

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO AA6063 EN
DIFERENTES ESTADOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO
SOLDADO MEDIANTE EL PROCESO GMAW CON EL
APORTE ER5356**

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

MARTÍN SAMUEL FIGUEROA PÉREZ

ASESOR: Paul Pedro Lean Sifuentes

Lima, Junio de 2018

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fuerza y fe para seguir adelante a pesar de las adversidades, y llegar al fin mayor.

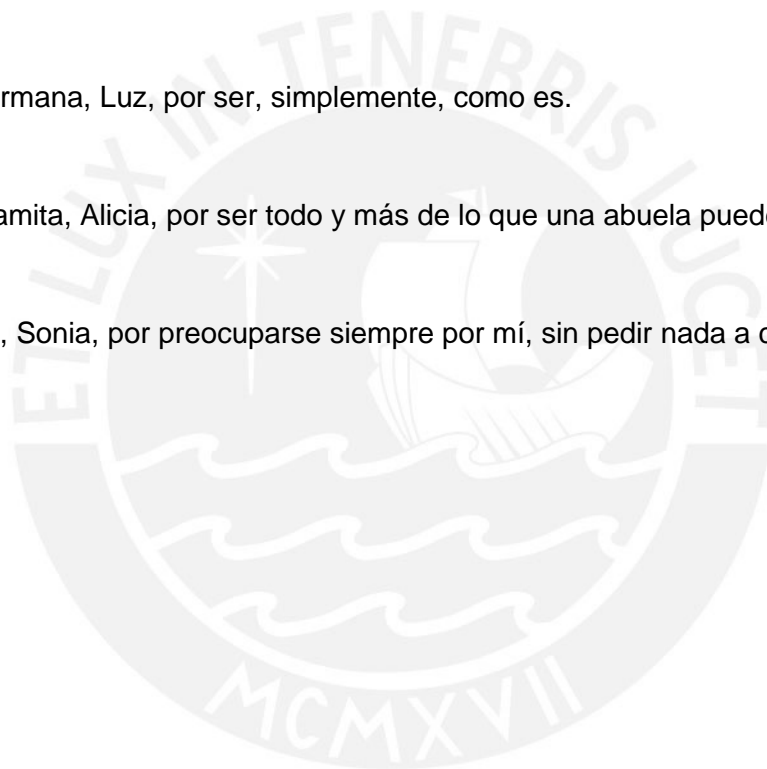
A mi padre, Jorge, por despertar en mí la curiosidad del saber, por ser el primer profesor en mi vida.

A mi madre, Ruth, por su apoyo incondicional en mis proyectos, tanto académicos como personales.

A mi hermana, Luz, por ser, simplemente, como es.

A mi mamita, Alicia, por ser todo y más de lo que una abuela puede y pudo ser.

A mi tía, Sonia, por preocuparse siempre por mí, sin pedir nada a cambio.



AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento al Dr. Ing. Paul Lean Sifuentes, por su gran apoyo durante la realización del presente trabajo, por su constante guía en todo el camino.

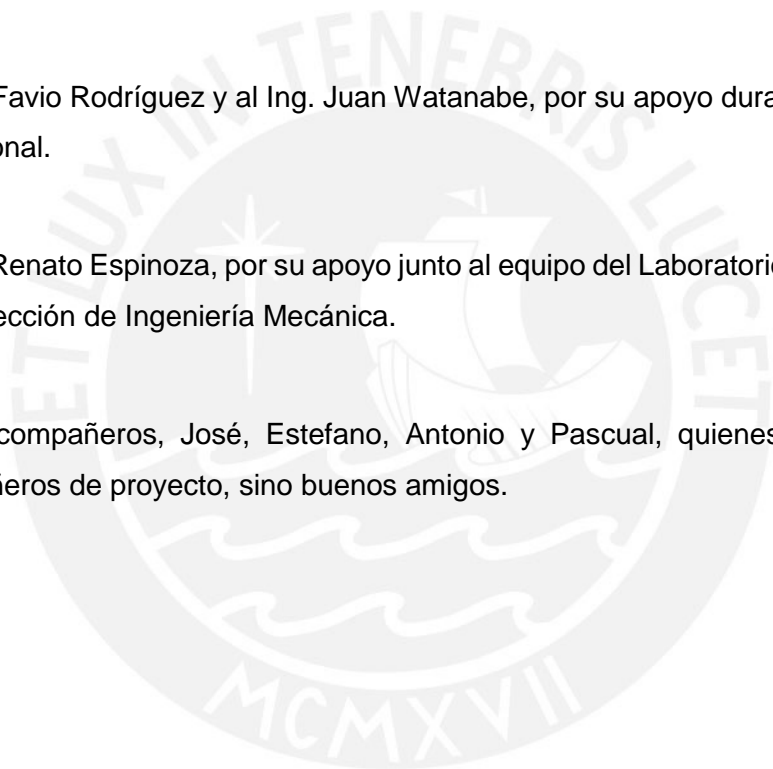
Al Ing. Aníbal Rozas Gallegos, por facilitarme el uso de las instalaciones y equipos del Laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica.

Al Ing. Daniel Calero y al Ing. Guillermo Moreno, por su gran apoyo, incluso en horarios extracurriculares.

Al Ing. Favio Rodríguez y al Ing. Juan Watanabe, por su apoyo durante mi formación profesional.

Al Ing. Renato Espinoza, por su apoyo junto al equipo del Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica.

A mis compañeros, José, Estefano, Antonio y Pascual, quienes no fueron solo compañeros de proyecto, sino buenos amigos.



RESUMEN

El presente trabajo de tesis estudia las diferencias en las propiedades mecánicas que se presentan entre las uniones soldadas, de la aleación de aluminio AA6063 de 2,8 mm de espesor, en diferentes estados de tratamiento térmico, mediante el proceso GMAW empleando como material de aporte ER5356 (Al-5Mg).

Los estados de tratamiento térmico en los que se soldó la aleación de aluminio AA6063 fueron tres: solubilizado y templado (W); solubilizado, templado y envejecido natural (T4); y solubilizado, templado y envejecido artificial (T6). Los cupones que fueron soldados en estado W, recibieron un tratamiento de envejecimiento luego del soldeo, equivalente a los estados T4 y T6; pasando a ser denominados W-T4 y W-T6.

Los parámetros de soldeo empleados no variaron al momento de soldar, manteniendo constantes el amperaje a 124 A, el voltaje de 17,9 V, la velocidad de alimentación del material de aporte y velocidad de soldeo.

La inspección visual realizada a los cupones, posteriores al proceso de soldeo, comprobó que el proceso fue realizado satisfactoriamente, al no mostrar discontinuidades, ni fisuras externas ni porosidades.

Los ensayos mecánicos de tracción mostraron que la máxima resistencia a la tracción de las uniones soldadas en los diferentes estados varía entre los 192 MPa y 202 MPa, coincidiendo como zona de rotura en la ZAC; y los ensayos de dureza mostraron que la mínima dureza de las uniones en los diferentes estados, varía entre los 43 HV y 67 HV, coincidiendo de la misma manera en la ZAC como zona de mínima dureza.

Se corroboró que realizando un tratamiento térmico posterior al soldeo, mejoran las propiedades mecánicas perdidas, obteniéndose los estados W-T4 y W-T6. Sin embargo, esta mejora en las propiedades mecánicas de la aleación, no es significativa, en comparación a soldarlo en los estados T4 y T6. De estos resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis, se concluyó que para la aleación AA6063, se deberá soldar directamente en los estados T4 y T6.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO
AA6063 EN DIFERENTES ESTADOS DE
TRATAMIENTO TÉRMICO SOLDADO MEDIANTE EL
PROCESO GMAW CON EL APORTE ER5356

ÁREA : Materiales #130

PROPUESTO POR : Dr. Paul Pedro Lean Sifuentes

ASESOR : Dr. Paul Pedro Lean Sifuentes

TESISTA : Martín Samuel Figueroa Pérez

CÓDIGO : 20101266

FECHA : 05/07/2017



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

El aluminio es el segundo metal más empleado después del acero, básicamente debido su peso liviano y buena resistencia a la corrosión. La soldadura por fusión es el tipo de unión ampliamente empleado en muchas aleaciones de aluminio. La soldabilidad de una aleación de aluminio dependerá básicamente de su composición química, siendo las aleaciones tratables térmicamente las que presentan problemas como pérdida del tratamiento térmico en la zona afectada por el calor, que en algunos casos puede llegar al 50%, y problemas de fisuración en caliente.

En el presente trabajo se estudiará el comportamiento mecánico de las uniones soldadas obtenidas de la aleación de aluminio tratable térmicamente AA6063 (Al-Mg-Si), cuando es soldado en tres estados diferentes de tratamiento térmico: solubilizado y templado (W); solubilizado, templado y envejecido naturalmente (T4); y solubilizado, templado y envejecido artificialmente (T6). Se empleará el proceso de soldadura GMAW y como metal de aporte ER5356 (Al-5Mg).



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ALUMINIO AA6063 EN
DIFERENTES ESTADOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO SOLDADO
MEDIANTE EL PROCESO GMAW CON EL APORTE ER5356**

Introducción

1. Fundamentos Teóricos
2. Procedimiento Experimental
3. Resultados y Análisis de Resultados

Conclusiones

Bibliografía

Máximo: 100 páginas

Dr. Paul Leon Sifuentes
Asesor

ÍNDICE

ÍNDICE	I
INTRODUCCIÓN.....	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
1.1. Aluminio y sus aleaciones	3
1.1.1. Aluminio puro	3
1.1.2. Aleaciones de aluminio.....	3
1.2.1. Aleaciones no tratables térmicamente.....	4
1.2.1.1. Serie 1XXX	5
1.2.1.2. Serie 3XXX	6
1.2.1.3. Serie 4XXX	6
1.2.1.4. Serie 5XXX	7
1.2.2. Aleaciones tratables térmicamente.....	7
1.2.2.1. Serie 2XXX	8
1.2.2.2. Serie 6XXX	9
1.2.2.3. Serie 7XXX	9
1.3. Principales tratamientos térmicos	10
1.3.1. Estado “W”	11
1.3.2. Estado “T4”	12
1.3.3. Estado “T6”	13
1.4. Soldabilidad del aluminio y sus aleaciones	13
1.4.1. Aleaciones no tratables térmicamente.....	14
1.4.2. Aleaciones tratables térmicamente.....	15
1.4.3. Fisuración en caliente.....	16
1.4.4. Selección del metal de aporte	18
1.5. Procesos de soldadura más empleados	19
1.5.1. Proceso de soldadura SMAW.....	20
1.5.2. Proceso de Soldadura GTAW (TIG)	21
1.5.3. Proceso de Soldadura GMAW (MIG).....	23
1.6. Aleación de aluminio AA6063	25
1.6.1. Composición química nominal.....	25
1.6.2. Propiedades nominales	25
1.6.3. Aplicaciones y usos.....	26
1.6.4. Tratamientos térmicos	26
1.6.5. Soldabilidad.....	27

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	28
2.1. Metodología	28
2.2. Materiales a emplear	30
2.2.1. Material base.....	30
2.2.1.1. Caracterización	30
2.2.1.2. Elaboración de muestras	31
2.2.2. Material de aporte	32
2.3. Tratamientos térmicos	32
2.3.1. Solubilizado	33
2.3.2. Templado	35
2.3.3. Envejecimiento natural	36
2.4. Proceso de soldadura	37
2.4.1. GMAW	37
2.4.2. Gas de protección	38
2.4.3. Voltaje y variación de la intensidad de soldeo	38
2.4.4. Ángulo de inclinación y dirección de la pistola de soldeo.....	38
2.4.5. Welding car	39
2.4.6. Sistema de alimentación del material de aporte	40
2.4.7. Equipo de protección personal	41
2.5. Obtención de cupones soldados	41
2.5.1. Preparación de juntas.....	41
2.5.1.1. Tipo de juntas	42
2.5.1.2. Posición de cupones a soldar	42
2.5.1.3. Limpieza de bordes.....	42
2.5.2. Procedimiento de soldeo	43
2.5.2.1. Ensayos iniciales	43
2.5.2.2. Cupones de soldadura.....	43
2.6. Cupones con tratamiento post-soldeo.....	49
2.7. Caracterización de materiales bases y cupones soldados	50
2.7.1. Inspección visual	50
2.7.2. Ensayos mecánicos	50
2.6.2.1. Ensayo de tracción	50
2.6.2.2. Ensayo de microdureza vickers	54
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
3.1. Inspección visual a cupones soldados	58
3.2. Ensayo de tracción	59
3.2.1. Material base.....	59

3.2.1.1. Suministro.....	59
3.2.1.2. Material con tratamiento térmico T4.....	59
3.2.1.3. Material con tratamiento térmico W.....	60
3.2.1.4. Análisis de resultados.....	60
3.2.2. Uniones soldadas.....	61
3.2.2.2. Suministro.....	61
3.2.2.2. Material con tratamiento térmico T4.....	61
3.2.2.3. Material con tratamiento térmico W.....	62
3.2.2.4. Material con tratamiento térmico W-T6.....	62
3.2.2.5. Material con tratamiento térmico W-T4.....	63
3.2.2.6. Análisis de resultados.....	63
3.2.3. Análisis de resultados.....	64
3.3. Ensayo de Microdureza Vickers.....	66
3.3.1. Material base.....	66
3.3.1.1. Suministro.....	66
3.3.1.2. Material con tratamiento térmico T4.....	67
3.3.1.3. Material con tratamiento térmico W.....	67
3.3.1.4. Análisis de resultados.....	68
3.3.2. Uniones soldadas.....	68
3.3.2.1. Suministro.....	68
3.3.2.2. Material con tratamiento térmico T4.....	69
3.3.2.3. Material con tratamiento térmico W-T6.....	70
3.3.2.4. Material con tratamiento térmico W-T4.....	70
3.3.2.5. Análisis de resultados.....	71
3.3.3. Análisis de resultados.....	74
CONCLUSIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	79

INTRODUCCIÓN

El aluminio es el segundo metal más empleado en las industrias después del acero en el mundo. El aluminio y sus aleaciones son metales de peso liviano, que poseen buena resistencia a la corrosión.

La soldadura por fusión es el tipo de unión ampliamente empleado en muchas aleaciones de aluminio. La soldabilidad de una aleación de aluminio dependerá básicamente de su composición química, siendo las aleaciones tratables térmicamente las que presentan problemas como disminución de las propiedades mecánicas por pérdida del tratamiento térmico en la zona afectada por el calor y problemas de fisuración en caliente.

La fisuración en caliente, se produce en el centro del cordón de soldadura y se extiende a lo largo del mismo. Este problema normalmente se inhibe empleando materiales de aporte que son resistentes a la fisuración en caliente como el ER5356 o el ER4043.

En cuanto a la pérdida de propiedades mecánicas en la ZAC, esta dependerá principalmente del calor de aporte del ciclo térmico del proceso de soldeo; además del tipo de material base, estado de tratamiento térmico de suministro, proceso de soldadura, velocidad de soldeo, tipo de aporte empleado entre otros factores.

En el presente trabajo de tesis, se estudiará el comportamiento mecánico de las uniones soldadas obtenidas de la aleación de aluminio tratable térmicamente AA6063 (Al-Mg-Si), cuando es soldado en tres estados diferentes de tratamiento térmico: solubilizado y templado (W); solubilizado, templado y envejecido naturalmente (T4); y solubilizado, templado y envejecido artificialmente (T6). Se empleará el proceso de soldadura GMAW y como metal de aporte ER5356 (Al-5Mg).

Para el desarrollo de la presente investigación, inicialmente se determinaron los parámetros a emplear para la obtención de los diferentes estados de tratamiento térmico W, T4 y T6. Al realizar los tratamientos térmicos a la aleación AA6063, se obtuvo la aleación en los estados térmicos deseados.

Luego, se determinaron los parámetros a emplear durante el proceso de soldadura de los diferentes estados de la aleación, y, empleando el material de aporte ER5356 junto a estos parámetros en el proceso de soldadura GMAW, se obtuvieron los cupones soldados en los estados W, T4 y T6.

Posterior al proceso de soldeo, las aleaciones en estado W recibieron tratamientos térmicos de envejecimiento natural y artificial, correspondientes a los estados T4 y T6, respectivamente, recibiendo la denominación W-T4 y W-T6.

La caracterización mecánica para el estudio de los materiales base y uniones soldadas se realizó mediante los ensayos de tracción y de dureza, de acuerdo a las normas internacionales existentes y vigentes por la ASTM.

Por lo expuesto, el presente trabajo de tesis tiene como objetivos:

Objetivo general:

Estudiar la resistencia mecánica de las uniones soldadas de la aleación de aluminio AA6063 cuando es soldada en diferentes estados de tratamiento térmico mediante el proceso GMAW (MIG) empleando el material de aporte ER5356.

Objetivos específicos:

- Evaluar las propiedades mecánicas de la aleación AA6063, en los diferentes estados de tratamiento térmico W, T4 y T6.
- Estudiar la resistencia mecánica y la variación de dureza de las uniones soldadas del aluminio AA6063 cuando es soldado en los estados de tratamiento térmico W, T4 y T6, mediante el proceso GMAW empleando el aporte ER5356.
- Contribuir con la difusión, conocimiento y el uso de aleaciones de aluminio en nuestro medio.

CAPITULO 1

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. Aluminio y sus aleaciones

1.1.1. Aluminio puro

El aluminio es un metal blanco plateado liviano ($\rho = 2,699 \text{ g/cm}^3$), y es uno de los metales más utilizados en el mundo.

Las características mecánicas del aluminio puro varían según el porcentaje de impurezas, así como la naturaleza de la deformación en frío y del recocido final. Posee valores de esfuerzo de fluencia que van desde 20 MPa hasta 147 MPa, resistencia a la tracción desde 50 MPa hasta 176 MPa, alargamiento hasta la rotura, desde 60 hasta 5 por ciento (%) y microdureza Vickers desde 14 HV hasta 47 HV.

Es empleado en la industria eléctrica por su buena conductividad eléctrica; posee además, buena resistencia a la corrosión gracias a la capa de óxido de aluminio llamado alúmina (Al_2O_3), que lo protege del medio externo.

1.1.2. Aleaciones de aluminio

El aluminio de alta pureza es un material de baja resistencia mecánica, por lo que para mejorar su resistencia mecánica se alea con otros metales. Los aleantes más utilizados son el cobre (Cu), magnesio (Mg), manganeso (Mn), silicio (Si) y zinc (Zn). Existen otros aleantes, en menores cantidades, que dan propiedades especiales.

Las aleaciones se dividen en dos grandes grupos, los usados para procesos de forja y los de fundición. Las más utilizadas en la industria son las de forja, siendo clasificadas en función al elemento aleante en mayor proporción.

La designación utilizada en las aleaciones según la asociación de aluminio (AA) para forja consta de 4 dígitos. El elemento o elementos aleantes principales, se indica en el primer dígito, como muestra la **Tabla 1.1**.

Tabla 1.1. Sistema de designación de aleaciones de aluminio [1].

Serie AA	Elemento de Aleación Principal
1XXX	% Al > 99.00
2XXX	Cobre
3XXX	Manganeso
4XXX	Silicio
5XXX	Magnesio
6XXX	Magnesio más silicio
7XXX	Zinc
8XXX	Otros elementos

El método de unión más empleado es la soldadura. Las propiedades de las aleaciones dependen del porcentaje del elemento o elementos aleantes en su composición, los cuales determinan si puede ser tratable o no tratable térmicamente; además de su deformación en frío.

1.2.1. Aleaciones no tratables térmicamente

Las aleaciones de las series 1XXX, 3XXX, 4XXX y 5XXX son no tratables térmicamente. Su dureza aumenta mediante el incremento de los aleantes y de la deformación en frío, generando el incremento de su resistencia y dureza, pero disminuyendo su ductilidad.

Las aleaciones de aluminio no tratables térmicamente guardan relación entre el porcentaje de deformación en frío y su endurecimiento (**Figura 1.1**).

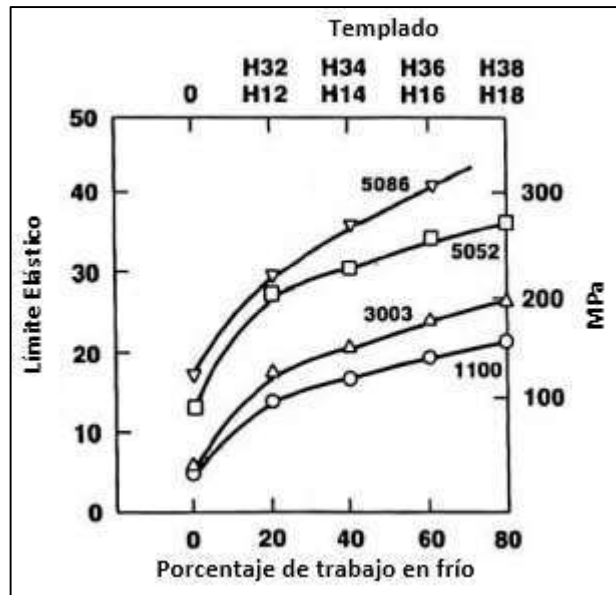


Figura 1.1. Efecto de la deformación en frío en el endurecimiento del aluminio [2].

