

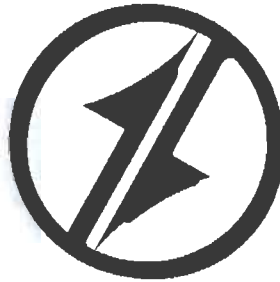
Con todo el amor y cariño que tengo en mi corazón para los seres que Dios puso en mi camino y que hacen que la vida valga la pena.

Mi esposa Evelina
Mi hija Daniela
Mi madre Maria del Carmen
Y Mi padre Antonio

Los amo

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN DE MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO BRAZING EN UNIONES DE TUBING DE
ALUMINIO PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

POR

ING. MIGUEL ANGEL BUENROSTRO GUZMAN

MONOGRAFÍA

**EN OPCION COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE
LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

FEBRERO 2008

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO BRAZING EN UNIONES DE TUBING DE
ALUMINIO PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

POR

ING. MIGUEL ANGEL BUENROSTRO GUZMAN

MONOGRAFÍA

**EN OPCION COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

FEBRERO 2008

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES, S.A.
DE C.V.**

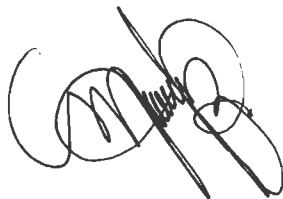
**GERENCIA DEL DESARROLLO DEL FACTOR HUMANO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del comité tutorial recomendamos que la monografía:
"Optimización del proceso brazing en uniones de tubing de aluminio para la
industria automotriz" realizada por el alumno Miguel Ángel Buenrostro Guzmán
matricula: 06-ES040, sea aceptada para su defensa como especialista en
tecnología de la soldadura industrial.

El Comité Tutorial



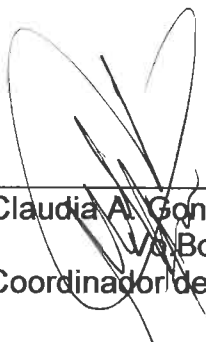
Dra. Ana María Arizmendi Morquecho
Tutor Académico



Ing. Pablo Muñoz Herrera
Tutor en planta asesor



Ing. Fernando Macías López
Asesor



M.C. Claudia A. González Rodríguez
V.B.
Coordinador de Postgrado

ÍNDICE

Capítulos	Página
1. Síntesis.....	4
2. Introducción	5
3. Objetivo general.....	7
4. Alcance.....	8
5. Justificación.....	9
6. Impacto.....	10
7. Revisión de la literatura.....	11
7.1 Fundamentos del brazing.....	11
7.2 Ventajas del proceso brazing.....	12
7.3 Limitaciones del proceso brazing.....	12
7.4 Principio del proceso.....	13
7.5 Fusión y fluidez de acuerdo al diagrama de equilibrio binario Al- Si.....	13
7.6 Licuación.....	15
7.7 Mojado y adhesión.....	15
7.8 Brazing manual con antorcha.....	18
7.9 Seis pasos básicos para el brazing.....	20
7.9.1 Buen ensamble y separación apropiada.....	20
7.9.2 Limpieza de los metales.....	24
7.9.3 Aplicación de fundente en las partes.....	27
7.9.4 Ensamble para el brazing.....	31
7.9.5 Soldadura brazing del ensamble.....	33
7.9.6 Limpieza de la unión soldada.....	36
7.10 Formatos (BPS).....	37
7.11 Diez reglas para un exitoso brazing con antorcha.....	39

8.	Materias primas para el brazing.....	43
8.1	Metales base.....	43
8.1.1	Aluminio 3003.....	43
8.1.1.1	Aplicaciones.....	44
8.1.1.2	Propiedades de diseño.....	45
8.1.1.3	Maquinabilidad.....	45
8.1.1.4	Conformado.....	45
8.1.1.5	Soldadura.....	45
8.1.1.6	Trabajo en caliente.....	45
8.1.1.7	Trabajo en frío.....	46
8.1.1.8	Otras propiedades físicas.....	46
8.1.1.9	Microestructura.....	46
8.1.2	Aluminio 6061.....	46
8.1.2.1	Aluminio 6061 T6.....	47
8.1.2.2	Propiedades de diseño.....	48
8.1.2.3	Maquinabilidad.....	48
8.1.2.4	Conformado.....	49
8.1.2.5	Soldadura.....	49
8.1.2.6	Tratamiento térmico.....	49
8.1.2.7	Otras propiedades físicas.....	49
8.1.2.8	Otras propiedades mecánicas.....	49
8.1.2.9	Microestructura.....	50
8.1.3	Efecto del magnesio del metal base en el proceso brazing....	50
8.2	El material de aporte.....	53
8.3	El flux utilizado en el brazing.....	55
8.3.1	Composición del flux.....	56
8.3.1.1	Nombre comercial.....	56
8.3.1.2	Tipo de sustancia.....	56
8.3.1.3	Ingredientes.....	56
8.3.1.4	Componentes.....	57

9.	Variables y parámetros del proceso.....	58
9.1	Recepción de materia prima.....	60
9.2	Corte.....	61
9.3	Limpieza de los componentes.....	62
9.4	Inspección.....	63
9.5	Proceso de torch brazing.....	63
9.5.1	Metal de aporte.....	65
9.5.2	Flux.....	67
9.5.3	Calentamiento de la pieza.....	68
9.5.4	Tipo de gas utilizado.....	69
9.5.5	Enfriamiento de la pieza.....	69
9.5.6	Tiempo de ciclo.....	70
9.6	Doble.....	72
9.7	Prueba de fuga.....	73
10.	Discusión.....	75
11.	Conclusiones y Recomendaciones.....	82
12.	Bibliografía.....	84
13.	Lista de Figuras.....	86
14.	Lista de Tablas.....	88

1.

SÍNTESIS

A lo largo de los años hemos sido testigos de los grandes avances y evoluciones en todos los campos de la ciencia, desde las teorías y filosofías hasta las tecnologías, mismos que han servido como base para futuras investigaciones.

El campo de la soldadura por brazing no es ajeno a estos cambios, por el contrario ha sido desarrollado a tal grado que es ahora un proceso que es utilizado comúnmente por diversas compañías.

Las uniones de aleaciones de aluminio por brazing son usadas ampliamente en la industria automotriz y en industria aeroespacial. Con el fin de asegurar la integridad de la unión, los efectos de las variables del proceso en la calidad de la unión deben ser entendidas. En esta monografía se llevó a cabo una revisión de la literatura de los parámetros del proceso de mayor influencia para la obtención de una soldadura por brazing de aleaciones de aluminio 3003 y 6061 con buenas propiedades. Adicionalmente se realizó una inspección de las variables del proceso en una empresa de la localidad donde se realizan este tipo de uniones por brazing y donde el uso principal es para la fabricación de componentes de aire acondicionado para la industria automotriz.

2.

INTRODUCCION

La soldadura por brazing, es un proceso de unión térmica en el que el metal de aporte se calienta hasta su fusión fluyendo por capilaridad entre el claro que existe entre los materiales a soldar y uniendo sus superficies mediante difusión. El material de aporte tiene un punto de fusión por encima de los 450°C, pero siempre por debajo del punto de fusión de los componentes que se van a unir. Las características físicas y químicas del material de aporte son completamente diferentes a las de las piezas que se van a soldar.

