

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE LA UNIÓN DISIMILAR DE
UN ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36 CON UNA ALEACIÓN
DE ALUMINIO AA5052-H34**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,

que presenta el bachiller:

GUILLERMO ALEJANDRO MORENO ZAVALA

ASESOR: Dr. Ing. Paul Pedro Lean Sifuentes

Lima, junio de 2015

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió la soldabilidad de una unión disimilar formada por el acero estructural ASTM A36 y la aleación de aluminio AA5052-H34. Las uniones disimilares obtenidas no lograron alcanzar la resistencia mecánica mínima indicada en el código AWS B 2.1 que establece que este tipo de uniones como mínimo deben alcanzar 170 MPa de resistencia a la tracción. En esta investigación los mejores resultados obtenidos alcanzaron los 86 MPa de resistencia a la tracción, representando el 50,6% de lo requerido por el código.

De los resultados se determinó que no es posible obtener uniones, entre el acero estructural ASTM A36 y la aleación de aluminio AA5052-H34, empleando un solo metal de aporte, pues se presentan problemas de soldabilidad básicamente entre el aporte y el acero. Se hace necesario realizar el proceso de enmantequillado o *buttering* en el lado del acero mediante el electrodo Cu-8Al. Luego de realizado el *buttering*, para la elaboración de los cupones de soldadura disimilares se emplearon diversos materiales de aporte y procesos de soldadura en la búsqueda de un procedimiento de soldadura que cumpla con lo estipulado en el código AWS B2.1.

Para el desarrollo de este trabajo, se emplearon los procesos de soldadura más comunes en el medio como SMAW, GMAW y GTAW. El procedimiento de soldadura con el que se obtuvieron las mejores propiedades mecánicas fue el realizado mediante el *buttering* a cinco pasadas mediante el proceso SMAW (62 A, 25 V) y realizando la unión con el proceso GMAW usando un aporte de Al-5Si (15.4 V, 105 A). Estas uniones no cumplieron lo requerido por el código en resistencia mecánica, ni en el ensayo de doblado, pues durante ambos ensayos se produce desprendimiento del *buttering* y el metal de aporte.

En el barrido de durezas realizado a la sección transversal del cordón, en las uniones mencionadas, se apreció que no existe mayor variación en los valores de dureza encontrados en las ZAC de ambos metales, lo que demuestra que se evitó la formación de zonas duras.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE LA UNIÓN DISIMILAR DE UN ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36 CON UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA5052-H34

ÁREA : Ingeniería de Materiales # 106

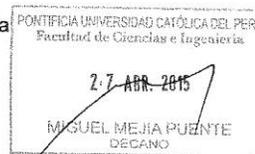
PROPUESTO POR : Dr. Paul Pedro Lean Sifuentes

ASESOR : Dr. Paul Pedro Lean Sifuentes

TESISTA : Guillermo Alejandro Moreno Zavala

CÓDIGO : 20087166

FECHA : 23/04/2015



DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

En la fabricación de conjuntos soldados, normalmente se emplean materiales similares de iguales características, siendo los más empleados los aceros estructurales como el ASTM A 36 y en menor proporción, se emplean a las aleaciones no ferrosas, como por ejemplo, las aleaciones de aluminio.

Existen casos en los que se debe unir, por soldadura, materiales de diferente composición química con propiedades y características diferentes, como en la industria automotriz, naval y química, donde a veces es necesario realizar uniones soldadas entre acero y aluminio. A estas uniones se les denomina "uniones disimilares". Cada unión disimilar presentará problemas particulares según sea los metales a unir, pues cada material presentará diferente composición química, temperatura de fusión, coeficiente de dilatación, etc. Estos problemas se deben afrontar para lograr una unión exitosa. El problema se hace mas complejo debido a que, para la realización de uniones disimilares, normalmente se debe emplear un tercer material de aporte, diferente en propiedades y características a ambos materiales que se desean unir.

El objetivo del presente trabajo, es estudiar la soldabilidad de la unión disimilar producida entre un acero estructural ASTM A36 y una aleación de aluminio AA5052-H34. Para ello se deberá elegir el proceso de soldadura, el material de aporte, los parámetros de soldadura (voltaje, amperaje, velocidad de soldeo, etc.). Además, se realizarán ensayos microestructurales y mecánicos a las uniones soldadas.






PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE LA UNIÓN DISIMILAR DE UN ACERO
ESTRUCTURAL ASTM A36 CON UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA5052-H34

INTRODUCCIÓN

1. ESTADO DEL ARTE
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL
3. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

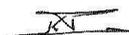
CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

Máximo: 100 páginas



Dr. Paul Pedro Lean Sifuentes
Asesor





DEDICATORIA

A Elena, Guillermo, Celia, José Luis y familia
por enseñarme el camino a recorrer,
a Rosa por acompañarme en la travesía
y a mi compañero que me espera al final del mismo.

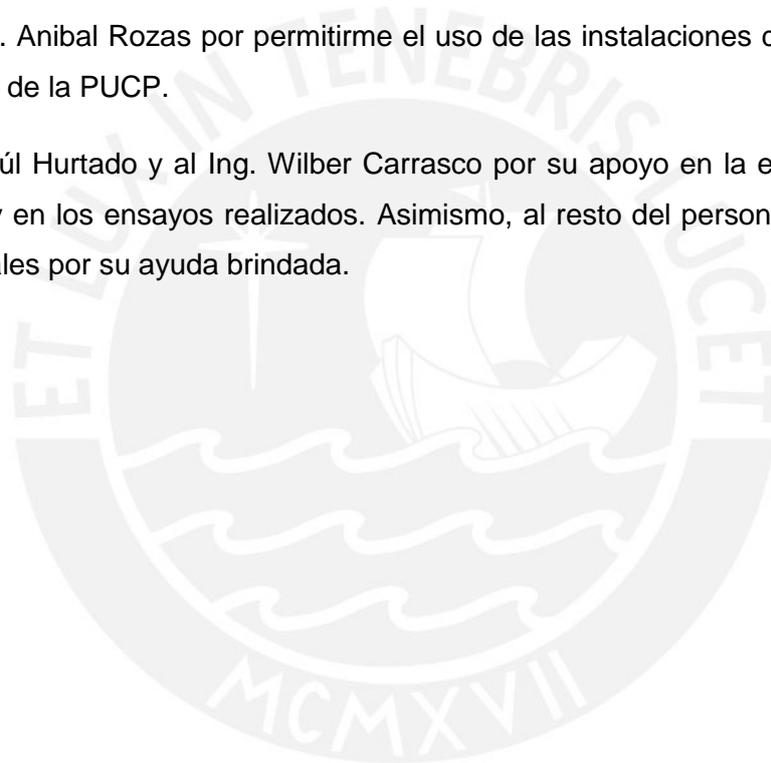
AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ing. Paul Pedro Lean Sifuentes por su incondicional apoyo durante la realización de este trabajo y permitirme iniciar el camino en este campo tan apasionante como es la soldadura.

Al Sr. Elvis Bello, por todas aquellas tardes de trabajo en la elaboración de los cupones.

Al Mg. Ing. Anibal Rozas por permitirme el uso de las instalaciones del Laboratorio de Materiales de la PUCP.

Al Ing. Raúl Hurtado y al Ing. Wilber Carrasco por su apoyo en la elaboración de las probetas y en los ensayos realizados. Asimismo, al resto del personal del Laboratorio de Materiales por su ayuda brindada.



Índice

Introducción	1
1. Estado de la tecnología	3
1.1 Acero al Carbono	3
1.1.1 Clasificación del acero según su porcentaje del carbono	3
1.1.2 Acero estructural	4
1.1.2.1 Soldabilidad del acero estructural ASTM A36	5
1.1.2.2 Procesos de soldadura	7
1.2 Aluminio Puro	8
1.2.1 Aleaciones del Aluminio	8
1.2.1.1 Aleaciones de fundición	9
1.2.1.2 Aleaciones de forja	9
1.2.2 Soldabilidad de las aleaciones de aluminio	13
1.2.2.1 Generalidades	13
1.2.3. Aleación AA5052-H34	15
1.3 Uniones Disimilares	16
1.3.1 Introducción	16
1.3.2 Aspectos a considerar al desarrollar una unión disimilar	16
1.3.2.1. Rangos de Temperatura de Fusión	16
1.3.2.2. Conductividad Térmica	18
1.3.2.3. Expansión Térmica	18
1.3.3 Unión Acero con Aluminio	18
1.3.3.1. Recomendaciones	21
1.3.3.2. Aplicaciones	22
2. Procedimiento Experimental	23
2.1. Características del material base	23
2.1.1. Acero estructural	23
2.1.1.1. Análisis químico del acero estructural ASTM A36	23
2.1.1.2. Ensayo de tracción del acero estructural ASTM A36	23
2.1.2. Aleación de aluminio AA 5052-H34	23
2.1.2.1. Análisis químico del aluminio AA5052-H34	24
2.1.2.2. Ensayo de tracción del aluminio AA5052-H34	24
2.2. Elaboración del procedimiento de soldadura	24

2.2.1 Tipo de Junta	24
2.2.2. Elección del metal de aporte	25
2.2.2.1. Electrodo de Cu-8Al	25
2.2.2.2. Electrodo de Al-12Si	25
2.2.2.3. Electrodo de Al-5Si	26
2.2.2.4. Electrodo de Al-5Mg	26
2.2.3. Elección del proceso de soldadura	26
2.2.3.1 Proceso SMAW	26
2.2.3.2 Proceso GMAW	27
2.2.3.3 Proceso GTAW	29
2.3. Elaboración de cupones de soldadura	30
2.3.1. Inspección Visual	31
2.3.2. Radiografía Industrial	31
2.3.2.1 Equipos y materiales utilizados	31
2.3.2.2 Metodología del Ensayo	32
2.4. Técnicas de Caracterización de las Uniones	32
2.4.1. Caracterización Mecánica	33
2.4.1.1. Ensayo de Tracción	33
2.4.1.2. Ensayo de dureza Vickers	34
2.4.1.3. Ensayo de doblado longitudinal	37
2.4.2. Caracterización microestructural	39
2.4.2.1 .Metalografía	39
3. Obtención y análisis de resultados	41
3.1 Características de los metales base	41
3.1.1 Acero estructural	41
3.1.1.1. Análisis químico del acero estructural ASTM A36	41
3.1.1.2. Ensayo de tracción del acero estructural ASTM A36	41
3.1.2 Aleación de aluminio AA5052-H34	42
3.1.2.1. Análisis químico del aluminio AA5052-H34	42
3.1.2.2. Ensayo de tracción del aluminio AA5052-H34	42
3.2 Resultados del procedimiento de soldadura	43
3.2.1 Tipo de Junta	43
3.2.1.1. Obtención del <i>buttering</i>	43

3.2.1.2. Uniones soldadas	43
3.2.2 Resultado del material de aporte	44
3.2.2.1. Electrodo de Cu-8Al	44
3.2.2.2. Electrodo de Al-12Si	44
3.2.2.3. Electrodo de Al-5Si	44
3.2.2.4. Electrodo de Al-5Mg	45
3.2.3 Resultado del proceso de soldadura	45
3.2.3.1 Proceso SMAW	45
3.2.3.2 Proceso GMAW	46
3.2.3.3 Proceso GTAW	47
3.3. Cupones de soldadura	50
3.3.1. Inspección Visual	50
3.3.1.1. Proceso SMAW	50
3.3.1.2. Proceso GMAW	50
3.3.1.3. Proceso GTAW	52
3.3.2. Radiografía Industrial	53
3.4. Técnicas de Caracterización de las Uniones	55
3.4.1. Caracterización Mecánica	55
3.4.1.1. Ensayo de Tracción	55
3.4.1.2. Ensayo de microdureza Vickers	58
3.4.1.3. Ensayo de doblado longitudinal	59
3.4.2. Caracterización microestructural	61
3.4.2.1 .Metalografía	61
Conclusiones	65
Bibliografía	66

Introducción

Se sabe que el acero representa más del 95% de los materiales metálicos que se usan para la construcción y fabricación en todo el mundo. Esto se debe a su bajo costo y las buenas propiedades mecánicas que presenta. Cabe resaltar que estas propiedades pueden ser fácilmente manejadas mediante adición de carbono, tratamientos térmicos o trabajo mecánico. [1]

El aluminio por su parte, es el segundo metal más utilizado después del acero. Este presenta propiedades muy útiles en el campo de la ingeniería debido a su baja densidad, alta resistencia a la corrosión y oxidación, alta conductividad térmica y eléctrica, maleabilidad y su costo es menor que otros materiales no ferrosos. Por tal motivo, el aluminio ha ganado mayor difusión en los países industriales.

Como estos materiales son muy usados en la actualidad, y ambos son empleados en diferentes condiciones de trabajo debido a sus propiedades y características se consideró oportuno realizar una investigación acerca de la unión disimilar entre estos dos metales. Es por esto, que en el presente trabajo se estudiará la soldabilidad de la unión de estos dos metales para poder conseguir recomendaciones y de esta manera realizar uniones soldadas satisfactorias, y a su vez incrementar los conocimientos sobre las uniones disimilares.

La mayoría de las aplicaciones donde se utilizan uniones disimilares entre el acero y el aluminio se hace para optimizar el material. El sector más importante es en el de transporte, por ejemplo, si el techo de un automóvil está hecho de aluminio, el peso de este disminuirá y su centro de gravedad estará más cerca al piso.

También se usa en el campo naval ya que esta unión disminuye el tiempo de ensamblaje y armado de la embarcación.

Otra aplicación interesante es para la fabricación de cubas electrolíticas, ya que se necesita pasar de acero a aluminio lo más cercano posible y si se emplea pernos estos se corroen rápidamente. [2]

Para poder desarrollar la presente investigación, se realizará un *buttering* en el lado del acero para luego soldar la aleación de aluminio. Se probarán los procesos de soldadura por arco eléctrico más empleados en nuestro medio con el fin de encontrar con cual se obtiene mejor resultado. Una vez se obtenga un cupón de soldadura que presente continuidad metálica se procederá a realizar los ensayos de tracción y de

doblado basándose en la norma AWS B 2.1 “Welding Procedure and Performance Qualification” ya que como se trata de una unión disimilar no se pueden aplicar directamente las normas AWS D1.1 “Structural Welding Code-Steel” ni AWS D1.2 “Structural Welding Code-Aluminum”.

Posteriormente se hará un ensayo metalográfico para poder observar los perfiles de los cordones y la microestructura de los metales base y poder relacionar sus propiedades mecánicas. A su vez se podrá apreciar las fases y microconstituyentes, el tamaño y forma de los granos. También se realizará un ensayo de dureza Vickers a las uniones obtenidas tanto en los metales base como en la zona afectada por el calor para poder analizar si se formaron zonas frágiles al momento de realizar la soldadura.

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

Objetivo general:

Estudiar la soldabilidad de una unión disimilar entre el acero al carbono ASTM A36 y la aleación de aluminio AA5052-H34, con el propósito de establecer parámetros de soldadura entre los que destacan el proceso de soldeo, voltaje, velocidad, amperaje, metal de aporte, que proporcionen propiedades mecánicas satisfactorias según la norma AWS B2.1.

Objetivos específicos:

- Estudiar las unión disimilar entre el acero ASTM A36 y la aleación de aluminio AA5052-H34.
- Obtener parámetros de soldadura y recomendaciones para lograr uniones disimilares satisfactorias entre el acero ASTM A36 y la aleación de aluminio AA5052-H34.
- Realizar ensayos mecánicos para poder caracterizar las uniones soldadas obtenidas.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1. ACERO AL CARBONO

El acero al carbono es una aleación ferrosa que presenta desde 0.008% hasta 2% de carbono. Es posible agregar otros elementos aleantes, pero sus efectos no serán tan significativos como los del carbono, he de ahí su nombre. Estos aceros son muy usados por sus propiedades mecánicas y su bajo costo. Es por estos motivos, que tienen aplicaciones en campos como: tanques a presión, maquinaria, puentes, etc. En la figura 1.1 se puede apreciar como varían las propiedades mecánicas respecto al porcentaje de carbono presente en los aceros según el diagrama Fe-Fe₃C. [3]

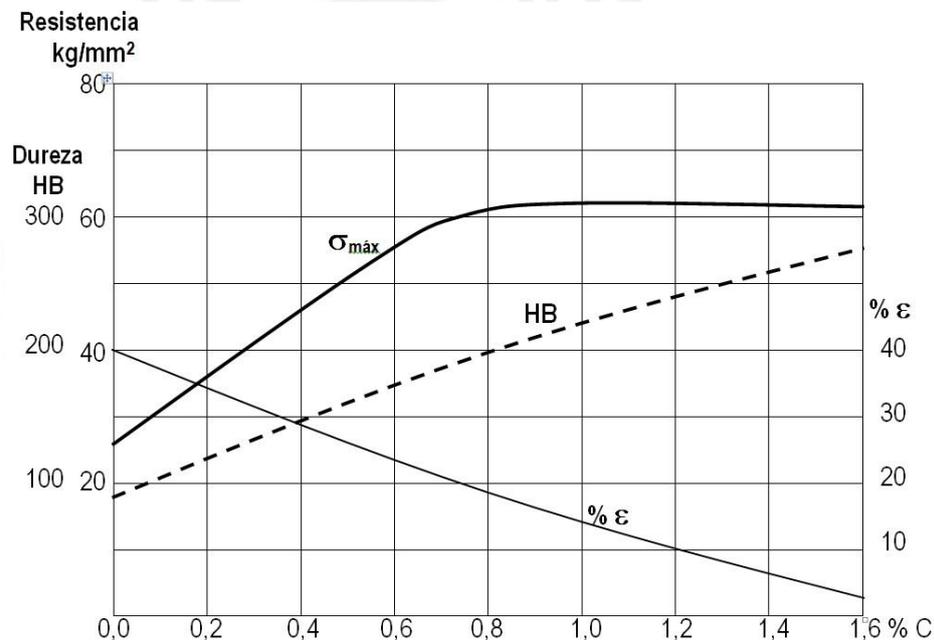


Figura 1.1. Cambio de las propiedades mecánicas según el contenido de carbono [3]

1.1.1. Clasificación del acero según su porcentaje de carbono

En la Tabla 1.1 se procede a describir las diferentes denominaciones que reciben los aceros dependiendo del porcentaje de carbono presente en su composición química. Asimismo, se detallan las características más importantes de estos.

