

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Facultad de Ciencias e Ingeniería



COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS EN EL SOLDEO DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO CON MATERIALES DE APORTE ER4043 Y ER5356 MEDIANTE EL PROCESO MIG.

Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico

Presentado por

JUAN LUIS ZARATE MONJE

Noviembre 2007

Lima - Perú



© 2007, Juan Luis Zárate Monje.

Se autoriza la reproducción total o parcial,
Con fines académicos a través de cualquier
medio o procedimiento, incluyendo la cita
bibliográfica del documento.

RESUMEN

El presente trabajo se estableció diferencias significativas en características y propiedades que existe entre uniones soldadas con ambos aportes. Las uniones obtenidas con el aporte ER4043, debido a su contenido de Si (5%), presentan una serie de características que lo hacen muy apreciado por los soldadores debido a que las uniones presentan mejor acabado superficial, mayor penetración, siendo más fácil su empleo durante la operación de soldeo, sin embargo, los inconvenientes que se pueden presentar es que se puede originar perforaciones en las planchas de aluminio de bajo espesor, además, que el cordón de soldadura presentará un color ligeramente más oscuro. Las uniones obtenidas con el aporte ER5356 presenta más salpicaduras, y se genera una gran cantidad de gases durante el proceso de soldeo debido al alto contenido de Mg (5%) que contiene, por lo que, se debe tener cuidado durante su empleo, este aporte una vez depositado, es más resistente que el ER4043, además de poderlo emplear para soldeo de materiales delgados. Los resultados encontrados en la presente investigación servirán de guía para seleccionar el aporte más conveniente entre estos dos materiales.



A mis padres Juan Luis
y Ana María, a mis hermanas
Erika y Kelly.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresando mi más profundo agradecimiento al profesor Dr. Ing. Paul Lean Sifuentes, por su desinteresado y constante apoyo en la presente tesis, ya que sin su ayuda hubiera sido muy difícil lograr las cualidades y objetivos con que cuenta este trabajo. Así mismo quiero agradecer de manera muy especial al Ing. Raúl Hurtado y al Ing. Edison Zegarra por su apoyo durante la parte experimental del trabajo. Además, deseo ofrecer mi gratitud a un buen amigo al Dr. Ing. Quino Valverde por su estímulo y apoyo constante durante mi etapa universitaria.



INDICE

| | |
|--|----|
| Introducción | 1 |
| 1. Fundamentos Teóricos | 2 |
| 1.1. Aluminio Puro | 2 |
| 1.2. Aleaciones de Aluminio | 3 |
| 1.2.1. Aleaciones de Aluminio No tratables Térmicamente | 5 |
| 1.2.2. Aleaciones de Aluminio Tratables Térmicamente | 12 |
| 1.3. Procesos de Soldeo en Aleaciones de Aluminio | 19 |
| 1.3.1. Proceso de Soldadura OFW | 21 |
| 1.3.2. Proceso de Soldadura SMAW | 23 |
| 1.3.3. Proceso de Soldadura GTAW | 24 |
| 1.3.4. Proceso de Soldadura GMAW | 26 |
| 1.4. Cambios Microestructurales en Soldaduras de Aluminio | 29 |
| 1.5. Materiales de Aporte para el Soldeo por Arco en Aleaciones de Aluminio | 30 |
| 1.6 Selección del Material de Aporte..... | 36 |
| 2. Procedimiento Experimental | 37 |
| 2.1. Metodología de Trabajo | 37 |
| 2.2. Características Nominales de los Materiales a Emplear | 38 |
| 2.2.1. Aleación del Material Base | 38 |
| 2.2.2. Materiales de Aporte | 39 |
| 2.3. Equipamiento y acondicionamiento antes del Soldeo | 40 |
| 2.3.1 Máquina de Soldeo MIG..... | 40 |
| 2.3.2. Variación de la Intensidad y Voltaje de Soldeo | 40 |
| 2.3.3. Angulo de Inclinación de la Pistola de Soldeo | 41 |
| 2.3.4. Sistema de Control de la Velocidad de Soldeo (Vs) | 42 |
| 2.3.5. Control y Graduación del Caudal del Gas de Protección ... | 43 |
| 2.3.6. Sistema de Alimentación de Aporte (Va) | 43 |
| 2.3.7. Protección Personal | 44 |
| 2.4. Ejecución de Uniones | 45 |
| 2.4.1. Preparación de las Juntas..... | 45 |
| 2.4.1.1. Posición de la Unión a Soldar..... | 46 |
| 2.4.1.2. Limpieza de Bordes..... | 46 |
| 2.4.2. Procedimiento de Soldeo..... | 46 |
| 2.4.2.1. Puesta a Punto para el Proceso de Soldadura..... | 46 |
| 2.4.2.2. Procedimiento Seguido y Parámetros Obtenidos... | 48 |
| 2.5. Técnicas de Caracterización de las Uniones | 50 |
| 2.5.1. Selección de Muestras..... | 50 |
| 2.5.2. Caracterización Mecánica | 52 |
| 2.5.2.1. Ensayo de Tracción..... | 52 |
| 2.5.2.2. Ensayo de Microdureza Vickers..... | 53 |

| | |
|--|----|
| 2.5.2.3 Ensayo de Doblado..... | 55 |
| 2.6. Comportamiento de los Aporte frente al Soldeo..... | 56 |
| 3. Resultados y Análisis de Resultados..... | 58 |
| 3.1. Comportamiento de los Aportes Durante el Soldeo | 58 |
| 3.2. Ensayo de Tracción | 60 |
| 3.2.1. Materiales Base..... | 60 |
| 3.2.2. Uniones Soldadas..... | 61 |
| 3.2.3. Análisis de Resultados..... | 64 |
| 3.2.3.1. Materiales Base y Aportes..... | 67 |
| 3.2.3.2. Uniones Soldadas..... | 68 |
| 3.3. Ensayo de Microdureza Vickers..... | 69 |
| 3.3.1. Resultados | 69 |
| 3.3.1.1. Uniones Soldadas..... | 70 |
| 3.3.2. Análisis de Resultados | 78 |
| 3.3.2.1. Uniones Soldadas..... | 78 |
| 3.3. Ensayo de Dobleza..... | 80 |
| 3.3.1. Resultados..... | 81 |
| 3.3.1.1. Uniones Soldadas..... | 81 |
| 3.3.2. Análisis de Resultados..... | 84 |
| 3.3.2.1. Uniones Soldadas | 84 |
| Conclusiones..... | 86 |
| Bibliografía..... | 88 |

INTRODUCCION

El desarrollo del aluminio y sus procesos de soldadura va en aumento a consecuencia de la demanda actual de la industria del primer mundo, encontrándose una enorme variedad en sus aplicaciones dentro de las cuales podemos mencionar al automovilismo, construcciones estructurales y aeroespaciales, haciendo del aluminio y sus aleaciones un material versátil y flexible según sea su campo de acción. Sin embargo, estos avances e investigaciones no son reflejados en nuestro medio, generando cierto desconocimiento en el momento de la operación del aluminio y sus aleaciones en uniones soldadas.

Por tal motivo y de manera particular, el presente trabajo logró reconocer las dificultades, alteraciones y características que presentan dos muestras de aleaciones de aluminio en el proceso de soldeo con los materiales de aporte ER4043 y ER5356. Según fundamentos e investigaciones, se demuestra que no es suficiente conocer las propiedades físicas que posee estos materiales; sino además es necesario comprender los parámetros involucrados al unir estas aleaciones mediante soldadura MIG.

El trabajo realizado conlleva al estudio de elementos que nos dirijan a una correcta selección del material de aporte para el soldeo de aleaciones de aluminio. Específicamente; el ER4043 y ER5356, que son los materiales de aporte comúnmente usados en la industria de la soldadura del aluminio; según recomendaciones esta son señaladas como apropiadas para el proceso de soldadura por arco en la mayoría de aleaciones de aluminio. Sin embargo, el 5% de Silicio y el 5% de Magnesio en el ER4043 y ER5356, respectivamente, harán que estos presenten diferente comportamiento a la hora del soldeo, diferentes aspectos en la unión, además de conducir a la obtención de diferentes características mecánicas en el cordón de soldadura.

CAPITULO 1

FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1. Aluminio Puro

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, donde el 8% esta formado por compuestos de aluminio, partiendo de esta información podemos decir que no es usual encontrar al aluminio en un estado puro. Así mismo, la bauxita es un mineral que contiene principalmente óxidos hidratados de aluminio y es la materia prima comúnmente utilizada para la producción de aluminio.

El aluminio puro es un metal blando, blanco y de peso ligero (densidad = 2.69g/cm^3), que al ser mezclado con otros elementos como: Silicio, Cromo, Tungsteno, Manganeso, Níquel, Zinc, Cobre, Magnesio, Titanio, Circonio, Hierro, Litio, Estaño y Boro; producen una serie de aleaciones ligeras, con propiedades específicas que pueden ser seleccionadas por el usuario según sea su propósito aplicativo.

Es un excelente conductor del calor y de la electricidad. Físicamente presenta una buena maleabilidad y formabilidad. Los efectos a la oxidación del material son mínimos a pesar de su afinidad por el oxígeno en el ambiente, y esto debido a que su superficie queda recubierta por una fina y compacta capa de óxido de alúmina (Al_2O_3) que lo protege del medio.

Se emplea en la fabricación de embarcaciones, aviones, ferrocarriles y automóviles, ya que las industrias involucradas aprovechan la alta relación resistencia-peso de este material; y para otras aplicaciones en que la rapidez de movimiento y la conservación

de energía se consideren importantes. Así mismo; por su elevada conductividad del calor, el aluminio se emplea en utensilios de cocina y en pistones de motores de combustión interna.

Los valores de resistencia a la tracción del aluminio puro varían entre 50 MPa y 70 MPa, y de dureza entre 140 HV y 160 HV; sin embargo, se pueden obtener grandes incrementos en resistencia mecánica mediante la deformación en frío o mediante la adición de elementos aleantes.

1.2. Aleaciones de aluminio

Algunas de las aleaciones de aluminio, las más complejas, pueden alcanzar características mecánicas muy parecidas al de algunos aceros. La adición de elementos de aleación, la deformación en frío y el tratamiento térmico hacen que su baja resistencia mecánica mejore significativamente; sin embargo, si una aleación de aluminio va a ser sometida a un proceso de soldadura por fusión sus propiedades mecánicas y microestructurales se verán modificadas en la zona afectada por el calor (ZAC).

Los elementos aleantes, generalmente en bajo porcentaje, mejoran las propiedades mecánicas del aluminio puro. Las aleaciones de aluminio se encuentran clasificadas en series (Tabla 1); según el contenido del elemento aleante principal o elementos principales; del mismo modo, estas series se agrupan si sus elementos aleantes permiten ser o no tratadas térmicamente.

Tabla 1. Clasificación de las aleaciones de Aluminio

| | Elementos aleantes principales | Serie | Aleaciones comunes |
|-----------------|---------------------------------------|--------------|---------------------------|
| ALUMINIO | Ninguno | 1XXX | AA1050 |
| | Cu | 2XXX | AA2014 |
| | Mn | 3XXX | AA3103 |
| | Si | 4XXX | AA4043 |
| | Mg | 5XXX | AA5083 |
| | Si+Mg | 6XXX | AA6082 |
| | Zn | 7XXX | AA7020 |
| | Otros | 8XXX | AA8090 |

Por la baja resistencia mecánica que presenta el aluminio después de un tratamiento térmico de recocido, llegando a alcanzar un valor de 10 MPa de esfuerzo de fluencia, la industria de los materiales busca proponer aleaciones que mejoren esta propiedad, cuya prioridad esta por encima de la resistencia a la corrosión. Los principales aleantes utilizados en la industria son el Cobre, Magnesio, Manganeso, Zinc y Silicio. En la tabla 2, se muestran las características de estos elementos de aleación.

Tabla 2. Propiedades de los elementos de aleación

| Elementos aleantes | Propiedades que obtiene la aleación |
|--------------------|--|
| Mn | Mejora la resistencia a la corrosión atmosférica. Aumenta resistencia mecánica y ductilidad. |
| Cu | Produce una aleación tratable térmicamente. Resistencia y dureza aumentadas. Disminuye su resistencia a la corrosión y ductibilidad. |
| Si | Mejora la fluidez, disminuye el coeficiente de dilatación en estado sólido, empeora la ductilidad y la tenacidad. Combinado con Mg produce una aleación tratable térmicamente. |
| Mg | Resistencia mecánica aumentada. Dureza aumentada. Buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos. Soldabilidad aumentada. |
| Zn | Resistencia y dureza aumentadas. Posibilidad de corrosión bajo tensión. Combinado con Mg produce una aleación tratable térmicamente. |

Las dos principales clasificaciones de las aleaciones de aluminio según el estado de suministro son:

- Aleaciones de fundición
- Aleaciones de forja.

Para el desarrollo del presente trabajo, se hará referencia a aleaciones de aluminio forjado, pues son estos materiales los que mayormente se destinan para la construcción de estructuras y trabajos en soldaduras, agrupándose según su comportamiento al tratamiento térmico; es decir, se tiene dos tipos de aleaciones de aluminio forjable: Tratable Térmicamente y No Tratables Térmicamente (Tabla 3).

Estos grupos se formaron de acuerdo a los mecanismos bajo los cuales actúan los elementos de aleación para lograr el desarrollo de las propiedades mecánicas, logrando ser denominados de la siguiente forma:

- Aleaciones susceptibles al endurecimiento estructural; en las cuales el endurecimiento se obtiene mediante un tratamiento térmico.
- Aleaciones no susceptibles de endurecimiento estructural; sus características mecánicas se obtienen por efecto de los elementos aleantes y/o deformación en frío.

Tabla 3. Comportamiento al Tratamiento Térmico

| | Serie | Tratamiento Térmico |
|-----------------|--------------|----------------------------|
| ALUMINIO | 1XXX | No |
| | 2XXX | Si |
| | 3XXX | No |
| | 4XXX | Variable* |
| | 5XXX | No |
| | 6XXX | Si |
| | 7XXX | Si |
| | 8XXX | Variable* |

*Algunos de las aleaciones de aluminio de las series AA8XXX y AA4XXX, presenta un buen comportamiento ante un tratamiento térmico; sin embargo, el contenido de cierto elemento de aleación provoca resultados adversos.

1.2.1. Aleaciones de Aluminio No Tratables Térmicamente

Estas aleaciones están dentro de las series AA1XXX, AA3XXX, AA5XXX, y algunas de la serie AA8XXX y AA4XXX. El mejoramiento de sus características mecánicas se logra por deformación en frío (endurecimiento por deformación), pero que inicialmente se produce por la adición de sus elementos aleantes, por otro lado esta deformación mecánica afecta (disminuye) la ductilidad del material. Además estas aleaciones presentan un grado variable de resistencia a la corrosión.

La disolución sólida de elementos aleantes; tales como el Magnesio, Manganeso, Silicio; incluidos en las series AA1XXX, AA3XXX, AA4XXX y AA5XXX, permiten obtener un estado de endurecimiento del material, formando parte de la resistencia mecánica de estas aleaciones. Estos tipos de aleaciones sufren un recocido por el efecto térmico del proceso de soldadura, en la zona afectada por el calor (ZAC), siendo algo inevitable cuando el arco de soldadura alcanza las temperaturas de recocido.

Serie AA1XXX

El aluminio de esta serie es considerado de alta pureza (0,02% de impurezas admisibles); el contenido de aluminio puro esta entre el 0,1 % y el 1 % como máximo. El Hierro (Fe) y Silicio (Si) son impurezas que se encuentran en la bauxita que es el mineral de partida, por lo tanto son las impurezas más abundantes en los aluminios comerciales; sin embargo, estas incrementan la resistencia mecánica de las aleaciones de esta serie. El contenido de Hierro es de 0,006% hasta 0,6% y de Silicio de 0,01% hasta 0,5%, además de otros elementos como el Cu, Ti y Zn. Se puede apreciar en la tabla 4 la composición química de las aleaciones representativas de esta serie.

Tabla 4. Composición química de las principales aleaciones de aluminio de la serie 1XXX

| Nomenclatura AA | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Otros | | Aluminio |
|-----------------|------|-------|-------------|------|------|------|----|------|------|----------|-------|----------|
| | | | | | | | | | | Cada uno | Total | |
| 1050 | 0.25 | 0.40 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | - | - | 0.05 | 0.03 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 1080 | 0.15 | 0.15 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | - | - | 0.06 | 0.03 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 1100 | 1.00 | Si+Fe | 0.05 - 0.20 | 0.05 | - | - | - | 0.1 | - | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 1200 | 1.00 | Si+Fe | 0.05 | 0.05 | - | - | - | 0.1 | 0.05 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 1350 | 0.1 | 0.40 | 0.05 | 0.01 | - | 0.01 | - | 0.05 | - | 0.05 | 0.15 | El resto |

Bibliografía: (2) Vol. 1, pag. 550, 551

Los elementos que se encuentran en solución sólida; y según sea su tipo de fase, establecen fuertes relaciones con las propiedades de estos materiales (Tabla 5). Al aumentar el contenido de elementos de aleación, aumenta notablemente la resistencia mecánica, mientras que la conductividad eléctrica disminuye. Particularmente, el AA1100 registra una pequeña cantidad de aleación de Cobre, con lo cuales modificaría las características de corrosión.

Tabla 5. Propiedades Mecánicas de aleaciones de aluminio de la serie 1XXX

| Aleación | Estado | Esfuerzo máx (MPa) | Esfuerzo de Fluencia (MPa) | Alargamiento (%) | Dureza HB |
|----------|--------|--------------------|----------------------------|------------------|-----------|
| AA1050 | O | 80 | 35 | 42 | 21 |
| | H12 | 100 | 85 | 12 | 30 |
| | H19 | 180 | 170 | -- | 48 |
| AA1200 | O | 90 | 40 | 40 | 23 |
| | H12 | 110 | 90 | 11 | 32 |
| | H19 | 190 | 180 | -- | 50 |

Dentro de sus principales características podemos mencionar que presenta una alta maleabilidad y formabilidad; así como también un buen comportamiento a procesos de soldadura por fusión siempre que se tome las consideraciones del caso para evitar problema como falta de fusión y otros defectos en el cordón de soldadura. El producto final en mercado lo podemos encontrar como papel aluminio, empaques de alimentos (Figura 1), conductores eléctricos y usos químicos.



Figura 1. Empaque de aluminio [11].

Serie AA3XX

En la serie AA3XXX, el Manganeseo es el elemento principal de aleación (Tabla 6) aumenta la dureza, la resistencia mecánica y su ductibilidad, ver Tabla 7. El rango de contenido de Manganeseo se encuentra entre los 0,5% a 1,8% aproximadamente, mostrando una resistencia mecánica moderada y fácil maquinabilidad; por otro lado, la resistencia al impacto de la soldadura decrece con el aumento del contenido de Mn, Fe y Si. La inclusión limitada del Manganeseo, como principal elemento de aleación en otras series, se debe a su restringida solubilidad, y sólo se utiliza en algunas aleaciones de forja. Presenta una buena resistencia a la corrosión atmosférica y buena soldabilidad.

Tabla 6. Composición química de las principales aleaciones de aluminio de la serie 3XXX

| Nomenclatura AA | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Otros | | Aluminio |
|--------------------|-----|------|-------------|-------------|-------------|-----|----|------|------|----------|-------|----------|
| | | | | | | | | | | Cada uno | Total | |
| 3003 | 0.6 | 0.70 | 0.05 - 0.20 | 1.00 - 1.50 | - | - | - | 0.10 | - | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 3004 | 0.3 | 0.70 | 0.25 | 1.00 - 1.50 | 0.80 - 1.30 | - | - | 0.25 | - | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 3005 | 0.6 | 0.70 | 0.30 | 1.00 - 1.50 | 0.20 - 0.60 | 0.1 | - | 0.25 | 0.10 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 3105 | 0.6 | 0.70 | 0.30 | 0.30 - 0.80 | 0.20 - 0.80 | 0.2 | - | 0.40 | 0.10 | 0.05 | 0.15 | El resto |

Bibliografía: (2) Vol. 1, pag. 550, 551

Tabla 7. Propiedades Mecánicas de aleaciones de aluminio de la serie 3XXX

| Aleación | Estado | Esfuerzo máx (MPa) | Esfuerzo de Fluencia (MPa) | Alargamiento (%) | Dureza HB |
|----------|--------|--------------------|----------------------------|------------------|-----------|
| AA3003 | O | 110 | 41 | 35 | 28 |
| | H14 | 152 | 145 | 12 | 40 |
| | H18 | 200 | 186 | 7 | 55 |
| AA3004 | O | 179 | 69 | 23 | 46 |
| | H34 | 241 | 200 | 11 | 63 |
| | H38 | 283 | 248 | 6 | 77 |

Aplicadas en trabajos donde la buena formabilidad sea necesaria e incluso para trabajos a elevadas temperaturas, siendo la aleación AA3003 la más representativa de este grupo (Figura 2). Del mismo modo, su uso está dentro de la fabricación de empaques de almacenamiento de alimentos y de sustancias químicas, utensilios de cocina, tubos y láminas de intercambiadores de calor de vehículos, radiadores y condensadores de aire acondicionado.

**Figura 2.** Utensilio de cocina de la serie AA3003 [12]

Serie AA4XXX

El Silicio es el principal elemento aleante de la serie AA4XXX. Agregando una cantidad considerable de este elemento se reduce el punto de fusión; además, mejora su fluidez debido a que reduce su temperatura de solidificación. El Silicio es uno de los elementos aleantes, ver Tabla 8, que al agregarse al aluminio, influye en el coeficiente de dilatación, pues disminuye por cada % en peso en masa de Si, aproximadamente un 1,2 %. Mezclándolo con una porción de Magnesio genera endurecimiento por precipitación. Cabe mencionar que si el Silicio es el único aleante del aluminio, la aleación se considera No Tratable Térmicamente.

Tabla 8. Composición química de las principales aleaciones de aluminio de la serie 4XXX

| Nomenclatura AA | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Otros | | Aluminio |
|--------------------|-------------|------|-------------|------|-------------|-----|-------------|------|-----|----------|-------|----------|
| | | | | | | | | | | Cada uno | Total | |
| 4032 | 11.0 -13.5 | 1.00 | 0.50 - 1.30 | - | 0.80 - 1.30 | 0.1 | 0.50 - 1.30 | 0.25 | - | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 4043 | 4.5 - 6.0 | 0.80 | 0.3 | 0.05 | 0.05 | - | - | 0.10 | 0.2 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 4047 | 11.0 - 13.0 | 0.80 | 0.30 | 0.15 | 0.1 | - | - | 0.20 | - | 0.05 | 0.15 | El resto |

Bibliografía: (2) Vol. 1, pag. 550, 551

Las aleaciones más importantes de este grupo son AA4032 y AA4043, utilizada para la fabricación de pistones y material de aporte para soldadura de aleaciones de aluminio respectivamente (Figura 3),.

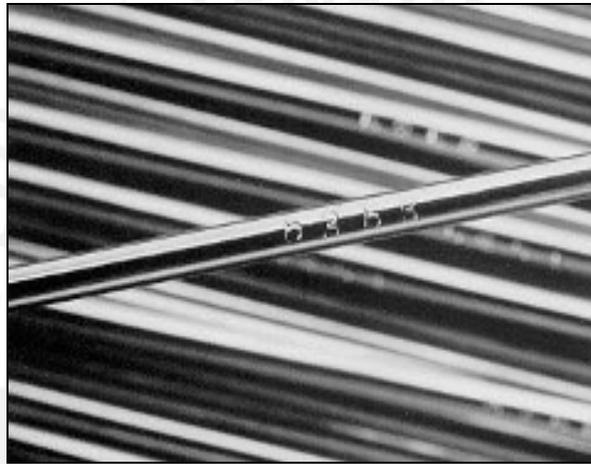


Figura 3. Alambres de aporte de la serie AA4043. [13]

Serie AA5XXX

La serie AA5XXX conformada por la base Aluminio-Magnesio, con alto contenido de Magnesio (Tabla 9) tiene una buena resistencia a la corrosión por agua de mar y/o atmósfera marina debido a que el Magnesio acelera la formación de la capa de óxido cuando se adiciona calor. El contenido de este elemento está en el rango de 0.5% y 7%. Estas aleaciones son más ligeras que el aluminio puro (Densidad Relativa: 2.6 g/cm³).