Este proceso usado en la unión de dos materiales (Aluminio 3003 y 6061) en la empresa Cooper Std. se logra mediante el uso de una mesa rotatoria en la cual se colocan las dos piezas a unir. Ambas piezas, una en forma de tubo y la otra en forma de bloque, son aseguradas por medio de fijadores, entre ambos componentes se coloca el material de aporte en forma de anillo y una vez realizado lo anterior, la mesa gira y llega primero a un dosificador que aplica el flux en forma de "slurry", posteriormente pasa a través de varias estaciones donde se le aplica calor por medio de flama, y es aquí en estas estaciones donde el calor funde el aporte y llena el hueco existente entre ambas piezas.

La pieza una vez soldada, se enfría por si sola a temperatura ambiente con el mismo aire mientras llega a la estación en la que recibe una limpieza por medio de agua que termina por enfriarla y quitar residuos de soldadura.

Ya terminado el proceso, ésta es llevada a otra estación donde se le deforma y dobla con ciertos equipos para dejarla lista en su forma final.

A continuación la pieza pasa a una revisión que consiste en hacerle una prueba de fugas, es decir, saber si la soldadura ha sellado bien el componente. Esta prueba consiste en hacer pasar helio por el conducto de la pieza para detectar moléculas de este gas en una cámara de vacío por medio de un sensor (sniffer).

De manera general se podría pensar que este es un proceso muy simple que en principio no tendría grandes inconvenientes, pero, es importante decir que la verdadera relevancia de esta monografía radica en el estudio de las variables de proceso utilizadas y su comportamiento dentro del mismo, ya que a pesar de ser un proceso relativamente sencillo se tiene una gran cantidad de piezas rechazadas.

En esta monografía mostrará la influencia de los parámetros usados en soldadura (como lo son la cantidad de flux, la temperatura de fusión del aporte, forma y presentación del aporte, porcentajes y contenidos de elementos químicos en los materiales, etc.) así como observar y analizar algunos trabajos realizados por otros investigadores en el mismo campo.

Todo lo anterior nos hará sumarle componentes y elementos a los juicios y conclusiones que se obtengan y que esto pueda servir a futuros estudiantes, analistas, experimentadores e investigadores y contribuir con la necesaria y siempre importante mejora continua que demanda nuestro entorno cada vez mas globalizado.

3.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es llevar a cabo una revisión de las variables de proceso en el brazing de piezas de aluminio utilizados para la fabricación de componentes de equipos de aire acondicionado en la industria automotriz, donde se identificarán los parámetros de mayor influencia para la obtención de una soldadura con buenas propiedades.

4.

ALCANCE

El alcance de este trabajo es documentar información la cual pueda contribuir de manera significativa en la reducción del amplio rango de operación de los parámetros del proceso utilizado para la unión de piezas de aluminio mediante el brazing. Estas medidas permitirán la optimización del proceso y contribuir con la mejora en la calidad del producto terminado.

5.

JUSTIFICACIÓN

El proceso de soldadura brazing es un proceso de unión muy utilizado para muchos materiales y aleaciones. Con muy poca cantidad de material de aporte se puede conseguir la unión de piezas la cual, realizada correctamente, es comparable en cuanto a propiedades con cualquier otro método de soldadura.

A través del brazing se pueden producir uniones muy resistentes y con muy buenas propiedades mecánicas. Sin embargo actualmente en la práctica el control de las variables del proceso es difícil obteniéndose un alto porcentaje de rechazo en las piezas terminadas.

Adicionalmente se han detectado algunas áreas de oportunidad para optimizar el proceso, tales como la actualización de los parámetros de trabajo. Algunos de ellos son las características del material de aporte, los gases, el tipo y cantidad de flux, por mencionar algunos. Evidentemente la optimización de estos parámetros permitirá una mejora en la calidad de las uniones y una disminución de costos del proceso.

6.

IMPACTO

El impacto del presente trabajo se verá reflejado una vez que se hayan detectado las áreas de oportunidad y se propongan cambios al proceso con lo cual se espera:

- ✓ Optimizar proceso.
- ✓ Reducción de costos en insumos como flux, gas y energía
- ✓ Reducción del tiempo total de proceso
- ✓ Menor gasto por defectos de calidad y retrabajos
- ✓ Aumento en la productividad

7.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

7.1 Fundamentos del brazing

La soldadura brazing se utiliza para unir materiales calentándolos en presencia de un metal de aporte el cual presenta un cambio a fase líquida por encima de 450 °C pero por debajo del cambio a fase sólida del metal base.

El brazing crea una unión metalúrgica extremadamente fuerte. El principio por el cual el metal de aporte es atraído a través de la unión para crear el enlace es la acción de la capilaridad. En una operación de brazing el calor es aplicado a los metales base por completo. El metal de aporte entra en contacto con las partes calientes y se funde instantáneamente fluyendo por acción de la capilaridad a través de la unión.

Las uniones realizadas por brazing son dúctiles, disponibles para resistir choques considerables y vibración. La técnica es ideal para unir metales diferentes. El brazing es esencialmente un proceso de un paso, rara vez se necesita granallar o darle un proceso de terminado a las piezas soldadas. Por lo general la apariencia superficial terminal es buena. Este proceso de unión se realiza a relativamente bajas temperaturas reduciendo la posibilidad de deformar, calentar o fundir los metales que se están uniendo. Además es un proceso económico y el costo por unión es favorable con respecto a otros métodos de soldadura.

7.2 Ventajas del proceso brazing

Las principales ventajas de la soldadura brazing son:

- 1.- Es económica para ensambles complejos
- 2.- Es sencilla para ensambles grandes
- 3.- La distribución térmica y de esfuerzos es excelente
- 4.- Conserva los recubrimientos y revestimientos
- 5.- Puede unir metales disímiles
- 6.- Permite unir metales y no metales
- 7.- Puede unir metales muy diferentes
- 8.- Permite unir piezas de precisión
- 9.- Las uniones requieren poco acabado
- 10.- Se pueden unir muchas piezas al mismo tiempo.

7.3 Limitaciones del proceso brazing

Las principales desventajas de la soldadura brazing son:

1. Posibilidad de interacciones desfavorables del metal líquido con la pieza.
2. Erosión del metal base
3. Formación de fases intermetálicas frágiles las cuales reducen la ductilidad
4. Formación de porosidad que disminuyen las propiedades finales
5. Requiere personal altamente capacitado

7.4 Principio del proceso

El flujo capilar es el principio básico en donde el metal de aporte fundido moja ambas superficies del ensamble. La unión deberá espaciarse de modo que permita una acción capilar eficiente.

La capilaridad es el resultado de la tensión superficial entre el metal base y el metal de aporte y ésta se relaciona directamente por el ángulo de contacto entre ambos.

En el flujo del metal de aporte influyen consideraciones dinámicas como la viscosidad, la presión de vapor, la gravedad y las reacciones metalúrgicas entre el metal base y la soldadura. En la aplicación de soldadura brazing las superficies que se van a unir se limpian para eliminar contaminantes y óxidos, luego se cubren con fundente el cual es capaz de disolver los óxidos metálicos sólidos y evitar una nueva oxidación.

Finalmente se calienta el área de la unión hasta que el fundente llega al punto de fusión y limpia los metales base quedando protegidos contra la oxidación.

7.5 Fusión y fluidez de acuerdo al diagrama de equilibrio binario Al-Si

Los metales puros se funden a una temperatura constante y generalmente son muy fluidos. Las composiciones binarias tienen diferentes características, dependiendo de las proporciones de los dos metales. Para explicar un poco de manera sencilla estos términos se utilizará el diagrama de equilibrio binario Aluminio-Silicio mostrado en la Figura 1. Durante el calentamiento la línea de solidus indica la temperatura de comienzo de la fusión de las aleaciones, en tanto que la línea de liquidus, indica las temperaturas a las que las aleaciones se vuelven completamente líquidas.