1.2.1.1. Serie 1XXX

No es una aleación en el sentido estricto de la palabra debido al muy bajo porcentaje de elementos aleantes en su composición.

Entre sus principales impurezas se encuentra el hierro y el silicio, además es posible encontrar cobre o zinc en porcentajes menores a 0,1% y otros elementos en cantidades de 0,05%, como muestra la **Tabla 1.2**.

Tabla 1.2. Composición química nominal del aluminio de la serie 1XXX [3].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Otros		Aluminio
								C/u	Total	
1050	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	-	99.50
1060	0.25	0.35	0.05	0.05	0.03	0.05	0.03	0.03	-	99.60
1100	1.00(Si+Fe)		0.05-0.20	0.05	-	0.10	-	0.05	0.15	99.00
1145	0.55(Si+Fe)		0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	-	99.45

En algunos casos, se puede agregar pequeñas cantidades de algún otro elemento a su composición química para mejorar sus propiedades.

Utilizados principalmente en la industria eléctrica en conductores eléctricos debido a que poseen una baja resistencia a la tensión y peso ligero; y en la industria química, por su resistencia a la corrosión en tanques químicos y tuberías.

1.2.1.2. Serie 3XXX

Su principal elemento aleante es el manganeso, lo que mejora un poco dureza, sin afectar apreciablemente su ductilidad y su resistencia a la corrosión.

Comprende entre el 0,5% y el 1,82% del peso total de la aleación. La **Tabla 1.3** muestra la composición química de las aleaciones más representativas de esta serie.

Tabla 1.3. Composición química nominal del aluminio de la serie 3XXX [3].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros		Aluminio
									C/u	Total	
3003	0.60	0.70	0.05-0.20	1.00-1.50	-	-	0.10	-	0.05	0.15	El resto
3004	0.30	0.70	0.25	1.00-1.50	0.80-1.30	-	0.25	-	0.05	0.15	El resto
3005	0.60	0.70	0.30	1.00-1.50	0.20-0.60	0.10	0.25	0.10	0.05	0.15	El resto
3105	0.60	0.70	0.30	0.30-0.80	0.20-0.80	0.20	0.40	0.10	0.05	0.15	El resto

Es de resistencia mecánica media y de buena resistencia a la corrosión atmosférica. Se presenta en planchas o platinas, con aplicaciones estructurales y en utensilios domésticos.

1.2.1.3. Serie 4XXX

El principal elemento de aleación es el silicio. Este elemento reduce la fragilidad en un intervalo de temperatura de trabajo en caliente [1], reduce el punto de fusión y el coeficiente de dilatación térmica.

Sus principales impurezas son el sodio y el hierro. El sodio, en grandes proporciones, disminuye las propiedades mecánicas de la aleación; mientras que el hierro causa fragilidad en la aleación.

Su principal aplicación es como metales de aporte para soldadura en aluminio y para fabricar fundiciones. La **Tabla 1.4.**, muestra la composición química de algunas aleaciones de esta serie.

Tabla 1.4. Composición química nominal del aluminio de la serie 4XXX [3].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros		Aluminio
									C/u	Total	
4043	4.50-6.00	0.80	0.30	0.05	0.05	-	0.10	0.20	0.05	0.15	El resto
4045	9.00-11.00	0.80	0.30	0.05	0.05	-	0.10	0.20	0.05	0.15	El resto
4145	9.30-10.70	0.80	3.30-4.70	0.15	0.15	0.15	0.20	-	0.05	0.15	El resto

Las aleaciones AA4032 y AA4043 son las más empleadas en la industria. La primera, para la fabricación de pistones de motores por su bajo coeficiente de dilatación y alta resistencia al desgaste; y la segunda, como material de aporte en la soldadura de aleaciones de aluminio, debido a que presenta un buen acabado superficial y mayor penetración; sin embargo, puede originar perforaciones en planchas de bajo espesor.

1.2.1.4. Serie 5XXX

Esta serie posee como elemento de aleación al magnesio. Sin sobrepasar normalmente el 5% (**Tabla 1.5**), pues a mayores cantidades disminuyen sus propiedades mecánicas. El magnesio es un elemento endurecedor, siendo esta serie la de mayor resistencia mecánica de las aleaciones no tratables térmicamente.

Tabla 1.5. Composición química nominal del aluminio de la serie 5XXX [3].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros		Aluminio
									C/u	Total	
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.20-2.80	0.15-0.35	0.10	-	0.05	0.15	El resto
5252	0.08	0.10	0.10	0.10	2.20-2.80	-	0.05	-	0.05	0.15	El resto
5654	0.45(Si+Fe)	5.00	0.01	3.10-3.90	0.15-0.35	0.20	0.05-0.15	0.05	0.05	0.15	El resto

Esta aleación posee buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos. Es frecuente su uso estructural, encontrándose generalmente en forma de planchas; pero además como material de aporte para soldadura, por su alta resistencia a la fisuración en caliente.

1.2.2. Aleaciones tratables térmicamente

Comprende a las aleaciones de las series 2XXX, 6XXX, 7XXX y algunas de la serie 8XXX. Los elementos principales de aleación son el cobre, magnesio, silicio y zinc, los cuales pueden mejorar dureza y resistencia mecánica al ser tratados térmicamente.

Todo el proceso de tratamiento térmico consiste en el calentamiento de la aleación de aluminio, hasta una temperatura elevada, en la cual los elementos aleantes y el aluminio se disuelven en una solución sólida. Posteriormente, es enfriada hasta temperatura ambiente a una velocidad que produzca una solución sobresaturada sólida; para luego, mantenerlo a una temperatura más baja, para controlar la precipitación de compuestos formados por los elementos aleantes. Este proceso se le denomina tratamiento térmico de solubilizado, templado y envejecimiento, que corresponde al estado de denominación T6, cuyos parámetros se mencionarán más adelante.

Los dos tipos de envejecimiento son el envejecimiento natural, a temperatura ambiente (T4); y el artificial, llevado a una temperatura un poco más elevada (T6). En esta última, es donde se logra una mejor dispersión de los precipitados de los elementos aleantes. Sin embargo, el tipo de tratamiento a elegir dependerá de las propiedades que se desee obtener.

1.2.2.1. Serie 2XXX

El cobre es el elemento de aleación principal de esta serie. Se puede apreciar la composición de las aleaciones que pertenecen a esta serie en la **Tabla 1.6**.

Tabla 1.6. Composición química nominal del aluminio de la serie 2XXX [3].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros		Aluminio
									C/u	Total	
2014	0.50-1.20	0.70	3.90-5.00	0.40-1.20	0.20-0.80	0.10	0.25	0.15	0.05	0.15	El resto
2024	0.50	0.50	3.80-4.90	0.30-0.90	1.20-1.80	0.10	0.25	0.15	0.05	0.15	El resto
2117	0.80	0.70	2.20-3.00	0.20	0.20-0.50	0.10	0.25	-	0.05	0.15	El resto

Con el tratamiento térmico adecuado, esta serie puede obtener una buena resistencia mecánica y dureza en relación a las otras series de aleaciones de aluminio; sin embargo, esta aleación es comúnmente revestida de aluminio puro, pues su resistencia a la corrosión es baja por sí sola, debido al cobre.

Estas aleaciones son comerciables más como aleaciones principales para la preparación de aleaciones más complejas, a las que se les agrega elementos como el magnesio, manganeso, silicio y níquel [1], empleadas en la industria aeronáutica.

1.2.2.2. Serie 6XXX

Las aleaciones de este grupo contienen silicio y magnesio, lo que las hace susceptibles al tratamiento térmico. Su resistencia mecánica es media en relación a otras series. Además, la serie 6XXX, es la aleación con mejor resistencia a la corrosión en ambientes marinos.

En su composición, el silicio se encuentra entre un 0,2% hasta un 1,8%; mientras que el magnesio, entre un 0,35% hasta un 1,5%. Juntos forman el compuesto siliciuro de magnesio (Mg_2Si), compuesto que otorga sus principales propiedades a la serie 6XXX. En la **Tabla 1.7**, se puede apreciar la composición de las aleaciones que pertenecen a esta serie de aleación.

Tabla 1.7. Composición química nominal del aluminio de la serie 6XXX [3].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros		Aluminio
									C/u	Total	
6003	0.35-1.00	0.60	0.10	0.08	0.80-1.50	0.35	0.20	0.10	0.05	0.15	El resto
6063	0.20-0.60	0.36	0.10	0.10	0.45-0.90	0.10	0.10	0.10	0.05	0.15	El resto
6151	0.60-1.20	1.00	0.35	0.20	0.45-0.80	0.15-0.35	0.25	0.15	0.05	0.15	El resto

Su aplicación en la industria eléctrica es en la fabricación de barras de distribución, conductores y accesorios eléctricos. Se utiliza además, en el área arquitectónica como marcos y en la estructural.

En el caso de la aleación AA6082, su uso va más allá del estructural, pues su resistencia mecánica es tan buena como su resistencia a la corrosión en ambientes atmosféricos y marinos; por lo que es utilizado en vagones de ferrocarril, plataformas marinas, entre otros.

1.2.2.3. Serie 7XXX

El zinc es el principal elemento aleante de esta serie y es necesario que contenga cobre y/o magnesio para que sea tratable térmicamente. La composición química de las aleaciones de esta serie se muestra en la **Tabla 1.8**.

Tabla 1.8. Composición química nominal de aleaciones de la serie 7XXX [3].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros		Aluminio
									C/u	Total	
7008	0.10	0.10	0.05	0.05	0.70-1.40	0.12-0.25	4.50-5.50	0.05	0.05	0.15	El resto
7072	0.70(Si+Fe)		0.10	0.10	0.10	-	0.80-1.30	-	0.05	0.15	El resto
7075	0.40	0.50	1.20-2.00	0.30	2.10-2.90	0.18-0.28	5.10-6.10	0.20	0.05	0.15	El resto

Las aleaciones binarias aluminio-zinc no tienen una aplicación comercial como producto forjado, pero se utiliza como revestimiento para otras aleaciones. Las aleaciones aluminio-zinc-magnesio tienen aplicación en la construcción de bastidores para aeronaves. Las aleaciones cuaternarias, aluminio-zinc-magnesio-cobre, se emplean en forma de planchas, hojas, extrusiones y forjados.

1.3. Principales tratamientos térmicos

Los cuatro dígitos de una aleación de aluminio son el número de serie de la misma, los cuales dan a conocer su composición química nominal; sin embargo, no su tratamiento térmico ni sus propiedades mecánicas.

Es por ello que se emplea un sistema de nomenclatura para los diferentes estados y tratamientos térmicos (**Tabla 1.9**) a los que fueron sometidos.

Tabla 1.9. Nomenclatura de los estados y tratamientos térmicos en aluminio [4].

Designación	Estado
F	Como está fabricado
O	Recocido
H	Endurecido por deformación
W	Tratamiento térmico en solución
T	Tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos, como su nombre lo indica, solo se aplica a aleaciones tratables térmicamente. Las aleaciones de aluminio, a diferencia de los aceros, pueden incluir deformación en sus tratamientos térmicos.

La designación para cada tipo de tratamiento térmico empieza codificada mediante una "T", la cual va seguida de un número, que indica qué procesos físicos y térmicos

han intervenido. Siendo un total de 10 designaciones, desde la “T1” hasta la “T10”, como se aprecia en la **Tabla 1.10**.

Tabla 1.10. Tratamientos térmicos para el aluminio [5].

Designación	Descripción
T1	Enfriamiento desde una temperatura elevada de un proceso de conformado y envejecido naturalmente hasta un estado sustancialmente estable
T2	Enfriamiento desde una temperatura elevada de un proceso de conformado, trabajado después en frío y envejecido naturalmente hasta un estado sustancialmente estable
T3	Tratamiento térmico en solución, trabajado después en frío y envejecimiento natural hasta un estado sustancialmente estable
T4	Tratamiento térmico en solución y envejecimiento natural hasta un estado sustancialmente estable
T5	Enfriamiento desde una temperatura elevada de un proceso de conformado y envejecimiento artificial
T6	Tratamiento térmico en solución y envejecimiento artificial
T7	Tratamiento térmico en solución y sobre-envejecimiento o estabilizado
T8	Tratamiento térmico en solución, trabajado después en frío y envejecimiento artificial
T9	Tratamiento térmico en solución, envejecimiento artificial y trabajado después en frío
T10	Enfriamiento desde una temperatura elevada de un proceso de conformado, trabajado después en frío y envejecimiento artificialmente

Las aleaciones de aluminio incrementan su resistencia mecánica y dureza mediante el tratamiento térmico. Las designaciones de tratamientos térmicos más comunes en el mercado son “T4” y “T6”.

1.3.1. Estado “W”

La designación “W” involucra solamente al proceso de tratamiento térmico en solución.

El solubilizado consiste en llevar la aleación a una temperatura lo suficientemente elevada, entre los 515 y 575 °C (960 y 1065 °F), durante el tiempo suficiente para lograr que los elementos aleantes se disuelvan y obtener una solución sólida

homogénea. El tiempo requerido dependerá del espesor de la aleación, y si el solubilizado es con baño de sal o de manera natural, tal como se muestra en la **Tabla 1.11**.

Tabla 1.11. Tiempo de solubilizado según el espesor de la aleación [5].

Espesor, mm (pulgadas)	Tiempo de solubilizado (minutos)				Tiempo máx. de inicio de templeado (segundos)
	Natural		Baño de sal		
	min	max	min	max	
≤ 0.41 (0.016)	20	25	10	15	5
0.51 (0.020)	20	30	10	20	7
0.64 (0.025)	25	35	15	25	7
1.27 (0.050)	30	40	20	30	10
2.03 (0.080)	35	45	25	35	10
2.54 (0.100)	40	55	30	45	15
3.18 (0.125)	40	55	30	45	15
6.35 (0.250)	55	65	35	45	15

1.3.2. Estado “T4”

La designación “T4” involucra los procesos de tratamiento térmico en solución (o solubilizado), templeado y envejecimiento natural.

El templeado tiene como objetivo conservar la solución sólida formada en el proceso de solubilizado mediante un rápido enfriamiento. De no darse rápidamente, afectará de forma negativa a las propiedades mecánicas del material. En la **Tabla 1.11** se puede observar además, el tiempo máximo que se tiene para empezar el templeado luego del solubilizado. Existen diferentes tipos de medios para el enfriamiento, estos se muestran en la **Tabla 1.12**.

Tabla 1.12. Distintos medios de enfriamiento para el templeado de aluminio [5].

Medios de Templeado
Agua
Polialquilenglicol (UCON)
Polivinilpirrolidona (PVP90)

Posteriormente, se realiza el envejecimiento natural de la aleación, manteniéndola a temperatura ambiente para lograr la dispersión de los precipitados y así obtener el estado “T4”, que se caracteriza por su alta resistencia mecánica y tenacidad. El tiempo del proceso de envejecimiento natural puede ir desde los 4 días hasta semanas, para obtener de esta manera una aleación estable.

1.3.3. Estado “T6”

La designación “T6” involucra los procesos de solubilizado, templado y envejecimiento artificial.

Los procesos de solubilizado y templado se rigen por los mismos parámetros que la designación “T4”, siendo la temperatura de solubilizado entre los 515 y 575 °C (960 y 1065 °F) [5], donde el tiempo del proceso se observa en la **Tabla 1.11**; y los parámetros del proceso de templado, tanto tiempo máximo de inicio del templado y velocidades según el medio a enfriar se pueden observar en **Tabla 1.11** y **Tabla 1.12**.

El envejecimiento artificial otorga al estado “T6” una alta resistencia mecánica sin perjudicar otras propiedades, por lo que su aplicación en la ingeniería es muy útil. Este proceso generalmente se realiza a temperaturas no muy elevadas, entre los 120 y 240 °C (250 y 460 °F); y durante largos periodos, que varían desde 2 hasta 24 horas.

1.4. Soldabilidad del aluminio y sus aleaciones

Sean aleaciones no tratables o tratables térmicamente, su soldadura disminuye la resistencia mecánica de la aleación, obtenida en los procesos de deformación en frío y tratamientos térmicos. La soldadura tiene dos zonas, el cordón de soldadura y la zona afectada por el calor (ZAC). El cordón de soldadura es la mezcla del material de aporte con el metal base. La ZAC, como su nombre lo indica, es la zona afectada por el calor del proceso, zona que involucra ambos lados del material base soldado.

Las propiedades de la unión soldada varían según la calidad de la soldadura, composición y velocidad de enfriamiento. Mientras más rápido sea el enfriamiento, más fina será su microestructura y presentará mejores propiedades mecánicas..

Los efectos del calor generado en la ZAC dependen de la aleación (tratable o no tratable térmicamente), la temperatura, el tiempo y la distancia desde el baño fundido. Además, la ZAC en soldaduras realizadas empleando gas inerte (GMAW) se extiende rara vez a más de ½" (12,7 mm) desde la línea central de la soldadura, pero por razones de diseño, esta se asume llega hasta 1" (25,4 mm) en cada lado de la soldadura.

1.4.1. Aleaciones no tratables térmicamente

Todas las series de aleaciones no tratables térmicamente son soldables por fusión debido a su buena ductilidad.

La ZAC de estas aleaciones pasa por un rango de temperatura, en el cual se encuentra la temperatura de recocido, generalmente de 345 °C (650 °F). Al pasar por este punto, la resistencia de la ZAC será cercana a la resistencia de la aleación en estado de recocido (**Figura 1.2**), mejorando además su ductilidad. El tiempo y la velocidad de enfriamiento no es un factor importante en estas aleaciones.

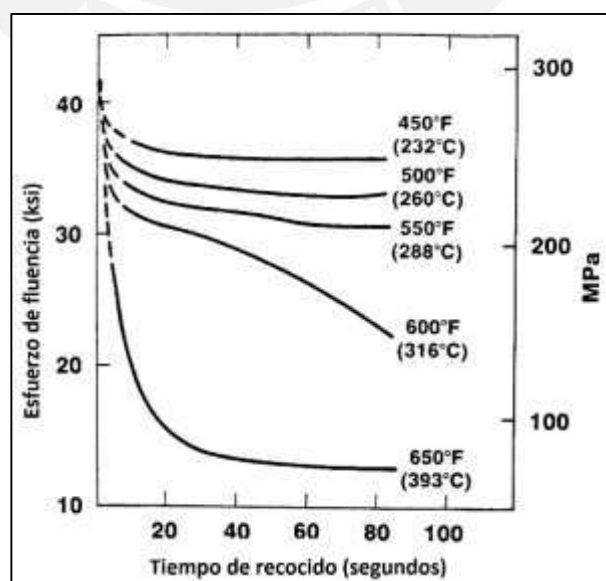


Figura 1.2. Efecto de la temperatura de recocido en la ZAC de la aleación AA5052 [2].

1.4.2. Aleaciones tratables térmicamente

Son las aleaciones tratables térmicamente las que presentan mayores restricciones en la soldadura. La serie 2XXX es de resistencia muy pobre en soldadura por arco, pero buena en soldadura por puntos; la 6XXX es soldable, pero perdiendo significativamente sus propiedades adquiridas por el tratamiento térmico; y la 7XXX son soldables por fusión las de bajo porcentaje de cobre.

La ZAC sufre una degradación de las propiedades del metal base [2], pues están sujetas a disolución o precipitaciones de los elementos aleantes frente al calor de la soldadura. Las propiedades en la ZAC de las aleaciones tratables térmicamente dependen del proceso de soldeo y de los parámetros de su procedimiento. La entrada de calor disminuye sus propiedades mecánicas y aumenta el ancho de la ZAC. Se puede apreciar, en la **Figura 1.3.**, la variación de su dureza a lo largo de la ZAC desde la soldadura, en la aleación de aluminio AA6061-T6.