Tabla 9. Composición química de las principales aleaciones de aluminio de la serie 5XXX

| Nomenclatura AA | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Otros | | Aluminio |
|--------------------|------|------|------|-------------|-------------|-------------|----|------|------|----------|-------|----------|
| | | | | | | | | | | Cada uno | Total | |
| 5005 | 0.30 | 0.70 | 0.20 | 0.2 | 0.50 - 1.10 | 0.1 | - | 0.25 | - | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 5050 | 0.40 | 0.70 | 0.20 | 0.1 | 1.10 - 1.80 | 0.1 | - | 0.25 | - | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 5052 | 0.25 | 0.40 | 0.10 | 0.1 | 2.20 - 2.80 | 0.15 - 0.35 | - | 0.10 | - | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 5083 | 0.40 | 0.40 | 0.10 | 0.40 - 1.00 | 4.00 - 4.90 | 0.05 - 0.25 | - | 0.25 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 5454 | 0.45 | 0.40 | 0.10 | 0.50 - 1.00 | 2.40 - 3.00 | 0.05 - 0.20 | - | 0.25 | 0.20 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 5754 | 0.40 | 0.40 | 0.10 | 0.40 - 1.00 | 4.00 - 4.90 | - | - | 0.25 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | El resto |

Bibliografía: (2) Vol. 1, pag. 550, 551

Además, muestra mejores características de resistencia mecánicas con contenidos superiores a 2.5% de Mg, siendo este elemento el que mas endurece por solución sólida a las aleaciones de aluminio No Tratable Térmicamente, a partir de este porcentaje el Magnesio es frecuente usarlo en estructuras, debido a que presenta una elevada resistencia en un estado de recocido. Sin embargo, demuestra una baja susceptibilidad al efecto térmico de la soldadura en la mayoría de las aleaciones comerciales forjadas de este grupo que contienen menos del 5 % de Magnesio y, con bajo contenido de Silicio. En la Tabla 10, podemos apreciar las propiedades mecánicas de una aleación de esta serie.

Tabla 10. Propiedades Mecánicas de aleaciones de aluminio de la serie 5XXX

| Aleación | Estado | Esfuerzo máx (MPa) | Esfuerzo de Fluencia (MPa) | Alargamiento (%) | Dureza HB |
|----------|--------|-----------------------|-------------------------------|---------------------|-----------|
| AA5754 | O | 215 | 100 | 25 | 55 |
| | H12 | 245 | 185 | 15 | 70 |
| | H14 | 270 | 215 | 14 | 75 |
| | H18 | 315 | 270 | 9 | 90 |

Por su buena soldabilidad operativa, las aleaciones de Al-Mg, se usan mucho para uniones soldadas y como material de aporte; debido a la cantidad de eutéctica presente en la aleación; con lo cual se obtiene una resistencia relativamente alta en la condición recocida. Cercano al 2% de Mg, se genera la tendencia a fisurarse en caliente durante el soldeo por fusión, ya sea del material base o aporte; sin embargo, aumentando el contenido de Mg (>5%), el Cobre y el Silicio mejoran la soldabilidad de la aleación Al-Mg, reduciendo la fisuración en caliente.

Las aplicaciones de las AA5XXX son amplias; como en construcciones tanques criogénicos (AA5083), puentes, construcciones de embarcaciones marinas. Así mismo, planchas de la serie AA5052 es muy requerida en la industria para la

producción de estructuras de camiones, ómnibus, aviones y también en aplicaciones marinas (Figura 4 y 5).



Figura 4. Construcciones marinas, yate, de la serie AA5083.



Figura 5. Estructura interna de los automóviles emplea AA5754

Los grupos mencionados están clasificados dentro de los No Tratables Térmicamente, son suministrados en forma recocida y endurecida en frío. Su estado de endurecimiento se pierde por efecto del calor de soldadura cercana al cordón de soldadura, razón por la cual la resistencia mecánica esta condicionado por la resistencia del metal base en estado recocido, sin tomar en cuenta el endurecimiento original, debido a ablandamiento de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) cercana a la unión.

1.2.2. Aleaciones de Aluminio Tratables Térmicamente

El trabajo en frío de las aleaciones no ferrosas, permiten de cierta forma mejorar su resistencia mecánica; sin embargo, otra alternativa para obtener mejoras en sus propiedades mecánicas como resistencia y dureza, adicional al que le da su composición química, es mediante tratamiento térmico. Por lo general puede ser un tratamiento térmico de solubilización y un temple seguido de envejecimiento, bien natural o bien artificial, proporcionando una fina dispersión de los elementos aleantes.

Estas aleaciones pueden someterse también a un recocido para que alcancen la máxima ductilidad. Las series AA2XXX, AA6XXX, AA7XXX, AA4XXX (silicio y otros aleantes) y algunas de la serie AA8XXX de las aleaciones de aluminio forjados presenta un buen comportamiento al ser tratados térmicamente, debido a la adición de aleantes como el Cobre, Silicio, Zinc o Magnesio. Estos elementos presentes de manera simple o en combinación exhiben un incremento de la solubilidad en el aluminio cuando la temperatura aumenta, para obtener este beneficio se debe de seguir un procedimiento adecuado de tratamiento térmico, según ASTM B918, Standard Practice for Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys.

Serie AA2XXX

La serie AA2XXX tiene al Cobre como metal de principal aleación cuyo contenido esta entre 2% y 10% de este elemento en el aluminio; permitiendo una adecuada solubilidad a partir de 5.65% de Cobre. Cuando la concentración de Cu excede del 15%; se forman compuestos intermetálicos fragilizando la aleación. Este grupo presenta una resistencia extremadamente alta cuando se le da un tratamiento térmico adecuado, además el Cobre facilita el endurecimiento por precipitación. Sin embargo, no presenta una buena resistencia a la corrosión, necesitando ser revestido de aluminio puro o aleación especial a base de aluminio (pinturas o recubrimientos).

Son tratables térmicamente las aleaciones cuyo porcentaje de cobre este entre 2.5% y 5%, endureciéndose por envejecido, en donde presenta su máxima solubilidad y aumenta su dureza mediante un proceso posterior de envejecimiento. La Tabla 11 muestra la composición química de las aleaciones más representativas de esta serie.

Tabla 11. Composición química de las principales aleaciones de aluminio de la serie 2.

| Nomenclatura AA | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Otros | | Aluminio |
|--------------------|-------------|------|-----------|-------------|-------------|------|-------------|------|------|----------|-------|----------|
| | | | | | | | | | | Cada uno | Total | |
| 2011 | 0.40 | 0.70 | 5.0 - 6.0 | - | - | - | - | 0.3 | - | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 2014 | 0.50 - 1.20 | 0.70 | 3.9 - 5.0 | 0.40 - 1.20 | 0.20 - 1.80 | 0.10 | - | 0.25 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 2017 | 0.20 - 0.80 | 0.70 | 3.5 - 4.5 | 0.40 - 1.00 | 0.20 - 0.80 | 0.10 | - | 0.25 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 2024 | 0.50 | 0.50 | 3.8 - 4.9 | 0.30 - 0.90 | 1.20 - 1.80 | 0.10 | - | 0.25 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 2218 | 0.90 | 1.00 | 3.5 - 4.5 | 0.20 | 1.20 - 1.80 | 0.10 | 1.70 - 2.30 | 0.25 | - | 0.05 | 0.15 | El resto |

Bibliografía: (2) Vol. 1, pag. 550, 551

Respecto a su soldabilidad, es relativamente pobre para la mayoría de estas aleaciones en procesos de soldadura por arco, los cordones tienden a ser frágiles y extensas zonas de eutéctico de bajo punto de fusión debilitan la unión. Las aleaciones con un alto contenido de Cu y sin Mg son las soldables del grupo (AA2014, AA2219, AA2519); las de alto contenido de Mg (duraluminio) son las de menor soldabilidad. La mayoría de la serie AA2XXX no se recomienda para el soldeo por fusión, porque tienden al agrietamiento ya sea por licuación o por solidificación. La tabla 12 muestra los valores de las propiedades mecánicas de las aleaciones mas representativas de esta serie.

Tabla 12. Propiedades Mecánicas de aleaciones de aluminio de la serie 2XXX

| Aleación | Estado | Esfuerzo máx (MPa) | Esfuerzo de Fluencia (MPa) | Alargamiento (%) | Dureza HB |
|----------|--------|-----------------------|-------------------------------|---------------------|-----------|
| AA2011 | T4 | 350 | 270 | 18 | 90 |
| | T6 | 395 | 300 | 12 | 110 |
| | T8 | 420 | 315 | 13 | 115 |
| AA2014 | O | 190 | 85 | 20 | 55 |
| | T4 | 430 | 290 | 18 | 110 |
| | T6 | 485 | 425 | 12 | 140 |
| AA2024 | O | 185 | 75 | 20 | 55 |
| | T3 | 475 | 340 | 18 | 120 |
| | T8 | 485 | 450 | - | 130 |

Esta es una de las series de aleación de aluminio que se ve afectada por la fisuración en caliente, químicamente hablando cuando el contenido de Cobre esta alrededor de 3% la sensibilidad a este problema aumenta; sin embargo, decrece cuando alcanza valores de 4.5% de este elemento. Pero, como se menciona en el párrafo anterior sobre la soldabilidad ante la presencia de Magnesio, la serie AA2024 presenta 4.5% de Cu y una pequeña cantidad de Magnesio, siendo este elemento de aleación el que genera la sensibilidad a la fisuración en caliente para este material base.

Por su elevada resistencia que presenta la aleación AA2014 se emplea con frecuencia en estructuras de aviones (Figura 6); y en casos que se requiera un peso ligero mezclado con una buena resistencia. Por otro lado, las aleaciones AA2219 y AA2048 se aplican en la industria aeroespacial por su buena soldabilidad, donde el método de unión es por remache. En trabajos pesados, partes de un avión y en estructuras de camión, se recomienda la aleación AA2014.



Figura 6. Estructura y partes de una aeronave (airbus) utiliza la aleación AA2014.

Serie AA6XXX

Las aleaciones de la serie AA6XXX, contiene Silicio y Magnesio (Tabla 13), haciéndolas susceptibles al tratamiento térmico. Estas aleaciones tienen resistencia media, la cual es aprovechada para la formación de piezas mediante extrusión; y presentan una buena resistencia a la corrosión. Por otro lado, la facilidad para el soldeo es variable, aunque por lo general es buena. Se necesita elevadas temperaturas para obtener una buena penetración en este tipo de aleaciones.

Tabla 13. Composición química de las principales aleaciones de aluminio de la serie 6XXX

| Nomenclatura AA | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Otros | | Aluminio |
|--------------------|-------------|------|------------|-----------|-------------|-------------|----|------|------|----------|-------|----------|
| | | | | | | | | | | Cada uno | Total | |
| 6061 | 0.40 - 0.80 | 0.70 | 0.15 - 0.4 | 0.15 | 0.80 - 1.20 | 0.04 - 0.35 | - | 0.25 | 0.15 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 6063 | 0.20 - 0.60 | 0.35 | 0.10 | 0.10 | 0.45 - 0.90 | 0.10 | - | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 6082 | 0.70 - 1.30 | 0.50 | 0.20 | 0.4 - 1.0 | 0.60 - 1.20 | 0.20 | - | 0.20 | 0.10 | 0.05 | 0.15 | El resto |

Bibliografía: (2) Vol. 1, pag. 550, 551

El principal compuesto formado por el Silicio y el Magnesio es el siliciuro de magnesio (Mg_2Si), su rango de composición química de interés técnico dentro de esta serie es de 0.2% hasta 1.6% en el Si; y del Mg es de 0.3% a 1.5%, conformando un 0.4% hasta 1.6% de Mg_2Si . El exceso de Mg disminuye la solubilidad del Mg_2Si . Se observa en la tabla 14 las propiedades mecánicas de algunas aleaciones de la serie 6XXX.

Tabla 14. Propiedades Mecánicas de aleaciones de aluminio de la serie 6XXX

| Aleación | Estado | Esfuerzo máx (MPa) | Esfuerzo de Fluencia (MPa) | Alargamiento (%) | Dureza HB |
|----------|--------|-----------------------|-------------------------------|---------------------|-----------|
| AA6060 | O | 100 | 50 | 27 | 25 |
| | T5 | 220 | 185 | 13 | 75 |
| AA6061 | O | 125 | 55 | 27 | 30 |
| | T6 | 310 | 270 | 14 | 95 |
| AA6063 | O | 100 | 50 | 27 | 25 |
| | T6 | 245 | 210 | 14 | 75 |
| AA6082 | O | 130 | 60 | 27 | 35 |
| | T6 | 340 | 310 | 11 | 95 |

Su buen comportamiento al proceso de conformado por extrusión, permite que algunas aleaciones de la serie 6XXX (AA6063) sean usadas para la fabricación de perfiles (Figura 7). Estas aleaciones (AA6XXX) forman un importante grupo complementario con las aleaciones de la serie AA5XXX.

En particular, la aleación AA6082 es empleada en construcciones ligeras para vagones de ferrocarril, plataformas marinas, puentes, bicicletas y accesorios, sistemas hidráulicos, industria vehicular, etc. El contenido de Mg en esta aleación es de 0,6% - 1,2% y el de Si está entre 0,7% - 1,3 %, la resistencia mecánica y el límite elástico aumenta cuando se satura de Si.



Figura 7. Algunas aleaciones de la serie AA6XXX utilizadas en la fabricación de perfiles.

Existen muchas variaciones en magnitud de resistencia a la tracción de una unión soldada de esta serie ya que muchas veces no llega al valor mínimo requerido por la norma AWS D1.2, Structural Welding Code-Aluminum. Esto debido al sobrecalentamiento que sufre el metal base durante el proceso de soldadura.

Comercialmente el metal base de esta serie 6XXX se provee al mercado en su condición de T6; es decir, con un tratamiento térmico inicial y seguido de un envejecimiento artificial, bajo estas condiciones es importante tener un control adecuado de la temperatura del proceso de soldadura para prevenir un sobrecalentamiento, no siendo esta la única variable importante y que contribuye al impacto del calor pues se recomienda técnicas y secuencia para el soldeo para la velocidad de soldeo.

Serie AA7XXX

Dentro de la serie AA7XXX, el Magnesio forma parte de la mayoría de aleaciones de este grupo, pero el Zinc es el principal elemento de aleación de esta serie (ver Tabla 15). Ambos dan una aleación de muy alta resistencia, cuando son tratadas térmicamente, debido a que la combinación del Zn y el Mg conllevan a la formación del compuesto intermetálico $MgZn_2$, considerado el principal precipitado que endurece este grupo de aleaciones de aluminio.

Tabla 15. Composición química de las principales aleaciones de aluminio de la serie 7XXX

| Nomenclatura AA | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Otros | | Aluminio |
|--------------------|------|------|------------|----------|-------------|-------------|----|-------------|-------------|----------|-------|----------|
| | | | | | | | | | | Cada uno | Total | |
| 7020 | 0.35 | 0.40 | 0.2 | 0.05-0.5 | 1.00 - 1.40 | - | - | 4.00 - 5.00 | 0.25 + (Zr) | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 7049 | 0.40 | 0.50 | 1.20 - 1.9 | 0.50 | 2.10 - 3.10 | - | - | 7.20 - 8.40 | 0.25 + (Zr) | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 7050 | 0.12 | 0.15 | 1.90 - 2.5 | 0.10 | 2.00 - 2.70 | - | - | 5.90 - 6.90 | 0.06 | 0.05 | 0.15 | El resto |
| 7075 | 0.40 | 0.50 | 1.2 - 2.0 | 0.30 | 2.10 - 2.90 | 0.18 - 0.35 | - | 5.10 - 6.10 | 0.20 | 0.05 | 0.15 | El resto |

Bibliografía: (2) Vol. 1, pag. 550, 551

Hay que considerar que las series de elevada resistencia mecánica (AA7010 y AA7050) y el grupo Al-Zn-Mg-Cu (AA7075) tienden al agrietamiento ya sea por licuación o fisuración en caliente en soldeo por fusión, por lo tanto no se recomienda soldar estas aleaciones (Tabla 16). La pequeña cantidad de Cobre, y la presencia de Magnesio incrementan la sensibilidad a la fisuración en caliente situación similar sucede con la aleación AA2024.

Tabla 16. Propiedades Mecánicas de aleaciones de aluminio de la serie 7XXX

| Aleación | Estado | Esfuerzo máx (MPa) | Esfuerzo de Fluencia (MPa) | Alargamiento (%) | Dureza HB |
|----------|--------|-----------------------|-------------------------------|---------------------|-----------|
| AA7020 | O | 180 | 80 | 24 | 55 |
| | T6 | 380 | 335 | 13 | 120 |
| AA7075 | O | 225 | 105 | --- | 60 |
| | T6 | 570 | 505 | 10 | 150 |
| AA7079 | O | 228 | 103 | 16 | 60 |
| | T6 | 538 | 469 | 14 | 145 |
| AA7178 | O | 228 | 103 | 16 | 60 |
| | T6 | 607 | 538 | 11 | 160 |

Por otro lado, las aleaciones Al-Zn-Mg (AA7005) presentan una mejor resistencia a la fisuración en caliente que los del grupo Al-Zn-Mg-Cu (7075), la presencia del Mg induciría que esta serie tendría problema de fisuración en caliente; sin embargo, la adición de zirconio permite refinar el grano y reducir la tendencia al agrietamiento. Ampliamente usados en bastidores de aeronaves.

Además de las aleaciones forjables con tratamiento térmico mencionadas; también podemos incluir algunas aleaciones de aluminio de la serie AA4XXX Al-Si, las cuales permiten un tratamiento térmico si concentran entre 5% a 20% de Silicio en combinación con el Magnesio. El Si endurece al Al, aumenta la fluidez en la colada y su resistencia a la corrosión. Estas aleaciones, Al-Si, son muy dúctiles y resistentes al

impacto, tiene bajo coeficiente de dilatación y una elevada conductividad calorífica y eléctrica, pero son difíciles de mecanizar por la naturaleza abrasiva del Si.

La gran fluidez de la colada que presenta esta serie (AA4XXX) con tratamiento térmico, proporciona una excelente soldabilidad; no solo son extensamente usadas en estructuras soldadas; sino que también se usan como relleno para soldar otras aleaciones de aluminio.

En general, cuando se realiza un proceso de soldadura en aleaciones de aluminio tratables térmicamente, estas no presentan un recocido completo en la ZAC como es en el caso de las aleaciones no tratables térmicamente. Por lo que es necesario realizarle un recocido parcial para lograr óptimas propiedades mecánicas y metalúrgicas. Los parámetros de tiempo y temperatura en estas aleaciones deben de ser controladas para evitar pérdidas de propiedades adyacentes a la soldadura.

Soldabilidad de las Aleaciones de Aluminio

Según lo investigado para los casos de aleaciones de aluminio tratables térmicamente y no tratables, podemos decir de manera general, que las aleaciones que ofrecen buena soldabilidad siguiendo el proceso de soldadura por fusión MIG son las de las series AA1XXX, AA3XXX, AA5XXX, AA6XXX y AA7XXX, esta última serie para la aleación AA7020 de resistencia mecánica media.

Los grupos de aleaciones No Tratable Térmicamente presentan buena soldabilidad, a excepción del Al-Mg (AA5XXX) con alto contenido de Magnesio; y entre las aleaciones tratables se considera al Al-Mg-Si (AA6XXX) y Al-Zn-Mg (AA7XXX) sin cobre. Por otro lado, la mayoría de las aleaciones Tratables Térmicamente de la serie Al-Cu (AA2XXX), Al-Zn-Mg-Cu (AA7XXX) y Al-Li (AA8XXX) presenta soldabilidad restringida, excepto las aleaciones Al-6Cu y Al-Li-Mg.

Podemos decir, que las aleaciones Tratables Térmicamente de propiedades mecánicas elevadas, a excepción de algún grupo, son las que presentan mayor dificultad para el soldeo. Y en general, las aleaciones tratables térmicamente son sujetas a considerables precipitaciones de los elementos aleantes como resultado del calor de la soldadura.

1.3. Procesos de soldeo en aleaciones de aluminio

La soldabilidad de una aleación de aluminio se dificulta porque intervienen varios parámetros; estos no actúan de manera independiente, sumándose el efecto que tendría la variación de un parámetro respecto a otros. El proceso de soldadura, tipo de aleación, material de aporte, prestaciones requeridas, etc.; formaran el conjunto de factores relacionados que garantizarían la estabilidad de la construcción soldada.

La tecnología desarrollada para equipo de soldadura de aluminio y sus aleaciones permite manejar con mayor facilidad algunos parámetros que conducen a una buena calidad del cordón; sin embargo, lo más importante es considerar que cada material de aluminio o aleación nos arrojará resultados diferentes, esto debido a las características particulares que estas tienen, y que deben de tenerse en cuenta a la hora de ser soldados, pues de lo contrario no se obtendrán uniones satisfactorias, por ejemplo podemos mencionar que la temperatura de fusión del aluminio puro es mucho mayor que el de otras aleaciones.

Es imprescindible conocer el comportamiento que tienen las aleaciones de aluminio frente a los diferentes procesos de soldadura, es por ello que se menciona la clasificación de la soldabilidad de algunas aleaciones representativas de cada serie para cada proceso de soldeo, determinada por la Welding Data Book/Welding and Fabrication Magazine (Tabla 17)

Dentro de un proceso de soldadura se debe de asegurar cumplir con tres aspectos importantes que son: continuidad metálica, características químicas y mecánicas, y comportamiento global, de esta manera se calificará la soldabilidad de una aleación de aluminio. Así, podemos relacionar estos tres aspectos con los siguientes grados de soldabilidad:

- Soldabilidad Metalúrgica; referida al material base.
- Soldabilidad Operatoria; según la técnica utilizada en la unión.
- Soldabilidad Constructiva; enfocada al diseño.

Tabla 17. Clasificación de la soldabilidad de las aleaciones de aluminio forjables

| Aleación | Gas | Arco con Gas Inerte | Soldadura por Resistencia | Soldadura por Presión | Soldadura Fuerte | Soldadura Blanda con Fundente | | Esfuerzo a la Ruptura a la Tensión (MPa) | Resistencia a la Fluencia a Tensión (MPa) |
|----------|-----|---------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|-------------------------------|------------|--|---|
| | | | | | | Baja Temp. | Alta Temp. | | |
| 1100-O | A | A | B | A | A | A | A | 89 | 34 |
| 1100-H8 | A | A | A | A | A | A | A | 165 | 152 |
| 3003-O | A | A | B | A | A | A | A | 110 | 41 |
| 3003-H18 | A | A | A | A | A | A | A | 200 | 186 |
| 3004-O | A | A | B | A | B | B | A | 179 | 69 |
| 3004-H38 | A | A | A | B | B | B | A | 283 | 248 |
| 2011-T3 | D | D | D | D | D | D | D | 379 | 296 |
| 2014-T4 | D | C | B | C | D | D | D | 427 | 290 |
| 2017-T4 | D | C | B | D | D | D | D | 427 | 276 |
| 4032-T6 | D | B | C | C | D | D | D | 379 | 317 |
| 5050-O | A | A | B | A | B | C | B | 145 | 55 |
| 5050-H38 | A | A | A | B | B | C | B | 221 | 200 |
| 5052-O | A | A | B | A | C | C | C | 193 | 90 |
| 5454-O | C | A | B | B | D | D | D | 248 | 117 |
| 5456-O | C | A | B | B | D | D | D | 310 | 159 |
| 6061-T4 | A | A | A | B | A | B | B | 341 | 145 |
| 6061-T6 | A | A | A | B | A | B | B | 310 | 276 |
| 6063-T5 | A | A | A | B | A | B | B | 186 | 145 |
| 7075-T6 | D | C | B | D | D | D | D | 572 | 503 |

Bibliografía: (1) Vol. 2, pag. 582,583. Pág. 584.

A= Muy Bueno, B=Bueno, C= Regular, D=Deficiente

1.3.1. Proceso de soldadura OFW

Uno de los primeros procedimientos para iniciar este proceso de soldadura para unir dos materiales es el precalentamiento de estos, y se realiza por medio de una llama producida por la combustión entre el oxígeno y el acetileno. El aporte de calor de esta combinación puede llegar a una temperatura de 3100 °C. El equipo de soldadura está constituido por dos cilindros que contienen acetileno y oxígeno respectivamente, sus respectivos reguladores, sus mangueras de conexión, sus boquillas y soplete (Figura 8).

La llama generada por la mezcla del oxígeno y el acetileno, va a depender en la proporción en la que estos gases se mezclen y ajustándola a los requerimientos del trabajo a realizar. Por ello, podemos identificar tres tipos de llama: Normal o Neutra, Carburante o Reductora y Oxidante.



Figura 8. Equipo de oxiacetileno.

Se denomina llama Neutra cuando la proporción en volúmenes de oxígeno y acetileno es de 1 a 1, la cual es considerada ideal para soldar. Sin embargo, cuando se aumenta el volumen de acetileno se obtiene una llama Carburante y de manera contraria al tener un exceso de oxígeno la llama es Oxidante.