En el punto C las dos líneas se unen (87.4% en peso Aluminio-12.6% Silicio), lo que indica que esa aleación se funde a esa temperatura específica (la temperatura eutéctica). Esta aleación tiene la composición eutéctica; en este punto es tan fluida como un metal puro, en tanto que las demás combinaciones de aleación son pastosas en el rango de solidificación entre sus temperaturas de solidus y de liquidus. Cuanto mayor sea la separación entre estas dos temperaturas, más trabajo costará que la aleación fluya al interior de una unión capilar.

La solubilidad sólida del Si en el Al es de 1.65% e.p. por lo tanto la región α es una solución sólida de Silicio en Aluminio. El aluminio tiene cero solubilidad sólida en el Si. La zona sólida central consiste en una mezcla homogénea de soluciones sólidas α y β . Por encima de la línea de liquidus, los átomos de Aluminio y de Silicio están distribuidos en forma totalmente homogénea en una solución líquida.

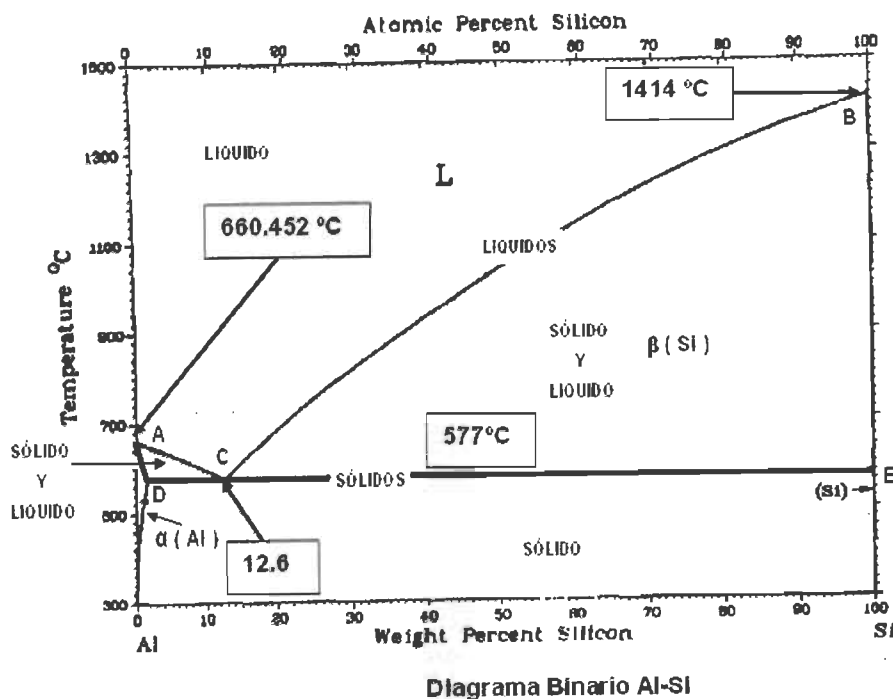


Figura 1. Diagrama de equilibrio del sistema binario Aluminio-Silicio.

7.6 Licuación

Como las fases de aleación sólida y líquida de un metal de aporte para soldadura brazing generalmente no son iguales, la composición del metal fundido cambiará gradualmente conforme se incremente la temperatura desde el solidus hasta el liquidus. Si se permite que la porción que se funde primero fluya hacia fuera, es posible que el sólido restante no se funda y permanezca como un residuo.

Los metales de aporte con intervalos de fusión estrechos no tienden a separarse, de modo que fluyen libremente al interior de uniones con separaciones extremadamente angostas. Los metales de aporte con intervalos de fusión amplios deben calentarse rápidamente o colocarse en la unión después de que el metal base haya alcanzado la temperatura de soldadura brazing, a fin de minimizar la separación, que se denomina licuación.

Los metales de aporte propensos a la licuación fluyen lentamente, sólo penetran en uniones bastante separadas y forman filetes grandes en las extremidades de las uniones.

7.7 Mojado y adhesión

Para ser efectivo, un metal de aporte de soldadura brazing debe alearse con la superficie del metal base sin:

1. Difundirse de manera indeseable al interior del metal base
2. Diluir el metal base
3. Erosionar el metal base
4. Formar compuestos intermetálicos frágiles

Los efectos 1, 2 y 3 dependen de la solubilidad entre el metal de aporte y el metal base, por lo tanto la cantidad de metal de aporte presente, la temperatura y duración del ciclo de soldadura brazing son importantes para lograr una unión adecuada.

Algunos metales de aporte se difunden excesivamente y alteran las propiedades del metal base. Si se desea controlar la difusión se debe escoger un metal de aporte apropiado, aplicar la mínima cantidad posible y seguir el ciclo de soldadura brazing correcto. Si el metal de aporte moja el metal base, mejorará el flujo capilar. Si los capilares entre las piezas metálicas son largos, la solubilidad mutua puede modificar la composición del metal de aporte por aleación. Por lo regular esto elevará su temperatura de liquidus y hará que solidifique antes de llenar por completo la unión. La Figura 2 muestra esquemáticamente los ángulos de mojabilidad capilar.

La erosión del metal base ocurre cuando el metal base y el metal de aporte de soldadura brazing son mutuamente solubles. Hay ocasiones en tal aleación que se pueden producir compuestos intermetálicos frágiles los cuales reducen la ductilidad de la unión.

La composición de los metales de aporte se ajusta con el fin de controlar los factores anteriores y conferir características deseables, como resistencia a la corrosión en medios específicos, temperaturas de soldadura brazing favorables o ahorro de materiales. Así por ejemplo, en las aleaciones plata-cobre que se usan para soldar en hierro y acero, los metales de aporte contienen cinc o cadmio, o ambos, los cuales se utilizan para disminuir las temperaturas de liquidus y solidus. Se puede añadir estaño en lugar de cinc o cadmio en los casos en que son indeseables los constituyentes con presión de vapor alta.

De manera similar, se usa silicio para bajar las temperaturas de liquidus y solidus de los metales de aporte para soldadura de aluminio y aleaciones base níquel.

Otros metales de aporte contienen elementos como litio, fósforo o boro, los cuales reducen los óxidos superficiales del metal base y forman compuestos con punto de fusión por debajo de la temperatura de soldadura brazing; esos óxidos fundidos pueden entonces fluir y salir de la unión dejando una superficie metálica limpia para la soldadura brazing. En esencia, estos metales de aporte son autofundentes.