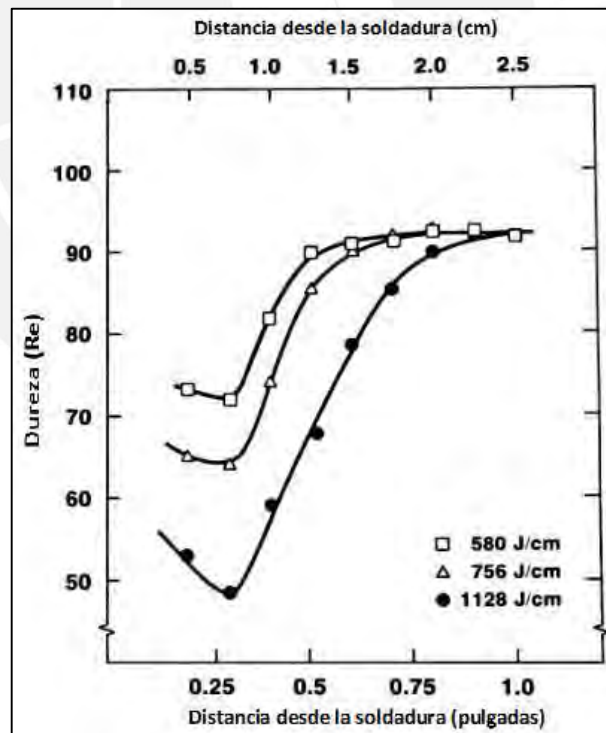


Figura 1.3. Dureza en soldadura en la aleación 6061-T6, soldado mediante el proceso TIG con varias entradas de calor [2].

Es por ello que en estas aleaciones, si se requiere recuperar sus propiedades en la ZAC, deben recibir tratamiento térmico posterior proceso de soldeo. Los tratamientos empleados son el de solubilizado, templado y envejecimiento, tanto natural como

artificial; aunque en el caso de aleaciones en estado "T4" solo envejecimiento. En la **Figura 1.4** se observa los efectos de un tratamiento luego del proceso de soldeo.

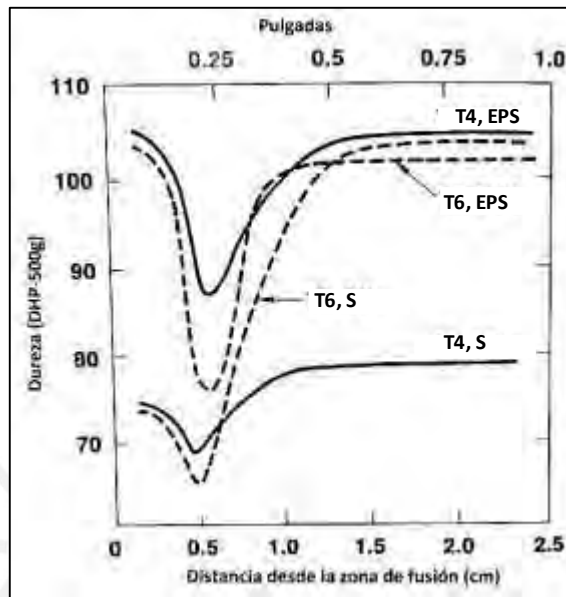


Figura 1.4. Dureza de la aleación 6061, en estado T4 y T6, en condiciones de Soldeo (AW) y de Envejecimiento Post-Soldeo (PAW) [2].

1.4.3. Fisuración en caliente

La fisuración en caliente se describe como un fenómeno que involucra factores mecánicos y metalúrgicos en la soldadura. Las aleaciones de aluminio tratables térmicamente presentan con mayor frecuencia este fenómeno en el cordón de soldadura.

Se produce durante la fase final de la solidificación, cuando las tensiones generadas en el tramo que está solidificando exceden a la tensión que puede soportar el metal que está solidificado.

La composición química de las aleaciones de aluminio tiene efecto en la sensibilidad a la fisuración en caliente de estos materiales. Se puede ver en la **Figura 1.5**, la variación de la sensibilidad a la fisuración en caliente de las aleaciones AA2XXX (Al-Cu), AA4XXX (Al-Si), AA5XXX (Al-Mg) y AA6XXX (Al-Mg₂Si), según su porcentaje en peso del aleante principal.

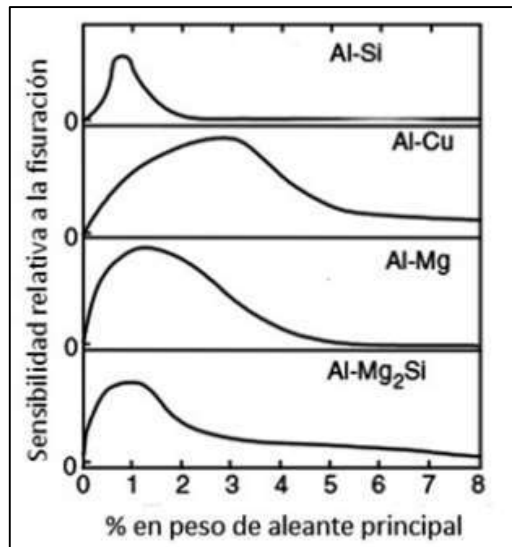


Figura 1.5. Sensibilidad a la fisuración en caliente de diferentes aleaciones de aluminio [11].

La presencia de un punto máximo en la curva de sensibilidad a la fisuración en caliente según el porcentaje del aleante principal se explica en la **Figura 1.6**. En (a) se muestran 4 puntos de la curva de sensibilidad. El primer punto es la zona I, que se aprecia en (b), donde casi no se presenta tendencia a la fisuración en caliente. El metal puro no presenta crecimiento de grano, siendo no susceptible a la fisuración.

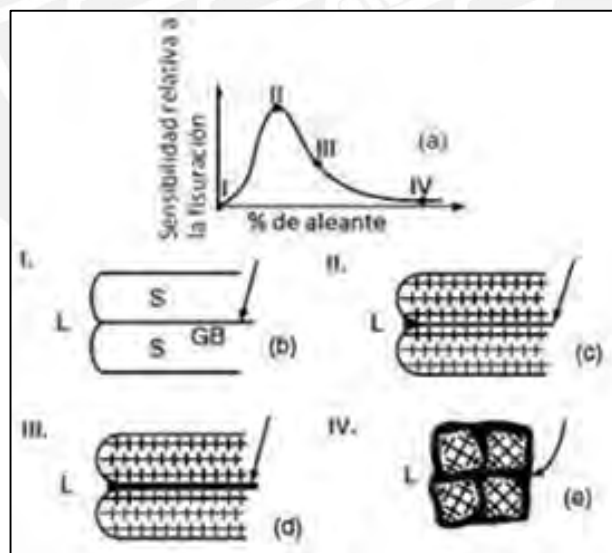


Figura 1.6. Efecto de la composición sobre la fisuración en caliente [11].

En el segundo punto, la zona II, que se muestra en (c), la sensibilidad aumentará notoriamente debido a la presencia de granos columnares gruesos. La parte central es la última en solidificar, generando un incremento en la tendencia a la fisuración. El tercer punto es la zona III, que se muestra en (d), aumenta el porcentaje de aleante

en comparación a la zona II, generando presencia de granos equiaxiales finos, disminuyendo la susceptibilidad. Finalmente, en (e) se muestra la zona IV, con el máximo porcentaje de aleante, poca cantidad de granos columnares y mayor presencia de equiaxiales reduce la tendencia a la fisuración en caliente.

1.4.4. Selección del metal de aporte

Para el proceso de soldeo del aluminio, es importante la selección del material de aporte; pues depende de la composición química del metal base, aplicación y los requerimientos del servicio.

Estas consideraciones a tomar al soldar aluminio, son distintas a las de la soldadura en acero, donde se emplea un aporte con propiedades químicas y mecánicas similares a las del metal base. En aluminio, se debe tomar en cuenta, además, la fácil soldabilidad, su ductilidad y el tipo de metal base. En la **Tabla 1.11**, se muestra los materiales de aporte comúnmente empleados según el material base.

Tabla 1.11. Materiales de aporte recomendados para varias aleaciones de aluminio [7].

Material Base	Aportes recomendados	
	Para máxima dureza	Para máximo alargamiento
1100	1100, 4043	1100, 4043
3003	5183, 5356	1100, 4043
3004	5554, 5356	5183, 4043
5005	5183, 4043, 5356	5183, 4043
5456	5556	5183, 5356
6061	4043, 5183	5356
6063	4043, 5183	5356
7005	5039	5183, 5356

Es el ER5356 (**Tabla 1.12**) el material de aporte comúnmente empleado por su compatibilidad con muchas aleaciones de aluminio, además de buena resistencia mecánica (**Tabla 1.13**) y alimentación como electrodo en proceso de soldadura MIG. Las uniones obtenidas presentan salpicaduras, y se genera una gran cantidad de gases durante el proceso de soldeo debido al alto porcentaje de magnesio (5%) que

contiene, por lo que se debe tener cuidado durante su empleo. Sin embargo, una vez depositado, es resistente; y no presenta problemas de perforaciones en plancha de bajo espesor [8].

Tabla 1.12. Composición química del material de aporte ER5356 [9].

ER	Mn	Mg	Cr	Ti	Al
5356	0.05-0.20	4.50-5.50	<0.3	0.06-0.15	El resto

Tabla 1.13. Propiedades mecánicas del material de aporte ER5356 una vez depositado [9].

Metal de Aporte	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite de Fluencia (MPa)	Elongación en 2" (%)	Intervalo fusión (°C)
ER5356	215-255	>100	17-25	575-630

1.5. Procesos de soldadura más empleados

El aluminio posee propiedades, los cuales hacen que la soldadura de este material sea distinta a la del acero [3]:

- La capa superficial de óxido de aluminio
- Alta conductividad térmica
- Coeficiente de expansión alto
- Temperatura de fusión baja
- No cambia de color cuando la temperatura se acerca al punto de fusión

Tal como se mencionó anteriormente en la **Sección 1.1**, existe una pequeña capa de óxido de aluminio llamada alúmina. Esta capa de alúmina cuando se hace más gruesa, absorbe humedad del medio ambiente, esta humedad contiene hidrógeno, el cual ocasiona porosidad en las soldaduras.

Debido a esto, es requisito quitar la capa de alúmina antes de soldar, ya que de no eliminarse, el arco será inestable; y al poseer un punto de fusión de 1926 °C, el cual es tres veces el del aluminio puro; quedarán partículas de óxido sin fundir en la soldadura, originando disminución de su ductilidad, falta de fusión y fisuras.

El aluminio y sus aleaciones pueden ser soldados mediante varios métodos de soldadura (**Tabla 1.14**).

Tabla 1.14. Procesos de soldadura en aluminio y aleaciones [10].

Soldadura por fusión	Oxiacetilénico
	Arco eléctrico manual
	GMAW
	GTAW
	Láser
	Haz de electrones
Soldadura eléctrica	Costura por puntos
	Inducción de alta frecuencia
Soldadura en fase sólida	Fricción
	Explosión
	Ultrasónica
	Soldadura por presión

1.5.1. Proceso de soldadura SMAW

El proceso de soldadura por arco eléctrico manual con electrodos revestidos SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) utiliza el calor del arco para llevar el metal base y el material de aporte (electrodo) al estado de fusión. Este proceso se encuentra representado en la **Figura 1.7**.

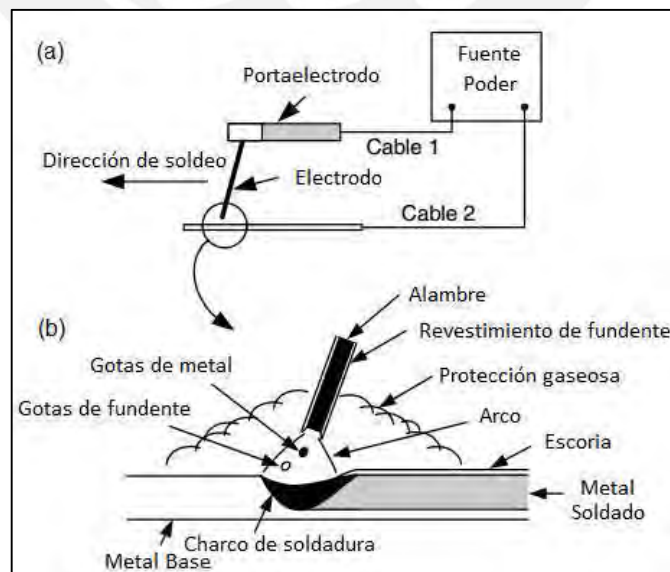


Figura 1.7. Proceso SMAW: (a) proceso general; (b) área de soldadura ampliada [11].

Los electrodos son varillas rectas de aleaciones de aluminio, revestidas de fundente. Este fundente cumple cuatro funciones: provee de una protección gaseosa, la cual protege al metal fundido del contacto con el aire; adiciona desoxidantes para desoxidar y limpiar el metal de la soldadura, provee de estabilizadores de arco (gas iónico) para mantener, como su nombre lo indica, estable el arco; y provee además, de elementos aleantes y polvo metálico, los que ayudan a controlar la composición del metal de soldadura y aumentar la velocidad de deposición.

Sin embargo, a pesar de utilizar un equipo simple, portable y de bajo costo, la soldadura en aluminio empleando el proceso de soldadura SMAW es poco común, debido a que el escudo de gas no es suficientemente limpio en un metal reactivo como el aluminio, y a su ratio de velocidad limitado, conlleva a obtener un cordón de soldadura no homogéneo.

1.5.2. Proceso de Soldadura GTAW (TIG)

El proceso de soldadura GTAW (*Gas-Tungsten Arc Welding*), también conocido como TIG (*Tungsten Inert Gas*), es un proceso de arco estable que emplea un electrodo de tungsteno no consumible y una atmósfera de gas inerte. Este proceso se encuentra representado en la **Figura 1.8**.

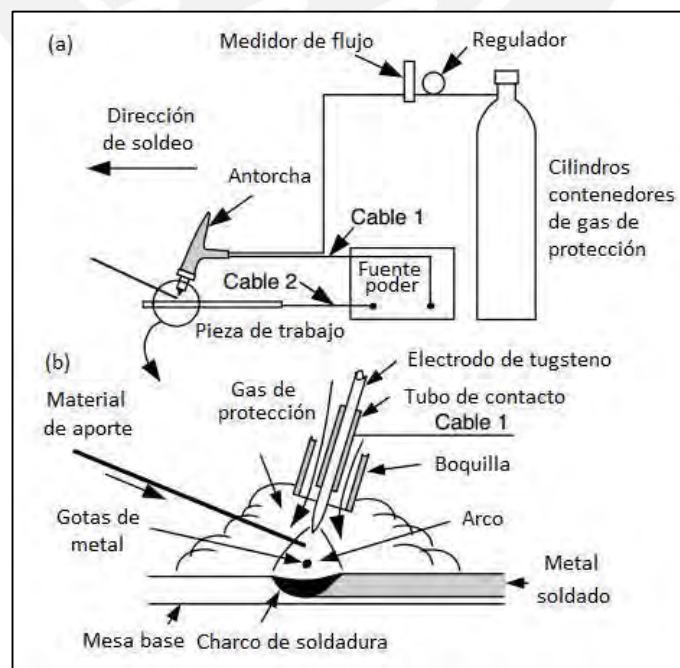


Figura 1.8. Proceso GTAW (TIG): (a) proceso general; (b) área de soldadura ampliada [11].

La velocidad de deposición del GTAW es baja. Sin embargo, a diferencia del proceso SMAW, el cordón de soldadura es de mejor calidad, debido a que el gas inerte protege la zona de fusión.

Existen tres polaridades para soldar en GTAW, mediante corriente continua (CC) con electrodo en negativo (CCEN) o en positivo (CCEP) y con corriente alterna (CA). La polaridad más empleada en GTAW es la de CCEN, que genera un cordón estrecho y profundo por la cantidad de energía empleada debido al alto amperaje; la de CCEP, genera una superficie más homogénea del cordón de soldadura al remover las capas de óxido, empleando un amperaje más bajo; y la de CA, empleada en su mayoría en soldadura en aluminio, por su buena penetración y remoción de la capa de óxido de alúmina. Estas polaridades se presentan en la **Figura 1.9**.

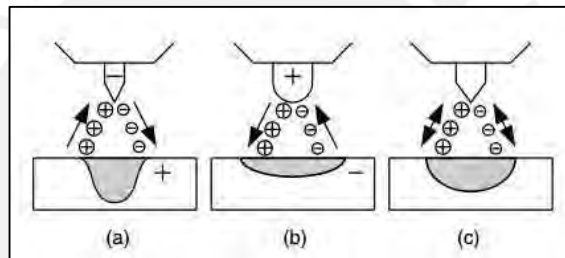


Figura 1.9. (a) CC con electrodo en negativo (CCEN), (b) CC con electrodo en positivo (CCEP), (c) CA [11].

El proceso GTAW se emplea para soldar espesores de hasta $\frac{1}{4}$ " (6,3 mm) y puede ser usado en juntas a tope, de borde, solapadas y de esquina. Además, se puede emplear de manera manual, semiautomática y automática. En la **Tabla 1.15** se aprecia los parámetros de soldeo según el espesor del metal base.

Tabla 1.15. Parámetros para la soldadura en proceso GTAW en juntas a tope [5].

Espesor metal base	Posición	N° de pasadas	Diámetro de material de aporte	Diámetro de electrodo de tungsteno puro	Flujo de argón	Velocidad del arco
mm (pulg.)	-	-	mm (pulg.)	mm (pulg.)	L/min (pie ³ /h)	mm/s (pulg./min)
1,6 (1/16)	P, V, H	1	2,4 (3/32)	1,6 - 2,4 (1/16 - 3/32)	9 (20)	3 - 4 (8 - 10)
3,2 (1/8)	O	1 - 2	3,2 - 4,0 (1/8 - 5/32)	3,2 (1/8)	12 (25)	4 - 5 (10 - 12)
4,8 (3/16)	F	2	4,0 - 4,8 (5/32 - 3/16)	4,0 - 4,8 (5/32 - 3/16)	12 (25)	4 - 5 (10 - 12)
6,3 (1/4)	V	2	4,8 (3/16)	4,8 (3/16)	14 (30)	3 - 4 (8 - 10)

(a) P, Plana; V, Vertical; H, Horizontal; S, Sobrecabeza.

Se puede emplear tanto el argón y el helio como gases inertes, sin embargo, el argón tiene mayores ventajas, pues el voltaje para emplearlo es más bajo; y al ser más pesado que el helio, la atmósfera de protección que genera es más resistente. Además, actúa mejor ante la remoción de capa de alúmina y tiene un menor costo.

1.5.3. Proceso de Soldadura GMAW (MIG)

El proceso de soldadura GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) hace uso del calor generado por el arco para fusionar el electrodo de alambre, ubicado en un carrete para alimentación continua, y el metal base. El arco y el baño de soldadura son protegidos por un gas inerte, usualmente argón, helio o una mezcla de ambos, por lo cual el proceso GMAW es también llamado MIG (*Metal-Inert Gas*). El proceso se representa en la **Figura 1.10**.

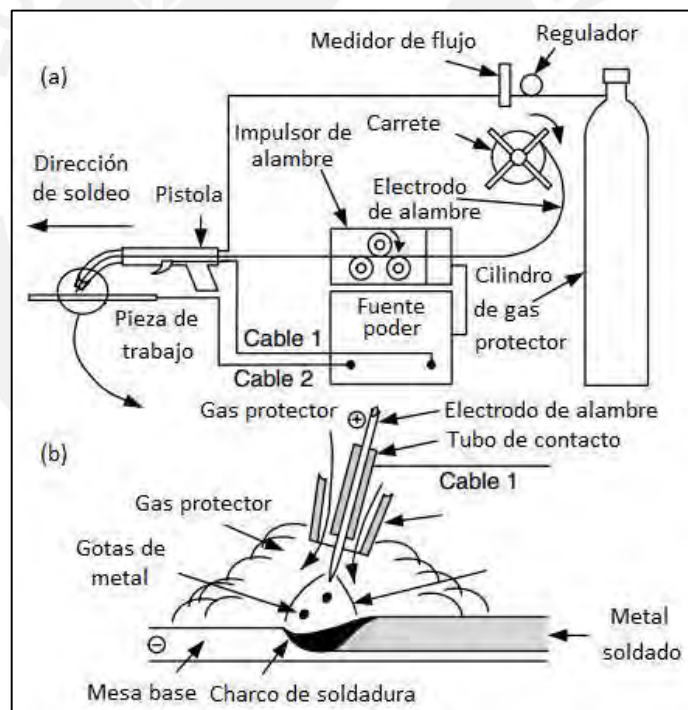


Figura 1.10. Proceso GMAW (MIG): (a) proceso general; (b) área de soldadura ampliada [11].

El proceso GMAW posee mayores ventajas que la soldadura mediante el proceso GTAW. Su mayor velocidad de soldadura y mejor remoción de las capas de óxido del material son motivos por los cuales el proceso GMAW es más empleado en la soldadura de aluminio, en especial en mayores espesores.

