones mostraron su

integridad mediante ensayo de doblado. Por este motivo, cuando se proporciona los medios adecuados para mitigar la fisuración en caliente, el cordón soldado podrá satisfacer las exigencias del código de soldeo estructural en aluminio AWS D1.2.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Huang, C.: **Liquation cracking in full-penetration Al-Cu welds**. Welding Journal. 2004.
- [2] Saunders, H.L.: **Welding aluminium: Theory and Practice**, tercera edición, 1997.
- [3] King, Franck.: **El aluminio y sus aleaciones**. Editorial LIMUSA S.A. Mexico D.F., 1992.
- [4] Horwitz, Henry: **Enciclopedia de la soldadura**. Edición en español Vol. I, II México, 1990.
- [5] Maureira Gonzales, Mauricio: **Aplicación de la soldadura en estructuras de aluminio**. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Naval. Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2007.
- [6] Sindo, Kou: **Welding metallurgy**. Segunda edición. 2003
- [7] Liu, Ren-pei; Dong, Zu-jue; Pan, Yong-ming: **Solidification crack susceptibility of aluminium alloy weld metals**. University of Aeronautics and Astronautics. Nanjing: Science, 2006. Pág: 110-116.
- [8] AWS D1.2/D1.2M.2008: **STRUCTURAL WELDING CODE - Aluminium**. AWS, 2008.
- [9] Cary, Howard B.: **Manual de la soldadura**. Edición en español Vol. II México, 1992.
- [10] Hernández Riesco, Germán: **Manual del soldador**, Madrid CESOL, decimoquinta edición, 2010.
- [11] American Welding Society: **Welding Handbook**, volumen 3, octava edición, 1996.
- [12] Pajuelo Céspedes, Jorge: **Evaluación de los procesos de soldadura TIG con y sin material de aporte en planchas de acero estructural**. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2009.
- [13] Davis, J.R: General Introduction. In: **ASM SPECIALITY HANDBOOK. Aluminum and aluminum alloys**. Ohio, ASM International. 1993