

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTUDIO DE UNIONES SOLDADAS CON Y SIN MATERIAL DE
APORTE DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA5052 – H34
MEDIANTE EL PROCESO GTAW**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Mecánica

AUTORA:

Gretel del Pilar Calderón Valladares

ASESOR:

Paul Pedro Lean Sifuentes

Lima, Febrero, 2021

RESUMEN

El presente trabajo muestra el estudio de uniones soldadas obtenidas mediante el proceso de soldadura GTAW, en planchas de tres milímetros de espesor de la aleación de aluminio AA5052 – H34. El objetivo principal de la tesis es determinar y comparar las características y propiedades de las uniones soldadas, obtenidas con y sin material de aporte, utilizando el proceso de soldadura GTAW.

Para el estudio se realiza en total 6 cupones soldados con una sola pasada (3 cupones con material de aporte y 3 cupones sin material de aporte). Asimismo, el aporte que se utiliza es el electrodo ER5356 elegido por sus buenas propiedades, características y compatibilidad química con el material base a soldar.

Posterior a la elaboración de los cupones soldados, se realizan ensayos no destructivos para determinar si las uniones soldadas cumplen con la normativa AWS D1.2. De esta forma, se realizan ensayos de inspección visual, tintes penetrantes y radiografía industrial. Asimismo, la caracterización y el análisis de las propiedades de los cupones soldados a través de elaboración de probetas, los cuales son sometidos a ensayos mecánicos de tracción, ensayo de barrido de dureza, ensayos de doblado y ensayos metalográficos.

En los ensayos de tracción, los resultados de las probetas soldadas sin material de aporte alcanzan menores valores de resistencia a la tracción, en comparación con las uniones soldadas con material de aporte. En los ensayos de dureza, los mayores valores para las uniones sin material de aporte se encuentran en el metal base y los menores en el baño de fusión, para las uniones soldadas con aporte los mayores valores se presentan en el baño de fusión y los menores en la ZAC. En los ensayos de doblado para ambos casos no se evidencian agrietamientos acumulados mayores o iguales a los 3 mm.

En base a los resultados de la presente investigación se concluye que, las uniones soldadas de aleación de aluminio AA5052 - H34 mediante el proceso de soldadura GTAW, se comportan de manera satisfactoria bajo los dos métodos: con y sin material de aporte. Pues, los valores de resistencia a la tracción en ambos procesos presentan valores que se encuentran por encima del valor límite que indica el código AWS D1.2. Finalmente, en la presente investigación, se obtienen ligeramente mejores propiedades y características en la unión soldada con material de aporte frente a una sin material.



DEDICATORIA

A mi mamá Pilar que me enseña cada día a no rendirme.

A mi papá, Juan Carlos, mis hermanos y Gloria

que me apoyaron en todo este camino.

A mi abuela Matilde por ser mi motivación y

fortaleza y a Dios por darme tanta dicha.



AGRADECIMIENTOS

A mi asesor Paul Pedro Lean Sifuentes por su apoyo durante el desarrollo del presente trabajo. Asimismo, a mis profesores y amigos del laboratorio de Materiales que permitieron que este trabajo sea posible.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
1. ESTADO DEL ARTE.....	3
1.1. El aluminio	3
1.2. Aleaciones de aluminio	3
1.2.1. Aleaciones no tratables térmicamente	8
1.2.2. Aleaciones tratables térmicamente	9
1.3. Principales tratamientos térmicos.....	10
1.3.1. Tratamientos térmicos en el aluminio	10
1.4. Soldabilidad del aluminio.....	11
1.4.1. Generalidades	11
1.5. Procesos más empleados	12
1.5.1. Soldadura SMAW.....	13
1.5.2. Soldadura GMAW	13
1.5.3. Soldadura GTAW	14
1.6. Aleación de aluminio AA5052-H34	15
1.6.1. Características.....	15
1.6.2. Composición química nominal	16
1.6.3. Propiedades mecánicas nominales.....	16
1.6.4. Aplicaciones y usos	16
1.6.5. Soldabilidad	16
1.6.6. Material de aporte	17
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	19
2.1. Metodología	19
2.2. Caracterización del material base AA5052 – H34	19
2.2.1. Composición química	19
2.2.2. Propiedades mecánicas	20
2.3. Equipamiento de soldadura GTAW	20
2.3.1. Proceso de soldadura	20
2.3.2. Consumibles	21
2.4. Elaboración y obtención de los cupones	24
2.4.1. Elaboración de juntas.....	24
2.4.2. Ensayos no destructivos de las uniones soldadas	32

2.5. Técnicas de caracterización de las uniones soldadas	36
2.5.1. Caracterización mecánica	36
2.5.2. Caracterización microestructural	45
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	47
3.1. Resultados de la caracterización del material base	47
3.1.1. Composición química	47
3.1.2. Propiedades mecánicas	47
3.2. Resultados del proceso de soldadura.....	49
3.2.1. Proceso de soldadura	49
3.2.2. Consumibles	50
3.2.3. Resultados de los parámetros de soldeo	50
3.2.4. Tipo de junta.....	51
3.2.5. Limpieza superficial	53
3.2.6. Resultados de los procedimientos durante la soldadura	53
3.2.7. Cupones soldados	54
3.2.8. Resultados de los ensayos no destructivos	59
3.2.9. Caracterización mecánica	65
3.2.10. Caracterización microestructural.....	75
CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	80

Índice de Tablas

Tabla 1.- Propiedades y características que proporciona los elementos aleantes	4
Tabla 2.- Designación de las aleaciones de aluminio para forja.....	5
Tabla 3.- Ejemplo de codificación de las aleaciones de aluminio	6
Tabla 4.- Estados fundamentales de las aleaciones del aluminio ANSI H35.1	7
Tabla 5.- Subdivisiones del estado de endurecimiento (H)	7
Tabla 6.- Codificaciones posibles para el estado H	8
Tabla 7.- Tratamientos térmicos para el aluminio y sus aleaciones según ANSI H35.1	11
Tabla 8.- Composición química nominal de la aleación de aluminio AA5052-H34.....	16
Tabla 9.- Propiedades mecánicas nominales de la aleación de aluminio AA5052-H34	16
Tabla 10.- Aportes recomendados	18
Tabla 11.- Comparativa de las propiedades mecánicas nominales de los materiales de aporte	18
Tabla 12.- Composición química nominal del material de aporte ER5356.....	21
Tabla 13.- Variación de los parámetros para una soldadura GTAW	24
Tabla 14.- Parámetros de soldadura de los cupones con material de aporte.....	30
Tabla 15.- Parámetros de soldadura de los cupones sin material de aporte.....	31
Tabla 16.- Parámetros del ensayo de radiografía industrial.....	35
Tabla 17.- Proporciones para el revelado	35
Tabla 18.- Probetas para ensayo de tracción sin material de aporte	38
Tabla 19.- Probetas para ensayo de tracción con material de aporte	39
Tabla 20.- Dimensiones del diámetro del punzón y la distancia entre apoyos	44
Tabla 21.- Composición química de la plancha de Aleación de aluminio AA5052 – H34.....	47
Tabla 22.- Alargamiento, resistencia máxima y a la fluencia del material base.....	48
Tabla 23.- Valores de dureza del material base AA5052 H-34	48
Tabla 24.- Calor de aporte para los cupones con material de aporte	56
Tabla 25.- Calor de aporte para los cupones sin material de aporte	58
Tabla 26.- Registros en la radiografía Industrial	65
Tabla 27.- Resultados del ensayo de tracción sin material de aporte	66
Tabla 28.- Resultados del ensayo de tracción con material de aporte	68
Tabla 29.- Resultados de ensayo de dureza para probetas sin material de aporte	69
Tabla 30.- Resultados del ensayo de dureza para probetas con material de aporte	72

Índice de Figuras

Figura 1.- Soldadura circunferencial de dos recipientes para airbag	1
Figura 2.- Ejemplo de denominación de las series AA para el aluminio y sus aleaciones	7
Figura 3.- Curva de sensibilidad de la fisuración en caliente	12
Figura 4.- Soldadura SMAW	13
Figura 5.- Soldadura GMAW	14
Figura 6.- Soldadura GTAW.....	15
Figura 7.- Máquina de soldeo Miller para soldadura TIG	21
Figura 8.- Carro de soldadura marca GULLCO	22
Figura 9.- Planchas de Aluminio AA5052 – H34 para la fabricación de cupones	25
Figura 10.- Junta a tope.....	25
Figura 11.- Planchas antes de la soldadura	26
Figura 12.- Limpieza de los bordes antes del soldeo	26
Figura 13.- Apuntalado de los extremos de los cupones	27
Figura 14.- Penetración incompleta de una junta soldada sin material de aporte.....	28
Figura 15.- Porosidades en el cordón de soldadura con material de aporte.....	29
Figura 16.- Cupón óptimo con aporte de calor	29
Figura 17.- Soldadura con material de aporte.....	30
Figura 18.- Soldadura con el uso del Welding car.....	32
Figura 19.- Cupón soldado sin material de aporte	32
Figura 20.- Kit de inspección de tintes penetrantes marca <i>Spotcheck Magnaflux</i>	33
Figura 21.- Equipo e implementos para la ejecución de la radiografía	35
Figura 22.- Equipo de tracción <i>Zwick/Roell Special Metal Testing Machine SP</i>	36
Figura 23.- Dimensiones de la probeta de tracción según AWS D1.2. [23].....	37
Figura 24.- Dimensiones de la probeta fabricada	37
Figura 25.- Probetas para el ensayo a tracción	38
Figura 26.- Máquina de Dureza Instron	40
Figura 27.- Probeta briqueteada para ensayo	40
Figura 28.- Equipo para el lijado de las briquetas de dureza	41
Figura 29.- Zona de indentaciones.....	42
Figura 30.- Esquema de puntos de barrido de dureza	42

Figura 31.- Máquina Universal de Tracción MFL.....	43
Figura 32.- Probeta para ensayo de doblado (Medido en mm).....	44
Figura 33.- Diámetro del punzón y distancia entre los apoyos según AWS D1.2 [23].....	44
Figura 34.- Microscopio óptico Leica DMI5000M	46
Figura 35.- Microestructura del Material base.....	49
Figura 36.- Fisuración en caliente en una soldadura sin aporte.....	50
Figura 37.- Cupón apuntalado con ligera separación.....	52
Figura 38.- Cupón soldado con presencia de porosidades	52
Figura 39.- Cupón apuntalado a tope (sin separación)	53
Figura 40.- Fisuración en caliente en la raíz del cordón con aporte	55
Figura 41.- Niveles de calor de aporte en un cordón soldado con material de aporte	56
Figura 42.- Unión soldada sin material de aporte	58
Figura 43.- Niveles de Calor de aporte en un cordón soldado sin material de aporte	59
Figura 44.- Porosidades en el cordón con material de aporte	60
Figura 45.- Cupón soldado en óptimas condiciones sin material de aporte.....	61
Figura 46.- Tintes penetrantes coloridos al cupón con material de aporte	62
Figura 47.- Cupón soldado con material de aporte con revelador	62
Figura 48. Tintes penetrantes coloridos al cupón sin material de aporte.....	63
Figura 49.- Cupón soldado sin material de aporte con revelador	63
Figura 50.- Cupón soldado sin material de aporte con revelador	63
Figura 51.- Radiografía cupón con material de aporte	64
Figura 52.- Radiografía cupón sin material de aporte.....	64
Figura 53.- Rotura de la probeta sin material de aporte.....	66
Figura 54.- Porosidad y falta de fusión en la estructura interna de una probeta sin material de aporte	67
Figura 55.- Roturas de las probetas sin material de aporte	67
Figura 56.- Rotura de la probeta con material de aporte.....	68
Figura 57.- Dureza Vickers en la primera probeta (sin aporte)	70
Figura 58.- Dureza Vickers en la segunda probeta (sin aporte).....	71
Figura 59.- Dureza Vickers en la primera probeta (con aporte)	73
Figura 60.- Dureza Vickers en la segunda probeta (con aporte).....	73
Figura 61.- Doblado de cara (izquierda) y raíz (derecha) sin aporte	74

Figura 62.- Doblado de cara (izquierda) y raíz (derecha) con aporte	75
Figura 63.- Microestructura del material base (Izquierda) a 50x y microestructura de la zona de transición ZAC – cordón a 50x (sin aporte)	75
Figura 64.- Microestructura de la Zona ZAC – BF a 100x (Izquierda) y microestructura del cordón BF con presencia de porosidades y cambios en el tamaño de grano a 50x (Derecha).	76
Figura 65.- Microestructura del material base (Izquierda) a 500x y microestructura de la zona de transición ZAC –BF a 100x. (con aporte).....	77
Figura 66.- Microestructura de la BF a 100x (Izquierda) y la microestructura de la zona BF – ZAC a 100x (Derecha)	77



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el aluminio es considerado como el segundo metal más utilizado en la industria, que reúne una serie de propiedades y características que lo hace atractivo dentro del grupo de los metales no féreos. Las aleaciones de este metal son utilizadas con frecuencia en construcciones metálicas por medio de procesos de soldadura GTAW, debido a que estas construcciones requieren de características y propiedades apropiadas que garanticen una adecuada resistencia mecánica y la economía en el diseño.

Se sabe que el proceso de soldadura GTAW es uno de los procesos mayormente utilizados para materiales metálicos con espesores menores a 8 mm, debido a que presentan una tasa de deposición baja comparada con otros procesos como GMAW. Además, con el GTAW, se obtienen uniones soldadas de alta calidad, generalmente exentas de defectos y con buen acabado superficial.

Existen muchos ejemplos en los cuales las uniones soldadas con aleaciones de aluminio, realizados mediante el proceso GTAW, tienen una alta calidad como la unión que se muestra en la Figura 1.

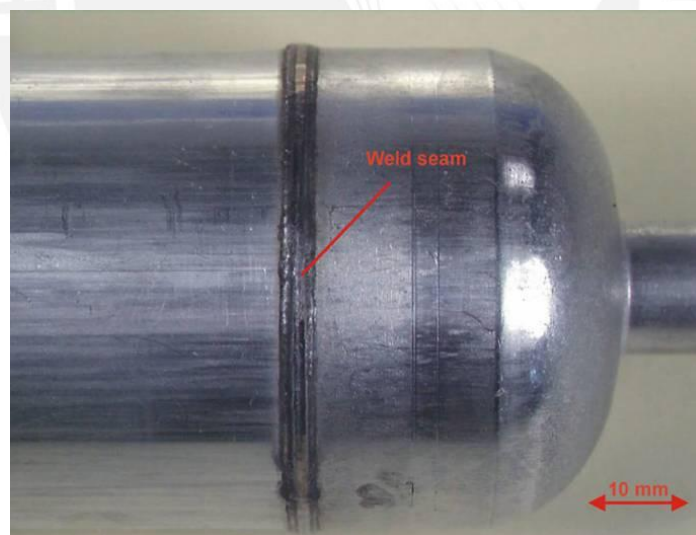


Figura 1.- Soldadura circunferencial de dos recipientes para airbag

En la actualidad el proceso GTAW más utilizado es cuando se emplea material de aporte; sin embargo, se puede soldar materiales delgados sin material de aporte, con este proceso, se puede producir un ahorro de tiempo y económico.

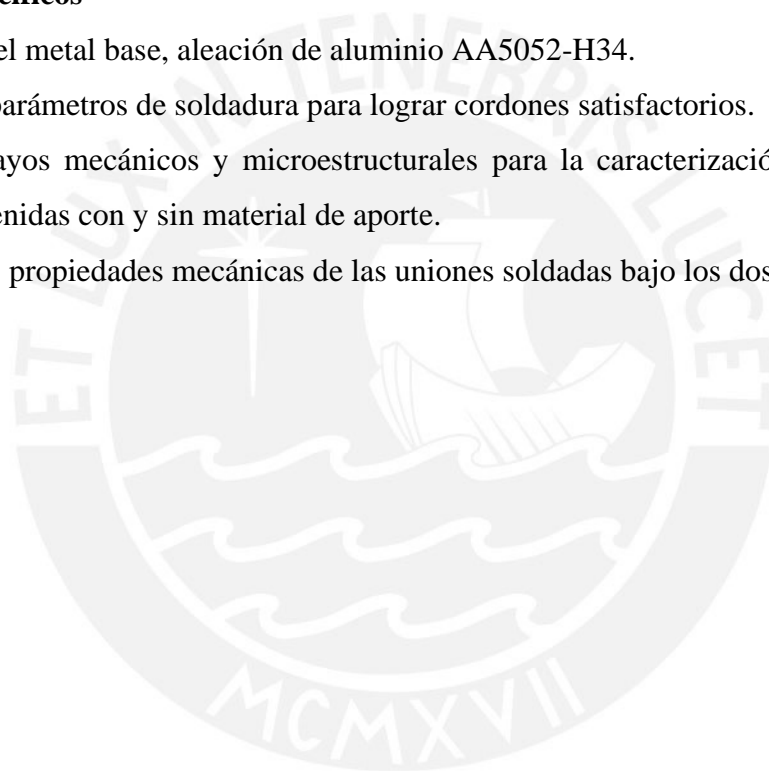
En el presente trabajo se realiza el estudio comparativo entre las uniones soldadas obtenidas mediante el proceso de soldadura GTAW, también conocido como TIG, en planchas de 3 mm de espesor de la aleación de aluminio AA5052 H-34 con y sin material de aporte.

Objetivo General

El objetivo principal de la tesis es determinar y comparar las características y las propiedades de las uniones soldadas obtenidas con y sin material de aporte utilizando el proceso de soldadura GTAW.

Objetivos Específicos

- Caracterizar el metal base, aleación de aluminio AA5052-H34.
- Obtener los parámetros de soldadura para lograr cordones satisfactorios.
- Realizar ensayos mecánicos y microestructurales para la caracterización de las uniones soldadas obtenidas con y sin material de aporte.
- Comparar las propiedades mecánicas de las uniones soldadas bajo los dos métodos.



1. ESTADO DEL ARTE

1.1. El aluminio

El aluminio es uno de los metales más usados después del acero, debido a las características importantes que brinda como la conducción de calor y la electricidad, además se considera como uno de los metales más livianos debido a su baja densidad ($\rho = 2,7 \text{ kg/m}^3$) y su alta resistencia a la corrosión, pues posee una capa superficial de óxido (alúmina - Al_2O_3) la que tiene como función proteger la superficie ante los efectos de corrosión. [1]

El aluminio no se encuentra puro en la naturaleza, sino que se obtiene por medio de la separación de alúmina (Al_2O_3) de las bauxitas y posteriormente su refinación por electrólisis.

El aluminio puro (99,0%) es un metal blanco plateado que al cristalizarse adopta el arreglo FCC (cúbica centrada en las caras). La conductividad eléctrica es un 63,8 % la del cobre (en aluminios conductores eléctricos) y es 3,5 veces mayor que la del acero. Su punto de fusión es 660°C y el de ebullición $2\ 450^\circ\text{C}$. El punto de fusión bajo en conjunto con el punto de ebullición alto facilita la fusión y moldeo. Este metal en estado puro puede alcanzar valores de resistencia a la tracción de 70 – 175 MPa y para aleaciones de aluminio de 140 - 650 MPa. Además, presenta un alargamiento a la rotura que va del 43 al 6 por ciento (%) y una dureza Brinell entre 19 y 35 HB. Se sabe que en estado puro el aluminio es más dúctil y maleable, a medida que es aleado se aumenta la resistencia mecánica y dureza. [1] [2] [3]

Desde el punto técnico – económico, este metal se mecaniza con facilidad y es relativamente más económico a comparación de otros metales como el magnesio ($\rho = 1,74 \text{ kg/m}^3$) y titanio ($\rho = 4,51 \text{ kg/m}^3$).

1.2. Aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio se obtienen a partir de la combinación del aluminio puro con otros elementos aleantes con el fin de mejorar las propiedades mecánicas, ya que el aluminio puro es un material de baja resistencia, blando y maleable. Se incrementa la resistencia mecánica y la dureza con la adición de aleantes y la deformación en frío y, dependiendo del tipo de elementos aleantes, se puede incrementar aún más mediante la aplicación de un tratamiento térmico.

Los principales elementos aleantes son metales como el manganeso, cobre, silicio, magnesio y el zinc. En la Tabla 1 se muestra las características y propiedades que los elementos aleantes principales le proporcionan al aluminio.

Tabla 1.- Propiedades y características que proporciona los elementos aleantes

Elementos aleantes	Propiedades que obtiene la aleación
Manganeso (Mn)	Mejora la resistencia a la corrosión atmosférica. Reduce la calidad a la embutición. Incrementa resistencia, dureza y ductilidad.
Cobre (Cu)	Produce una aleación tratable térmicamente. Resistencia y dureza aumentada. Disminuye la resistencia a la corrosión y la ductilidad.
Silicio (Si)	Mejora la fluidez, disminuye el coeficiente de dilatación en estado sólido, disminuye la ductilidad y la tenacidad.
Magnesio (Mg)	Aumenta la resistencia mecánica y la dureza. Presenta buena soldabilidad y resistencia a la corrosión en ambientes agresivos. Alta resistencia tras el conformado en frío.
Zinc (Zn)	Presenta resistencia y dureza aumentadas. Existe posibilidad de corrosión bajo tensión.

Nota. Tomado de “Estudio de la soldabilidad de la unión disimilar de un acero estructural ASTM A36 con una aleación de aluminio AA5052-H34”, por Guillermo Moreno (Perú), 2015 [4]

Según el proceso de transformación, las aleaciones de aluminio se agrupan en aleaciones de forja (*Wrought Alloy*) y aleaciones por fundición (*Casting Alloy*), siendo el primero el de mayor difusión en la industria.

A continuación, se muestra el detalle para cada una de las aleaciones:[1]

- Aleaciones de Forja: son aquellas coladas en forma de placas y tochos que se transforman en semi productos por laminación o extrusión.
- Aleaciones por fundición: se usan en fundición para la fabricación de piezas obtenidas a partir de la colada del metal líquido en moldes de arena o en moldes de metal.

En el presente trabajo se abordará las aleaciones de forja debido a que estos materiales son los más utilizados en las construcciones de estructuras por medio de trabajos de soldadura. La Tabla 2 muestra la codificación respectiva para las aleaciones de aluminio de forja y su comportamiento al tratamiento térmico.

Las designaciones para los dos grupos se rigen por distintas normas, para las aleaciones por forja se rige por la norma ANSI H35.1 y para las aleaciones por fundición la norma ASTM B275.

Las aleaciones de forja se clasifican según su comportamiento al tratamiento térmico en lo siguiente [1]:

- Aleaciones no tratables térmicamente: Este tipo de aleaciones de aluminio está formado por las series AA 1XXX, AA 3XXX, AA 4XXX y AA 5XXX y algunas aleaciones de la serie AA 8XXX.
- Aleaciones tratables térmicamente: Este tipo de aleaciones de aluminio está formado por las restantes series las cuales son AA 2XXX, AA 6XXX, AA 7XXX y algunas aleaciones de la serie AA 8XXX.

Tabla 2.- Designación de las aleaciones de aluminio para forja

Designación	Serie AA	Tratable térmicamente
Aluminio puro 99,0% pureza	1XXX	No
Aluminio aleado principalmente con Cobre	2XXX	Sí
Aluminio aleado principalmente con Manganeso	3XXX	No
Aluminio aleado principalmente con Silicio	4XXX	No
Aluminio aleado principalmente con Magnesio	5XXX	No
Aluminio aleado principalmente con magnesio y silicio	6XXX	Sí
Aluminio aleado principalmente con Zinc	7XXX	Sí
Aluminio aleado con otros elementos	8XXX	Sí/No

Nota. Tomado de “Estudio de la soldabilidad de la unión disimilar de un acero estructural ASTM A36 con una aleación de aluminio AA5052-H34”, por Guillermo Moreno (Perú), 2015 [4]

Según la *Aluminum Association* (AA) de acuerdo a la norma ANSI H35.1 para aleaciones de forja el código consta de cuatro dígitos. El primer dígito indica el grupo de la aleación, el segundo dígito indica una variación de las impurezas en el caso de la serie AA 1XXX, para las aleaciones de las series del 2 al 8 indica las modificaciones sucesivas de la aleación. En el tercer y cuarto código para la serie 1 indica el porcentaje de aluminio por encima del 99%. Para las demás series, indican la identificación de las diferentes aleaciones. Posterior a los 4 dígitos iniciales, se utilizan letras y números adicionales para una especificación más completa, que indica el estado en que se encuentra la aleación. Asimismo, en la Tabla 3 se muestra la designación de las aleaciones de aluminio. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de la designación completa de una aleación de aluminio de la serie 5 endurecida por deformación en frío y luego estabilizada.

Las aleaciones de aluminio pueden encontrarse tanto en sus estados fundamentales, así como pueden ser modificadas a partir de tratamientos térmicos. En la Tabla 4 se muestran los estados fundamentales del aluminio y sus aleaciones, de acuerdo a los requerimientos de la Norma

ANSI H35.1 y la subdivisión del estado H (estado de dureza con el que se trabajará en la presente investigación), como anteriormente se mencionó, de esta forma se desarrolla la codificación de la aleación de aluminio. [5]

La codificación de la subdivisión H es designada por medio de dos cifras, la primera identifica el tipo de trabajo realizado, que son explicadas a detalle en la Tabla 5. Por otro lado, la segunda cifra está relacionada a los niveles de dureza alcanzados, los cuales pueden ser 2, 4, 6, 8 o 9. Los estados de dureza en las aleaciones de aluminio se muestran en la Tabla 6.