La polaridad en el proceso GMAW es CC con electrodo en positivo (CCEP), la cual genera un arco estable, pocas pérdidas por salpicadura y buena penetración. La soldadura mediante CCEN o CA genera una transferencia del metal pésima, incrementando las pérdidas de salpicadura y dando un mal aspecto a la soldadura.

Existen tres modelos básicos de transferencia del metal: globular, por pulverización y por cortocircuito. La transferencia globular, mediante el cual, el alambre se funde en gotas de gran tamaño y se deposita por gravedad, no es recomendable por producir bastantes salpicaduras. En la transferencia por pulverización el material de aporte es depositado en partículas finas, siendo este el modelo más empleado en GMAW. La transferencia por cortocircuito emplea corrientes y tensiones muy bajas, por lo que solo puede usarse en soldadura de elementos de espesores pequeños.

El proceso GMAW puede emplearse en juntas de tope y solapadas. Las juntas de borde y de esquina no son recomendadas a menos que el espesor sea suficientemente grueso para proporcionar un saliente sobre la cual depositar el material de aporte. Según su espesor y su posición, los parámetros como diámetro del electrodo, velocidad de deposición y flujo del gas argón varían. Esto se puede apreciar en la **Tabla 1.16**.

Tabla 1.16. Parámetros para la soldadura en proceso GMAW en juntas a tope [5].

Espesor metal base	Posición	Tipo y N° de pasadas	Diámetro del electrodo	Corriente en DC	Voltaje	Flujo de argón	Velocidad del arco
mm (pulg.)	-	-	mm (pulg.)	A	V	L/min (pie ³ /h)	mm/s (pulg./min)
1,6 (1/16)	P	1	0,8 (0,030)	70 - 110	15 - 20	12 (25)	10 - 19 (25 - 45)
3,2 (1/8)	P, V, H	1	0,8 - 1,2 (0,030 - 3/64)	120 - 150	20 - 24	14 (30)	10 - 13 (24 - 30)
4,8 (3/16)	P, V, H	1F, 1R	0,9 - 1,2 (0,035 - 3/64)	130 - 175	22 - 26	16 (35)	10 - 13 (24 - 30)
6,3 (1/4)	V, H	3F, 1R	1,2 (3/64)	165 - 190	25 - 29	21 (45)	10 - 15 (25 - 35)

(a) P, Plana; V, Vertical; H, Horizontal; S, Sobrecabeza. (b) C, de Cara; R, de Raíz.

1.6. Aleación de aluminio AA6063

La aleación AA6063 pertenece al grupo de aleación tratables térmicamente, de la serie 6XXX, altamente empleada en la industria.

1.6.1. Composición química nominal

Sus principales elementos aleantes son el silicio y el magnesio. Su composición química nominal se aprecia en la **Tabla 1.17**.

Tabla 1.17. Composición química nominal de la aleación AA6063 [5].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros		Aluminio
									C/u	Total	
6063	0.20-0.60	0.35	0.10	0.10	0.45-0.90	0.10	0.10	0.10	0.05	0.15	El resto

1.6.2. Propiedades nominales

Las propiedades mecánicas de la aleación AA6063 en estado "T4" y "T6" se aprecian en las tablas **Tabla 1.18** y **Tabla 1.19** respectivamente, las cuales varían principalmente por los procesos involucrados en los tratamientos térmicos de cada estado.

Tabla 1.18. Propiedades mecánicas nominales de la aleación AA6063 en estado "T4" [5].

6063-T4	
Esfuerzo máximo de tracción	172 MPa
Esfuerzo de fluencia	90 MPa
Alargamiento en 50 mm.	22%
Dureza Brinell (500 kg / 10 mm)	46 HB

Tabla 1.19. Propiedades mecánicas nominales de la aleación AA6063 en estado "T6" [5].

6063-T6	
Esfuerzo máximo de tracción	241 MPa
Esfuerzo de fluencia	214 MPa
Alargamiento en 50 mm.	12%
Dureza Brinell (500 kg / 10 mm)	73 HB

1.6.3. Aplicaciones y usos

En el mercado se encuentran barras, alambres, planchas, perfiles y tubos, productos de la aleación AA6063.

Su aplicación va desde el ámbito arquitectónico y estructural, tales como puertas, ventanas, estructuras, barandillas y perfiles, además en disipadores de calor, módulos electrónicos, elementos de maquinaria, instalaciones neumáticas, tubos de riego, calefacción, refrigeración y construcciones marinas.

1.6.4. Tratamientos térmicos

Como se mencionó anteriormente en la **Sección 1.3**, son para la designación "T4" los tratamientos térmicos de solubilizado, templado y envejecimiento natural; y para la "T6", el solubilizado, templado y envejecimiento artificial. La temperatura y tiempo dependerá de la aleación, tanto de su espesor y medios a emplear en procesos como de templado y envejecimiento.

En la **Tabla 1.21.**, y **Tabla 1.22.**, se muestra las temperaturas y tiempo de cada tratamiento, según su estado, para la aleación AA6063.

Tabla 1.21. Temperaturas y tiempos de los tratamientos térmicos, del estado "T4" en la aleación AA6063 [5].

ESTADO	"T4"
Solubilizado	
Temperatura	520 °C
Tiempo	40 minutos
Templado	
Medio de Templado	Agua
Envejecimiento	
<u>Natural</u>	
Temperatura	Ambiente
Tiempo	9 - 10 días

Tabla 1.22. Temperaturas y tiempos de los tratamientos térmicos, del estado "T6" en la aleación AA6063 [5].

ESTADO	"T6"
Solubilizado	
Temperatura	520 °C
Tiempo	40 minutos
Templado	
Medio de Templado	Agua
Envejecimiento	
<u>Artificial</u>	
Temperatura	175 °C
Tiempo	8 horas

1.6.5. Soldabilidad

La soldadura en la aleación AA6063, así como la de otras aleaciones, depende de ciertos parámetros, como la capa de óxido de aluminio, ya mencionado en la **Sección 1.5**. Esta aleación, por su composición química, es susceptible de fisurarse en caliente; por ello, se debe emplear un procedimiento que inhiba la fisuración. En la **Tabla 1.22** se puede apreciar el rango de temperaturas de fusión.

Tabla 1.22. Rango de temperatura de fusión de la aleación AA6063 [5].

Metal Base	Rango de temperatura de fusión (°C)
AA6063	616 - 654

CAPÍTULO 2

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describen las condiciones y características que se llevaron a cabo para obtener los cupones en los diferentes estados de tratamiento térmico; para el soldeo de los mismos, a tope, con material de aporte; y la preparación de las probetas a partir de los cupones para la realización de los diferentes ensayos. Así mismo, se describe las metodologías de ensayos empleadas para la caracterización y determinación de las propiedades de los cupones soldados y del material base.

2.1. Metodología

El material base se recibió en estado T6, por ello no fue necesario realizar los tratamientos térmicos para obtener este estado. Para los estados W y T4, se definieron las temperaturas, tiempos y modos de enfriamiento de los tratamientos térmicos.

Luego, se cortaron planchas de 100 x 150 (mm x mm) y de 200 x 150 (mm x mm), las primeras, destinadas a la obtención de la uniones soldadas, y las segundas, para la caracterización de los materiales base.

Las planchas fueron sometidas a los diferentes tratamientos térmicos, como fueron definidos con anterioridad para los estados W y T4, cuyos parámetros se indicarán más adelante. De esta manera, se obtuvieron los materiales base en los 3 estados.

Luego, se procedió a realizar el soldeo y obtener los cupones en los diferentes estados, empleando el proceso GMAW. Una vez obtenidos los cupones de soldadura, se inspeccionó la calidad del cordón para descartar imperfecciones que afecten su caracterización.

Posteriormente, se realizó tratamientos térmicos post-soldado, a cupones de soldadura en el estado W, de envejecimiento natural y artificial, correspondientes a los estados soldados, T4 y T6.

Finalmente, se prepararon las probetas y briquetas, tanto de material base como de los cupones soldados, para la caracterización de sus propiedades, empleando las normativas respectivas. Los ensayos realizados fueron: inspección visual, tracción y dureza.

En la **Tabla 2.1.**, se muestra un resumen de lo realizado a las planchas destinadas a la caracterización de los materiales base; y la **Tabla 2.2.**, muestra un resumen de lo realizado para la elaboración de los cupones de soldadura, y su caracterización mecánica.

Tabla 2.1. Resumen de procedimientos realizados a planchas para soldadura.

AA6063 - T6	Planchas de 200 x 150 (mm x mm)		
	N° - 1	N° - 2	N° - 3
Tratamiento Térmico			
Solubilizado	x	x	-
Templado	-	x	-
Envejecimiento Natural	-	x	-
Envejecimiento Artificial	-	-	-
Estado Final	W	T4	T6
Ensayo Mecánico			
Tracción	x	x	x
Dureza	x	x	x

Tabla 2.2. Resumen de procedimientos realizados a planchas de 100 x 150 (mm x mm).

AA6063 - T6	Planchas de 100 x 150 (mm x mm)				
	N° - 1 y 2	N° - 3 y 4	N° - 5 y 6	N° - 7 y 8	N° - 9 y 10
Tratamiento Térmico (Pre-Soldadura)					
Solubilizado	x	x	-	x	x
Templado	x	x	-	-	x
Envejecimiento Natural	-	x	-	-	-
Envejecimiento Artificial	-	-	-	-	-
Estado Final (Pre-Soldadura)	W	T4	T6	W	W
Proceso de Soldadura					
GMAW	x	x	x	x	x
Tratamiento Térmico (Post-Soldadura)					
Envejecimiento Natural	-	-	-	x	-
Envejecimiento Artificial	-	-	-	-	x
Estado Final (Post-Soldadura)	W	T4	T6	W-T4	W-T6
Ensayo Mecánico					
Tracción	x	x	x	x	x
Dureza	x	x	x	x	x

2.2. Materiales a emplear

2.2.1. Material base

2.2.1.1. Caracterización

Se empleó, como material base, planchas de la aleación AA6063-T6, de 2,8 mm de espesor. La composición química y propiedades mecánicas nominales del material se muestran en la **Tabla 2.3.**, y **Tabla 2.4.**

Tabla 2.3. Composición química nominal de la aleación AA6063-T6 [5].

AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros		Aluminio
									C/u	Total	
6063-T6	0.20-0.60	0.35	0.10	0.10	0.45-0.90	0.10	0.10	0.10	0.05	0.15	El resto

Tabla 2.4. Propiedades físicas y mecánicas nominales de la aleación AA6063-T6 [5].

AA6063-T6	
Propiedades Físicas	
Densidad	2.7 g/cm ³
Conductividad térmica	218 W/m.°C
Conductividad eléctrica	50 % IACS
Propiedades Mecánicas	
Esfuerzo máximo de tracción	240 MPa
Esfuerzo de fluencia	215 MPa
Alargamiento en 50 mm.	12%
Dureza Brinell (500 kg / 10 mm)	73 HB

La aleación AA6063 es muy empleada para uso estructural; además, por su buena resistencia a la corrosión, es empleada en ambientes industriales y marítimos.

2.2.1.2. Elaboración de muestras

Empleando las planchas adquiridas, se dimensionó y fabricó 13 planchas de AA6063-T6 para el estudio, con las dimensiones mostradas en la **Tabla 2.5**. Se muestran las planchas en la **Figura 2.1**.

Tabla 2.5. Dimensiones y cantidades de las planchas empleadas.

Planchas	Tipo "A"	Tipo "B"
Dimensiones (mm)	200x150	100x150
Cantidad	3	10

Las planchas tipo A y tipo B, se emplearon para la caracterización del material base y la unión soldada, respectivamente.

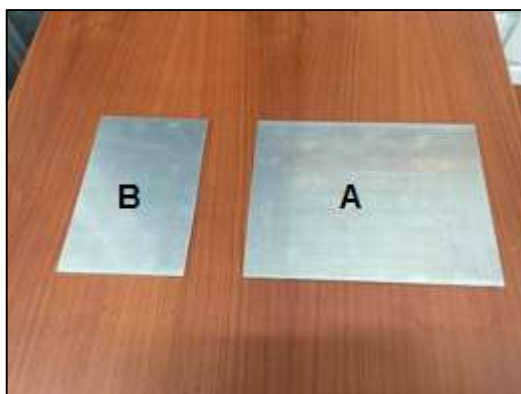


Figura 2.1. Planchas de aluminio para ensayos. Derecha: Tipo "A", Izquierda: Tipo "B".

El proceso de soldeo empleado es el GMAW, con material de aporte, de acuerdo a las recomendaciones de soldabilidad de este material.

2.2.2. Material de aporte

Se empleó el material de aporte ER5356 DE 1,0 mm de diámetro, material recomendado para el proceso GMAW en la aleación AA6063. La composición química nominal, sus propiedades mecánicas y sus parámetros de suministro de soldeo, muestran en la **Tabla 2.6.**, **Tabla 2.7.**, y **Tabla 2.8.**

Tabla 2.6. Composición química del material de aporte ER5356 [9].

Material de Aporte	Mn	Mg	Cr	Ti	Al
ER5356	0.05-0.20	4.50-5.50	<0.3	0.06-0.15	El resto

Tabla 2.7. Propiedades del material de aporte ER5356 una vez depositado [9].

Metal de Aporte	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite de Fluencia (MPa)	Elongación en 2" (%)	Intervalo fusión (°C)
ER5356	215-255	>100	17-25	575-630

Tabla 2.8. Características de trabajo material de aporte ER5356 suministrado [9].

Características	ER5356
Diámetro (mm/pulg.)	1,00 (0,040)
Polaridad	CC con electrodo en positivo (CCEP)
Gas Protector	100% Ar

2.3. Tratamientos térmicos

Como se mencionó, el material base fue suministrado en estado T6, siendo necesario solo realizar los tratamientos térmicos para obtener los estados W y T4.

De acuerdo al espesor de las planchas, que es de 2,8 mm, los parámetros para el tratamiento térmico, empleados en el presente estudio, de los estados W y T4, se muestran en la **Tabla 2.9.**

Tabla 2.9. Parámetros de los tratamientos térmicos empleados, para los estados W y T4 [5].

ESTADO	"W"	"T4"
Solubilizado		
Temperatura	520 °C	520 °C
Tiempo	40 minutos	40 minutos
Templado		
Medio	Agua	Agua
Temperatura del medio	35 °C	35 °C
Envejecimiento Natural		
Temperatura	-	Ambiente
Tiempo	-	8 - 10 días

Posterior al tratamiento de templado, las planchas tratadas para obtener el estado W, fueron conservadas a baja temperatura (-17 °C) durante un tiempo máximo de 24 horas, antes de ser empleadas, para evitar que se produzca un envejecimiento natural.

2.3.1. Solubilizado

a) Equipos y materiales utilizados

- **Horno de cámara**

El equipo empleado, mostrado en la **Figura 2.2.**, es un horno tipo cámara, de la marca Carbolite, modelo CWF 11/13, de temperatura máxima 1100 °C, ubicado en el Laboratorio de Materiales, Sección Ingeniería Mecánica de la PUCP.



Figura 2.2. Horno tipo cámara Carbolite CWF 11/13.

- **Planchas**

Para el proceso de solubilizado, se empleó 2 de las planchas de 200 x 150 (mm x mm) y 4 de 100 x 150 (mm x mm) del material base AA6063-T6, mostradas en la **Figura 2.3**.



Figura 2.3. Planchas de la aleación AA6063 empleadas para el proceso de solubilizado.

b) Procedimiento

Para el proceso de solubilizado, las planchas se colocaron en el horno durante 40 minutos a una temperatura de 520 °C.

Para esto, se programó en el horno la temperatura especificada y se esperó a que el interior del horno llegue a la programada. Se puede ver esto en la **Figura 2.4**.



Figura 2.4. Temperatura de 520 °C programa en el interior del horno para el tratamiento.

Luego, las planchas fueron colocadas en el interior del horno. Para esto se empleó unas pinzas y guantes de protección. Se muestra, en la **Figura 2.5.**, las planchas dentro del horno, para empezar su tratamiento.



Figura 2.5. Planchas ubicadas en el interior del horno para el tratamiento de solubilizado.

El tiempo de permanencia en el horno fue de 40 minutos para finalizar el tratamiento de solubilizado, para luego, proseguir con el templado del material.

2.3.2. Templado

Al término del solubilizado, el material fue extraído del horno con ayuda de pinzas, como se muestra en la **Figura 2.6.** Se procedió a realizar el temple del material empleando como medio de enfriamiento agua a 35 °C.



Figura 2.6. Retiro de las planchas de aluminio del horno al finalizar el solubilizado.

Las planchas fueron enfriadas de forma casi inmediata a la salida del horno, pues, de no darse de forma rápida, afectará de manera negativa a las propiedades del metal. Se empleó un balde lleno con el agua de enfriamiento, como se muestra en la **Figura 2.7.**



Figura 2.7. Enfriamiento de planchas de aluminio empleando agua como medio.

De las planchas templadas, se continuó el tratamiento para lograr el estado T4, con 1 de las planchas de 200 x 150 (mm x mm) y 2 de las 100 x 150 (mm x mm). Las restantes, se emplearon para la caracterización del material base y las uniones soldadas del estado W.

2.3.3. Envejecimiento natural

Para finalizar el tratamiento térmico para lograr el estado T4, se debió realizar el envejecimiento natural de la aleación en cuestión. Para ello, la aleación se mantuvo a temperatura ambiente en una zona con flujo de aire constante. En la **Figura 2.8.**, se muestran las planchas tratadas.



Figura 2.8. Planchas de aluminio AA6063 durante envejecimiento natural a T4.

2.4. Proceso de soldadura

2.4.1. GMAW

Mediante el proceso GMAW, se realizaron las uniones soldadas obteniendo los cupones del material base AA6063 en diferentes estados de tratamiento térmico (T4, T6 y W), empleando el ER5356 como material de aporte. El equipo empleado para el proceso de soldeo fue el OPTIPLUS 350, de la marca SAF, mostrado en la **Figura 2.9**, con sus datos técnicos mostrados en la **Tabla 2.10**.



Figura 2.9. Equipo OPTIPLUS 350 de soldeo GMAW.

Tabla 2.10. Datos técnicos del equipo OPTIPLUS 350 de soldeo GMAW.

OPTIPLUS 350	
Especificaciones Primarias	
Voltaje de suministro	230/400 V -- 50-60 Hz.
Corriente máxima	41.7 A (230 V) - 24 A (400 V)
Especificaciones Secundarias	
Corriente de soldeo	10 - 350 A
Carrete de material de aporte	
Diámetro (Aluminio)	1,0 - 1,6 mm
Especificaciones físicas	
Dimensiones externas (L x W x H)	810 x 450 x 915 mm
Peso	125 kg

2.4.2. Gas de protección

El gas de protección empleado durante el proceso GMAW fue argón al 100 %, utilizando un caudal de 10 litros/min en todas las uniones realizadas.

2.4.3. Voltaje y variación de la intensidad de soldeo

La intensidad y el voltaje son parámetros de entrada de la soldadura GMAW. El voltaje se ingresa en el equipo y es el que determina la longitud de arco. Mientras, la intensidad se ajusta indirectamente con la velocidad de alimentación del material de aporte, la cual genera el calor necesario fundir el material de aporte. En la **Figura 2.10.**, se muestra los parámetros de voltaje e intensidad de corriente durante el proceso de soldeo.



Figura 2.10. Parámetros de voltaje e amperaje durante el soldeo.

2.4.4. Ángulo de inclinación y dirección de la pistola de soldeo

Entre los parámetros de soldadura GMAW se encuentra el ángulo de inclinación de la pistola de soldeo. La pistola debe estar bien posicionada, de manera que el gas proteja de manera correcta durante el soldeo. Esta inclinación es el ángulo formado entre la boquilla y la vertical, recomendándose un ángulo entre los 10° y 20°.

La dirección de la pistola de soldeo dependerá del espesor del material a soldar, como se muestra en la **Figura 2.11**. La dirección de empuje **(a)**, de derecha a izquierda, es para chapas finas; y la dirección de arrastre **(b)**, de izquierda a derecha, para piezas de espesor superior a los 3 milímetros.

Es recomendable, en la soldadura del aluminio, emplear la dirección de empuje, porque otorga una mejor protección por parte del gas de argón. El gas va por delante, antes del arco, protegiendo con mayor eficiencia a comparación de emplear la dirección de arrastre.