Existen dos procedimientos básicos para este tipo de soldadura (Oxi-acetilénica), los cuales son Soldadura por Fusión (con fusión del material base); Soldadura Fuerte y Soldadura Blanda (sin fusión del material base). Para el caso de soldadura de aluminio por fusión se recomienda un tipo de llama ligeramente reductora (Carburante) con fundente de aluminio, por otro lado cuando se desea unir aleaciones de aluminio sin fusión del material base se utiliza material de aporte (aluminio al silicio), con tipo de llama ligeramente reductora y fundente.

Antes de iniciar el proceso de soldadura en aleaciones de aluminio, cual fuera el procedimiento seleccionado, es muy importante realizar una limpieza de las grasas y contaminante que pueden estar adheridos a la superficie del material base, utilizando disolvente y un cepillo de alambre de acero inoxidable. Además, se ha mencionado la

utilización de fundentes, el cual permite eliminar el óxido que se forma sobre la pieza de trabajo y los contaminantes en la varilla del metal de aporte, recubriéndolo para hacerlo resistente a la humedad, y protegiéndolo del hidrógeno y oxígeno.

Principales características de los fundentes:

- Compuesto por fluoruros y cloruros alcalinos.
- Temperatura de fusión inferior al del material base.
- Alto poder de aglomeración sobre las pequeñas gotas de metal.
- Absorbe con rapidez los óxidos.
- Presentación en polvo, pasta y líquidos.

La utilización de este proceso de soldadura permite realizar soldaduras en todas las posiciones, presenta versatilidad en el uso de tiras del mismo material base cuando no se logra conseguir el aporte adecuado, logrando obtener buenos resultados.

Particularmente, muestra una satisfactoria calidad de la soldadura en aleaciones de aluminio tratables térmicamente, con características de espesor pequeño y cuyas exigencias mecánicas no sean elevadas.

La soldadura con gas se ha empleado tanto con oxígeno acetileno y oxígeno hidrógeno. En ambos casos, se necesita llama neutra (no oxidante ni reductora), empleándose fundente así como una varilla de aporte. Este proceso goza de una baja popularidad, debido a que entra muy poco calor y a la necesidad de quitar el fundente. Cuando se suelda con soplete de oxiacetileno o de oxígeno-hidrógeno la superficie del metal se funde primero y asume una apariencia mojada y lustrosa característica, esto ayuda a saber cuando se alcanzan la temperatura de soldadura.

El AWS ER 1100, AWS ER 4043 y AWS ER 4047, son materiales de aporte (AWS Filler Metal Specification by Material and Welding Process) que se emplean para soldar aluminio de su mismo tipo, usando una llama ligeramente carburante. En este caso es prácticamente obligatorio el uso del fundente, el que se encarga de romper la capa de alúmina que se forma con la temperatura y que dificulta la soldabilidad de estos materiales. El fundente que se emplea es el AWS A3.0 FB 1-A, caracterizándose por ser altamente hidrofóbico.

1.3.2. Proceso de soldadura SMAW

La soldadura por arco de metal protegido (Shielded Metal Arc Welding, SMAW) es de uso manual, en el que se produce coalescencia de metales, producto del calor generado por el arco eléctrico que se mantiene entre la punta del electrodo revestido y la superficie del metal base entre la unión que se está soldando.

Los electrodos son varillas rectas revestido con aluminio o aleación de aluminio y flux, este flux permite disolver el óxido de aluminio del base y del electrodo a utilizar. Los principales elementos que conforma este proceso son: Fuente de Poder, Portaelectrodo, Electrodo, Cable de Fuerza, Cable de Tierra, Metal Base (Figura 9)

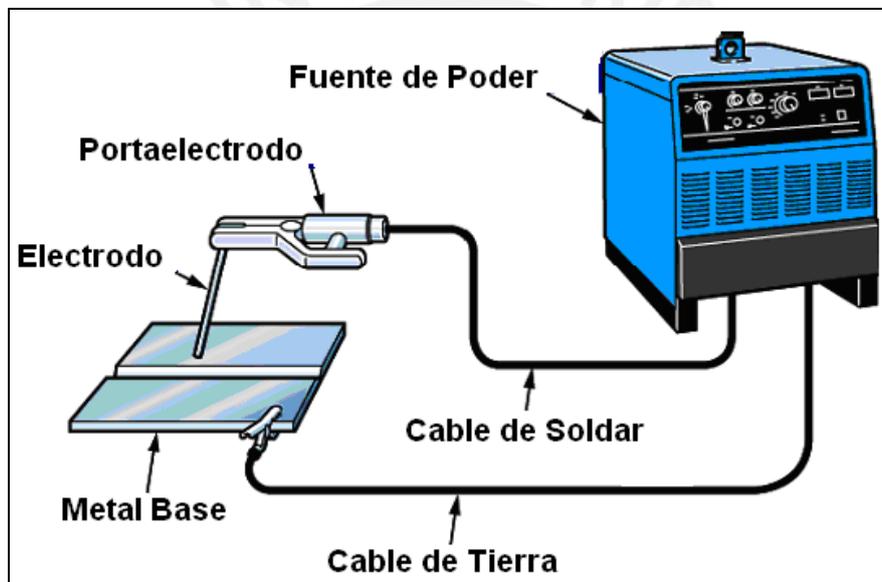


Figura 9. Componentes básicos de un equipo de soldadura SMAW.

En este proceso se utiliza, en cierta medida, los electrodos recubiertos con fundente; porque se da el caso que no logra cumplir con los requerimientos de calidad en la unión, esto se debe a la presencia de porosidad y un bajo nivel de resistencia mecánica. Las aleaciones de aluminio se sueldan a veces por el proceso de arco metálico protegido, aplicados para espesores gruesos, por la eficiencia en el aporte de calor que tiene este proceso.

De otro lado a su capacidad de aporte de calor, esta la tendencia a producir porosidad y una calidad de soldadura deficiente sobre espesores delgados de aleaciones de aluminio menores a 9.0mm. En aplicaciones no críticas se utilizan electrodos de

aleación de aluminio recubierto con fundente. La solidez y la tersura de su superficie son deficientes, limitando a soldaduras a tope en planchas de aluminio cuyo espesor es de 3.2mm. o de mayor espesor.

Podemos encontrar dos tipos de electrodos comerciales en nuestro medio, estos aplicados a aluminio puro y aleaciones de aluminio, cuyas especificaciones están según norma AWS A5.3.

1.3.3. Proceso de soldadura GTAW (TIG)

La soldadura por arco de tungsteno y gas (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) es un proceso de soldadura por fusión que utiliza un arco eléctrico como fuente de calor entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y el metal base, puede usarse con o sin metal de aporte, según lo requiera la aplicación específica. El proceso emplea con un gas inerte protector y sin aplicación de presión. Hoy en día, muchas industrias están haciendo uso del proceso GTAW como un instrumento de soldeo de alta calidad en las uniones producidas.

Se puede identificar 4 elementos básicos (Figura 10) de este proceso de soldadura, los cuales son:

- Antorcha
- Electrodo de Tungsteno
- Maquina de soldeo o Fuente de Poder
- Gas Protector y reguladores

Puede usarse el proceso manual GTAW (TIG), ya sea con corriente alterna o corriente directa dentro de las formas de polaridad directa o invertida. La selección de estas alternativas de trabajo va a depender del material a unir, por ejemplo para el aluminio se recomienda la corriente alterna, para soldar secciones cuyo espesor varíe desde 1mm hasta 9.50mm.



Figura 10. Equipo básico para proceso de soldadura GTAW

Los requisitos de limpieza son especialmente estrictos antes de la soldadura con corriente continua de polaridad directa (electrodo al negativo) en arco de tungsteno con gas, porque bajo tales condiciones el arco no ejerce acción limpiadora alguna.

El recubrimiento de óxido en algunos metales base, el cual se ha formado, provocan un efecto adverso sobre la fluidez del metal de la soldadura y sobre la solidificación presentando mayor riesgo de porosidad. El uso de alambre de aporte, debe estar limpio, si no se quita el óxido del alambre de aporte puede introducir humedad produciendo porosidad en el cordón de soldadura.

La aparición de inclusiones puede ser de dos tipos; metálicas y no metálicas, a consecuencia del uso de corriente excesiva para un tamaño dado de electrodo dando lugar a que se deposite tungsteno en la soldadura.

Como se mencionó para aplicaciones en aluminio se emplea ampliamente la soldadura con corriente alterna, generalmente con alta frecuencia en aplicaciones manuales y automáticas, siguiendo estrictamente los procedimientos establecidos;

atendiendo al tipo de electrodo de tungsteno, al tamaño de la boquilla para soldar, el tipo de gas y las tasas de flujo del mismo. Los gases a emplear pueden ser argón o helio, o una mezcla de ambos. El más empleado es el argón y se usa a un menor flujo, el helio aumenta la penetración, pero necesitando un mayor flujo.

El aluminio crea su propia capa de óxido protectora la cual debe de ser retirada para mejorar la calidad de la soldadura. En el caso del proceso TIG con corriente alterna, su método eléctrico de remoción de óxido emplea bombardeo catódico o de electrones, el cual tiene lugar durante el medio ciclo positivo de la corriente alterna al soldar con arco de tungsteno en gas, este es un fenómeno eléctrico que en realidad “sopla” la capa de óxido produciendo una superficie limpia. Este es una de las razones por la que es tan común la soldadura de arco de tungsteno en gas con corriente alterna en aleaciones de aluminio.

1.3.4. Proceso de soldadura GMAW (MIG/MAG)

La soldadura por arco de metal y gas (Gas Metal Arc Welding, GMAW), también conocido como proceso de soldadura MIG/MAG, emplea un arco entre el extremo del alambre de aporte y el metal base. El proceso se realiza bajo un gas inerte para proteger el arco, suministrado paralelamente con el aporte y sin aplicación de presión.

El proceso consta de los siguientes elementos básicos; además podemos apreciar en la figura 11 los elementos listados en la parte de abajo.

- La unidad de pistola soldadora y cables.
- La unidad de alimentación de alambre de aporte.
- La fuente de potencia.
- La fuente de gas protector.

El proceso denominado MIG/MAG, concentra dos clasificaciones las cuales están en función del tipo de gas protector. Cuando se utilice un tipo de gas puro; ya sea Helio Argon u otros, y las características del material es no ferroso (aluminio) se denominara proceso MIG. Pero cuando se trabaja con dióxido de carbono como gas protector le llamaremos proceso MAG.



Figura 11. Equipo de soldadura MIG

Existen mecanismos de transferencia de material de aporte hacia el metal base, los cuales constituyen la manera de caracterizar el proceso de soldadura MIG, a continuación se menciona los 3 tipos de transferencia:

- Transferencia en cortocircuito.
- Transferencia globular.
- Transferencia por aspersion.

El modo de transferencia del Gas Metal Arc Welding por corto circuito entre sus principales desventajas encontramos el uso limitado en aluminio en ciertos metales y aleaciones. Usado para soldar materiales cuyos espesores sean mayores a 0.6mm.

Para obtener una buena penetración con el proceso de soldadura MIG, solo debe usarse corriente directa de polaridad invertida (electrodo al positivo). Si es el caso, el proceso MIG puede usar barras de respaldo de tipo permanente o temporal, además puede usarse para hacer soldaduras que cumplan con los requerimientos del código ASME para Calderas y Recipientes Sujetos a Presión. Este proceso de soldadura se

puede aplicar a espesores considerables de aluminio, además es mucho más rápido que el proceso por arco de tungsteno con gas.

No solamente hay que tomar en cuenta las consideraciones mencionadas en el párrafo anterior para la obtención de un buen cordón de soldadura mediante este proceso, sino también existen variables de este proceso que afectan la calidad del cordón en su penetración, geometría y calidad en general, estas variables son:

- Velocidad de soldeo
- Voltaje del arco
- Polaridad
- Extensión del electrodo
- Orientación del electrodo
- Diámetro del electrodo
- Posición de la unión que se va a soldar
- Composición y caudal de flujo del gas protector

El aluminio es uno de los metales más susceptibles a la formación de poros durante el proceso de solidificación del metal de soldadura, teniendo una mayor consideración en el proceso MIG, ya que es característica particular e inherente, por la alta característica de solidificación de este proceso. El tipo, el espesor, la composición química del metal base, ayudan a determinar el voltaje necesario, el diámetro de alambre de aporte y tipo de gas de protección a usarse.

Por lo general, el gas argón es usado en este tipo de proceso y en aplicaciones de aluminio. Se debe de usar un control de purga de gas y post-flujo de gas. El ángulo de la pistola o soplete es crítico, se recomienda un avance en ángulo de 30° grados. Además, se debe de realizar un decapado (limpieza de óxidos) previo al proceso de soldadura, con lo cual nos permitirá soldar correctamente planchas de aluminio.

El uso del proceso de soldadura MIG en aluminio es cada vez más frecuente en reparaciones y construcciones navales, ello se debe a su elevada velocidad de soldeo y productividad. Este proceso de soldadura permite depositar cordones de soldadura de alta calidad en todas las posiciones a comparación de otros procesos.

1.4. Cambios Microestructurales en Soldaduras de Aluminio

Durante la realización de la soldadura varias zonas del material se verán afectadas, por transformaciones microestructurales (tamaño de grano), y que dependerá básicamente de la composición de la aleación, de la deformación en frío y del tratamiento térmico. Considerando las características de cada una de las zonas que aparecen durante el proceso (Figura 12), podríamos analizar su soldabilidad.

1. Zona 1, presenta dos etapas durante el aporte de material: la fundición y solidificación. A consecuencia de su buena conductividad térmica que presenta las aleaciones de aluminio, la velocidad de enfriamiento es muy alta, generando estructuras muy finas durante la solidificación, existiendo la posibilidad de formación de segregaciones intergranulares de compuestos intermetálicos de bajo punto de fusión en solución sólida antes de la soldadura. Estas formaciones dependerá de la composición química de la aleación y de la velocidad de solidificación.
2. Zona 2, se produce una fusión parcial del metal base. Las aleaciones no endurecidas térmicamente sufren poco el efecto, cuyas características mecánicas en dicha zona son parecidas a la del metal base en estado recocido. Por otro lado, en aleaciones con tratamiento térmico pueden presentar precipitaciones parciales de los elementos aleantes durante la solidificación, formando compuestos intermetálicos en los bordes de grano. Del mismo modo, para ambos casos puede producirse la fusión de eutécticos, el riesgos de sus efectos dependerá de la cantidad y su localización.
3. Zona 3, es característica principal de las aleaciones tratables térmicamente, ya se produce la solubilización. Los elementos aleantes se encuentran en solución sólida durante el calentamiento, para luego precipitar durante el enfriamiento cuya proporción dependerá de la velocidad en que disminuya la temperatura. Por lo general, estas precipitaciones son perjudiciales, ya que se presenta de forma incontrolada en los bordes de granos; así como en el interior del mismo. Se recomienda el uso de altas velocidades de soldeo para limitar estos efectos.

4. Zona 4, donde se localiza el recocido y maduración en aleaciones conformadas, los cuales se logra en intervalos de temperatura de 250 y 400°C, y en aleaciones no bonificables se da hasta la temperatura de 540°C, perdiendo de esta manera su acritud en materiales que la poseen. A consecuencia del efecto térmico las aleaciones bonificables sufren cambios estructurales debido a la acritud inicial del material; además puede causar precipitación o coalescencia de aleantes. El recocido puede llegar a ser total, de recristalización o de crecimiento de grano.
5. Zona 5, no es afectado por el calor, alcanzando temperaturas muy bajas, y no sufre modificaciones estructurales.

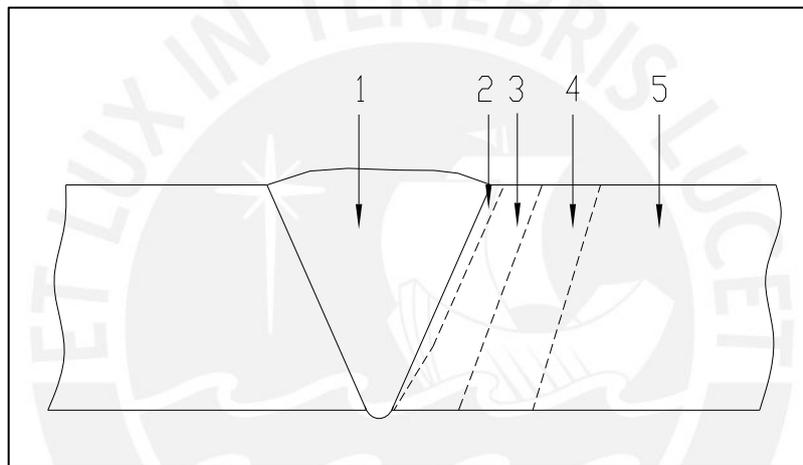


Figura 12. Zona de cambio microestructurales en la ZAC

En general, para las aleaciones de aluminio forjado, la zona donde se deposita el metal de aporte presenta menor ductibilidad que el material base; cuyas características químicas son similares. Esta característica mecánica se debe, al calor transmitido por el arco eléctrico para la fusión del metal de aporte; produciendo de cierta forma un tratamiento térmico de ablandamiento del material o también llamado recocido. La recuperación de las propiedades mecánicas, perdidas en la zona afectada por el calor, se produce mediante un tratamiento térmico.

1.5. Materiales de Aporte para el Soldeo por Arco en Aleaciones de Aluminio

Parte principal del presente trabajo de investigación; es el conocimiento de la composición química del material de aporte a usarse; ya que este influye en el proceso

de soldeo y su comportamiento durante su trabajo. La razón en elegir un material de aporte respecto a otro depende de la aplicación y los requerimientos de servicio que serán sometidos los componente que van a ser soldados. La selección esta determinada por:

- La soldabilidad del material base.
- Las características mínimas del metal soldadura.
- La resistencia a la corrosión.

La referencia más próxima que se tiene para una adecuada selección de materiales de aporte o un sistema de clasificación de aportes para aluminio lo encontramos en la norma del AWS. Sin embargo, es importante mencionar que la clasificación que presenta esta norma con respecto al acero es muy diferente, debido a la amplia diferencia en características física que presenta ambos materiales base. Por ejemplo, en soldadura de aceros es muy común usar un aporte cuyas características químicas y mecánicas sean similares a las del material base, sin importar consideraciones adicionales.

El aluminio y sus aleaciones deben de considerar las condiciones de servicios del componente a unir. Algunas consideraciones que se sugieren para la selección de materiales de aporte de aluminio, las cuales se difieren a las del acero, son las siguientes: fácil soldabilidad, ductibilidad, resistencia a la corrosión, temperatura de servicio, relación de color entre el material base y material de aporte; y tratamiento térmico después de la soldadura. En la Tabla 18 se muestra los aporte recomendados según el material base a unirse.

A menudo; para aplicaciones de uniones soldadas, se utiliza metales de aporte compatibles químicamente con el metal base para las aleaciones de aluminio no tratable térmicamente. Sin embargo, para materiales tratables térmicamente de baja aleación y también para algunas aleaciones no tratables térmicamente se utilizan aportes diferentes al material base, con el fin de obtener características de soldadura y propiedades del metal de soldadura satisfactorias, además para evitar efectos de agrietamientos por solidificación (Fisuración en caliente).

Tabla18. Aportes recomendados para uniones de aleaciones de aluminio [9]

| Material Base | Aportes recomendados | |
|---------------|------------------------|--------------------------|
| | Para Máxima dureza | Para máximo alargamiento |
| EC | ER1100 | EC, 1260 |
| AA1100 | ER1100, ER4043 | ER1100, 4043 |
| AA2219 | ER2319 | |
| AA3003 | ER5183, 5356 | ER1100, ER4043 |
| AA3004 | ER5554, ER5356 | ER5183, ER4043 |
| AA5005 | ER5183, ER4043, ER5356 | ER5183, ER4043 |
| AA5050 | ER5356 | ER5183, ER4043 |
| AA5052 | ER5356, ER5183 | ER5183, ER4043, ER5356 |
| AA5083 | ER5183, ER5356 | ER5183, ER5356 |
| AA5086 | ER5183, ER356 | ER5183, ER5356 |
| AA5154 | ER5356, ER5183 | ER5183, ER5356, ER5654 |
| AA5357 | ER5554, ER5356 | ER5356 |
| AA5454 | ER5356, ER5554 | ER5554, ER5356 |
| AA5456 | ER5556 | ER5554, 5356 |
| AA6061 | ER4043, ER5183 | ER5356 |
| AA6063 | ER4043, ER5183 | ER5356 |
| AA7005 | ER5039 | ER5183, ER5356 |
| AA7039 | ER5039 | ER5183, ER5356 |

La fisuración en caliente se produce a causa de las elevadas tensiones de tracción que se generan en la unión soldada debido a la elevada dilatación térmica y a la importante contracción que el material experimenta durante la solidificación, provocando una fisura en el centro del cordón, que suele extenderse a lo largo de la línea central del mismo, como muestra la Figura 13.

La tendencia a la fisuración en caliente de cuatro series de aleaciones de aluminio, AA2XXX (Al-Cu), AA4XXX (Al-Si), AA5XXX (Al-Mg), y AA6XXX (Al-Mg₂Si), se muestra en la figura 14. Se observa que el aumento en porcentaje en peso de elementos aleantes como Cu, Si y Mg, disminuye la tendencia a la fisuración en caliente.

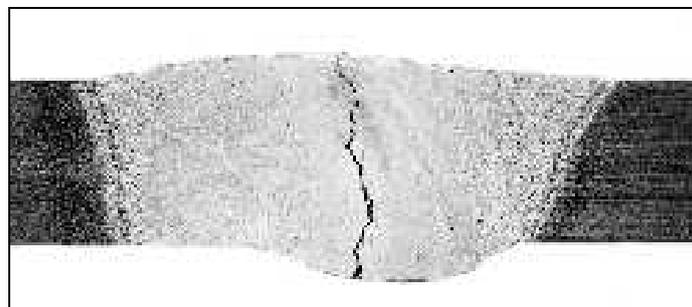


Figura 13. Fisuración en Caliente

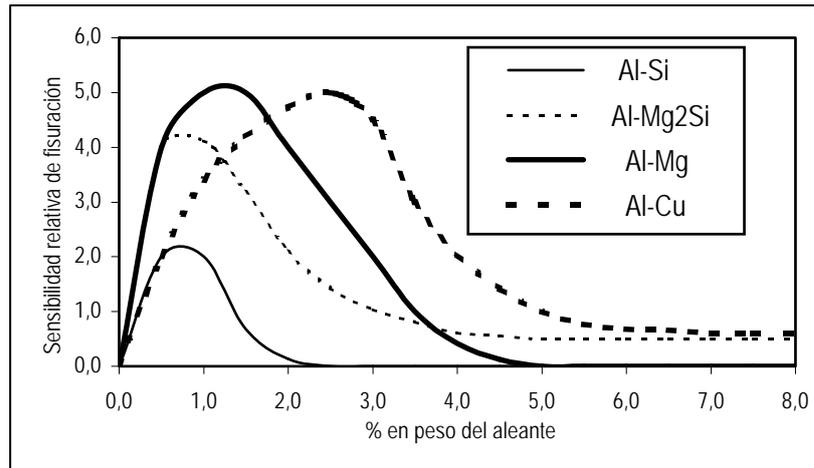


Figura 14. Fisuración en Caliente

La fisuración en caliente se presenta debido principalmente a una inadecuada combinación del metal de aporte y metal base, por eso se recomienda aportes de la serie AA4XXX o AA5XXX, para la reducción del riesgo de fisuración, ya que estos resisten estas imperfecciones cuando se utiliza en materiales bases diferentes al del aporte. Teniendo como consecuencia obtener resistencia mecánica baja en la unión soldada con relación a la del metal base y restricciones a un tratamiento térmico posterior.

Existe un amplio número de aleaciones de aluminio que son susceptibles a la fisuración en caliente cuando son soldados por arco eléctrico. Por lo general estas aleaciones son la de tipo tratables térmicamente, específicamente encontramos a la serie AA2XXX (Al-Cu), AA6XXX (Al-Mg-Si) y AA7XXX (Al-Zn). Como se mencionó anteriormente, la fisuración en caliente se debe al alto grado de estrés térmico y a la contracción de solidificación presentes cuando la soldadura está por debajo de la temperatura de solidificación adecuada, por lo tanto este problema agrupa factores mecánicos térmicos y metalúrgicos.

El desarrollo de tensiones por factor térmico en la unión soldada ocasiona agrietamiento a temperaturas elevadas, apoyado por la elevada dilatación térmica que presenta las aleaciones de aluminio. Durante la solidificación aparecen estas imperfecciones debido a que experimenta una contracción considerable, la cual es 5% mayor en las uniones realizadas sobre aceros.