Tabla 3.- Ejemplo de codificación de las aleaciones de aluminio

ALEACIONES DE ALUMINIO		TRATAMIENTO EN FRÍO
1. Primer dígito: Indica al grupo que pertenece el aluminio o aleación.		1. Primer dígito: Tipo de Trabajo.
En la serie 1XXX: Se refiere a aluminio puro	De la serie 2 al 8XXX: Indica el elemento principal.	H1XXX: En frío. H2XXX: En frío y parcialmente recocido. H3XXX: En frío y estabilizado
2. Segundo dígito: Indica las variables de las impurezas.		2. Segundo dígito: Grado de dureza
En la serie 1XXX: 0: No hay control Los demás valores: Control especial	De la serie 2 al 8XXX: 0: Aleación original Los demás valores: Modificaciones de la aleación	HX1X: Un octavo de dureza HX2X: Un cuarto de dureza HX3X: Tres octavos de dureza HX4X: Media dureza
3. El tercer y cuarto dígito:		3. Tercer dígito: Variaciones del temple
En la serie 1XXX: Indica el porcentaje de aluminio por encima del 99,00%.	De la serie 2 al 8XXX: Identifica la aleación.	HXX1: Endurecido por debajo del temple HXX2: Endurecido naturalmente HXX3: Resistencia aceptable a corrosión HXX4: Producto grabado en la superficie con patrón
Ejemplo: AA5052 – Aluminio Aleado principalmente con magnesio (Mg) Véase Tabla 2 Es una aleación original, identificado como AA5052.		Ejemplo: H34 – Trabajado en frío y estabilizado con media dureza sin temple.

Nota. Tomado de “Aluminio y sus aleaciones de aluminio”, por Asociación española de soldadura y tecnologías de unión CESOL(España), 2007 [5]

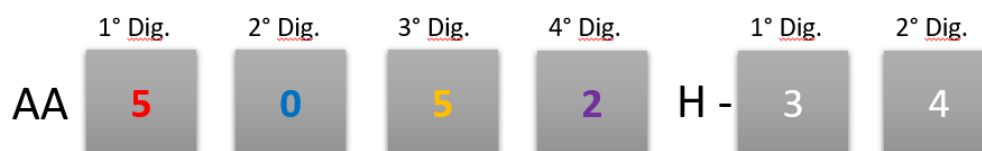


Figura 2.- Ejemplo de denominación de las series AA para el aluminio y sus aleaciones

Tabla 4.- Estados fundamentales de las aleaciones del aluminio ANSI H35.1

Símbolo	Estados fundamentales de las aleaciones de Aluminio
F	En bruto. Es aplicado a productos conformados por procesos de trabajos en frío, en caliente o fundición. Para productos forjados no existe control en sus propiedades mecánicas.
O	Estado de Recocido. Es aplicado a productos que se les aplica el recocido para obtener el estado más blando, y para productos fundidos para mejorar la ductilidad y la estabilidad.
W	Solución tratada térmicamente. Es aplicado a productos que posterior a un tratamiento térmico presentan una estructura inestable. Se aplica a las aleaciones que han sufrido una inmersión en solución, seguida de temple.
H	Estado de acritud, es decir deformados. Es aplicado a productos que han sido fortalecidos por endurecimiento por deformación el cual puede ser en frío, con o sin ablandamiento posterior.
T	Estado endurecido por tratamiento térmico. Es aplicado a aleaciones con estructura estable posterior al tratamiento térmico con solución.

Nota. Basado en “*Aluminum and Aluminum Alloys*”, ASM International, 1993, p. 579 – 622 [1]

En la Tabla 5 se muestra las subdivisiones del estado de endurecimiento H, las cuales se encuentran en función de las operaciones básicas y del grado de acritud final.

Tabla 5.- Subdivisiones del estado de endurecimiento (H)

Símbolo	Estado de Endurecimiento (H)
H1	Estado endurecido por deformación: Se aplica a los productos endurecidos por deformación hasta que se obtenga un nivel previsto de características mecánicas, sin ablandamiento posterior por mantenimiento a una temperatura apropiada.
H2	Estado endurecido por deformación y parcialmente ablandado: Se aplica a los productos endurecidos por deformación hasta un nivel superior al previsto, y después ablandados parcialmente a la resistencia esperada por mantenimiento a una temperatura apropiada.
H3	Estado endurecido por deformación y estabilizado: Se aplica a las aleaciones que se van ablandando espontáneamente a temperatura ambiente después de haber sido endurecidos por deformación (caso de aleaciones Al - Mg) y que deben estabilizarse por mantenimiento a una temperatura adecuada.

Nota. Tomado de “*Enciclopedia del aluminio*”, por C. Vargel (Bilbao), 1979. [6]

Tabla 6.- Codificaciones posibles para el estado H

Niveles de dureza para el estado H	
Nivel cuarto - duro	H12 - H22 - H32
Nivel semi - duro	H14 - H24 - H34
Nivel tres cuartos - duro	H16 - H26 - H36
Nivel duro	H18 - H28 - H38
Nivel extraduro	H19 - H29 - H39

Nota. Tomado de “Enciclopedia del aluminio”, por C. Vargel (Bilbao), 1979. [6].

1.2.1. Aleaciones no tratables térmicamente

Son aleaciones que no pueden incrementar su resistencia mecánica y dureza por tratamiento térmico. Mediante la deformación en frío se aumenta la resistencia mecánica y dureza de este grupo de aleaciones; sin embargo, producirá una pérdida en su ductilidad.

A continuación, se describirán las cualidades y aplicaciones de las aleaciones no tratables térmicamente.

1.2.1.1. Serie AA 1XXX

Esta serie considera a los productos de composición pura al 99,0% de aluminio en peso, teniendo como impurezas, al hierro y al silicio. En algunos casos es poco frecuente encontrarlo aleado con cobre o zinc en cantidades inferiores al 0,1%. Esta serie cuenta con una resistencia a la tracción entre 70 - 175 MPa. Se utilizan principalmente en trabajos de laminado en frío y en industrias eléctricas y químicas, debido a que tienen buena conductividad eléctrica, térmica y adecuada soldabilidad.[1]

1.2.1.2. Serie AA 3XXX

El elemento principal de este grupo de aleaciones es el manganeso (Mn) que está presente hasta en un 1,2%. Estas aleaciones cuentan con moderada resistencia a la corrosión atmosférica. Su resistencia a la tracción es media entre 140 - 280 MPa. Es utilizado en aplicaciones arquitectónicas y comercializado principalmente en planchas aplicado en paneles en los edificios, techos y paredes. Asimismo, se utiliza en la fabricación de utensilios de cocina. [2]

1.2.1.3. Serie AA 4XXX

El elemento aleante principal de este grupo de aleaciones es el silicio (Si), el cual puede añadirse hasta en un 12%. Su resistencia a la tracción es media entre 105 - 350 MPa. Es utilizado en alambres de soldadura, porque su intervalo de fusión resulta ser más bajo que la

del material base, también es empleado en aplicaciones arquitectónicas debido a su color gris oscuro por la presencia del silicio.

1.2.1.4. Serie AA 5XXX

En este grupo de aleaciones el principal elemento de aleación es el magnesio, el cual varía del (1 - 2,5% Mg) o del (3 - 6% Mg) dependiendo si se realiza deformación en frío u otros tratamientos (no térmicos). Posee una resistencia a la tracción media de 140 - 380 MPa y una dureza media; además, conserva la ductilidad en el estado de deformación en frío. Esta serie es la que más endurece por solución sólida entre las aleaciones no tratables térmicamente y además posee buena soldabilidad. Con frecuencia es utilizada en la fabricación de cascos de barcos y otros productos expuestos al ambiente marino. [1]

1.2.2. Aleaciones tratables térmicamente

Si bien con el trabajo en frío se puede obtener buenas propiedades mecánicas, los tratamientos térmicos brindan otra alternativa para lograr la mejora de éstas. Los tratamientos utilizados frecuentemente son los de solución, temple y envejecimiento ya sea natural o artificial. El tratamiento térmico más utilizado es el envejecimiento artificial, en el cual se produce una dispersión más fina de los precipitados con respecto al envejecimiento natural, obteniéndose mayor resistencia mecánica. En las siguientes líneas se explicarán las cualidades de las series que pueden ser sometidas a los tratamientos.

1.2.2.1. Serie AA 2XXX

Su principal elemento de aleación es el cobre (Cu) que está comprendido entre el 2% y 10% en peso. Esta serie puede alcanzar niveles altos de resistencia a la tracción y dureza cuando se le aplica el tratamiento térmico adecuado. Sin embargo, no presentan una adecuada resistencia a la corrosión. Los valores de resistencia a la tracción están comprendidos entre 170 - 310 MPa. Estas aleaciones se revisten de aluminio puro o con una aleación especial a base de aluminio para darles protección ante la corrosión. Son utilizadas frecuentemente en las fabricaciones de estructura de aviones y en la industria automovilística, especialmente en camiones. [2]

1.2.2.2. Serie AA 6XXX

Los elementos principales de aleación son el magnesio y el silicio, los cuales se encuentran en composiciones que van desde 0,2 % hasta 1,6% de silicio y 0,3% hasta 1,5% de magnesio. Cuentan con alta resistencia a la corrosión en ambientes marinos y resistencia a la tracción

media. Se utilizan para fabricar perfiles y estructuras en general. De acuerdo con sus características es empleado en estructuras metálicas, en la industria del automóvil y en la fabricación de embarcaciones marinas. [1] [2]

1.2.2.3. Serie AA 7XXX

Los elementos principales de aleación son el zinc, magnesio y cobre. En conjunto proporcionan una aleación de muy alta resistencia a la tracción tratable térmicamente. Son utilizados principalmente para fabricar estructuras de aviones y en la industria aeroespacial. Esta serie se emplea en los bastidores de las aeronaves. [1]

1.3. Principales tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos mejoran las propiedades mecánicas, de las aleaciones de aluminio tratables térmicamente, por efecto de la variación de la temperatura, asimismo estos tratamientos van muy relacionados al tipo de aleación, composición y los niveles de deformación que puedan poseer. Dentro de los tratamientos más conocidos se tiene el solubilizado, temple y revenido.

Para los metales como el aluminio y sus aleaciones, la deformación es uno de los indicadores que está relacionado con los tratamientos térmicos.

1.3.1. Tratamientos térmicos en el aluminio

Los tratamientos térmicos se estructuran de acuerdo con el grupo de aleación ya sea por forja o fundición. Para la presente investigación se desarrollará el estudio para forja. Los tratamientos son designados con la letra T seguidos de uno o dos dígitos. El primer dígito muestra las características del tratamiento y cuando tiene un segundo dígito indica algunas variaciones de las características del producto con respecto al tratamiento original. En la Tabla 7 se desarrolla las características de cada uno de los tratamientos.

Los tratamientos térmicos más utilizados son T4 y T6 en aleaciones de la serie AA2XXX, AA6XXX Y AA7XXX, ya que estas pueden ser modificados para aumentar su resistencia mecánica y dureza por medio del envejecimiento ya sea natural (T4) o artificial (T6).

Tabla 7.- Tratamientos térmicos para el aluminio y sus aleaciones según ANSI H35.1

N°	Tratamientos térmicos
T1	Tratamiento de temple desde la temperatura de extrusión y maduración.
T2	Tratamiento de temple desde la temperatura de extrusión y maduración natural
T3	Tratamiento térmico de solución, temple, acritud y maduración natural.
T4	Tratamiento de solución, temple y maduración natural
T5	Tratamiento desde una temperatura extrusión y maduración artificial.
T6	Tratamiento de solución, temple y maduración artificial.
T7	Tratamiento térmico de solución, temple y sobre - maduración estabilizado.
T8	Tratamiento de solución, temple, acritud y maduración artificial.
T9	Tratamiento de solución, temple, maduración artificial y acritud.
T10	Tratamiento de temple desde la temperatura de extrusión, acritud y maduración artificial.

Nota. Tomado de “Tratamientos térmicos para Aluminios”, por Revista Metal Actual, 2014. [7]

1.4. Soldabilidad del aluminio

1.4.1. Generalidades

Uno de los principales problemas que se presenta en la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones es la formación de la capa de óxido de aluminio (alúmina Al_2O_3). Esta capa de alúmina debe ser eliminada antes de soldar para evitar que las partículas de óxido queden atrapadas sin fundir y originen una pérdida de ductilidad. Los medios que pueden remover esta capa de alúmina pueden ser de tres maneras: medios mecánicos, químicos y eléctricos. El medio mecánico es considerado como una de las formas comúnmente utilizadas debido a su fácil procedimiento para realizar la limpieza de la superficie a soldar. No obstante, con los otros medios también se obtienen los resultados del decapado del óxido de la superficie. [7] [8]

Por otro lado, se debe tomar en consideración los efectos de la velocidad de enfriamiento y el tiempo de soldeo. Pues a velocidades muy lentas y tiempos de soldeo muy prolongados pueden presentarse malos resultados en las soldaduras por la presencia de rechupes y fisuración en cráteres.

Finalmente, la fisuración en caliente es un problema que se presenta en la mayoría de las aleaciones de aluminio tratables térmicamente y en algunas no tratables, al momento de ser soldadas. La fisuración en caliente genera fisuras en el centro del cordón y se extiende a lo largo de la línea. [9]

En la Figura 3 se muestran las curvas de sensibilidad a la fisuración en caliente que varían con respecto al porcentaje en peso del aleante. Es así que al agregar elementos aleantes la sensibilidad se vuelve más severa, para luego decrecer. Las aleaciones que presentan valores en composición química, cercanos a los niveles máximos de sensibilidad (picos) a la fisuración, se consideran difíciles de soldar o “insoldables” debido al riesgo de fisuración en caliente.

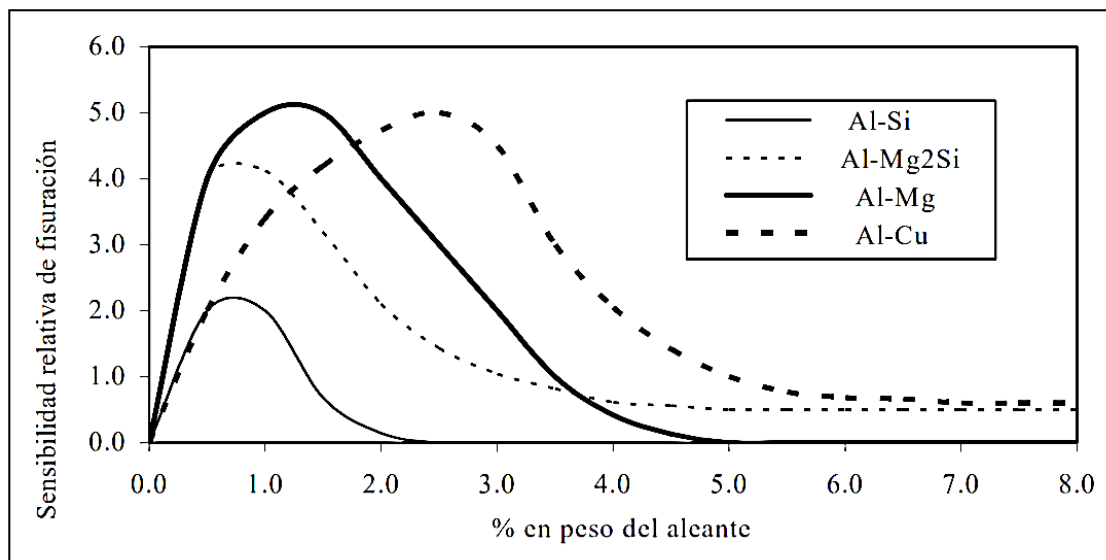


Figura 3.- Curva de sensibilidad de la fisuración en caliente

Tomado de “Comparación de las características de los materiales de aporte ER4043 y ER5356 en el soldeo del Aluminio empleando el proceso MIG”, por P.P. Lean Sifuentes (Perú), 2007. [9]

En general, para reducir el riesgo a la fisuración en caliente se puede utilizar un material de aporte de diferente composición química al material base, con resistencia a la fisuración en caliente y con buenas propiedades mecánicas.

1.5. Procesos más empleados

El Aluminio puede ser soldado por varios procesos, dentro de los cuales se tiene:

- SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*)
- GMAW (*Gas Metal Arc Welding*)
- GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*)

1.5.1. Soldadura SMAW

La soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico revestido es un proceso de unión por fusión de los bordes de las piezas metálicas mediante el calor intenso por un arco eléctrico, que al solidificarse forma una unión permanente.

Los equipos y materiales necesarios para realizar la soldadura comprenden un generador de corriente (fuente de poder), cables de soldadura, porta electrodo, conexión de masa o tierra, electrodo y pieza de trabajo.

Las ventajas de este proceso de soldadura es que el equipo se puede utilizar de forma práctica y sencilla y con acabados intermedios de acuerdo con la aplicación de la soldadura.

Además, es portátil y es económico frente a otros tipos de soldadura y no requiere de gases auxiliares, pues ya cuenta con su gas protector por medio de la fusión del revestimiento. En la Figura 4 se muestra los componentes y el proceso de soldadura SMAW. Este proceso solo se emplea en soldaduras de poca responsabilidad en reparaciones pues no presenta alta calidad en uniones de aleaciones de aluminio.

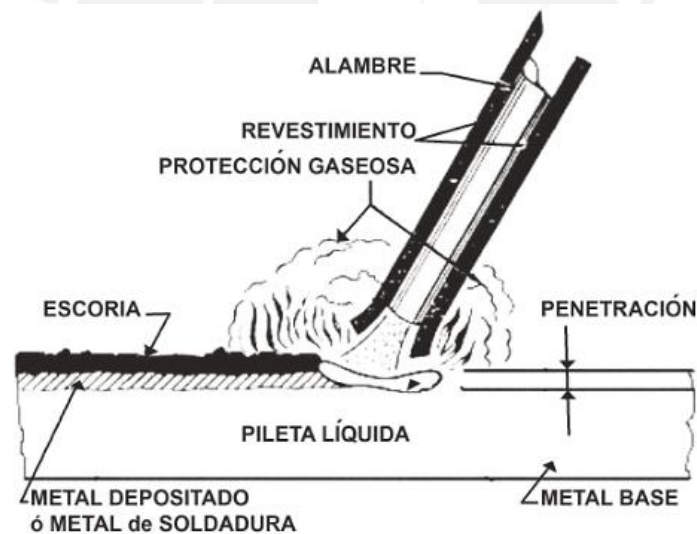


Figura 4.- Soldadura SMAW

Tomado de “Procesos de soldadura”, Mathias Rodriguez Guiso, ESAB Argentina (2021). [10]

1.5.2. Soldadura GMAW

La soldadura metálica por arco eléctrico con protección gaseosa (*Gas Metal Arc Welding – GMAW*) es un proceso basado en la alimentación automática de un electrodo continuo consumible que se protege por medio de un gas externo. La combinación entre los gases de protección y el alambre desnudo eliminan la necesidad del recubrimiento de escoria en la gota de soldadura. Cuando se emplea como gases de protección inertes como argón, helio o sus

mezclas, es conocido como soldadura MIG y es utilizado mayormente para soldaduras de metales ferrosos y no ferrosos.

Los equipos necesarios para realizar este tipo de soldadura comprenden cables, pistola para soldar, unidad de alimentación de electrodo, fuente de potencia y fuente de gas protector.

Este tipo de proceso tiene algunas ventajas como elevada penetración en las juntas soldadas y elevada tasa de deposición del material a comparación de otros procesos, además se pueden soldar en cualquier posición y diferentes aleaciones metálicas. En la Figura 5, se muestra un esquema del proceso de soldadura GMAW.

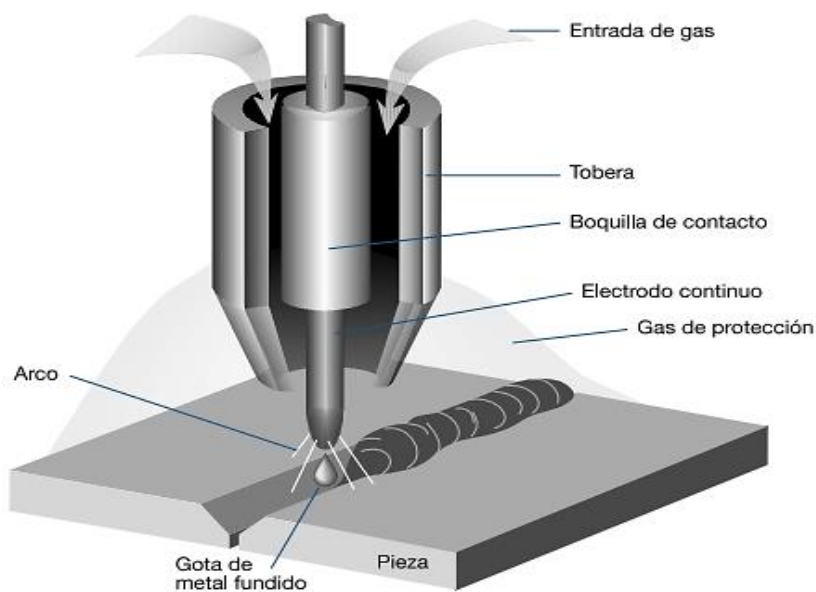


Figura 5.- Soldadura GMAW

Tomado de “Manual de sistemas y materiales de soldadura”, por INDURA (Perú). [11]

1.5.3. Soldadura GTAW

La soldadura *Gas Tungsten Arc Welding* (en adelante, GTAW) es un proceso de soldadura por fusión que utiliza un electrodo no consumible de tungsteno y un gas inerte para proteger el arco eléctrico. Este procedimiento puede ser utilizado en uniones que requieran alta calidad de soldadura y en soldaduras con metales altamente sensibles como el titanio y el aluminio. Se puede utilizar con corriente continua con polaridad directa o invertida y también con corriente alterna. Actualmente, la industria aeroespacial y nuclear son las que más la utilizan por su calidad de las uniones producidas. [12]

Los equipos o elementos necesarios para realizar este proceso comprenden una antorcha, electrodo de tungsteno, máquina de soldeo y gas protector. En la Figura 6 se muestra un esquema del proceso de soldadura GTAW.

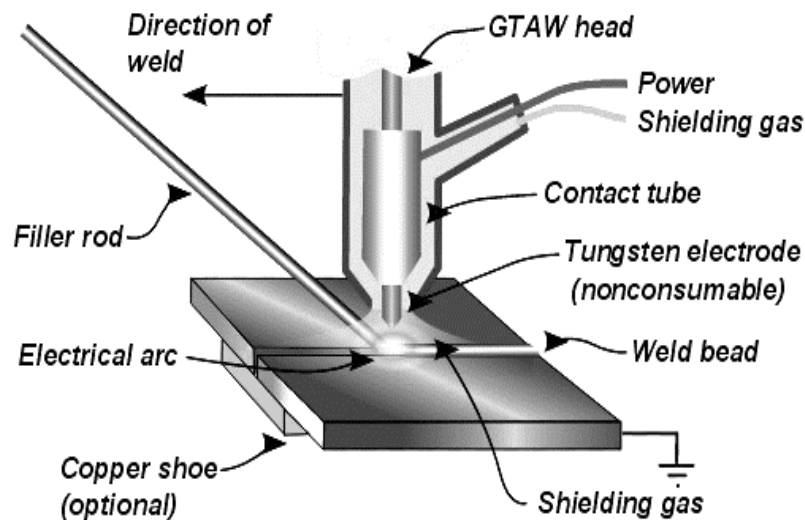


Figura 6.- Soldadura GTAW

Tomado de "Manual del soldador", por MECH TEC (Perú). [13]

Una de las ventajas más importantes que presenta este tipo de proceso de soldeo es la ausencia de salpicaduras y escorias, pues se obtienen cordones de calidad evitando realizar una limpieza o un acabado posterior al soldeo. Además, este proceso es aplicable a espesores finos (desde 0,3 mm). Por último, sin dejar de lado que puede ser utilizada con o sin material de aporte.

1.6. Aleación de aluminio AA5052-H34

1.6.1. Características

La aleación de aluminio AA5052-H34 pertenece a la serie 5 con un porcentaje promedio de 2,5% de magnesio, la cual ha sido endurecida por trabajo en frío y posteriormente sometida a un ablandamiento mediante un proceso térmico para obtener un estado estable. Esta aleación posee buenas características generales, así como buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos y propiedades mecánicas moderadas.

1.6.2. Composición química nominal

La Tabla 8 muestra la composición química nominal de la aleación AA5052-H34 la cual ha sido tomada del código ASTM B209 “*Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate*”

Tabla 8.- Composición química nominal de la aleación de aluminio AA5052-H34

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Otros	Al
% en peso	0,25	0,40	0,10	0,10	2,20 – 2,80	0,15 – 0,35	0,10	0,15	Resto

Nota. Tomado de “*Standard Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Sheet and Plate*”, por American Society for Testing and Materials, 2014. [14]

1.6.3. Propiedades mecánicas nominales

En la Tabla 9 se muestran las propiedades mecánicas nominales de la aleación de aluminio AA5052-H34 de acuerdo al código ASTM B209 “*Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate*”

Tabla 9.- Propiedades mecánicas nominales de la aleación de aluminio AA5052-H34

Espesor	Resistencia a la tracción		Resistencia a la fluencia	Elongación (%)
	min (MPa)	máx (MPa)		
mm			(MPa)	(en 50 mm)
3	235	285	180	6

Nota. Tomado de “*Standard Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Sheet and Plate*”, por American Society for Testing and Materials, 2014. [14]

1.6.4. Aplicaciones y usos

Este tipo de aleación de aluminio es usualmente utilizada en el sector naval, marítimo e industrial, ya que tiene propiedades que soportan la corrosión y se comporta de manera estable en ambientes salinos. Asimismo, la presencia de magnesio en la aleación evita que se presente corrosión bajo tensión (SCC). [1]

Existen algunas aplicaciones típicas donde se utilizan el aluminio AA5052 las cuales pueden ser cascos de barcos, componentes de aviones, aplicaciones arquitectónicas, componentes automotrices, entre otros.