Tabla 1.1 Clasificación de los aceros según su porcentaje de carbono

Denominación	%C	Características
Aceros de bajo carbono	< 0.15	Presentan baja resistencia mecánica. Son fácilmente soldables bajo cualquier proceso de soldadura. Se usan en elementos estructurales, electrodos, chapas.
Aceros de medio carbono	0.15 - 0.30	La soldabilidad en estos aceros es buena; sin embargo, se vuelven más susceptibles debido a la fisuración por hidrógeno y por el incremento que sufre en su dureza. Se usan en elementos de máquinas y herramientas.
Aceros de alto carbono	0.50-1.0	Presenta una mala soldabilidad debido a la alta dureza y sensibilidad a las fisuras en el metal soldado. Por lo que se deben usar procedimientos de bajo hidrógeno para soldarlos mediante arco eléctrico. Se aplican en vías de tren, muelles, herramientas.

1.1.2. Acero estructural

El acero estructural es un acero al carbono que posee menos de 0.29%C, es utilizado en diversos elementos estructurales como perfiles, barras y láminas. Esto se debe a su buena ductilidad y el bajo contenido de carbono que presenta hace que tenga una buena soldabilidad. Por lo que no se presentan problemas de que se formen estructuras frágiles en la ZAC ni peligros de fisuración en caliente como si se da en los aceros inoxidables austeníticos y en aleaciones de aluminio.

Se puede apreciar en la Tabla 1.2 extraída de la norma ASTM A36/A36M la composición química nominal para el acero ASTM A36.

Tabla 1.2 Composición química nominal del acero ASTM A36 [4]

Producto	Perfil	Planchas				
		Hasta 20	De 20 a 40	De 40 a 65	De 65 a 100	De 100 a más
Espesor mm	Todos					
Carbón máx %	0.26	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29
Manganeso %	0.8-1.2	0.8-1.2	0.85-1.2	0.85-1.2
Fósforo máx %	0.04	0.04	0.04	0.04	0.4	0.04
Azufre máx %	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicio %	0.40 máx	0.04 máx	0.04 máx	0.15-0.4	0.15-0.40	0.15-0.40
Cobre min %	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Las propiedades mecánicas nominales se pueden apreciar en la Tabla 1.3, también extraída de la norma ASTM A36/A36M.

Tabla 1.3 Propiedades mecánicas del acero ASTM A36 [4]

Planchas, perfiles y barras	
Resistencia a la tracción, ksi [MPa]	58-80 [400-550]
Resistencia a la fluencia min, ksi [MPa]	36 [250]
Planchas y barras	
Elongación en 8 pulgadas [200 mm] min, %	20
Elongación en 2 pulgadas [50 mm] min, %	23
Perfiles	
Elongación en 8 pulgadas [200 mm] min, %	20
Elongación en 2 pulgadas [50 mm] min, %	21

1.1.2.1. Soldabilidad del acero estructural ASTM A36

Se puede definir como soldabilidad a la capacidad de los metales a ser soldados y que la unión soldada resultante presente continuidad metálica y propiedades mecánicas satisfactorias. [5]

Es muy común que se usen los aceros para realizar uniones soldadas, pero hay que tener presente que no todos presentan la misma soldabilidad. Esta propiedad depende netamente del %C presente en el acero, mientras menor %C tenga mayor será la soldabilidad del acero. Hay que tener en consideración a los elementos aleantes, ya que mientras mayor sea su contenido menor será la soldabilidad del acero. [5]

Hay diversos factores que influyen para determinar la soldabilidad de los metales. Como por ejemplo las transformaciones en la microestructura que se produce en la zona afectada por el calor (ZAC), la composición química de los metales, el procedimiento mediante el cual ha sido soldado el metal. [5]

En el caso del cambio de microestructura que se produce en la ZAC, este se debe al incremento de dureza que es ocasionada por la templabilidad que presenta el acero, puesto que mientras más templable sea el acero más fácil será que se genere martensita lo cual volverá frágil al acero. [5]

Uno de los métodos empleado para predecir la soldabilidad del acero, es el método del carbono equivalente. Esto se debe a que la dureza máxima de un acero y el grado de templabilidad de este depende directamente del %C presente. Hay diversas fórmulas para realizar el cálculo del carbono equivalente (CE), propuestas por diversas instituciones como por ejemplo el IIW (Instituto Internacional de Soldadura), la AWS (American Welding Society). Las fórmulas del CE se basan en el porcentaje de los aleantes presentes en el acero. Con el valor de CE hallado también es posible obtener recomendaciones para el precalentamiento del acero y de esta forma obtener una mejor unión soldada. [5]

El IIW propone la siguiente relación para calcular el carbono equivalente en el metal.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} (\%)$$

Empleando la relación anterior se obtiene que el CE del acero ASTM A36 es en promedio 0,26. En la figura 1.2 se puede apreciar que este se ubica en la zona 2. Que el acero este en esta zona significa que presenta una soldabilidad media, pero se deberán tomar precauciones para evitar formación de estructuras frágiles. Esto se podría lograr precalentando el material. [5]

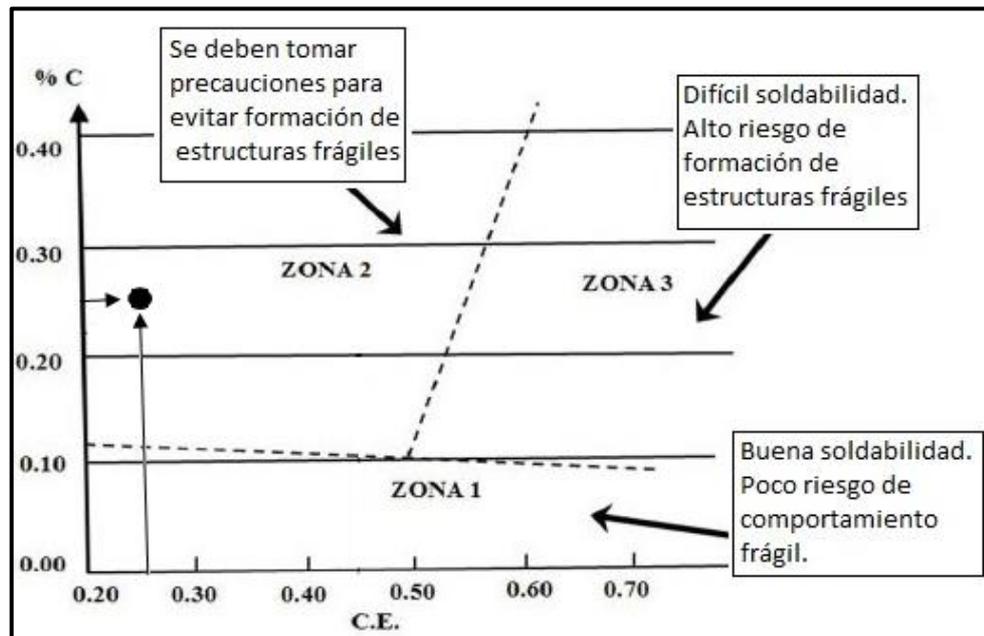


Figura 1.2 Gráfica donde se aprecia la relación de CE con la soldabilidad y %C [5]

Sin embargo, el CE tan solo considera a la composición química como único factor influyente. La soldabilidad también está ligada a otros factores importantes como el aporte de calor, el proceso de soldeo, el tipo de junta, el espesor de la pieza a soldar, hidrógeno difundido y grado de embridamiento. Pero cabe resaltar la practicidad del concepto de CE para limitar el riesgo de que se originen fracturas en frío. Entonces el CE es una estimación rápida y sencilla, pero incompleta de la soldabilidad de un acero. [5]

1.1.2.2. Procesos de Soldadura

El acero ASTM A36 puede ser soldado mediante varios procesos como por ejemplo:

- SMAW (Shielded Metal Arc Welding)
- GMAW (Gas Metal Arc Welding)
- GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)
- FCAW (Flux Core Arc Welding)
- SAW (Submerged Arc Welding)

Para cada proceso se deben tener ciertas consideraciones en la soldadura del acero ASTM A36, por ejemplo si el proceso a utilizar es GMAW. Los gases más utilizados

como el CO_2 , Ar y O_2 y la selección dependen del tipo de transferencia y la composición del metal.

Se debe tener en cuenta que el acero ASTM A36 tiene la posibilidad de formar martensita si se enfría muy rápido. Por lo tanto siempre se debe estar controlando que la velocidad de enfriamiento no sea muy rápida, por eso se recomienda enfriamiento al aire y si se tienen piezas muy grandes hacer un recubrimiento de arena o cal.

1.2. ALUMINIO PURO

El aluminio puro es un metal blando, que presenta una alta conductividad térmica y eléctrica. Otra característica del aluminio es su alta resistencia a la corrosión, ya que si se le hace un correcto tratamiento superficial, es resistente al agua de mar, y a otras soluciones acuosas incluyendo químicas. Aparte los efectos de la oxidación sobre el aluminio son mínimos ya que la superficie del metal queda recubierta por una fina capa de óxido de aluminio (alúmina, Al_2O_3) que lo protege del medio. [1]

El aluminio puede ser aleado con otros elementos y de esta manera se pueden formar aleaciones con propiedades específicas que pueden ser seleccionadas para diversos propósitos. Es por esto que las aleaciones de aluminio pueden ser utilizadas en la fabricación de automóviles, aviones, embarcaciones. Esto se debe también a que las aleaciones de aluminio presentan una alta relación resistencia mecánica-peso. [1]

1.2.1. Aleaciones de Aluminio

El aluminio puro en sí no tiene mucha aplicación, ya que es un metal blando y presenta baja resistencia mecánica. Es por esto que el aluminio se alea con diversos metales para lograr mejores características mecánicas, inclusive muy parecidas a la de algunos aceros estructurales. Los elementos aleantes más usados en la industria son el cobre, manganeso, magnesio, silicio y zinc. En la siguiente Tabla 1.4 se muestran las características que aporta el aleante al aluminio.

Tabla 1.4 Propiedades de los elementos de aleación

Elementos Aleantes	Propiedades que obtiene la aleación
Mn	Mejora la resistencia a la corrosión atmosférica. Aumenta la resistencia mecánica y la ductilidad.
Cu	Produce una aleación tratable térmicamente. Resistencia y dureza aumentadas. Disminuye la resistencia a la corrosión y la ductilidad.
Si	Mejora la fluidez, disminuye el coeficiente de dilatación en estado sólido, empeora la ductilidad y la tenacidad.
Mg	Aumenta la resistencia mecánica y la dureza. Presenta buena soldabilidad y buena resistencia a la corrosión en ambientes agresivos.
Zn	Presenta resistencia y dureza aumentadas. Existe posibilidad de corrosión bajo tensión.

Según el modo de transformación de las aleaciones, se distinguen las siguientes:

1.2.1.1. Aleaciones de fundición

Se usan en fundición para la fabricación de piezas obtenidas por colada del metal líquido en moldes de arena o en moldes de acero. Con este procedimiento se fabrican piezas de formas complejas como bloques de motores. [6]

1.2.1.2. Aleaciones de forja

Son las coladas en forma de placas o tochos que se transforman en semi-productos por laminación o extrusión. Estos semi-productos obtenidos se utilizan para la construcción metálica y son ensamblados por soldadura, atornillado, etc.

En el presente trabajo solo se abordará las aleaciones de forja debido a que estos materiales son los que se destinan para la construcción de estructuras mediante trabajos de soldaduras. Estas aleaciones se pueden agrupar según su comportamiento al tratamiento térmico, es por eso que se clasifican en: tratables térmicamente y no tratables térmicamente.

Esta clasificación es posible debido a cómo actúan los elementos aleantes sobre las propiedades mecánicas. En el primer caso se pueden endurecer mediante trabajos en frío. En el segundo caso este endurecimiento se obtiene mediante tratamientos térmicos y deformación en frío. [6]

En la Tabla 1.5, se puede apreciar las diferentes series en las que se dividen las aleaciones del aluminio, que elementos aleantes están presentes y si es posible el tratamiento térmico o no.

Tabla 1.5 Grupos de las aleaciones y como se designan

Grupo de Aleación	Designación de la Serie	Tratamiento Térmico
Aluminio, pureza mínima: 99,00%	1XXX	No
Aluminio-Cobre	2XXX	Si
Aluminio-Manganeso	3XXX	No
Aluminio-Silicio	4XXX	No
Aluminio-Magnesio	5XXX	No
Aluminio-Magnesio-Silicio	6XXX	Si
Aluminio-Zinc	7XXX	Si
Aluminio-Otros elementos	8XXX	Variable

La Aluminium Association (AA) da cuatro dígitos a las aleaciones del aluminio para poder clasificarlas. El primer dígito identifica el grupo de la aleación, el segundo dígito indica una modificación de la aleación inicial. En el caso de la serie 1, el segundo dígito identifica las variantes en las que las impurezas tienen contenidos controlados. En la serie del 2 a 8, están reservadas para las modificaciones sucesivas de la aleación. Las dos últimas cifras en la serie 1 indican el porcentaje de aluminio por encima de 99,00%. Mientras que en los demás grupos solo se utiliza para identificar la aleación. [7]

Aparte de los dígitos, también se utilizan letras y números adicionales para una especificación más completa. A continuación se muestra la Tabla 1.6 donde se distinguen cinco estados fundamentales:

Tabla 1.6 Estados fundamentales de las aleaciones del aluminio [6]

Símbolo	Definición
F	<u>Estado bruto de fabricación</u> : Tal como salen del proceso de fabricación y no hay garantía de sus propiedades mecánicas.
O	<u>Estado recocido</u> : Es generalmente el estado más dúctil que se puede obtener. Es aplicado a los semi-productos para obtener el estado más bajo de resistencia.
H	<u>Estado con acritud</u> : Se aplica a los productos endurecidos por deformación en frío con o sin ablandamiento posterior.
W	<u>Estado templado no estabilizado</u> : Es un estado metalúrgico inestable. Se aplica a las aleaciones que han sufrido una inmersión en solución, seguida de temple.
T	<u>Estado endurecido por tratamiento térmico</u> : Están sometidos a todos o parte de los siguientes tratamientos: puesta en solución, temple, envejecimiento y revenido.

El estado H presenta subdivisiones, por lo cual se designa mediante dos cifras, la primera por la manera en cómo se endureció, se explica en la Tabla 1.7. Mientras que la segunda toma valores entre 2, 4, 6, 8 ó 9 y corresponde al nivel de dureza. Los estados posibles están en la Tabla 1.8.

Tabla 1.7 Clasificación del estado H [6]

Símbolo	Definición
H1	<u>Estado endurecido por deformación</u> : Se aplica a los productos endurecidos por deformación hasta un nivel previsto de características mecánicas, sin ablandamiento posterior por mantenimiento a una temperatura apropiada.
H2	<u>Estado endurecido por deformación y parcialmente ablandado</u> : Se aplica a los productos endurecidos por deformación hasta un nivel superior al previsto, y después ablandados parcialmente por mantenimiento a una temperatura apropiada.
H3	<u>Estado endurecido por deformación y estabilizado</u> : 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.

Tabla 1.8 Niveles de dureza para el estado H [6]

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 extra duro	H19-H29-H39

a) Aleaciones de Aluminio No Tratables Térmicamente

Las aleaciones dentro de esta clasificación son: AA1XXX, AA3XXX, AA4XXX, A5XXX y algunas de la serie AA8XXX. El nivel de sus características mecánicas depende del grado de forja, pero que inicialmente se produce por la adición de elementos aleantes, como es el caso de las aleaciones al magnesio. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este aumento de dureza disminuye la ductilidad de la aleación.