Otro tipo de agrietamiento es por licuación, la cual se desarrolla en la ZAC, y es la formación de películas de bajo punto de fusión en el límite de grano, la cual no soporta las tensiones por contracción cuando el metal de soldadura se solidifica y se enfría. Las series más susceptible a este defecto son AA2XXX, AA6XXX, AA7XXX y algunas de la serie AA8XXX, las cuales están dentro de las que son tratables térmicamente.

Este peligro por licuación disminuye al utilizar un metal de aporte cuya temperatura de fusión es más baja que la del metal base. Por ejemplo: las aleaciones de la serie AA6XXX se sueldan con metal de aportación de la serie AA4XXX. Sin embargo, para soldar aleaciones con elevado contenido de magnesio, AA5053, no se debe usar metal de aporte de la serie AA4XXX, ya que en los límites de la zona de fusión se puede formar excesiva cantidad de siliciuro de magnesio (Mg_2Si), y conlleva a la disminución de la ductilidad y aumento de la sensibilidad al agrietamiento.

En aplicaciones de soldadura para aleaciones de aluminio de alta resistencia como son las tratables térmicamente los electrodos más apropiados son los que tienen una composición diferente a de los metales base. Por ejemplo; aleaciones de aluminio como la AA6061 no son apropiadas como metales de aporte están se utilizan como material base. En base a lo mencionado las aleaciones de aporte se diseñan de modo que produzcan las propiedades de metal de soldadura deseadas con características de operación aceptables.

El aporte debe satisfacer ciertas demandas del proceso en cuanto a estabilidad del arco, compartimiento de transferencia de metal y características de solidificación. También debe producir un depósito de soldadura compatible con una o más de las siguientes características del metal base:

1. Química
2. Resistencia Mecánica
3. Ductibilidad
4. Tenacidad

Otras propiedades como la resistencia a la corrosión, la respuesta al tratamiento térmico, la resistencia al desgaste y la igualación de colores, se deben tomar en cuenta según el tipo de aplicación de la unión. Pero, por encima de estas

observaciones esta la compatibilidad metalúrgica del metal base y el metal de aporte. La American Welding Society ha establecido clasificaciones para los metales de aporte de uso común.

Ya sea por arco metálico con gas o por arco de tungsteno con gas, el metal de aporte que se selecciona es el mismo. Es importante conocer la composición química del metal o la aleación base. Para mayor detalle se debe de consultar con las especificaciones AWS A5.3 y A5.10, las que se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. Composición de los metales de aporte con base de aluminio

| Tipo | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|------|--------------|------|-----------|-----------|----------|-----------|------|-----------|-----------|
| 1100 | 1.0 Si + Fe | - | 0.05-0.20 | 0.05 | - | - | 0.10 | - | 99.0 Min. |
| 4043 | 4.5-6.0 | 0.80 | 0.30 | 0.05 | 0.05 | - | 0.10 | 0.20 | El resto |
| 5154 | 0.45 Si + Fe | - | 0.10 | 0.10 | 3.1-3.9 | 0.15-0.35 | 0.20 | 0.20 | El resto |
| 5254 | 0.45 Si + Fe | - | 0.05 | 0.01 | 3.1-3.9 | 0.15-0.35 | 0.20 | 0.05 | El resto |
| 5652 | 0.40 Si + Fe | - | 0.04 | 0.01 | 2.2-2.8 | 0.15-0.35 | 0.10 | - | El resto |
| 5554 | 0.40 Si + Fe | - | 0.10 | 0.50-1.0 | 2.4-3.0 | 0.05-0.20 | 0.25 | 0.05-0.20 | El resto |
| 5356 | 0.50 Si + Fe | - | 0.10 | 0.05-0.20 | 4.5-5.5 | 0.05-0.20 | 0.10 | 0.06-0.20 | El resto |
| 5183 | 0.40 | 0.40 | 0.10 | 0.50-1.0 | 4.3-5.2 | 0.05-0.25 | 0.25 | 0.15 | El resto |
| 5556 | 0.40 Si + Fe | - | 0.10 | 0.50-1.0 | 4.7-5.5 | 0.04-0.35 | 0.25 | 0.05-0.20 | El resto |
| 6061 | 0.40-0.80 | 0.70 | 0.15-0.40 | 0.15 | 0.80-1.2 | 0.04-0.35 | 0.25 | 0.15 | El resto |

Bibliografía: (2) Pág. 554.

Algunas bibliografías, hacen mención que en una soldadura de las aleaciones de Al-Mg de la serie 5XXX, no es conveniente utilizar una aleación de aporte de silicio; y se sugiere un aporte de Al-Mg, y en cordones de soldadura donde el metal de aporte es Al-Si y el metal base otro, puede producirse dilución del Si y fisuración; así mismo, puede existir pérdida de Si durante la soldadura

Para prevenir el riesgo de agrietamiento en la unión, se recomienda que el aporte seleccionado tenga un mayor porcentaje de contenido de magnesio que el material base, aunque pueda derivar a una corrosión intergranular por la presencia de partículas β originadas por el calentamiento durante largos periodos. Así mismo, otro elemento que debe ser controlado en aporte de Al-Mg es el sodio, ya que en contenidos elevados tiende a generar gasificación y agrietamiento.

La existencia de dos tipos de aleaciones de aluminio, tratables térmicamente y no tratables térmicamente, nos induce a cuestionar la versatilidad de los materiales de aporte comercialmente utilizados ante un tratamiento térmico posterior a la soldadura. Por lo que se debe de evaluar el comportamiento y la habilidad del material de aporte

antes lo efectos de un tratamiento térmico. Por lo general, los materiales de aporte sufren una sustancial dilución con el material base, lo cual no es fácil realizar un adecuado control

1.6 Selección del material de aporte

Las curvas de sensibilidad (Figura 14) a la fisuración en caliente del aluminio, toman en cuenta la composición química y son una herramienta útil para entender porque se produce las fisuras durante el soldeo del aluminio.

En la Figura 14, se aprecia que con la adición de pequeñas cantidades de elementos aleantes la sensibilidad a la fisuración se vuelve mas severa, llegando a un máximo para luego descender hasta niveles relativamente bajos. La mayoría de aleaciones de aluminio consideradas como “insolubles”, tienen su composición química en o cerca de los picos de sensibilidad a la fisuración. Adicionalmente la figura 14 muestra que las aleaciones que presentan bajo riesgo de fisuración en caliente, son las que tienen su composición química que se encuentran lejos de los picos de sensibilidad a la fisuración. Por lo tanto, es claro que la sensibilidad a la fisuración en caliente de una aleación de aluminio es principalmente dependiente de su composición química.

En general, el riesgo de que se produzca fisuración en caliente se puede reducir utilizando un metal de aporte diferente al material base, resiste a la fisuración en caliente, usualmente que forme parte de las series de aleaciones AA4XXX ó AA5XXX, generalmente el inconveniente de esta practica es que el aporte empleado presenta una resistencia mecánica menor que la del metal base y que no responde adecuadamente al tratamiento térmico posterior del soldeo.

Los materiales de aporte comúnmente empleados en el soldeo de diversas aleaciones de aluminio por su resistencia a la fisuración en caliente, y que son extensamente recomendados para el soldeo de aleaciones de aluminio tratables y no tratables térmicamente, son el ER4043 (Al-5Si) y el ER4043 (Al-5Mg).

CAPITULO 2

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El objetivo del presente capítulo es, establecer las condiciones y características necesarias en el soldeo de las uniones soldadas de aluminio con ambos materiales de aporte, así mismo, determinar las diferencias en sus propiedades mecánicas mediante los ensayos de Tracción, Microdureza y Doblado.

2.1. Metodología de Trabajo

Para la realización de las uniones soldadas se seleccionó el proceso MIG semiautomático, pues es el más adecuado para el soldeo del aluminio y sus aleaciones debido a que presenta una serie de características durante el soldeo que permite obtener cordones de soldadura de calidad, siempre que se sigan las recomendaciones para este proceso. Así mismo, se siguieron procedimientos de limpieza, preparación del material base, prueba de parámetros de soldeo, como también, la verificación y utilización de los implementos de seguridad para la soldadura.

Finalizada la unión de los materiales base, se anotaron los valores finales de intensidad de corriente y voltaje, estos valores son referenciales debido que dependerá de una serie de factores como material base, material de aporte, gas de protección, etc. Estos presentaran característica de soldeo diferente.

Para constatar la calidad del cordón, se realizó una inspección visual el cual debería descartar problemas de mordedura, falta de fusión en la raíz, socavación, etc. con la finalidad de obtener parámetros de soldeo confiables durante los ensayos mecánicos realizados a las probetas de aluminio.

2.2. Características Nominales de los Materiales a Emplear

2.2.1. Material Base

Se emplearan planchas de aleaciones de aluminio de 3mm de espesor estas presentaban geometría (ancho y largo) poco adecuadas para un trabajo de soldeo cómodo para esta parte experimental, por lo que se fabricaron cupones rectangulares de dimensiones 150mm x 200mm, cuyas características químicas se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Composición del material base utilizado

| Muestra | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ni | Cr | Pb | Sn | Ti | Na | Sr | V | Zr | Al |
|---------|-------|-------|-------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|--------|-------|--------|-------|
| 1 | 0,143 | 0,666 | 0,12 | 1,1478 | <0,0050 | <0,005 | <0,001 | <0,005 | <0,002 | <0,005 | 0,008 | <0,0005 | <0,001 | 0,006 | 0,016 | 97,89 |
| 2 | 0,186 | 0,713 | 0,114 | 0,9774 | 0,0479 | <0,005 | <0,001 | <0,005 | <0,002 | <0,005 | 0,019 | 0,0006 | <0,001 | 0,009 | 0,0014 | 97,91 |

Estas muestras corresponden a la familia de aleaciones de aluminio de la serie AA3XXX, perteneciendo al grupo de No Tratado Térmicamente. Presenta variaciones porcentuales de algunos de sus elementos aleantes principales, que hacen que cada muestra obtenga un comportamiento sustancialmente diferente frente al proceso de soldadura y ante los resultados de los ensayos mecánicos realizados.

Material Base 1

El mayor contenido de Manganeso permite obtener una mayor resistencia a la tracción y ductibilidad que el Material Base 2 (MB2). Así mismo, la combinación del elemento principal de esta serie con el 0.14% de Silicio produce un buen comportamiento a la extrusión, formabilidad.

Material Base 2

El contenido de Manganeso (1.0%) en el MB2 es menor que en el MB1 (1.15%), por lo tanto sus propiedades de ductibilidad y resistencia mecánica serán menores con respecto al MB1. El contenido en Mn en ambos materiales base es menor que 1.8%, este valor no está cercano al de máxima solubilidad (1.8% Mn), ver Tabla 21, siendo de poca consideración ya que por encima de este valor se forman cristales de Al₆Mn, los cuales crean problemas para futuros procesos.

Tabla 21. Máxima Solubilidad Sólida en Aluminio [3]

| Elementos Aleantes | Máxima Solubilidad (%peso) | Temperatura (°C) |
|--------------------|----------------------------|------------------|
| Cu | 5.6 | 546 |
| Mg | 14.9 | 450 |
| Mn | 1.8 | 658 |
| Si | 1.6 | 577 |
| Zn | 82.8 | 383 |
| Mg ₂ Si | 1.8 | 595 |
| MgZn ₂ | 16.9 | 475 |

2.2.2. Materiales de Aporte

De acuerdo a las recomendaciones de la norma AWS, se presenta en la Tabla 22 la composición química nominal de los aportes, ER4043 y ER5356, según norma AWS A5.10-92, empleados en el presente trabajo

Tabla 22. Composición de los materiales de aporte utilizados

| Aporte | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|--------|-------------|------|------|-----------|----------|-----------|-----|-----------|----------|
| 4043 | 4.5-6.0 | 0.80 | 0.30 | 0.05 | 0.05 | - | 0.1 | 0.20 | El resto |
| 5356 | 0.5 Si + Fe | | 0.10 | 0.05-0.20 | 4.5.-5.5 | 0.05-0.20 | 0.1 | 0.06-0.20 | El resto |

Los resultados de los ensayos realizados a los materiales de aporte en estado de suministro se muestran en la Tabla 23.; es decir, las propiedades mecánicas de los cordones de soldadura una vez depositados, de acuerdo a la información proporcionada por la empresa fabricante

Tabla 23. Propiedades mecánicas del material de aporte

| Aporte | Resistencia a la Tracción (Mpa) | Elongación (l=5d)(%) | Limite de fluencia (MPa) |
|---------|---------------------------------|----------------------|--------------------------|
| ER 4043 | 118-147 | 10 - 17 | >49 |
| ER 5356 | 215 - 255 | 17 - 25 | >100 |

2.3. Equipamiento y acondicionamiento antes del soldeo

2.3.1. Máquina de soldeo MIG

El equipo de soldeo o fuente de poder utilizado para el proceso de soldadura, permite un fácil encendido y mantiene el arco eléctrico a favor de una buena soldadura. Este equipo brinda las condiciones necesarias para trabajar bajo exigencias variables y duras que el proceso pueda presentar.

La fuente de poder es del tipo voltaje constante; es decir, la intensidad de corriente varía de acuerdo a la exigencia del trabajo, cuyas características normales de trabajo empleados fue continua de polaridad invertida. Así mismo, no se dejara de mencionar la importancia de mantener la estabilidad del arco para la obtención de un cordón de soldadura de buena calidad, el proceso MIG proporciona la cantidad adecuada de corriente para una velocidad de alimentación fijada.

2.3.2. Variación de la Intensidad y Voltaje de soldeo

Los valores de entrada al equipo de potencia (Figura 15), es el voltaje que conjuntamente con la intensidad de corriente, este último se ajusta indirectamente con la velocidad de aporte del material, provoca el calor necesario para fundir el material de aporte. El valor de voltaje ingresado en la fuente de poder determina la longitud de arco. Siendo estos parámetros las condiciones operatorias para la soldadura.

Conociendo que el modo de transferencia del metal aporte influye en las condiciones finales del cordón de soldadura, se prestó atención en obtener parámetros de soldadura para que la transferencia de aporte sea tipo spray, ya que permite obtener una alta tasa de deposición, buena fusión y penetración, buena apariencia del cordón y limita el exceso de salpicadura.

La Figura 15 muestra dos parámetros de soldadura, voltaje y amperaje, que se regulan para obtener un buen rendimiento y una buena calidad, así como también los valores de velocidad de avance y aporte del material, regulados en el carrito de soldadura, influyendo en tipo de transferencia del proceso.



Figura 15. Visualización del amperaje y voltaje.

2.3.3. Angulo de inclinación de la pistola de soldeo

Es un factor importante al realizar un trabajo de soldadura, porque afecta la forma y la penetración del cordón de soldadura, debiendo ser considerado tan igual o mas importante que otros factores como son el voltaje o velocidad de avance. Dentro de la inclinación de la pistola de soldeo se considera el ángulo de desplazamiento y el ángulo de trabajo.

En la obtención de las uniones soldadas se dirigió la punta del alambre de aporte en dirección al desplazamiento, esta técnica se denomina soldadura de derecha con ángulo de ataque. Girando un ángulo entre 20-25 grados (Figura 16) con respecto a la perpendicular, se dio un ángulo de ataque a nuestro proceso, de esta manera las condiciones físicas del cordón de soldadura llegan a ser optimas; además que la técnica de ataque es preferida para soldadura de aleaciones de aluminio, ya que tiene un efecto limpiador sobre el metal base durante el aporte del material fundido, reduciendo la tensión superficial y la oxidación del metal base.

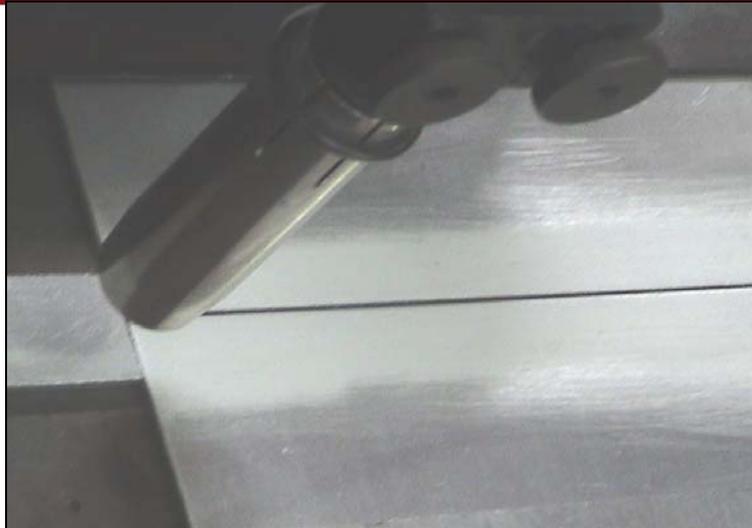


Figura 16. Inclutación de la pistola de soldeo.

2.3.4. Sistema de control de la velocidad de soldeo (V_s)

Con el objetivo de mantener la velocidad de soldeo constante se empleó un carro de soldadura o “Welding Car” (Figura 17) el cual permite además regular el ángulo de inclinación e ingresar el valor de la velocidad de soldeo, la cual es la velocidad de movimiento lineal del arco a lo largo de la unión que se va a soldar. Manteniendo el control de las demás variantes del proceso y una adecuada velocidad de soldeo, se obtiene una buena penetración de soldadura.

La velocidad de soldeo es inversamente proporcional a la cantidad de material de aporte depositado. Por ejemplo, si se disminuye la velocidad de soldeo, se incrementa la deposición del metal de aporte por unidad de longitud, teniendo como consecuencia el aumento de la penetración efectiva y la ampliación del cordón de soldadura.

Así mismo, al aumentar el valor de la velocidad de soldadura la fusión del material de aporte disminuye, debido a que la energía térmica que transmite el arco eléctrico hacia el material base decrece por unidad de longitud de la soldadura.



Figura 17. Carro de soldadura (Welding Car) MIG-Semiamatomatica

2.3.5. Control y Graduación del Caudal del Gas de Protección

La función principal del gas protector es la de impedir que los gases de la atmósfera entren en contacto con el metal fundido de la soldadura. La utilización de este gas impide que se formen óxidos durante el baño fundido del metal, lo que puede limitar la calidad del cordón.

El gas de protección utilizado para soldar los cupones de aleaciones de aluminio fue el Argón al 100%; el cual es muy usado en aleaciones no ferrosas, siguiendo especificaciones de pureza y contenido de humedad según welding grade.

La graduación del caudal del gas de protección, dependerá de las condiciones externas requeridas para unir el material base. Evitando que sea afectado por gases contaminantes de la atmósfera, desplazándolos y protegiéndolo por una envoltura sobre el arco.

2.3.6. Sistema de Alimentación del material de aporte (Va)

Los elementos que permiten la alimentación del metal de aporte están conformados por la pistola y cables de conducción. El tipo de pistola que presenta el equipo de soldadura es de tipo cabezal curvo; ideal para diámetros pequeños, permitiendo a la vez una buena maniobrabilidad en las posiciones de soldeo. Los cables de conducción no solo albergan conductores eléctricos; sino también, el gas de protección (Argón) y

el material de aporte (alambre de aleación de aluminio). En la Figura 18, se aprecia el sistema mecánico del alimentador de alambres para el proceso MIG.

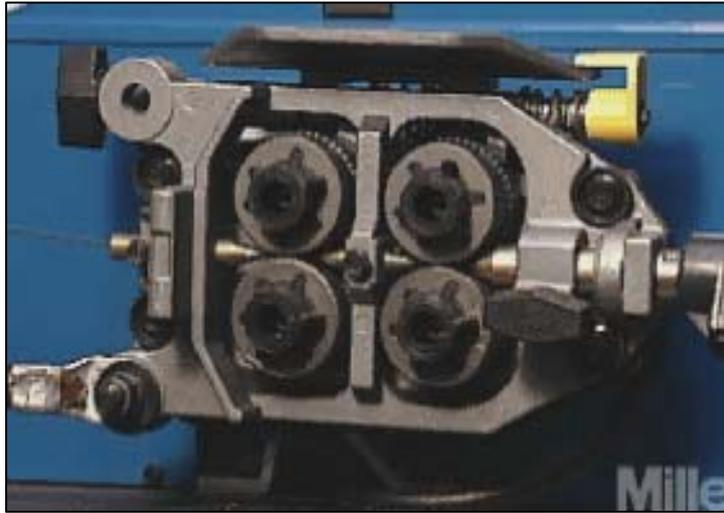


Figura 18. Sistema mecánico del alimentador de alambres.

Dentro del sistema de alimentación del alambre se puede identificar un parámetro adicional de soldeo que es la velocidad del aporte (V_a), la cual dependerá de las condiciones iniciales fijadas en la fuente de poder, esta a su vez emitirá la energía necesaria para mantener el voltaje constante cuyo valor esta determinado por la relación del grado de combustión del alambre y la corriente a soldar.

Por consiguiente, la “alimentación” es la velocidad (cm/min) con lo que el alambre es enviado hacia la tobera (salida del aporte), es conocida como velocidad de alimentación, la cual no deberá fluctuar durante procesos MIG, pues generaría desestabilización del arco eléctrico y esto se puede originar, a partir del roce en la boquilla de contacto de la pistola de soldar.

2.3.7. Protección Personal

Indiscutiblemente la conservación de la integridad física del soldador y personas cercanas al área de trabajo deben de preservarse, por este motivo existe el equipo de protección especial para estos procesos. Del mismo modo, la norma ANSI Z49.1, Safety in Welding, Cutting, and Allied Proceses, proporciona una guía de seguridad que debe de ser practicada por el personal en contacto con estos procesos.

Un factor muy dañino para los órganos visuales del soldador es la luz brillante y las chipas emitidas por el arco eléctrico, para contrarrestar estos efectos es necesario la utilización de una careta (Figura 19) que permite observar el desarrollo de la operación de soldeo a través de un vidrio con filtro de luz el cual está incorporado en la careta.



Figura 19. Protección facial para soldaduras.

2.4. Ejecución de Uniones

2.4.1. Preparación de Juntas

Las partes a unir del material base con el aporte de soldadura, se les denomina juntas de soldeo, cuyas características geométricas es visible en los bordes de las planchas. La elección del tipo de junta debe permitir satisfacer las condiciones del proceso de soldadura y una adecuada penetración del aporte en la raíz del cordón.

De los cinco tipos básicos de juntas o uniones para la soldadura (unión a tope, unión en ángulo, unión por el borde, unión de solape y unión en T) se selecciono la unión a tope, porque es el tipo de unión recomendada para espesores menores a 6 mm. El diámetro del material de aporte, está relacionado con la separación que tendrán los bordes de cada plancha.

2.4.1.1. Posición de la Unión a Soldar

Por lo general, los trabajos de uniones de soldadura se ejecutan en la posición en la cual se encuentran, para lo cual se desarrollan técnicas de trabajo en campo. En este trabajo se utilizó la posición plana, la cual se adecua muy bien a la soldadura GMAW, permitiendo un fácil soldeo y considerada de bajo costo de proceso a comparación de otras posiciones de soldaduras.

2.4.1.2. Limpieza de Bordes

Para eliminar las grasas y óxidos formados de manera natural por el aluminio (capa de alúmina), se realizó la limpieza de la plancha en forma mecánica (escobilla de acero inoxidable) en los alrededores de los bordes (Figura 20); además, se empleó alcohol en la limpieza final para retirar grasas y aceite, esto con el fin de evitar la formación de porosidades, grietas y otros defectos en el cordón durante el proceso de soldadura.

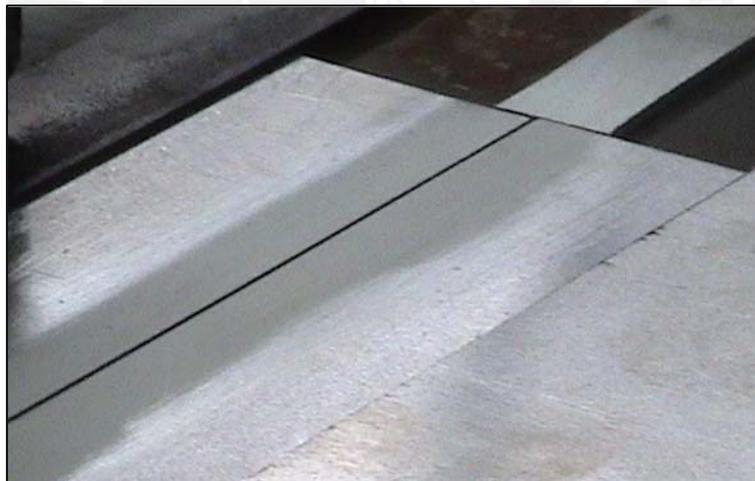


Figura 20. Limpieza de borde.