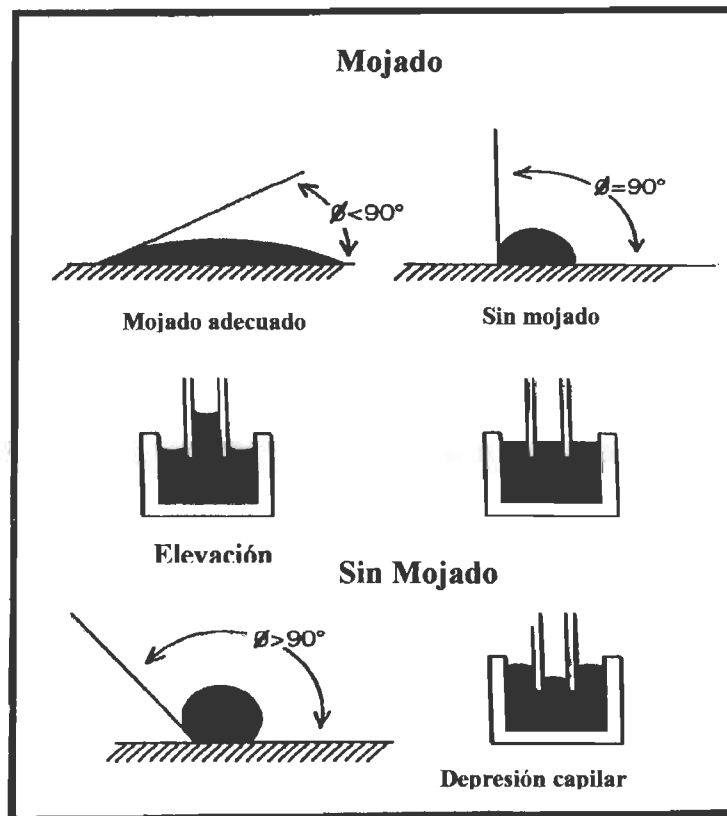


Figura 2. Ángulos de Mojado Capilar

7.8 Brazing manual con antorcha

Este proceso se lleva a cabo calentando uno o más sopletes de gas. Dependiendo de la temperatura y de la cantidad de calor requerida, el gas combustible (acetileno, propano, gas natural, etc.) se puede quemar con aire, aire comprimido u oxígeno. Los sopletes de aire-gas natural son los que producen la temperatura de flama más baja y también el mínimo de calor. El acetileno a presión se usa en el soplete de aire-acetileno con aire a presión atmosférica. Se pueden usar con sopletes de aire-gas natural como de aire - acetileno para soldar piezas pequeñas y secciones delgadas. Los sopletes que usan oxi-hidrógeno se usan ampliamente para la soldadura brazing de aluminio y aleaciones no ferrosas. Lo bajo de la temperatura reduce la posibilidad de sobrecalentar el ensamble durante la soldadura. Un exceso de hidrógeno ayuda a limpiar y proteger la unión. Se pueden usar con provecho sopletes de diseño especial con múltiples puntas o múltiples flamas a fin de incrementar la cantidad de aporte de calor. Hay que evitar el sobrecalentamiento local teniendo cuidado de mover constantemente el soplete sobre la pieza de trabajo.

Para la soldadura brazing manual con soplete, éste puede equiparse con una sola punta, la cual puede ser de una o varias flamas. La soldadura brazing manual con soplete resulta especialmente útil para unir ensambles con secciones de masa diferentes.

Es posible configurar operaciones mecanizadas, si la tasa de producción lo justifica, empleando uno o más sopletes equipados con puntas de una o varias flamas. La máquina puede diseñarse de modo que mueva el trabajo o bien los sopletes, o ambas cosas.

El calentamiento con soplete para soldadura brazing sólo puede usarse con metales de aporte acompañados de fundente o con autofundente.

Esta lista incluye aluminio-silicio, plata, cobre-fósforo y todos requieren fundente. En ciertas aplicaciones, incluso los metales de aporte de cobre fósforo auto fundentes requieren fundente adicional.

El metal de aporte puede colocarse previamente en la unión y cubrirse con fundente antes del calentamiento, o alimentarse en el punto de aplicación de la flama. Primero se aplica calor a la unión y posteriormente el fundente alcanza su punto de fusión, seguido por el metal de aporte que entonces fluye al interior de la unión. Es preciso evitar el sobrecalentamiento del metal base y del metal de aporte, ya que este último podría difundirse con rapidez y salir de la unión bajo la acción de la gravedad. El gas natural es adecuado para la soldadura brazing con soplete porque la temperatura relativamente baja de su flama reduce el peligro del sobrecalentamiento.

El metal de aporte para soldadura brazing puede colocarse previamente en la unión de forma de anillos, rondanas, tiras, cilindros o polvos, o puede alimentarse a mano, generalmente en forma de alambre o varilla. En todos los casos, la limpieza y el uso del fundente correcto son esenciales.

Las técnicas de soldadura brazing con soplete difieren de las que se usan en la soldadura con gas oxcombustible. Los operadores que sólo tiene experiencia con la soldadura autógena tal vez requieran capacitación en técnicas de soldadura brazing. Por ejemplo, es práctica recomendable evitar que el cono interior de la flama entre en contacto con la unión excepto durante el precalentamiento, ya que la fusión del metal base y la dilución del metal de aporte puede elevar la temperatura de cambio a fase líquida (liquidus) y hacer más viscoso el flujo. Además, existe la posibilidad de sobrecalentar el fundente y nulificar su capacidad para promover el flujo capilar, y de que se evaporen algunos constituyentes de bajo punto de fusión del metal de aporte.

De manera general el brazing debe satisfacer 4 criterios:

1. Las piezas deben unirse sin fusión de los metales base
2. El metal de aporte debe tener una temperatura de liquidus mayor que 450°C
3. El metal de aporte debe mojar las superficies del metal base
4. Penetrar en la unión ó mantenerse en ella por acción capilar

Las piezas deben limpiarse y protegerse con fundente o una atmósfera inerte durante el calentamiento para evitar oxidación excesiva.

7.9 Seis pasos básicos para el brazing

La Especificación de prácticas recomendadas para diseño, manufactura e inspección de componentes críticos unidos por brazing con antorcha de la AWS indica 6 pasos básicos a seguir en el proceso como se mencionan a continuación.

7.9.1 Buen ensamble y separación apropiada

El brazing, como hemos visto, utiliza el principio de la acción capilar para distribuir el metal de aporte fundido entre las superficies de los metales base. Por lo tanto, durante la operación de brazing, se debe tener cuidado para mantener una separación entre los metales base para permitir que la acción capilar trabaje lo más eficaz posible. Esto significa que en casi todos los casos se requiere una separación lo mas cerrada posible. La gráfica de la Figura 3 se basa en juntas a tope soldadas con brazing de acero inoxidable, usando un metal de aporte específico. En esta figura se puede observar cómo la resistencia a la tensión varía con la cantidad de separación entre las piezas que son unidas.



Figura 3. Efecto del espesor de la unión sobre la resistencia a la tensión.

Se puede notar que la unión más resistente (135.000 psi/930.8 MPa) se alcanza cuando la separación es de .0015" (.038mm). Cuando la separación es más estrecha, el metal de aporte es más difícil de fluir o distribuirse a través de toda la junta y por lo tanto se reduce la resistencia de la unión. Inversamente, si la separación es más ancha de lo necesario, la resistencia de la soldadura será reducida considerablemente. También bajando la resistencia de la soldadura se reduce la acción capilar, así que el metal de aporte puede no poder llenar completamente la unión.

La separación ideal de una junta para unirse por brazing del ejemplo anterior es cercana a .0015" (.038mm). Pero ordinariamente en una soldadura brazing, no se logra tener en forma precisa esta distancia, para conseguir una soldadura con esa resistencia. La acción capilar funciona sobre un rango de apertura, por lo que tendríamos un buen margen de separación. Si observamos nuevamente la figura anterior se ve que para rangos de separación de .001" a .005" (.025 mm a .127 mm) todavía se producen uniones de 100 psi (689.5 MPa) de resistencia a la tensión.

Traducido a la práctica de taller diaria, es fácil ajustar la separación y obtener una soldadura perfecta en una unión tubular. Si nosotros unimos dos partes planas, simplemente podemos empalmar una encima de la otra. El contacto metal sobre metal es toda la separación que se necesitará generalmente, puesto que el "acabado de fabricación" de metales proporciona la rugosidad de la superficie suficiente para las "trayectorias capilares" para el flujo del metal de aporte fundido. (Las superficies altamente pulidas, tienden a restringir el flujo del metal de aporte).