Elementos como el Manganeso, Magnesio que forman parte en las series AA3XXX, AA5XXX respectivamente, forma una solución sólida que permite obtener el endurecimiento final. En general, estas aleaciones presentan buena soldabilidad. [6]

Serie AA5XXX

Esta serie posee como elemento de aleación principal al magnesio. El contenido de magnesio presente, varía desde 0.5% para la aleación AA5005 hasta 2.5% para la aleación AA5056. Sin embargo, presentan mejores características mecánicas las de contenido mayor e igual a 2.5%, es a partir de este porcentaje que se puede utilizar estas aleaciones en estructuras ya que el magnesio es el elemento que más endurece por solución sólida a las aleaciones No Tratables Térmicamente. [6]

Presentan buena soldabilidad, es por eso que se usan mucho para realizar uniones soldadas. Sin embargo, si la aleación a soldar presenta un valor cercano a 1.2% de magnesio se produce la tendencia a fisurarse en caliente, ya sea el metal base o el material de aporte. Para combatir este inconveniente se aumenta el contenido de magnesio, por lo general mayor a 5%, el cobre y el silicio mejoran la soldabilidad de la aleación reduciendo así la fisuración en caliente. Estas aleaciones son las que presentan mejores características contra la corrosión, lo que justifica su uso en los medios más agresivos. [8]

b) Aleaciones de Aluminio Tratables Térmicamente

Si bien el trabajo en frío permite mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio, no es la única opción que existe. Otra alternativa para mejorar las propiedades mecánicas es mediante un tratamiento térmico de solución, temple y envejecido. Estos llevan a la formación de precipitados de fase endurecedora en el interior o en los límites de grano.

Las series de las aleaciones que están dentro de esta categoría son: AA2XXX, AA6XXX, AA7XXX y algunas de la serie AA8XXX que presentan buen comportamiento al ser tratados térmicamente gracias a elementos aleantes como el cobre, silicio o magnesio. [6]

1.2.2. Soldabilidad de las aleaciones de aluminio

1.2.2.1. Generalidades

El principal problema de la soldabilidad del aluminio y sus aleaciones es la formación del óxido de aluminio, alúmina (Al_2O_3), la cual presenta un punto de fusión de 2030°C a diferencia del aluminio puro cuya temperatura de fusión es de 660°C. La alúmina es la causante de la mala soldabilidad del metal ya que su presencia se opone a la interpenetración de las gotas fundidas que permiten la continuidad del cordón por lo que es imprescindible eliminar la capa de óxido mediante medios mecánicos, un decapado químico, empleo de fundente o la acción decapante del arco eléctrico. Eso es lo que pasa cuando se realiza el soldeo GTAW o GMAW con corriente continua con electrodo al positivo o polaridad inversa o CA, ya que el arco decapa la superficie eliminando el óxido cuando está conectado al positivo y la nube del gas inerte previene la contaminación del baño fundido. [9]

A continuación se hablará del comportamiento del aluminio respecto a los diferentes procesos de soldeo.

a) Según proceso GTAW

Si se usa corriente continua con polaridad inversa, electrodo al positivo, se produce un calentamiento excesivo del electrodo y gran inestabilidad del arco. El electrodo actúa como ánodo por lo que los iones positivos bombardean la pieza entonces se tiene un buen efecto decapante y de esta manera se logra la eliminación de la capa de

alúmina. Se recomienda usar este tipo de corriente para espesores de metal base inferiores a 1.5mm.

En el caso de usarse corriente continua con polaridad directa, la pieza trabaja como ánodo por lo que no hay función decapante sobre esta y no se puede eliminar la capa de alúmina y la soldadura tiende a incorporar óxidos. Se emplea solamente para espesores muy gruesos ya que se consigue buena penetración, debido a que se puede emplear altos amperajes pero es imprescindible realizar una buena limpieza previa. [9]

El tipo de corriente más utilizada es la alterna. El decapado de la pieza ocurre cuando el electrodo es positivo, en este periodo hay buena penetración y el electrodo se calienta, y cuando el electrodo actúa de negativo este se enfría, no se produce el decapado de la pieza pero la penetración que se obtiene es buena. Es por esto que cuando se utiliza corriente alterna se consigue una penetración y limpieza intermedias pero adecuadas.

Con respecto al gas de protección se suele emplear argón, mientras que en piezas de mayor espesor se puede utilizar mezclas de argón y helio.

b) Según proceso GMAW

Se emplea corriente continua con el electrodo en positivo y se suele utilizar una técnica de soldeo, la cual consiste en soldar hacia adelante para que la limpieza comience antes de la fusión del metal base. Si se emplea multipases, la primera pasada será a un voltaje menor lo que permite una buena fusión y limpieza, para las pasadas siguientes el voltaje aumenta progresivamente. Las imperfecciones típicas en el soldeo GMAW son las faltas de fusión, porosidad e inclusión de óxidos. [9]

c) Según proceso SMAW

No es recomendable para soldar aluminio ni sus aleaciones. Esto se debe que la protección otorgada por el revestimiento del electrodo no es suficiente para evitar la formación de poros en el cordón de soldadura.

1.2.3. Aleación AA5052-H34

La aleación de aluminio AA5052-H34 recibe ese nombre debido a los procesos por los cuales se obtuvo. Al pertenecer a la serie 5, esta aleación puede ser endurecida significativamente mediante el trabajo en frío y luego un proceso térmico para su ablandamiento. En este caso al ser H34, representa que la aleación es semidura, significa que la aleación ha tenido un ablandamiento para alcanzar un estado estable. La composición química nominal de la aleación AA5052-H34 se muestra en la siguiente Tabla 1.9.

Tabla 1.9 Composición química de la aleación AA5052-H34 [10]

Aleación	AA5052-H34
Si (%)	0.25
Fe (%)	0.4
Cu (%)	0.1
Mn (%)	0.1
Mg (%)	2.2-2.8
Cr (%)	0.15-0.35
Zn (%)	0.1
Otros (%)	0.05-0.15
Al (%)	Restante

Las propiedades mecánicas nominales de la aleación de aluminio AA5052-H34 están mostradas en la siguiente Tabla 1.10.

Tabla 1.10 Propiedades mecánicas nominales de las planchas de la aleación AA5052-H34 [10]

Espesor		Resistencia a la Tracción		Resistencia a la Fluencia	Elongación
min(mm)	máx(mm)	min(MPa)	máx(MPa)	MPa	en 50 mm
1.20	3.2	235	285	180	6

Con respecto a su resistencia a la corrosión, la aleación puede ser usada en un amplio rango en ambientes, incluso en medios agresivos como los marinos. El contenido de magnesio de estas aleaciones es lo suficientemente bajo para que no sufra de fisuración por corrosión bajo tensión.

Esta aleación presenta una buena soldabilidad bajo diversos procesos como por arco eléctrico y por resistencias. Se suelen utilizar los procesos de GMAW y GTAW para realizar soldaduras en aplicaciones estructurales. Por lo general se utiliza como material de aporte, varillas de la aleación ER 5356, pero también hay otros metales de aportes disponibles. En el caso que se tenga un metal base el cual haya sufrido un alto endurecimiento, la soldadura reducirá los esfuerzos presentes en la ZAC, esto se debe a que ocurrirá el proceso de recocido del metal base.

Asimismo, su maquinabilidad es buena gracias al grado de dureza que tiene a diferencia de si hubiera sido un estado O, los cuales son mucho más blandos.

Las aplicaciones típicas que tiene la aleación AA5052-H34 son en embarcaciones pequeñas, en los equipos de procesamiento de comida, planchas estriadas para pisos de uso industrial y marino.

1.3. UNIONES DISIMILARES

1.3.1. Introducción

Se conoce como unión disimilar a aquella unión soldada de materiales diferentes. La diferencia entre estos puede ser química, que se refiere a aleaciones de distinta composición y metalúrgica, cuando su microestructura es diferente. La unión resultante tendrá diferentes propiedades que los metales base. Es por ese motivo, que se debe saber seleccionar apropiadamente el procedimiento a utilizar, el tipo de junta y el material de aporte.

El material de aporte juega un rol importante en las uniones disimilares, ya que si los metales a unir no son metalúrgicamente compatibles, es posible lograr una buena soldadura utilizando el material de aporte correcto.

1.3.2. Aspectos a Considerar al Desarrollar una Unión Disimilar

1.3.2.1. Rangos de Temperatura de fusión

Al realizar la soldadura los metales bases se funden, por lo que sería recomendable que ambos metales a unir tengan su punto de fusión similar para poder realizar procesos de soldadura sin tener que tener consideraciones en su ejecución. Si la diferencia de los puntos de fusión de los metales bases es demasiado alta, quizá no

pueda ser soldado mediante un proceso de arco eléctrico en donde se producirá la fusión de ambos metales base.

Si se realiza una unión disimilar y la diferencia entre los puntos de fusión de los metales base es considerable esto puede ocasionar que se fisure el metal con el menor punto de fusión, como se muestra en la figura 1.3 Una de las formas para solucionar esta diferencia entre los puntos de fusión es realizar un *buttering*, tal como se aprecia en la figura 1.4. El *buttering* o enmatequillado, la cual sería su traducción literal, es un proceso el cual consiste en depositar una capa de un material de propiedades intermedias a uno de los extremos para luego realizar la soldadura. Mientras más grande sea la diferencia entre los puntos de fusión, la capa intermedia debe ser de mayor espesor.

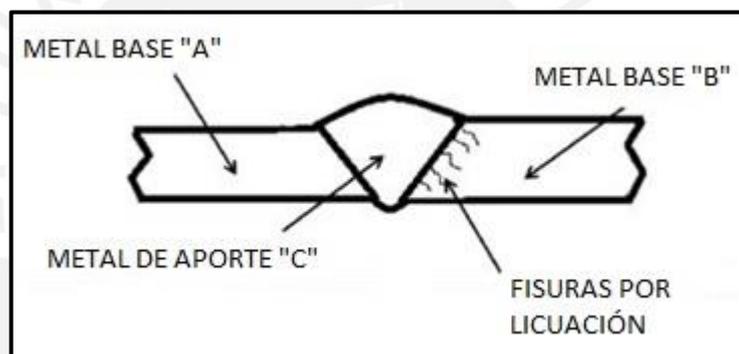


Figura 1.3 Unión soldada sin *buttering* [1]

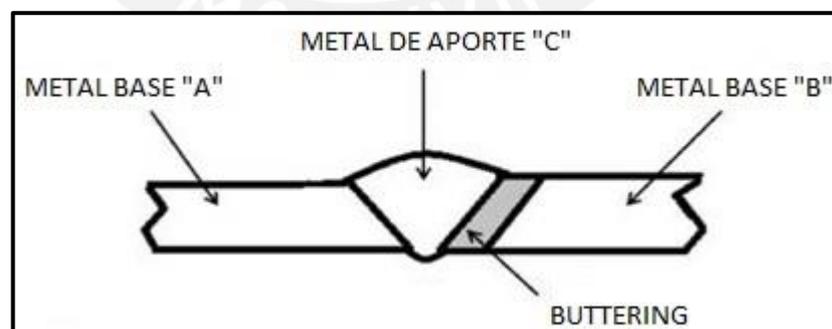


Figura 1.4 Unión soldada con *buttering* [1]

1.3.2.2. Conductividad Térmica

Esta propiedad de los metales base está muy ligada a la capacidad de los metales a fundirse. Si se tiene un metal base con una pobre conductividad térmica, este metal se fundirá más rápido, dado que no podrá transmitir con facilidad todo el calor aportado. Por otro lado, si el metal base tiene una buena conductividad térmica, este transferirá el calor localizado proveniente del arco eléctrico hacia las zonas adyacentes por lo que es más difícil que alcance la fusión.

Algunas de las consideraciones que se toman para solucionar este problema es dirigir la fuente de calor directamente hacia el metal con mayor conductividad térmica, otra opción es el que este metal sea precalentado antes de empezar la soldadura. Ambos buscan la manera de aumentar el calor brindado al metal base que tiene alta conductividad sin afectar al de baja, y de esta manera permitir una dilución balanceada.

1.3.2.3. Expansión Térmica

El hecho que los metales base sean desiguales, significa que tendrán diferentes coeficientes de dilatación térmica y esto conlleva a que se produzcan tensiones en la junta durante la soldadura, ya que durante el enfriamiento la temperatura de la superficie disminuye más rápido que la del centro, esto conlleva a que la menor contracción del núcleo impida mayores contracciones en la superficie y por este motivo se producen esfuerzos de tracción en la superficie y esfuerzos de compresión en el centro, y esto puede ser perjudicial cuando la unión se pone en servicio.

Por este motivo se recomienda que el material de aporte a utilizar tenga un coeficiente de dilatación térmica medio entre los valores de los metales base.

1.3.3. Unión Acero con Aluminio

Primeramente, existe una gran diferencia entre las propiedades del acero y el aluminio, como se puede ver en la tabla 1.11.

Tabla 1.11 Diferencia de propiedades entre el acero y el aluminio

Propiedad	Acero	Aluminio
Densidad (kg/L)	7.8	2.7
Temperatura de fusión (°C)	1536	660
Coef. Conductividad Térmica (W/m-K)	75	238
Coef. Dilatación Térmica (1/K)	12.3×10^{-6}	23.8×10^{-6}
Módulo Elástico (GPa)	210	70
Resistencia a la Tracción (MPa)	270-410	80
Resistencia a la Fluencia (MPa)	180-250	35
Elongación después de la Rotura (%)	30	42
Potencial Estandar de Electrodo (V)	-0.447	-1.662

La diferencia que existe en la dilatación térmica puede resultar en deformaciones descontroladas o en tensiones residuales. Otra diferencia importante después de realizada la soldadura es la diferencia en el potencial estándar de electrodo, ya que el acero al ser menos negativo que el aluminio se deben tomar medidas para evitar la corrosión galvánica del lado del aluminio, es por eso que se recomienda utilizar el acero galvanizado. Por otra parte, existe una gran afinidad entre el aluminio y el hierro, lo cual constituye todo un reto a la hora de realizar la soldadura. El diagrama de equilibrio Fe-Al permite observar la aparición de varios compuestos intermetálicos frágiles.

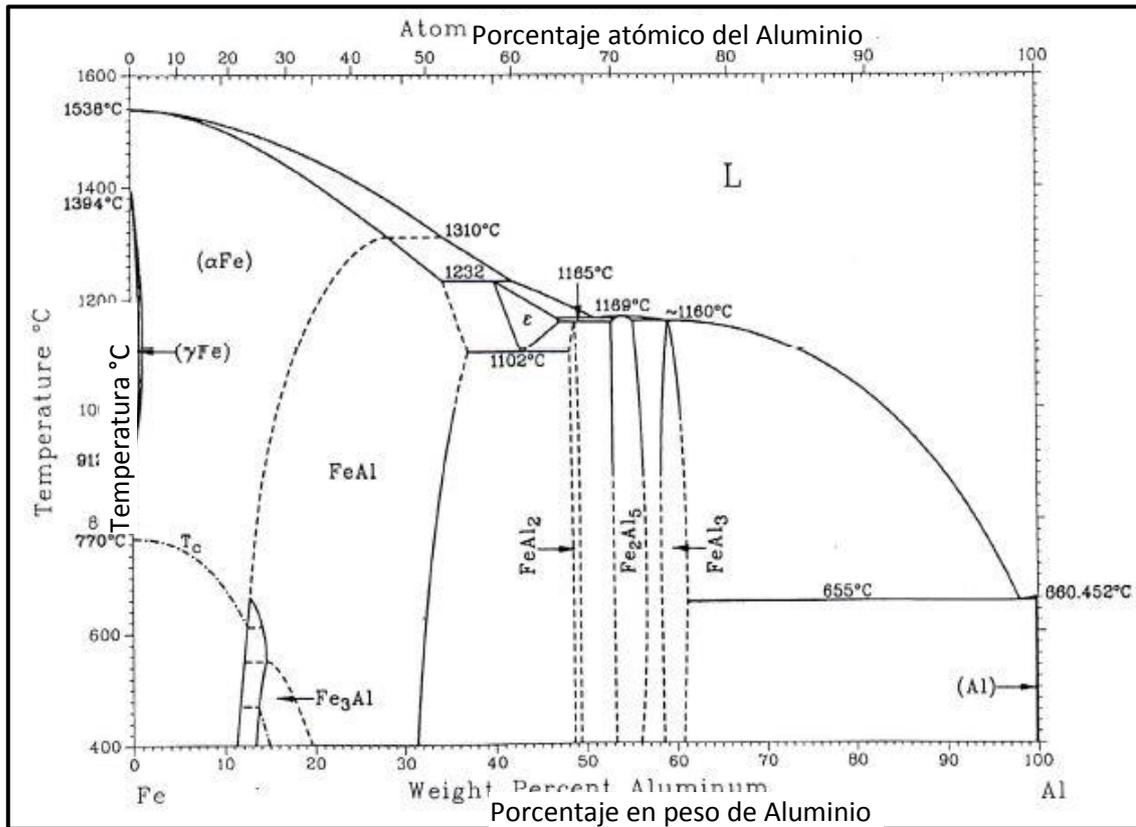


Figura 1.5 Diagrama de equilibrio Fe-Al [11]

Hay que tener en cuenta que cuando se realiza la soldadura directamente entre el acero y el aluminio se obtiene el Fe_2Al_5 cuya dureza está en el rango de 1000-1100HV, al costado del acero y el FeAl_3 con una dureza que fluctúa entre 820-980 HV al costado del aluminio. Estas son las fases más duras y frágiles que pueden tener un impacto negativo sobre las propiedades mecánicas de la junta.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la diferencia de conductividades térmicas que hay entre el aluminio y el acero. La conductividad del aluminio con respecto al acero es 3:1, por lo que se tendría que precalentar el aluminio para minimizar defectos por falta de fusión; pero, debido a la baja temperatura de fusión y para bajos espesores no será necesario el precalentamiento.