2.4.2. Procedimiento de Soldeo

2.4.2.1. Puesta a Punto para el Proceso de Soldadura

Para la ejecución del soldeo de cada uno de los cupones, se variará los parámetros de soldeo de tal manera de conseguir uniones satisfactorias, requerimientos necesarios

para que la acción del avance del aporte de material sea adecuada y obtener resultados finales óptimos.

El posicionamiento de las planchas de aluminio (cupones) sobre la mesa de trabajo, se realizó con la ayuda de dos mordazas (Figura 21), con la finalidad de evitar el desplazamiento de las planchas de aluminio durante el trayecto del carro de soldadura y que se produzcan alabeos (deformaciones) como consecuencia del aporte de calor.

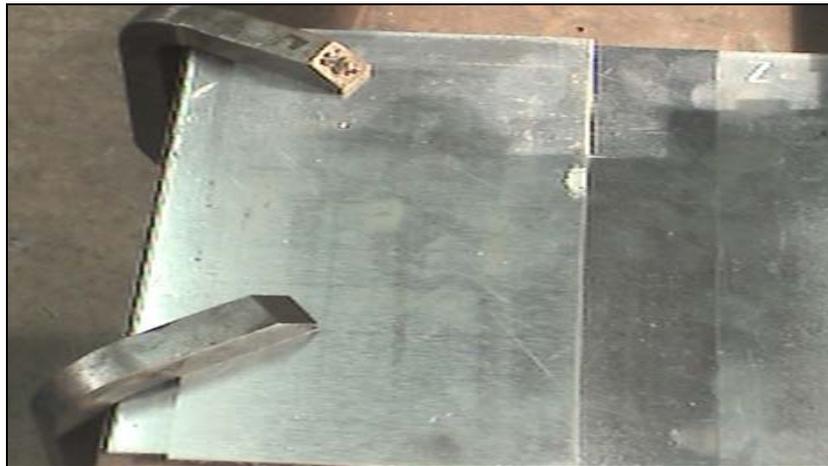


Figura 21. Posicionamiento de las planchas de aleaciones de aluminio.

Una de las propiedades físicas del aluminio es su elevado valor de dilatación térmica, que es el doble que del acero, cuyo efecto durante el proceso de soldadura es la disminución del espacio entre los bordes de las planchas. Para evitar esta dificultad, así como el desnivel entre planchas (Hi Low) se realizó un apuntalado adecuado (punto de soldadura) entre los borde de ambos cupones para lo cual se empleó pequeños apéndices de aluminio para iniciar el arco y finalizar el arco (Figura 22 y 23)

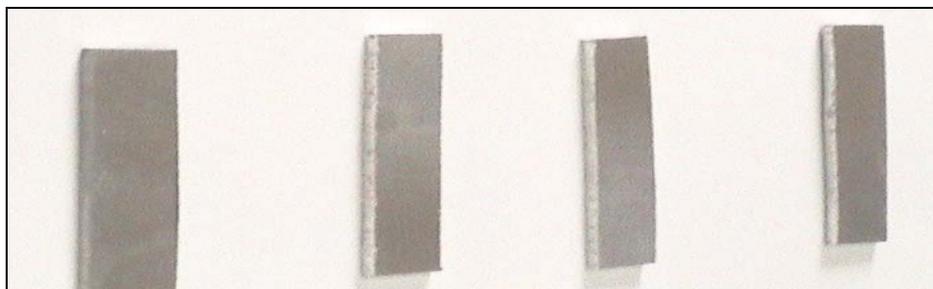


Figura 22. Apéndices de Aluminio.

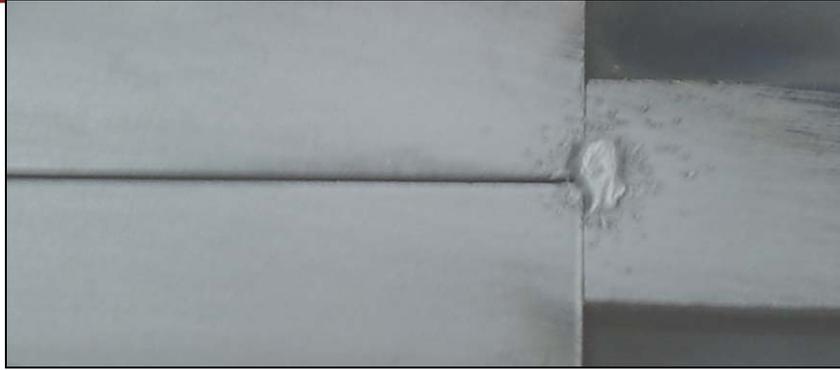


Figura 23. Apuntalamiento de las planchas a soldar y la unión con el apéndice.

El posicionamiento de la tobera y la distancia del alambre de aporte respecto al material base se puede observar en la figura 24. Para esta parte del proceso realizó la regulación de la longitud del material de aporte que sobresale de la boquilla, que es la distancia que existe del extremo del tubo de contacto y la punta del aporte. Por el tipo de transferencia a usar, pulverizado o spray, la extensión del aporte debe de estar entre 13 y 25 mm.

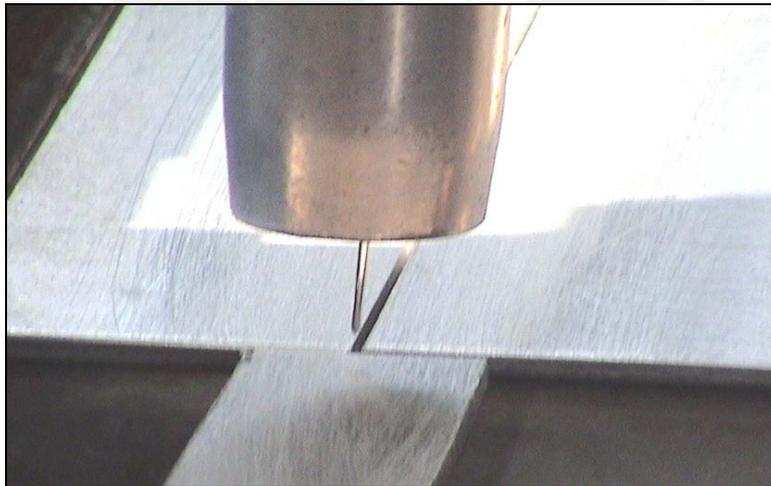


Figura 24. Posicionamiento de la tobera y alambre de aporte.

2.4.2.2. Procedimiento Seguido y Parámetros Obtenidos

Antes de iniciar el proceso de soldadura, para obtener los cupones, se verificó los parámetros de soldeo utilizando unas planchas de aluminio como prueba, con la finalidad de garantizar una buena penetración en la raíz, aporte de calor óptimo, sobremonta del cordón de soldadura; así se procedió para cada junta a realizar.

En total se realizaron ocho cupones de soldadura con los dos materiales de aporte y ambos materiales base, con una y dos pasadas de material de aporte. En la Tabla 24 se puede observar los cupones realizados.

Tabla 24. Combinaciones de uniones realizadas

| Número de pasadas | Combinaciones | | | |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 | Muestra 1/ER5356 | Muestra 2/ER5356 | Muestra 1/ER4043 | Muestra 2/ER4043 |
| 2 | Muestra 1/ER5356 | Muestra 2/ER5356 | Muestra 1/ER4043 | Muestra 2/ER4043 |

Como se mencionó al inicio de esta sección, la calidad del soldeo gira alrededor de varios parámetros del propio proceso, algunos de estos como la intensidad de corriente y voltaje. El ajuste adecuado y la variación controlada de la intensidad durante el trabajo determinarán el aporte calorífico apropiado para la fusión del material de aporte. Los valores obtenidos durante el proceso de soldadura con una y dos pasadas en los cupones de Material Base 1, con aporte ER5356, se visualizan en la Tabla 25. Para las mismas condiciones mencionadas se tiene una tabla de parámetros obtenidos en la unión del Material Base 2 (Tabla 26).

Tabla 25. Valores de soldeo empleando MB1 y aporte ER5356

| Muestra | Pasadas | Junta | Intensidad (A) | Voltaje (V) | Velocidad Aporte (cm/min) | Velocidad Soldeo (cm/min) | Aporte | | Gas Protección | |
|---------|---------|-------|----------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------|--------|----------------|----------------|
| | | | | | | | Diámetro (mm) | Tipo | Tipo | Caudal (l/min) |
| 1 | 1 | I | 144 | 22 | 10 | 60 | 1,0 | ER5356 | Ar | 14 |
| 1 | 2 | I | 124/124 | 22/23 | 8 | 60/60 | 1,0 | ER5356 | Ar | 14 |

Tabla 26. Valores de soldeo empleando MB2 y aporte ER5356

| Muestra | Pasadas | Junta | Intensidad (A) | Voltaje (V) | Velocidad Aporte (cm/min) | Velocidad Soldeo (cm/min) | Aporte | | Gas Protección | |
|---------|---------|-------|----------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------|--------|----------------|----------------|
| | | | | | | | Diámetro (mm) | Tipo | Tipo | Caudal (l/min) |
| 2 | 1 | I | 120 | 20 | 8 | 60 | 1,0 | ER5356 | Ar | 14 |
| 2 | 2 | I | 117/118 | 23/23 | 8 | 60/60 | 1,0 | ER5356 | Ar | 14 |

El valor de velocidad de soldeo con la que se inició el trabajo de soldadura (Tabla 25) fue de 70cm/min, con este parámetro de soldeo se verificó, por inspección visual, que no llegaba a unir los bordes de los cupones, modificando este parámetro por un valor de velocidad menor. A 60cm/min se obtuvo una buena fusión del material y unión de las piezas, cuyas características era un buena deposición del material y calidad de

cordón aceptable. Además, se realizaron pequeños ajustes entre la distancia de separación de los cupones y la altura del alambre. Distancia referencia asumida Tobera-pieza=20 mm.

Es conveniente mencionar que para el ensayo, material base 1/ER5356 dos pasadas (Tabla 25), el proceso de soldadura se inicio con una velocidad de aporte a 7 cm/min, lo que origino una transferencia globular no deseada para nuestros fines. Dicho valor fue aumentado a 8 m/min, obteniendo una transferencia de material tipo spray.

Siguiendo con los ensayos realizados, se presenta los valores obtenidos durante el trabajo de soldeo (Tabla 27), utilizando el aporte ER4043 para unir el material base 1, para una y dos pasada. Por otro lado, en la Tabla 28 se observa los valores finales al unir el material base 2.

Tabla 27. Valores de soldeo empleando Materia Base 1 y aporte ER4043

| Material Base | Pasadas | Junta | Intensidad (A) | Voltaje (V) | Velocidad Aporte (m/min) | Velocidad Soldeo (m/min) | Aporte | | Gas Protección | |
|---------------|---------|-------|----------------|-------------|--------------------------|--------------------------|---------------|--------|----------------|----------------|
| | | | | | | | Diámetro (mm) | Tipo | Tipo | Caudal (l/min) |
| 1 | 1 | I | 110 | 23 | 6 | 60 | 1,0 | ER4043 | Ar | 14 |
| 1 | 2 | I | 110 | 22 | 8 | 60 | 1,0 | ER4043 | Ar | 14 |

Tabla 28. Valores de soldeo empleando Materia Base 2 y aporte ER4043

| Muestra | Pasadas | Junta | Intensidad (A) | Voltaje (V) | Velocidad Aporte (cm/min) | Velocidad Soldeo (cm/min) | Aporte | | Gas Protección | |
|---------|---------|-------|----------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------|--------|----------------|----------------|
| | | | | | | | Diámetro (mm) | Tipo | Tipo | Caudal (l/min) |
| 2 | 1 | I | 110 | 22 | 6 | 60 | 1,0 | ER4043 | Ar | 14 |
| 2 | 2 | I | 117/118 | 23/23 | 8 | 60/60 | 1,0 | ER4043 | Ar | 14 |

2.5. Técnicas de Caracterización de las Uniones

2.5.1. Selección de Muestras

Dentro del estudio de las uniones soldadas realizadas, se contempla ensayos mecánicos que brindarán información (resistencia mecánica, dureza y ductilidad) de las uniones realizadas con ambos materiales de aporte utilizados para unir dos aleaciones de aluminio. Se seleccionaron los cupones de aleaciones de aluminio con

cordones de soldadura de calidad aceptable, según inspección visual, de forma que a partir de ellas se fabriquen las respectivas probetas (Figura 25 y 26).

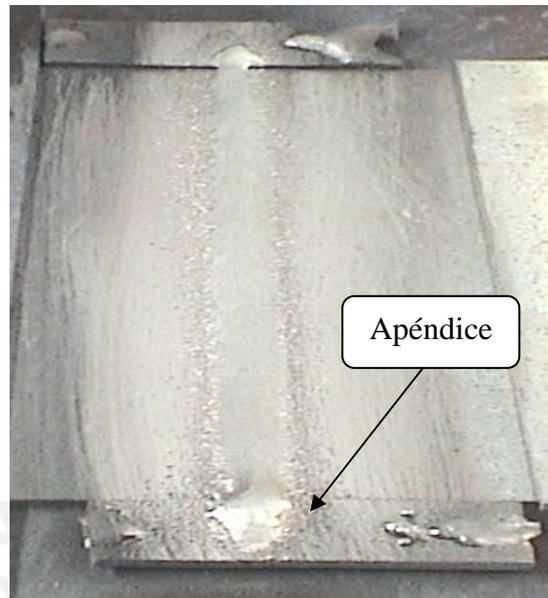


Figura 25. Selección de un cupón bien soldado (ER5356)

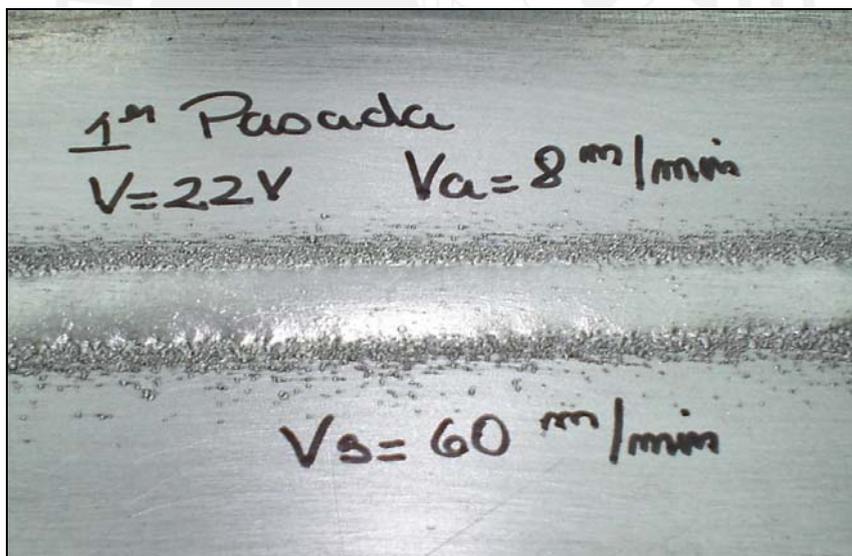


Figura 26. Cordón de soldadura (ER5356).

Luego de elegir los cupones se enviaron al Taller Mecánico de la sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP, para la fabricación de las probetas de ensayo (Figura 27).



Figura 27. Probetas de Ensayo de Tracción

2.5.2. Caracterización Mecánica

Para la caracterización de las uniones soldadas se realizaron a través de tres ensayos mecánicos de acuerdo a las normas ASTM, se llevo a cabo los ensayos mecánicos que son los de tracción, microdureza vickers y doblado para fines del desarrollo del presente trabajo.

2.5.2.1. Ensayo de Tracción

Se fabricaron probetas tomando como referencia la norma ASTM A370-05 (Figura 28) con la finalidad de obtener valores de resistencia y ductibilidad.

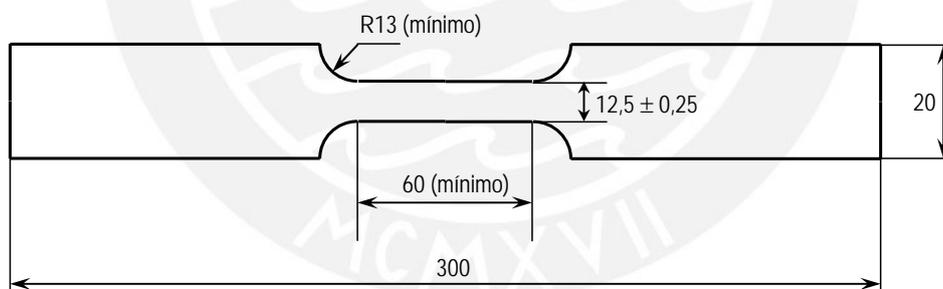


Figura 28. Dimensiones de la probeta de ensayo de tracción.

Este ensayo permitirá conocer propiedades mecánicas a la tracción de la unión soldada. La confiabilidad de los resultados a obtenerse se sustenta en el procedimiento seguido según norma ASTM A370-05 y empleando una maquina calibrada.

La maquina de ensayo empleada para realizar los ensayos de tracción se muestra en la figura 29, el cual pertenece al Laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica. El principio de este ensayo se basa en la aplicación de carga de tensión en los extremos de la probeta, cuyo incremento es constante.

El valor de Máxima Carga dividido entre el área inicial, indicará la máxima resistencia de la probeta, siendo unos de los principales valores para el análisis de las características de las uniones soldadas. Otros valores que muestra el equipo es el Esfuerzo a la Fluencia y Esfuerzo Final o de Rotura.



Figura 29. Maquina de Tracción

Así mismo, el alargamiento que se produce durante el ensayo de tracción, es un indicador de una propiedad que es la ductilidad del material, el cual mide su capacidad para soportar la deformación plástica.

2.5.2.2. Ensayo de Microdureza Vickers

El comportamiento que tienen los materiales (aleaciones de aluminio) frente a la resistencia que estos ofrecen al dejarse penetrar por un material más duro; se estudia con el ensayo de dureza. Los ensayos de microdureza determinan valores de dureza en áreas muy pequeñas, donde se utiliza un indentador de diamante en forma piramidal, que es un material de mucha mayor dureza que la muestra (aleación de aluminio).

El principal requerimiento para realizar esta prueba es el buen acabado superficial, pero también es necesario garantizar un paralelismo entre caras para que la lectura de la dureza no muestre errores de desnivel de la base. Los procedimientos de estudio de microdureza están designados en la norma ASTM E384-97, los cuales fueron considerados para este ensayo.

Se fabricaron 7 briquetas (Figura 30) con las uniones soldadas realizadas, con la finalidad de obtener muestras compactas de forma cilíndrica y de caras paralelas, cumpliendo con los requerimientos para este ensayo.



Figura 30. Briqueta para el ensayo de Microdureza Vickers

El siguiente paso previo a la indentación de las muestras, fue el pulir la superficie a examinar. Con la utilización de lijas de diferentes grados de rugosidad (gruesa, media fina, fina), un disco de diamante y disco de pulido, se logra el acabado necesario para que las huellas del indentador sean observables en el equipo de Microdureza Vickers.

El principio de este ensayo es la aplicación de una carga, que en nuestro caso fue de 200 gramos, sobre de la cara pulida de la muestra. Esta carga permitirá que el indentador deje una huella en forma de rombo, con valor de diagonales d_1 y d_2 . El equipo de Microdureza Vickers (Figura 31), permite medir valores de estas diagonales en unidades de micrómetros. El valor de interés final será el promedio de las dos diagonales.

Para determinar la Microdureza Vickers, se procede partiendo del promedio obtenido de las diagonales de la huella, luego se ubica en la tabla 2 de la norma ASTM E 384.

El valor leído en esta tabla es para el valor de 1 gramo, que para nuestro caso se debe de multiplicar por 200 que corresponde al peso en gramos usado.



Figura 31. Equipo de microdureza empleado

2.5.2.3. Ensayo de Doblado

El objetivo de este ensayo mecánico del tipo destructivo es medir la ductibilidad de la unión soldada a través de la observación visual al final de la prueba; después de ser dobladas un cierto ángulo.

Se emplearon dos ángulos de dobles 120° y 180° , siendo el de 180° la mas exigente. La figura 32 muestra el acondicionamiento mecánico para el ensayo de doblez.

La presencia de discontinuidades que pueda presentar la unión soldada provocara la fisura o falla del mismo. Además, esta prueba permite saber sobre la existencia de grietas, falta de fusión, penetración inadecuada o porosidad severa. Así mismo, según sea el caso que presentara la falla (tipos de discontinuidades) es necesario evaluar el

procedimiento de soldadura usado y realizar los ajustes necesarios para mejorar la integridad de la unión.

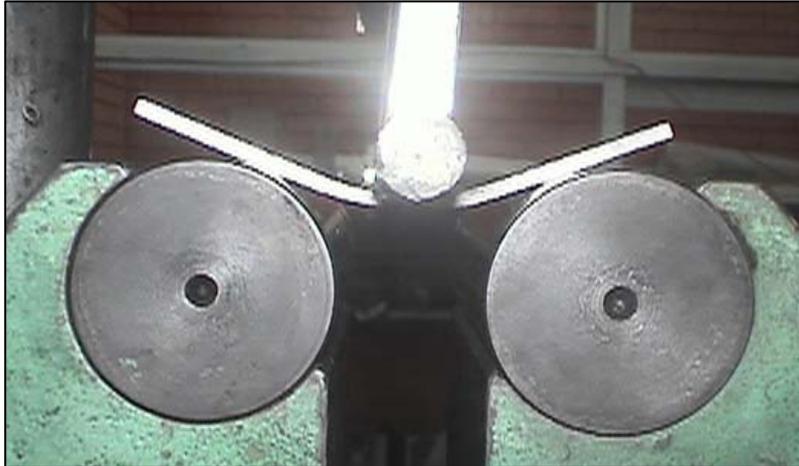


Figura 32. Equipo empleado para el doblado de las probetas soldadas.

2.6. Comportamiento de los metales de aportes frente al soldeo

Las uniones obtenidas con el aporte ER4043 presentan un mejor acabado superficial, debido a que el arco es más estable, comparado con el aporte ER5356 que presenta mayor cantidad de salpicaduras además de un cordón más rugoso.

El aporte ER5356 genera gran cantidad de humos debido al 5% Mg que contiene (Figura 33), ello hace necesario el empleo de elementos de protección para el soldador como uso de mascarillas y extractores de humos adecuados. Este problema no se presenta con el aporte Al-5Si.



Figura 33. Humos generado por el contenido de 5% Mg.

El aporte ER4043 presenta problemas de atascamiento durante el desarrollo del proceso de soldadura, específicamente este problema se presentaba en las guías. Con el empleo del aporte ER5356 los problemas de atascamiento son mínimos

El aporte ER4043 al contener 5% Si disminuye la temperatura de fusión del aluminio y aumenta la fluidez, con lo cual hay peligro que ocurra perforaciones. Por lo que se puede recomendar, cuando es permitido, usarlo en soldeo de mayores espesores, que el ER5356, pues presentará mayor penetración.



CAPITULO 3

RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADO

3.1. Comportamiento de los aportes durante el soldeo

a) Alimentación – Atascamiento

El atascamiento del material de aporte (Figura 34), generalmente al inicio del soldeo, fue uno de los inconvenientes que se presentaron en el proceso de soldadura con el material de aporte ER4043, esto debido a diferencias mecánicas que existen en ambos materiales de aporte. Pues el alambre del aporte ER5356 presenta mayor esfuerzo máximo que el ER4043 lo cual hace que el aporte Al-5Mg se suministre sin dificultad durante la realización del soldeo.



Figura 34. Atascamiento del ER4043 entre los rodillos impulsores.

b) Perforación

Un ejemplo de las consecuencias de un mal control de la velocidad de aporte, se muestra en la Figura 35. Se aprecia una perforación la que se produce debido a una

velocidad de aporte excesiva y a la acumulación de calor, esto ocurrió con el ER4043. Es una clara muestra de la influencia y la dependencia que existen entre factores y parámetros, sobre la calidad final del cordón de soldadura durante el proceso de soldadura.

Se debe de tener en cuenta que el contenido en Si en este aporte hace que disminuya la temperatura de fusión del aluminio con lo cual aumenta aun mas el peligro de ocasionar perforaciones durante el proceso de soldadura. Por lo tanto, se debe tener cuidado en el soldeo de planchas delgadas, siendo recomendable emplear cuando se requiere mayor penetración (5% Si) como el caso de planchas gruesas.