1.6.5. Soldabilidad

La aleación de aluminio AA5052-H34 presenta buena soldabilidad para procesos de soldadura con arco eléctrico. Usualmente es aplicado para procesos de soldadura como GMAW y GTAW.

Mediante el soldeo GTAW, se presenta buenas condiciones durante el soldeo; asimismo, las uniones presentan buen acabado superficial y ausencia de salpicaduras.

Por otro lado, para realizar el soldeo de este material base, se suele utilizar materiales de aporte compatibles, dentro de los más frecuentes se tiene varillas tipo ER5356 y ER4043. La selección del material de aporte está relacionada con el metal base y las condiciones de soldeo. [9]

1.6.6. Material de aporte

La elección del material de aporte, el metal base y el diseño de la junta determinan el desempeño final de la junta soldada. Una parte relevante del presente trabajo consiste en la selección del material de aporte, pues influye en el proceso de soldeo y en los resultados de calidad del cordón de soldadura.

Para seleccionar el material de aporte se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Cordones libres de grietas (Fisuración en caliente)
- Resistencia mecánica
- Ductilidad
- Temperatura de servicio

Los materiales de aporte utilizados, con mayor concurrencia, para la aleación de aluminio AA5052-H34 son el ER4043 (Al-5Si) y el ER5356 (Al-5Mg) como muestra la Tabla 10. Existen diferencias significativas que afectan las características de las uniones soldadas con ambos aportes. Las uniones obtenidas con el aporte ER4043 presentan buen acabado superficial, buena penetración, fácil empleo durante el soldeo; no obstante, puede originar perforaciones en planchas de bajo espesor.

Por otro lado, el aporte ER5356 es más resistente que el ER4043 y se emplea para el soldeo de materiales de bajo espesor; sin embargo, se debe tener cuidado al soldeo pues puede presentar salpicaduras en caso de mala limpieza de la pieza. Para la presente investigación se escogió el material de aporte ER5356 pues es más beneficioso de acuerdo con sus propiedades y al presentar magnesio en su composición existe mayor compatibilidad con el material base. [9]

En la Tabla 10 se muestra los aportes recomendados según el tipo de aleación de aluminio que corresponda. En la Tabla 11 se muestra las propiedades nominales de los dos materiales de

aporte. En la cual se muestra la ventaja en dureza, resistencia máxima y elongación del ER5356 frente a la del ER4043.

Tabla 10.- Aportes recomendados

Material base	Materiales de aporte recomendados	
	Para máxima dureza	Para máxima elongación
AA1100	ER1100, ER4043	ER 1260, ER1100, ER4043
AA2219	ER2319	-
AA3003	ER5183, ER5356	ER1100, ER4043
AA3004	ER5664, ER5356	ER5183, ER4043
AA5005	ER5183, ER4043, ER5356	ER5183, ER4043
AA5050	ER5356	ER5183, ER4043
AA5052	ER5356, ER5183	ER5183, ER4043, ER5356
AA5083	ER5183, ER5356	ER5183, ER5356
AA5086	ER5183, ER5356	ER5183, ER5356
AA5154	ER5356, ER5183	ER5183, ER5356, ER5654
AA5357	ER5554, ER5356	ER5356
AA5454	ER5356, ER5554	ER5554, ER5356
AA5456	ER5556	ER5183, ER5356
AA6061	ER4043, ER5183	ER5356
AA6063	ER4043, ER5183	ER5356
AA7005	ER5039	ER5183, ER5356
AA7039	ER5040	ER5183, ER5356

Nota. Tomado de “The Procedure Handbook of Arc Welding”, por The Lincoln Electric Company. Edición 13, 1994. [15]

Tabla 11.- Comparativa de las propiedades mecánicas nominales de los materiales de aporte

Aporte	Metal depositado		
	σ máx (MPa)	Elongación (%)	Dureza (HV)
ER5356 (AlMg5)	265	4.7	72 – 82
ER4043 (AlSi5)	173	1.3	52 - 60

Nota. Tomado de “Comparación de las características de los materiales de aporte ER4043 y ER5356 en el soldeo del Aluminio empleando el proceso MIG”, por P.P. Lean Sifuentes (Perú), 2007. [9]

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se detalla el procedimiento experimental utilizado, para la fabricación de los cupones de soldaduras obtenidos con y sin material de aporte. Asimismo, se aborda la fabricación de las probetas, que fueron extraídas de los cupones soldados, para su posterior empleo en los ensayos de caracterización mecánica y microestructural.

2.1. Metodología

Para la obtención de los cupones de soldadura, se utilizó el proceso de soldadura GTAW empleando argón puro para la protección de la soldadura. El material base utilizado fue la aleación de aluminio AA5052-H34 en planchas de 3 mm de espesor y, el material de aporte empleado fue el ER5356 (Al-5Mg), como se mencionó en el capítulo anterior. Antes de obtener los cupones soldados, se realizó la caracterización del material base en estado de suministro. Posteriormente, a la obtención de los cupones, se realizaron ensayos no destructivos a los cupones soldados, con el fin de detectar discontinuidades presentes en el cordón de soldadura y descartar los cupones con presencia de defectos. De acuerdo con ello, se fabricaron probetas de ensayo de los cupones obtenidos en óptimas condiciones. Por último, se realizaron ensayos de caracterización mecánica y microestructural a las probetas, con el fin de obtener las propiedades mecánicas de las uniones soldadas y estudiar la microestructura respectivamente. Los resultados de los ensayos realizados se muestran en el siguiente capítulo, en donde se realiza su análisis.

2.2. Caracterización del material base AA5052 – H34

Se realizó la caracterización del material base AA5052-H34, con el fin de obtener su composición química y sus propiedades mecánicas de suministro. Los ensayos del material base fueron realizados con los mismos equipos y procedimientos empleados en la caracterización mecánica y microestructural de las probetas soldadas.

2.2.1. Composición química

Para realizar el análisis de la composición química se prepararon tres probetas cuadradas de 40 milímetros de lado, y en ellas se determinó los elementos químicos que constituyen el material base. El análisis de composición química se realizó mediante el método de espectrometría de emisión, empleando un espectrómetro de emisión por chispa Q8 Marca Bruker Modelo

Magellan. El ensayo fue desarrollado en base a la norma ASTM E 1251-17^a “*Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry*” [16]

2.2.2. Propiedades mecánicas

2.2.2.1. Ensayo de tracción

Se fabricaron tres probetas, las cuales fueron sometidas a un ensayo de tracción, para determinar la resistencia mecánica y la ductilidad del metal base. El ensayo fue realizado con el equipo de tracción marca Zwick Roell del Laboratorio de materiales de la PUCP. El ensayo de tracción se realizó de acuerdo con la norma vigente ASTM E8/ E8M “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”. [17]

2.2.2.2. Ensayo de dureza

Se realizó en ensayo de dureza Vickers empleando un durómetro marca Instron, ubicado en el Laboratorio de Materiales de la PUCP. Este ensayo fue realizado con los mismos equipos que las soldaduras. Asimismo, el procedimiento se realizó en base a la normativa ASTM E 384 “*Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*”. [18]

2.3. Equipamiento de soldadura GTAW

2.3.1. Proceso de soldadura

De acuerdo con la información brindada en el capítulo 1, las ventajas de escoger el proceso de soldadura GTAW frente a SMAW y GMAW, es básicamente debido a que este proceso es el más adecuado para soldar planchas de aluminio de espesor delgado, y las uniones presentan mejores características y calidad; además, que permite soldar sin el empleo de metal de aporte. La soldadura con material de aporte fue realizada de forma manual, donde el soldador con una mano suministraba el material de aporte y con la otra llevaba la pistola de soldadura para establecer el arco eléctrico. La soldadura sin material de aporte fue realizada de manera mecanizada.

Para ambos procedimientos se utilizó el equipo de soldadura de marca Miller, modelo *Dynasty 200 DX*, como muestra la Figura 7. [19]



Figura 7.- Máquina de soldeo Miller para soldadura TIG

Tomado de “Manual del Operador”, por Miller Dynasty 200 SD y DX, 2008 [19]

2.3.1.1. Material de aporte

El material de aporte utilizado fue el ER5356 como se mencionó en el anterior capítulo. Las dimensiones de estas varillas de aporte son aproximadamente de 1 metro de longitud y 3/32” de diámetro en la industria, presentan buenas propiedades de resistencia máxima, dureza y ductilidad. Mayormente conocidas por contener alrededor del 5% de Magnesio (Mg). A continuación, en la Tabla 12 se muestra la composición química nominal del material de aporte escogido (ER5356) y en la Tabla 11 las propiedades del metal una vez depositado.

Tabla 12.- Composición química nominal del material de aporte ER5356

Elementos (%)	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Cr	Ti	Al
ER5356	4,5-5,5	0,25	0,40	0,05-0,20	0,10	0,05-0,20	0,06-0,20	Resto

Nota. Tomado de AWS A5. 10 “Welding Consumables-Wire Electrodes, Wires and Rods for Welding of Aluminum and Aluminum Alloys”, por American Welding Society, 2017. [20]

2.3.2. Consumibles

2.3.2.1. Gas de protección

Para realizar el soldeo de los cupones mediante el proceso de soldeo GTAW se empleó el argón puro como gas protector con un caudal de 11 litros/min tanto para soldadura con y sin material de aporte. Se utilizó este gas de protección debido a su gran disponibilidad, economía y su eficiencia para este proceso con corriente alterna variando la onda cuadrada. [21]

2.3.2.2. Carro de soldadura (Welding Car)

La soldadura de planchas sin material de aporte, bajo el método mecanizado, se realizó con el carro de soldadura (*Welding car*) toda vez que con dicho equipo existe un mayor control de la

velocidad de soldeo y la longitud del arco, a diferencia de la soldadura realizada de forma manual.

El carro de soldadura utilizado fue de la marca Gullco modelo Moggy (Véase Figura 8) el cual opera en rangos de velocidad de soldeo de 15 a 290 cm/min y con inclinaciones máximas de 30°. Para la soldadura sin material de aporte se utilizó una velocidad constante intermedia sin modificar la posición vertical de la antorcha de soldeo.



Figura 8.- Carro de soldadura marca GULLCO

Tomado de “Carrito de soldadura automático”, por GULLCO Internacional, 2019. [22]

2.3.2.3. Parámetros de soldeo

Los parámetros de soldeo que se tomaron en cuenta para realizar los cupones soldados fueron la intensidad de corriente, la velocidad de soldeo, el voltaje de soldeo, el ángulo de inclinación de la pistola de soldeo y el caudal del gas de protección.

2.3.2.3.1. Intensidad de soldeo

En el proceso de soldeo se utilizó corriente alterna con un control de la onda cuadrada, con el fin de obtener mayor calidad de las uniones soldadas.

A continuación, se definirán algunos términos utilizados durante el proceso de soldeo, los cuales están relacionados con la corriente de suministro durante el soldeo.

Balance: El balance utilizado para esta investigación es con una semi onda cuadrada, el cual asegura que el efecto de decapado o limpieza esté más acentuado. De este modo, se puede regular la estabilidad del arco para asegurar la limpieza de óxidos de aluminio. Para este caso se cumpliría un balance cuando se utilice 50% electrodo positivo y 50% electrodo negativo.

Desbalance: El desbalance de la semi onda cuadrada puede ser de dos tipos:

- Para obtener mayor penetración que una onda balanceada se utiliza mayor porcentaje de electrodo negativo > 50% y lo restante de electrodo positivo.
- Para obtener mayor limpieza se utiliza mayor porcentaje de electrodo positivo > 50% y lo restante de electrodo negativo.

Las planchas de aluminio serán soldadas con corriente alterna en un rango de valores entre 100 a 150 A, en función a si el procedimiento se realiza con o sin material de aporte. Estos valores son elegidos en base al diámetro del electrodo usando tungsteno puro. Se sabe que el ajuste de la intensidad de corriente (Amperaje) puede determinar la regulación de la penetración de la soldadura. En caso de usar intensidades muy elevadas, se puede generar una penetración excesiva. En caso contrario, se genera una penetración insuficiente.

2.3.2.3.2. Velocidad de soldeo

La velocidad de soldeo varía de acuerdo al tipo de procedimiento para ambos casos (con y sin material de aporte). Los valores se encuentran en promedio en el rango de 10 – 40 cm/min. Este parámetro es inversamente proporcional a la cantidad de material depositado. Asimismo, al aumentar la velocidad de soldeo disminuye la fusión del material de aporte, es decir, hay mayor riesgo que no se logre la penetración completa del cordón. También está relacionado con el calor de aporte, al aumentar la velocidad de soldeo el calor de aporte disminuye; de esta manera, las tensiones creadas por las diferencias de temperaturas entre el metal a temperatura ambiente y caliente disminuye.

2.3.2.3.3. Ángulo de inclinación de la pistola de soldeo

Es uno de los factores más importantes debido a que afecta directamente la penetración del cordón en forma y volumen. La inclinación de la pistola para este procedimiento puede variar entre 15° – 25 ° con referencia a la vertical. Asimismo, la inclinación es diferente para el soldeo con y sin material de aporte, puesto que es dependiente de la velocidad y la intensidad de corriente.

2.3.2.3.4. Caudal del gas inerte

El gas argón puro protege el metal fundido de los efectos perjudiciales que tiene en contacto con el aire (oxígeno, nitrógeno, etc.). Estos efectos pueden ser de oxidación y porosidad. El rango del caudal para este tipo de soldadura con aluminio se encuentra entre 7 a 14 l/min. Uno

de los efectos mayormente observados cuando se utiliza un caudal fuera del rango es la porosidad en el cordón de soldadura.

En la Tabla 13 se encuentra el rango de los parámetros a emplear para ambos casos de soldadura (con y sin material de aporte).

Tabla 13.- Variación de los parámetros para una soldadura GTAW

Parámetros	Unidades	Rango	
		Sin material de aporte	Con material de aporte
Intensidad de soldeo	A	120 – 150	110 – 140
Velocidad de soldeo	cm/min	30 – 45	15 – 30
Voltaje de soldeo	V	10 – 20	10 – 20
Ángulo de soldeo	°	15 – 25	15 – 25
Caudal del gas	l/min	7 – 14	7 – 14

2.4. Elaboración y obtención de los cupones

Con el fin de obtener los parámetros idóneos de soldadura, se realizaron inicialmente cupones de prueba. Para el caso de soldadura sin material de aporte se tiene cierta complejidad debido a que la velocidad de avance manual no suele ser continua; por ello, para este caso se utilizó un equipo móvil de soldadura, *Welding Car*, que permitió un avance a velocidad constante de la soldadura. Por otro lado, la soldadura con material de aporte fue realizada de forma manual, debido a que es la forma generalmente empleada a nivel industrial.

Una vez obtenidos los parámetros de soldadura óptimos (ver Tabla 14 y Tabla 15), se fabricaron seis cupones de soldadura, tres con material de aporte y tres sin material de aporte.

2.4.1. Elaboración de juntas

Para elaborar los cupones de soldadura, se prepararon planchas con dimensiones de 180 x 100 mm como se muestra en la Figura 9.

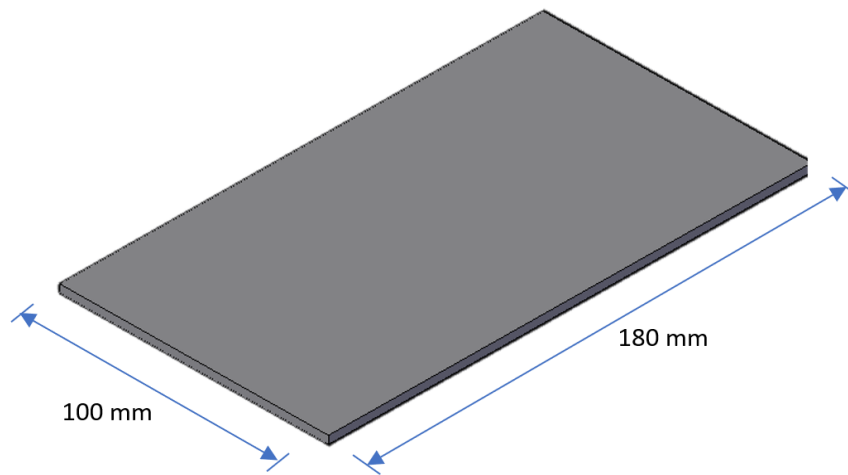


Figura 9.- Planchas de Aluminio AA5052 – H34 para la fabricación de cupones

2.4.1.1. Tipo de junta

El tipo de junta utilizada para la presente investigación fue a tope de bordes rectos. Se seleccionó este tipo de junta debido a que los espesores de las planchas de aluminio son menores a 6 mm. Este tipo de junta fue aplicado para ambos casos. En la Figura 10 se muestra el tipo de junta utilizado.



Figura 10.- Junta a tope

Las uniones soldadas sin material de aporte no presentaron separación entre bordes, mientras que las uniones con material de aporte se realizaron empleando una ligera separación entre planchas.

En la Figura 11 se muestra los elementos para formar un cupón soldado el cual está compuesto por las 2 planchas de aluminio y 2 apéndices de sujeción.

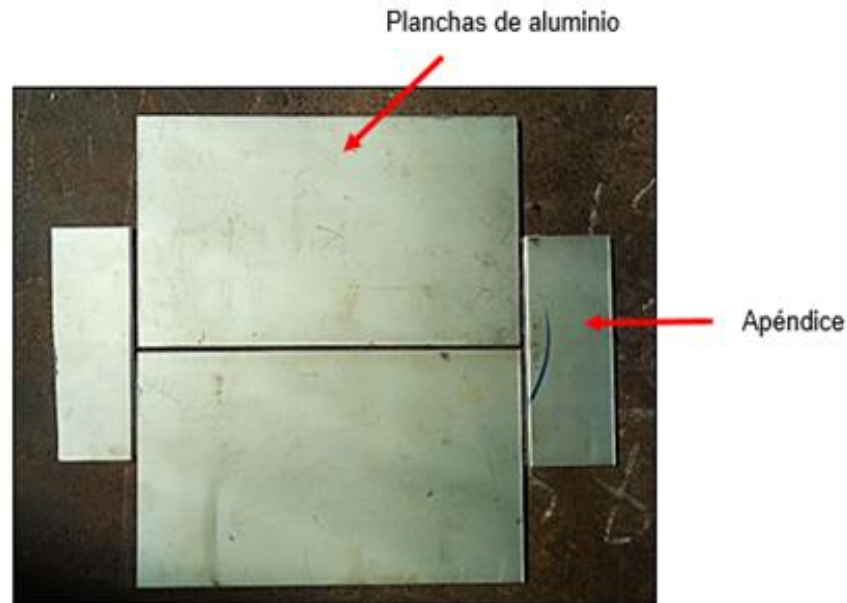


Figura 11.- Planchas antes de la soldadura

2.4.1.2. Limpieza superficial

Para preparar la superficie de las planchas de aluminio AA5052 – H34 previo al proceso de soldeo, se realizó la limpieza utilizando un cepillo de cerdas de acero inoxidable con la finalidad de retirar el óxido de aluminio (alúmina) y las impurezas. El ancho de limpieza mínima fue de 15 mm desde el borde interno de cada plancha como se aprecia en la Figura 12. Finalmente, se terminó la limpieza de la superficie con alcohol.



Figura 12.- Limpieza de los bordes antes del soldeo

2.4.1.3. Posición de soldadura

La posición de soldeo que se utiliza para estos tipos de trabajos es una posición plana con un ángulo de inclinación de la pistola con dirección a la soldadura, puesto que es muy aplicado para procesos de soldadura GTAW. Esta posición de soldeo se adecua fácilmente para planchas de espesores pequeños; asimismo, es considerada de bajo costo y provee buen acabado superficial.

2.4.1.4. Sujeción de las planchas

Para que los efectos térmicos, al momento de soldeo, no puedan causar desalineación y deformación angular, se optó por realizar el apuntalado con apéndices de sujeción, con el fin de fijar las dos planchas y evitar la deformación del material como se puede apreciar en la Figura 13. Asimismo, estos apéndices son de vital importancia para el arranque y fin del arco eléctrico y se pueda evitar perforaciones en la plancha.



Figura 13.- Apuntalado de los extremos de los cupones

2.4.1.5. Obtención de cupones

Inicialmente, se realizaron cordones de prueba empleando parámetros de soldeo dentro del rango de valores mostrados en la Tabla 13. Posterior a ello, se realizaron 3 cupones soldados para ambos casos.

a) Obtención de cupones con metal de aporte

En el caso de soldadura con material de aporte, se inició la soldadura tomando en consideración el calor de aporte cedido por la fusión del material. Debido a que esta soldadura se realiza bajo

el método manual. Asimismo, es muy importante considerar la experiencia del soldador pues se busca realizar cordones uniformes y con penetración completa exenta de discontinuidades superficiales. Otro de los factores importantes tomado en cuenta fue la intensidad de soldeo, la cual puede modificar la penetración y el ancho del cordón de soldadura.

Durante la soldadura de cordones de prueba con material de aporte se unieron las planchas de aluminio, en una sola pasada, empleando una frecuencia de 100 Hz y un voltaje de 15 V de forma constante durante todo el soldeo. Asimismo, la intensidad de soldeo fue de 125 amperios con un desbalance al 55% de polaridad negativa, y una velocidad¹ promedio de 15 cm/min. Posterior al soldeo se observó que el cordón soldado presentó ligeras fisuraciones. En la Figura 14 se muestra el cordón de soldadura con penetración incompleta en la raíz.

Debido a que los resultados obtenidos del primer cupón soldado no fueron los esperados. Se cambiaron los parámetros de soldadura reduciendo la intensidad de corriente a 120 A y manteniendo constante el desbalance al 55% con polaridad negativa. Asimismo, se varió la velocidad promedio de 18 cm/min. Con los valores mencionados se obtuvieron mejores características que las anteriores; sin embargo, la calidad de la superficie de la soldadura no fue la esperada debido a la presencia de porosidades. En la Figura 15 se muestra el cordón de soldadura con material de aporte no uniforme con presencia de porosidades.

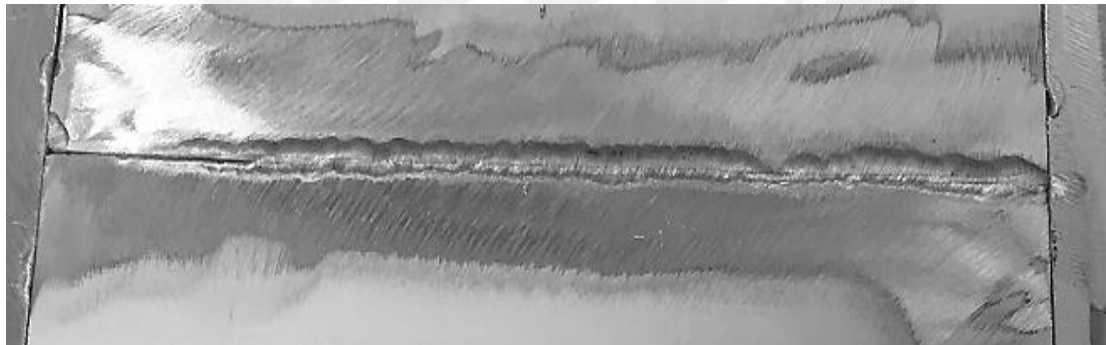


Figura 14.- Penetración incompleta de una junta soldada sin material de aporte

¹ La velocidad de soldeo para la soldadura del tipo manual se calculó en base a la distancia del cordón de soldadura en el tiempo transcurrido del soldeo de la unión. Todos los valores son aproximados pues se realizaron múltiples ensayos para obtener los mejores resultados.

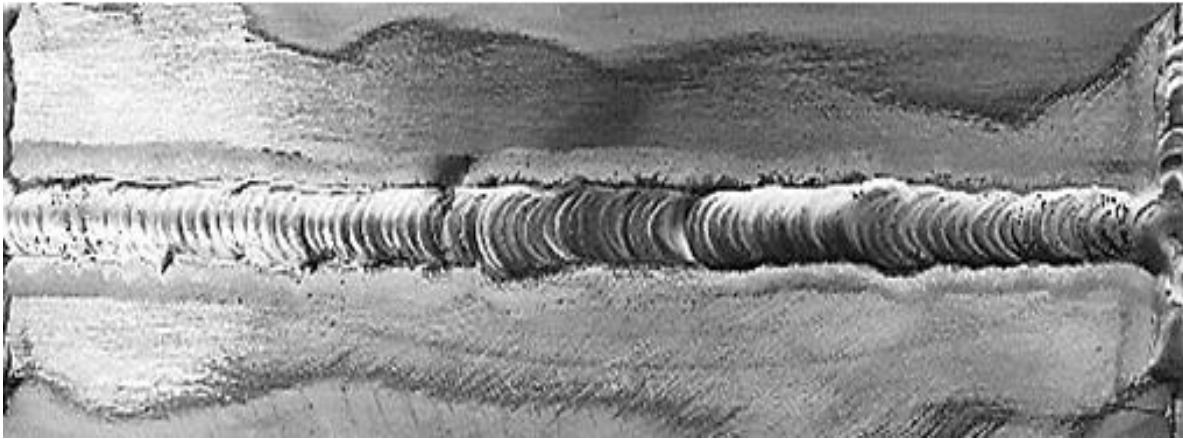


Figura 15.- Porosidades en el cordón de soldadura con material de aporte

Finalmente, se optimizó los parámetros de soldeo disminuyendo ligeramente la intensidad de soldeo a 118 A y con una velocidad de soldeo alcanzada, en promedio, de 18 cm/min. Para este caso se balanceó en un 50% de la semi onda cuadrada. De esta forma se obtuvieron las uniones soldadas satisfactorias con una adecuada penetración y cordones uniformes, como muestra la Figura 16.