También se aprecia que el coeficiente de expansión térmica del aluminio es mayor al del acero, esto provocará que el aluminio se dilate y puede que cierre la junta de la soldadura. Es posible que se generen esfuerzos residuales cuando la unión soldada se enfríe, debido a que el aluminio se contraerá más que el acero.

1.3.3.1. Recomendaciones

Para realizar la unión soldada se puede hacer un *buttering* en el lado del acero mediante un proceso GTAW con electrodos de Aluminio-Cobre (Cu-8Al). Una vez realizado esto se puede soldar al aluminio con un proceso SMAW con electrodos de (Al-12Si) [12]

Otra opción para realizar esta unión es hacer un recubrimiento previo del acero con aluminio, ya sea mediante inmersión en aluminio líquido o un termorrociado. De esta manera se facilita la unión cuando se utilizan consumibles de aluminio-silicio. También se han obtenido resultados cuando se recubre el acero con zinc o estaño, ya sea por inmersión en metal líquido o depositado con llama (soldeo oxigás). Para finalizar se realiza el soldeo del acero con aluminio mediante el proceso GTAW utilizando un material de aporte similar al aluminio empleado o un aporte de aluminio al alto silicio. En este caso el arco se debe dirigir hacia el aluminio, para contrarrestar su alta conductividad. [13]

Otra manera de lograr la unión del acero y el aluminio es mediante soldadura por fricción. Consiste en poner una pieza en rotación para luego acercarla a la otra y se calientan debido al calor de la fricción hasta una temperatura inferior al punto de fusión, para semejar un proceso de forjado. Lo esencial de este proceso es que la temperatura relativamente baja que alcanza el material hace que los compuestos intermetálicos tengan propiedades mecánicas admisibles. Hay que tener en consideración que para realizar este método, las piezas a soldar por lo menos deben tener una geometría simétrica en rotación. [14]

Otro método utilizado para realizar esta unión disimilar es el de soldadura por explosión. Este proceso se da sobre todo para unir planchas de materiales disimilares de grandes dimensiones. Consiste en poner una plancha encima de la otra, dejando un pequeño espacio entre estas. Luego se procede a cubrir la plancha superior de un explosivo. De esta manera, se utiliza la energía cinética que tiene la plancha superior, ocasionada por la explosión, para que así quede unida a la plancha inferior.

1.3.3.2. Aplicaciones

La mayoría de las aplicaciones donde se utilizan uniones disimilares entre el acero y el aluminio se hace para optimizar el material. El sector más importante es en el de transporte. Por ejemplo, si el techo de un automóvil esta hecho de aluminio, el peso de este disminuirá y también su centro de gravedad estará más cerca al piso. También se usa en el campo naval ya que esta unión disminuye el tiempo de ensamblaje y armado de la embarcación.

Otra aplicación donde se utiliza es en los evaporadores, algunos de estos al tener su tubería de aluminio, lo que se hace es dejar una brida de acero soldada a la tubería del aluminio para que así el evaporador se pueda conectar al sistema sin problema alguno.

Una aplicación interesante es en el campo de la química, en la fabricación de cubas electrolíticas de aluminio. “Se trata de una electrólisis ígnea, por lo que las condiciones de corrosión, por efecto de las temperaturas de trabajo, se acentúan enormemente. Las barras catódicas y anódicas son generalmente de acero pero, como es lógico, los electrodos deben ser de aluminio. Es necesario, pues, pasar de acero a aluminio en la proximidad de la cuba. Si la transición de ambos metales se efectúa mediante tornillos o pernos, estos sufren en poco tiempo una fuerte corrosión producida por el ambiente circundante, con un aumento al paso de la corriente eléctrica”. Si se opta por una junta de transición soldada aluminio-acero, se podría soldar el acero de la barra al de la junta y el aluminio de la junta al del electrodo por medios convencionales. [2]

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se detalla el procedimiento experimental empleado para la fabricación de los cupones y, probetas las cuales son las fracciones extraídas del cupón de soldadura que son utilizadas para realizar los ensayos. Asimismo, se describen los pasos que se siguieron para la caracterización y la determinación de las propiedades, tanto del metal base como de las uniones soldadas.

2.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL BASE

A continuación, se describirán los ensayos realizados para determinar las características de los metales base empleados para la fabricación de los cupones.

2.1.1. Acero estructural ASTM A36

Para el presente trabajo se utilizaron planchas de acero ASTM A36 de tres milímetros de espesor. Para la obtención de los cupones de soldadura las planchas se cortaron con una dimensión de 165 milímetros de largo por 100 milímetros de ancho.

2.1.1.1. Análisis químico del acero estructural ASTM A36

Se prepararon unos tochos cuadrados de 40 milímetros de lado, los cuales se utilizaron como muestras del acero para poder realizar un análisis químico y de esta manera conocer los elementos que lo constituyen. Este análisis se realizó mediante el método de espectrometría de emisión.

2.1.1.2. Ensayo de tracción del acero estructural ASTM A36

Además, se fabricaron tres probetas de ensayo para determinar la resistencia mecánica de la plancha de acero ASTM A36 que estaba siendo utilizada para la presente investigación. Se pudo emplear la norma ASTM A370; sin embargo, se optó por emplear la norma ASTM E8 para homogenizar los ensayos ya que el aluminio será ensayado bajo esa norma.

2.1.2. Aleación de aluminio AA 5052-H34

Las planchas de la aleación de aluminio AA 5052-H34 que se utilizaron tienen un espesor de tres milímetros. Las dimensiones a la que se cortaron, para la obtención de

los cupones de soldadura, son las mismas que las del acero, 165 milímetros de largo por 100 milímetros de ancho.

2.1.2.1. Análisis químico del aluminio AA5052-H34

Al igual que se hizo con el acero, se prepararon tochos cuadrados de 40 milímetros de lado para la realización del análisis químico. Esto permitió conocer los elementos que conformaban al metal base.

2.1.2.2. Ensayo de tracción del aluminio AA5052-H34

También se elaboraron tres probetas para poder conocer la resistencia mecánica que presenta la plancha de la aleación de aluminio AA5052-H34 utilizadas en la presente investigación. El ensayo de tracción se hizo de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM E8.

2.2. ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

En esta sección se detallan los procesos de soldeo empleados y los parámetros de soldadura utilizados en la realización de los procedimientos de soldadura que permitieron la fabricación de los cupones de la unión soldada.

Al ser una unión disímil, no existen procedimientos definidos para realizar esta unión soldada. Sin embargo, se cuentan con recomendaciones para obtenerla, por lo que se realizaron ensayos previos para ir encontrando los parámetros de soldadura que permitan que la soldadura resultante cumpla las exigencias de la norma AWS B2.1

Para el presente trabajo, luego de la revisión bibliográfica consultada se optó por realizar la unión soldada mediante un proceso de *buttering*. Por lo que se empleará un *buttering*, en todas las uniones soldadas, en el lado del acero con un material de aporte Cu-8Al. Una vez que se tenga este recubrimiento, se procederá a soldar la aleación de aluminio utilizando un aporte de una determinada aleación de aluminio.

2.2.1. Tipo de Junta

Como el espesor de la plancha es de tres milímetros, se puede soldar usando una junta a tope sin preparación de bordes, es decir bordes rectos. En nuestro caso como al acero se le realizará un *buttering*, se procedió a hacerle un bisel como se aprecia en la figura 2.1, de tal manera que el *buttering* se puede depositar con mayor facilidad.

Una vez esté recubierto el lado del acero, se puede desbastar el *buttering* para mantener uniforme el espesor de la plancha.



Figura 2.1 Bisel realizado en el acero

2.2.2. Elección del metal de aporte

Para la elección del metal de aporte se tomó en consideración las recomendaciones de diversos autores, por lo que se utilizaron los siguientes electrodos:

2.2.2.1. Electrodo de Cu-8Al

Este electrodo se empleó para realizar el *buttering* en el lado del acero ya que se usa como revestimiento en aleaciones de acero y hierro fundido. Se espera que este electrodo al poseer un determinado porcentaje de aluminio permita unir el lado del aluminio y de esta manera evitar las zonas duras que se formarían al unir los dos metales base.

2.2.2.2. Electrodo de Al-12Si

Permite realizar uniones y revestimientos para aleaciones de aluminio tanto de forja como de fundición. El efecto más notable que tiene el silicio sobre el aluminio es el de mejorar las características de fundición, mejorando la fluidez y la resistencia a la fisuración en caliente. Asimismo, las adiciones de silicio disminuyen el coeficiente de expansión térmica que presenta el aluminio, lo cual muchas veces es beneficioso en la soldadura.

2.2.2.3. Electrodo de Al-5Si

Al igual que el electrodo anterior, al presentar silicio este material de aporte mejora la fluidez y la resistencia a la *fisuración* en caliente. Este material de aporte al tener menor contenido de silicio, presentará mayor resistencia mecánica que el anterior, Al-12Si.

2.2.2.4. Electrodo de Al-5%Mg

Se consideró utilizar este electrodo como material de aporte debido a que presenta resistencia a la fisuración en caliente y que el metal base es la aleación de aluminio AA5052-H34, también perteneciente a la serie 5. Asimismo, este aporte presenta mayor resistencia a la tracción y ductilidad que los aportes anteriores debido a que no hay presencia de silicio.

2.2.3. Elección del proceso de soldadura

A continuación se describen los diferentes ensayos realizados para encontrar el proceso de soldadura óptimo, tanto para la obtención del *buttering* como de los cupones soldados.

2.2.3.1 Proceso SMAW

a) *Buttering* Cu-8Al

Inicialmente, se realizó el *buttering* bajo el proceso SMAW, mediante tres pasadas, dos por la parte superior y una por la inferior. Una vez realizado el *buttering*, se preparó el borde realizándose un bisel para su posterior soldeo con la aleación de aluminio.

En el segundo ensayo, el *buttering* se realizó en cinco pasadas, dos por ambas caras y una en el filo; sin embargo, en esta oportunidad no se realizó el bisel en el lado cubierto por el *buttering*. Para este caso, se utilizó la misma intensidad de corriente que en el primero.

Para un tercer ensayo, se optó nuevamente por realizar cinco pasadas de *buttering*, pero en esta oportunidad si se realizó un chaflán en el borde del acero recubierto por el *buttering*.

En la Tabla 2.1 se muestra un cuadro resumen de los parámetros utilizados para la obtención del *buttering*.

Tabla 2.1 Parámetros de soldadura para la obtención del *buttering*

Cupón	Número de pasadas	Polaridad	Voltaje promedio (V)	Intensidad (A)
1	3	CCEP	23.8	62
2	5	CCEP	28.6	62
3	5	CCEP	23.9	62

Cabe resaltar que el voltaje mostrado en la Tabla 2.1 es el voltaje promedio del ensayo, esto se debe a que este variará dependiendo de la longitud del arco y este a su vez depende del soldador.

b) Cupones de soldadura

Para la elaboración de los cupones se empleó un electrodo revestido de Al-12Si y la polaridad era CCEP. Los parámetros de soldadura que se utilizaron en la fabricación de los cupones se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros de soldadura para la elaboración del cupón

Cupón	Material de aporte	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Separación (mm)
1	Al-12%Si	57	14	2
2	Al-12%Si	62	15	2.2
3	Al-12%Si	65	17	2

2.2.3.2 Proceso GMAW

a) *Buttering* de Cu-8Al

Se prepararon 3 cupones de acero con *buttering* bajo el proceso SMAW. En cada uno se realizaron cinco pasadas y se realizó un bisel luego de haber recubierto el acero. La intensidad empleada fue de 62A en cada una de las pasadas.

En la Tabla 2.3 se muestran los parámetros empleados en la realización del *buttering*.

Tabla 2.3 Parámetros utilizados en la realización de *buttering* bajo proceso SMAW

Cupón	Número de pasadas	Polaridad	Voltaje (V)	Intensidad (A)
1	5	CCEP	25.0	62
2	5	CCEP	23.4	62
3	5	CCEP	29.1	62

b) Cupones de soldadura

En esta oportunidad se utilizaron tres materiales de aporte diferentes. En todos ellos el gas de protección utilizado fue Argón y se aplicó la técnica del soldeo hacia adelante, el cual permitía tener un efecto de decapado antes que la fusión del metal base.

Para el primer ensayo se empleó un material de aporte de Al-5Si. Los parámetros utilizados fueron 15.4 V y una velocidad de alambre 5.3 m/min.

Para una segunda experiencia, se empleó el material de aporte Al-12Si. Se utilizó un voltaje de 16V y la velocidad de alambre se fijó en 5 m/min.

Por último se usó el material de aporte Al-5Mg, con un voltaje de 14.5 V y una velocidad de alambre de 5.4 m/min.

Cabe resaltar que en la máquina se fija el parámetro de velocidad de alambre y no el de intensidad de corriente, esto se debe a que estos parámetros son directamente proporcionales. Para un mismo voltaje si hay una mayor velocidad de alambre el amperaje deber ser mayor para poder consumirlo más rápido.

En la Tabla 2.4 se muestran los parámetros usados en la elaboración de los tres cupones bajo el proceso GMAW.

Tabla 2.4 Parámetros de soldeo con proceso GMAW

Cupón	Velocidad de alambre (m/min)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Material de Aporte	Separación (mm)
1	5.3	105	15.4	Al-5Si	2.0
2	5.0	113	16.0	Al-12Si	2.0
3	5.4	75	14.5	Al-5Mg	2.2

2.2.3.3 Proceso GTAW

a) Buttering Cu-8Al

Para realizar esta experiencia se optó por realizar el *buttering* bajo los procesos SMAW y GTAW.

Para dos cupones se empleó el proceso SMAW. En cada uno se hicieron cinco pasadas con una intensidad de corriente de 70A. Para finalizar, se desbastó la sobremonta para obtener un espesor uniforme y se realizó un bisel en el lado del *buttering*. En la Tabla 2.5 se muestran los parámetros utilizados.

Tabla 2.5 Parámetros utilizados para la realización del *buttering* bajo proceso SMAW

Cupón	Número de pasadas	Polaridad	Voltaje (V)	Intensidad (A)
1	5	CCEP	25.3	70
2	5	CCEP	28.6	70

Para poder realizar el *buttering* mediante el proceso GTAW, se procedió a retirar el revestimiento de los electrodos Cu-8Al para que puedan ser utilizados como varillas de aporte. Para este ensayo se empleó corriente alterna empleando una intensidad de 55A, encendido por alta frecuencia con el cual ya no es necesario golpear el metal base para cebar el arco. El balance fijado fue de 50%, el cual consiste en que la cantidad de tiempo entre las polaridades es la misma. El electrodo empleado fue uno de tungsteno puro de 3/32" de diámetro. En la Tabla 2.6 se muestran los parámetros mostrados.

Tabla 2.6 Parámetros para el *buttering* bajo proceso GTAW

Cupón	Amperaje (A)	Encendido	Arranque	Final	Balance
3	55	Alta frecuencia	15 A durante 3s	20 A durante 4s	50%

b) Cupones de soldadura

Como se explicó en el capítulo uno, el aluminio posee una capa de óxido, la cual debe ser removida para lograr una buena soldadura, es por tal motivo que al soldar el aluminio debe realizarse con corriente alterna o corriente continua con el electrodo al

positivo con el fin de obtener un proceso de decapado. Asimismo, el gas protector utilizado para todos los ensayos fue Argón.

Antes de elaborar los cupones de soldadura se realizaron descargas de material de aporte sobre planchas usando corriente continua con el electrodo al positivo y como electrodo tungsteno con óxido de torio al 2%. Se emplearon electrodos de tungsteno de tres diferentes diámetros: 3/32", 1/8" y 5/32".