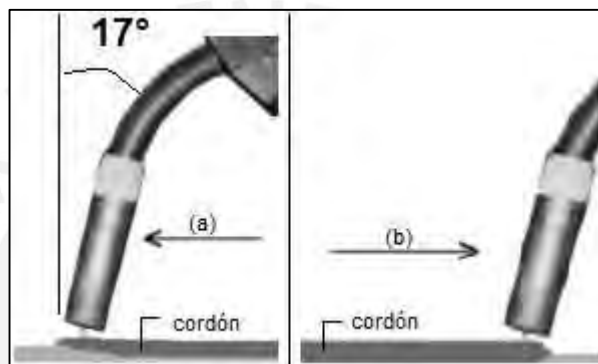


Figura 2.11. (a) Dirección de empuje. (b) Dirección de arrastre.

Durante el proceso GMAW de los ensayos, se realizó un proceso con dirección de empuje por su espesor, con un ángulo de 17° entre la boquilla y la vertical, como muestra la **Figura 2.11**. (a).

2.4.5. Welding car

La velocidad de soldeo y la longitud de arco son parámetros importantes durante el proceso de soldeo. Estos parámetros influyen fuertemente sobre el calor de aporte durante el soldeo.

Al efectuarse una pasada muy lenta, el calor aportado será muy elevado, ocasionando una mayor tendencia a la fisuración en caliente y con el peligro de producirse perforaciones. Por otro lado, al realizarse una pasada más rápida, el material podría no fundirse completamente, ocasionando una penetración parcial.

La longitud de arco, distancia entre la pieza de trabajo y la boquilla, debe mantenerse constante, debido a que si variase el voltaje de aporte puede dar como resultado un cordón sin uniformidad.

Es por ello, se utilizó un equipo que emplea un método semiautomático capaz de mantener constantes parámetros como la longitud del arco, la velocidad y el ángulo de inclinación de soldeo. El equipo empleado fue un carro de soldadura (*Welding car*), modelo Magnetic Moggy de la marca GULLCO, mostrado en la **Figura 2.12**.



Figura 2.12. *Welding car* modelo Magnetic Moggy.

2.4.6. Sistema de alimentación del material de aporte

El equipo cuenta con un sistema de alimentación de empuje del material de aporte, el cual consiste en un sistema mecánico, mostrado en la **Figura 2.13.**, que controla la velocidad con la que el alambre de material de aporte es enviado hacia la pistola de soldeo, durante el proceso mismo.



Figura 2.13. Sistema mecánico de alimentación de material de aporte.

La velocidad de alimentación del material de aporte debe mantenerse constante durante el proceso de soldeo, debido a que su fluctuación desestabilizaría el arco eléctrico.

2.4.7. Equipo de protección personal

Durante el proceso de soldadura se empleó el equipo de protección personal recomendado por la guía de seguridad de la norma ANSI Z49.1, denominada “Seguridad de los procesos de soldadura, corte y afines”, para la seguridad del soldador y personas cercas al área de trabajo.

El equipo de protección empleado fue una careta de soldar para la protección facial y ocular, por la luz brillante y las chipas emitidas por el arco eléctrico; guantes, por las altas temperaturas que se alcanzan durante el proceso; extractor de humos, respiradores con filtros de partículas, por los gases emitidos y las partículas de alúmina, dañinas para el organismo; y mandil de cuero, para protección del cuerpo humano.

2.5. Obtención de cupones soldados

2.5.1. Preparación de juntas

Las planchas preparadas para la elaboración de los cupones son las planchas tipo “B” especificadas anteriormente, de dimensiones 100 x 150 mm, de 2,8 mm de espesor, como se muestra en la **Figura 2.14**.

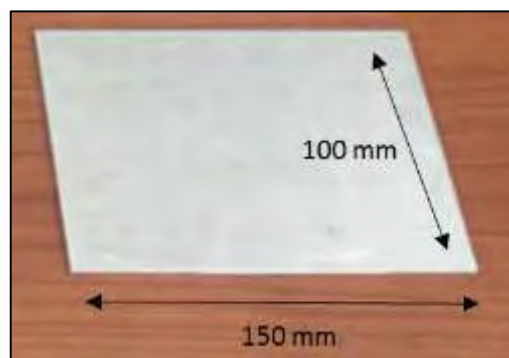


Figura 2.14. Plancha de aluminio AA6063 para la fabricación de cupones de soldadura.

2.5.1.1. Tipo de juntas

Existen cinco tipos básicos de juntas para la elaboración de uniones soldadas (unión a tope, unión en T, unión de solape, unión en ángulo y unión de borde), de las cuales, se seleccionó la unión a tope, mostrada en la **Figura 2.15.**, recomendada para la soldadura en piezas de espesor menor a 6 mm, con separación entre planchas del 80% del espesor de las mismas.

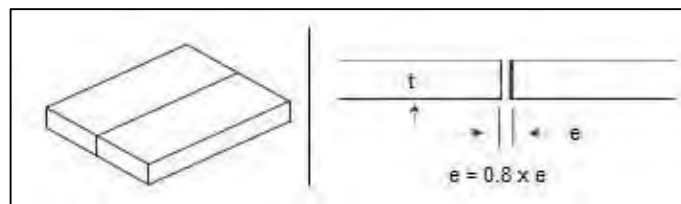


Figura 2.15. Unión a tope y separación entre planchas.

Las planchas tienen un espesor de 2,8 mm, por lo que la separación entre planchas deberá ser de 2,25 mm, al momento de realizar la unión a tope durante el proceso de soldeo.

2.5.1.2. Posición de cupones a soldar

Las posiciones de soldadura son básicamente cuatro (plana, horizontal, vertical y sobre cabeza), que su ejecución depende de la posición del eje de soldadura en los diferentes planos a soldar. Para el presente trabajo, se soldó en posición plana, donde la pieza fue colocada en posición plana a nivel. Esta posición favorece al proceso GMAW, por el fácil soldeo y considerable bajo costo en comparación a otras.

2.5.1.3. Limpieza de bordes

La limpieza de bordes se realizó con la finalidad de eliminar la grasa y la capa de óxido formada por alúmina, ubicada en la superficie, con la finalidad de evitar la formación de porosidad, fomentar la estabilidad del arco y otros defectos en el cordón de soldadura. Para ello, se empleó un cepillo con cerdas de acero inoxidable, para evitar la contaminación de la pieza a soldar; y alcohol para la limpieza final de grasas y suciedad en la superficie.



Figura 2.16. Planchas luego de la limpieza de bordes.

2.5.2. Procedimiento de soldeo

2.5.2.1. Ensayos iniciales

Para la elaboración de los cupones soldados, se realizó una serie de ensayos iniciales para obtener los parámetros óptimos para el procedimiento de soldadura empleando GMAW, dando como resultado uniones satisfactorias.

Entre los criterios para empezar el soldeo de los cupones finales, se verificó la sobremonta del cordón de soldadura, la buena penetración en la raíz y la ausencia de fisuras y/o porosidades superficiales.

2.5.2.2. Cupones de soldadura

El aluminio posee un elevado coeficiente de dilatación térmica ($2,3 \times 10^{-5}/^{\circ}C$) en comparación al del acero ($1,2 \times 10^{-5}/^{\circ}C$); lo que ocasiona que durante el proceso de soldeo, disminuye el espacio entre los bordes de las planchas. Por ello, antes de realizar la soldadura, se apuntaló en los extremos de cada borde unos pequeños apéndices de aluminio, como se muestra en la **Figura 2.17**. En estos es donde se iniciaría el depósito del material de aporte y se finalizaría el mismo.

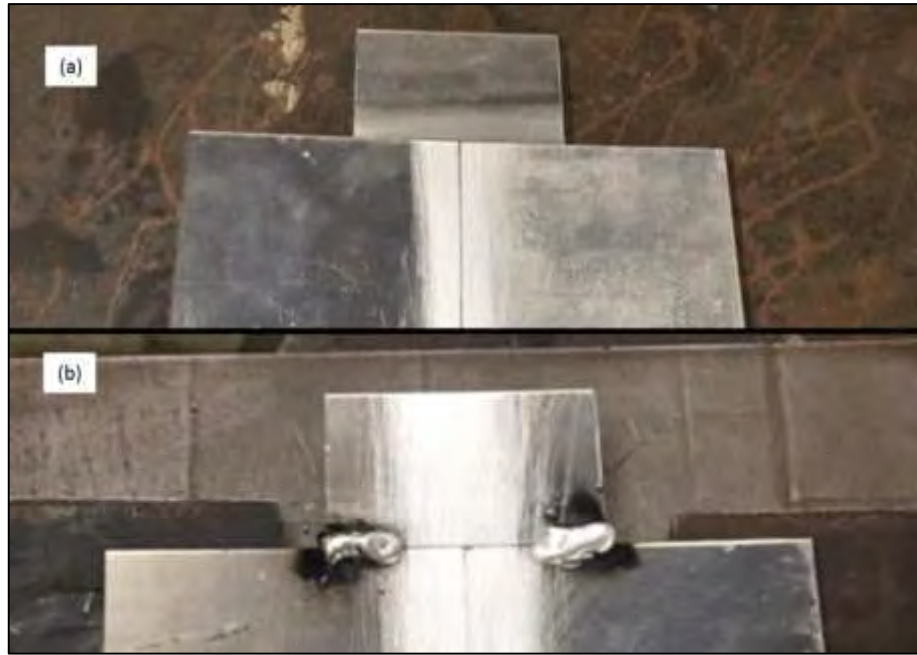


Figura 2.17. Posicionamiento de apéndice; (a) antes del apuntalado, (b) después del apuntalado.

Se soldaron un total de cinco cupones de AA6063, en los siguientes estados de tratamiento térmico: un cupón en T4, uno en T6 y tres en W. La **Tabla 2.11.**, muestra los parámetros de soldeo empleados durante el proceso de los cinco cupones.

Tabla 2.11. Parámetros de soldeo de los cupones AA6063 en los tres estados.

Número de pasadas	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Velocidad Aporte (cm/min)	Velocidad Soldeo (cm/min)	Caudal Gas Protección (l/min)
1	124	17,9	4,7	60	10

Además, también se ajustó la distancia entre las piezas a soldar y la boquilla, siendo esta de 10 mm para un proceso con dirección de empuje por su espesor, como se mencionó anteriormente, con un ángulo de 17° entre la boquilla y la vertical. La Especificación de Procedimiento de Soldadura (WPS) de cada cupón soldado se muestra a continuación.

ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Identificación **T6**
 Revisión **Nº1** Fecha **15/08/16** Por **Martín Figueroa**
 Autorizado por _____ Fecha _____
 Tipo - Manual Semiautomático
 Mecanizado Automático

Nombre de la compañía _____
 Proceso(s) de soldadura **GMAW**
 PQR de soporte No(s) -

DISEÑO DE JUNTA USADA
 Tipo: **TOPE H**
 Simple Ambos lados
 Placa de respaldo: Si No
 Material de la placa de respaldo **Cobre**
 Abertura de raíz **2.25 mm** Talón -
 Ángulo del canal - Radios (J-U) _____
 Cordón de respaldo: Si No Método _____

METALES BASE
 Especificación del material **ASM AA 6063 - T6**
 Tipo o grado -
 Espesor: Canal **2.25 mm** Filete -
 Diámetro (Tubo) -

METALES DE APORTE
 Especificación AWS **AWS A5.10**
 Clasificación AWS **ER 5356**

PROTECCIÓN
 Flux _____ Gas **Ar**
 Composición **100 %**
 Electrodo-Flux (Clase) _____ Caudal **10 l/min**

PRECALENTAMIENTO
 Temp. de Pre calentamiento Mínima **NO**
 Temp. de Interpase Min - Máx -

POSICIÓN
 Posición del canal **PLANA** Filete -
 Progresión vertical: Ascendente Descendente

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS
 Modo de transferencia (GMAW) Cortocircuito
 Globular Spray
 Corriente: AC DCEP DCEN Pulsada
 Otro _____
 Electrodo de tungsteno (GTAW)
 Tamaño -
 Tipo -

TÉCNICA
 Cordón recto u oscilante **RECTO**
 Multipase o un solo pase (por lado) **UN PASE**
 Número de electrodos **1**
 Espaciamento entre elect. Longitudinal -
 Lateral -
 Ángulo **17°**
 Distancia tubo de contacto a pieza **1 cm**
 Martillado **Sin martillado**
 Limpieza entre pasadas **Escobilla acero inox.**

TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDEO
 Temperatura -
 Tiempo -

PROCEDIMIENTO DE SOLDEO

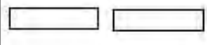
Pase o Capa(s) de soldadura	Proceso	Metal de Aporte		Corriente		Tensión Voltaje	Velocidad de Soldeo	Detalle de la Junta
		Clase	Diámetro	Tipo y Polaridad	Amperaje ó Velocidad de alimentación			
1	GMAW	AWS A5.10 ER5356	1 mm	DCEP	124 A 4,7 cm/min	17,9 V	60 cm/min	

Figura 2.18. WPS del metal base AA6063-T6.

ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Nombre de la compañía _____

Proceso(s) de soldadura **GMAW**

PQR de soporte No(s) _____

Identificación **T4**

Revisión N°1 Fecha **17/08/16** Por **Martin Figueroa**

Autorizado por _____ Fecha _____

Tipo – Manual Semiautomático

Mecanizado Automático

DISEÑO DE JUNTA USADA

Tipo: **TOPE H**

Simple Ambos lados

Placa de respaldo: Si No

Material de la placa de respaldo **Cobre**

Abertura de raíz **2.25 mm** Talón _____

Ángulo del canal _____ Radios (J-U) _____

Cordón de respaldo: Si No Método _____

METALES BASE

Especificación del material **ASM AA 6063 – T4**

Tipo o grado _____

Espesor: Canal **2.25 mm** Filete _____

Diámetro (Tubo) _____

METALES DE APORTE

Especificación AWS **AWS A5.10**

Clasificación AWS **ER 5356**

PROTECCIÓN

Flux _____ Gas **Ar**

Composición **100 %**

Electrodo-Flux (Clase) _____ Caudal **10 l/min**

PRECALENTAMIENTO

Temp. de Pre calentamiento Mínima **NO**

Temp. de Interpase Min _____ Máx _____

POSICIÓN

Posición del canal **PLANA** Filete _____

Progresión vertical: Ascendente Descendente

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Modo de transferencia (GMAW) Cortocircuito

Globular Spray

Corriente: AC DCEP DCEN Pulsada

Otro _____

Electrodo de tungsteno (GTAW)

Tamaño _____

Tipo _____

TÉCNICA

Cordón recto u oscilante **RECTO**

Multipase o un solo pase (por lado) **UN PASE**

Número de electrodos **1**

Espaciamiento entre elect. Longitudinal _____

Lateral _____

Ángulo **17°**

Distancia tubo de contacto a pieza **1 cm**

Martillado **Sin martillado**

Limpieza entre pasadas **Escobilla acero inox.**

TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDEO

Temperatura _____

Tiempo _____

PROCEDIMIENTO DE SOLDEO

Pase o Capa(s) de soldadura	Proceso	Metal de Aporte		Corriente		Tensión Voltaje	Velocidad de Soldeo	Detalle de la Junta
		Clase	Diámetro	Tipo y Polaridad	Amperaje ó Velocidad de alimentación			
1	GMAW	AWS A5.10 ER5356	1 mm	DCEP	124 A 4,7 cm/min	17.9 V	60 cm/min	<div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100px;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 15px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 15px;"></div> </div>

Figura 2.19. WPS del metal base AA6063-T4.

ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Identificación **W**
Revisión **Nº1** Fecha **22/08/16** Por **Martin Figueroa**
Nombre de la compañía _____ Autorizado por _____ Fecha _____
Proceso(s) de soldadura **GMAW** Tipo – Manual Semiautomático
PQR de soporte No(s) **-** Mecanizado Automático

DISEÑO DE JUNTA USADA
Tipo: **TOPE H**
Simple Ambos lados
Placa de respaldo: Si No
Material de la placa de respaldo **Cobre**
Abertura de raíz **2,25 mm** Talón **-**
Ángulo del canal **-** Radios (J-U) _____
Cordón de respaldo: Si No Método _____

METALES BASE
Especificación del material **ASM AA 6063 – W**
Tipo o grado **-**
Espesor: Canal **2,25 mm** Filete **-**
Diámetro (Tubo) **-**

METALES DE APORTE
Especificación AWS **AWS A5.10**
Clasificación AWS **ER 5356**

PROTECCIÓN
Flux _____ Gas **Ar**
Composición **100 %**
Electrodo-Flux (Clase) _____ Caudal **10 l/min**

PRECALENTAMIENTO
Temp. de Pre calentamiento Minima **NO**
Temp. de Interpase Min **-** Máx **-**

POSICIÓN
Posición del canal **PLANA** Filete **-**
Progresión vertical: Ascendente Descendente

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS
Modo de transferencia (GMAW) Cortocircuito
Globular Spray
Corriente: AC DCEP DCEN Pulsada
Otro _____
Electrodo de tungsteno (GTAW)
Tamaño **-**
Tipo **-**

TÉCNICA
Cordón recto u oscilante **RECTO**
Multipase o un solo pase (por lado) **UN PASE**
Número de electrodos **1**
Espaciamento entre elect. Longitudinal **-**
Lateral **-**
Ángulo **17°**
Distancia tubo de contacto a pieza **1 cm**
Martillado **Sin martillado**
Limpieza entre pasadas **Escobilla acero inox.**

TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDEO
Temperatura **-**
Tiempo **-**

PROCEDIMIENTO DE SOLDEO

Pase o Capa(s) de soldadura	Proceso	Metal de Aporte		Corriente		Tensión Voltaje	Velocidad de Soldeo	Detalle de la Junta	
		Clase	Diámetro	Tipo y Polaridad	Amperaje ó Velocidad de alimentación				
1	GMAW	AWS A5.10 ER5356	1 mm	DCEP	124 A 4,7 cm/min	17,9 V	60 cm/min	[] []	

Figura 2.20. WPS del metal base AA6063-W.

ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Nombre de la compañía _____ Proceso(s) de soldadura GMAW PQR de soporte No(s) :- <hr/> DISEÑO DE JUNTA USADA Tipo: TOPE H Simple <input checked="" type="checkbox"/> Ambos lados <input type="checkbox"/> Placa de respaldo: Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Material de la placa de respaldo Cobre Abertura de raíz 2.25 mm Talón :- Ángulo del canal :- Radios (J-U) _____ Cordón de respaldo: Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Método _____ <hr/> METALES BASE Especificación del material ASM AA 6063 - W Tipo o grado :- Espesor: Canal 2.25 mm Filete :- Diámetro (Tubo) :- <hr/> METALES DE APORTE Especificación AWS AWS A5.10 Clasificación AWS ER 5356 <hr/> PROTECCIÓN Flux _____ Gas Ar Composición 100 % Electrodo-Flux (Clase) _____ Caudal 10 l/min <hr/> PRECALENTAMIENTO Temp. de Precalentamiento Mínima NO Temp. de Interpase Min :- Máx :- <hr/>	Identificación W-T6 Revisión Nº1 Fecha 22/08/16 Por Martin Figueroa Autorizado por _____ Fecha _____ Tipo - Manual <input type="checkbox"/> Semiautomático <input checked="" type="checkbox"/> Mecanizado <input type="checkbox"/> Automático <input type="checkbox"/> <hr/> POSICIÓN Posición del canal PLANA Filete :- Progresión vertical: Ascendente <input type="checkbox"/> Descendente <input type="checkbox"/> <hr/> CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Modo de transferencia (GMAW) Cortocircuito <input type="checkbox"/> Globular <input type="checkbox"/> Spray <input type="checkbox"/> Corriente: AC <input type="checkbox"/> DCEP <input checked="" type="checkbox"/> DCEN <input type="checkbox"/> Pulsada <input type="checkbox"/> Otro _____ Electrodo de tungsteno (GTAW) Tamaño :- Tipo :- <hr/> TÉCNICA Cordón recto u oscilante RECTO Multipase o un solo pase (por lado) UN PASE Número de electrodos 1 Espaciamiento entre elect. Longitudinal :- Lateral :- Ángulo 17° Distancia tubo de contacto a pieza 1 cm Martillado Sin martillado Limpieza entre pasadas Escobilla acero inox. <hr/> TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDEO Temperatura 175 °C Tiempo 8 horas <hr/>
--	--

PROCEDIMIENTO DE SOLDEO

Pase o Capa(s) de soldadura	Proceso	Metal de Aporte		Corriente		Tensión Voltaje	Velocidad de Soldeo	Detalle de la Junta
		Clase	Diámetro	Tipo y Polaridad	Amperaje ó Velocidad de alimentación			
1	GMAW	AWS A5.10 ER5356	1 mm	DCEP	124 A 4,7 cm/min	17,9 V	60 cm/min	<div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100px;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 15px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 15px;"></div> </div>

Figura 2.21. WPS del metal base AA6063-W-T6.

ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

<p>Nombre de la compañía _____</p> <p>Proceso(s) de soldadura GMAW</p> <p>PQR de soporte No(s) -</p> <hr/> <p>DISEÑO DE JUNTA USADA</p> <p>Tipo: TOPE H</p> <p>Simple <input checked="" type="checkbox"/> Ambos lados <input type="checkbox"/></p> <p>Placa de respaldo: Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/></p> <p>Material de la placa de respaldo Cobre</p> <p>Abertura de raíz 2.25 mm Talón -</p> <p>Ángulo del canal - Radios (J-U) _____</p> <p>Cordón de respaldo: Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Método _____</p> <hr/> <p>METALES BASE</p> <p>Especificación del material ASM AA 6063 - W</p> <p>Tipo o grado -</p> <p>Espesor: Canal 2.25 mm Filete -</p> <p>Diámetro (Tubo) -</p> <hr/> <p>METALES DE APORTE</p> <p>Especificación AWS AWS A5.10</p> <p>Clasificación AWS ER 5356</p> <hr/> <p>PROTECCIÓN</p> <p>Flux _____ Gas Ar</p> <p>Composición 100 %</p> <p>Electrodo-Flux (Clase) _____ Caudal 10 l/min</p> <hr/> <p>PRECALENTAMIENTO</p> <p>Temp. de Pre calentamiento Mínima NO</p> <p>Temp. de Intérase Mín - Máx -</p>	<p>Identificación W-T4</p> <p>Revisión N°1 Fecha 22/08/16 Por Martin Figueroa</p> <p>Autorizado por _____ Fecha _____</p> <p>Tipo - Manual <input type="checkbox"/> Semiautomático <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Mecanizado <input type="checkbox"/> Automático <input type="checkbox"/></p> <hr/> <p>POSICIÓN</p> <p>Posición del canal PLANA Filete -</p> <p>Progresión vertical: Ascendente <input type="checkbox"/> Descendente <input type="checkbox"/></p> <hr/> <p>CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS</p> <p>Modo de transferencia (GMAW) Cortocircuito <input type="checkbox"/></p> <p>Globular <input type="checkbox"/> Spray <input type="checkbox"/></p> <p>Corriente: AC <input type="checkbox"/> DCEP <input checked="" type="checkbox"/> DCEN <input type="checkbox"/> Pulsada <input type="checkbox"/></p> <p>Otro _____</p> <p>Electrodo de tungsteno (GTAW)</p> <p>Tamaño -</p> <p>Tipo -</p> <hr/> <p>TÉCNICA</p> <p>Cordón recto u oscilante RECTO</p> <p>Multipase o un solo pase (por lado) UN PASE</p> <p>Número de electrodos 1</p> <p>Espaciamiento entre elect. Longitudinal -</p> <p>Lateral -</p> <p>Ángulo 17°</p> <p>Distancia tubo de contacto a pieza 1 cm</p> <p>Martillado Sin martillado</p> <p>Limpieza entre pasadas Escobilla acero inox.</p> <hr/> <p>TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDEO</p> <p>Temperatura Ambiente</p> <p>Tiempo 10 días</p>
--	---

PROCEDIMIENTO DE SOLDEO								
Pase o Capa(s) de soldadura	Proceso	Metal de Aporte		Corriente		Tensión Voltaje	Velocidad de Soldeo	Detalle de la Junta
		Clase	Diámetro	Tipo y Polaridad	Amperaje o Velocidad de alimentación			
1	GMAW	AWS A5.10 ER5356	1 mm	DCEP	124 A 4,7 cm/min	17,9 V	60 cm/min	

Figura 2.22. WPS del metal base AA6063-W-T4.

2.6. Cupones con tratamiento post-soldeo

Posteriormente, dos de los cupones soldados en estado W, fueron sometidos a envejecimiento natural y artificial, con los mismos parámetros para obtener los estados T4 y T6, como se muestra en la **Tabla 2.12**.

Tabla 2.12. Parámetro de envejecimiento de estados T4 y T6.

ESTADO	"T4"	"T6"
Envejecimiento	Natural	Artificial
Temperatura	Ambiente	175 °C
Tiempo	7 - 8 días	8 horas

El tercer cupón, fue sometido a bajas temperaturas, para evitar su envejecimiento artificial, de manera que al momento de realizar los ensayos de tracción y dureza a las probetas y briqueta extraídas del mismo, se mantengan las propiedades del estado de tratamiento térmico W.

2.7. Caracterización de materiales bases y cupones soldados

2.7.1. Inspección visual

La inspección visual se realizó a las uniones soldadas con el fin de confirmar la ausencia de fisuras, porosidades, mala penetración a la raíz, entre otras discontinuidades que pudieran afectar en la correcta caracterización de los cupones soldados.

2.7.2. Ensayos mecánicos

Para la caracterización del material base y cupones soldados, se realizaron ensayos mecánicos según las normas ASTM. Los ensayos realizados fueron los de tracción y dureza.

2.6.2.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción permite conocer las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción de los materiales base y los cupones soldados. El ensayo se realizó según la norma ASTM E8/E8M-15a, empleando una máquina calibrada y probetas correctamente dimensionadas.

a) Equipos y materiales utilizados

- **Máquina para ensayo de tracción**

La máquina de tracción empleada se muestra en la **Figura 2.23**. Esta es de la marca Zwick/Roell modelo Xforce K de 250 kN capacidad de tracción, ubicada en el Laboratorio de Materiales, Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP.



Figura 2.23. Máquina de tracción Zwick/Roell, modelo Xforce K de 250 kN de capacidad de tracción.

- **Probetas de tracción**

Se fabricaron 3 probetas para cada estado de tratamiento térmico del material base AA6063. Estas probetas fueron fabricadas según la norma ASTM E8/E8M-15a, “Métodos de Ensayos Estándar para Ensayos de Tracción en Materiales Metálicos”. En la **Figura 2.24.**, se observan las dimensiones de las probetas según la norma; en la **Figura 2.25.**, las probetas de materiales base.

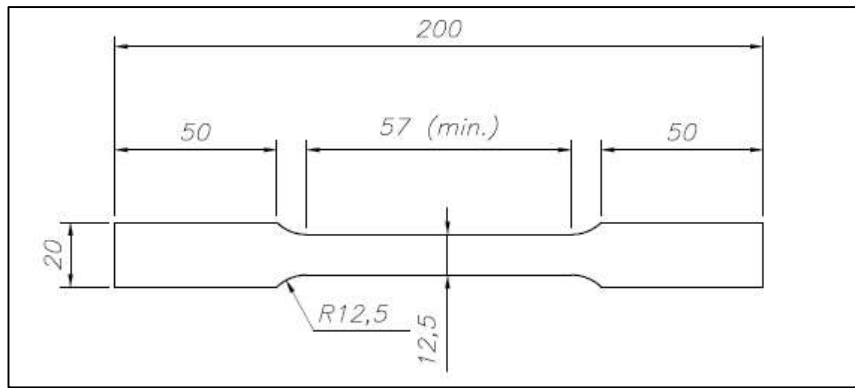


Figura 2.24. Dimensiones (en mm) de las probetas fabricadas según la norma ASTM E8/E8M-15a.



Figura 2.25. Probetas para tracción de material base.

Las 3 probetas de los cupones soldados también fueron ensayadas según la norma ASTM E8/E8M-15a. Debido a la dificultad de fabricación y costo, se fabricaron probetas sin sección reducida. La resistencia a obtener será la resistencia máxima de la unión soldada. La **Figura 2.26.**, muestra las dimensiones de las probetas de cupones soldado; y la **Figura 2.27.**, las probetas de los cupones soldados a ensayar.

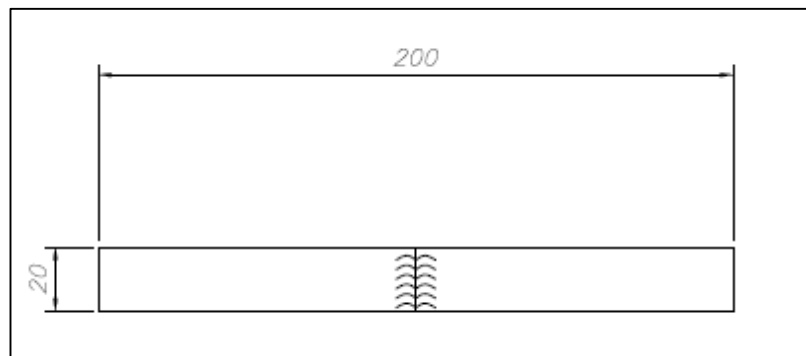


Figura 2.26. Dimensiones (en mm) de las probetas de uniones soldadas fabricadas.



Figura 2.27. Probetas para tracción de cupones soldados.

En la **Tabla 2.13.**, se muestra un resumen de la totalidad de probetas que se ensayaron a tracción.

Tabla 2.13. Resumen de probetas ensayadas a tracción.

AA6063 - T6: N° de probetas		
Estado	Material base	Cupón de soldadura
W	3	3
T4	3	3
T6	3	3
W-T4	-	3
W-T6	-	3
Total	9	15

b) Metodología de ensayo.

Para la realización de los ensayos de tracción, se empleó las recomendaciones de la norma ASTM E8/E8M-15a, al igual que se dimensionó las probetas para dicho ensayos.

El ensayo consistió en colocar las probetas de material base y los extraídos de cupones soldados en las mordazas de la máquina de tracción; y someterlas a una carga axial con incremento progresivo hasta alcanzar a rotura de cada probeta. En la **Figura 2.28.**, se muestra una probeta colocada en la máquina de tracción durante el ensayo.

Las probetas extraídas de cupones soldados se ensayaron con sobremonta, debido a que en la aplicación, esta no es removida.



Figura 2.28. Probeta durante ensayo en máquina de tracción.

2.6.2.2. Ensayo de microdureza vickers

El ensayo de microdureza mide la resistencia que oponen los metales a ser deformados plásticamente cuando son penetrados por un material más duro. El ensayo se realizó según la norma ASTM E384-16, empleando un equipo de ensayo de Microdureza Vickers.

a) Equipos y materiales utilizados.

- **Equipo para ensayo de dureza.**

El equipo empleado, mostrado en la **Figura 2.29**, es un equipo de Microdureza Vickers, de la marca Zwick/Roell, modelo ZHV. Al igual que la máquina de tracción, se ubicada en el Laboratorio de Materiales, Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP.



Figura 2.29. Equipo de ensayo de Microdureza Vickers Zwick/Roell.

- **Briquetas de materiales base.**

Se fabricaron 3 briquetas, mostradas en la **Figura 2.30.**, una de cada estado (T6, T4 y W), de caras paralelas, para la realización de los ensayos de microdureza vickers.



Figura 2.30. Planchas de materiales base.

- **Briquetas de cupones soldados.**

Se fabricaron 5 briquetas de los cupones soldados, mostradas en la **Figura 2.31.** Según las recomendaciones del ASM Handbook "Aluminum and aluminum alloys", para su preparación superficial, se realizó un desbaste con lijas #100, #150, #220, #360, #400, #600 y #1200. Para el pulido se empleó alúmina de $1\mu\text{m}$.



Figura 2.31. Briquetas de cupones soldados.

En la **Tabla 2.14.**, se muestra un resumen de las briquetas ensayadas en microdureza vickers, de cada estado.

Tabla 2.14. Resumen de briquetas ensayadas en microdureza vickers.

AA6063 - T6: N° de briquetas		
Estado	Briquetas de material base	Briquetas de cupón de soldadura
W	1	1
T4	1	1
T6	1	1
W-T4	-	1
W-T6	-	1
Total	3	5

b) Metodología de ensayo.

El ensayo consistió en el posicionamiento de la briqueita en el equipo de ensayo, la aplicación de una carga de 100 gramos, tanto en las briquetas de material base, como en las briquetas de los cupones soldados.

El equipo luego de aplicar la carga, empleando el software de Zwick/Roell, muestra el valor de la microdureza de Vickers (HV0,1) en la pantalla del computador asociado al equipo, junto con las diagonales (d1 y d2), de la huella del indentador.

La **Figura 2.32.**, muestra los barridos de dureza realizados al cordón de soldadura. El esquema es referencial, pues el espesor de las planchas empleadas para la elaboración del cupón soldado, es muy delgado; además, que la ZAC, es de un ancho pequeño.

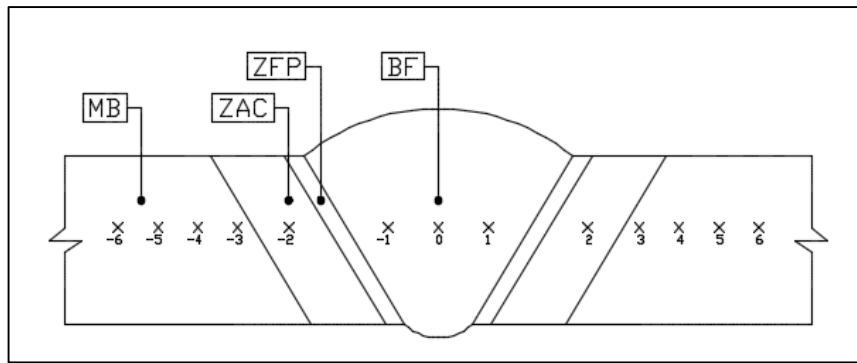


Figura 2.32. Detalle del barrido de microdureza vickers en el cordón de soldadura (MB: Material Base, ZAC: Zona Afectada por el Calor, ZFP: Zona Fundida Parcialmente, BF: Baño Fundido).



CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Inspección visual a cupones soldados

Se realizó una limpieza luego del proceso de soldeo para inspeccionar los cupones soldados. Como muestra la **Figura 3.1.**, el cordón de soldadura de la pieza AA6063-T6 no muestra fisuras externas ni porosidades; y presenta penetración total. Lo que si se aprecia son salpicaduras que no llegan a ser defectos. De la misma manera, los otros cuatro cupones soldados.



Figura 3.1. Cordón de soldadura del AA6063-T6.

3.2. Ensayo de tracción

3.2.1. Material base

3.2.1.1. Suministro

En la **Tabla 3.1.**, se muestra los resultados del ensayo de tracción en probetas obtenidas del material en estado de suministro AA6063-T6. Se aprecia que la resistencia a la tracción o esfuerzo máximo promedio obtenido es 248 MPa.

Tabla 3.1. Resultados de ensayo de tracción del material de suministro AA6063-T6.

Material		Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Fuerza máxima (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)
AA6063-T6	Probeta 1	3.03	12.51	37.9	9.3	246.7
	Probeta 2	3.03	12.45	37.7	9.4	248.7
	Probeta 3	3.02	12.48	37.7	9.4	248.7
	Promedio	-	-	-	9.4	248.0

3.2.1.2. Material con tratamiento térmico T4

En la **Tabla 3.2.**, se muestra los resultados del ensayo de tracción en probetas obtenidas del material con tratamiento térmico T4. Se aprecia que el material presenta una resistencia a la tracción promedio de 207,5 MPa, valor que es un 16% menor respecto a la resistencia a la tracción promedio del material de suministro de 248 MPa en estado T6.

Tabla 3.2. Resultados de ensayo de tracción del material con tratamiento térmico T4.

Material		Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Fuerza máxima (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)
AA6063- T4	Probeta 1	2.97	12.43	36.9	7.7	208.3
	Probeta 2	3.00	12.41	37.2	7.7	207.3
	Probeta 3	3.02	12.46	37.6	7.8	207.0
	Promedio	-	-	-	7.7	207.5

3.2.1.3. Material con tratamiento térmico W

En la **Tabla 3.3.**, se muestra los resultados del ensayo de tracción en probetas obtenidas del material con tratamiento térmico W. Se aprecia que el material presenta una resistencia a la tracción promedio de 193 MPa, valor que es un 22% menor respecto a la resistencia a la tracción promedio del material de suministro de 248 MPa en estado T6.

Tabla 3.3. Resultados de ensayo de tracción del material con tratamiento térmico W.

Material		Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Fuerza máxima (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)
AA6063- W	Probeta 1	2.98	12.51	37.3	7.1	189.6
	Probeta 2	2.97	12.45	37.0	7.2	194.0
	Probeta 3	2.94	12.44	36.6	7.1	194.6
	Promedio	-	-	-	7.1	193.0

3.2.1.4. Análisis de resultados

En el **Gráfico 3.1.**, se muestra una comparación de la resistencia máxima a la tracción del material AA6063-T6, del mismo, con tratamientos térmicos T4 y W, y del material de aporte ER5356 una vez depositado.

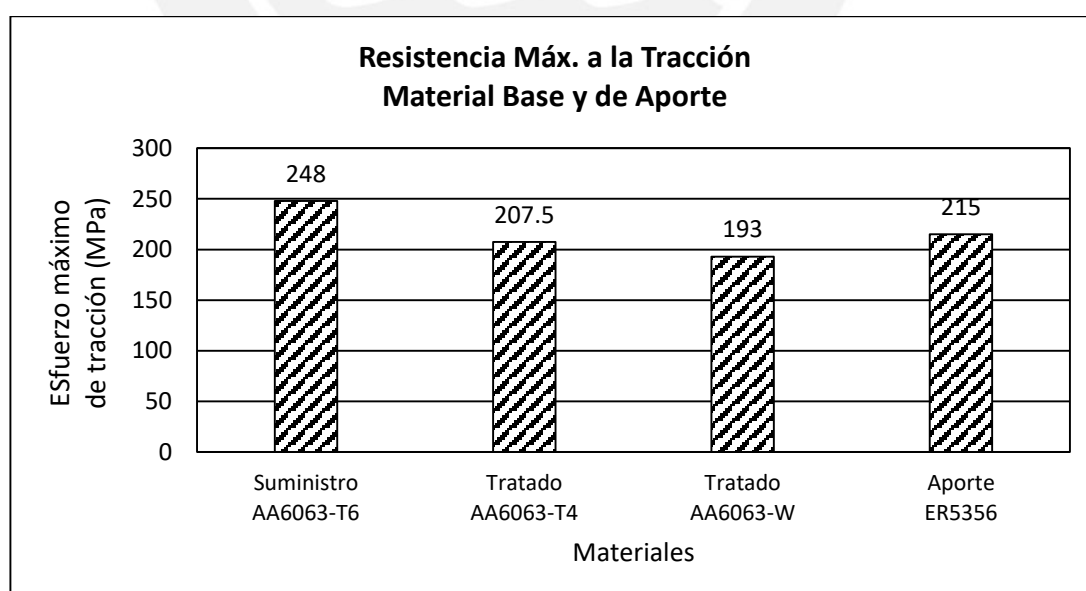


Gráfico 3.1. Comparación gráfica de la resistencia máxima a la tracción de las probetas de materiales a emplear.

En el gráfico se aprecia, que la mayor resistencia mecánica de la aleación, le corresponde al estado T6. Además, el esfuerzo máximo de tracción del material de aporte, es mayor al de la aleación AA6063 en cualquiera de los 3 estados de tratamiento térmico.

3.2.2. Uniones soldadas

3.2.2.2. Suministro

En la **Tabla 3.4.**, se muestra los resultados del ensayo de tracción de las probetas extraídas del cupón soldado empleando el material de suministro AA6063-T6. Se aprecia que la resistencia máxima mecánica promedio a la tracción es de 199 MPa, siendo este valor menor en un 20% respecto al material base de suministro, en estado T6. Además, todas las probetas rompieron en la ZAC.

Tabla 3.4. Resultados de ensayo de tracción de las probetas del cupón soldado empleando el material de suministro AA6063-T6.

Material Soldado		Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Fuerza máxima (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Zona de rotura
AA6063-T6	Probeta 1	3.07	20.84	64.0	12.6	197.5	ZAC
	Probeta 2	3.02	21.17	63.9	12.9	201.1	ZAC
	Probeta 3	3.08	20.23	62.3	12.3	197.5	ZAC
	Promedio	-	-	-	12.6	199	-

3.2.2.2. Material con tratamiento térmico T4

En la **Tabla 3.5.**, se muestra los resultados del ensayo de tracción de las probetas extraídas del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico T4. Se aprecia que la resistencia máxima promedio a la tracción es de 191,5 MPa, siendo este valor menor en un 8% respecto al material base en estado T4.

Tabla 3.5. Resultados de ensayo de tracción de las probetas del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico T4.