Figura 16.- Cupón óptimo con aporte de calor

En la siguiente Tabla 14 se presentan los parámetros utilizados durante la obtención de los cupones óptimos con material de aporte.

Tabla 14.- Parámetros de soldadura de los cupones con material de aporte

Número de cupón	Intensidad (A)	Avance (cm/min)	Balance o Desbalance	Electrodo		Material de aporte	Gas de protección	
				Tipo	Diámetro (pulg)		Tipo	Caudal (litros/min)
1	125	15	55% electrodo (-)	EWP	3/32	ER 5356	Argón	11
2	120	18	55% electrodo (-)	EWP	3/32	ER 5356	Argón	11
3	118	18	50%	EWP	3/32	ER 5356	Argón	11

En la Figura 17 se muestra la elaboración de las uniones con material de aporte mediante el proceso GTAW.



Figura 17.- Soldadura con material de aporte

b) Obtención de cupones sin material de aporte

En el caso de la soldadura sin material de aporte se consideró un incremento en el valor de la velocidad de soldeo, pues a mayor velocidad se fusiona bastante rápido reduciendo el aporte de calor localizado evitando perforaciones y fisuraciones en el cordón de soldadura.

Inicialmente, al igual que el caso con material de aporte, se realizaron cordones de prueba sin la aplicación de material de aporte en una plancha del material base. Para este tipo de soldadura se utilizó el proceso de soldadura mecanizada en 4 tiempos con el uso del equipo de soldadura GTAW y la utilización del carro de soldadura. Asimismo, otro punto que se tomó en consideración fue la variación de los parámetros dentro de los cuales están el ángulo de soldeo,

la intensidad de soldeo y la velocidad de soldeo. El ángulo de ataque o de soldeo se mantuvo constante en 15° con la vertical para los tres cupones.

El primer cupón fue soldado con una intensidad de 135 amperios, desbalance del 55% al electrodo negativo y una velocidad de 40 cm/min. De este cordón se observó que presentaba penetración incompleta y ligeras fisuraciones en los extremos. El segundo cupón fue soldado disminuyendo el valor de la velocidad de soldeo la cual fue de 35 cm/min y una intensidad de 140 amperios con un desbalance al 55% al electrodo negativo.

De la prueba anterior se obtuvieron cordones en buenas condiciones. Sin embargo, con el fin de mejorar el acabado superficial se realizó el último cupón. En el tercer cupón soldado se realizó un balance al 50% mejorando la penetración del cordón de soldadura y el acabado superficial. En la Tabla 15 se muestra los parámetros obtenidos durante la fabricación de los 3 cupones sin material de aporte.

Tabla 15.- Parámetros de soldadura de los cupones sin material de aporte

Número de cupón	Intensidad (A)	Avance (cm/min)	Ángulo (°)	Balance o Desbalance	Electrodo		Gas de protección	
					Tipo	Diámetro (pulg)	Tipo	Caudal (litros/min)
1	135	40	15	55% electrodo (-)	EWP	3/32	Argón	11
2	140	35	15	55% electrodo (-)	EWP	3/32	Argón	11
3	140	35	15	50%	EWP	3/32	Argón	11

En la Figura 18 se muestra la elaboración de las juntas sin material de aporte. Como resultado final en la Figura 19 se muestra el cupón soldado sin material de aporte en óptimas condiciones.



Figura 18.- Soldadura con el uso del Welding car



Figura 19.- Cupón soldado sin material de aporte

2.4.2. Ensayos no destructivos de las uniones soldadas

Posterior a la obtención de los cupones de prueba, se seleccionó un cupón para cada tipo de soldadura y fueron sometidos a ensayos no destructivos con el fin de detectar las posibles discontinuidades presentes en la superficie del cordón de soldadura por medio de la inspección

visual, tintes penetrantes y radiografía industrial. Una vez aceptados los cupones, se realizaron los cortes de los cupones para obtener las probetas.

2.4.2.1. Inspección visual

La inspección visual fue utilizada posterior a la obtención de los cupones, para detectar las discontinuidades superficiales en el cordón de la soldadura con un nivel de criticidad apreciados a la vista. Este ensayo no destructivo fue realizado de acuerdo con el código AWS D1.2 “*Structural Welding Code- Aluminum*” [23]

2.4.2.2. Tintes penetrantes

Posterior a la inspección visual se realizó el ensayo de tintes penetrantes coloreados con el fin de determinar si existen discontinuidades en la superficie.

a) Equipo y materiales utilizados

El equipo de líquidos (tintes) penetrantes empleados fueron de la marca *Spotcheck*.

- Líquido penetrante visible con solvente de color rojo SKL – SP2
- Removedor SKC –S
- Revelador SKD – S2

En la Figura 20 se muestra el kit de inspección utilizado para el ensayo de tintes penetrantes coloreados.



Figura 20.- Kit de inspección de tintes penetrantes marca *Spotcheck Magnaflux*

b) Metodología de ensayo

Se limpiaron los dos cupones con el uso del removedor y un paño limpio. Posteriormente, se aplicó el líquido penetrante coloreado sobre la unión soldada y se mantuvo por 5 minutos (tiempo apropiado para la aplicación en aluminio). Luego de la espera, se removió el líquido penetrante de la superficie del cordón de soldadura. Finalmente, se aplicó el revelador para observar las discontinuidades presentes en la soldadura. El método empleado para la realización del ensayo se hizo de acuerdo al estándar ASTM E165 “*Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry*” [24]

2.4.2.3. Radiografía industrial

El ensayo de radiografía industrial es un método volumétrico que utiliza la radiación ionizante de alta energía proveniente de los rayos X o gamma, parte de su energía al pasar a través de un material sólido es atenuada debido a diferencia de espesores, densidad o presencia de discontinuidades.

Se realizó la radiografía industrial para los dos cupones, para determinar la presencia de discontinuidades internas y volumétricas. A continuación, se muestran los equipos y materiales utilizados durante el ensayo.

Las variaciones de atenuación o absorción son detectadas y registradas en una película radiográfica o pantalla fluorescente obteniéndose una imagen de la estructura interna de una pieza o probeta.

a) Equipos y materiales utilizados

- **Equipo de rayos X:** Se utilizó la máquina perteneciente al laboratorio de materiales de la PUCP. El equipo utilizado fue de la marca *Balteau NDT Modelo GDF165*, el cual incluye el tubo, unidad de control, cables y control remoto. Este equipo tiene un rango de voltaje alto hasta 160 KV. En la Figura 21 se muestra el equipo y sus implementos.



Figura 21.- Equipo e implementos para la ejecución de la radiografía

- **Película:** Placa radiográfica donde se registrará las discontinuidades para cada cupón a lo largo de todo el cordón de soldadura.
- **Indicadores de calidad de imagen:** Es un arreglo de seis alambres ordenados según su diámetro en forma creciente. Tiene como función registrar la calidad de la radiografía.

Para el presente ensayo se consideraron los parámetros de la Tabla 16. Estos parámetros son tomados de acuerdo al espesor de la plancha de aluminio con el cálculo del tiempo que el cordón de soldadura debe ser expuesto a los rayos X.

Tabla 16.- Parámetros del ensayo de radiografía industrial

Proceso	Potencia (kv)	Tiempo (s)
GTAW	145	90

Luego se procedió a revelar la película para obtener el registro de las discontinuidades obtenidas. Para ello se realizó el revelado con las proporciones adecuadas mostradas en la Tabla 17.

Tabla 17.- Proporciones para el revelado

Proporciones	Revelador (L)	Agua (L)	Fijador (L)	Tiempo (min)
Baño inicial	0,5	2	-	5
Baño intermedio	-	2	-	2
Baño final	-	2	0,5	5

Al finalizar el revelado, se midió la densidad de la película, que debería estar en el rango de 1,8 – 4,0 para rayos X.

2.5. Técnicas de caracterización de las uniones soldadas

2.5.1. Caracterización mecánica

Para el análisis de las propiedades mecánicas se realizaron ensayos de tracción, barrido de dureza Vickers, ensayos de doblado transversal de cara y raíz de las probetas fabricadas a partir de la unión soldada. A continuación, se explica los procedimientos para cada tipo de ensayo.

2.5.1.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta a un esfuerzo uniaxial ejercido gradualmente hasta provocar su rotura con el fin de conocer propiedades mecánicas como su esfuerzo a la fluencia y resistencia a la tracción. Se realizó los ensayos de tracción a las probetas para determinar la resistencia máxima de las uniones soldadas.

a) Equipos y materiales utilizados

Equipo. - Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP. Se utilizó la máquina *Zwick / Roell* modelo *Special Metal Testing Machine SP* que alcanza una capacidad máxima de 60 KN en tracción. Se puede visualizar esta máquina en la Figura 22.



Figura 22.- Equipo de tracción *Zwick/Roell Special Metal Testing Machine SP*

Probetas. - La fabricación de las probetas a partir de los cupones de soldadura se realizó tomando como referencia al código AWS D1.2. bajo las dimensiones mostradas en la Figura 23. Debido a los espesores delgados de los cupones se trabajaron con probetas rectangulares con dimensiones de 200 mm x 38 mm (sin sección reducida para facilitar la fabricación de éstas como se muestra en la Figura 24). Antes de realizar los ensayos se realizó las mediciones a las probetas con un vernier electrónico las cuales se muestran en la Tabla 18 y Tabla 19. [23]

En general se ensayaron 18 probetas de las cuales 9 pertenecen a uniones soldadas sin material de aporte y las restantes con material de aporte ER5356.

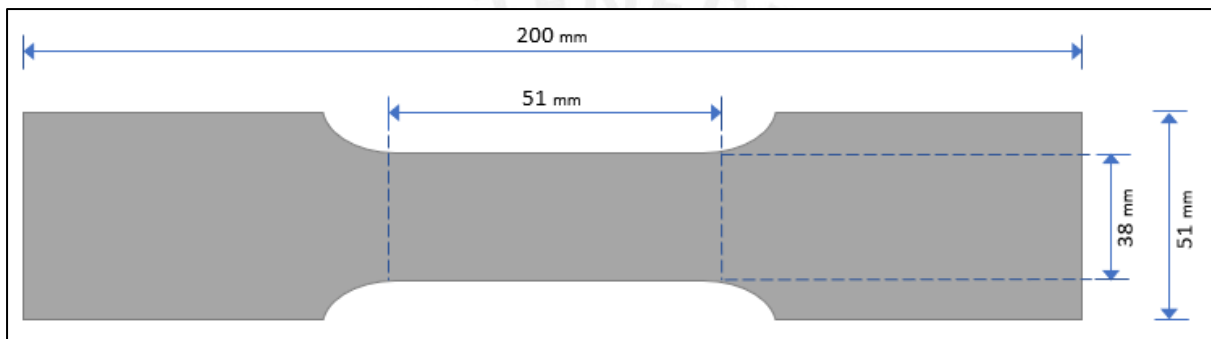


Figura 23.- Dimensiones de la probeta de tracción según AWS D1.2. [23]

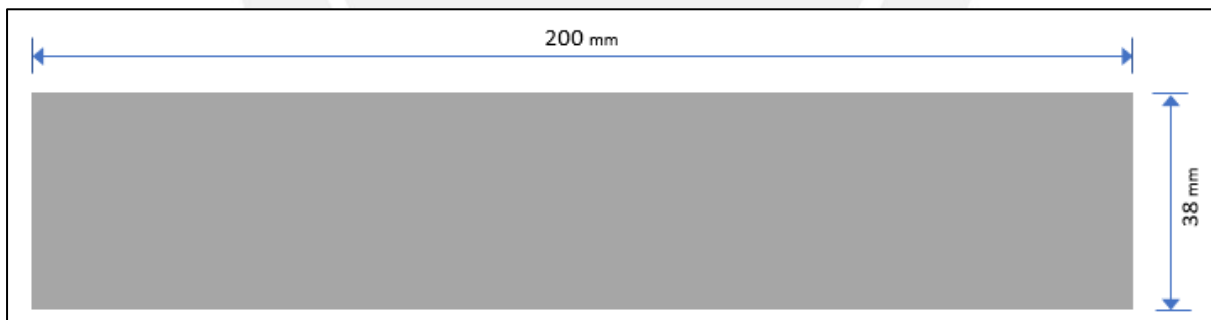


Figura 24.- Dimensiones de la probeta fabricada

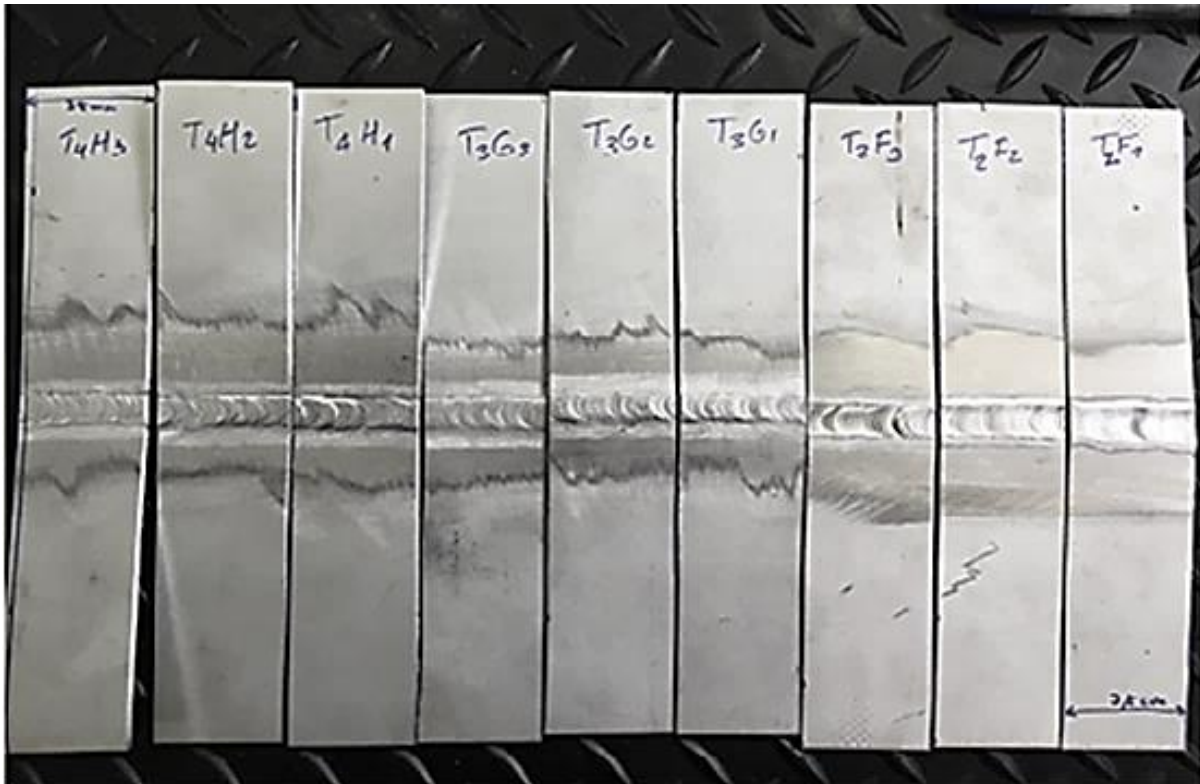


Figura 25.- Probetas para el ensayo a tracción

En la Figura 25 se muestran las probetas con material de aporte antes de ser sometidas a ensayos mecánicos y metalográficos.

Tabla 18.- Probetas para ensayo de tracción sin material de aporte

Medidas del ensayo a tracción (SM)			
Probeta	Sección transversal		
	Ancho(mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)
A1	38,03	2,67	101,54
A2	38,56	2,77	106,81
A3	39,24	2,74	107,52
B1	38,10	2,74	104,39
B2	37,90	2,75	104,23
B3	38,80	2,71	105,15
C1	38,10	2,73	104,01
C2	38,19	2,73	104,26
C3	38,80	2,73	105,92

Tabla 19.- Probetas para ensayo de tracción con material de aporte

Medidas del ensayo a tracción (CM)			
Probeta	Sección transversal		
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm²)
E1	37,21	2,72	101,21
E2	38,59	2,73	105,35
E3	38,44	2,84	109,17
F1	37,33	2,73	101,91
F2	37,45	2,73	102,24
F3	38,80	2,77	107,48
G1	38,03	2,71	103,06
G2	38,00	2,73	103,74
G3	37,52	2,75	103,18

El resultado obtenido a partir de este ensayo se comparará con lo establecido en el código AWS D1.2 el cual especifica que el ensayo de tracción debe demostrar que la resistencia máxima de la unión soldada debe ser mayor o igual que el valor nominal de la resistencia máxima a la tracción del material base. Para el presente caso, el valor de la resistencia de la unión soldada del aluminio AA5052-H34 es de 170 MPa. [23]

2.5.1.2. Ensayo de microdureza Vickers

El ensayo de microdureza determina los valores de dureza en áreas muy pequeñas, para el ensayo se utilizó un indentador de diamante en forma piramidal, con el cual se realizaron las indentaciones a cierta distancia, una de la otra. Para realizar el ensayo, se fabricaron 4 briquetas a partir de las uniones soldadas, 2 briquetas sin aporte de material y 2 con aporte.

a) Equipos y materiales utilizados

- Equipo de Dureza: Se empleó el equipo de dureza Instron mostrada en la Figura 26. La cual se encuentra ubicada en el Laboratorio de Materiales de la PUCP.
- Probetas: Con el fin de obtener los valores de dureza en las zonas de fusión y en las zonas afectadas por el calor (ZAC en adelante) de los cupones con y sin material de aporte se fabricaron briquetas como se muestra en la Figura 27. De este modo se prepararon dos probetas briqueteadas por cada cupón y se procedió a medir la dureza.



Figura 26.- Máquina de Dureza Instron

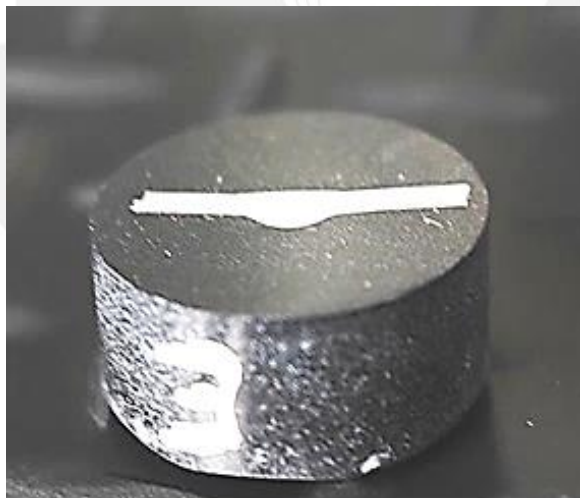


Figura 27.- Probeta briquetada para ensayo

b) Metodología de ensayo

Inicialmente se prepararon las muestras por medio de un lijado manual, utilizando lijas al agua de distintos números: P150, P220, P360, P600, P800, P1000. Para realizar el lijado se cambió el sentido del lijado por cada tipo de lija. Posterior al lijado, se pulió hasta que esté totalmente preparada la superficie y se realizó un ataque químico para apreciar los límites del cordón y la

ZAC y de este modo realizar las indentaciones por zonas. En la Figura 28 se muestra el equipo de lijado.



Figura 28.- Equipo para el lijado de las briquetas de dureza

Para realizar los ensayos se utilizó el código ASTM E384 el cual muestra que la distancia entre centros de dos huellas consecutivas debe ser mínimo dos diagonales de la huella. [18]

Se realizaron las penetraciones perpendiculares a la superficie bajo la acción de una carga de 1 kg-f. Se mantuvo la carga por un tiempo apropiado, se retiró la carga y posteriormente se tomó la medida de las diagonales de la impresión que el indentador dejó. De esta forma, se determinó los valores de dureza Vickers de acuerdo a las Ecuación 1 y la Ecuación 2.

$$HV = \frac{1.8544 * F}{d^2} \dots\dots\dots \text{Ecuación 1}$$

$$d = \frac{d1+d2}{2} \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

Donde:

F: Carga (kg-f)

d1: Diagonal 1

d2: Diagonal 2

d: Promedio de las dos diagonales medidas en milímetros

El ensayo de barrido de dureza se realizó en 13 puntos a lo largo de la briqueta (Véase la Figura 29 y Figura 30). Para el ensayo se aplicó la carga de 1 kg con el fin de obtener las indentaciones de acuerdo al estándar ASTM E384 “*Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*”. [18]

Las indentaciones se realizaron desde el centro de la probeta briqueteada (zona de fusión) hacia el material base ubicado en el extremo. La distancia entre los centros de las indentaciones en la ZAC fue de 0,6 milímetros, asimismo la distancia desde la ZAC hacia el material base fue de 1,8 milímetros. En la Figura 29 se muestra la zona en donde se realizarán las indentaciones. Asimismo, en la Figura 30 se muestra el esquema de los puntos de las indentaciones por medio del barrido de dureza bajo la normativa UNE - EN ISO 9015 -1 “*Ensayos destructivos de soldaduras en materiales metálicos. Ensayo de dureza*” [25]

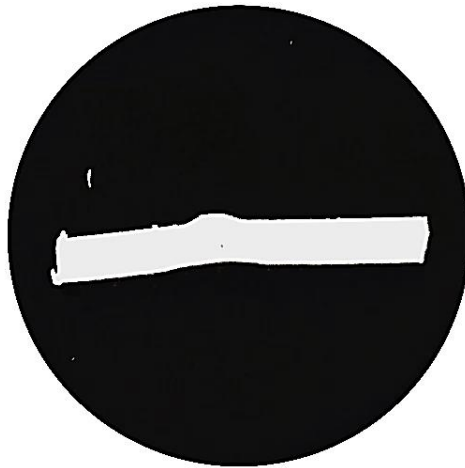


Figura 29.- Zona de indentaciones

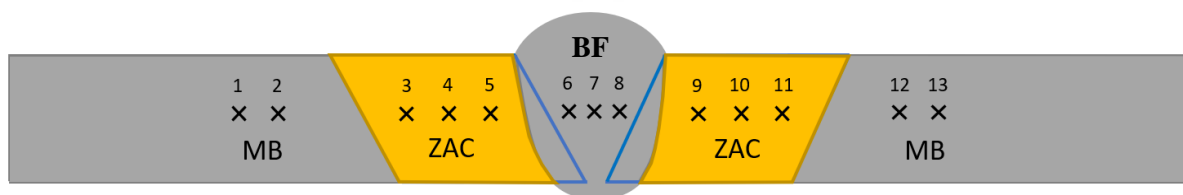


Figura 30.- Esquema de puntos de barrido de dureza

MB: Material Base

ZAC: Zona afectada por calor

BF: Baño de fusión

2.5.1.3. Ensayo de doblado

El ensayo de doblado es utilizado para determinar la capacidad de deformación de las uniones soldadas al ser doblado y sometido a una carga sin agrietarse permitiendo apreciar la ductilidad de las probetas.

a) Equipos y materiales utilizados

- **Equipo:** Se empleó la Máquina Universal MFL ubicada en el Laboratorio de Materiales de la PUCP. Esta máquina está diseñada para aplicar una carga máxima hasta de 60 toneladas. (Véase Figura 31)



Figura 31.- Máquina Universal de Tracción MFL

- **Probetas:** Se fabricaron probetas para realizar los ensayos de doblado transversal de cara y raíz, estas probetas fueron fabricadas de acuerdo al código AWS D1.2. con dimensiones de 152 mm de largo y 38 mm de ancho como se muestra en la Figura 32. Este ensayo permite verificar que no se haya producido fragilización o falta de fusión a lo largo del cordón de soldadura. Asimismo, determinar la ductilidad de las uniones soldadas.

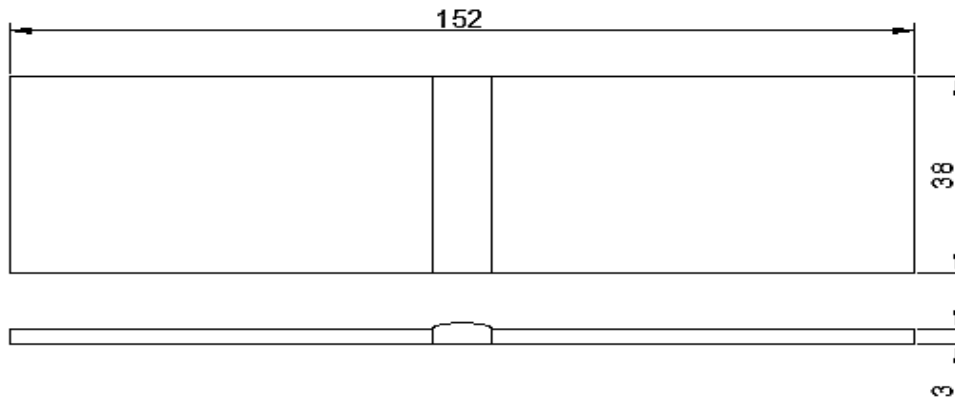


Figura 32.- Probeta para ensayo de doblado (Medido en mm)

- **Punzón:** Es el elemento que realiza el doblado al aplicar la fuerza directamente en la probeta que genera la deformación. El cálculo del diámetro del punzón se realizó de acuerdo a la normativa AWS D1.2 siguiendo la fórmula mostrada en la Tabla 20. Asimismo, en la Figura 33 se muestra la distancia entre apoyos y el diámetro de forma referencial.