Figura 35. Perforación en el cordón de soldadura.

c) Acabado Superficial

El acabado final es unas de las características principales de cada unos de los aportes utilizados, por ello podemos apreciar en la Figura 36 la apariencia al final de la unión soldada con el aporte ER4043, la cual muestra un cordón totalmente limpio con ausencia de salpicadura, básicamente debido al silicio. Por otro lado, el ER5356 demuestra un acabado final con salpicaduras y aspecto muy rugoso (Figura 37).



Figura 36. Apariencia totalmente limpia con el aporte ER4043.



Figura 37. Apariencia con salpicaduras con el aporte ER5356.

3.2. Ensayo de Tracción

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados a las probetas de aleaciones de aluminio, determinando de esta forma sus características mecánicas de resistencia a la tracción y alargamiento de rotura (ductilidad).

3.2.1. Materiales Base

a) Material Base 1

En la tabla 29 y 30 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados al Material Base 1 y al Material Base 2 en estado de suministro, respectivamente.

Tabla 29. Resultados Ensayo de Tracción Material Base 1

| Material Base | Sección Transversal | | Carga Máxima (KN) | Longitud entre marcas (mm) | Longitud final entre marcas (mm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Alargamiento (%) |
|----------------|---------------------|------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------|
| | Dimensiones | Área (m ²) | | | | | |
| 1 | 12,46x3,10 | 38,63 | 6,90 | 50 | 53,59 | 178,62 | 7,2 |
| 1 | 12,55x3,10 | 38,91 | 6,92 | 50 | 54,09 | 177,85 | 8,2 |
| 1 | 12,50x3,10 | 38,75 | 6,91 | 50 | 53,54 | 178,32 | 7,1 |
| Valor Promedio | | | | | | 178,26 | 7,5 |

b) Material Base 2

Tabla 30. Resultados ensayo de tracción Material Base 2

| Material Base | Sección Transversal | | Carga Máxima (KN) | Longitud entre marcas (mm) | Longitud final entre marcas (mm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Alargamiento (%) |
|----------------|---------------------|------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------|
| | Dimensiones | Área (m ²) | | | | | |
| 2 | 12,46x3,10 | 38,63 | 6,90 | 50 | 52,78 | 178,62 | 5,6 |
| 2 | 12,55x3,10 | 38,91 | 6,50 | 50 | 53,46 | 167,05 | 6,9 |
| 2 | 12,50x3,10 | 38,75 | 6,68 | 50 | 52,85 | 172,39 | 5,7 |
| Valor Promedio | | | | | | 172,69 | 6,1 |

Se aprecia que el MB1 presenta ligeramente una mayor resistencia a la tracción y mayor ductibilidad que el MB2, debido a que presenta mayor contenido de Mn (1.15% MB1 y 1.0% MB2)

3.2.2. Uniones soldadas

a) Material Base 1, aporte ER5356 y ER4043 con 1 pasada

Las uniones soldadas fueron ensayadas a tracción sin retirar la sobremonta, como se aprecia en la figura 38, pues normalmente cuando trabajan lo hacen con sobremonta y rara vez se retira. En seguida se presenta los resultados de la prueba de tracción en las Tablas 31 y 32 correspondiente al MB1 unido con los aportes ER5356 y ER4043, respectivamente.

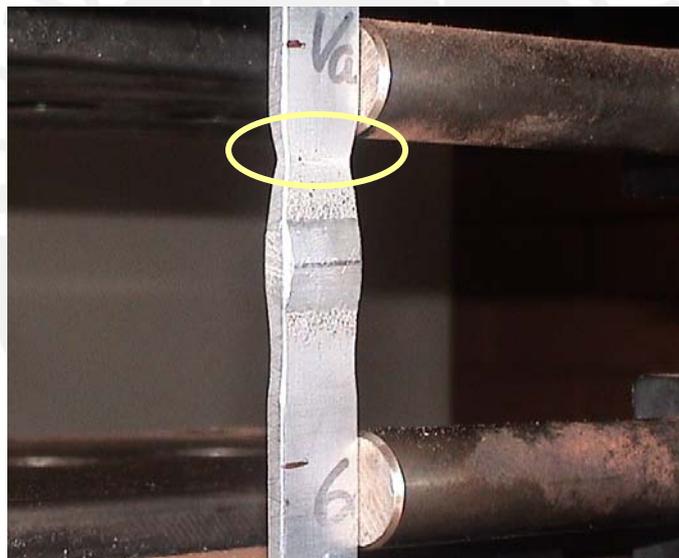


Figura 38. Zona de Ruptura y condiciones del ensayo de tracción.

Tabla 31. Resultados ensayo de tracción Material Base 1, aporte ER5356, 1 pasada

| Material Base | Aporte | Pasos | Sección Transversal | | Carga máxima (KN) | Longitud entre marcas (mm) | Longitud final entre marcas (mm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Alargamiento % |
|-----------------------|--------|-------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------|
| | | | Dimensiones | Área (mm ²) | | | | | |
| 1 | ER5356 | 1 | 12,45x3,10 | 38,60 | 4,74 | 50 | 55,23 | 122,80 | 10,5 |
| 1 | ER5356 | 1 | 12,46x3,10 | 38,63 | 4,74 | 50 | 55,32 | 122,70 | 10,6 |
| 1 | ER5356 | 1 | 12,48x3,10 | 38,70 | 4,74 | 50 | 56,43 | 122,48 | 12,9 |
| Valor Promedio | | | | | | | | 122,66 | 11,3 |

Tabla 32. Resultados ensayo de tracción Material Base 1 aporte ER4043, 1 pasada

| Material Base | Aporte | Pases | Sección Transversal | | Carga máxima (KN) | Longitud entre marcas (mm) | Longitud final entre marcas (mm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Alargamiento % |
|----------------|--------|-------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------|
| | | | Dimensiones | Área (mm ²) | | | | | |
| 1 | ER4043 | 1 | 14.20x3,10 | 44,02 | 5,45 | 50 | 56,22 | 123,81 | 12,4 |
| 1 | ER4043 | 1 | 14.05x3,10 | 43,60 | 5,43 | 50 | 55,25 | 124,54 | 10,5 |
| 1 | ER4043 | 1 | 14.20x3,10 | 44,02 | 5,42 | 50 | 54,88 | 123,13 | 9,8 |
| Valor Promedio | | | | | | | | 123,82 | 10,9 |

Los resultados obtenidos indican que el MB1 soldado con ambos aportes presenta similares valores de resistencia a la tracción, bajo las mismas condiciones. De manera similar es el comportamiento en ductilidad. Es importante mencionar que la rotura en todos los casos se dió en el material base, y que la ductilidad de la unión aumenta en 48% con respecto al material base en estado de suministro.

b) Material Base 1, aporte ER5356 y ER4043 con 2 pasadas.

Las Tablas 33 y 34 corresponden a las uniones realizadas con los materiales de aporte ER5356 y ER4043, respectivamente. A diferencia de la anterior prueba (a), esta presenta doble pase de soldadura, cuyo comportamiento mecánico frente a los efectos térmicos y la adición de material de aporte por ambos lados tiene influencia sobre la unión.

De nuevo los valores de resistencia y ductibilidad obtenido en las uniones soldadas con ambos aportes son similares.

Tabla 33. Resultados ensayo de tracción material base 1 aporte ER5356, 2 pasadas

| Material Base | Aporte | Pases | Sección Transversal | | Carga máxima (KN) | Longitud entre marcas (mm) | Longitud final entre marcas (mm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Alargamiento % |
|----------------|--------|-------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------|
| | | | Dimensiones | Área (mm ²) | | | | | |
| 1 | ER5356 | 2 | 12,45x3,10 | 38,60 | 4,87 | 50 | 54,82 | 126,17 | 9,6 |
| 1 | ER5356 | 2 | 12,42x3,10 | 38,50 | 4,84 | 50 | 54,98 | 125,71 | 10,0 |
| 1 | ER5356 | 2 | 12,39x3,10 | 38,41 | 4,91 | 50 | 54,31 | 127,83 | 8,6 |
| Valor Promedio | | | | | | | | 126,57 | 9,4 |

La rotura en todos los casos ocurrió a través de la ZAC del material base.

Tabla 34. Resultados ensayo de tracción material base 1, aporte ER4043, 2 pasadas

| Material Base | Aporte | Pases | Sección Transversal | | Carga máxima (KN) | Longitud entre marcas (mm) | Longitud final entre marcas (mm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Alargamiento % |
|----------------|--------|-------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------|
| | | | Dimensiones | Área (mm ²) | | | | | |
| 1 | ER4043 | 2 | 12,40x3,10 | 38,44 | 4,85 | 50 | 54,80 | 126,17 | 9,6 |
| 1 | ER4043 | 2 | 12,38x3,10 | 38,40 | 4,82 | 50 | 55,10 | 125,52 | 10,2 |
| 1 | ER4043 | 2 | 12,39x3,10 | 38,41 | 4,89 | 50 | 54,61 | 127,31 | 9,2 |
| Valor Promedio | | | | | | | | 126,33 | 9,7 |

c) Material Base 2, aporte ER5356 y ER4043, 1 pasada

Los resultados de los ensayos de tracción realizados en el Material Base 2 unido con los aportes ER5356 (5% Mg) y ER4043 (5% Si) son apreciados en las Tablas 35 y 36 respectivamente.

Tabla 35. Resultados ensayo de tracción material base 2 aporte ER5356, 1 pasada

| Material Base | Aporte | Pases | Sección Transversal | | Carga máxima (KN) | Longitud entre marcas (mm) | Longitud final entre marcas (mm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Alargamiento % |
|-----------------------|--------|-------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------|
| | | | Dimensiones | Área (mm ²) | | | | | |
| 2 | ER5356 | 1 | 12.70x3,10 | 39,37 | 4,26 | 50 | 56,25 | 108,20 | 12,5 |
| 2 | ER5356 | 1 | 12.45x3,10 | 38,60 | 4,16 | 50 | 55,62 | 107,77 | 11,2 |
| 2 | ER5356 | 1 | 12.65x3,10 | 39,22 | 4,34 | 50 | 56,46 | 110,66 | 12,9 |
| Valor Promedio | | | | | | | | 108,88 | 12,2 |

Tabla 36. Resultados ensayo de tracción material base 2 aporte ER4043, 1 pasada

| Material Base | Aporte | Pases | Sección Transversal | | Carga máxima (KN) | Longitud entre marcas (mm) | Longitud final entre marcas (mm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Alargamiento % |
|-----------------------|--------|-------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------|
| | | | Dimensiones | Área (mm ²) | | | | | |
| 2 | ER4043 | 1 | 12.90x3,10 | 39,99 | 4,49 | 50 | 54,69 | 112,28 | 9,4 |
| 2 | ER4043 | 1 | 12.60x3,10 | 39,06 | 4,47 | 50 | 54,39 | 114,44 | 8,8 |
| 2 | ER4043 | 1 | 13.00x3,10 | 40,30 | 4,40 | 50 | 54,05 | 109,18 | 8,1 |
| Valor Promedio | | | | | | | | 111,97 | 8,8 |

Los valores de resistencia a la tracción encontrados en la unión con el aporte ER5356 (109MPa) y el ER4043 (112MPa), ligeramente diferentes. Respecto a la ductilidad la probeta soldada con el ER5356 (12%) presenta mejor comportamiento que el ER4043 (9%).

d) Material Base 2, aporte ER5356 y ER4043 con 2 pasadas.

Los resultados que presenta las Tablas 37 y 38 corresponde a los valores obtenido en uniones con los aporte ER5356 y ER4043 respectivamente con dos pases de soldadura. Dicho resultados indica un comportamiento diferente que el que se muestra en el acápite b, donde se trabaja el MB1 bajo las mismas condiciones.

Tabla 37. Resultados ensayo de tracción material base 2 aporte ER5356, 2 pasadas

| Material Base | Aporte | Pases | Sección Transversal | | Carga máxima (KN) | Longitud entre marcas (mm) | Longitud final entre marcas (mm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Alargamiento % |
|-----------------------|--------|-------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------|
| | | | Dimensiones | Área (mm ²) | | | | | |
| 2 | ER5356 | 2 | 12,50x3,10 | 38,75 | 4,49 | 50 | 54,33 | 115,87 | 8,7 |
| 2 | ER5356 | 2 | 12,18x3,10 | 37,75 | 4,47 | 50 | 54,46 | 118,41 | 8,9 |
| 2 | ER5356 | 2 | 12,10x3,10 | 37,51 | 4,40 | 50 | 54,95 | 117,30 | 9,9 |
| Valor Promedio | | | | | | | | 117,19 | 9,2 |

Tabla 38. Resultados ensayo de tracción material base 2 aporte ER4043, 2 pasadas

| Material Base | Aporte | Pasos | Sección Transversal | | Carga máxima (KN) | Longitud entre marcas (mm) | Longitud final entre marcas (mm) | Resistencia a la tracción (MPa) | Alargamiento % |
|----------------|--------|-------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------|
| | | | Dimensiones | Área (mm ²) | | | | | |
| 2 | ER4043 | 2 | 14.20x3,10 | 44,02 | 5,25 | 50 | 53,00 | 119,26 | 6,0 |
| 2 | ER4043 | 2 | 14.40x3,10 | 44,64 | 4,57 | 50 | 52,94 | 102,37 | 5,9 |
| 2 | ER4043 | 2 | 14.40x3,10 | 44,64 | 5,21 | 50 | 53,80 | 116,71 | 7,6 |
| Valor Promedio | | | | | | | | 112,78 | 6,5 |

El doble pase de soldadura brinda diferente comportamiento mecánico de resistencia la tracción y alargamiento sobre el MB2, pues la resistencia mecánica aumenta para ambos casos, pero su alargamiento disminuye con respecto a los valores obtenidos con el MB2 con un pase de soldadura, siendo el ER5356 el que presenta mayores valores de ductibilidad, lo cual se comprobó en el ensayo de doblado.

Es importante mencionar que el lugar de la falla del material (zona de rotura) no se dió en el cordón de soldadura sino en la ZAC (Figura 32), esto muestra que la unión realizada fue óptima, con mejores propiedades mecánicas que las zonas adyacentes al cordón. Es así, que esta condición de falla se mantuvo tanto para el material base 1 y 2.

3.2.3 Análisis de resultados

Para tener una mejor visión de los resultados obtenidos en el ensayo realizado y lograr un buen análisis crítico, se hará uso de gráfico estadísticos, los cuales muestran la desviación estándar (barra de error de color negro) de los valores de resistencia mecánica y alargamiento de cada muestra, los que se comparan con el respectivo material base de partida. Esta medida de dispersión ayudará a tener un panorama más realista al momento de realizar una crítica e interpretación, así tomar y/o asumir la decisión mas adecuada. Es importante mencionar que el hecho de que dichos intervalos (barras de error) no se solapen, no implica necesariamente que la diferencia entre ambos grupos pueda ser estadísticamente significativa, pero sí nos puede servir para valorar la magnitud de la misma.

Los diagramas de barras de las Figuras 39 y 40; representa los grupos de ensayos de tracción realizada a los materiales base 1 y 2 respectivamente, desarrollados en términos de su valor medio de resistencia mecánica alcanzado en la prueba. Del

mismo modo, se logró obtener los valores de alargamiento de las probetas, cuyos valores medios se encuentran representados en las Figuras 41 y 42.

Estos diagramas son especialmente útiles ya que no sólo permiten ver si existe o no diferencia entre los grupos; sino que además nos permiten comprobar la normalidad y la variabilidad de cada una de las distribuciones. La nomenclatura usada en los gráficos son: Nominación del material de aporte usado según norma AWS, MB1 = Material Base 1, MB2 = Material Base 2, los números seguidos representa la cantidad de pases de soldadura. Por ejemplo: ER5356-MB1-1, representa a las uniones de soldadura con aporte ER5356, Material Base 1, con una pasada de soldadura.

Se puede apreciar en las Figuras 39 y 40, que la resistencia del material base suministrado disminuye por el efecto de la soldadura (mas bando), por otro lado se puede decir que la resistencia mecánica de las uniones soldadas obtenidas con ambos aportes son similares tanto para el material base 1 y el material base 2.

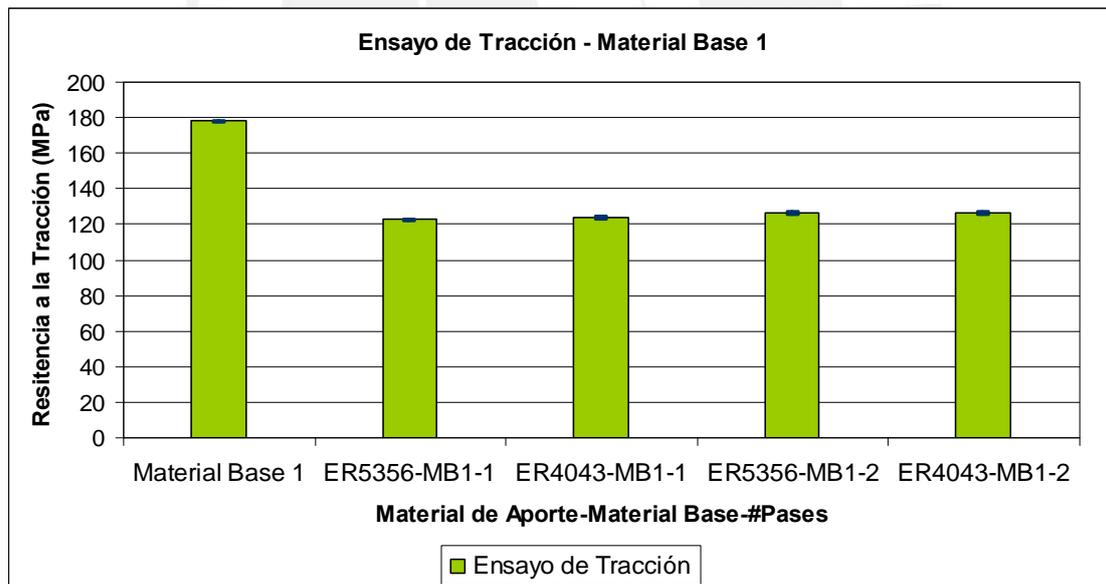


Figura 39. Diagrama de Barras del ensayo de tracción.

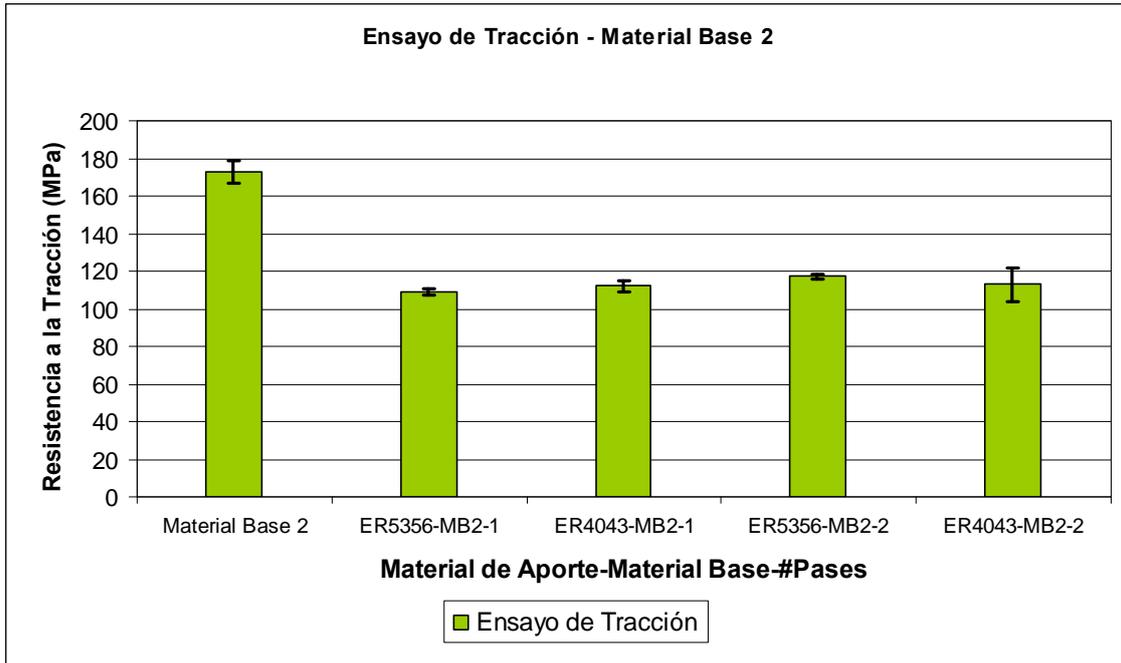


Figura 40. Diagrama de Barras del ensayo de tracción.

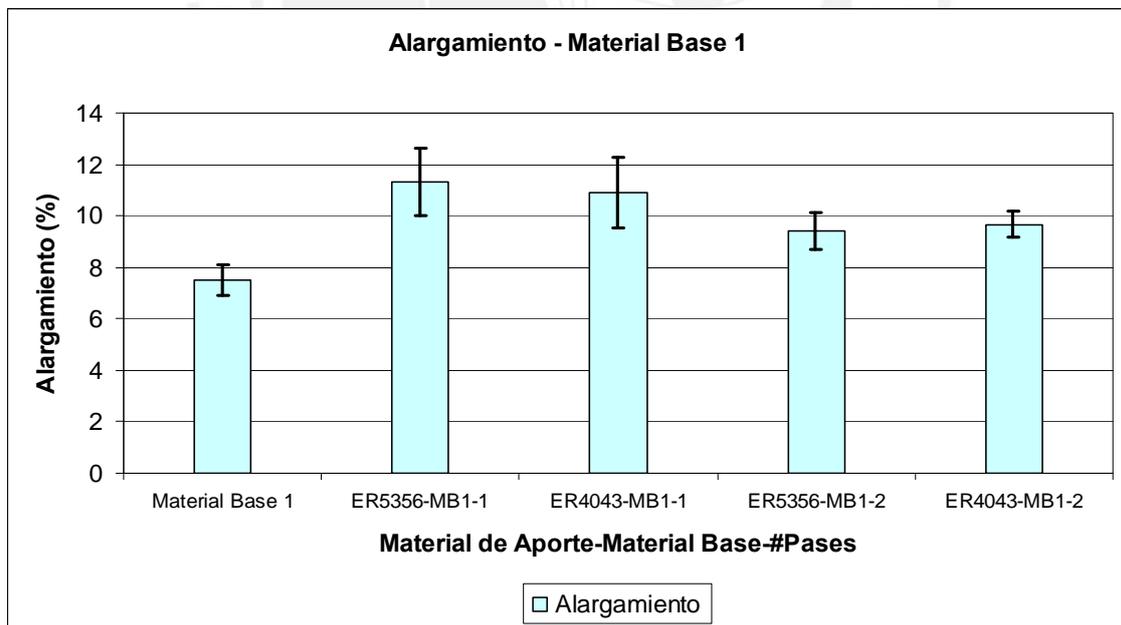


Figura 41. Diagrama de Barras del ensayo de tracción.

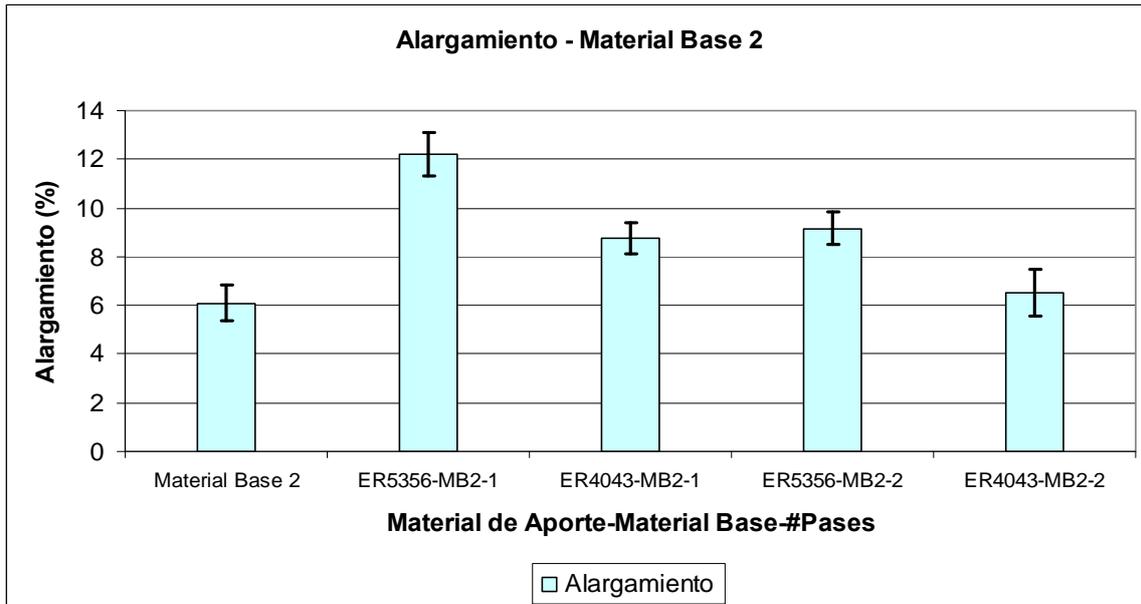


Figura 42. Diagrama de Barras del ensayo de tracción.