Material Soldado		Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Fuerza máxima (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Zona de rotura
AA6063-T4	Probeta 1	3.04	20.26	61.6	12.0	194.3	ZAC
	Probeta 2	3.13	20.92	65.5	12.4	189.0	ZAC
	Probeta 3	3.03	20.60	62.4	11.9	191.3	ZAC
	Promedio				12.1	191.5	-

3.2.2.3. Material con tratamiento térmico W

En la **Tabla 3.6.**, se muestra los resultados del ensayo de tracción de las probetas extraídas del cupón soldado empleando el material de suministro con tratamiento térmico W. Se aprecia que la resistencia máxima promedio a la tracción es de 187 MPa, siendo este valor menor en un 3% respecto al material base en estado W.

Tabla 3.6. Resultados de ensayo de tracción de las probetas del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico W.

Material soldado		Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Fuerza máxima (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Zona de rotura
AA6063-W	Probeta 1	3.01	20.05	60.4	11.4	189.0	ZAC
	Probeta 2	3.04	20.79	63.2	11.6	183.8	ZAC
	Probeta 3	3.05	21.37	65.2	12.2	187.4	ZAC
	Promedio	-	-	-	11.7	187	-

3.2.2.4. Material con tratamiento térmico W-T6

En la **Tabla 3.7.**, se muestra los resultados del ensayo de tracción de las probetas extraídas del cupón soldado empleando el material de suministro con tratamiento térmico W, con un envejecimiento posterior al soldeo igual al del estado T6, denominándolo estado W-T6. Se aprecia que la resistencia máxima promedio a la tracción es de 202 MPa, siendo este valor menor en un 18% respecto al promedio del material base de suministro, en estado T6.

Tabla 3.7. Resultados de ensayo de tracción de las probetas del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico W-T6.

Material		Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Fuerza máxima (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Zona de rotura
AA6063 W-T6	Probeta 1	2.99	19.53	58.4	12.0	205.6	ZAC
	Probeta 2	3.04	20.53	62.4	12.6	202.3	ZAC
	Probeta 3	3.06	20.38	62.4	12.4	198.8	ZAC
	Promedio	-	-	-	12.3	202.0	-

3.2.2.5. Material con tratamiento térmico W-T4

En la **Tabla 3.8.**, se muestra los resultados del ensayo de tracción de las probetas extraídas del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico W, con un envejecimiento posterior al soldeo igual al del estado T4, denominándolo estado W-T4. Se aprecia que la resistencia máxima promedio a la tracción es de 195 MPa, siendo este valor menor en un 6% respecto al promedio del material base en estado T4.

Tabla 3.8. Resultados de ensayo de tracción de las probetas del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico W-T4.

Material		Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Fuerza máxima (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Zona de rotura
AA6063 W-T4	Probeta 1	3.02	20.43	61.7	11.7	189.1	ZAC
	Probeta 2	3.01	19.83	59.7	11.8	197.8	ZAC
	Probeta 3	3.02	20.21	61.0	12.0	197.2	ZAC
	Promedio	-	-	-	11.8	195	-

3.2.2.6. Análisis de resultados

En el **Gráfico 3.2.**, se muestra una comparación gráfica de la resistencia máxima a la tracción de las probetas obtenidas de los cupones soldados en los ensayos de tracción.

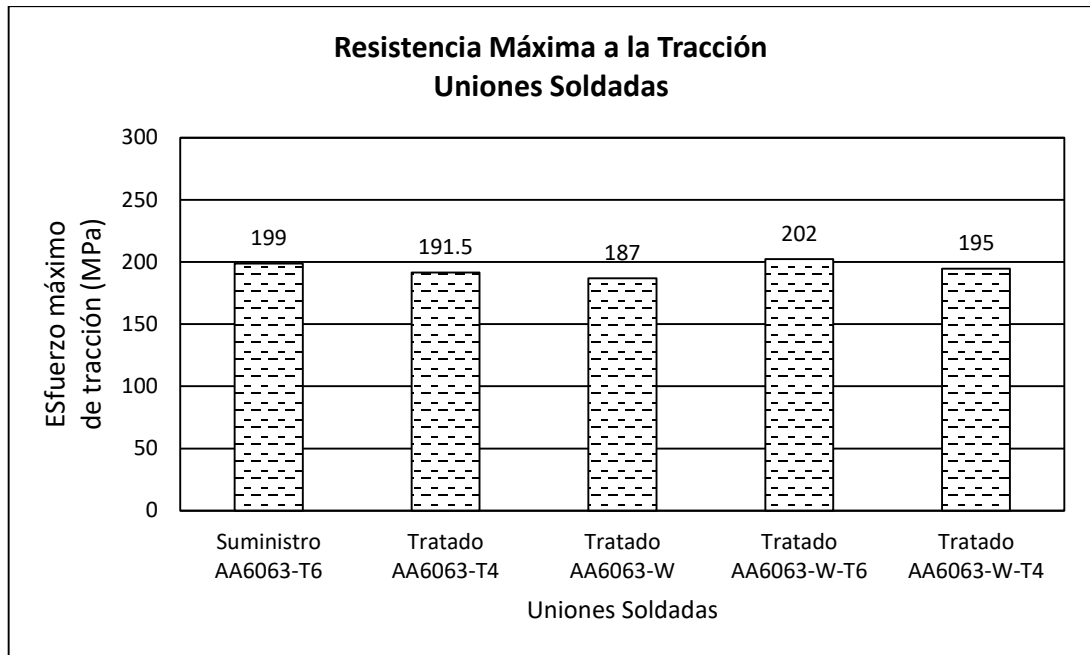


Gráfico 3.2. Comparación gráfica de la resistencia máxima a la tracción de las probetas de los cupones soldados.

En el gráfico se aprecia que no existe una gran variación entre los valores de resistencia máxima obtenidos entre los diferentes estados de tratamiento térmico soldados.

3.2.3. Análisis de resultados

En el **Gráfico 3.3.**, con los resultados obtenidos, se realizó una comparación entre la resistencia máxima a la tracción de las probetas extraídas del material base y del cupón soldado.

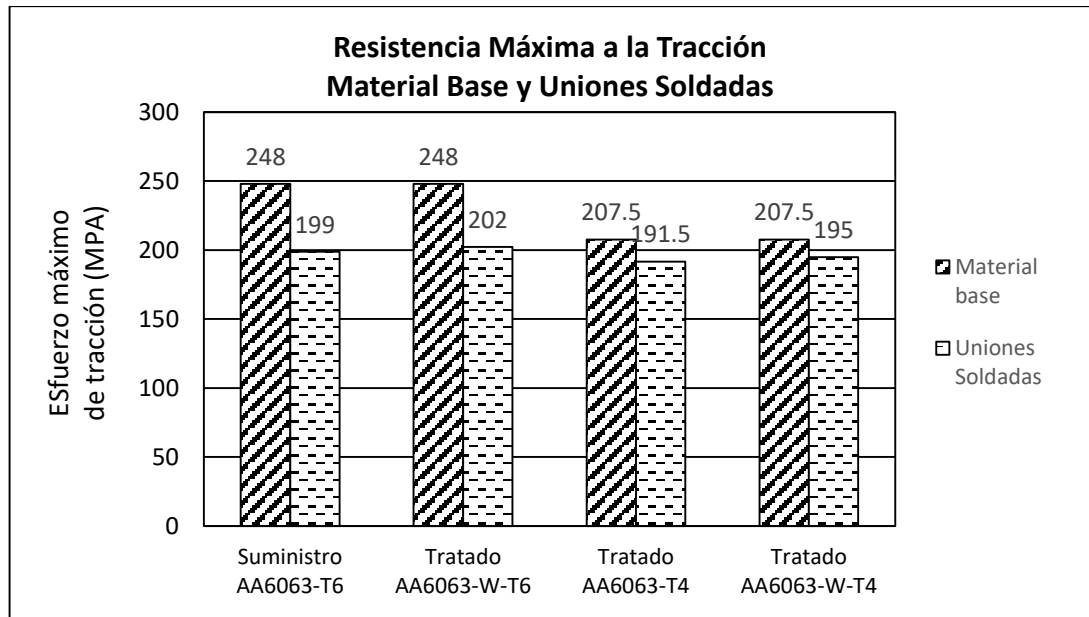


Gráfico 3.3. Comparación gráfica de la resistencia máxima a la tracción de las probetas del material base y uniones soldadas.

Los valores de resistencia a la tracción encontrados en las uniones soldadas en los diversos estados son similares, y oscilan entre los 191,5 MPa y 202 MPa.

En el gráfico se observa, que prácticamente no se consigue una mejora realizando un tratamiento de envejecimiento, natural y artificial, posterior al soldeo en estado W, pues el aumento entre los estados T6 y W-T6; y T4 y W-T4, es muy pequeño.

Con los resultados obtenidos, se calculó el porcentaje de la pérdida de esfuerzo máximo de los cupones soldados empleando los distintos materiales base. En la **Tabla 3.9.**, se muestra las pérdidas en resistencia máxima entre las probetas de los cupones soldados con material suministro, AA6063-T6, y con tratamiento W-T6; y las pérdidas entre las probetas de los cupones soldados con material suministro con tratamiento T4 y W-T4.

Tabla 3.9. Pérdidas porcentuales de resistencia máxima a la tracción.

	Material	Esfuerzo máximo (MPa)	Pérdida (%)
Material base	Suministro AA6063-T6	248.0	-
Cupón soldado	Suministro AA6063-T6	198.7	20%
	Tratado AA6063-W-T6	202.2	18%
Material base	Tratado AA6063-T4	207.5	-
Cupón soldado	Tratado AA6063-T4	191.5	8%
	Tratado AA6063-W-T4	194.7	6%

Las pérdidas porcentuales en los ensayos de tracción de los estados W-T6 y W-T4, de 18% y 6%, respectivamente, son mayores a las pérdidas de los estados T6 y T4, de 20% y 8%. Además, las pérdidas porcentuales del suministro en estado T4 y W-T4, son menores en comparación a las de los otros dos, T6 y W-T6. Aunque, la resistencia máxima a la tracción, en los ensayos a las uniones soldadas, es de 202,2 MPa, del estado W-T6.

Preliminarmente, de estos resultados obtenidos, se puede indicar que para soldar en los estados T6 y T4, no es necesario que previamente estén solubilizados, pues se alcanzan valores, de resistencia máxima a la tracción, prácticamente iguales a soldarlos directamente en T6 y T4.

3.3. Ensayo de Microdureza Vickers

3.3.1. Material base

3.3.1.1. Suministro

En la **Tabla 3.10.**, se muestran los resultados del ensayo de dureza realizado a la muestra del material en estado de suministro AA6063-T6. Se aprecia que la microdureza vickers promedio obtenida es 76 HV.

Tabla 3.10. Resultados del ensayo de microdureza vickers de la muestra del material de suministro AA6063-T6.

AA6063-T6				
Punto	Mediciones			Dureza
	d1 (µm)	d2 (µm)	dprom (µm)	HV0,1
1	155.3	156.8	156.05	76.1
2	155.1	155.6	155.35	75.8
3	155.7	156.2	155.95	75.9
4	156.3	155.5	155.9	75.7
5	155	156.1	155.55	76.2
Dureza promedio:				76

3.3.1.2. Material con tratamiento térmico T4

En la **Tabla 3.11.**, se muestran los resultados del barrido de dureza realizado a la muestra del material con tratamiento térmico T4. Se aprecia que microdureza vickers promedio obtenida es 50 HV. Este valor tiene una variación del 34% respecto a la dureza promedio del material de suministro de 76 HV en el estado T6.

Tabla 3.11. Resultados del ensayo de microdureza vickers de la muestra del material con tratamiento térmico T4.

AA6063-T4				
Punto	Mediciones			Dureza
	d1 (μm)	d2 (μm)	dprom (μm)	HV0,1
1	189.1	194.9	192	50.6
2	188.5	196.3	192.4	50.4
3	188.8	194.2	191.5	50.4
4	189.5	195.1	192.3	50.5
5	188.4	196.1	192.25	50.4
Dureza promedio:				50

3.3.1.3. Material con tratamiento térmico W

En la **Tabla 3.12.**, se muestran los resultados del barrido de dureza realizado a la muestra del material con tratamiento térmico W. Se aprecia que la dureza promedio obtenida es de 47 HV. Este valor tiene una variación del 38% respecto a la dureza promedio del material de suministro de 76 HV en el estado T6.

Tabla 3.12. Resultados del ensayo de microdureza vickers de la muestra del material con tratamiento térmico W.

AA6063-W				
Punto	Mediciones			Dureza
	d1 (μm)	d2 (μm)	dprom (μm)	HV0,1
1	195.2	195.6	195.4	46.4
2	193.1	194.9	194	49
3	196.4	195.3	195.85	46.4
4	194.6	195.2	194.9	48
5	195.1	194.8	194.95	47.8
Dureza promedio:				47

3.3.1.4. Análisis de resultados

En el **Gráfico 3.4.**, se muestra una comparación gráfica de la microdureza vickers del material de suministro AA6063-T6, del mismo, con tratamientos térmicos T4 y W.

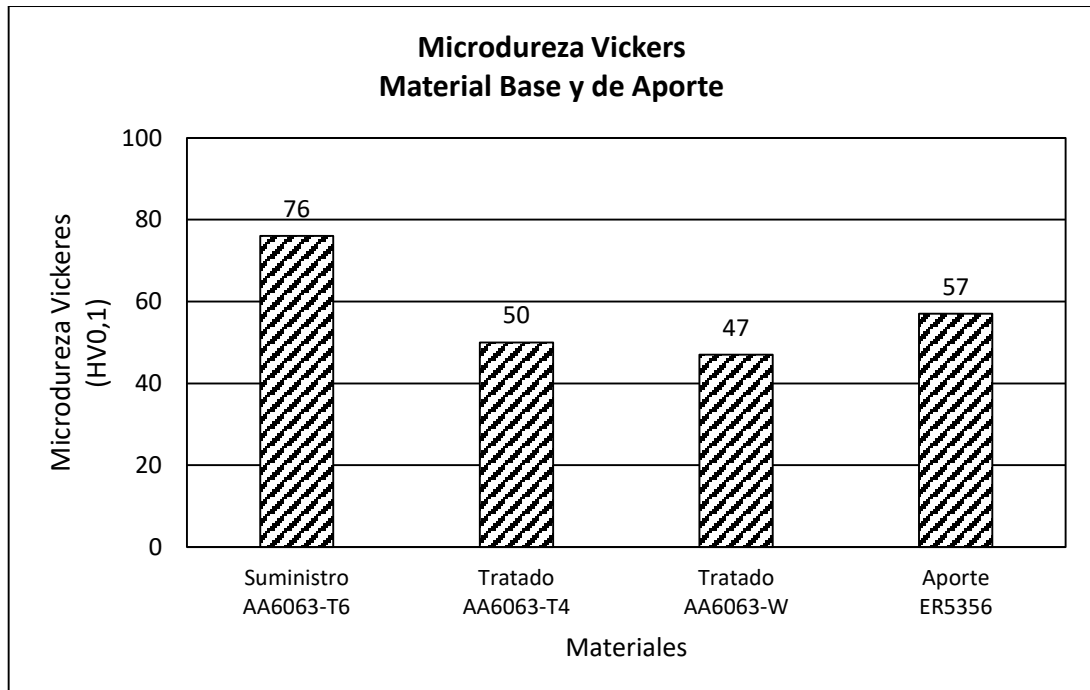


Gráfico 3.4. Comparación gráfica de la microdureza vickers de las muestras obtenidas de los materiales a emplear.

Como era de esperarse, los mayores valores de dureza se encuentran en la aleación que presenta el estado T6, mientras, que los valores más bajos de dureza, en la del estado W.

3.3.2. Uniones soldadas

3.3.2.1. Suministro

En la **Tabla 3.13.**, se muestran los resultados del barrido de dureza realizado a la muestra extraída del cupón soldado empleando el material de suministro AA6063-T6. Se aprecia que la dureza del material de aporte, ER5356, es menor que la del material base; y que la menor dureza se presenta en la ZAC.

Tabla 3.13. Resultados del ensayo de microdureza vickers de la muestra del cupón soldado empleando el material de suministro AA6063-T6.

AA6063-T6					
Punto	Mediciones			Dureza	Zona de medición
	d1 (μm)	d2 (μm)	dprom (μm)	HV0,1	
-6	161.7	163.5	162.6	70	MB
-5	167.2	162.6	164.9	68	MB
-4	185.1	192.1	188.6	52	ZAC
-3	187.4	190.2	188.8	52	ZAC
-2	188.4	190.4	189.4	51	ZAC
-1	180	182.3	181.15	57	BF
0	182.3	184.7	183.5	57	BF
1	177.7	179.5	178.6	58	BF
2	189.8	191.2	190.5	51	ZAC
3	190.2	190.7	190.45	51	ZAC
4	188.8	194.4	191.6	50	ZAC
5	162.6	162.6	162.6	70	MB
6	160.7	160.7	160.7	72	MB

3.3.2.2. Material con tratamiento térmico T4

En la **Tabla 3.14.**, se muestran los resultados del barrido de dureza realizado a la muestra extraída del cupón soldado empleando el material de suministro con tratamiento térmico T4. El material de aporte, ER5356, presenta mayor dureza que la del material base. La menor dureza se presenta en la ZAC.

Tabla 3.14. Resultados del ensayo de microdureza vickers de la muestra del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico T4.

AA6063-T4					
Punto	Mediciones			Dureza	Zona de medición
	d1 (μm)	d2 (μm)	dprom (μm)	HV0,1	
-6	191.6	195.3	193.45	50	MB
-5	190.7	194.9	192.8	50	MB
-4	184.7	188.4	186.55	49	MB
-3	189.8	186.5	188.15	49	MB
-2	187	189.3	188.15	43	ZAC
-1	181.4	182.3	181.85	56	BF
0	178.1	182.3	180.2	57	BF
1	184.7	184.2	184.45	55	BF
2	186	188.8	187.4	44	ZAC
3	184.2	187.4	185.8	48	MB
4	182.8	188.8	185.8	49	MB
5	190.1	191.2	190.65	51	MB
6	191.2	194.8	193	50	MB

3.3.2.3. Material con tratamiento térmico W-T6

En la **Tabla 3.15.**, se muestra los resultados del barrido de dureza realizado a la muestra extraída del cupón soldado empleando el material de suministro con tratamiento térmico W, con un envejecimiento posterior al soldeo igual al del estado T6, denominándolo estado W-T6. La menor dureza se presenta en el metal de aporte, siendo la zona de rotura la línea de fusión.

Tabla 3.15. Resultados del ensayo de microdureza vickers de la material del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico W-T6.

AA6063-W-T6					
Punto	Mediciones			Dureza	Zona de medición
	d1 (μm)	d2 (μm)	dprom (μm)	HV0,1	
-6	167	170.2	168.6	75	MB
-5	170.2	175.3	172.75	72	MB
-4	164.4	163.5	163.95	71	MB
-3	169.1	164.4	166.75	67	ZAC
-2	164.4	159.8	162.1	69	ZAC
-1	194	189.4	191.7	55	BF
0	160.7	160.7	160.7	58	BF
1	167.2	163.5	165.35	56	BF
2	164.4	158.9	161.65	71	ZAC
3	164.4	161.7	163.05	70	ZAC
4	158.9	160.7	159.8	73	MB
5	177.7	179.5	178.6	68	MB
6	167.9	175.8	171.85	73	MB

3.3.2.4. Material con tratamiento térmico W-T4

En la **Tabla 3.16.**, se muestra los resultados del barrido de dureza realizado a la muestra extraída del cupón soldado empleando el material de suministro con tratamiento térmico W, con un envejecimiento posterior al soldeo igual al del estado T4, denominándolo estado W-T4. La menor dureza se presenta en la ZAC.

Tabla 3.16. Resultados del ensayo de microdureza vickers de la muestra del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico W-T4.

AA6063-W-T4					
Punto	Mediciones			Dureza HV0,1	Zona de medición
	d1 (μm)	d2 (μm)	dprom (μm)		
-6	188.5	192.1	190.3	51	MB
-5	193.1	191.2	192.15	50	MB
-4	189.4	188.5	188.95	52	MB
-3	190.3	190.3	190.3	51	ZAC
-2	184.8	185.7	185.25	54	ZAC
-1	179.2	185.7	182.45	56	BF
0	177.4	176.4	176.9	59	BF
1	184.8	181.1	182.95	55	BF
2	186.6	191.2	188.9	52	ZAC
3	185.7	187.5	186.6	53	MB
4	185.7	187.5	186.6	53	MB
5	188.5	187.5	188	52	MB
6	189.4	194.9	192.15	50	MB

3.3.2.5. Análisis de resultados

En los gráficos siguientes, **Gráfico 3.5.**, **Gráfico 3.6.**, **Gráfico 3.7.**, y **Gráfico 3.8.**, se muestra una curva de dureza para los diferentes estados T6, T4, W-T6 y W-T4.