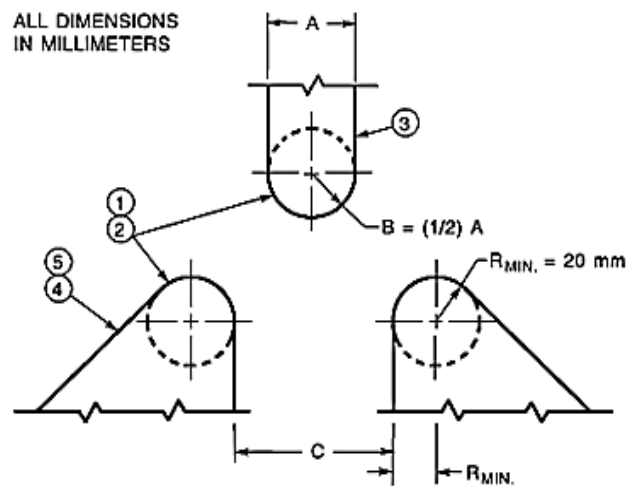


Figura 33.- Diámetro del punzón y distancia entre los apoyos según AWS D1.2 [23]

Tabla 20.- Dimensiones del diámetro del punzón y la distancia entre apoyos

Dimensiones			
Espesor	A: Diámetro	B: Radio	C: Distancia entre apoyos
3 mm	52 mm	26 mm	60 mm
$t < 3$	$16 - 0,5t$	$8 - 0,25t$	$18 - 0,5t + 1.6$

Nota. Tomado de AWS D1.2. "Structural Welding Code-Aluminum", por American Welding

Society,2014.[23]

b) Metodología del ensayo:

Los ensayos de doblado transversal de cara y raíz someten a la probeta a la deformación plástica ambos realizados por el punzón. Este ensayo se realiza en un solo sentido al doblado de la cara soldada lo máximo posible y en el caso de la raíz se imprime el mayor esfuerzo en la pasada de raíz hasta la máxima deformación plástica. Al final al obtener los resultados debe corroborarse que las fisuras o grietas en la parte estirada deben ser menor a 3 mm (1/8 pulg) de largo en dirección de la superficie convexa de la probeta después del doblado.

2.5.2. Caracterización microestructural**2.5.2.1. Ensayo metalográfico****a) Equipos y materiales utilizados**

- **Microscopio con cámara fotográfica:** Se realizó con el microscopio óptico de marca Leica modelo DMI5000M el cual tiene incorporado una cámara fotográfica, este equipo se encuentra ubicado en el laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería mecánica de la PUCP. (Véase Figura 34)
- **Probetas:** Las muestras fueron tomadas del cupón de soldadura. Para ello se utilizó 2 probetas briqueteadas bajo el mismo método de preparación que del ensayo de dureza. Posterior a la fabricación de las 2 probetas, se realizó el ataque químico con reactivo de Keller por un tiempo de 15 segundos según la norma ASTM E407 “*Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*” [26]



Figura 34.- Microscopio óptico Leica DMI5000M

b) Metodología del ensayo

Para el análisis de la microestructura de la unión soldada, inicialmente, se observó que la superficie de la probeta esté libre de rayones o cualquier suciedad. Posterior a ello, se observó la probeta en el microscopio y se obtuvo un registro fotográfico de la microestructura para cada caso (con y sin material de aporte).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Resultados de la caracterización del material base

3.1.1. Composición química

Se obtuvieron los resultados de la composición química a partir del ensayo de espectrometría por emisión, en la Tabla 21 se puede observar todos los elementos que componen la aleación de aluminio en estudio.

Tabla 21.- Composición química de la plancha de Aleación de aluminio AA5052 – H34

Elemento	Porcentaje en peso (%)
Si	0,11
Fe	0,49
Mg	1,95
Cr	0,20
Cu	0,02
Mn	0,04
Zn	0,01
Al	Resto

De los resultados obtenidos en la Tabla 21 se puede apreciar que el valor porcentual del magnesio es menor en 0,25% de peso respecto al valor nominal establecido por la norma ASTM B209 (Valor nominal Mg 2,20% peso). Por otro lado, los otros elementos aleantes como el silicio, hierro, cobre y manganeso se encuentran dentro del rango del valor porcentual del peso. Se podría decir que la composición química del material base cumple con lo establecido por la norma ASTM B209 “*Standard Specification for Aluminum and Aluminum – Alloy Sheet and Plate*”. [14]

3.1.2. Propiedades mecánicas

3.1.2.1. Resultados del ensayo a tracción del material base

La resistencia máxima a la tracción, resistencia a la fluencia y el alargamiento porcentual representan las propiedades mecánicas del material en estudio. Estas propiedades han sido obtenidas a partir del ensayo de tracción. En la Tabla 22 se muestran los resultados.

A partir de los resultados obtenidos del ensayo a tracción de la aleación de aluminio AA5052 – H34 se obtuvo una resistencia a la fluencia promedio de 195 MPa, una resistencia máxima a

la tracción promedio de 246 MPa y un alargamiento de 11% en promedio. Al comparar los resultados con los datos nominales, de acuerdo con el código ASTM B209M -14, mostrados en la Tabla 9 se determinó que los valores se encuentran dentro del rango establecido por la normativa. [14]

Tabla 22.- Alargamiento, resistencia máxima y a la fluencia del material base

Probeta	Área inicial (mm ²)	Longitud final (mm)	Alargamiento (%)	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)	
				Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima
1	38,3	55,1	10%	7,4	9,4	193,4	245,7
2	38,1	55,3	11%	7,4	9,4	194,1	246,6
3	38,3	55,4	11%	7,5	9,4	195,9	245,5
Promedio			11%	7,4	9,4	194,5	245,6

3.1.2.2. Resultados del ensayo de Dureza HV del material base

La Tabla 23 muestra los resultados del ensayo de dureza Vickers realizados. El valor de dureza promedio obtenido para el material base fue de 58 HV.

Tabla 23.- Valores de dureza del material base AA5052 H-34

Probeta	D1	D2	D promedio	HV
1	179,2	179,8	182,7	57,5
2	178,4	178,7	178,5	58,3
3	176,8	180,7	178,7	58,2
Total				58

3.1.2.3. Resultados del análisis microestructural

En la Figura 34 se muestra la microestructura de una sección transversal del material base visto a través del microscopio óptico a 500 aumentos, se aprecian los precipitados finos de siliciuro de magnesio, Mg₂Si, que vienen a ser las zonas oscuras que se encuentran distribuidos en una matriz α , que es una solución sólida compuesta en su mayoría por aluminio.

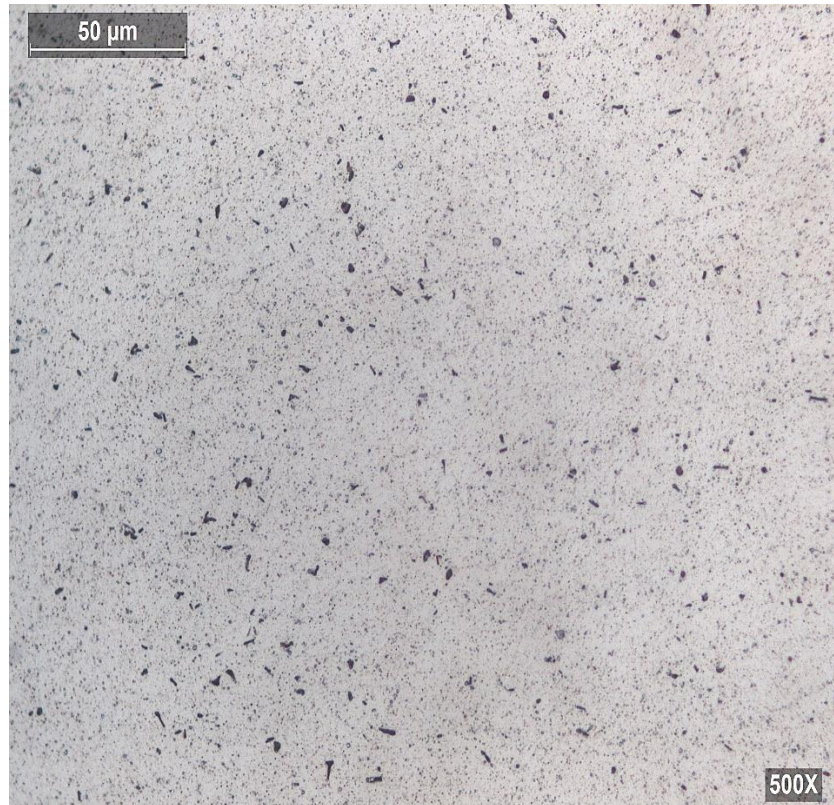


Figura 35.- Microestructura del Material base

3.2. Resultados del proceso de soldadura

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos del procedimiento de soldadura GTAW para el material en estudio. Asimismo, se muestran los parámetros utilizados para la obtención de los cordones de soldadura.

3.2.1. Proceso de soldadura

a) Cupones sin material de aporte

Durante el soldeo de los primeros cupones sin material de aporte mediante el proceso de soldadura GTAW se presentaron porosidades en los cordones y falta de fusión. La porosidad ocasionada puede deberse a que inicialmente se soldó con una velocidad baja y variable sumado a una inadecuada limpieza de superficies. Asimismo, se presentó falta de fusión, la que está muy relacionada al mismo efecto de la velocidad y la longitud de arco.

b) Cupones con material de aporte

Durante la fabricación del primer cupón soldado con material de aporte mediante el proceso de soldadura GTAW, se obtuvieron porosidades y algunas pequeñas salpicaduras. Las porosidades pueden haberse presentado debido a que la velocidad de enfriamiento fue

acelerada y a una mala limpieza o una fuente de hidrógeno no detectada. Generalmente, una causa principal de la ocurrencia de porosidades se presenta por la presencia de hidrógeno en la soldadura.

Por otro lado, las salpicaduras presentes en el cordón de soldadura se produjeron por efecto de la inapropiada limpieza de la superficie del material base. Asimismo, la inadecuada regulación del arco de soldeo. Los cupones siguientes fueron soldados tomándose en cuenta los problemas observados en el primer cupón con el fin de evitar este tipo de problemas.

3.2.2. Consumibles

3.2.2.1. Varilla de aporte de Al-5Mg

Los cupones soldados con material de aporte ER5356 presentaron adecuados resultados con respecto a la apariencia visual del cordón. Para el presente caso de investigación no se observó la presencia de salpicaduras, ni discontinuidades superficiales por efecto del material de aporte.

3.2.3. Resultados de los parámetros de soldeo

3.2.3.1. Intensidad de soldeo

Al incrementar la intensidad de soldeo se fue aumentando el aporte de calor entregado a la unión soldada. Para el caso de soldadura sin material de aporte a altas intensidades, el gran calor aportado aumentó las contracciones del metal y se afectó el cordón de soldadura. Sumado a ello, la rápida velocidad de enfriamiento ocasionó una fisuración en caliente desde el centro del cordón hacia la zona afectada por el calor (Véase Figura 36)

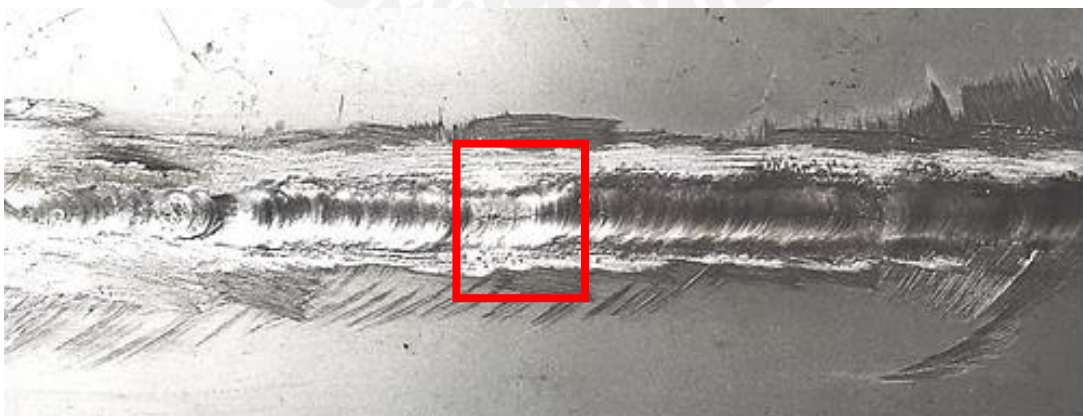


Figura 36.- Fisuración en caliente en una soldadura sin aporte

Una de las recomendaciones para evitar la fisuración en caliente es soldar con la mayor velocidad de soldeo, para que contrarreste el gran aporte de calor y no perjudique el cordón final.

3.2.3.2. Velocidad de soldeo

La velocidad de soldeo es inversamente proporcional a cantidad de material de aporte depositado y al calor aportado a la soldadura. Para el caso de los cupones con material de aporte al no tener una velocidad de soldeo constante se observó variación en el ancho y la penetración del cordón. Pues a menores velocidades de soldeo la cantidad de material de aporte depositado aumentó generando un cordón más ancho.

Por otro lado, para los cupones sin material de aporte se obtuvieron buenos resultados debido a que la velocidad de soldeo se mantuvo constante durante todo el proceso de soldeo. De este modo, se resume que la soldadura mecanizada puede garantizar dicho efecto.

A continuación, se presentan los resultados de la elaboración de los cupones.

3.2.4. Tipo de junta

El tipo de junta empleado, en las uniones a tope, fue de bordes rectos o sin preparación de bordes. Inicialmente se apuntaló los extremos de las planchas a soldar, para garantizar que no se deformen las planchas y el cordón que se obtenga no presente flexiones por esfuerzos. Debido a que durante el proceso de soldeo el calor aumenta, se realizó la soldadura en una sola pasada y con una ligera separación (Véase Figura 37) con el fin de recubrir completamente la zona de soldadura sin aumentar el espesor de la plancha. Los resultados de esta experiencia inicial (cupón soldado con material de aporte) no fueron los esperados, pues el cordón de soldadura presentó una superficie irregular, debido a que el ancho del cordón de soldadura fue excesivo y la penetración fue incompleta. Asimismo, el cordón presentó gran cantidad de porosidades.

De acuerdo con lo obtenido anteriormente, se buscó controlar los nuevos parámetros de soldadura para preparar el proceso de soldeo sin separación (Véase Figura 38), a partir de ello se obtuvieron buenos resultados en el cordón de soldadura. Este presentó penetración completa y un adecuado ancho del cordón; sin embargo, se siguió presentando ligeras porosidades.

Un problema que siempre se presenta en la soldadura del aluminio y sus aleaciones es la presencia de porosidad, básicamente debido a que el aluminio disuelve relativamente grandes

cantidades de hidrógeno cuando está a altas temperaturas, y éste queda atrapado, generando la porosidad.

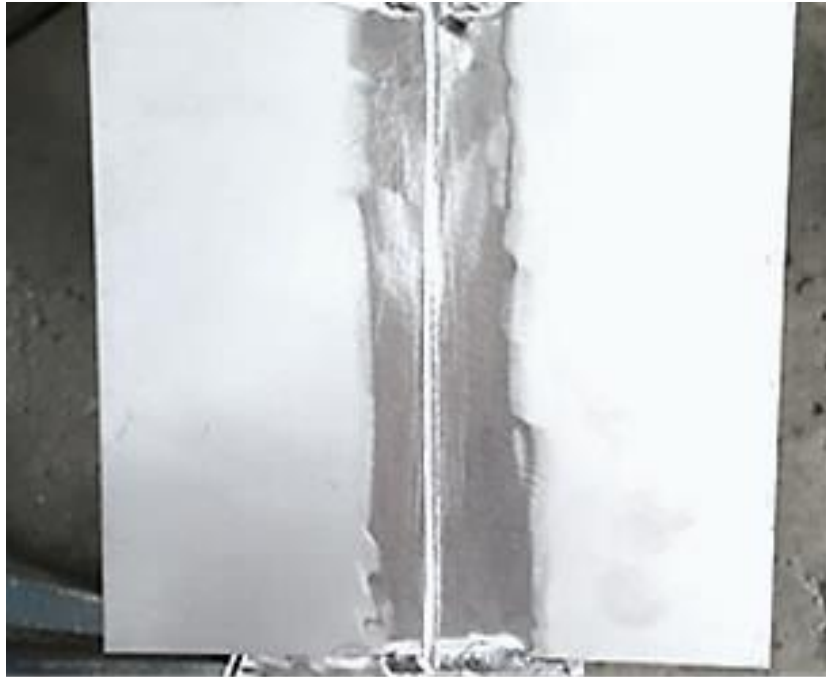


Figura 37.- Cupón apuntalado con ligera separación

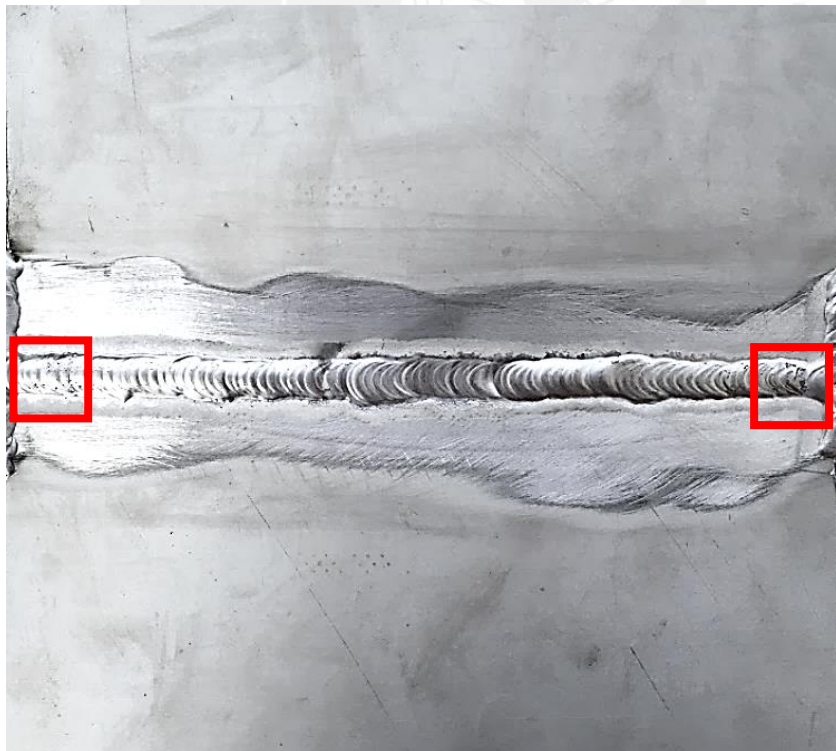


Figura 38.- Cupón soldado con presencia de porosidades



Figura 39.- Cupón apuntalado a tope (sin separación)

3.2.5. Limpieza superficial

Se presentaron porosidades en los cordones de soldadura pues la limpieza fue inadecuada, debido a que no se utilizó ningún disolvente previo al amolado y el cepillado de la zona de la costura. Por tal motivo, se produjo que se contaminara la superficie y los cordones de soldadura presenten porosidades, en su mayoría, en los extremos de los cupones.

3.2.6. Resultados de los procedimientos durante la soldadura

3.2.6.1. Dirección de centrado

La dirección de centrado de la pistola de soldeo es un factor importante durante el soldeo de la junta sin material de aporte. Debido a que, con el desplazamiento del avance del carro de soldadura, se produjeron ligeros movimientos en la posición vertical de la pistola, de este modo se ocasionaron variaciones en el ancho y penetración del cordón. Por otro lado, se analizarán los resultados de los otros factores durante el proceso de soldeo.

3.2.6.2. Descarga de las líneas de fusión

Durante el soldeo se generan altas deformaciones en el material base, debido a que el aluminio presenta un alto coeficiente de dilatación. Por tal motivo, se realizó un equilibrio en las contracciones del metal base mediante el embridamiento con elementos de sujeción (prensas manuales). De este modo se pudo disminuir el curvado o pando de los cupones al momento de soldeo y se obtuvieron cupones sin deformaciones en sus extremos.

3.2.6.3. Dilatación térmica

Con el fin de controlar y estudiar los problemas ocasionados por la dilatación térmica del aluminio, se realizaron soldeos a diferentes velocidades. A continuación, se detalla el soldeo para ambos casos:

a) Junta soldada sin material de aporte

Inicialmente se soldó cupones sin material de aporte de forma manual. No obstante, los resultados no fueron los esperados, debido a que la velocidad fue muy baja y variable (proceso más lento). Por ello, se cambió la forma de la soldadura a mecanizada. De esta manera, la soldadura se llevó a cabo con la ayuda del Welding Car mostrado en el capítulo anterior, en donde se reguló el parámetro de la velocidad y la longitud de arco. Como resultado final se obtuvieron cupones soldados sin fisuración en caliente y penetración completa.

b) Junta soldada con material de aporte

La soldadura se realizó de forma manual ya que se aplicó el material de aporte de acuerdo a la experiencia del soldador. Inicialmente el cordón de soldadura presentó variaciones de forma (ancho y penetración) debido a que no se había regulado la velocidad y ángulo de inclinación adecuado. Posterior a la regulación de los parámetros observados, se obtuvieron cordones más uniformes, pero con presencia de porosidades en los extremos.

3.2.7. Cupones soldados

Para realizar el soldeo de los cupones se siguió el procedimiento de elaboración de cupones desarrollado en el capítulo anterior. Para ello, se evaluó el resultado de 3 cupones para cada caso. A continuación, se muestran los resultados y su respectivo análisis.

3.2.7.1. Uniones soldadas con material de aporte

Se realizaron tres cupones de soldadura con material de aporte ER5356. De las juntas soldadas se observaron porosidades en el cordón de soldadura. Este efecto se provocó por el contenido de magnesio y la generación de gases a partir de este. Asimismo, por la alta velocidad de enfriamiento y la probable aparición de hidrógeno en la junta soldada.

En el primer cupón con una intensidad de soldeo de 125 A con un desbalance del 55% en polaridad negativa y una velocidad de 15 cm/min se presentó fisuración en el centro del cordón. En donde el calor de aporte fue determinado de acuerdo a la Ecuación 3.

$$\text{Calor de aporte} = \frac{\text{Voltaje [V]} * \text{Intensidad de soldeo [A]}}{\text{velocidad de soldeo [m/h]}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3}$$

El valor del calor de aporte fue de 208,3 kJ/m. A estas condiciones el cupón soldado presentó una fisuración de 2 cm, lo cual generó un índice de fisuración del 10% de acuerdo con la Ecuación 4.

$$IFC = \frac{\Sigma \text{Longitud de las fisuras}}{\text{Longitud total del cordón}} * 100\% = 10,52\% \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}$$

A partir de los resultados del primer cupón la tendencia de fisuración dependían directamente al rango de temperatura de solidificación de la aleación, el gradiente térmico y la relación del volumen líquido y del volumen de material solidificado. Por tal motivo se varió la intensidad de corriente y la velocidad de soldeo. [9]

En el segundo cupón, se disminuyó el amperaje a 120 A, manteniendo el mismo desbalance y aumentando la velocidad a 18 cm/min, se verificó que al disminuir la intensidad y aumentar la velocidad de soldeo el sobrecalentamiento por acumulación de calor en el material base disminuyó, de esta manera se evitó la fisuración en caliente. Sin embargo, al finalizar la soldadura se presentaron porosidades y ligeras salpicaduras debido al aumento progresivo del calor en dirección a la ejecución de soldeo. El calor de aporte para este cupón fue menor al límite en 41,6 kJ/m (166,7 kJ/m).

En el tercer cupón, con el fin de obtener mejor acabado superficial y uniformidad del cordón de soldadura se disminuyó el amperaje a 118 A con un balance del 50% y una velocidad de 20 cm/min. Con estas variaciones se mejoró el acabado superficial del cordón de soldadura. Sin embargo, se mantuvieron ligeras porosidades en los extremos del cupón. Para este cupón el calor de aporte fue menor al límite en 60,83 kJ/m (147,5 kJ/m).