En general, en todas las uniones soldadas se presenta una pérdida de la resistencia mecánica, como consecuencia del proceso de soldeo, es así que el material base 1, en su estado de suministro pierde un 30% de su valor nominal de resistencia mecánica. Sin embargo, se observa un incremento en la ductibilidad en un 40%.

Por otro lado, el uniones soldadas con el material base 2 presentó una pérdida de resistencia mecánica en un 35%. Respecto a la ductibilidad se observa un aumento un aumento en 45%.

3.2.3.1. Materiales Base y Aportes

a) Material Base 1 y aportes ER4043, ER5356

Los resultados de los ensayos realizados el MB1 (Tabla 29) se encuentra dentro de los valores nominales de la aleación de aluminio correspondiente a la serie AA3XXX, pues la resistencia a la tracción alcanzada por el MB1 es de 178MPa.

En el caso de los valores referenciales de resistencia mecánica de los materiales de aporte y el alcanzado por el MB1, este último presenta una resistencia mecánica menor que el material de aporte ER5356 (5% Mg), siendo estos 178MPa y 235MPa

(datos del fabricante del producto) respectivamente. Por otro lado, la situación es contraria con el aporte ER4043 cuyo valor de resistencia a la tracción es de 133MPa.

b) Material Base 2 y aportes ER4043, ER5356

El promedio de valores obtenidos en esta prueba del MB2 es de 173MPa, este valor, en el caso de los valores referenciales de resistencia mecánica de los materiales de aporte y el alcanzado por el material base 2, se puede decir que este último presenta una resistencia mecánica menor que el material de aporte ER5356 (235MPa), lo apuesto sucede con el aporte ER4043 cuyo valor de resistencia a la tracción es de 133MPa.

3.2.3.2. Uniones Soldadas

a) Material Base 1, aporte ER5356 y ER4043, con 1 pasada.

El aporte ER4043 presenta valores de resistencia a la tracción ligeramente superior a la unión soldada con el ER5356, cuyos valores promedios de resistencia a la tracción son 124MPa y 123MPa respectivamente. Sin embargo, el valor del alargamiento no demuestra cambios de consideración ya que para el caso del aporte ER5356 es de 11.3%, y para el otro aporte es de 10.9%.

b) Material Base 1, aporte ER5356 y ER4043, con 2 pasadas.

La resistencia a la tracción, del aporte ER5356 y ER4043 es de 127MPa y 126MPa respectivamente, ligera diferencia. También, el efecto térmico permite mejorar la resistencia mecánica; sin embargo, afecta la ductibilidad disminuyéndola para ambos aportes.

c) Material Base 2, aporte ER5356 y ER4043, con 1 pasada.

Los valores de resistencia mecánica obtenidos en esta prueba fueron de 109MPa y 112MPa en las uniones con ER5356 y ER4043 respectivamente. Esta diferencia en

comportamientos mecánicos entre muestras, es por la influencia química del material base utilizada.

Es importante mencionar que estos valores de resistencia a la tracción (Tabla 35 y 36) son menores que los obtenidos en el MB2 sin soldadura, por lo que la zona de ruptura de esta unión se presentara en la ZAC (Zona Blanda), tanto con el ER4043 y ER5356. El alargamiento del material soldado con el ER5356 (12%) es superior que del aporte ER4043 (9%), la cual es un características esperada por el aumento de silicio en este último caso.

d) Material Base 2, aporte ER5356 y ER4043, con 2 pasadas.

La realización de dos pasadas en el soldeo presento los valores de 117MPa y 113MPa en uniones con los aporte ER5356 y ER4043, respectivamente.

El alargamiento de rotura o elongación del MB2 en uniones con 2 pases de soldadura es de 6.5% y 9.2 % en las probetas con aporte ER4043 y ER5356, respectivamente. El cambio de condiciones de soldaduras (números de pases) altera significativamente la ductibilidad del material disminuyendo en un 26% aproximadamente con respecto a los valores con una pasada de soldadura.

3.3. Ensayo de Microdureza Vickers

3.3.1. Resultados

Se presenta tablas de resultados de las medidas de microdureza vickers, las cuales muestra sus valores de las diagonales en micrómetros y sus respectivos valores de microdureza Vickers (HV). A partir del número de pases de soldadura, se condicionaron el lugar de la indentación, las cuales se realizaron a 1mm del borde de la superficie (Figura 43 y 44). La dureza obtenida en valor promedio para ambos materiales base son de 32HV.

Dentro de estos tablas se sombrearon valores en posición cero (0) que representa la medida en el punto medio del cordón de soldadura. También, se resaltó las posiciones

que indican valores de dureza dentro y fuera de la interfase cordón-ZAC (línea de fusión)

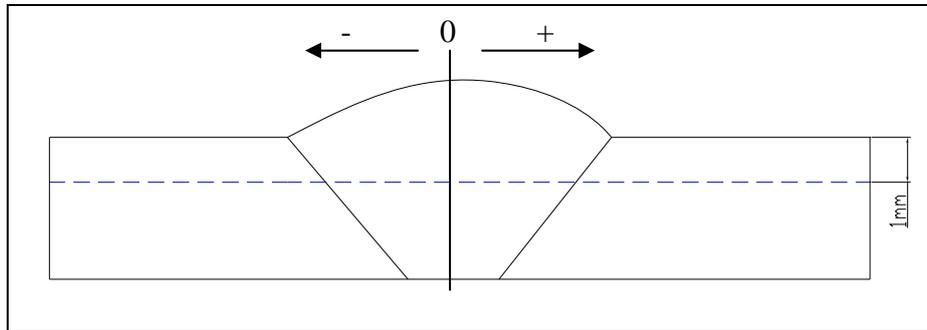


Figura 43. Zona de toma de microdureza, 1 pasada.

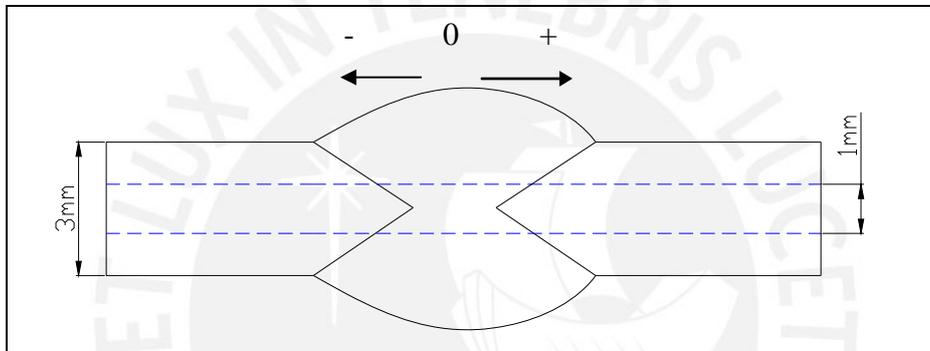


Figura 44. Zonas de toma de microdureza, 2 pasadas.

3.3.1.1. Uniones soldadas

a) Material Base 1, aporte ER5356 y ER4043, con 1 pasada.

En las Tabla 39 y 40 se observa los resultados obtenidos del ensayo de dureza realizado al MB1 con los aportes ER4043 y ER5356, respectivamente y en la figura 45, se presenta una gráfica de curvas comparativa en función de los valores obtenidos en la prueba con ambos materiales de aporte.

Tabla 39. Resultados Material Base 1, aporte ER4043, 1 pasada

| Posición | Diagonal 1 (μm) | Diagonal 2 (μm) | Promedio (μm) | HV |
|----------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------|
| -11 | 114,4 | 103,3 | 108,9 | 33,4 |
| -10 | 106,6 | 104,4 | 105,5 | 33,4 |
| -9 | 105,3 | 103,5 | 104,4 | 34,0 |
| -8 | 105,4 | 103,8 | 104,6 | 33,9 |
| -7 | 109,5 | 108,0 | 108,8 | 31,3 |
| -6 | 104,2 | 100,8 | 102,5 | 35,3 |
| -5 | 103,4 | 101,5 | 102,5 | 35,3 |
| -4 | 90,0 | 89,6 | 89,8 | 46,0 |
| -3 | 94,3 | 92,8 | 93,6 | 42,3 |
| -2 | 96,0 | 92,0 | 94,0 | 42,0 |
| -1 | 95,0 | 93,0 | 94,0 | 42,0 |
| 0 | 94,5 | 91,3 | 92,9 | 43,0 |
| 1 | 91,2 | 95,5 | 93,4 | 42,5 |
| 2 | 90,5 | 88,0 | 178,5 | 46,5 |
| 3 | 88,8 | 88,6 | 177,4 | 47,1 |
| 4 | 92,1 | 91,0 | 183,1 | 44,2 |
| 5 | 105,2 | 105,2 | 210,4 | 33,5 |
| 6 | 107,0 | 104,5 | 211,5 | 33,1 |
| 7 | 108,7 | 107,7 | 216,4 | 31,7 |
| 8 | 107,0 | 104,0 | 211,0 | 33,3 |
| 9 | 108,0 | 107,7 | 215,7 | 31,9 |
| 10 | 105,5 | 105,0 | 210,5 | 33,4 |

Tabla 40. Resultados Material Base 1, aporte ER5356, 1 pasada

| Posición | Diagonal 1 (μm) | Diagonal 2 (μm) | Promedio (μm) | HV |
|----------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------|
| -7 | 107,5 | 111,0 | 109,3 | 31,0 |
| -6 | 106,8 | 113,4 | 110,1 | 30,6 |
| -5 | 106,0 | 113,5 | 109,8 | 30,8 |
| -4 | 94,7 | 100,0 | 97,4 | 39,1 |
| -3 | 92,6 | 90,8 | 91,7 | 44,1 |
| -2 | 94,8 | 94,4 | 94,6 | 41,4 |
| -1 | 90,8 | 93,0 | 91,9 | 43,9 |
| 0 | 91,5 | 91,5 | 91,5 | 45,0 |
| 1 | 92,4 | 91,5 | 92,0 | 43,8 |
| 2 | 97,4 | 93,5 | 95,4 | 40,5 |
| 3 | 91,4 | 92,0 | 91,7 | 44,1 |
| 4 | 90,5 | 96,5 | 93,5 | 42,4 |
| 5 | 110,5 | 113,0 | 111,8 | 29,7 |
| 6 | 111,8 | 117,4 | 114,6 | 28,2 |
| 7 | 112,5 | 114,4 | 113,5 | 28,8 |
| 8 | 125,0 | 121,5 | 113,4 | 28,6 |

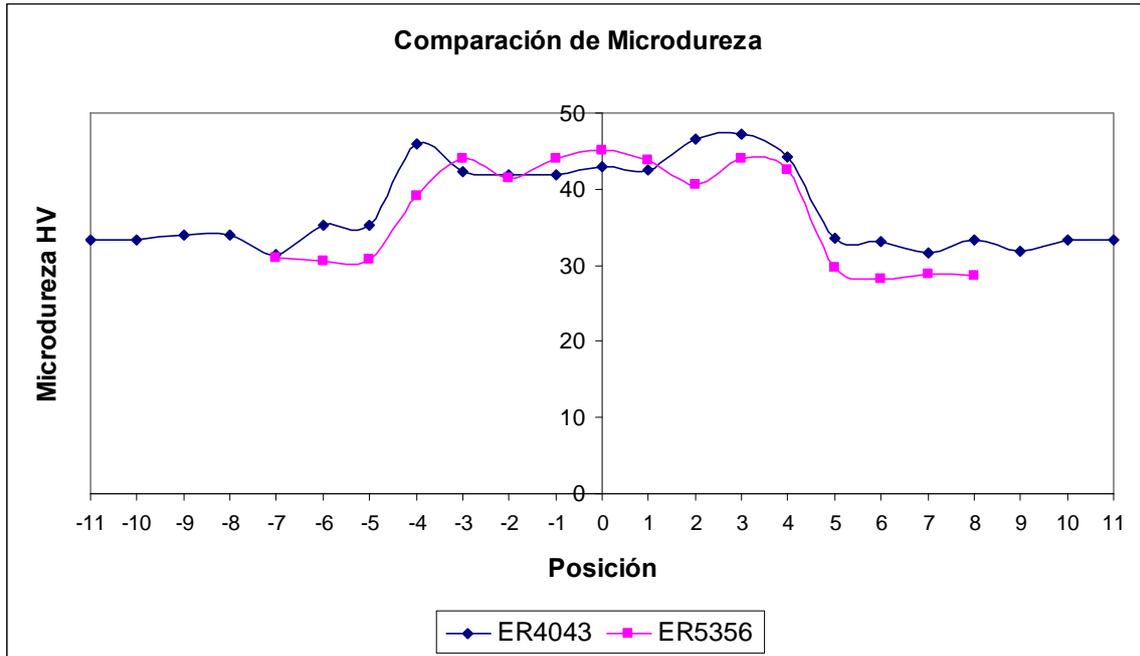


Figura 45. Curva de dureza MB1, aportes ER4043 y ER5356, 1 pasada

La diferencia en valores de dureza alcanzados no es significativa dentro de la zona fundida, pues el aporte ER5356 y ER4043 registra un promedio de 43HV y 44HV, respectivamente.

b) Material Base 1, aporte ER5356 y ER4043, con 2 pasadas.

El grado de dureza de uniones soldadas con dos pases de soldadura para el caso del MB1 con aportes ER5356 y ER4043 se puede apreciar en las Tablas 41 y 42 respectivamente. Así mismo, se grafican (Figura 46) las curvas de tendencia de los resultados de la prueba con la finalidad de lograr un buen análisis crítico de estos.

Tabla 41. Resultados MB1, aporte ER5356, 2 pasadas

| Posición | Diagonal 1 (μm) | Diagonal 2 (μm) | Promedio (μm) | VH |
|----------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------|
| -10 | 106,5 | 110,8 | 108,7 | 31,4 |
| -9 | 107,5 | 111,5 | 109,5 | 31,0 |
| -8 | 148,5 | 131,5 | 140,0 | 18,9 |
| -7 | 105,4 | 103,5 | 104,5 | 34,0 |
| -6 | 103,0 | 105,4 | 104,2 | 34,2 |
| -5 | 109,0 | 110,6 | 109,8 | 30,7 |
| -4 | 101,0 | 106,0 | 103,5 | 34,6 |
| -3 | 125,0 | 78,0 | 101,5 | 36,0 |
| -2 | 100,5 | 102,5 | 101,5 | 36,0 |
| -1 | 83,0 | 82,5 | 82,8 | 54,1 |
| 0 | 81,6 | 79,5 | 80,6 | 57,1 |
| 1 | 82,9 | 83,2 | 83,1 | 53,7 |
| 2 | 84,4 | 85,4 | 84,9 | 51,5 |
| 3 | 89,5 | 90,6 | 90,1 | 45,7 |
| 4 | 110,0 | 108,4 | 109,2 | 31,1 |
| 5 | 111,0 | 111,4 | 111,2 | 29,8 |
| 6 | 108,0 | 110,8 | 109,4 | 31,0 |
| 7 | 117,4 | 116,3 | 116,9 | 27,3 |
| 8 | 129,5 | 122,4 | 126,0 | 23,4 |
| 9 | 104,6 | 101,5 | 103,1 | 35,0 |
| 10 | 109,5 | 112,3 | 110,9 | 30,2 |
| 11 | 111,7 | 113,0 | 112,4 | 29,4 |
| 12 | 109,0 | 111,9 | 110,5 | 30,4 |

Tabla 42. Resultados MB1, aporte ER4043, 2 pasadas

| Posición | Diagonal 1 (μm) | Diagonal 2 (μm) | Promedio (μm) | HV |
|----------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------|
| -11 | 114,4 | 103,3 | 108,9 | 34,3 |
| -10 | 106,6 | 104,4 | 105,5 | 34,3 |
| -9 | 105,3 | 103,5 | 104,4 | 34,0 |
| -8 | 105,4 | 103,8 | 104,6 | 33,0 |
| -7 | 109,5 | 108,0 | 108,8 | 32,4 |
| -6 | 104,2 | 100,8 | 102,5 | 35,3 |
| -5 | 103,4 | 101,5 | 102,5 | 36,2 |
| -4 | 90,0 | 89,6 | 89,8 | 45,8 |
| -3 | 94,3 | 92,8 | 93,6 | 42,3 |
| -2 | 96,0 | 92,0 | 94,0 | 42,0 |
| -1 | 95,0 | 93,0 | 94,0 | 43,1 |
| 0 | 94,5 | 91,3 | 92,9 | 44,5 |

Tabla 43. Resultados MB1, aporte ER4043, 2 pasadas (Continuación)

| Posición | Diagonal 1 (µm) | Diagonal 2 (µm) | Promedio (µm) | HV |
|----------|-----------------|-----------------|---------------|------|
| 1 | 91,2 | 95,5 | 93,4 | 42,5 |
| 2 | 90,5 | 88,0 | 178,5 | 46,4 |
| 3 | 88,8 | 88,6 | 177,4 | 47,1 |
| 4 | 92,1 | 91,0 | 183,1 | 44,8 |
| 5 | 105,2 | 105,2 | 210,4 | 33,1 |
| 6 | 107,0 | 104,5 | 211,5 | 33,5 |
| 7 | 108,7 | 107,7 | 216,4 | 32,5 |
| 8 | 107,0 | 104,0 | 211,0 | 33,3 |
| 9 | 108,0 | 107,7 | 215,7 | 31,9 |
| 10 | 105,5 | 105,0 | 210,5 | 33,4 |
| 11 | 105,5 | 105,0 | 210,5 | 33,4 |

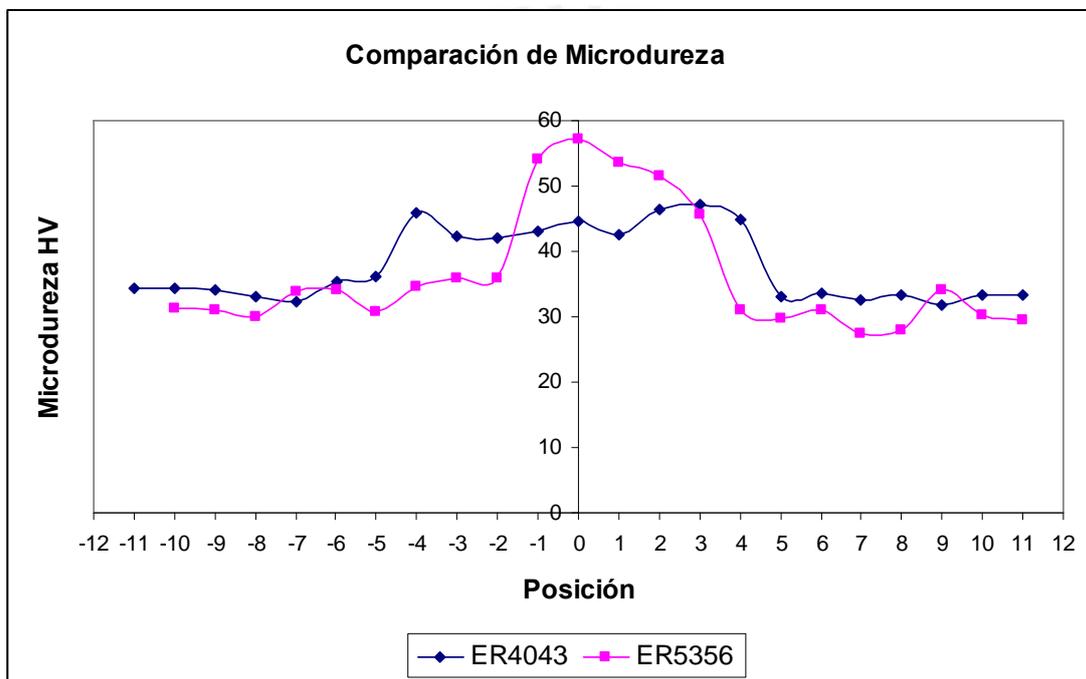


Figura 46. Resultados comparativos MB1, aportes ER4043 y ER5356, 2 pasadas

La adición de una mayor proporción de material de aporte en una doble pasada de soldadura endurece mas la zona de fusión en el caso del aporte con 5% Mg, sin embargo el aporte con 5% Si no presenta cambios de consideración con respecto a los valores alcanzados en 1 pase de soldadura.

c) Material Base 2, aporte ER5356 y ER4043 con 1 pasada.

A continuación se presenta los resultados del ensayo de microdureza realizado al MB2 con los aportes ER5356 ER4043 en la Tablas 43 y 44, respectivamente.

Tabla 44. Resultados Material Base 2, aporte ER5356, 1 pasada

| Posición | Diagonal 1 (μm) | Diagonal 2 (μm) | Promedio (μm) | HV |
|----------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------|
| -11 | 107,5 | 105,5 | 106,5 | 32,7 |
| -10 | 106,0 | 103,7 | 104,9 | 33,7 |
| -9 | 108,0 | 102,5 | 105,3 | 33,4 |
| -8 | 106,5 | 103,6 | 105,1 | 33,6 |
| -7 | 105,2 | 102,5 | 103,9 | 34,4 |
| -6 | 108,0 | 106,0 | 107,0 | 32,4 |
| -5 | 105,2 | 101,5 | 103,4 | 34,7 |
| -4 | 89,6 | 91,5 | 90,6 | 45,2 |
| -3 | 84,5 | 92,0 | 88,3 | 47,6 |
| -2 | 87,0 | 84,0 | 85,5 | 50,7 |
| -1 | 84,6 | 82,5 | 83,6 | 53,1 |
| 0 | 82,5 | 81,0 | 163,5 | 55,4 |
| 1 | 88,3 | 88,0 | 176,3 | 47,7 |
| 2 | 87,5 | 86,0 | 173,5 | 49,2 |
| 3 | 89,1 | 89,2 | 178,3 | 46,6 |
| 4 | 83,6 | 81,5 | 165,1 | 54,4 |
| 5 | 106,0 | 101,0 | 207,0 | 34,6 |
| 6 | 110,8 | 108,5 | 219,3 | 30,9 |
| 7 | 106,8 | 113,6 | 220,4 | 32,6 |
| 8 | 110,5 | 107,5 | 218,0 | 31,2 |
| 9 | 110,5 | 109,0 | 219,5 | 30,8 |
| 10 | 115,5 | 114,0 | 229,5 | 28,1 |

Tabla 45. Resultados Material Base 2, aporte ER4043, 1 pasada

| Posición | Diagonal 1 (μm) | Diagonal 2 (μm) | Promedio (μm) | HV |
|----------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------|
| -10 | 119,2 | 113,8 | 116,5 | 27,3 |
| -9 | 112,5 | 122,0 | 117,3 | 27,0 |
| -8 | 112,0 | 100,0 | 106,0 | 33,0 |
| -7 | 108,8 | 107,5 | 108,2 | 31,7 |
| -6 | 107,8 | 102,5 | 105,2 | 33,5 |
| -5 | 104,8 | 100,0 | 102,4 | 35,4 |
| -4 | 97,0 | 89,8 | 93,4 | 42,5 |
| -3 | 87,4 | 85,1 | 86,3 | 49,8 |
| -2 | 93,2 | 82,5 | 87,9 | 48,4 |
| -1 | 85,5 | 87,3 | 86,4 | 49,7 |
| 0 | 90,5 | 85,8 | 88,2 | 47,7 |
| 1 | 92,3 | 90,6 | 91,5 | 44,3 |
| 2 | 88,5 | 83,4 | 86,0 | 50,1 |
| 3 | 88,2 | 88,0 | 88,1 | 47,8 |
| 5 | 93,6 | 89,3 | 91,5 | 44,3 |
| 6 | 107,0 | 101,0 | 104,0 | 34,3 |
| 7 | 110,4 | 105,4 | 107,9 | 31,9 |
| 8 | 114,5 | 107,5 | 111,0 | 30,1 |
| 9 | 111,8 | 106,1 | 109,0 | 31,2 |
| 10 | 117,5 | 111,1 | 114,3 | 28,4 |
| 11 | 106,4 | 105,7 | 106,1 | 32,9 |
| 12 | 103,8 | 103,0 | 103,4 | 34,7 |

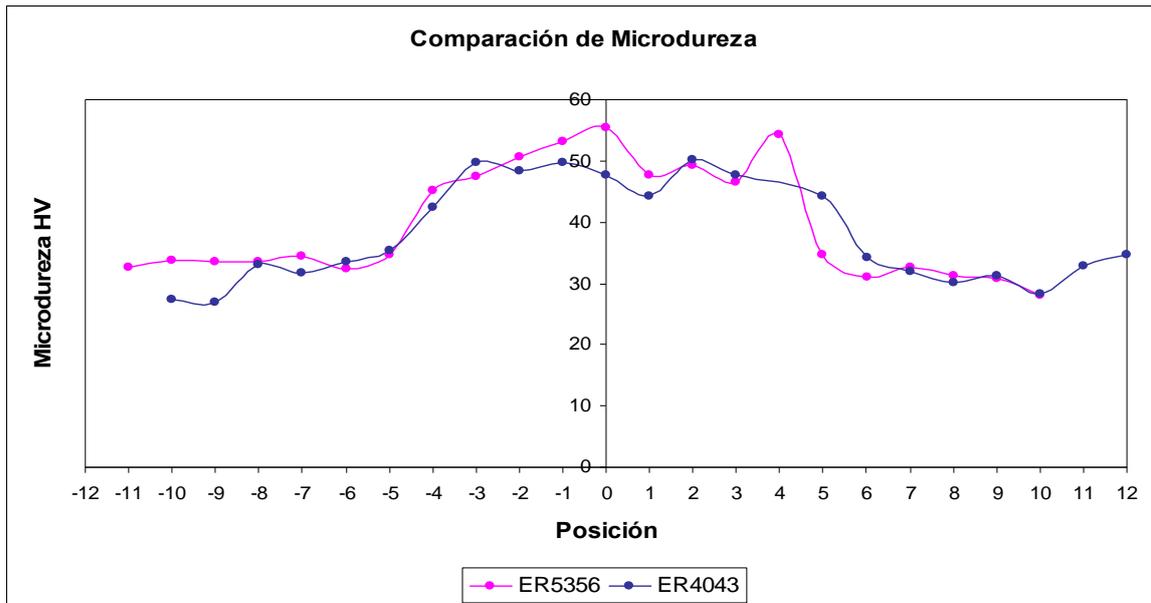


Figura 47. Resultados comparativos MB2, aportes ER4043 y ER5356, 1 pasada

Se aprecia en la Figura 46 el mejoramiento del nivel de dureza en la zona 1 para los dos aportes en estudio que esta entre 48HV y 50 HV, se debe a la cantidad de magnesio, 0.05% Mg, el cual es mayor que en el MB1.

d) Material Base 2, aporte ER5356 y ER4043 con 2 pasadas.