Sin embargo, hay un factor especial que se debe considerar cuidadosamente en la preparación de las separaciones. Las uniones con brazing se realizan a temperaturas apropiadas para el brazing, no a temperatura ambiente, se debe tomar en cuenta el coeficiente de expansión térmica de los metales que son unidos.

Esto es particularmente verdad de las uniones de ensambles tubulares de materiales disímiles. Como ejemplo, supongamos que se esta soldando un buje de bronce dentro de una manga de acero, como se muestra en la Figura 4. El bronce cuando se calienta, se expande más que el acero. Si se maquinan las piezas y tenemos una separación a temperatura ambiente de .002"- .003" (.051 mm - .076 mm), para el momento en que se hayan calentado las piezas a la temperatura necesaria de brazing esta separación pudo haberse cerrado totalmente. La solución es que se debe permitir una separación inicial mayor, de modo que cuando se alcance la temperatura este sea de alrededor .002"- .003" (.051mm- .076 mm).

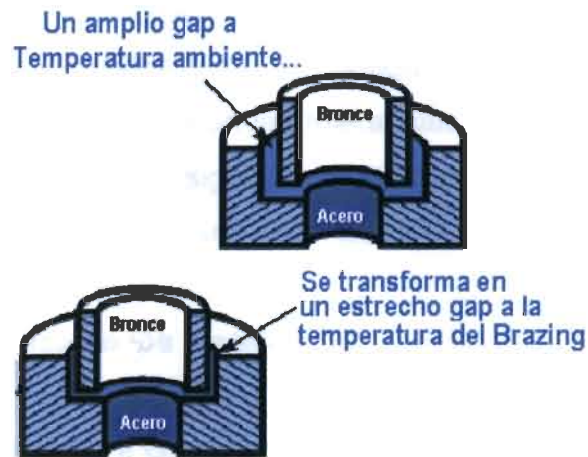


Figura 4. Separación estrecha en uniones por brazing.

Por supuesto, el mismo principio puede ser al inverso. Si la parte externa es de bronce y la interna de acero en una unión, como se muestra en la Figura 5 se puede ensamblar aplicando una pequeña fuerza a temperatura ambiente durante el tiempo en que se alcanza la temperatura de soldadura, la expansión rápida del bronce crea una separación adecuada.



Figura 5. Separación holgada en uniones por brazing.

La expansión o contracción permisible depende de la naturaleza y tamaño de los metales que son unidos y de la configuración de la junta. Aunque hay muchas variables involucradas en las tolerancias exactas de las separaciones, se debe tener en mente el siguiente principio: los metales se expanden a diferentes velocidades cuando son calentados.

7.9.2 Limpieza de los metales

La acción capilar trabajará correctamente solamente cuando las superficies de los metales están limpias. Si se contaminan con aceite, grasa, moho, cascarilla o suciedad, esos contaminantes tienen que ser eliminados. Si permanecen, formarán una barrera entre las superficies del metal base y el brazing. Un metal base aceitoso, por ejemplo, repelerá el fundente, formando puntos de óxido formados por el calor y el resultado serán huecos en la soldadura. El aceite y la grasa se carbonizarán cuando se calienta, formando una película la cual no permitirá al metal de aporte fluir. Y el metal de aporte no se adhiere a superficies con moho. La limpieza de las partes algunas veces es un trabajo complicado, pero tiene que realizarse forzosamente. El aceite y la grasa se deben quitar primero, debido a que la solución de ácido cítrico evita la remoción de moho y cascarilla. (Si se intenta quitar moho o cascarilla por la limpieza abrasiva, antes de estar libre de aceite, se adherirá más el aceite, así como el polvo fino del abrasivo más profundamente en la superficie). Se debe eliminar el aceite y la grasa.

En la mayoría de los casos puede hacerse muy fácilmente sumergiendo las piezas en un solvente desengrasante, mediante desengrase a vapor, o por limpieza alcalina o acuosa.

Si las superficies del metal están cubiertas con óxido o cascarilla, se puede quitar esos contaminantes químicamente o mecánicamente.

Para la remoción química, se utiliza un tratamiento ácido pícrico, cerciorándose de que los productos químicos son compatibles con los metales base que son limpiados, y que no permanecerán trazas de este ácido en hendiduras o cavidades. La remoción mecánica se conoce como limpieza abrasiva.

Particularmente en la reparación, donde las partes pueden estar muy sucias o enmohecidas, se puede utilizar un método rápido de limpieza usando un esmeril de paño o un disco abrasivo, un lima o limpieza con arena, seguida por una operación de enjuague.

Una vez que las partes estén completamente limpias, es una buena idea aplicar el fundente y soldar cuanto antes. Haciendo esto será mínima la posibilidad de recontaminación de las superficies por polvo de taller o manos grasosas depositadas durante el manejo. En la Figura 6 se muestra una inspección de limpieza a través de una lámpara de luz negra (ultravioleta) en un cuarto oscuro.

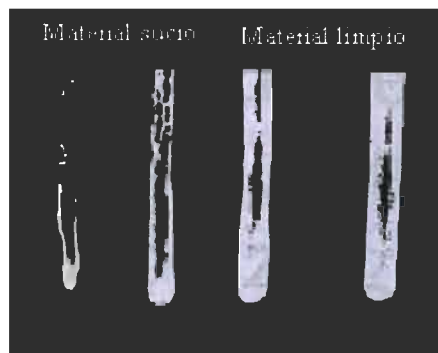


Figura 6. Inspecciones de limpieza con luz negra.

Es indispensable que las superficies estén limpias y libres de óxidos para asegurar uniones soldadas en brazing integra y de calidad uniforme. En la Tabla 1 se muestran los métodos de limpieza como etapa previa para realizar la unión.

Las grasas, los aceites, la suciedad y los óxidos evitan que el metal de aporte fluya y se adhiera de manera uniforme, e interfieren con la acción del fundente con la formación de huecos e inclusiones.

El desengrasado generalmente se efectúa primero, los métodos más comunes son:

- Limpieza con disolventes
- Desengrasado con vapor
- Limpieza alcalina
- Limpieza con emulsión
- Limpieza electrolítica

Métodos de limpieza			
Método	Composición	Capacidad para remover:	
		Aceite Mineral y Fluidos de corte	Aceites solubles en agua
Limpieza con Emulsión	Mezcla de hidrocarburos insolubles y agua	Buena	Buena
Limpieza Alcalina	Mezcla con base en agua que contiene limpiadores alcalinos y otros aditivos	Buena	Buena
Limpieza con Solventes	Esencias minerales Alcohol Acetona Tolueno Hidrocarburos Clorados	Buena	Pobre
Desengrasado con Vapor	Hidrocarburos Clorados Metilcloridos Percloroetileno Tricloroetileno Tricloroetano	Excelente	Pobre
Nota: No usar hidrocarburos clorados para la limpieza de aleaciones de Zirconio y Aluminio			

Tabla 1. Métodos de limpieza como etapa previa para realizar la unión.

7.9.3 Aplicación de fundente en las partes

El fundente es un compuesto químico aplicado a las superficies de la junta antes de soldar. Su uso es esencial en el proceso brazing (con algunas excepciones que se verán más adelante).

La razón es que durante el calentamiento de la superficie del metal se acelera la formación de óxidos, debido a la combinación química entre el metal caliente y el oxígeno en el aire. Estos óxidos deben ser prevenidos o inhibidos para que el metal de aporte moje y pegue en la superficie.