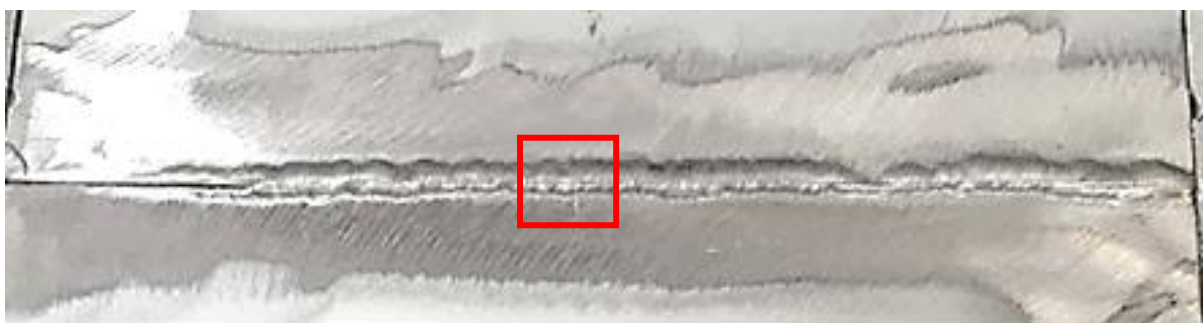


Figura 40.- Fisuración en caliente en la raíz del cordón con aporte

En la Tabla 24 se muestran los valores de aporte para cada cupón; asimismo, cabe resaltar que el cupón N° 1 fue el único que obtuvo fisuración en caliente, por tal motivo, se ha considerado a este como el valor límite de calor aportado para juntas soldadas con material de aporte. En la Figura 40 se muestra la falta de penetración y fisuración en caliente en el cordón de soldadura del primer cupón soldado.

Tabla 24.- Calor de aporte para los cupones con material de aporte

N° Prueba	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Velocidad (cm/min)	Calor de aporte (kJ/m)
PB 1	15	125	15	208,33
PB 2	15	120	18	166,67
PB 3	15	118	20	147,50

En la Figura 41 se muestra las curvas de calor de aporte frente a la intensidad y la velocidad de soldeo, en donde el límite para un material base de aluminio AA5052 H34 de 3 mm de espesor soldado mediante GTAW se fisure es igual o mayor a 208 kJ/m.

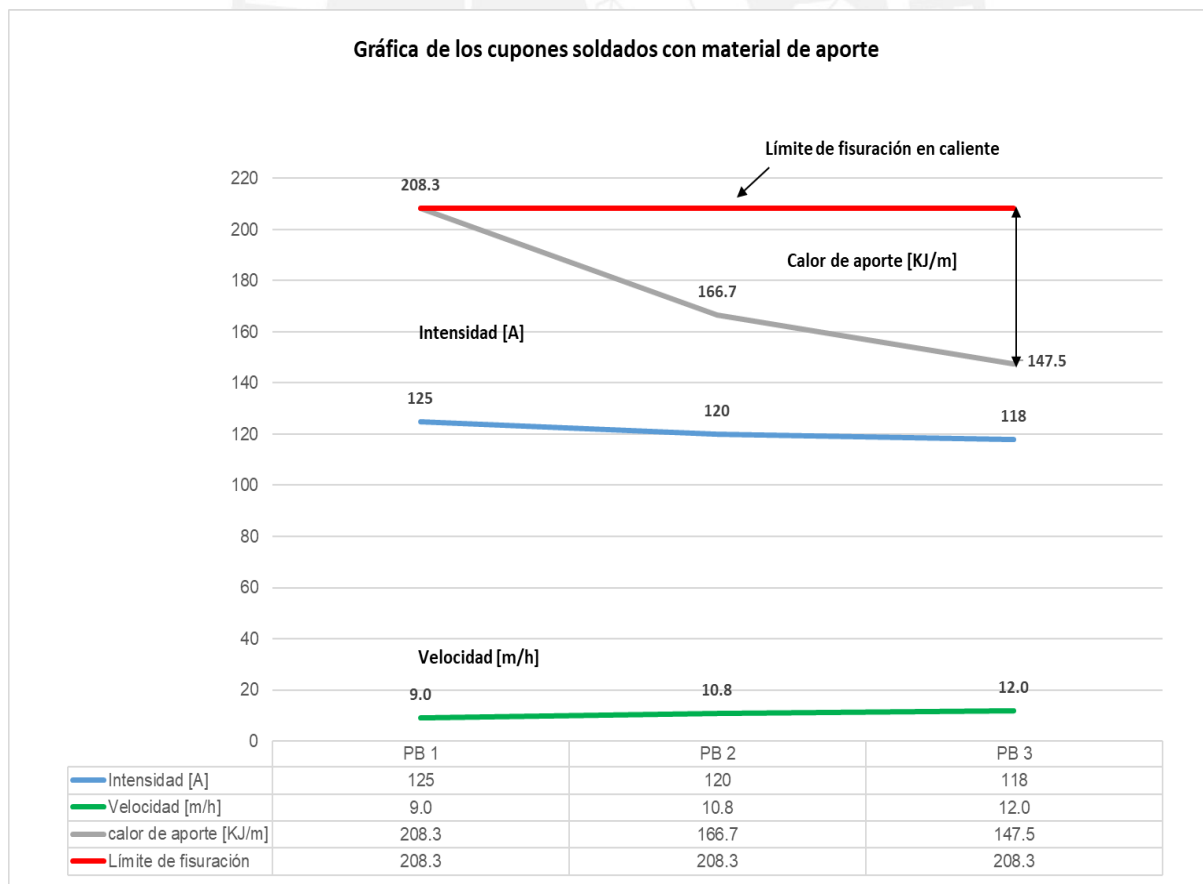


Figura 41.- Niveles de calor de aporte en un cordón soldado con material de aporte

3.2.7.2. Uniones soldadas sin material de aporte

De manera similar a la soldadura de cupones con material de aporte, se obtuvieron tres cupones sin material de aporte. Estos cupones fueron sometidos a variaciones de los parámetros de soldeo como la intensidad, velocidad de soldeo, ligeros cambios de ángulos de inclinación, entre otros. Con el fin de encontrar los cupones óptimos se utilizó, para el presente caso, la soldadura mecanizada mediante el uso del Welding car mencionado en el capítulo anterior. A continuación, se detalla los parámetros utilizados y los resultados para cada cupón soldado.

El primer cupón fue soldado con una intensidad de 140 A en corriente alterna balanceada y una velocidad de 30 cm/min. A estas condiciones se produjo una fisuración en caliente en la cara del cordón de soldadura. El principal motivo de la fisuración fue por efecto del gran aporte de calor y que debido a las bajas velocidades de soldeo para el caso sin material de aporte la velocidad de enfriamiento no fue la esperada. El calor de aporte de acuerdo a la Ecuación 3 fue de 116,7 kJ/m. Las fisuraciones en caliente se presentaron en alrededor de 4 cm. De acuerdo con la Ecuación 5, el índice de fisuración en caliente fue elevado con un valor porcentual de 21,05%.

$$IFC = \frac{\Sigma \text{Longitud de la fisura}}{\text{Longitud total del cordón}} * 100\% = 21,05\% \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

Al observar que la tendencia de la fisuración en caliente se presentaba por el efecto de la intensidad de soldeo, velocidad de soldeo y la velocidad de enfriamiento. Con el fin de evitar este efecto en los cordones se modificaron los parámetros como se muestra en los siguientes cupones.

En el segundo cupón, se disminuyó la intensidad de soldeo en 2 A. Asimismo se aumentó la velocidad de soldeo a 35 cm/min con un desbalance de corriente alterna al 55% de polaridad negativa, se verificó que al disminuir la intensidad y aumentar la velocidad de soldeo se obtuvo una disminución en el calor aportado en 18 kJ/m de esta manera al disminuir el calor se evitó la fisuración en caliente. Sin embargo, el cordón de soldadura presentó porosidades.

Con el fin de mejorar el acabado superficial se realizó la soldadura del tercer cupón sin material de aporte, disminuyendo levemente la intensidad de soldeo a 135 A y manteniendo constante la velocidad de soldeo en 35 cm/min. Se observó que para ambos cupones se obtienen buenos acabados superficiales. Sin embargo, el tercer cupón presentó menor cantidad de porosidades a lo largo del cordón.

En la Tabla 25 se muestran los calores de aporte para cada cupón; asimismo, cabe resaltar que el cupón N° 1 fue el único que obtuvo fisuración en caliente, por tal motivo, se ha considerado a este como el límite de calor aportado. (Véase Figura 42).

Tabla 25.- Calor de aporte para los cupones sin material de aporte

Pruebas	Intensidad (A)	Velocidad (cm/min)	Calor de aporte (kJ/m)
PB1	140	30	116,7
PB2	138	35	98,6
PB3	135	35	96,4

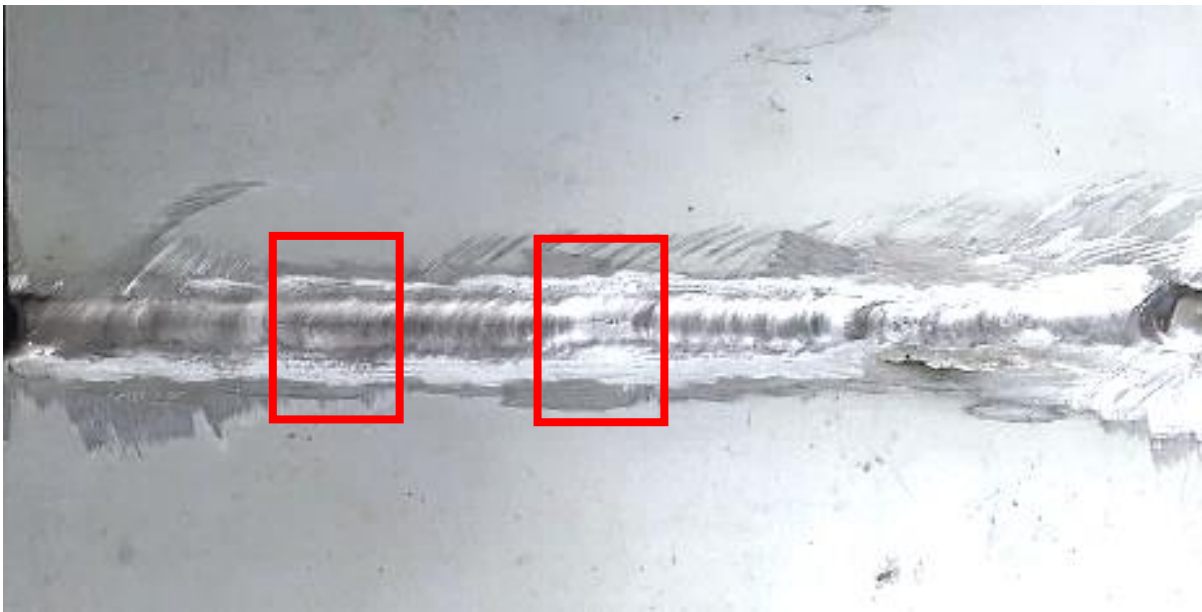


Figura 42.- Unión soldada sin material de aporte

En la Figura 43 se muestra las curvas de calor de aporte frente a la intensidad y la velocidad de soldeo, en donde el límite para que un material base de aluminio AA5052 H34 se fisure sin material de aporte es igual o mayor a 116,7 kJ/m.

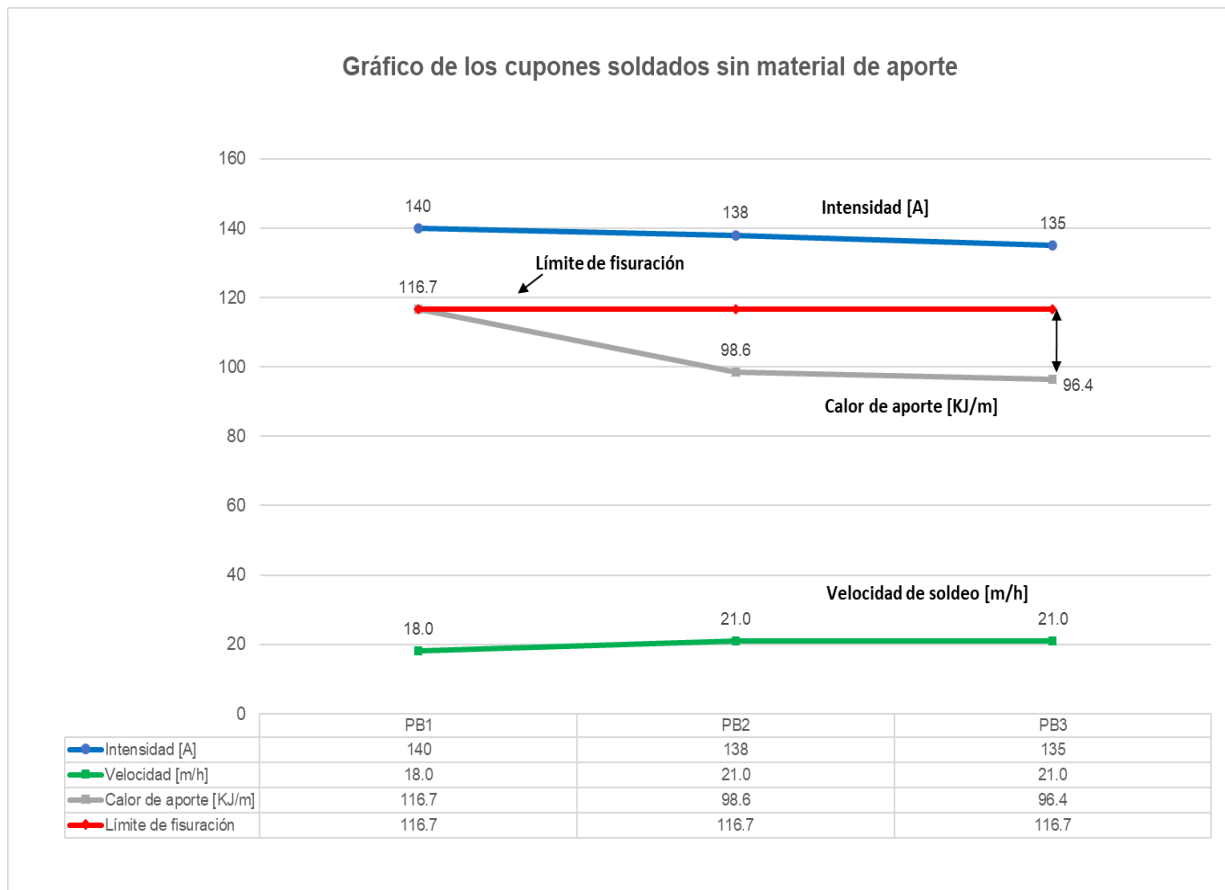


Figura 43.- Niveles de Calor de aporte en un cordón soldado sin material de aporte

3.2.8. Resultados de los ensayos no destructivos

3.2.8.1. Inspección visual

Se realizó inspección la visual a 2 cupones para ambos casos. Para ello, se tomaron dos muestras, 1 cupón soldado de baja calidad y otro cupón de alta calidad. El fin de este análisis fue de comparar la calidad de las uniones soldadas, asimismo, evitar, en adelante, malos resultados de los cordones.

a) Uniones soldadas con material de aporte

Al realizar la inspección visual al cupón soldado de baja calidad, se observó una fisuración en caliente en la raíz del cordón. Se dimensionó la fisura y se determinó que aproximadamente medía 21 mm. De acuerdo con el inciso 3.3.4.1, esto representaba que el calor de aporte había sobrepasado el límite de 208 kJ/m; por lo tanto, fue evidente que la causa fue el exceso de calor y la baja velocidad de soldadura. Por otro lado, en la cara opuesta se observó un cordón no uniforme y falta de penetración en los extremos como se muestra en la Figura 40.

Al realizar la inspección visual al cupón soldado de alta calidad, se observó que el cordón presentaba porosidades en mayor presencia en los extremos. Este cupón soldado fue realizado con una intensidad de corriente de 118 A y un avance de 20 cm/min en el semiciclo de corriente alterna. Los resultados a inspección visual fueron los adecuados pues las porosidades presentes (en cantidad) no representan una causa para considerarse como defectos. En la Figura 44 se observa las porosidades presentes en los extremos del cordón.



Figura 44.- Porosidades en el cordón con material de aporte

b) Uniones soldadas sin material de aporte

Al realizar la inspección visual al cupón soldado de baja calidad, se observó una fisuración en caliente en la raíz del cordón. Se dimensionó la fisura y se determinó que medía 43 mm. De acuerdo con el inciso 3.3.4.1, esto representaba que el calor de aporte había sido mayor o igual al límite de 116 kJ/m; por lo tanto, es evidente que la causa fue la baja velocidad de soldeo que no fue controlada de manera adecuada con el carro de soldadura. Asimismo, en la cara opuesta se observó una fisuración en cráter en el centro del cordón. Para mayor análisis se evaluó en base a otros ensayos no destructivos (tintes penetrantes y radiografía industrial).

Por otro lado, se inspeccionó el cupón soldado con mejores características. El cual fue obtenido con una intensidad de 135 A, velocidad de soldeo de 35 cm/min en corriente alterna con un desbalance al 55% en polaridad positiva. Con estas condiciones se obtuvieron cordones con buena penetración y sin discontinuidades. En la Figura 45 se muestra el cordón con buenas características físicas.

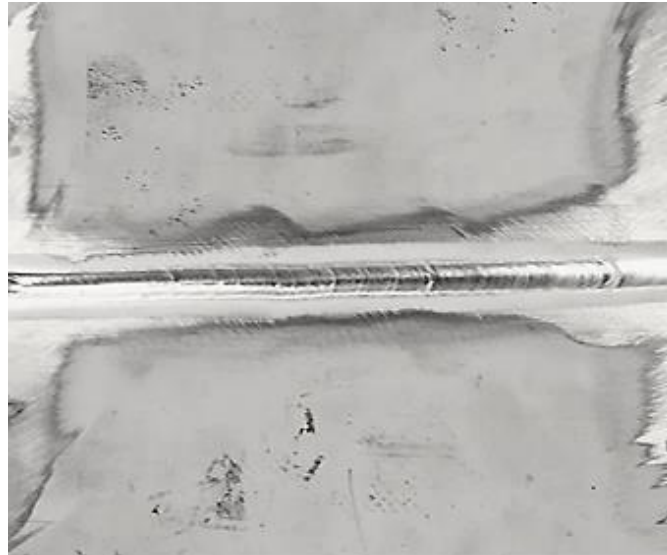


Figura 45.- Cupón soldado en óptimas condiciones sin material de aporte

3.2.8.2. Tintes penetrantes

Se realizaron tintes penetrantes coloreados a los cupones con y sin material de aporte que por inspección visual presentaron mayores discontinuidades.

a) Uniones soldadas con material de aporte

A partir de la inspección visual se observó que el cupón soldado con material de aporte presentaba alteraciones en el cordón de soldadura (cordón no uniforme con diferentes dimensiones y fisuración en caliente). En ese sentido, el cupón fue sometido al ensayo con tintes penetrantes coloreados, así como como la limpieza y el revelado, propios del procedimiento desarrollado en el capítulo 2. Como consecuencia de dicho ensayo, los resultados arrojaron la ausencia de penetración en el centro y los extremos del cordón; asimismo, el ensayo determinó que no existe presencia de la fisuración en caliente en la raíz del cordón.

En la Figura 46 y Figura 47. se puede observar los cupones antes y después del ensayo.

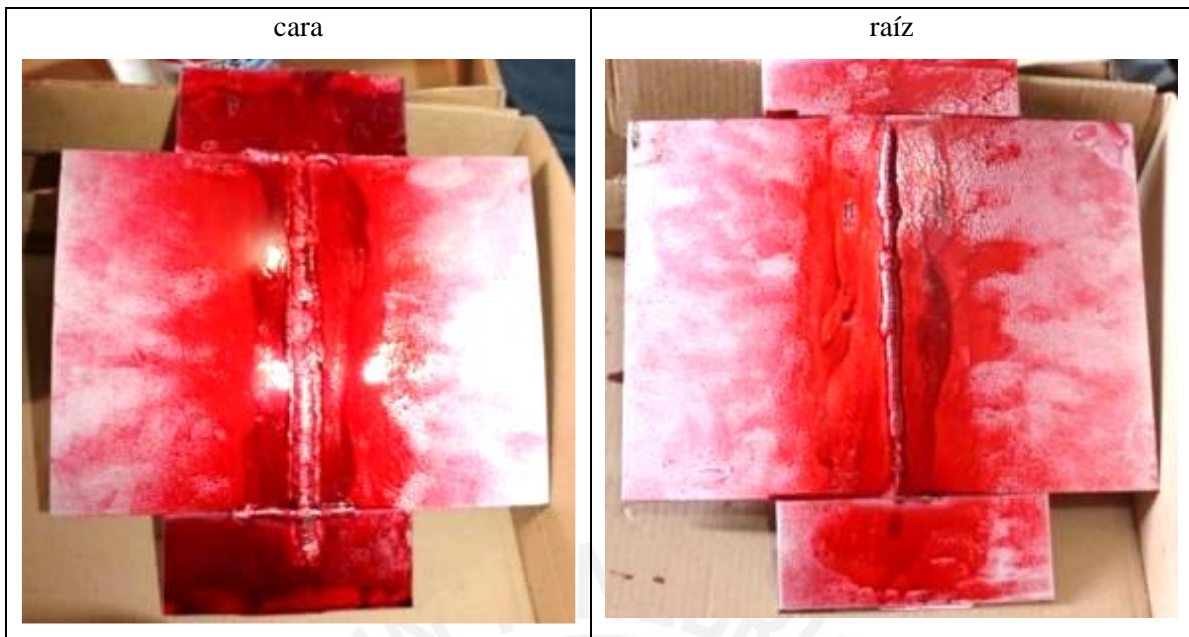


Figura 46.- Tintes penetrantes coloridos al cupón con material de aporte



Figura 47.- Cupón soldado con material de aporte con revelador

b) Uniones soldadas sin material de aporte

A partir de la inspección visual se observó el cupón soldado sin material de aporte presentó alteraciones en el cordón soldado (Presencia de fisuración en la cara y raíz). En ese sentido, el cupón fue sometido al ensayo con tintes penetrantes coloridos, así como como la limpieza y el revelado, propios del procedimiento desarrollado en el capítulo 2. De los resultados obtenidos se observó la presencia de fisuraciones longitudinales, fisuración en cráter presente en la raíz del cordón y porosidades en el centro y extremos del cordón. En las Figura 48, Figura 49 y Figura

50 se pueden observar las fisuraciones presentes en la cara y raíz del cordón de soldadura. Asimismo, la presencia de porosidades.

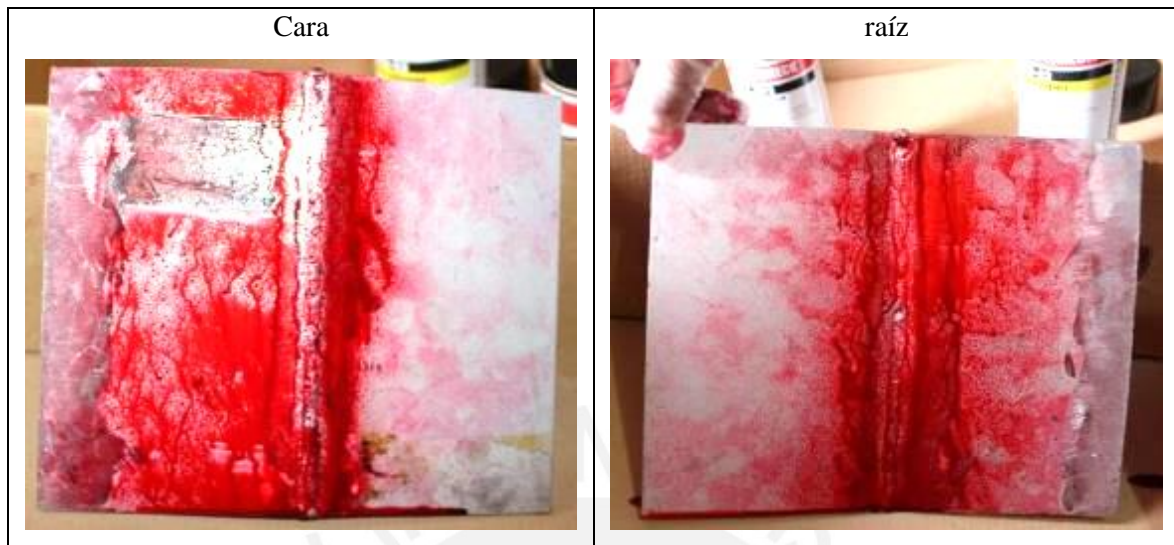


Figura 48. Tintes penetrantes coloridos al cupón sin material de aporte



Figura 49.- Cupón soldado sin material de aporte con revelador

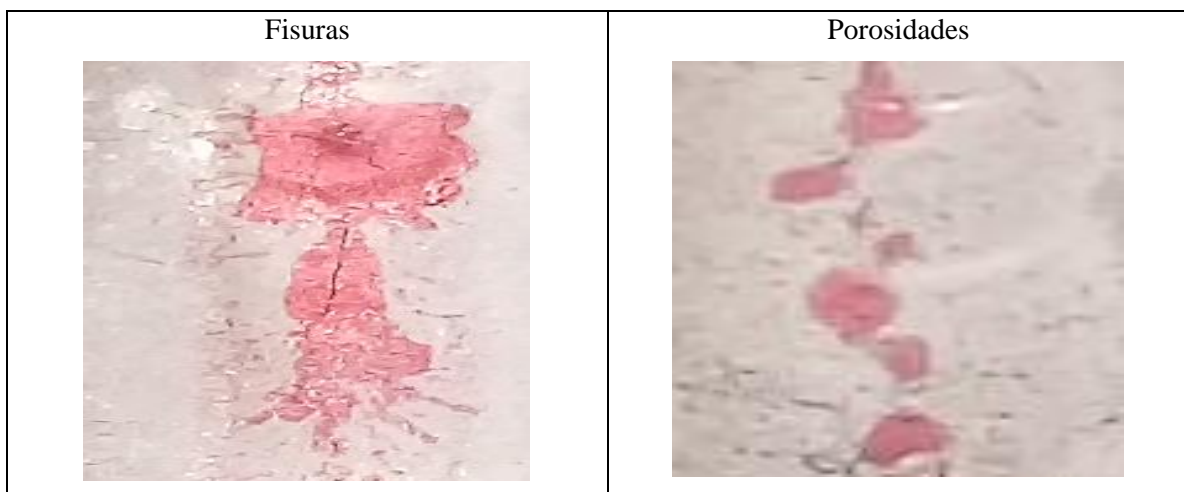


Figura 50.- Cupón soldado sin material de aporte con revelador

3.2.8.3. Radiografía Industrial

Con el fin de complementar el análisis de estos cupones soldados se observó con una radiografía los defectos volumétricos para cada caso.