Los resultados del efecto de la doble pasada de soldadura sobre el valor final de dureza de la unión soldada con los aportes ER4043 y ER5356 se presenta en las Tablas 45 y 46. Por otro lado, se observa la comparación grafica de estos valores en Figura 47.

Tabla 46. Resultados muestra 2 con aporte ER4043, 2 pasadas

| Posición | Diagonal 1 (µm) | Diagonal 2 (µm) | Promedio (µm) | HV |
|----------|-----------------|-----------------|---------------|------|
| -8 | 97,5 | 91,0 | 188,5 | 41,7 |
| -7 | 95,5 | 92,8 | 188,3 | 41,8 |
| -6 | 97,4 | 96,1 | 193,5 | 39,6 |
| -5 | 108,5 | 104,5 | 213,0 | 32,7 |
| -4 | 110,0 | 107,8 | 217,8 | 31,3 |
| -3 | 109,5 | 104,5 | 214,0 | 32,4 |
| -2 | 105,5 | 104,5 | 210,0 | 33,6 |
| -1 | 94,0 | 98,0 | 192,0 | 40,2 |
| 0 | 92,0 | 92,2 | 184,2 | 43,7 |
| 1 | 97,8 | 100,0 | 98,9 | 37,9 |

Tabla 47. Resultados muestra 2 con aporte ER4043, 2 pasadas (Continuación)

| Posición | Diagonal 1 (μm) | Diagonal 2 (μm) | Promedio (μm) | HV |
|----------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------|
| 2 | 98,5 | 100,0 | 99,3 | 37,6 |
| 3 | 96,8 | 97,2 | 97,0 | 39,4 |
| 4 | 115,0 | 110,0 | 112,5 | 29,3 |
| 5 | 106,4 | 106,5 | 106,5 | 32,7 |
| 6 | 105,5 | 105,2 | 105,4 | 33,4 |
| 7 | 112,0 | 106,0 | 109,0 | 31,2 |
| 8 | 113,8 | 109,8 | 111,8 | 29,7 |
| 9 | 104,1 | 101,5 | 102,8 | 35,1 |
| 10 | 95,3 | 92,2 | 93,8 | 42,2 |
| 11 | 95,5 | 93,5 | 94,5 | 41,5 |

Tabla 48. Resultados Material Base 2, aporte ER5356, 2 pasadas

| Posición | Diagonal 1 (μm) | Diagonal 2 (μm) | Promedio (μm) | VH |
|----------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------|
| -11 | 111,8 | 106,5 | 109,2 | 31,1 |
| -10 | 111,6 | 109,0 | 110,3 | 30,5 |
| -9 | 108,5 | 107,2 | 107,9 | 31,9 |
| -8 | 112,0 | 106,8 | 109,4 | 31,0 |
| -7 | 112,0 | 107,8 | 109,9 | 30,7 |
| -6 | 108,0 | 116,0 | 112,0 | 33,4 |
| -5 | 110,0 | 105,0 | 107,5 | 33,4 |
| -4 | 92,0 | 92,5 | 92,3 | 43,5 |
| -3 | 91,0 | 90,5 | 90,8 | 45,0 |
| -2 | 91,0 | 90,5 | 90,8 | 45,0 |
| -1 | 98,3 | 84,5 | 91,4 | 44,4 |
| 0 | 98,6 | 85,0 | 91,8 | 50,3 |
| 1 | 89,4 | 88,5 | 89,0 | 48,3 |
| 2 | 91,5 | 85,4 | 88,5 | 47,4 |
| 3 | 92,8 | 89,8 | 91,3 | 44,5 |
| 4 | 90,0 | 90,0 | 90,0 | 45,8 |
| 5 | 110,2 | 105,0 | 107,6 | 32,0 |
| 6 | 111,7 | 106,5 | 109,1 | 31,1 |
| 7 | 110,6 | 110,0 | 110,3 | 30,5 |
| 8 | 119,8 | 110,4 | 115,1 | 28,0 |
| 9 | 111,0 | 108,8 | 109,9 | 30,7 |
| 10 | 114,0 | 106,5 | 110,3 | 30,5 |

Una característica principal del doble pase de soldadura es mantener homogénea el nivel de dureza en la zona de fusión tanto para la adición del material de aporte con 5% Mg y 5% Si, este comportamiento se puede observar en la Figura 47.

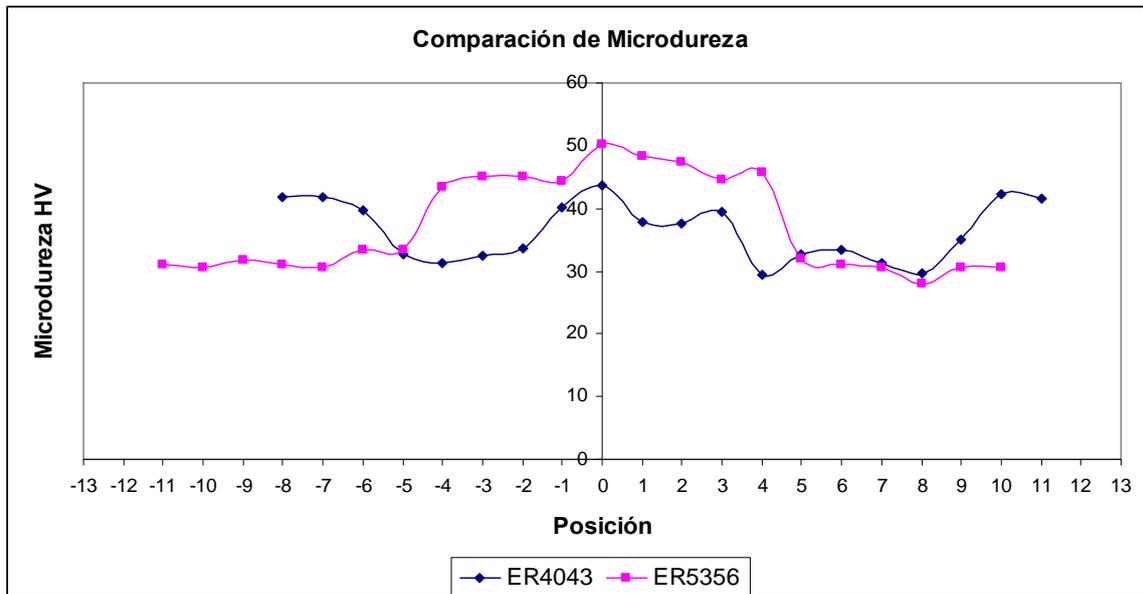


Figura 48. Resultados comparativos MB2, aportes ER5356 y ER4043, 2 pasadas

3.3.2. Análisis de resultados

En la sección anterior (resultados), no solo se muestra los valores de cada probeta ensayada con sus respectivas tablas, sino también se consideró utilizar gráficos con líneas de tendencia en función de los valores obtenidos, esto con la finalidad de mejorar el análisis de los resultados obtenidos. A continuación se realizara el análisis de los resultados obtenidos apoyándonos con las gráficas antes mencionadas.

3.3.2.1. Uniones soldadas

a) Material Base 1, aporte ER5356 y ER4043, con 1 pasada.

Haciendo una observación general del grafico comparativo (Figura 45), se estima que los valor de microdureza alcanzado por el aporte ER4043 y ER5356 son ligeramente iguales, considerando al aporte ER5356 como el de mayor grado de microdureza en el centro del cordón 45HV. Sin embargo, los valores promedios para ambos aportes dentro de la zona 1 y 2, ver figura 12, para el ER5356 y el ER4043 es de 43HV y 44HV respectivamente.

Conforme nos alejamos del centro de ambas probetas ensayadas, el nivel de microdureza disminuye, pero al aproximarnos a la interfase zona fundida y zona de fusión parcial del metal base este tiende a aumentar de dureza. Este aumento de la dureza, se debe a la mezcla de propiedades que se conformaron por la fusión del material base y el material de aporte, también a la precipitación de elementos aleantes.

En el caso del aporte ER4043, el valor alcanzado en el centro del cordón es de 43HV, sin embargo en la interfase de la zona fundida y material base a conformar una microestructura mas dura producto de la segregación de precipitados y posiblemente del Mg_2Si . Por otro lado, la dureza alcanzada por el ER5356 en la interfase aporte fundido y metal base fundido es similar a la que se obtuvo en el centro del cordón. Para ambos caso, la dureza tiende a disminuir hasta el valor promedio del material base 1.

b) Material Base 1, aporte ER5356 y ER4043, con 2 pasadas.

Realizando un promedio de los valores de dureza obtenidos dentro de la zona de fusión (Zona 1) tanto para el aporte ER4043 y el ER5356, resulta valores muy próximos o de ligera diferencia entre uno y otro aporte. Por ejemplo, el ER4043 alcanza 44HV de dureza y por otro lado el aporte ER5356 logra 45HV, pero sus valores en el centro de la probeta son muy distantes como es el caso del ER5356 con 57HV contra el ER4043 que logra 44HV.

Algo importante que viene dándose en esta ensayo de dureza con los aporte mencionados, es que el ER4043 mantiene cierta estabilidad de esta propiedad mecánica a lo largo de la zona 1 en comparación con el ER5356 que muestra tendencia pero en tramos menor de la zona de fusión, fuera de esta zona critica ambos aportes tiende a lograr la estabilidad de la dureza nominal del material base.

c) Material Base 2, aporte ER5356 y ER4043 con 1 pasada.

La influencia del material de material base, elementos de aleación como el Manganeso y el Magnesio, y los materiales de aporte usados, han permitido obtener valores superiores en dureza (Tablas 44 y 45) a los alcanzados con el MB1 bajo las mismas

condiciones de trabajo. Los valores en el centro del cordón son de 55VH y 48VH, y el promedio dentro de la zona 1 es de 50HV y 47HV para los aporte ER5356 y ER4043, respectivamente.

En el caso de las curvas del aporte ER5356 y ER4043 (Figura 46) describe un comportamiento poco usual a comparación de lo que se ha venido observando en el MB1. Es decir, no muestra esa subidas y bajadas dentro de la zona 1, y por el contrario trata de mantener cierta estabilidad dentro de dicha área.

Es importante mencionar que se tomaron las medidas de dureza en la sobremonta y en la raíz de cada uno de los cordones de soldadura, siendo mayores los valores de dureza en la sobremonta (52HV) que en la raíz (46HV).

d) Material base 2, aporte ER5356 y ER4043 con 2 pasadas.

Los valores promedios obtenidos en la zona 1 de la unión soldadura con el aporte ER5356 (46HV) es superior al de la unión con aporte ER4043 (38HV). La curva del aporte 5%Mg tiende a mantener un nivel de dureza que oscila entre los 44HV y 46HV, con un pico poco pronuncia de 50HV (centro del cordón), por otro lado, el aporte 5% Si la zona fundida es corta pero de similar comportamiento al anterior.

Algo importante que mencionar es el grado de dureza que se ha registrado en la sobremonta de cada uno de los pases realizado en las probetas con dos pasadas de soldadura, como en todos los casos el registro de valor se realizo a 1mm del borde de la sección transversal de la muestra. Encontrándose que el valor de un lado de la sobremonta es diferente con respecto a su opuesto; es decir, uno mayor que el otro.

3.3. Ensayo de Doble

Con objeto de estudiar la ductibilidad de las uniones soldadas se realizaron ensayos de doblado, eligiéndose dos ángulos, 120° y 180°.

3.3.1. Resultados

Para efectos del ensayo y sus resultados en la unión soldada (aleaciones de aluminio) se procedió a realizar en todas la probetas, la prueba de doblez de cara y de raíz, deformándose hasta alcanzar la forma de "U" cuyo ángulo de referencia fue de 120° y 180°.

Las uniones soldadas y ensayadas fueron inspeccionadas de modo visual, de manera tal que podamos encontrar algún tipo de defecto de importancia en las uniones, esos defectos o imperfecciones puede ser grietas, socavaciones, porosidades y falta de fusión. Todos estos defectos encontrados guardan estrecha relación a la forma o técnica de soldeo, medidas de limpiezas antes del soldeo, correcto posicionamiento de las juntas (Hi low, apuntalamiento) que tienen que ver con la preparación de juntas. Todas estas consideraciones nos permitirá calificar una unión soldada si esta dentro de los parámetros de la norma (AWS 1.3) y si se considera una unión de calidad.

3.3.1.1. Uniones Soldadas

a) Material Base 1, aporte ER4043 y ER5356, 1 pasada.

La prueba realizada a las probetas soldadas con el aporte ER4043 muestra un límite a ser doblado, mostrando de esta forma el nivel de ductibilidad de esta unión. Es así que en la Figura 49 muestra una apariencia sin falla o fisura en el cordón de soldadura cuando es doblada a 120°; sin embargo, cuando es doblado a 180° (Figura 50) se presenta imperfecciones de continuidad en la zona de aporte del cordón.

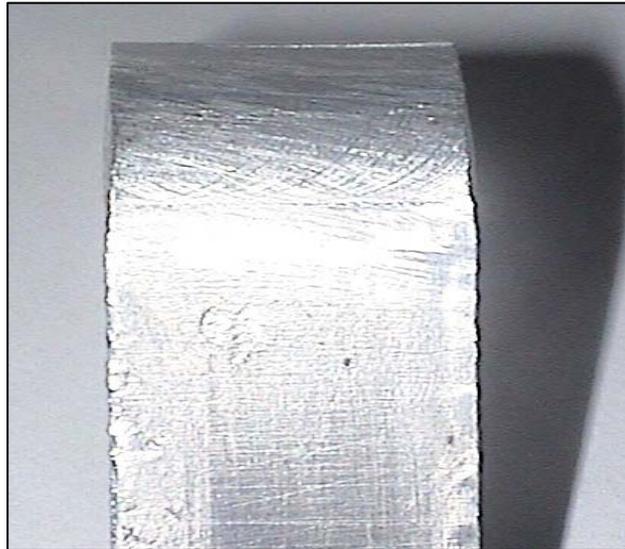


Figura 49. Doblez de cara a 120°. MB1, 1 pasada (ER4043).



Figura 50. Doblez de cara a 180°. MB1, 1 pasada (ER4043).

Las probetas soldadas con el otro aporte (ER5356) no presentaron discontinuidades de soldadura, por lo tanto no se figuraron durante el ensayo de doblez.

b) Material Base 2, aporte ER4043 y ER5356, 1 pasada

La presencia de discontinuidades en uniones soldadas con el ER4043 muestra la poca ductilidad de la probeta al ser dobladas. Se puede apreciar en la Figura 51 la fisura

generada en el cordón de soldadura en el ensayo de doblé a 120° . La propagación de esta imperfección se presentó en el doblé a 180° (Figura 52).



Figura 51. Doble de cara a 120° . MB2, 1 pasada (ER4043).



Figura 52. Doble de cara a 180° . MB2, 1 pasada (ER4043).

Las probetas soldadas con el aporte ER5356 presentan un buen comportamiento al ensayo de doblé a 120° y 180° .

c) Material Base 1, aporte ER5356 y ER4043, 2 pasadas.

Las características físicas del Ensayo de Dobleza a 120° muestran una apariencia limpia de imperfecciones, ER4043, sin embargo a 180° la ductilidad de esta unión no es buena.

El material base 1 unido con el aporte ER5356 fue sometido a ensayos de dobleza a 120° y 180°. Estas no presentan fisuras como si sucedió en otro caso donde el aporte era el de 5% Si.

d) Material base 2, aporte ER5356 y ER4043, 2 pasadas.

El comportamiento de las probetas dobladas a 120° y 180° respectivamente, para este caso se observó uniones con ER5356 sobre el la aleación de aluminio Al-1% Mn, sin presenta discontinuidades.

Las uniones soldadas con el aporte ER4043 5% Si, es así que tanto en el doblado a 120° y 180° presentaron fisuras en el cordón de soldadura (en el baño fundido).

3.3.2. Análisis de resultados

La recomendación de la norma AWS 1.1, menciona ciertos límites aceptables cuando se presenta una fisuración o grita, el cual es de 3mm como máximo en una unión soldada en este tipo de ensayos.

3.3.2.1. Uniones soldadas

a) Material Base 1, aporte ER4043 y ER5356, 1 pasada.

Las uniones soldadas con el aporte ER5356 pasaron las pruebas de doblado, por otro lado, las uniones obtenidas con el otro aporte presentaron defectos físicos a 180° más no a 120° (ángulo menos exigente)

b) Material Base 2, aporte ER4043 y ER5356, 1 pasada.

La unión realizada con el material de aporte ER4043 en este material base, presentó una fisuración en el centro del cordón en el doblado de cara. Sin embargo la longitud de este defecto no supera los 3 mm del cual exige la norma para calificarlo como una mala unión o de baja calidad (a 120° ó 180°)

Por el lado del aporte ER5356 el ensayo de doblez muestra una unión limpia y libre de defectos, tanto en el doblado de raíz y cara.

c) Material base 1, aporte ER5356 y ER4043, 2 pasadas.

Tanto el aporte ER4043 y ER5356, obtuvieron un buen desempeño en el ensayo de doblez. No mostraron imperfección de soldeo o preparación de juntas o limpieza de impurezas.

d) Material base 2, aporte ER5356 y ER4043, 2 pasadas.

Los resultados con el material de aporte ER5356 no son los mismos que con el aporte ER4043, esto debido a la ductilidad proporcionada por este último material de aporte genera la fisuración en la cara de unas de probetas. Por otro lado se observa en las figuras que con el aporte ER5356 se obtuvieron las uniones limpias y sin aspectos de grieta o fisuración.

En términos generales se puede decir que los ensayos de doblados a 120° realizados con ambos aportes cumplen adecuadamente con las especificaciones establecidas en las normas, pero no hay que perder vista las uniones con el aporte ER4043 (5% Si) pues es el que presenta, de manera global, una menor ductilidad.

CONCLUSIONES

Se obtiene una mejor velocidad de alimentación con el aporte ER5356, pues el aporte rico en silicio presenta problemas de atascamiento. En soldeo con el aporte ER4043 se recomienda emplear un diámetro mayor posible, como 1.2mm, debido a que presenta mayor dureza y resistencia en estado de suministro.

Cuando se emplea el aporte 5% de Mg se genera una gran cantidad de humos, debido al gran contenido en magnesio que presenta el aporte, además, en algunas uniones por lo que si no se cuenta con una adecuada extracción de humos y ventilación se deberá emplear el aporte ER4043.

Otro aspecto a tener en cuenta es el color pues el aporte rico en silicio tiene una coloración más oscura, esto se acentuará más si sufre un anodinado.

La apariencia superficial del cordón de soldadura es mejor con el aporte ER4043, debido al contenido de silicio (5%), pues presenta en general buen acabado; además, que permite mantener la estabilidad del arco durante el soldeo, haciendo esto muy atractivo para los soldadores. Lo contrario sucede con el otro aporte, pues presenta muchas salpicaduras y un cordón más rugoso.

El aporte ER4043 presenta mayor fluidez lo que produce un aumento en la penetración, por lo que se debe tener cuidado cuando se le emplea en el soldeo de materiales delgados, pues puede producir perforaciones, por lo que se recomienda para mayores espesores.

Al margen del número de pasadas, la resistencia mecánica obtenidas en el ensayo de tracción con ambos aportes alcanzan valores similares presentando en ambos casos una caída en la resistencia que oscila entre 30% y 33% con respecto al valor nominal del material base. Así mismo, las muestras sometidas a tracción rompen en la ZAC, debido a que en esa zona se produce un recocido por efecto de las temperaturas durante el proceso de soldeo.

Los valores de ductilidad obtenidos en el ensayo de tracción que se logran son mayores a las del material base, pues se presenta un aumento entre 38% y 50%, con

ambos aportes. Estos resultados indican que el material estuvo endurecido por deformación en frío, la que se pierde en la ZAC aumentando con ello su ductibilidad.

Otro ensayo que permite evaluar la ductibilidad en la unión formada por el material de aporte y la ZAC, es el doblado, en el caso del doblado a 120° grados se aprecia pequeñas fisuras en uniones con el aporte ER4043 y MB2, lo que indica que este material presenta menor ductibilidad que el otro aporte. Cuando son dobladas a 180°, mayor exigencia mecánica, este material termina por extender la longitud de la fisura.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Horwitz, Henry, Enciclopedia de la soldadura. Edición en español Vol. I, II México, 1990.
- [2] Horward, Cary, Manual de la soldadura. Edición en español Vol. II México, 1992.
- [3] Saunders, Welding Aluminum: Theory and Practice. "The Aluminum Association", 1991.
- [4] Rivera Carpio, Jorge, Soldadura oxi-gas del aluminio y sus aleaciones comerciales, Tesis de grado, 1987.
- [5] Seferian, Las soldaduras, Técnicas de control. Soldabilidad de los metales. Bilbao, 1981.
- [6] Vargel, Christian, Enciclopedia del aluminio, Vol. 5, 1987.
- [7] Exsa, Manual de Soldadura y Catálogo de Productos. Sexta Edición, 2003.
- [8] C.A. Bloem, M.D. Salvador, V. Amigó y D. Busquets, Rev. De Metalurgia Madrid 39, 2003.
- [9] The Lincoln Electric Company, The Procedure Handbook of Arc Welding. Thirteenth Edition, Ohio, 1994.
- [10] ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, USA, 1993.
- [11] AWS D1.2/D1.2M2003 Structural Welding Code-Aluminum, Fourth edition, Florida, 2003
- [12] The Aluminum Association, Welding Aluminum Theory and Practice, Third Edition, USA, 2004.
- [13] J. Oñoro, Revista de soldadura, 19, 1989.
- [14] Aluminum Q&A. Welding Journal.Vol.82 N°12. December 2003.

[15] Aluminum Q&A. Welding Journal.Vol.85 N°2. February 2006.

[16] Aluminum Q&A. Welding Journal.Vol.83 N°8. August 2004.

[17] Aluminum Q&A. Welding Journal.Vol.84 N°8. August 2005.

[18] <http://www.envapack.com/javascript/uploads/627b.jpg>

[19] <http://www.record.com.pe/image/upload/tips/pailas-grupo.jpg>

[20] http://products.esabna.com/SP/home/filler_metals_catalog/filler_metals_product_detail/q/display_id.id4367f2a954cc98.53791212/category_id.631