Se aprecia en el **Gráfico 3.5.**, que la menor dureza se ubica en la ZAC y es de 50 HV, siendo este valor menor en un 34% respecto al promedio del material base.

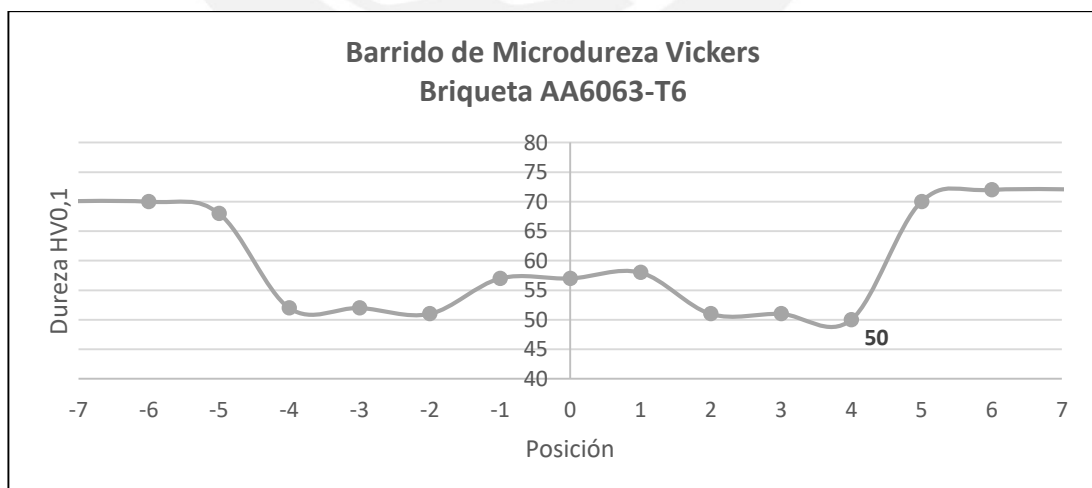


Gráfico 3.5. Curva de microdureza vickers la muestra del cupón soldado empleando el material de suministro AA6063-T6.

En el **Gráfico 3.6.**, se aprecia que el mayor valor de dureza se ubica en el baño fundido. Además, la menor dureza se ubica en la ZAC y es la de 43 HV, siendo este valor menor en un 14% respecto al promedio del material base.

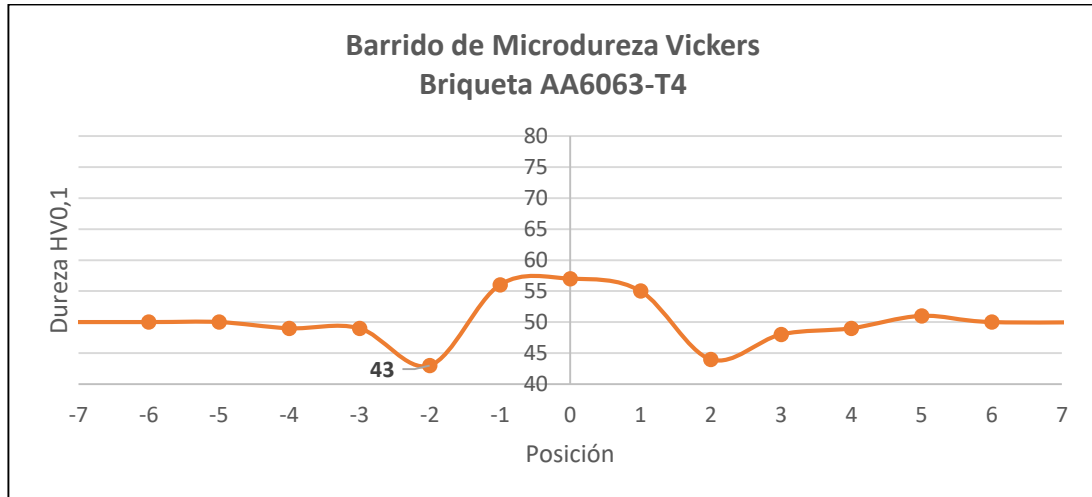


Gráfico 3.6. Curva de microdureza vickers la muestra del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico T4.

Se puede observar en el estado W-T6, cuya curva se representa en el **Gráfico 3.7.**, que el envejecimiento no solo afecta a la ZAC, sino también a otras zonas de medición. No se aprecia una fuerte caída de la dureza en la ZAC, básicamente debido a que después del soldeo se produce la precipitación del siliciuro de magnesio (Mg_2Si), el cual le otorga el estado T6. Además, la menor dureza se ubica en el baño fundido y en la ZAC cercana al baño fundido.

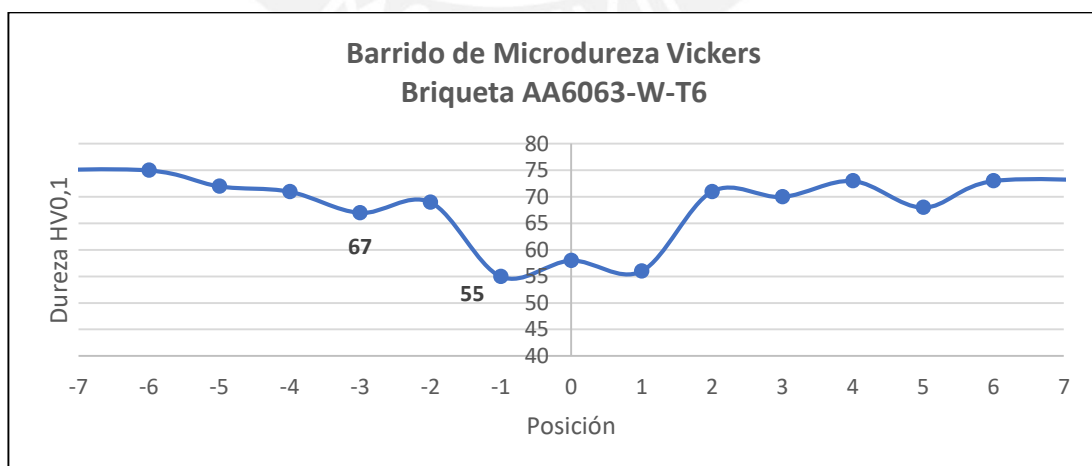


Gráfico 3.7. Curva de microdureza vickers la muestra del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico W-T6.

De la misma manera que en el estado W-T6, en el **Gráfico 3.8.**, la curva de barrido de dureza del estado W-T4 muestra que el envejecimiento no solo afecta a la ZAC, sino también a otras zonas de medición. Esta curva es más plana. La dureza mínima, ubicada en la ZAC, corresponde a la del estado T4.

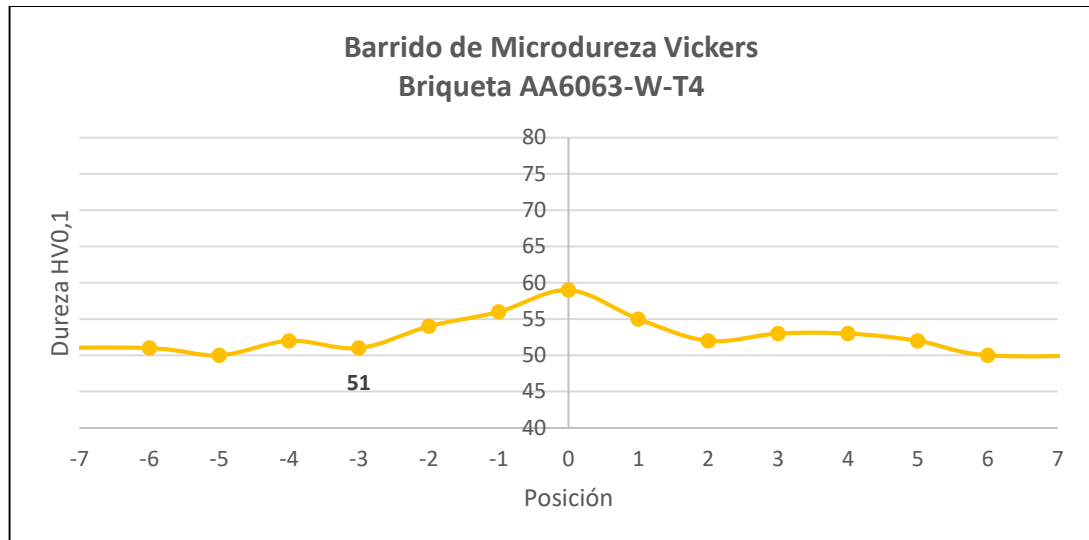


Gráfico 3.8. Curva de microdureza vickers la muestra del cupón soldado empleando el material con tratamiento térmico W-T4.

Se observa la caída de los valores de dureza HV para cada caso, en la zona ZAC, en los estado T6 y T4, como era de esperarse. En los ensayos realizados a los estados W-T6 y W-T4, la dureza mejora en la ZAC, por lo que la dureza tiende a ser la del material base, como se observa en las gráficas.

En el **Gráfico 3.9.**, se muestra una comparación gráfica de la microdureza vickers mínima en la ZAC en los ensayos de barrido a las briquetas obtenidas de los cupones soldados.

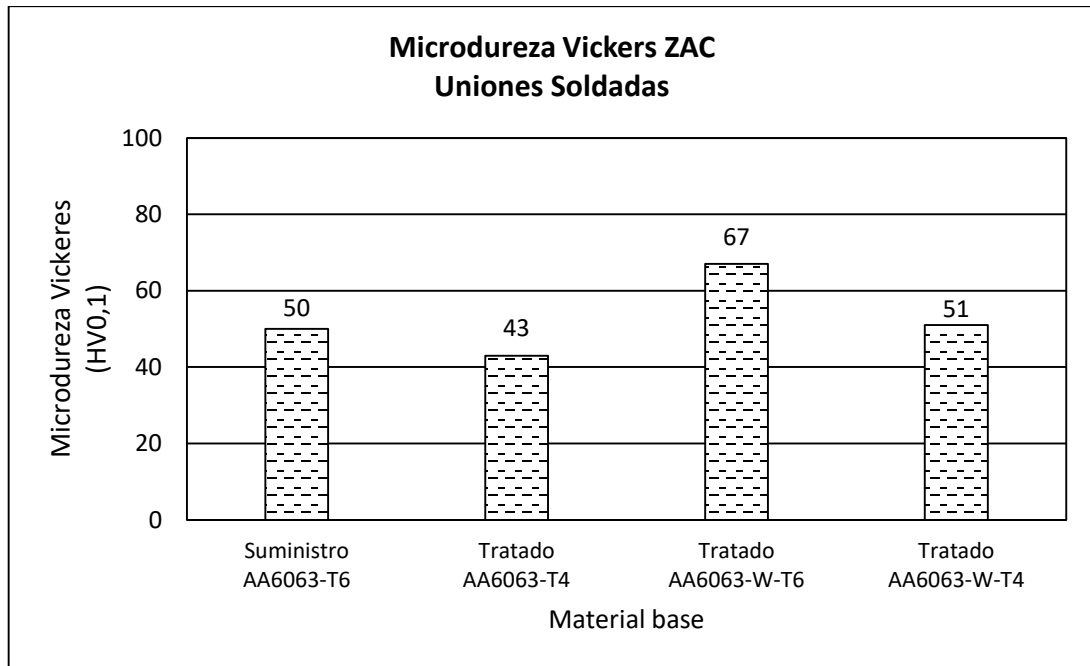


Gráfico 3.9. Comparación gráfica de la microdureza vickers mínima en la ZAC en los ensayos de barrido a las muestras obtenidas de las uniones soldadas.

En el caso del material tratado AA6063-W-T6, se aprecia que la dureza en la ZAC después de realizar el envejecimiento artificial a la unión soldada no llega al estado T6, pues se ve afectado por el ciclo térmico durante el soldeo previo al envejecimiento.

3.3.3. Análisis de resultados

En el **Gráfico 3.10.**, con los resultados obtenidos, se realizó una comparación entre la microdureza vickers de las briquetas obtenidas de los materiales a emplear y la microdureza vickers mínima en la ZAC en los ensayos de barrido a las muestras obtenidas de los cupones soldados.

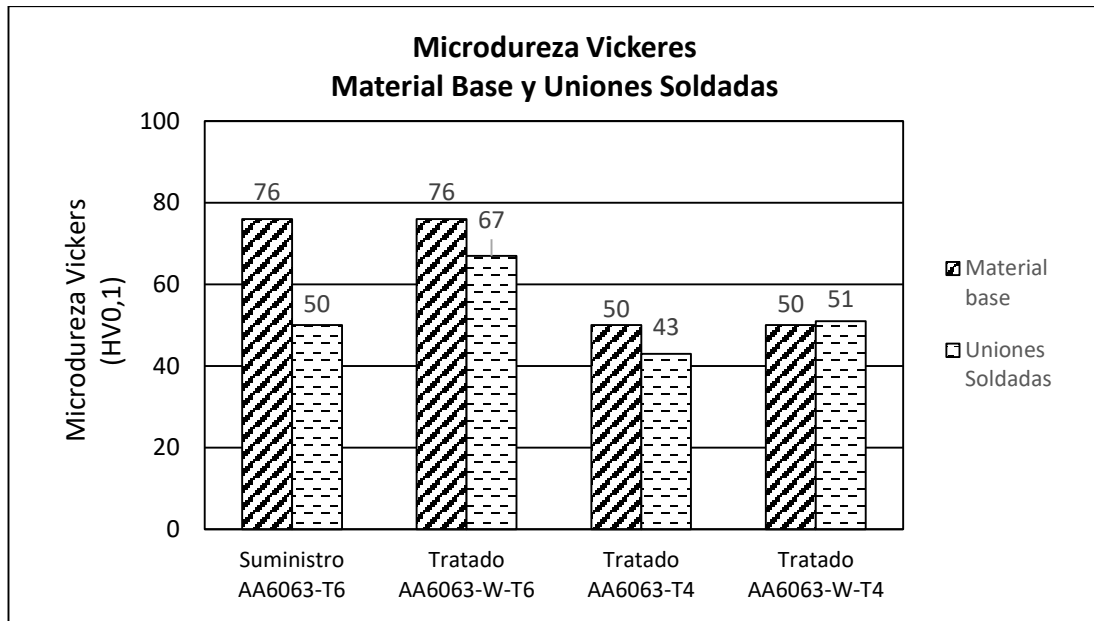


Gráfico 3.10. Comparación gráfica de la microdureza vickers de las muestras del material base y ZAC de las uniones soldadas.

La mayor caída en la ZAC se presenta en los estados T6 y T4, debido a la pérdida del tratamiento térmico. Mientras, en los estados W-T6 y W-T4, la ZAC mejora su dureza, cercana a la del estado original, correspondiente a T6 y T4, respectivamente, debido al tratamiento de envejecimiento, posterior al soldeo.

Con los resultados obtenidos, se calculó la pérdida porcentual de microdureza vickers de los cupones soldados empleando los distintos materiales base.

En la **Tabla 3.17.**, se muestra los resultados porcentuales de pérdida de microdureza vickers del material suministro, AA6063-T6, y con tratamiento W-T6; y las pérdidas entre material suministro con tratamiento T4 y W-T4.

Tabla 3.9. Pérdidas porcentuales de microdureza vickers.

Material		Microdureza Vickers (HV0,1)	Pérdida (%)
Material base	Suministro AA6063-T6	76	-
Cupón Soldado	Suministro AA6063-T6	50	34%
	Tratado AA6063-W-T6	67	12%
Material base	Tratado AA6063-T4	50	
Cupón Soldado	Tratado AA6063-T4	43	14%
	Tratado AA6063-W-T4	51	-2%

La pérdida porcentual en el ensayo de microdureza vickers del suministro en estado W-T6, de 12%, es mayor a la del suministro en estado T6, de 34%. Sin embargo, la pérdida en el estado W-T4, no solo es menor a la del estado T4, de 14%, sino que supera ligeramente a la del material base en un 2%.

Además, las pérdidas en los estados T4 y W-T4, son menores en comparación a las de los estado T6 y W-T6. Aunque, el valor de microdureza vickers máxima, en una unión soldada, se da en el estado W-T6, con 67 HV.

Si bien es cierto, se aprecia un incremento en dureza en la ZAC en los estados W-T6 y W-T4, en el ensayo de tracción, el incremento de la resistencia máxima a la tracción es ligeramente superior a los estados T6 y T4. Es por ello, que sería mejor soldar directamente en T6 y T4.



CONCLUSIONES

Los parámetros de soldeo del aluminio AA6063-T6 de 2,8 mm de espesor, empleando el material de aporte ER5356 (Al-5Mg), mediante el proceso GMAW, no varían al momento de soldar en los diferentes estados de tratamiento térmico del aluminio AA6063 empleados durante los ensayos, en este caso, se soldó empleando un amperaje de 124 A y un voltaje de 17,9 V, a una velocidad de alimentación del material de aporte de 4,7 cm/min y una velocidad de soldeo de 60 cm/min.

La unión soldada en estado T6 presenta una resistencia máxima a la tracción de 199 MPa y una dureza de 50 HV, que frente a los valores del material base, reflejan una pérdida porcentual en la resistencia a la tracción y la dureza, del 20% y 34% respectivamente.

La unión soldada en estado T4 presenta una resistencia máxima a la tracción de 191,5 MPa y una dureza de 43 HV, que frente a los valores del material base, reflejan una pérdida porcentual en la resistencia a la tracción y la dureza, del 8% y 14% respectivamente.

La unión soldada en estado de denominación W-T6 presenta una resistencia máxima a la tracción de 202,2 MPa y una dureza de 67 HV, que frente a los valores del material base, reflejan una pérdida porcentual en la resistencia a la tracción y la dureza, del 18% y 12% respectivamente. Estos porcentajes son menores a los del estado T6.

La unión soldada en estado de denominación W-T4 presenta una resistencia máxima a la tracción de 194,7 MPa y una dureza de 51 HV, que frente a los valores del material base, reflejan una pérdida porcentual en la resistencia a la tracción del 6% y un ligero aumento en la dureza del 2% respectivamente. Estos porcentajes son menores a los del estado T4, sobretodo en la dureza, donde prácticamente se ha recuperado el valor nominal del material base.

La resistencia máxima final de todas las uniones soldadas obtenidas en los diferentes estados de tratamiento térmico varía entre 191,5 MPa y 202 MPa, coincidiendo en la ZAC como zona de rotura.

La dureza mínima final de todas las uniones soldadas obtenidas en los diferentes estados de tratamiento térmico varía entre 43 HV y 67 HV, coincidiendo en la ZAC como zona de mínima dureza.

Las pérdidas de resistencia a la tracción y dureza de las uniones soldadas disminuyen si el proceso de soldadura se realiza en estado W, y posteriormente, se realiza el tratamiento de envejecimiento, ya sea natural o artificial; en comparación a si la unión es soldada directamente en los estados T6 y T4.

De los resultados obtenidos, se concluye que, para el soldeo de la aleación AA6063-T6 de 2,8 mm de espesor mediante el proceso GMAW empleando como material de aporte el ER5356 (Al-5Mg), es recomendable realizar un soldeo en estado T4 y T6 directamente, y que no es conveniente soldar en estado W y luego realizar un envejecimiento natural o artificial, pues no se logran mejorar sustancialmente sus propiedades mecánicas.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] King, Frank: **El aluminio y sus aleaciones**. Editorial LIMUSA S.A. México D.F., 1992
- [2] Sauders, H.L.: **Welding Aluminum: Theory and Practice**. Tercera edición, 1997
- [3] Cary, Howard B.: **Manual de Soldadura Moderna**. Segunda edición, Vol. II, 1992
- [4] Horwitz, Henry: **Enciclopedia de la soldadura**. Edición en español Vol. II, México , 1990
- [5] Davis, J.R.: General Introduction. In: **ASM SPECIALTY HANDBOOK. Aluminum and aluminum alloys**. Ohio, ASM International. 1993
- [6] Obando, Johnny: “**Tratamientos Térmicos para Aluminios**”. *Metal Actual*. Bogotá, número 31, pp. 36-43, 2014
- [7] The Lincoln Electric Company: **The Procedure Handbook of Arc Welding**. Decimotercera edición, Ohio, 1994
- [8] Lean Sifuentes, P.P.: **Comparación de las características de los materiales de aporte ER4043 y ER5356 en el soldeo del aluminio empleando el proceso MIG-P**. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2007
- [9] Soldexa: **Manual de Soldadura & Catálogo de Productos**. Séptima edición
- [10] 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
- [11] Sindo, Kou: **Welding Metallurgy**. Segunda edición, 2003