También se optó por la opción de utilizar corriente continua con el electrodo al negativo, para esto se utilizó el electrodo de tungsteno con óxido de torio con diámetro de 3/32".

Por último, se empleó corriente alterna la cual permite decapar cuando se encuentra con polaridad inversa, electrodo al positivo y se enfría cuando el electrodo esta en negativo, lo que permite una mayor penetración. En este caso se usó un electrodo de tungsteno puro de 3/32" de diámetro.

En la elaboración de todos los cupones de soldadura se empleó una varilla de Al-5Si de 3.2 mm de diámetro y corriente alterna. Los parámetros de soldadura empleados en la realización de los cupones se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Parámetros de soldadura para la fabricación de cupones bajo proceso GTAW

Cupón	Amperaje (A)	Encendido	Arranque	Final	Balance
1	100	Alta frecuencia	20 A durante 3s	20 A durante 3s	50%
2	115	Alta frecuencia	20 A durante 5s	20 A durante 3s	50%
3	110	Alta frecuencia	15 A durante 5s	20 A durante 4s	40%

En este caso que el balance es de 40%, significa que este porcentaje de todo el periodo estará en polaridad inversa, por lo que tendrá un efecto mayor de penetración que de decapado.

2.3. ELABORACIÓN DE CUPONES DE SOLDADURA

A continuación se mostrarán los ensayos realizados a los cupones de soldadura para determinar las discontinuidades superficiales y de volumen(al interior de la unión).

2.3.1. Inspección visual

Realizar la inspección visual a los cupones obtenidos luego del proceso de soldeo permite observar si se produjo algún defecto en el cordón de soldadura. En el caso que se haya producido algún defecto como una fisura, esta se podrá registrar y en el caso de que el cordón no presente defectos, se podrá decir que este presenta continuidad metálica.

2.3.2. 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 esta energía al pasar a través de un material sólido es atenuada debido a factores como la diferencia de espesores, densidad o presencia de discontinuidades.

Estas variaciones de absorción quedan registradas en una película radiográfica y de esta manera se obtiene una imagen de la estructura interna del cordón de soldadura.

De los cupones inspeccionados visualmente, se optó por realizarle el ensayo de radiografía industrial a los cupones elaborados con el proceso SMAW (57A), GMAW cuando se utilizó el aporte de Al-5Si y por último al cordón obtenido mediante proceso GTAW realizado con el aporte Al-5Si.

2.3.2.1 Equipos y materiales utilizados

Máquina de rayos X: Se usó la máquina perteneciente al laboratorio de materiales de la PUCP.



Figura 2.2 Máquina de Radiografía Industrial

Película: Es el papel fotográfico donde quedará registro de las discontinuidades que se encuentren a lo largo del cordón de soldadura.

Indicadores de calidad de imagen: Conocido como IQI por sus siglas en inglés, es un arreglo de seis alambres ordenados según su diámetro en forma creciente. Tiene como función registrar la calidad de la radiografía, ya que si se ven menos alambres de los que se deberían quiere decir que el ensayo no cumple con la calidad debida.

2.3.2.2 Metodología del Ensayo

Para realizar este ensayo hay que tener en consideración diferentes parámetros. En primer lugar, se debe tener una gráfica de Tiempo vs Espesor para poder calcular el tiempo que deberá estar expuesto el cordón a los rayos X. En la tabla 2.8 se pueden apreciar los parámetros con los que se realizaron los ensayos de rayos X.

Tabla 2.8 Parámetros del ensayo de radiografía industrial

Proceso	Potencia (kV)	Tiempo (s)
GMAW	140	40
SMAW	140	25
GTAW	140	80

Luego habrá que revelar la película para poder obtener registro del cordón de soldadura con las proporciones mostradas en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Proporciones para el revelado de la película

	Revelador (L)	Agua (L)	Fijador(L)	tiempo (min)
Baño inicial	0.5	2	-	5
Baño intermedio	-	2	-	2
Baño final	-	2	0.5	5

Una vez finalizado el revelado, se debe medir la densidad de la película para corroborar la calidad de esta. Como se utilizó rayos X, la densidad de las películas debe estar entre 1.8 y 4.

2.4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

Se realizaron ensayos para determinar la resistencia mecánica de los metales base.

Una vez obtenidos los cupones y haber evaluado si presentaban discontinuidades, se procedió a realizar ensayos destructivos para poder medir las características de la unión disimilar obtenida.

2.4.1. Caracterización Mecánica

2.4.1.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta del material a un esfuerzo axial gradualmente creciente hasta provocar su rotura, a través de este ensayo se obtuvo, en los materiales base, el esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo o resistencia a la tracción y la ductilidad. En las uniones soldadas solo interesó conocer la resistencia a la tracción y ese valor fue el que se obtuvo.

Equipo: Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Materiales perteneciente a la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP utilizando la máquina de tracción universal marca Zwick/Roell Z050 la cual cuenta con una capacidad de hasta 50kN en tracción.



Figura 2.3 Máquina de tracción Zwick/Roell Z050

Probetas de cupones de soldadura: Las probetas de los cupones de soldadura fueron fabricadas según la norma AWS B2.1 bajo las dimensiones mostradas en la figura 2.4.

En la norma, en el anexo II 3.1 se indica que para espesores de una pulgada o menos se puede emplear una sola probeta. [15]

Se consideró en un principio que toda la probeta tenga el mismo ancho de 19 mm debido a la facilidad para la fabricación de la probeta; sin embargo, al momento de realizar el ensayo de tracción hay una alta probabilidad de que la unión soldada rompa en la zona del aluminio que es sujetado por las tenazas, por lo que para evitar ese problema se optó porque las partes finales tengan seis milímetros más que la sección reducida.

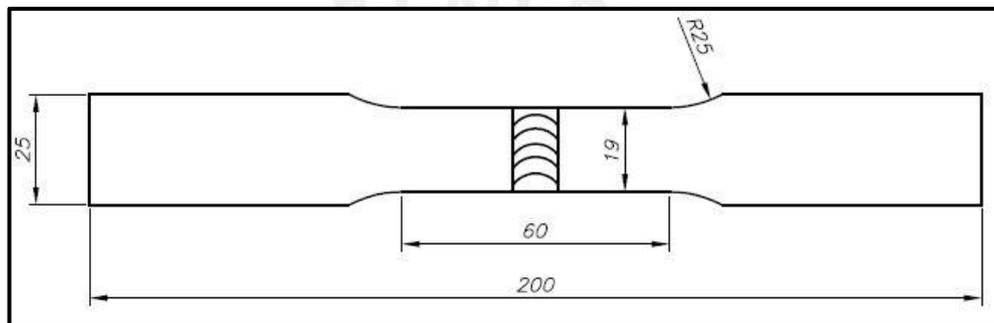


Figura 2.4 Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción de la unión soldada

El resultado que se obtenga se comparará con lo establecido en el código AWS B2.1 en el cual se especifica en el artículo 2.12.2.1 que la prueba de tracción debe demostrar que la unión soldada debe tener la menor resistencia a la tracción de los metales base que se están empleando. Por lo que se comparará con la resistencia del aluminio AA5052-H34 cuyo valor es 170 MPa la cual está especificada en el código AWS D1.2. [16]

2.4.1.2. Ensayo de dureza Vickers

Se optó por emplear el ensayo de dureza y no de microdureza, debido a que las indentaciones del ensayo de microdureza, no serían significativas para el tamaño de la probeta. Por lo que se empleó una carga de 5 kg durante diez segundos para la realización del ensayo.

Equipo: Para realizar el ensayo de dureza Vickers, se empleó el equipo Zwick/Roell ZHV, el cual se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la PUCP. La máquina se puede apreciar en la figura 2.5.



Figura 2.5 Máquina de dureza Vickers ZHV

Probetas: Para obtener los valores de dureza en las uniones soldadas de los cupones es necesario preparar una probeta del cupón de soldadura, para luego poder maquirarla ya que se debe dejar las caras paralelas y de esta manera poder ensayarlas apropiadamente. Sin embargo, se optó por briquetear la probeta para poder asegurar la correcta realización del ensayo, la cual se aprecia en la figura 2.6.



Figura 2.6 Probeta “briquetada” para el ensayo de dureza Vickers

Metodología del Ensayo

Primero se debe preparar la probeta briquetada, por lo que se procede a lijarla utilizando lijas al agua de los siguientes números: P220, P360, P400, P600, P1000 y por último P1200.

Una vez se tenga preparada la superficie de la probeta, se procede a realizar el ataque químico para poder revelar los límites del cordón y de la ZAC. Esto permite evaluar las durezas en las zonas que se formen a lo largo del cupón.

Para realizar los ensayos se empleó la norma ASTM E384, en la cual se indica que la distancia entre los centros de dos huellas consecutivas debe ser por lo menos dos diagonales de la huella.

Como la dureza Vickers se calcula de la relación de la carga en kilogramos aplicada y el área en mm^2 de la huella dejada por el indentador, es necesario conocer el área de la huella que se genera en la superficie de la pieza. Al ser el indentador, una pirámide regular de cuatro lados, la figura generada en la superficie de la pieza debería ser un cuadrado; sin embargo, esto no sucede siempre. Por tal motivo, el área se determina a partir de sus diagonales, las cuales a su vez se miden con la ayuda de un microscopio. A continuación se muestra la fórmula para calcular la dureza Vickers.

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{1.8544 \times F(\text{kg})}{d^2(\text{mm})}$$

Donde:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Las indentaciones se realizarán distribuidas como se aprecia en la figura 2.7, bajo la norma UNE-EN1043-1 en la cual se especifican como se deben realizar los ensayos de dureza en las uniones soldadas. [17]

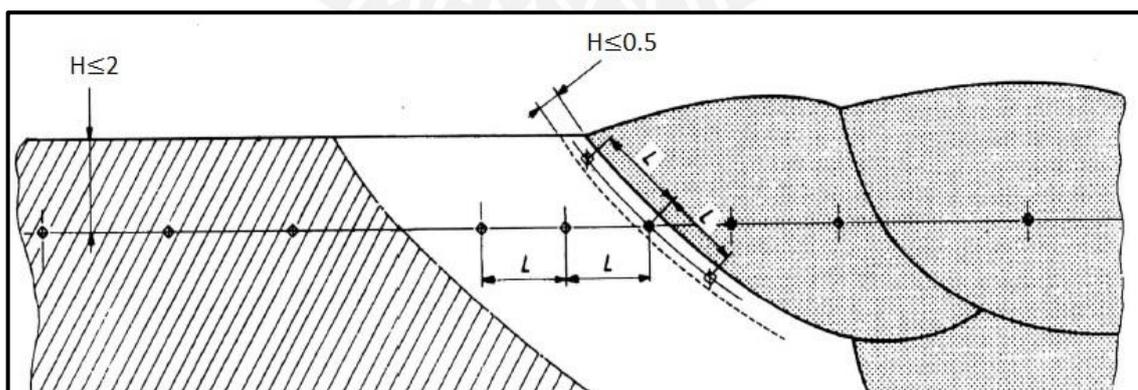


Figura 2.7 Distribución del ensayo de dureza [17]

2.4.1.3. Ensayo de doblado longitudinal

El ensayo de doblado longitudinal al cordón de soldadura se usa en lugar del ensayo de doblado transversal para evaluar casos en los que los metales base tengan diferencias marcadas en sus propiedades de doblado. Este ensayo permite apreciar la ductilidad de las probetas y a su vez la integridad del cupón soldado.

Probetas: Para poder realizar el ensayo de doblado longitudinal, se fabricaron probetas de acorde a la norma AWS B2.1 cuyas dimensiones son: 152.4mm de largo y 38 milímetros de ancho. Este ensayo evalúa la ductilidad de la unión soldada y a su vez permite comprobar que los diversos parámetros y materiales de aporte seleccionados en el procedimiento de soldadura no hayan generado fragilización o faltas de fusión a lo largo del cordón.

Como el espesor de la plancha es de 3 milímetros, el código AWS B2.1 estipula que cuando el espesor varía entre 1.5 y 3 milímetros el espesor de la probeta para realizar el ensayo el ensayo de doblado será de 3 milímetros.

Punzón: Es el elemento que genera el doblado de la probeta al descender sobre esta aplicando la fuerza que provoca la deformación. Según el código AWS B2.1 para calcular el diámetro del punzón se utilizará la siguiente relación:

$$A = \left(\frac{100 \times TS}{E} \right) - TS$$

Donde:

A : Diámetro del punzón

E : Elongación mínima a la tracción del metal base con menor elongación

TS : Espesor del espécimen

Como en este caso se ensayará una unión disímil, cada metal tendrá una elongación mínima a la tracción, por lo que se usará el de menor elongación, en este caso el aluminio AA5052-H34. Por lo tanto reemplazando los valores se tiene:

$$A = \left(\frac{100 \times 3mm}{6} \right) - 3mm$$

$$A = 47 \text{ mm}$$

Por lo que se usará un punzón con diámetro de 50 milímetros, y para la distancia entre los apoyos, se usará:

$$C = 50 \text{ mm} + 3 \text{ mm}$$

$$C = 53 \text{ mm}$$

Lamentablemente, no se contaba con suficiente material para realizar un cupón cuya longitud esté acorde con el código AWS B2.1. Por lo que se elaboró una probeta de 100 mm de longitud, 38 mm de ancho y el diámetro del punzón a utilizar fue de 25mm.



Figura 2.8 Probeta mecanizada para el ensayo de tracción

Metodología del Ensayo

Usando el punzón se aplicó una deformación plástica a las probetas, tal como se observa en la figura 2.9. Este ensayo se realiza en un solo sentido, ya que así se logra que una sola cara de la probeta esté sometida a los esfuerzos de tracción.

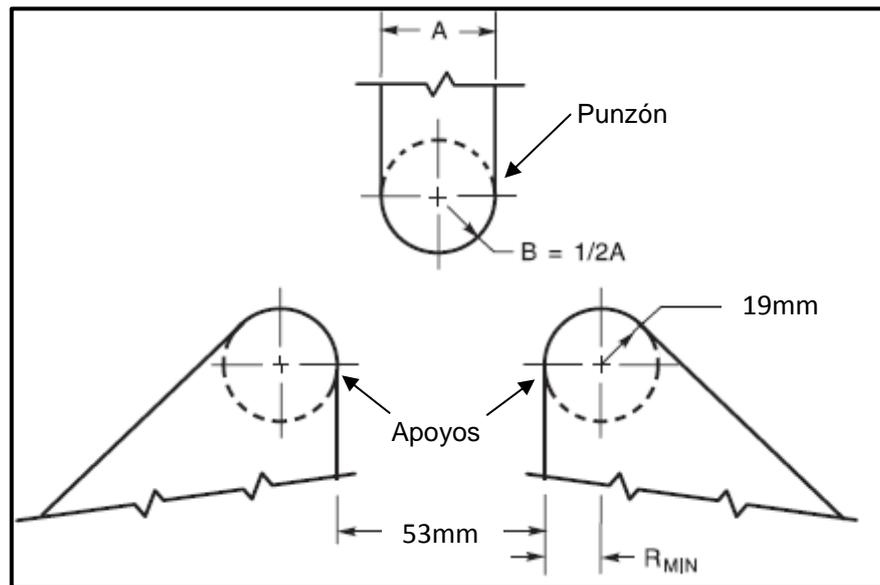


Figura 2.9 Punzón y apoyos empleados para el ensayo de doblado [15]

2.4.2. Caracterización microestructural

2.4.2.1 Metalografía

Permite estudiar las características microestructurales que presenta el metal para poder relacionarlas con las propiedades físicas, químicas y mecánicas. La información que se puede obtener de este ensayo es amplia debido a que se puede conocer las fases y microconstituyentes, el tamaño y forma de grano y si hay precipitaciones o inclusiones en el metal.

Equipo: El Laboratorio de Materiales de la PUCP posee un microscopio óptico Leica DMI5000 M con cámara fotográfica, el cual se muestra en la figura 2.10.



Figura 2.10 Microscopio óptico Leica DMI5000 M

Probetas: En este caso se tomaron muestras del cupón de soldadura y se colocaron en briquetas, como se apreció en la figura 2.6. Para realizar el ataque químico se usará la norma ASTM E407, en la cual se indican varias opciones para realizar el ataque químico en las aleaciones de aluminio de la serie 5, al cobre y al acero.

Metodología del Ensayo

Como la probeta para el ensayo metalográfico consta de tres diferentes metales, se deberá emplear tres diferentes reactivos para poder apreciar la microestructura de cada uno de ellos. Primero se atacó el acero ASTM A36 ya que el reactivo a emplearse es nital el 2% durante diez segundos. En segundo lugar será el cobre al cual se le atacó con cloruro férrico al 10% durante medio minuto. Para finalizar, el aluminio se atacó con el reactivo Keller. Se realizaron los ataques en ese orden, debido a que cada reactivo es más fuerte que el anterior.

3. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS METALES BASE

3.1.1. Acero estructural

3.1.1.1. Análisis químico del acero estructural ASTM A36

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados del ensayo realizado mediante espectrometría por emisión.

Tabla 3.1 Composición química de la plancha del metal base ASTM A36

Elemento	Porcentaje en peso (%)
C	0.20
Mn	0.14
Si	0.16
P	0.014
S	0.005
Ni	0.01
Cr	0.02
Cu	0.01
Fe	Resto

De acuerdo a los resultados de la tabla 3.1 se aprecia que se encuentran dentro de los parámetros que se muestran en la tabla 1.2, por lo que se verifica que la composición química corresponde a la de un acero estructural ASTM A36.

3.1.1.2. Ensayo de tracción del acero estructural ASTM A36

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados de las tres probetas del acero ASTM A36 ensayadas a tracción.

Tabla 3.2 Resultados del ensayo de tracción de acero ASTM A36 empleado

Probeta	Área Inicial (mm ²)	Longitud final (mm)	Alargamiento (%)	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)	
				Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima
1	36.7	66.6	33%	10.0	16.7	272.48	455.04
2	36.52	65.4	31%	9.9	16.6	271.08	454.55
3	36.77	65.0	30%	9.9	16.5	269.24	448.74
Promedio			31%	9.9	16.6	270.94	452.77

De los ensayos realizados en el acero ASTM A36 se obtuvo una resistencia a la fluencia promedio de 270.94 MPa, una resistencia máxima de 452.77 Mpa y una elongación de 31%. Estos valores concuerdan con los valores mostrados en la Tabla 1.3. Todas las probetas ensayadas rompieron dentro de las marcas que se hicieron para evaluar la elongación.

3.1.2 Aleación de aluminio AA5052-H34

3.1.2.1. Análisis químico del aluminio AA5052-H34

En la Tabla 3.3 se muestran los resultados que se obtuvieron de la composición química de la aleación de aluminio AA5052-H34.

Tabla 3.3 Composición química plancha 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

Los resultados que se muestran presentan un contenido de magnesio ligeramente menor al mostrado en la Tabla 1.9. El resto de elementos químicos se encuentra dentro de lo establecido como composición química nominal.

3.1.2.2. Ensayo de tracción del aluminio AA5052-H34

En la Tabla 3.4 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de tracción realizado a probetas de la aleación de aluminio AA5052-H34.

Tabla 3.4 Resultados del ensayo de tracción del aluminio AA5052-H34

Probeta	Área Inicial (mm ²)	Longitud final (mm)	Alargamiento (%)	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)	
				Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima
1	38.26	55.08	10%	7.4	9.4	193.41	245.69
2	38.12	55.29	11%	7.4	9.4	194.12	246.59
3	38.29	55.39	11%	7.5	9.4	195.87	245.49
Promedio			11%	7.4	9.4	194.47	245.92

Las probetas ensayadas presentaron una resistencia a la fluencia promedio de 194.47 MPa, una resistencia máxima de 245.92 MPa y una elongación de 11%. Estos valores están de acuerdo a la Tabla 1.10. Asimismo todas las probetas rompieron dentro de la longitud calibrada.

3.2 RESULTADOS DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

En esta sección se detallan los resultados de las experiencias que se tuvieron al momento de fabricar los cupones para encontrar el procedimiento de soldadura óptimo.

3.2.1 Tipo de junta

3.2.1.1. Obtención del *buttering*

El realizar el bisel en el acero como se apreció en la figura 2.1 permite que al momento de hacer el *buttering*, este recubra al acero sin aumentar demasiado el espesor de la pancha, que es lo que sucedió cuando se realizó el *buttering* sin chaflán en el acero. Luego de haber obtenido el *buttering* también se le realizó un bisel, de tal manera que el filo del acero cubierto por el *buttering* sea homogéneo y así tener una distancia de separación uniforme entre los dos metales base a soldar. También se evaluó la posibilidad de no realizar bisel en el *buttering*, pero no se obtuvieron buenos resultados ya que se obtuvieron concentradores de tensiones al no estar uniforme el espesor del *buttering* sobre el acero y, además que la separación de los metales base no es uniforme.

3.2.1.2. Uniones soldadas

Se aprecia en la figura 3.1 la preparación de bordes realizada para la elaboración de los cupones de soldadura. A la aleación de aluminio AA5052-H34 no se le preparó un bisel, ya que no ameritaba dado que el arco iba a estar dirigido al lado del acero y si se preparaba el bode el aluminio, hubiera sido necesario aportar más material y por lo tanto más calor, lo cual hubiera provocado una fisuración en caliente en el lado del aluminio.

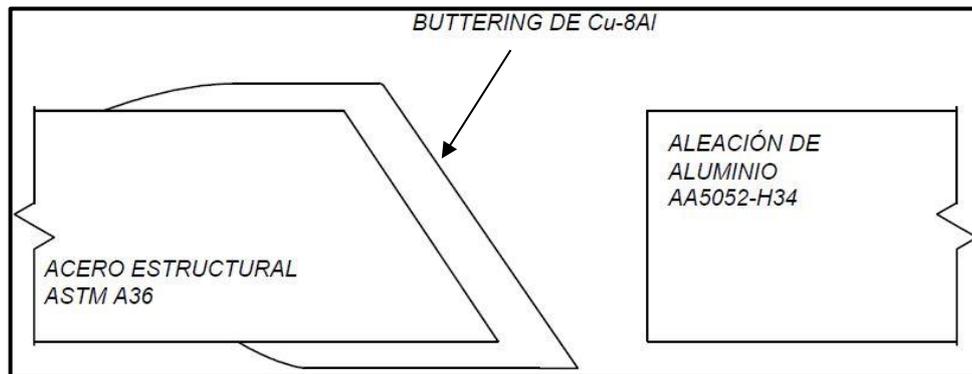


Figura 3.1 Esquema de preparación para realizar la unión soldada

3.2.2 Resultado del material de aporte

3.2.2.1. Electrodo de Cu-8Al

Este electrodo se utilizó para realizar el *buttering* tanto en proceso SMAW como en proceso GTAW. Con el proceso SMAW se presentaron dificultades al momento de remover la capa de escoria que se formaba protegiendo al cordón, ya que esta no salía con facilidad. Si bien con el proceso GTAW no se presentaba este problema, el *buttering* que se formó no presentaba tan buena dilución en el acero como lo hacía con el proceso SMAW.

Por lo que con el proceso SMAW se obtuvieron mejores resultados que utilizando el proceso GTAW.

3.2.2.2. Electrodo de Al-12Si

Se utilizó como material de aporte para la realización de las uniones soldadas con los procesos GMAW y SMAW. Cuando se utiliza en la forma de electrodo revestido no se tienen buenos resultados debido a que la protección que ofrece el revestimiento no es suficiente, lo que ocasiona la presencia de poros superficiales. Problema que no ocurre cuando se utiliza con el proceso GMAW debido a la presencia del gas protector.

3.2.2.3. Electrodo de Al-5Si

Se empleó como metal de aporte en los procesos de GMAW y GTAW. En ambos se obtuvieron buenos resultados, ya que no se apreciaron discontinuidades superficiales ni fisuraciones en caliente. Por lo tanto, se recomendaría emplear estos electrodos para la elaboración del proceso de soldadura óptimo.

3.2.2.4. Electrodo de Al-5Mg

Como metal de aporte, solamente se usó con el proceso GMAW. Este aporte a pesar de no poseer silicio y presentar mejores propiedades mecánicas, que los aportes Al-5Si y Al-12Si, el cupón elaborado por este electrodo se fisuró en caliente.

3.2.3 Resultado del proceso de soldadura

A continuación, se describirán los resultados que se obtuvieron luego de realizar las uniones soldadas mediante los procesos de soldadura empleados en la presente investigación.

3.2.3.1 Proceso SMAW

a) Buttering Cu-8Al

Se apreció una buena dilución entre el electrodo y el acero al momento de realizar el recubrimiento. Con las tres pasadas se obtuvo un espesor de cuatro milímetros y no se apreció ninguna discontinuidad.

Cuando se realizaron cinco pasadas, se obtuvo un aumento en el ancho de siete milímetros. No se apreció ninguna discontinuidad; sin embargo, como se mencionó el espesor en el borde no era uniforme como para realizar la unión soldada sin una preparación previa de un bisel.

b) Cupones de soldadura

En la elaboración de los cupones de soldadura, mediante el proceso de soldeo SMAW, se obtuvieron discontinuidades superficiales a lo largo del cordón, las cuales se mostrarán más adelante. Mediante este proceso de soldeo solo es necesario un pase para obtener la unión con buena penetración como se aprecia en la figura 3.2.



Figura 3.2 Raíz del cordón de soldadura bajo proceso SMAW

3.2.3.2 Proceso GMAW

a) Buttering Cu-8Al

El *buttering* obtenido mediante este proceso logró aumentar el ancho del material unos siete milímetros aproximadamente. A su vez, se desbastó el recubrimiento para poder realizar un bisel a los tres cupones fabricados y poder emparejar el límite del cupón lo cual sirve para tener una separación constante cuando se vaya a soldar con la aleación de aluminio.

b) Cupones de Soldadura

Cabe resaltar que en los cupones fue necesario realizar una segunda pasada, debido a que no se logró una penetración completa con el primer cordón.

Respecto al cupón elaborado con el material de aporte Al-5Si, no presentó discontinuidades superficiales, pero al momento de realizar el segundo cordón este generó una sobremonta excesiva.

El cupón elaborado con el aporte de Al-12Si se realizó dos veces, en la primera oportunidad luego de haber realizado el cordón, este emitía fuertes sonidos provenientes de las contracciones que sufría el material luego del proceso de soldeo lo que terminó con la fisuración en caliente del cupón. Se pensó que la fisuración se presentó debido a que como los metales base estaban sujetos mediante alicates de presión, estos rigidizaron mucho a los metales base. En una segunda oportunidad, se repitió el proceso pero una vez acabado el soldeo, se procedió a retirar los alicates para efectuar el alivio de tensiones; sin embargo, el cordón volvió a presentar

fisuración en caliente. Esta fisuración se debe a que el alto porcentaje de silicio presente en el metal de aporte más el calor producido por el soldeo provocó que se presentara dilución y mezcla del aporte Al-12Si y la aleación de aluminio del metal base, lo cual genera que se forme el compuesto Mg_2Si (siliciuro de magnesio) el cual ocasiona que se produzca la fisuración en caliente.

Como tercer cupón se empleó el material de aporte Al-5Mg, el cual se pensó que al poseer una mayor ductilidad se lograría una mejor unión soldada. Pero, luego de finalizar el cordón presento fisuración en caliente.

3.2.3.3 Proceso GTAW

a) Buttering Cu-8Al

En los cupones en los cuales se empleó el *buttering* con proceso GTAW se obtuvo un crecimiento de siete milímetros. Fue necesario desbastar el recubrimiento realizado para emparejar el borde y tener un espesor homogéneo.

Para realizar el *buttering* mediante el proceso GTAW, se procedió a retirar el revestimiento del electrodo Cu-8Al para poder utilizarlo como material de aporte. Este se realizó en el filo del cupón del acero como se aprecia en la figura 3.3 para que al momento de soldar solamente se funda el *buttering* con el material de aporte de aluminio. Lamentablemente, bajo este proceso, la dilución entre el *buttering* y el metal base es pequeña. Caso contrario de lo que sucede al emplear el *proceso* SMAW donde se obtiene un buen recubrimiento

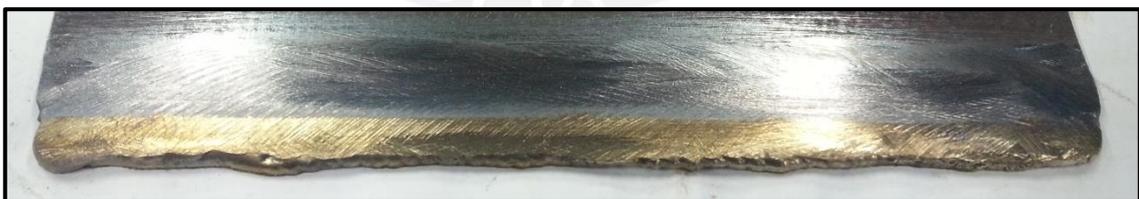


Figura 3.3 Buttering en el lado del acero utilizando proceso GTAW

b) Cupones de soldadura

En la primera experiencia, se utilizó un electrodo de tungsteno de 3/32" para realizar líneas de calor en una plancha de aluminio. Sin embargo, como se utilizó corriente continua con el electrodo al positivo no había penetración como se muestra en las

figuras 3.4 y 3.5, debido a que el electrodo no puede soportar las altas intensidades como si lo hace cuando se conecta al negativo.



Figura 3.4 Vista superior de la línea de fusión



Figura 3.5 Lado opuesto donde se aprecia que no hubo penetración

Asimismo, como el electrodo soportaba la mayor temperatura y se trataba de un diámetro pequeño, este se fundía originando inclusiones de tungsteno como se muestra en la figura 3.6. Por tal motivo se optó por utilizar el electrodo de 5/32" ya que al poseer mayor diámetro soportaría mayores intensidades y por lo tanto mayores temperaturas; sin embargo, al momento de cebar el arco para realizar las líneas de fusión en el aluminio, con este electrodo no se llegaba a estabilizar el arco formado.



Figura 3.6 Inclusiones de tungsteno

Con el electrodo de 1/8" no hubo problema al arrancar y establecer el arco eléctrico; sin embargo, este tampoco era capaz de soportar las altas temperaturas que se alcanzaba en el proceso de soldeo, por lo que se producían inclusiones de tungsteno a la hora de realizar las líneas de descarga.

Se realizó las líneas de fusión con el electrodo de 3/32" pero en esta oportunidad con polaridad directa o electrodo al negativo. En este caso se obtenía una buena penetración, pero la línea de fusión era de color negro debido a la presencia del óxido de aluminio, debido a que empleando esta polaridad no se obtiene el efecto de decapado.

Se realizaron dos cupones de soldadura empleando *buttering* con proceso SMAW y para la unión proceso GTAW con material de aporte Al-5Si con intensidades de 100 A y 115 A.

El primer cupón, en el cual se utilizó una corriente de 100 A no presentó discontinuidades superficiales ni sobremontas excesivas en el cordón.

El segundo cupón no soportó la gran cantidad de calor aportado, por lo que se fisuró en caliente en el metal base, más precisamente en la ZAC.

El tercer cupón preparado, cuyo había sido elaborado por proceso GTAW, se soldó al aluminio empleando un aporte de Al-5Si. Como el *buttering* se había realizado en el borde del cupón para que su ancho aumente, no presentaba buena adherencia con el borde del acero. Por lo que al realizar la unión empleando una intensidad de 55 A, el *buttering* se desprendió del lado del acero como se muestra en la figura 3.7.



Figura 3.7 Cordón de soldadura bajo el proceso GTAW

3.3 CUPONES DE SOLDADURA

3.3.1 Inspección visual

3.3.1.1. Proceso SMAW

Una vez realizada la soldadura, se procedió a retirar la capa escoria que protegía al cordón realizado. Como se aprecia en la figura 3.8, la superficie del cordón realizado por el material de aporte Al-12Si (57A, 14V) presenta porosidades a lo largo de todo el cordón; por ello, se comprueba que este proceso de soldadura no es recomendable para realizar uniones de calidad en aleaciones de aluminio.



Figura 3.8 Porosidades en la cara del cordón de soldadura bajo proceso SMAW

3.3.1.2. Proceso GMAW

A diferencia de los cupones realizados bajo proceso SMAW, los cupones obtenidos mediante proceso GMAW no presentaron porosidades superficiales. En la figura 3.9 se muestra el cupón obtenido cuando se utilizó el aporte de Al-5Si. Este cordón no presentaba fisuras, más bien el problema era el tamaño del sobrespesor ya que era un claro concentrador de tensiones.