Una capa de fundente en el área de la junta, protegerá la superficie del aire, previniendo la formación del óxido. El fundente también disolverá y absorberá cualquier óxido que se forme durante el calentamiento o que no fue completamente removido en el proceso de la limpieza. El fundente en la junta se debe aplicar de cualquier manera, mientras se cubra las superficies totalmente. Puesto que el fundente convencional está hecho de una pasta consistente, lo más usual es utilizar una brocha.

Pero en una línea de producción las cantidades aumentan, puede ser más eficiente aplicar el fundente sumergiendo las piezas en un depósito de fundente de alta viscosidad o con un aplicador de fundente tipo pistola. Muchas compañías han encontrado que un tamaño de depósito repetible mejora la consistencia de la junta y se disminuye la cantidad de fundente usado.

El fundente se aplica generalmente justo antes de soldar, si es posible de este modo el fundente tiene menos posibilidad de secarse y desquebrajarse por golpeteos durante el manejo. El fundente que se debe utilizar es el que está

formulado específicamente para los metales, temperaturas y condiciones de aplicación deseadas.

Hay fundentes formulados para prácticamente todas las necesidades. Por ejemplo, fundentes para brazing a muy altas temperaturas en el rango 1093°C, los fundentes para metales con óxidos refractarios, fundentes para largos ciclos de calentamiento y fundentes para aplicación automatizada.

La cantidad de fundente que se debe utilizar es suficiente para cubrir totalmente el ciclo de calentamiento. En piezas de tamaño y peso grande el ciclo de calentamiento es mayor, por lo cual es necesario utilizar más fundente (en piezas más ligeras, el calentamiento es más rápido y se requiere menos fundente). Como regla general, no se debe escatimar o economizar el fundente. Es nuestro seguro contra la oxidación.

En una cantidad insuficiente de fundente rápidamente se saturará y perderá su efectividad. Un fundente que absorbe menos cantidad de óxido no asegura una buena unión, solo sería más fácil de enjuagarse cuando se haya terminado la soldadura.

El fundente puede también actuar como un indicador de temperatura, minimizando la posibilidad de sobrecalentamiento de las partes a soldar, por ejemplo un fundente típico se vuelve completamente claro y activo a 593 °C, a esta temperatura se observa como agua y revela el brillo metálico de la superficie inferior, entonces podemos decir que el metal base está listo con el calor suficiente para fundir el metal de aporte para el brazing. En la Tabla 2 se muestran la apariencia del fundente a diversas temperaturas.

Temperatura	Apariencia del fundente
100°C (212°F)	Termina la ebullición
315° C (600°F)	El fundente se vuelve blanco y levemente grumoso, y comienza "a trabajar."
425°C (800°F)	El fundente se impregna en la superficie y presenta una apariencia lechosa.
593°C (1100°F)	El fundente es completamente claro y activo, parece agua. La superficie del metal es brillante y visible en este punto, Si el metal de aporte se derrite, está en la temperatura apropiada para soldar

Tabla 2. Apariencia del fundente a diferentes temperaturas

El fundente es un paso esencial en la operación de brazing. Ciertamente hay algunas excepciones a la regla, se puede unir cobre - cobre sin fundente, usando un metal de aporte formulado especialmente para el trabajo, conocido como materiales de aporte cobre-fósforo. El fósforo en estas aleaciones actúa como agente fundente en el cobre, aparte se puede omitir el uso de fundente si se va a soldar en una atmósfera controlada.

Una atmósfera controlada es una mezcla de gases contenida en un espacio cerrado, generalmente en un horno para brazing. La atmósfera (tal como hidrógeno, nitrógeno o amoníaco disociado) envuelve totalmente el ensamble excluyendo el oxígeno, previniendo la oxidación. Incluso en atmósfera controlada, se puede usar una pequeña cantidad de fundente para mejorar la acción de la adherencia del metal de aporte en la junta. Como los metales son calentados, estos tienen una tendencia a reaccionar con oxígeno en el aire. Este proceso es llamado oxidación.

Para prevenir la oxidación que sucede durante el ciclo de brazing, una atmósfera de protección gaseosa o un flux o ambos, es usado para “proteger” las piezas, de esta manera la superficie no reacciona rápidamente con el oxígeno a altas temperaturas de brazing. Además las atmósferas de protección y los fundentes ayudan a:

1. Prevenir la oxidación durante el ciclo de calentamiento.
2. Disocia los oxidantes que se forman.
3. Mantiene las partes limpias durante el ciclo de brazing (el fundente o atmósfera de protección no es diseñado para la limpieza de las partes a unir sino para mantenerlas limpias).
4. El proceso de brazing por horno con atmósfera controlada puede eliminar la necesidad de fundente (Ver Tabla 3).

Clasificación AWS	Forma	Tipo de aporte	Actividad en rango de temperaturas
			°C
FB1-A	Polvo	BAISi	580-615
FB1-B	Polvo	BAISi	560-615
FB1-C	Polvo	BAISi	540-615
FB2-A	Polvo	BMg	480-620
FB3-A	Pasta	BAG y BCuP	565-870
FB3-C	Pasta	BAG y BCuP	565-925
FB3-D	Pasta	BAG, BCu, BNi, BAu y RBCuZn	760-1205
FB3-E	Líquido	BAG y BCuP	565-870
FB3-F	Polvo	BAG y BCuP	650-870
FB3-G	Slurry	BAG y BCuP	565-870
FB3-H	Slurry	BAG	565-925
FB3-I	Slurry	BAG, BCu, BNi, BAu y RBCuZn	760-1205
FB3-J	Polvo	BAG, BCu, BNi, BAu y RBCuZn	760-1205
FB3-K	Líquido	BAG y RBCuZn	760-1205
FB4-A	Pasta	BAG y BCuP	595-870

Tabla 3. Clasificación de fundentes con metales de aporte.

7.9.4 Ensamble para el brazing

Ya se menciono anteriormente que las piezas a soldar se limpian y se les aplica fundente. Ahora se tiene que tener una posición adecuada para soldar. Así mismo se debe asegurar que esta posición permanecerá en la alineación correcta durante los ciclos de enfriamiento y calentamiento del brazing y que la acción capilar hará su trabajo. Si la forma y el peso de las piezas lo permiten, la manera más simple de mantenerlas juntas es por gravedad como se observa esquemáticamente en la Figura 7.

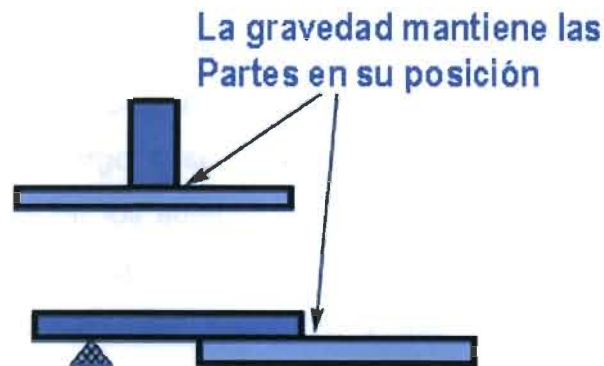


Figura 7. Sujetadores en ensambles para brazing.

Si se tiene un número de ensambles a soldar y su configuración es demasiado compleja para sujetarla por si sola, puede ser una buena idea utilizar un sujetador de ayuda para aplicar el brazing. Cuando se diseñe el sujetador se debe considerar que no sea de una gran masa y minimizar el contacto con las partes a unir. (Un sujetador en contacto con las partes a soldar conduce y extrae el calor de esa zona a través de si mismo.) El uso de pernos y cuchillas en los bordes reducen el contacto al mínimo. En la Figura 8 se muestra esquemáticamente los sujetadores con pernos o cuchillas.