Este ensayo fue realizado a los mismos cupones que fueron sometidos a tintes penetrantes. En la Figura 51 se muestra la radiografía del cupón soldado con material de aporte el cual presenta falta de penetración y un cordón no uniforme.

Asimismo, en la Figura 52 se muestra la radiografía sin material de aporte el cual presenta porosidades en los extremos y en el centro del cordón.



Figura 51.- Radiografía cupón con material de aporte



Figura 52.- Radiografía cupón sin material de aporte

En la Tabla 26 se muestran los registros de la radiografía industrial para ambos cupones. Estas fotografías han sido obtenidas a partir de un negatoscopio.

Tabla 26.- Registros en la radiografía Industrial

Componente	Longitud del Cordón	Tipo y ubicación de la discontinuidad	Forma y Tamaño de la discontinuidad
Cordón sin material de aporte	19 cm	Porosidad a 18 cm del cordón	Discontinuidad agrupada de 15 mm
	19 cm	Cráter central	Discontinuidad puntual
	19 cm	Ausencia de penetración	Discontinuidad en los extremos y centro
Cordón con material de aporte	19 cm	Soldeo en frío de los cordones	Discontinuidad lineal

Seguidamente, se mostrarán los resultados de las técnicas de caracterización de las uniones soldadas.

3.2.9. Caracterización mecánica

3.2.9.1. Ensayo de tracción

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por medio del ensayo a tracción de las probetas fabricadas a partir de las uniones soldadas con y sin material de aporte.

El objetivo del ensayo de tracción fue obtener la resistencia máxima a la cual las uniones soldadas con y sin material de aporte fueron sometidas antes de la rotura.

a) Uniones soldadas sin material de aporte

En la Tabla 27 se muestran los resultados del ensayo de tracción para las probetas soldadas sin material de aporte. Para el presente caso se obtuvo una resistencia máxima en promedio de 174 MPa. Aproximadamente se incrementó en un 2% al valor de resistencia con respecto al valor normativo según AWS D.1.2 [23]. Se debe tener en cuenta que el aluminio previamente deformado en frío pierde el endurecimiento alcanzado por la deformación debido al ciclo térmico de la soldadura, que hace que se regenere la microestructura en la ZAC; por lo tanto, disminuye su resistencia a la tracción y su dureza.

Tabla 27.- Resultados del ensayo de tracción sin material de aporte

Ensayo de tracción sin material de aporte					
Probeta	Sección transversal	Fuerza de Fluencia	Esfuerzo de fluencia	Fuerza máxima	Esfuerzo máximo
	(mm ²)	(kN)	MPa	(kN)	MPa
A1	101,5	8,6	84,91	18,8	185,1
A2	106,8	9,1	89,84	20,0	187,3
A3	104,2	9,1	87,87	16,7	162,1
B1	104,8	10,1	95,12	19,7	185,4
B2	107,6	8,6	79,98	16,7	155,3
B3	106,1	7,1	68,03	18,4	176,8
C1	103,3	9,3	87,64	17,3	163,1
C2	104,3	8,3	79,39	18,0	171,4
C3	105,9	9,2	87,75	19,0	181,9
Promedio	104,9	8,8	85,05	18,29	174,2

A modo de resumen, se puede observar que la probeta de menor valor de esfuerzo máximo es la probeta A3 la cual alcanzó un valor de 155 MPa. Esta probeta se sustrajo de la parte inicial de soldeo del cupón. Esta sección no alcanzó una fusión adecuada, pues la rotura se presentó en el baño fundido debido a una variación del aporte de calor.

Es por ello, que la probeta presentó los menores valores de resistencia máxima. En la Figura 53 se muestra la rotura de la probeta, en donde se visualiza la rotura en la misma en el baño fundido. Al observar la estructura interna en la Figura 54 se confirmó la presencia de porosidad. La mayoría de las probetas sin material de aporte rompieron en el baño fundido (BF) como se observa en la Figura 55.



Figura 53.- Rotura de la probeta sin material de aporte



Figura 54.- Porosidad y falta de fusión en la estructura interna de una probeta sin material de aporte

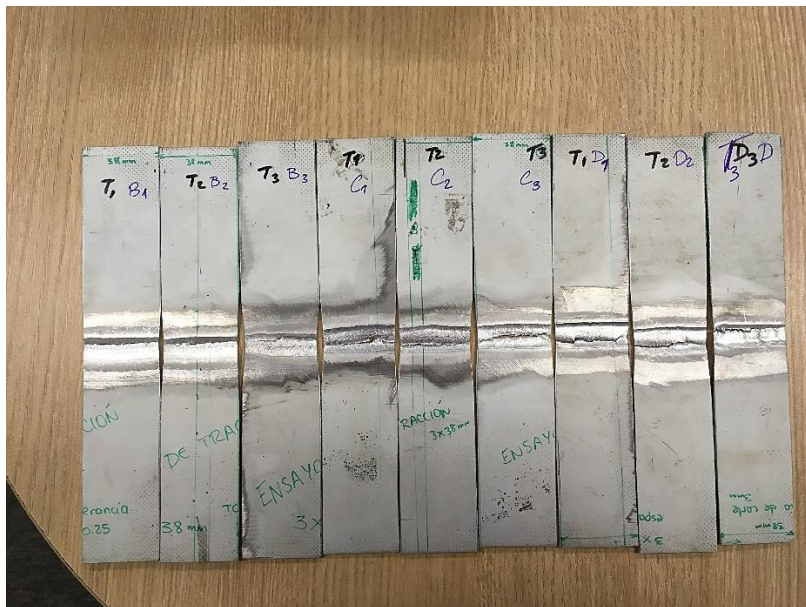


Figura 55.- Roturas de las probetas sin material de aporte

b) Uniones soldadas con material de aporte

En la Tabla 28 se muestran los resultados del ensayo de tracción para las probetas obtenidas de los cupones soldados con material de aporte. Se podría pensar que el material de aporte tiende a incrementar la resistencia de la unión soldada. Sin embargo, para el presente caso se obtuvo una resistencia máxima en promedio de 177 MPa. Este valor es ligeramente mayor al valor de resistencia mínima de 170 MPa según la norma AWS D1.2. Aproximadamente se incrementa en un 4% en el valor de resistencia con respecto al valor normativo.

Tabla 28.- Resultados del ensayo de tracción con material de aporte

Ensayo de tracción con material de aporte					
Probeta	Sección transversal	Fuerza de fluencia	Esfuerzo de fluencia	Fuerza máxima	Esfuerzo máximo
	(mm ²)	(kN)	MPa	(kN)	MPa
E1	101,2	9,0	86,1	18,3	175,2
E2	105,4	8,6	82,1	19,3	183,6
E3	109,2	8,0	76,0	18,1	185,4
F1	101,9	7,9	75,0	18,6	172,3
F2	102,2	8,5	80,9	19,2	177,5
F3	107,5	7,6	72,3	18,2	183,1
G1	103,1	7,0	66,9	18,1	173,8
G2	103,7	6,1	58,3	18,6	173,7
G3	103,2	5,7	54,3	18,5	172,1
Promedio	104,1	7,6	72,4	18,6	177,4

Como se puede visualizar en la Tabla 28 el valor mínimo se produce con 18,5 KN aproximadamente en 172 MPa si bien este valor está cercano a los 170 MPa, cumple con los valores mínimos de tracción. En la Figura 56 la rotura se presenta en el material base. Asimismo, la mayoría de las probetas rompieron en la zona del material base y ZAC.

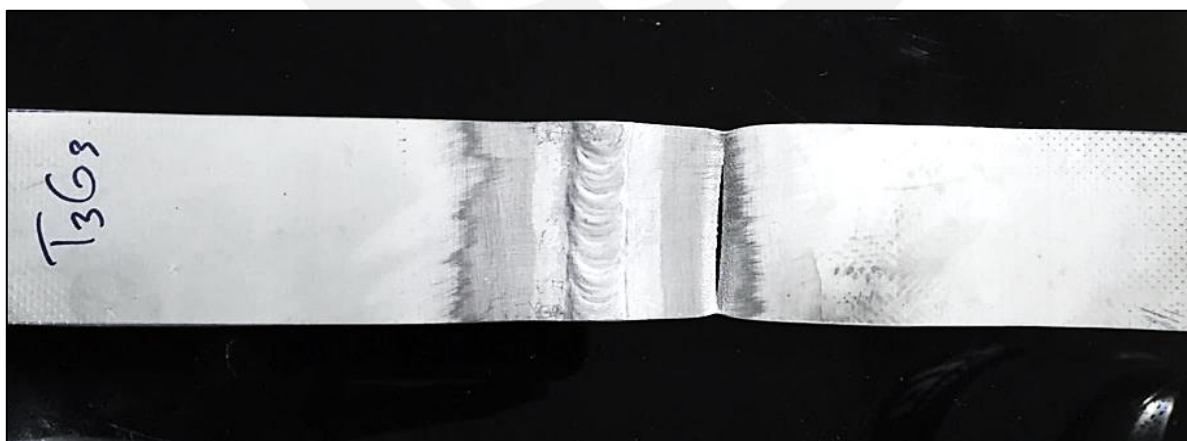


Figura 56.- Rotura de la probeta con material de aporte

3.2.9.2. Ensayo de dureza Vickers

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a través del ensayo de dureza realizada para las muestras (briquetas) con y sin material de aporte. El ensayo de barrido de dureza se realizó para 13 puntos como se muestra en el capítulo anterior.

a) Uniones soldadas sin material de aporte

En la Tabla 29 se presentarán los resultados obtenidos de la medición de la dureza para dos muestras sin material de aporte.

Donde D1 y D2 indican las dimensiones de las dos diagonales dejadas por la huella de indentación y “D” el promedio, el valor de la semisuma de las diagonales dejadas por la huella. Asimismo, el valor de dureza fue evaluada por el equipo y contrastado de acuerdo al cálculo desarrollado en el capítulo 2.

Tabla 29.- Resultados de ensayo de dureza para probetas sin material de aporte

Ensayo de dureza sin material de aporte (Primera probeta)						
Probeta		Mediciones			Dureza HV10	Zona
		D1(um)	D2(um)	D prom(um)	HV	
1	1	175,3	178,8	177,1	59,2	MB
	2	174,4	178,5	176,5	59,6	
	3	180,5	179,8	180,2	57,1	ZAC
	4	182,1	180,3	181,2	56,5	
	5	182,4	181,3	181,9	56,1	
	6	184,2	182,9	183,5	55,0	BF
	7	182,9	183,7	183,3	55,2	
	8	182,0	181,8	181,9	56,0	
	9	182,3	180,9	181,6	56,2	ZAC
	10	180,9	180,8	180,9	56,7	
	11	180,2	179,7	179,9	57,3	
	12	177,2	175,8	176,5	59,5	MB
	13	176,1	174,7	175,4	60,3	

Ensayo de dureza sin material de aporte (Segunda Probeta)						
Probeta	Mediciones			Dureza HV10	Zona	
	D1(um)	D2(um)	D prom(um)	HV		
2	1	175,5	178,5	177,0	59,2	MB
	2	177,6	177,7	177,7	58,8	
	3	180,1	180,4	180,3	57,1	ZAC
	4	181,8	180,2	181,0	56,6	
	5	182,3	180,4	181,4	56,4	
	6	182,7	181,2	181,9	56,0	BF
	7	183,2	182,1	182,7	55,6	
	8	180,9	183,2	182,1	55,9	
	9	180,2	181,1	180,7	56,8	ZAC
	10	179,7	180,9	180,3	57,0	
	11	178,8	180,9	179,9	57,3	
	12	177,3	176,2	176,8	59,4	MB
	13	177,4	174,2	175,8	60,0	

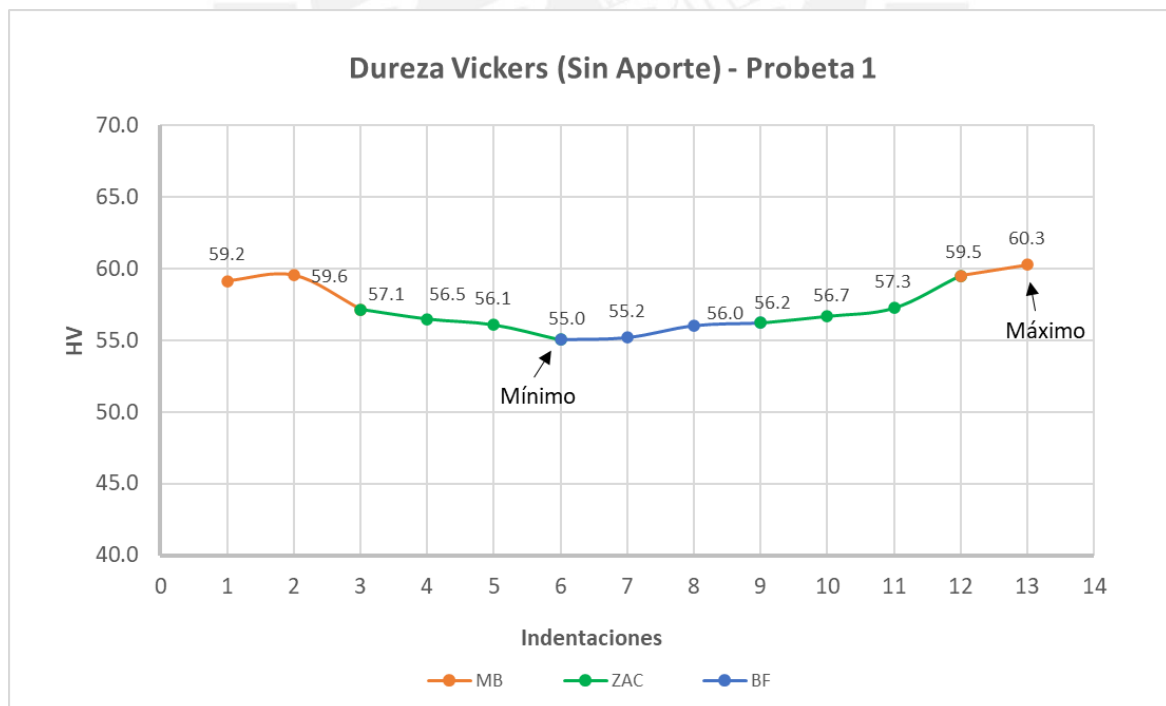


Figura 57.- Dureza Vickers en la primera probeta (sin aporte)

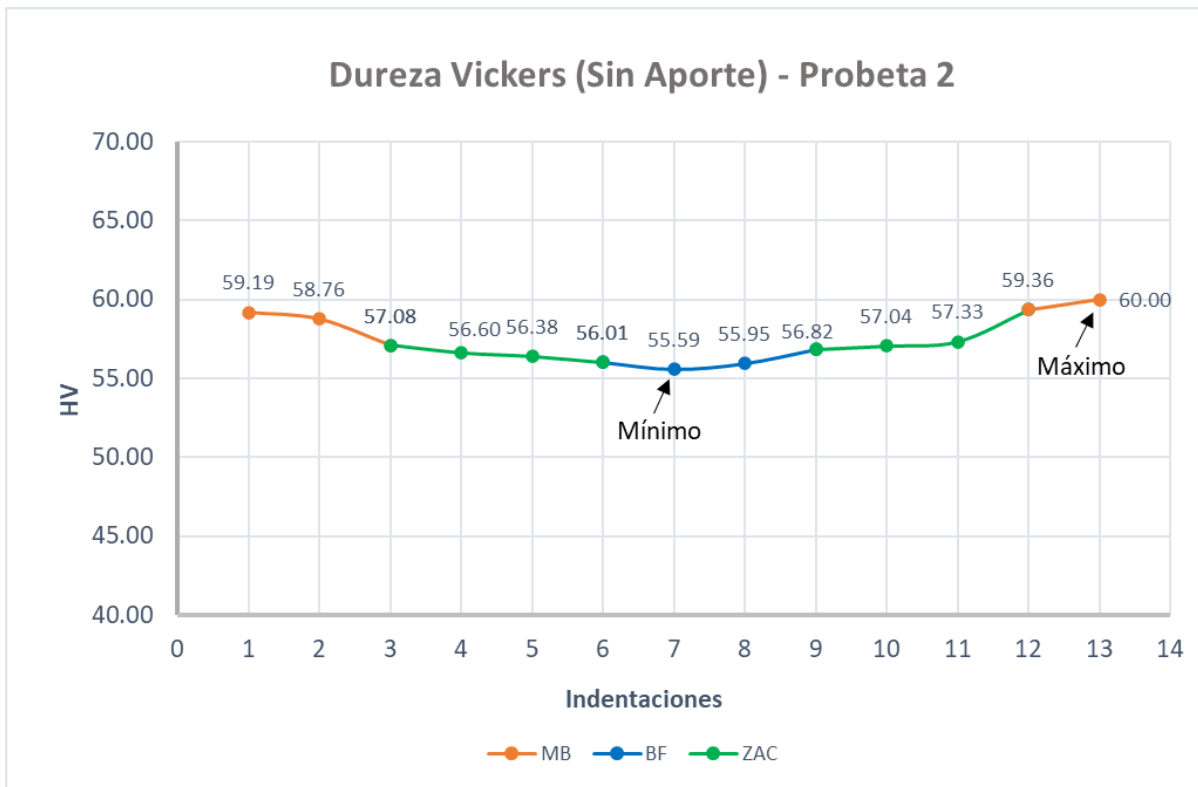


Figura 58.- Dureza Vickers en la segunda probeta (sin aporte)

De acuerdo con los gráficos de la probeta 1 y probeta 2 se alcanzó los valores de dureza máximos en la zona del material base. En la Figura 57 se muestra que el valor máximo de dureza fue de 60,3 HV, el cual corresponde al MB. Asimismo, el valor máximo de dureza para la probeta 2 fue de 60 HV como se muestra en la Figura 58. Por el contrario, los valores de dureza más bajos se encuentran en la zona del baño fundido (BF).

b) Uniones soldadas con material de aporte

En la Tabla 30 se presentan los resultados obtenidos de la medición de la dureza para las briquetas con material de aporte.

Tabla 30.- Resultados del ensayo de dureza para probetas con material de aporte

Ensayo de dureza con material de aporte (Primera probeta)						
Probeta		Mediciones			Dureza HV10	Zona
		D1(um)	D2(um)	Dprom(um)	HV	
1	1	177,8	177,4	177,6	58,8	MB
	2	178,3	177,6	177,9	58,6	
	3	180,7	181,5	181,1	56,5	ZAC
	4	180,9	181,5	181,2	56,5	
	5	181,1	180,2	180,7	56,8	
	6	176,1	175,6	175,8	59,9	BF
	7	170,8	170,4	170,6	63,7	
	8	173,1	174,8	173,9	61,3	
	9	178,6	180,2	179,4	57,6	ZAC
	10	181,8	180,3	181,1	56,6	
	11	179,4	180,9	180,1	57,1	
	12	176,6	176,9	176,8	59,4	MB
	13	176,7	174,2	175,5	60,2	

Ensayo de dureza con material de aporte (Segunda Probeta)						
Probeta		Mediciones			Dureza HV10	Zona
		D1(um)	D2(um)	Dprom(um)	HV	
2	1	175,7	176,9	176,3	59,7	MB
	2	175,9	176,6	176,3	59,7	
	3	180,7	179,5	180,1	57,2	ZAC
	4	180,7	180,4	180,5	56,9	
	5	181,1	181,5	181,3	56,4	
	6	174,8	173,9	174,4	61,0	BF
	7	170,1	170,4	170,3	63,9	
	8	170,4	172,1	171,3	63,2	
	9	175,6	179,2	177,4	58,9	ZAC
	10	180,3	180,9	180,6	56,9	
	11	180,5	181,6	181,1	56,6	
	12	175,6	176,7	176,2	59,8	MB
	13	175,7	175,2	175,5	60,2	

En la Figura 59 se muestra que la dureza para la primera probeta varía desde 56,4 hasta 63,7 HV, en donde el mayor valor de dureza se presenta en la zona de baño fundido (BF) y el menor en la ZAC.

En la Figura 60 se muestra la variación de la dureza para la segunda probeta, en donde se obtienen valores desde 56,4 hasta 63,9 HV. Al igual que en la primera probeta se presenta la

misma tendencia de la dureza, el valor máximo se encuentra en el baño fundido (BF) y el valor mínimo en la ZAC.

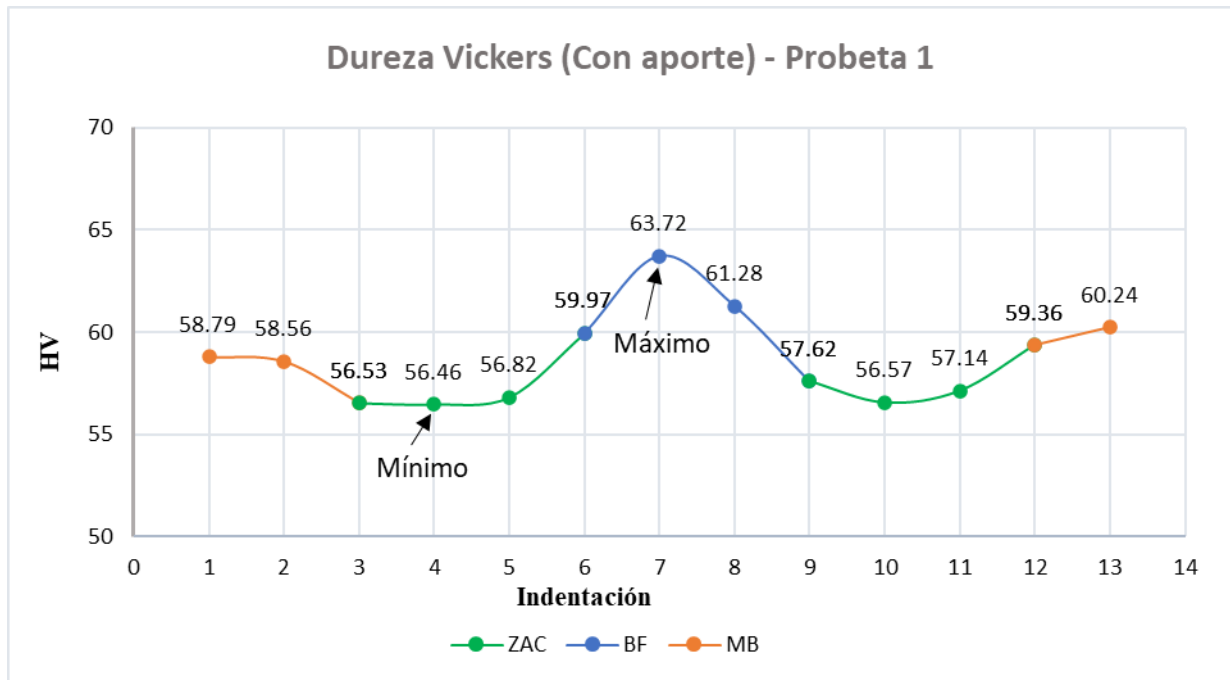


Figura 59.- Dureza Vickers en la primera probeta (con aporte)

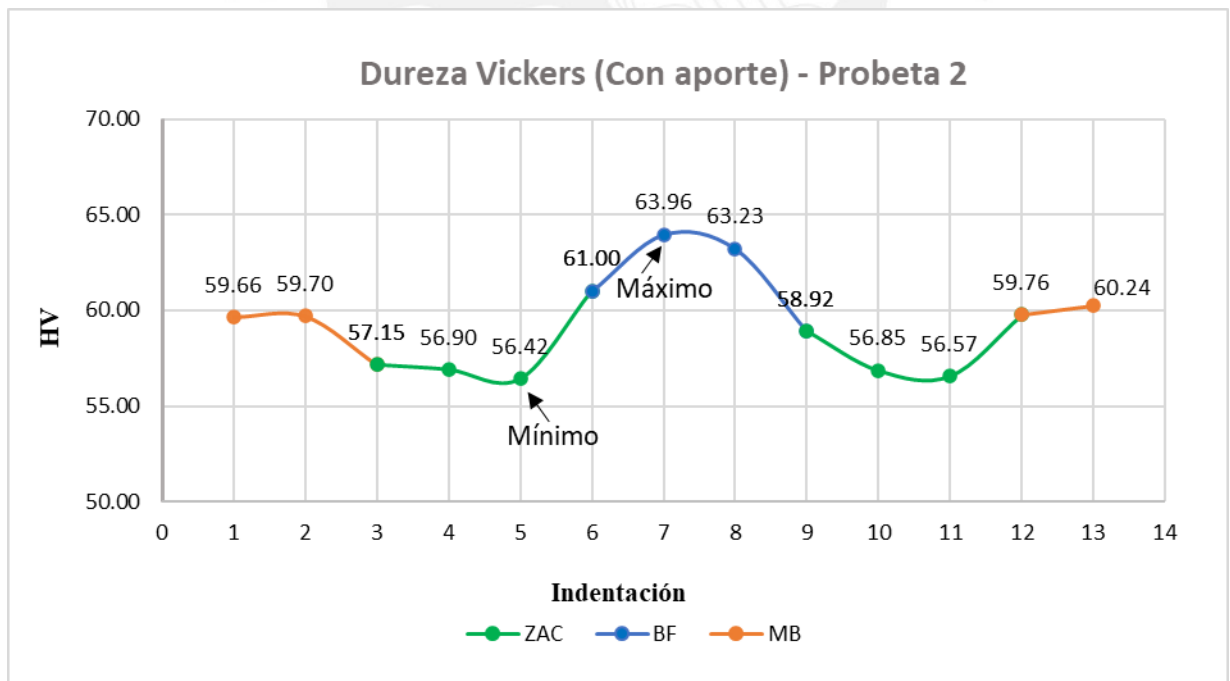


Figura 60.- Dureza Vickers en la segunda probeta (con aporte)

3.2.9.3. Ensayo de doblado

En las siguientes figuras se muestra los resultados de los ensayos de doblado transversal de cara y raíz realizados a las probetas obtenidas de los cupones soldados de acuerdo a la normativa AWS D1.2. [23]

En la Figura 61 se muestran los resultados de los ensayos de doblado de las probetas soldadas sin material de aporte. En la figura de la izquierda se muestra el doblado de cara y en la derecha el doblado de raíz. En ninguna de las figuras no se evidenció fisuración o agrietamiento. Para su aceptación de acuerdo a la normativa AWS D.1.2 no debe haber presencia de discontinuidades en la superficie superior a 3 mm. Para el presente caso los resultados cumplen con la normativa.