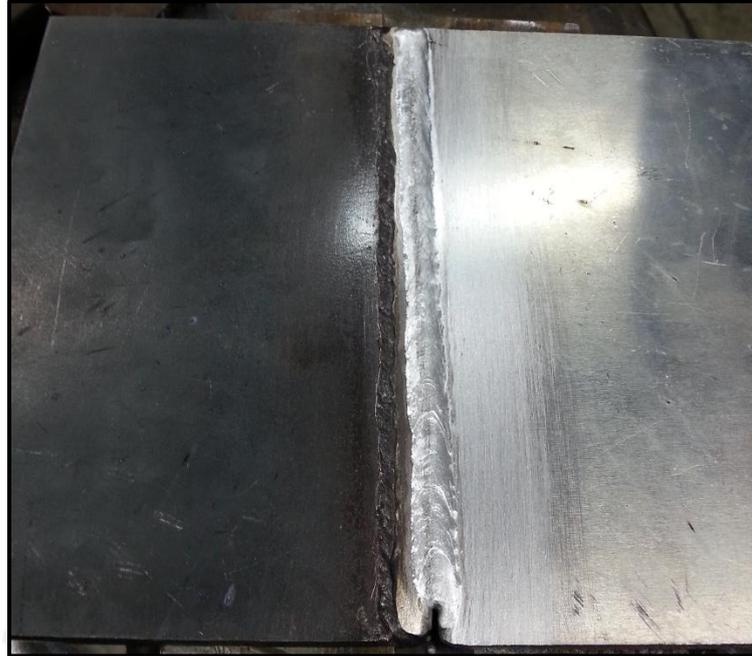


Figura 3.9 Cupón realizado con proceso GMAW y aporte Al-5%Si

El cupón que se realizó utilizando el aporte Al-12Si se fisuró en caliente, como se puede apreciar en la figura 3.10. Se pensó que la fisuración se debió a que no se aliviaron las tensiones, ya que para realizar la soldadura, los cupones de los metales base se encontraban sujetos a la mesa con alicates de presión. Sin embargo, se repitió la experiencia y en esta nueva oportunidad se soltaron los alicates a presión una vez realizada la soldadura, lamentablemente el resultado fue el mismo ya que se volvió a producir una fisuración en caliente.



Figura 3.10 Cupón realizado con proceso GMAW y aporte Al-12%Si.

Por último, se realizó la experiencia con el material de aporte Al-5%Mg; sin embargo, este sufrió una fisuración en caliente tal como se aprecia en la figura 3.11.



Figura 3.11 Cupón realizado con proceso GMAW y aporte Al-5%Mg

3.3.1.3 Proceso GTAW

Los cupones elaborados con *buttering* con proceso SMAW se pueden apreciar en las figuras 3.12 y 3.13. El primer cupón de soldadura, elaborado con 100 A no presenta discontinuidades superficiales, tampoco sobremonta excesiva que pueda actuar como concentrador de tensiones.



Figura 3.12 Unión soldada bajo proceso GTAW con aporte Al-5Si

En cambio, el cupón fabricado con 115 A presentó fisuración en caliente cerca de la línea de fusión en la zona afectada por el calor del aluminio, la longitud de la fisura abarcaba cerca del 80% de la longitud total del cordón realizado.



Figura 3.13 Cupón realizado con proceso GTAW Al-5%Si y buttering SMAW

Con respecto al cupón elaborado con buttering GTAW, se vio en la figura 3.5 que el *buttering* realizado no fue bueno. Esto se puede apreciar en la figura 3.14, donde se observa que al momento de realizar el *buttering* solo se formó una capa para que aumente el ancho del metal base. La cual al momento de realizar la soldadura se desprendió del lado del acero ocasionando una falta de fusión a lo largo del cordón.



Figura 3.14 Detalle de la falta de dilución

3.3.2 Radiografía industrial

Como se puede observar, el tiempo de exposición para el cupón realizado por el proceso GMAW es mayor al del proceso SMAW. Esto se debe a que el espesor en cordón de soldadura era mucho mayor en el proceso GMAW.

Además, en el proceso GTAW se empleó un mayor tiempo de exposición debido a que el tubo de rayos X no se encontraba a 700 mm sino que se encontraba a 1000 mm.

Como se aprecia en la figura 3.15, el cordón realizado con el proceso SMAW y aporte AL-12Si no presenta discontinuidades en la parte inferior del cordón, lo cual concuerda con la buena raíz formada al momento de realizar la soldadura.

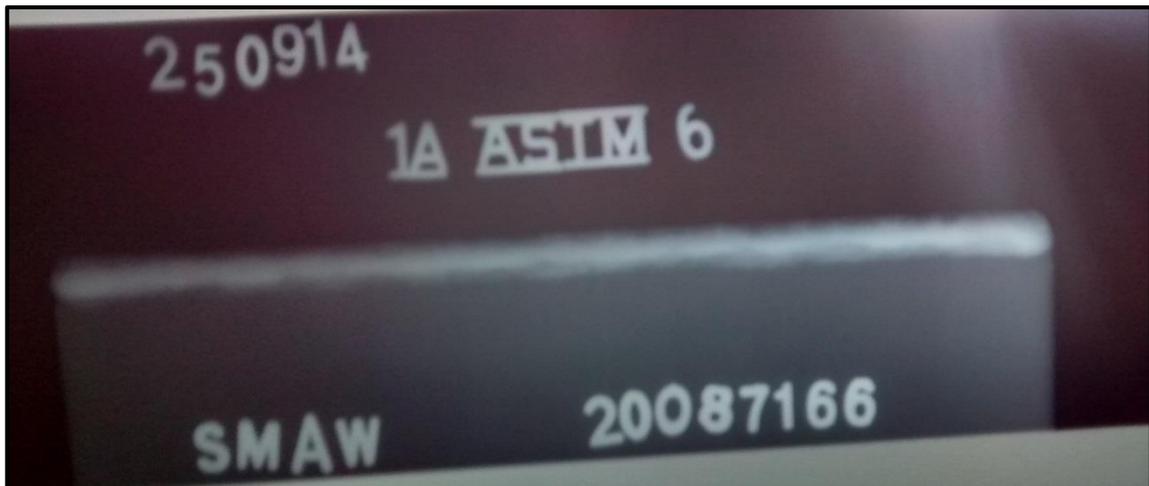


Figura 3.15 Radiografía a cupón elaborado con proceso SMAW utilizando aporte Al-12Si

En la figura 3.16 se muestra el cordón elaborado con el proceso GMAW, empleando un aporte el cual presenta una fisura transversal a la mitad del cordón y un poro aislado. Esta fisura es interna, ya que al momento de realizar la inspección visual no se observaron discontinuidades superficiales.



Figura 3.16 Radiografía a cupón elaborado con proceso GMAW utilizando aporte Al-5Si

Para finalizar, en la figura 3.17 se muestra el cordón obtenido por el proceso GTAW utilizando un aporte de Al-5Si. En la placa se pueden observar dos conjuntos de poros, los cuales estarían en el límite entre el *buttering* y el cordón de soldadura.

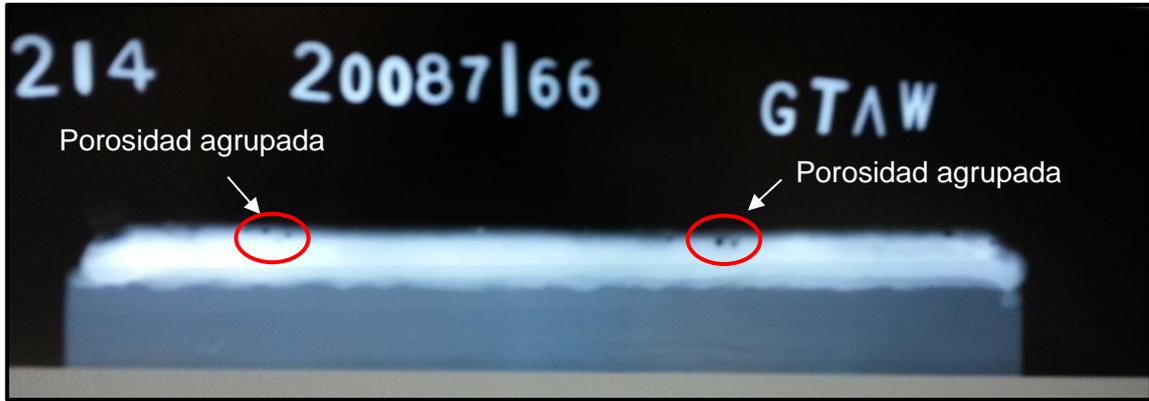


Figura 3.17 Radiografía a cupón elaborado con proceso GTAW utilizando aporte Al-5Si

3.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIONES

3.4.1 Caracterización mecánica

3.4.1.1 Ensayo de tracción

A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron del ensayo de tracción de las probetas extraídas de los cupones de soldadura.

El objetivo del ensayo de tracción es poder obtener la resistencia máxima a la cual podría ser sometida la unión soldada antes de romper.

a) Proceso SMAW

Cuando se mecanizó, para obtener las probetas, el cupón soldado con el proceso SMAW empleando el aporte Al-12Si, este no soportó las cargas del mecanizado y se fracturó. Tal como se puede ver en la figura 3.18, el cordón presentaba porosidades interiores y había falta de fusión entre el metal de aporte y el *buttering* utilizado.

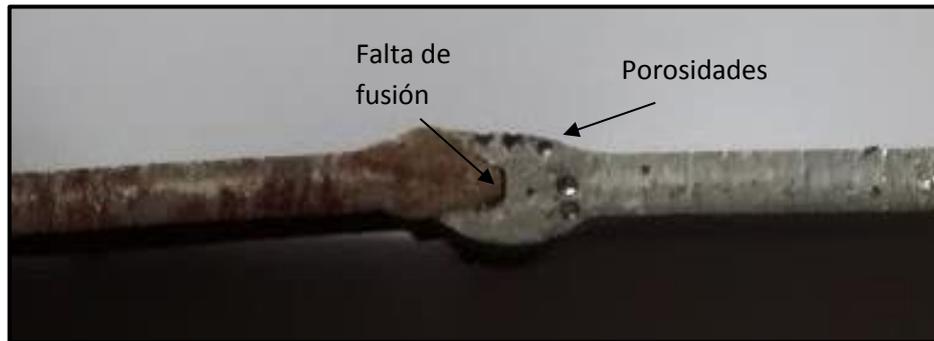


Figura 3.18 Vista transversal del cordón realizado con proceso SMAW

b) Proceso GMAW

A diferencia del cupón soldado con proceso SMAW, el cupón elaborado con el proceso GMAW y material de aporte Al-5Si si soportó las cargas del mecanizado, por lo que se pudo realizar el ensayo de tracción. Se obtuvo una resistencia 86 MPa, este valor corresponde al 50.6% de la resistencia a la tracción de la aleación AA5052-H34. Lo cual es la mitad que debió haber soportado la unión soldada. En la figura 3.19, se puede apreciar cómo fue la ruptura de la probeta soldada. Esta se produce en el límite entre el *buttering* y el cordón de soldadura.



Figura 3.19 Vista transversal al cordón realizado con proceso GMAW

En las figuras 3.20 y 3.21, se observan las zonas de ruptura del cordón. Se aprecia la gran cantidad de poros presentes en el cordón. La fractura tiene apariencia brillante y granular, lo cual consiste con una rotura de tipo frágil.



Figura 3.20 Zona de ruptura en el aluminio



Figura 3.21 Zona de ruptura en el acero

c) Proceso GTAW

Por último, se mecanizó el cupón obtenido con el proceso GTAW, utilizando como material de aporte Al-5Si. Sin embargo, al momento de realizar el mecanizado se produjo una fisura en el límite entre el *buttering* y el metal de aporte. La figura 3.22 muestra la vista transversal del cordón luego del mecanizado. Se aprecia que la interfase entre el *buttering* y el cordón de soldadura producido por el aporte Al-5Si, no soportó los esfuerzos que se generaron durante el mecanizado.

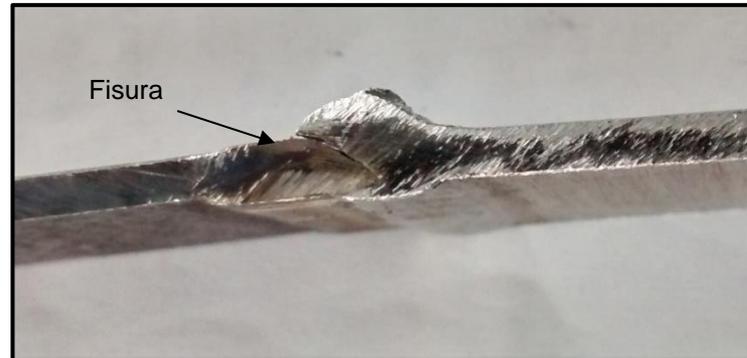


Figura 3.22 Vista transversal del cordón GTAW con aporte Al-5Si luego del mecanizado

3.4.1.2 Ensayo de dureza Vickers

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a través del ensayo de dureza realizados en una unión soldada empleando el proceso Al-5Mg. En la Tabla 3.5 se muestran los resultados de las diferentes indentaciones realizadas en el barrido de durezas.

Tabla 3.5 Resultados del ensayo de HV5

Puntos	D1 (μm)	D2 (μm)	D promedio (μm)	HV5
1	254.4	251.7	253.05	139
2	259.9	261.7	260.8	136
3	268.2	265.4	266.8	130
4	270	271.8	270.9	126
5	266.3	266.3	266.3	131
6	261.7	268.2	264.95	132
7	246.1	246.1	246.1	153
8	248.9	247	247.95	151
9	237.8	243.3	240.55	160
10	226.8	235.1	230.95	174
11	234.1	239.7	236.9	165
12	235.1	233.2	234.15	169
13	337.2	343.6	340.4	80
14	351	355.6	353.3	74
15	347.3	346.4	346.85	77
16	376.7	382.2	379.45	64
17	383.2	383.2	383.2	63
18	401.6	404.3	402.95	57
19	395.1	394.2	394.65	60
20	393.3	400.6	396.95	59

Donde $D1$ y $D2$ indican las dimensiones de las dos diagonales dejadas por la huella de indentación y D promedio, el valor de la semisuma de las diagonales dejadas por la huella.

En la figura 3.23 se puede apreciar la variación de la dureza a través de la sección transversal al cordón de soldadura. En la zona del aluminio se hicieron tres mediciones en línea vertical para verificar las durezas de la ZAC. También se observa que el buttering presenta mayor dureza que el acero.

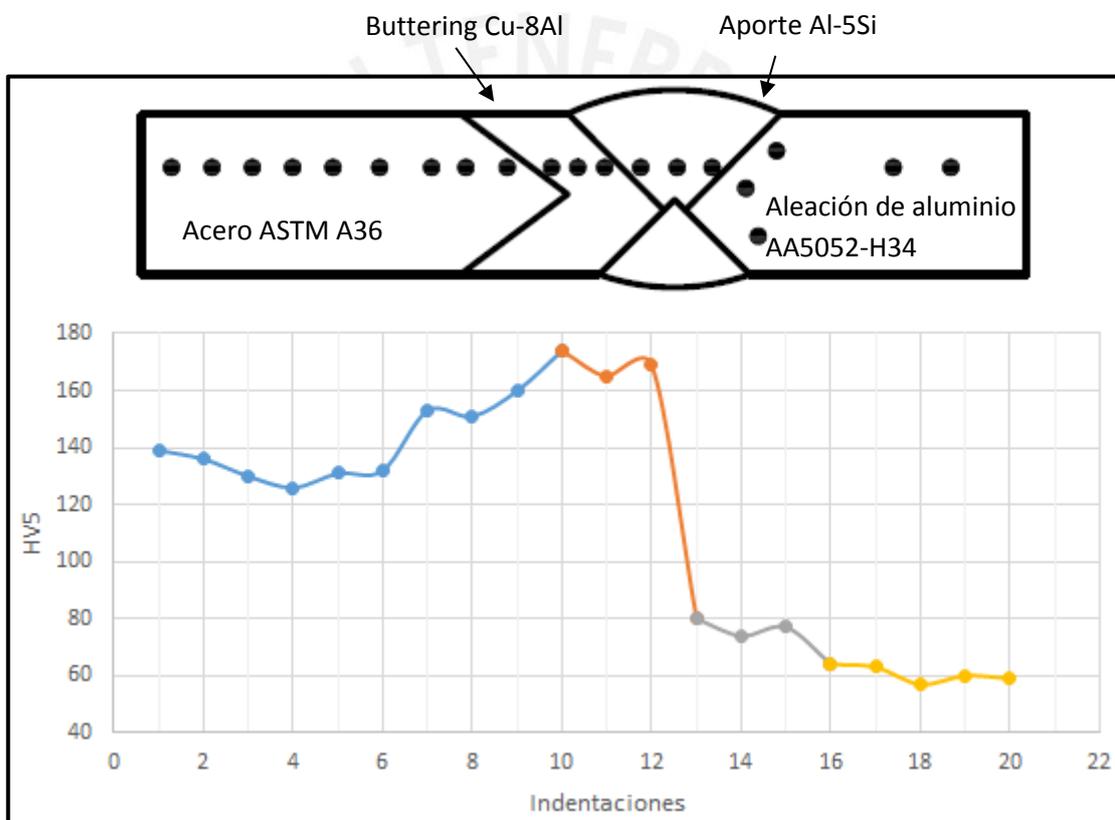


Figura 3.23 Gráfica del barrido de durezas de la unión soldada

3.4.1.3 Ensayo de doblado longitudinal

El ensayo de doblado longitudinal se realizó al cupón que fue soldado con el proceso GMAW utilizando un aporte de Al-5Si. Una vez que se mecanizaron las probetas de tal manera que se desbastó tanto el sobrespesor de la cara como el sobrespesor de la raíz del cordón, estas se encontraban listas para realizar el ensayo. El punzón utilizado fue de una pulgada de diámetro, por lo que el punzón al ser más pequeño que el recomendado en el código AWS B2.1, la probeta estará soportando mayores

deformaciones. Por tal motivo, se decidió hacer dos probetas para evaluar su comportamiento en el ensayo de doblado.