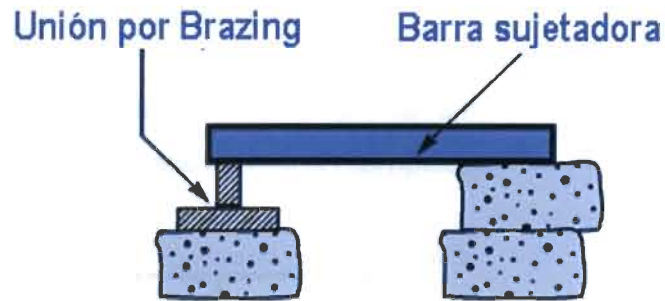


Figura 8. Sujetadores con pernos o cuchillas.

De preferencia se deben utilizar los materiales en los sujetadores con baja conductividad térmica, tales como acero inoxidable, inconel o cerámica. Puesto que éstos materiales son de baja conductividad térmica, extraen menos calor de la junta. Se deben elegir los materiales compatibles en cuanto a su velocidad de expansión para no alterar la alineación del ensamble durante el ciclo térmico. Sin embargo, si se está planeando soldar a centenares de juntas idénticas, debe diseñar los sujetadores adecuados e iguales para el proceso brazing. En la etapa de planeación inicial, se diseñan los dispositivos mecánicos que lograrán este propósito, y que se puedan incorporar en la operación de la línea de ensamble. Los dispositivos típicos incluyen prensas, costuras que se enclavijan o estampan (Ver Figura 9). Las esquinas puntiagudas se deben reducir al mínimo en estos ensambles mecánicos. Tales esquinas pueden impedir la acción capilar. Las esquinas se deben redondear levemente para ayudar al flujo del metal de aporte.



Figura 9. Sujetadores con soportes.

El dispositivo mecánico más simple es el mejor, puesto que solamente su función es juntar las piezas mientras que la unión se esta soldando. En la Figura 10 se muestran algunos de estos ejemplos.

El punto indica donde será aplicado el aporte

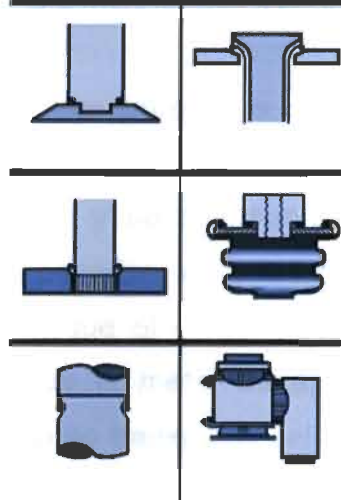


Figura 10. Ejemplos de sujetadores.

7.9.5 Soldadura brazing del ensamble

El quinto paso es la realización de la soldadura. Esto implica calentar el ensamble a soldar a la temperatura de brazing, y que el metal de aporte fluya a través de la unión.

Primero, el proceso de calentamiento. Como se ha visto en el brazing, el calor se aplica ampliamente al metal base. Si se está soldando un ensamble pequeño se puede calentar el ensamble completo y alcanzar el punto en el que el metal fluya, si se está soldando un ensamble grande se deberá calentar una amplia área alrededor de la unión.

El método de calentamiento mas utilizado en el proceso brazing es con flama sosteniendo la antorcha con una mano y el aporte con la otra.

Hay gran variedad de combustibles disponibles: gas natural, acetileno, propano, propileno, etc., a combinarse con oxígeno o aire. (La más común sigue siendo la mezcla oxy-acetileno.) Se tiene que tener presente que ambos metales de la unión se deben calentar lo más uniformemente posible y alcanzar la temperatura de brazing al mismo tiempo.

Cuando unimos secciones gruesas a una sección delgada la "pluma" de la flama puede ser suficiente para calentar la parte delgada. Se debe mantener la antorcha en movimiento y no calentar directamente la zona de brazing. Al ensamblar secciones pesadas, el fundente puede llegar a ser transparente - hasta 593°C antes de que el ensamble este completo y lo suficientemente caliente previo a recibir el metal de aporte. Algunos metales son buenos conductores y por lo tanto transportan el calor más rápidamente a áreas más frías. Otros son conductores pobres y tienden a conservar el calor y sobrecalentamiento fácilmente. Los buenos conductores necesitarán más calor que los conductores pobres, simplemente porque disipan el calor más rápidamente.

En todos los casos, para prevenir un calentamiento desigual se debe vigilar cuidadosamente el fundente. Si el fundente cambia en aspecto uniformemente, las piezas se están calentando de la misma manera, sin considerar la diferencia en masa o conductividad. Una vez calentado la junta a la temperatura de brazing, esta todo listo para depositar el metal de aporte.

En la soldadura brazing manual, todo esto implica un manejo cuidadoso de la varilla o alambre en la zona donde se esta soldando. El ensamble caliente fundirá la porción del metal de aporte la cual inmediatamente fluirá por la acción capilar a través del área de la junta.

Se puede agregar algo de fundente a la punta del alambre o varilla de aporte, alrededor 2" a 3" (51 mm a 76 mm) para mejorar el flujo, utilizando una brocha o sumergiendo el alambre en el fundente. Las piezas más grandes requieren mayor tiempo de calentamiento o donde el fundente haya sido saturado con más óxido lograda cepillando encendido o sumergiendo la barra en flujo. En piezas más grandes que requiere un tiempo de calentamiento más largo, cuando el fundente se ha saturado con mucho óxido, la adición de fundente nuevo en la varilla de aporte mejora el flujo y la penetración del metal de aporte en toda el área a unir. Sin embargo, hay una precaución pequeña a observar. El metal de aporte líquido tiende para fluir hacia áreas de una temperatura más alta. En el ensamble calentado la superficie del metal base exterior puede estar ligeramente mas caliente que la superficie interior de la junta. Hay que tener cuidado en depositar el metal de aporte en la parte adyacente a la junta, si se deposita lejos, tiende cubrir las superficies calientes en lugar de que fluya a la unión. Además, es mejor calentar al lado del ensamble del lado opuesto donde se va a alimentar el metal de aporte.

En el ejemplo anterior se calienta la superficie inferior de la placa más grande, de modo que el calor del metal de aporte baje completamente dentro de la unión. Es muy importante que el metal de aporte fluya hacia la fuente del calor como se observa esquemáticamente en la Figura 11.

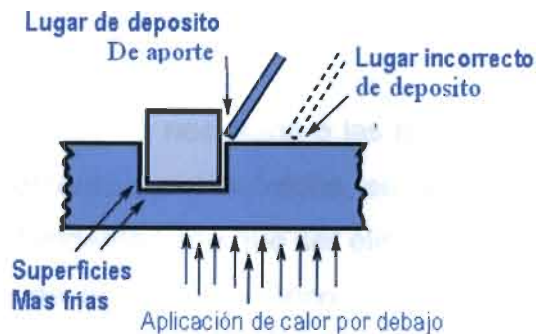


Figura 11. Ejemplo de aplicación de calor y del metal de aporte en el brazing.

7.9.6 Limpieza de la unión soldada.

Después de haber soldado el ensamble, este tiene que limpiarse. La limpieza es generalmente una operación de dos etapas:

1. Se retiran los residuos del fundente.
2. Se quita cualquier cascarilla del óxido formado durante el proceso brazing con ácido pícrico.

El retiro del fundente es una operación simple, pero esencial. (Los residuos del fundente son químicamente corrosivos y, si no se retiran, podrían debilitar ciertas juntas.) Puesto que la mayoría de los fundentes para soldar son solubles en agua, la manera más fácil de quitarlos es enfriar el ensamble en agua caliente (50°C o más caliente). La mejor opción es sumergir las piezas mientras siguen estando calientes, asegurándose que el metal de aporte ha solidificado totalmente antes de enfriarse.