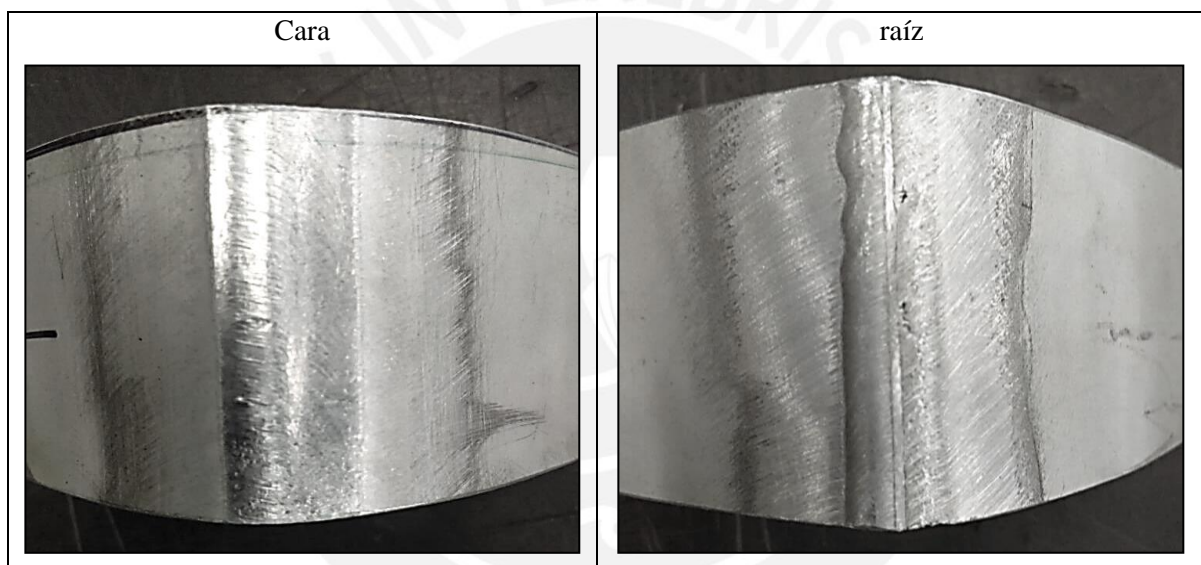


Figura 61.- Doblando de cara (izquierda) y raíz (derecha) sin aporte

Por otro lado, en la Figura 62 se muestran los resultados del ensayo de doblado para las probetas soldadas con material de aporte. A la izquierda se muestra el doblado de cara y a la derecha el doblado de raíz. Al igual que el caso sin material de aporte, no se evidenció agrietamiento o fisuración posterior al Doblado. De acuerdo con la normativa AWS D1.2 estos resultados también son aceptables. [23]

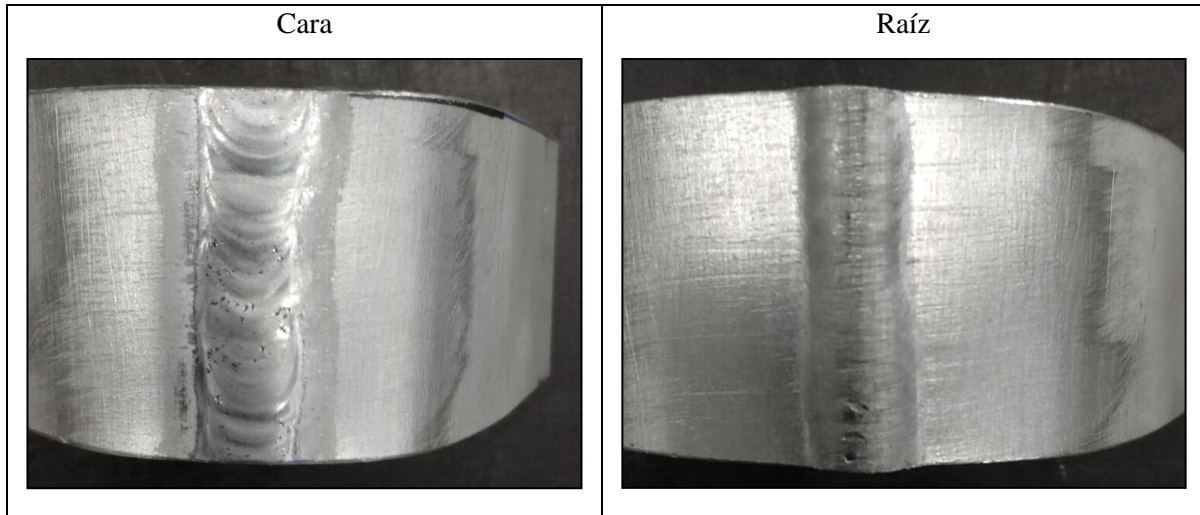


Figura 62.- Doblado de cara (izquierda) y raíz (derecha) con aporte

3.2.10. Caracterización microestructural

En esta sección se observa la microestructura de los perfiles de los cordones de soldadura con y sin material de aporte desde el metal base hasta la base fundida.

a) Sin material de aporte

En la Figura 63 se muestra la microestructura del material base a la izquierda a 50 aumentos y a la derecha la zona de transición del MB hacia la ZAC con el mismo aumento. Se observó un ligero cambio en el tamaño de grano, al aumentar mejora sus propiedades dúctiles y lo vuelve menos frágil y duro.

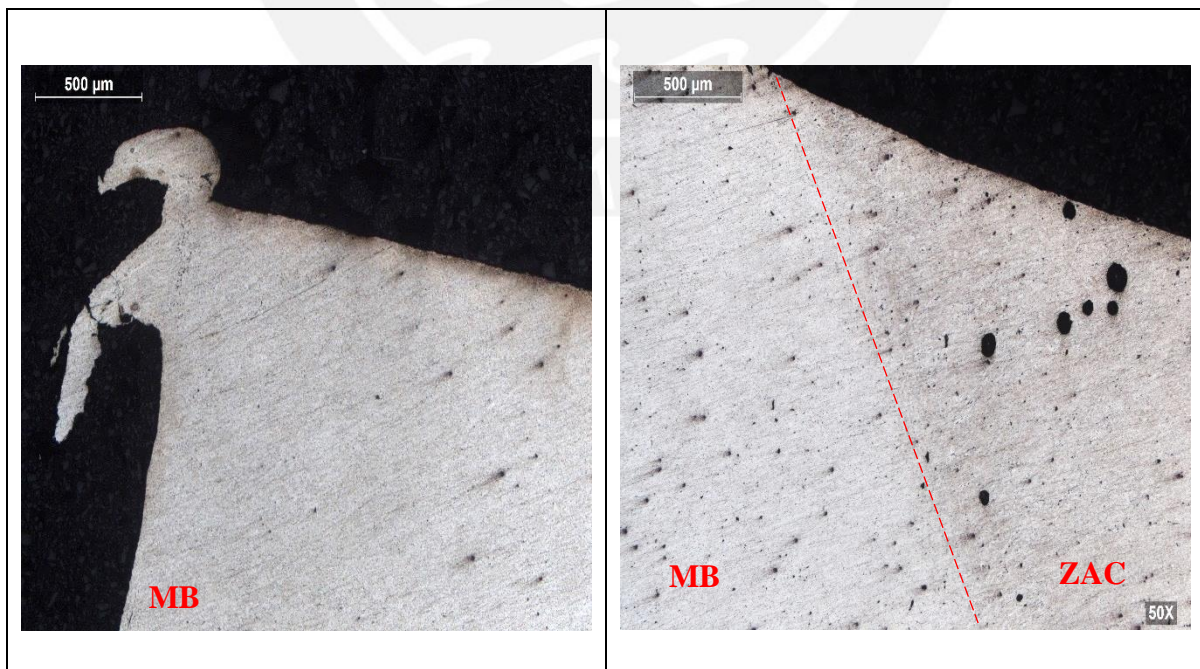


Figura 63.- Microestructura del material base (Izquierda) a 50x y microestructura de la zona de transición ZAC – cordón a 50x (sin aporte)

En la Figura 64 se muestran dos microestructuras. A la izquierda se muestra la microestructura de la transición de la ZAC hacia la BF a 100x, la cual muestra la diferencia en el tamaño de grano. Asimismo, la figura de la derecha muestra la zona fundida con diferentes tamaños y deformación en sus granos. Se puede observar que se presentan gran cantidad de precipitados por la presencia de las porosidades. Asimismo, se aprecia que los granos crecen en dirección a la evacuación del calor, perpendiculares a la línea de fusión. En esta última figura se muestra que el grano deformado alargado representa las porosidades muy frecuentes en materiales como el aluminio. La flecha señala la presencia de un incipiente de fisura en caliente (inicio) que no llega a comprometer las características del cordón de soldadura.

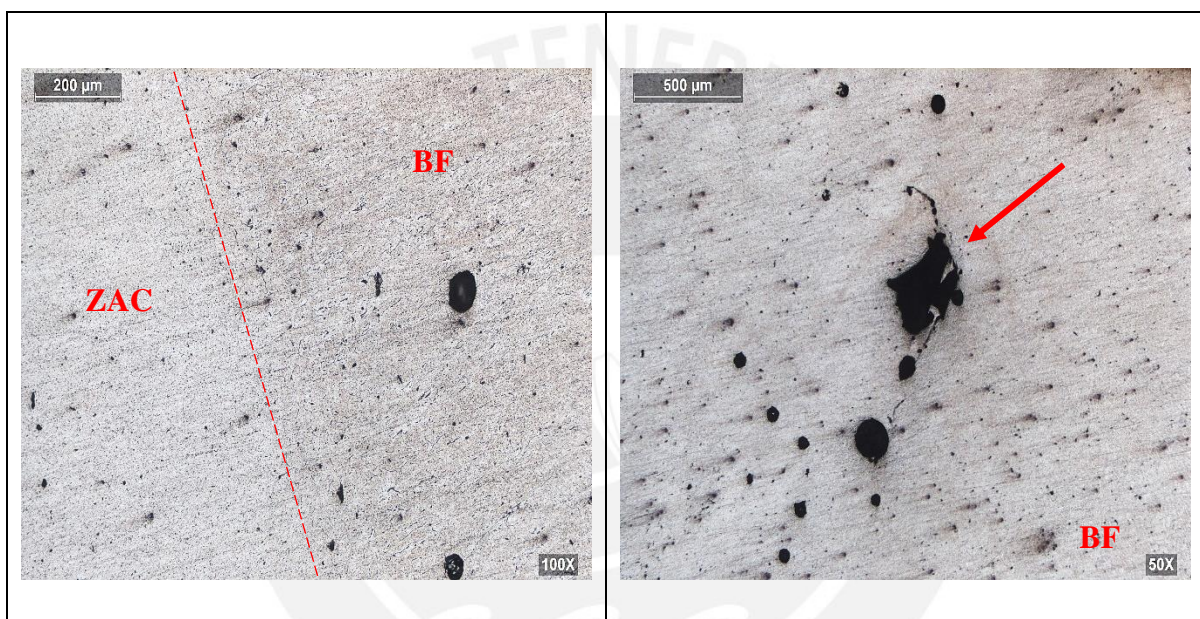


Figura 64.- Microestructura de la Zona ZAC – BF a 100x (Izquierda) y microestructura del cordón BF con presencia de porosidades y cambios en el tamaño de grano a 50x (Derecha).

b) Con material de aporte

En la Figura 65 se muestra la microestructura del perfil del cordón de soldadura con material de aporte. A la izquierda se muestra la microestructura del material base a 500x en la cual se aprecia zonas oscuras con finos precipitados de Mg_2Si (Silicio de magnesio) distribuida uniformemente en una matriz α y a la derecha se muestra la transición ZAC-BF a 100x en la cual se muestra que los precipitados de Mg_2Si se ubican en los límites de las dendritas. Asimismo, se observó cambios en la estructura y el tamaño de grano, al cambiar mejora sus propiedades mecánicas y se vuelve más tenaz, es decir mejora en el baño de fusión; además, se observa que las dendritas crecieron perpendicular a la línea de fusión.

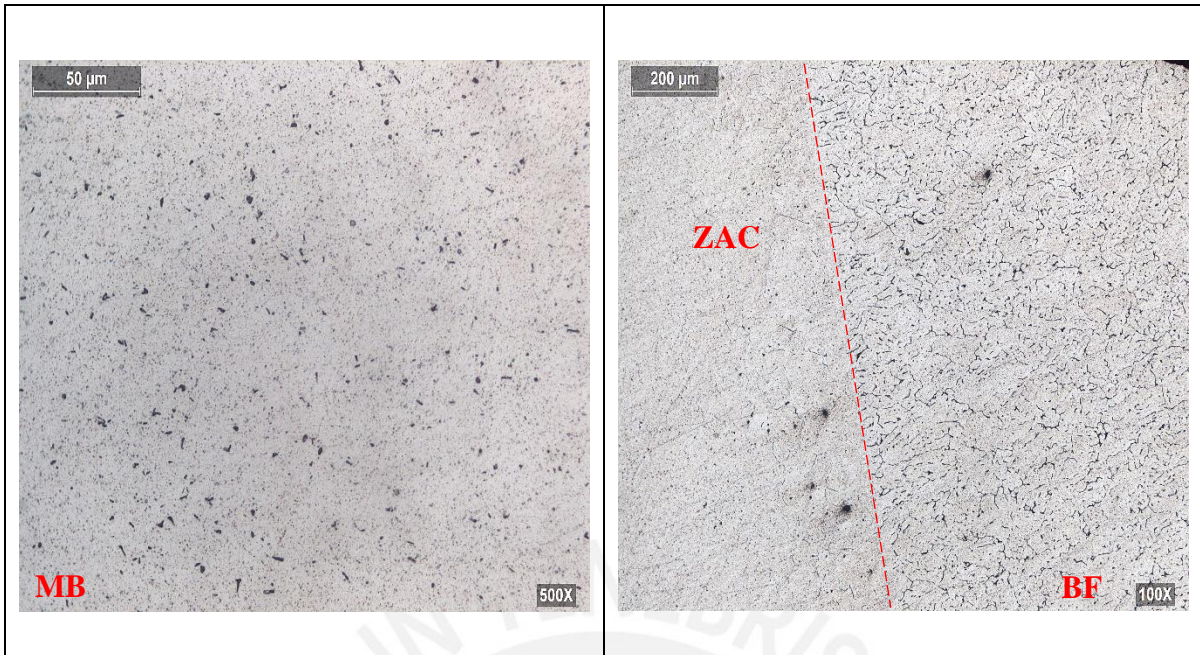


Figura 65.- Microestructura del material base (Izquierda) a 500x y microestructura de la zona de transición ZAC –BF a 100x. (con aporte)

En la Figura 66 se aprecia la microestructura del BF a 100x y la microestructura de la transición de la ZAC – BF a 100x. En las imágenes se puede observar el cambio en el tamaño de grano y el cambio de la estructura en las transiciones.

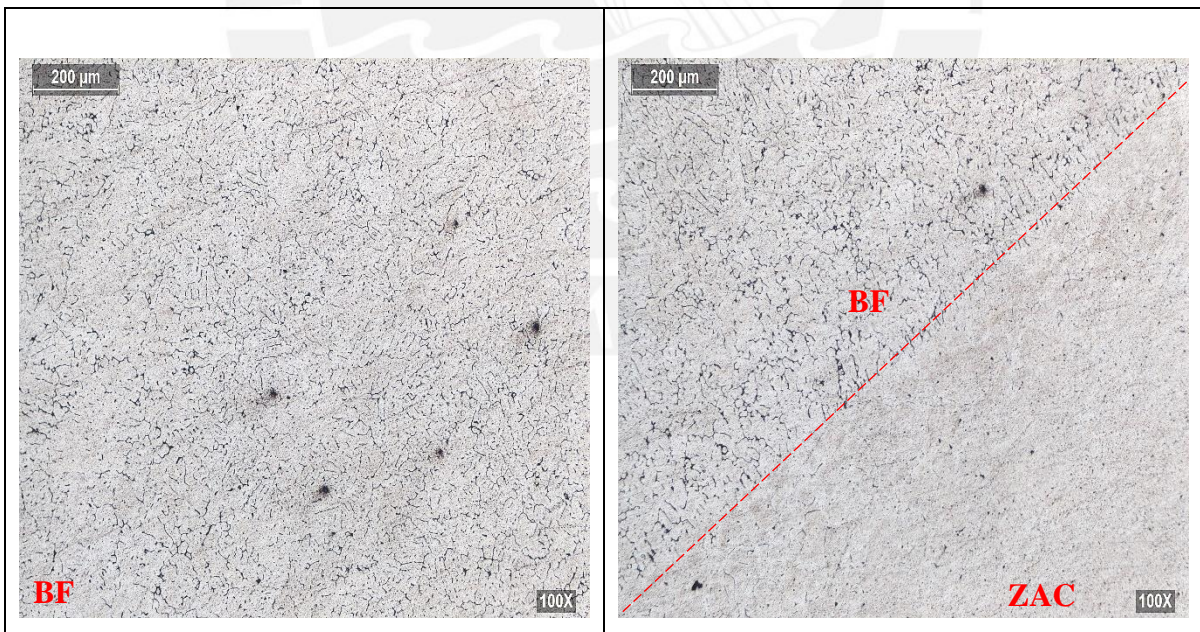


Figura 66.- Microestructura de la BF a 100x (Izquierda) y la microestructura de la zona BF – ZAC a 100x (Derecha)

CONCLUSIONES

1. A partir de los resultados de composición química del material base (AA5052 - H34), se concluye que los valores porcentuales del peso se encuentran dentro del rango de los valores nominales conforme a lo establecido en el estándar ASTM B209. Por otro lado, los resultados del ensayo de tracción arrojaron que los valores de resistencia mecánica para el material base cumplen con los valores establecidos de acuerdo con el estándar ASTM B209.

Del ensayo microestructural al material base, se presentó una microestructura de finos precipitados de siliciuro de magnesio (Mg_2Si) distribuidos en una matriz α (Aluminio).

2. Se variaron los parámetros de soldadura con la finalidad de obtener cordones soldados que presenten fusión y penetración completa; para ello, se fue modificando los valores de la velocidad de soldeo, la intensidad de soldeo y el ángulo de soldeo. Como consecuencia, se obtuvieron los parámetros óptimos que permiten obtener cordones soldados cumpliendo con el código AWS D1.2, satisfactoriamente.

3. De los ensayos realizados se comprueba que las propiedades mecánicas de las uniones soldadas con y sin material de aporte cumplen con los requisitos establecidos por el código AWS D1.2. Ambos tipos de uniones lograron alcanzar valores similares de resistencia a la tracción, alcanzando en ambos casos, valores ligeramente mayores a la resistencia mínima especificada, de 170 MPa, establecida en el código AWS D1.2.

Del resultado del ensayo de dureza, en las uniones sin material de aporte, se encontraron los mayores valores en la zona del material base (MB) no afectado por el ciclo térmico; mientras que, los menores valores, se ubicaron en el baño de fusión (BF) y en la ZAC, básicamente debido a que, en esas zonas, se pierde el endurecimiento por deformación en frío por el ciclo térmico del proceso de soldeo.

Respecto a las uniones con metal de aporte, los valores de dureza fueron mayores en la zona del baño fundido, que corresponde a la dureza del metal de aporte ER5356; mientras que, los menores valores de dureza se ubican en la ZAC.

Por otro lado, en el ensayo de tracción la mayoría de las probetas, sin metal de aporte, rompieron en el baño fundido, lo que concuerda con zonas de menores valores de dureza. Las probetas con material de aporte rompieron en la ZAC, que es la zona que alcanzó los menores valores de dureza.

4. Realizando una comparación de los resultados entre las uniones soldadas con y sin material de aporte se determinó que los valores de sus propiedades mecánicas resultaron similares. Asimismo, cabe indicar que las uniones soldadas sin material de aporte representan una gran ventaja frente al proceso con material de aporte, pues es producido de forma mecanizada o semiautomática y generan un gran beneficio no solo en la calidad de las uniones, sino también a nivel económico. Es decir, se abaratan los costos al no utilizar materiales de aporte y se garantiza una velocidad constante durante todo el proceso de soldeo evitando la fisuración en caliente, uno de los problemas más recurrentes en soldadura GTAW con aleaciones de aluminio.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Davis, J.R: General Introduction. In: ASM SPECIALITY HANDBOOK. Aluminum and aluminum alloys. Ohio, ASM International. 1993
- [2] Otho. (2008). Aluminio y sus aleaciones. Argentina. Universidad Católica de Argentina
Recuperado de <https://estudioyensayo.files.wordpress.com/2008/11/aluminio-y-aleaciones.pdf>.
- [3] Espinoza Hurtado, Jhordann. Estudio de la fisuración en caliente en el soldeo de la aleación AA6063-T6 mediante proceso GTAW sin material de aporte. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Lima. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2014.
- [4] Moreno Zavala, Guillermo: Estudio de la soldabilidad de la unión disimilar de un acero estructural ASTM A36 con una elevación de aluminio AA5052 – H34. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. Lima. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2015.
- [5] José Ramón Ibers, Aluminio y sus aleaciones, España: Asociación español de soldadura y tecnologías de unión, 2007.
- [6] C. Vargel, Enciclopedia del Aluminio, Bilbao: Urmo, 1979.
- [7] Castro Patiño, Luisa. 2014. Tratamiento térmico para aluminio. Metal Actual, pág. 36 -42.
- [8] Davis Joseph R., ed: Introduction. In: ASM HANDBOOK, Corrosion of Aluminum and aluminum alloys. Ohio, ASM International.1999.
- [9] Lean Sifuentes, P.P. (2007,25,10). Comparación de las características de los materiales de aporte ER4043 y ER5356 en el soldeo del aluminio empleando el proceso MIG, Pontificia Universidad Católica del Perú. 2007.
- [10] Mathias Rodriguez Guiso, Procesos de soldadura, Argentina: ESAB, 2021.
- [11] INDURA, Manual de sistemas y materiales de soldaduras, Perú, 2014.
- [12] Escuela Colombiana de Ingeniería (2008). Disponible marzo de 2008. Recuperado de https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/3637_soldadura.pdf.
- [13] MECH TEC, Manual del soldador, Perú.

- [14] American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2014.
- [15] The Lincoln Electric Company, The Procedure Handbook of Arc Welding. Thirteenth Edition, Ohio, 1994.
- [16] ASTM International, Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry, EE.UU., 2017.
- [17] ASTM International, Standard Test Methods for tension Testing of metallic Materials, EE. UU., 2016.
- [18] American Welding Society, Welding Consumables – Wire electrodes, Wires and rods for welding of Aluminum and Aluminum Alloys- Classification, Danvers, 2017.
- [19] Miller, Manual del operador Dynasty 200 SD y DX, EE. UU., 2008.
- [20] American Society for Testing and Materials, Welding Consumables-Wire Electrodes, Wires and Rods for Welding of Aluminum and Aluminum Alloys. American Society for Testing and Materials, Miami, 2016.
- [21] Cary, Howard B. Manual de la soldadura. Edición en español Vol. II México, 1992.
- [22] GULLCO Internacional, Carrito de soldadura, EE. UU.,2021.
- [23] American Welding Society, AWS D1.2 Structural Welding Code-Aluminum. American Welding Society. Miami, 2003.
- [24] American Society for Testing and Materials, Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry, EE. UU.,2018.
- [25] UNE Normalización Española, Ensayos destructivos de soldaduras en materiales metálicos. Ensayo de dureza, España, 2011.
- [26] American Society for Testing and Materials, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, EE.UU., 2007.