La primera probeta ensayada se puede apreciar en la figura 3.24, donde se ve el comportamiento del cordón de soldadura. Se aprecia una fisura entre el metal de aporte Al-5Si y la aleación de aluminio AA5052-H34; también que la interfase entre el acero ASTM A36 y el *buttering* no es muy resistente. En la figura 3.25, se observa el desprendimiento del material de aporte Al-5Si del *buttering* en la segunda probeta. Esto lleva concordancia con el ensayo de tracción, ya que fue justamente esa zona en la que se rompió la probeta.

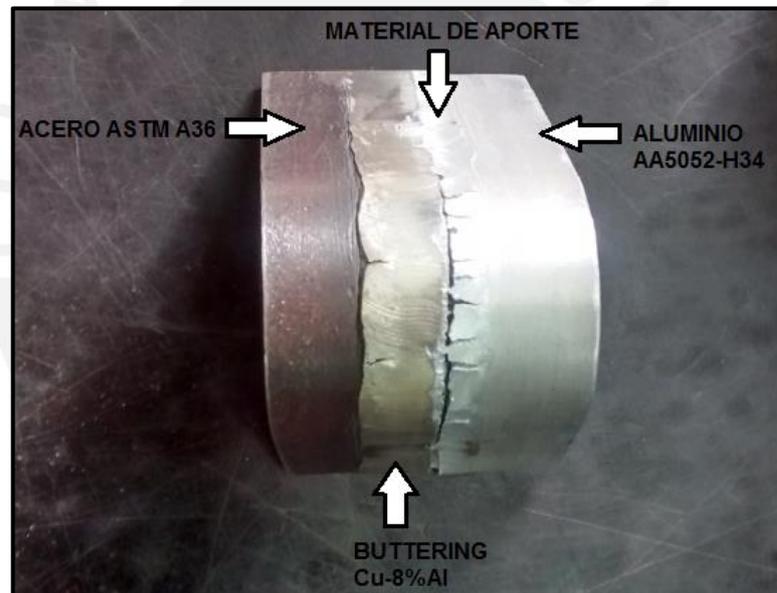


Figura 3.24 Ensayo de doblado del primer cupón bajo proceso GMAW

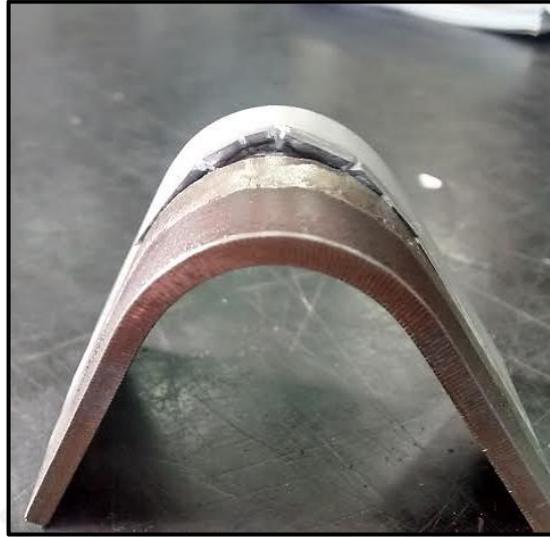


Figura 3.25 Resultado del ensayo de doblado del segundo cupón soldado

3.4.2 Caracterización microestructural

3.4.2.1 Metalografía

En la figura 3.26 se puede apreciar la macrografía a 50 aumentos de la unión soldada obtenida bajo proceso GMAW utilizando Al-5%Si como material de aporte. Se puede observar que el cordón de soldadura presenta porosidades. Asimismo, se procedió a realizar un análisis micrográfico, para observar los perfiles de los diferentes materiales presentes en el cordón de soldadura. Cabe resaltar que no se buscó identificar las fases presentes, debido a que ese sería un campo de estudio aparte.



Figura 3.26 Probeta atacada para la macrografía a 50 aumentos

En el lado del acero, se puede observar ferrita y perlita en baja cantidad como muestra la figura 3.27. En cambio, en la zona cercana al cobre, se puede ver que hay mayor porcentaje de perlita como se aprecia en la figura 3.28.

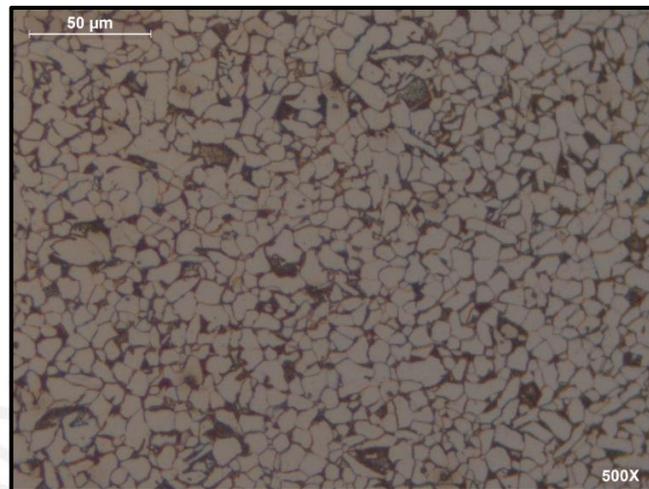


Figura 3.27 Microestructura del acero a 500 aumentos

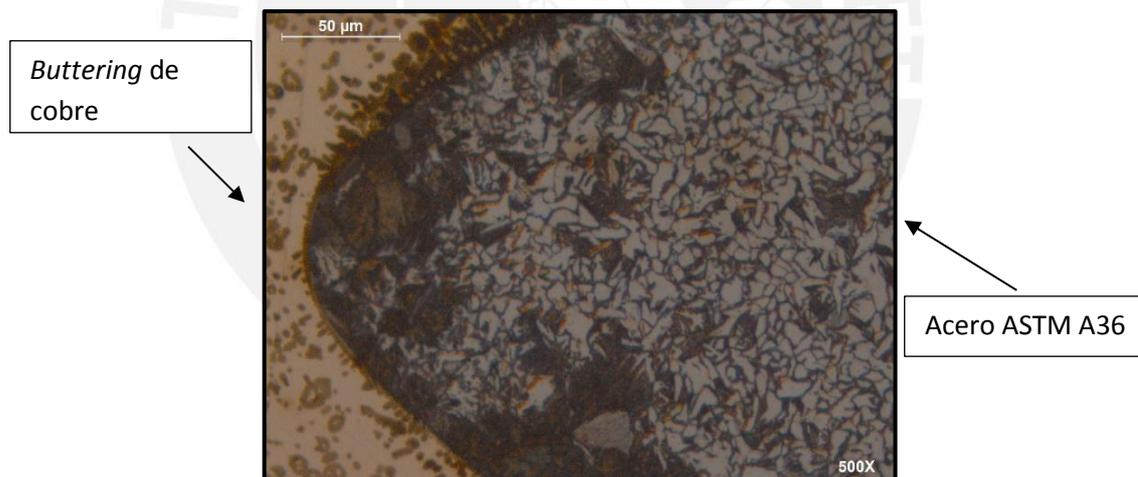


Figura 3.28 Microestructura en el límite del *buttering* y el acero a 500 aumentos

En la figura 3.29, se observa que si hay una muy pequeña dilución entre el cobre y el aluminio. Por tal motivo, no se puede obtener una mejor unión soldada.

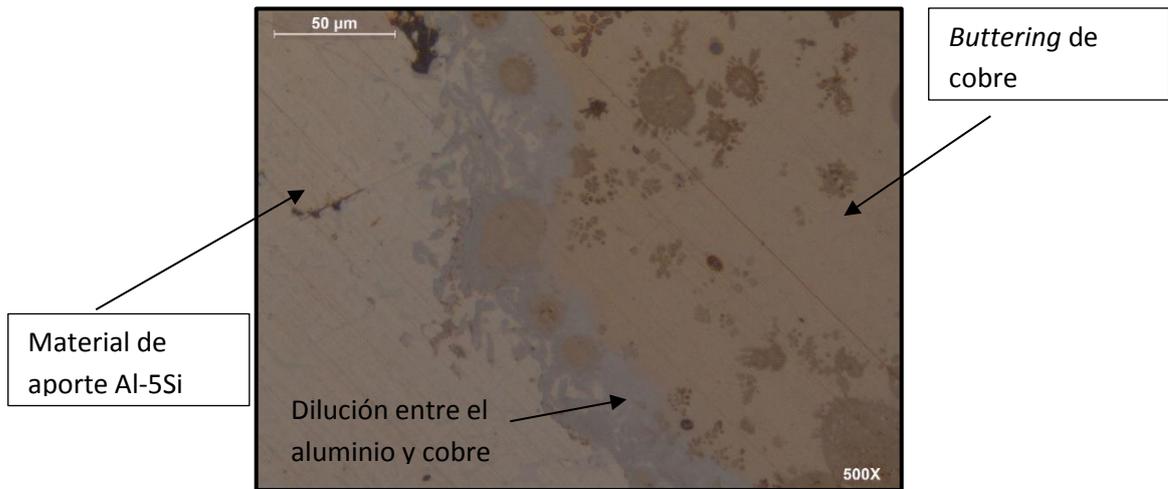


Figura 3.29 Microestructura en el límite entre el buttering y el material de aporte Al-5%Si

En la figura 3.30 se observan los diferentes cambios microestructurales sufridos en el *buttering* debido a los procesos de soldadura efectuados para la elaboración del cordón.

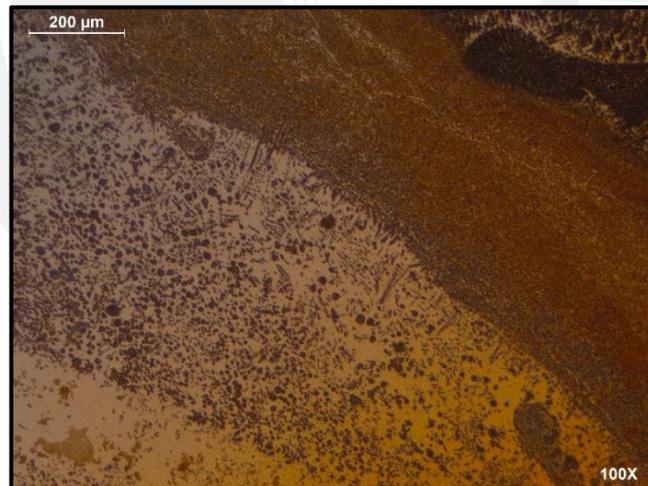


Figura 3.30 Microestructura en la parte del cobre

Después del ataque químico realizado mediante el reactivo de Keller, se puede apreciar en la figura 3.31 la microestructura del cordón de soldadura, así como su tamaño de grano. En la figura 3.32 se muestra el metal base en el cual se puede apreciar el sentido de la laminación.

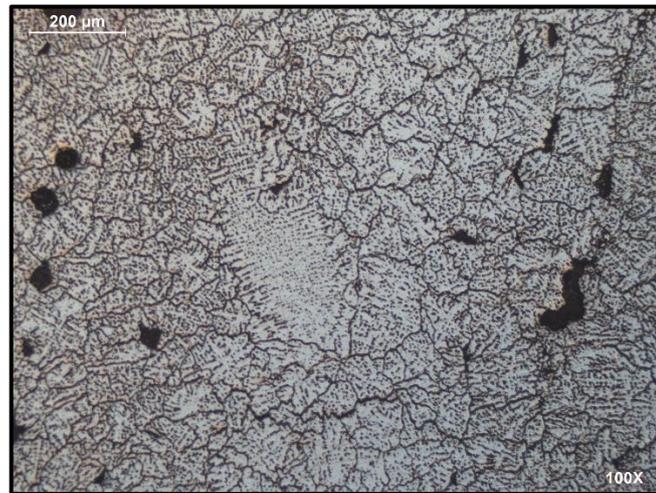


Figura 3.31 Microestructura del cordón de soldadura

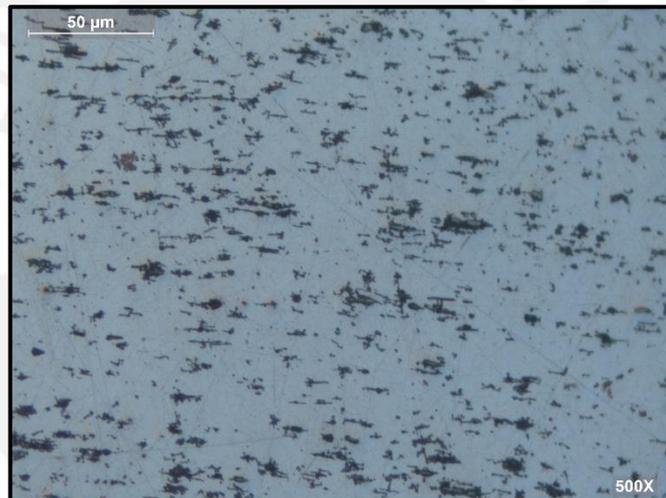


Figura 3.32 Microestructura del metal base del aluminio AA5052-H34

CONCLUSIONES

- 1.- Las uniones disimilares obtenidas entre el acero ASTM A36 y la aleación de aluminio AA5052-H34 no lograron alcanzar la resistencia mecánica indicada en el código AWS B 2.1 que establece que este tipo de uniones como mínimo deben alcanzar 170 MPa de resistencia a la tracción. En esta investigación los mejores resultados obtenidos alcanzaron los 86 MPa de resistencia a la tracción, representando el 50,6% de lo requerido por el código.
- 2.- No es posible obtener uniones, entre el acero estructural ASTM A36 y la aleación de aluminio AA5052-H34, empleando un solo metal de aporte, pues se presentan problemas de soldabilidad básicamente entre el aporte y el acero. Se hace necesario realizar el proceso de *buttering* en el lado del acero mediante el electrodo Cu-8Al.
- 3.- El procedimiento de soldadura con el que se obtuvieron las mejores propiedades mecánicas fue el realizado mediante el *buttering* a cinco pasadas mediante el proceso SMAW (62 A, 25 V) y realizando la unión con el proceso GMAW usando un aporte de Al-5Si (15.4 V, 105 A). Sin embargo, estas uniones no cumplieron lo requerido por el código en resistencia mecánica, ni en el ensayo de doblado, pues durante ambos ensayos se produce desprendimiento del *buttering* y el metal de aporte.
- 4.- De los tres procesos de soldadura empleados, SMAW, GMAW y GTAW; se comprueba que si se quiere garantizar la calidad de una unión soldada en una aleación de aluminio, el proceso SMAW no es una buena elección, pues los cordones presentan una gran cantidad de poros superficiales y el acabo no es de buena calidad, si se le compara con los procesos GMAW y GTAW. En el presente trabajo los mejores resultados se obtuvieron con el proceso GMAW. Asimismo, estos resultados se lograron empleando el material de aporte Al-5Si realizando dos cordones de soldadura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] American Welding Society, *Welding Handbook*, vol. IV, Miami: American Welding Society, 2011.
- [2] M. Reina Gomez, *Soldadura de los Aceros*, Madrid: Gráficas Lormo, 2003.
- [3] P. P. Lean Sifuentes, *Introducción a la Ingeniería de Materiales*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2008.
- [4] American Society for Testing and Materials, «Standard Specification for Carbon Structural Steel,» American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2014.
- [5] C. Fosca Pastor, *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2003.
- [6] C. Vargel, *Enciclopedia del Aluminio*, Bilbao: Urmo, 1979.
- [7] H. Saunders, *Welding aluminum : theory and practice*, Washington: Aluminum Association, 1991.
- [8] F. King, *El Aluminio y sus Aleaciones*, México D.F.: Limusa, 1992.
- [9] G. Hernández Riesco, *Manual del Soldador*, Madrid: Coboprint, 2012.
- [10] 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.
- [11] The Materials Information Society, *ASM HANDBOOK*, vol. 3, Ohio: The Materials Information Society, 1992.
- [12] ESAB, *Welding guide for the joining of dissimilar metals*, Gotemburgo: ESAB, 2006.
- [13] H. Cary, *Manual de Soldadura Moderna*, México : Prentice-Hall, 1992.
- [14] CESOL, *Soldeo entre Materiales Disimilares*, Madrid: CESOL, 2012.
- [15] American Welding Society, *AWS B2.1 Specification for Welding Procedure and Performance Qualification*, Miami: American Welding Society, 2005.
- [16] American Welding Society, *AWS D1.2 Structural Welding Code-Aluminum*, Miami: American Welding Society, 2003.

- [17] AENOR, Soldadura. Requisitos de calidad de las soldaduras, ensayos destructivos y productos de aportación para el soldeo, Madrid: AENOR, 1999.