Los residuos cristalinos del fundente se agrietarán y formarán escamas generalmente cuando la unión ya este fría. Si se dificulta su remoción, se utiliza un cepillo de alambre mientras que el ensamble todavía está en agua caliente. Se pueden utilizar métodos sofisticados para eliminar los residuos de fundente, por ejemplo un tanque de limpieza ultrasónica para apresurar la acción del agua caliente, o un flujo de vapor.

Cuando no se utiliza el fundente necesario o las piezas se han recalentado, el fundente se satura totalmente con los óxidos, se observa de un tono verde a negro. En este caso, el fundente tiene que ser eliminado utilizando una solución ácida suave. Un baño de ácido hidroclicórico del 25% (calentado a 60-70°C) disolverá generalmente los residuos más obstinados del fundente.

Simplemente se agita el ensamble soldado en esta solución por un lapso de tiempo de 30 segundos a 2 minutos. No es necesario cepillar. No obstante se debe tener precaución en las soluciones ácidas usadas en piezas o ensambles grandes, así que al enfriar en agua caliente en un baño ácido, se deben usar guantes y equipo de protección para la cara.

Después de que se haya conseguido eliminar el fundente, se utiliza una solución de ácido pícrico para quitar cualquier óxido que quede en las áreas desprotegidas de fundente durante el proceso de brazing. Las soluciones de ácido pícrico altamente oxidantes, y que contengan ácido nítrico, deben ser evitadas si es posible, pues atacan el metal de aporte de plata. Si es necesario se utiliza un tiempo de acción muy corto. Una vez que el fundente y los óxidos se quiten del ensamble soldado, las operaciones de acabado final son rara vez necesarias. En los pocos casos donde se necesita una ultra limpieza final se puede conseguir puliendo el ensamble con un esmeril de paño fino. Si los ensambles van a ser almacenadas para el uso posterior, se debe aplicar una capa protectora de una sustancia soluble en agua, resistente al moho.

7.10 Formatos (BPS)

Para procesos y operaciones de brazing se debe elaborar un procedimiento conforme lo es requerido en el estándar ANSI/AWS B2.2-91 "Standard for Brazing Procedure and Performance Qualification", donde se muestra una forma estándar en la cual se registran todos los parámetros utilizados durante el proceso como se puede observar en la Figura 12.

Form A1

BRAZING PROCEDURE SPECIFICATION (BPS)

BPS No. _____ Date _____ B PQR NO. _____

Company _____

Brazing Process _____ Manual Mechanized Automatic

Brazing Equipment _____

BRAZING CONDITIONS

BASE METAL:

Identification _____ BM No. _____

Thickness _____ Preparation _____

Other _____

FILLER METAL:

FM No. _____ AWS Classification _____

Form _____ Method of Application _____

FLUX: AWS Type _____ Other _____

ATMOSPHERE: AWS Type _____ Other _____

TEMPERATURE: _____ TEST POSITION: _____

TIME: _____ CURRENT: _____

FUEL GAS: _____ TIP SIZE: _____

POSTBRAZE CLEANING: _____

POSTBRAZE HEAT TREATMENT: _____

OTHER: _____

JOINT:

Type _____

Clearance _____

UTS _____

Other _____

Approved for production by _____ Employer

JOINT SKETCH

Figura 12. Formato Brazing de acuerdo al estándar ANSI/AWS B2.2-9.

Es importante recordar que existen metodologías para llevar a cabo un buen proceso de soldadura por brazing, aquí, nombramos una de ellas:

7.11 Diez reglas para un exitoso brazing con antorcha

- 1.- Leer cuidadosamente estas instrucciones antes de iniciar el proceso.
- 2.- Ser conciente de todos los daños potenciales asociados con el proceso que se va a iniciar.
 - a) Leer la hoja de información de salud y seguridad para cada metal de aporte y flux que se planea usar antes de iniciar el proceso
 - b) Asegurarse de seguir las reglas del Control de sustancias peligrosas para la salud
 - c) Si se tiene alguna duda con respecto al significado de lo que se lee, buscar al proveedor del aporte y flux.
- 3.- Asegurarse de que la estación de Brazing posea adecuada y efectiva ventilación.
 - a) Una eficiente ventilación del sistema ayudara en los resultados del Brazing
 - b) Nunca realizar el brazing en espacios confinados con ventilación restringida
 - c) No realizar el brazing con la cabeza directamente sobre la pieza de trabajo. Esta es una practica potencial de peligro que debe ser erradicada.
- 4.- Use solo partes limpias.
 - a) Asegurarse de que las piezas estén libres de aceite, suciedad, excesivo oxido y grasa. De ser así resultara en uniones no sanas y puede resultar en generación de humos durante el proceso.
 - b) Extremar precauciones si las piezas a unir tienen algún recubrimiento, es muy posible que dicho recubrimiento se erosione y de cómo resultado una unión no sana.

- c) Ser cuidadoso al trabajar con piezas que tengan recubrimiento de cadmio, estas generaran excesivos humos que perjudican seriamente la salud

5.- Escoger el correcto metal de aporte.

- a) Asegurarse de que el metal de aporte sea el correcto para el trabajo. Si se tiene duda, comunicarse con el proveedor.
- b) Checar el empaque de la aleación para identificar su contenido
- c) Poner atención en las advertencias y avisos del empaque

6.- Usar el flux correcto.

- a) Asegurarse de que el flux a usar es el recomendado.
- b) Aplicar el flux en la unión antes de iniciar el Brazing.
- c) Es recomendable que el material de aporte y el flux sean surtidos por el mismo proveedor.

7.- Maneja el flux con respeto.

- a) Los fluxes pueden ser tóxicos si se ingieren.
- b) Nunca usar fluxes viejos guardados en recipientes de te, café, azúcar, etc.
- c) Mantén el flux lejos del contacto con la piel y particularmente de raspones y heridas.
- d) Aplicar crema protectora en las manos antes de iniciar el Brazing.
- e) Lavar siempre las manos después de aplicar el flux

8.- Usar suficiente flux.

- a) Es vital el uso de suficiente flux para asegurar completa protección en la junta durante el ciclo.
- b) Si se usa demasiado flux, el flujo del metal de aporte fundido variara de pobre hasta cero.
- c) Flux extra puede ser aplicado a través de mojar una varilla de aporte y llevarlo a la unión. Si es necesaria esta practica, asegurarse de queel grado de flux sea el correcto.

- d) Si hay insuficiente presencia de flux, el charco no se protegerá adecuadamente del calor de la flama y resultara en la generación de humos excesivos que pueden perjudicar la salud.

9.- Caliente la pieza adecuadamente.

- a) Caliente el área de unión. Si las partes a unir tienen diferentes masas, es necesario calentar primero la parte mas pesada para asegurar que ambas partes lleguen a la temperatura de Brazing al mismo tiempo
- b) Caliente la junta gradualmente hasta que el flux se derrita, de esta manera se estará alcanzando la temperatura correcta del Brazing.
- c) Continuar calentando gradualmente las partes a soldar.
- d) Tocar con la carilla de aporte la unión, esta deberá fundirse por la conducción del calor desde los componentes, no por la aplicación de la flama.
- e) Nunca aplicar directamente la flama al metal de aporte. Esto causara humos que pueden ser peligrosos a la salud.
- f) Para asistencia en los criterios de temperatura nunca lleves el Brazing directo a la luz del sol u otras condiciones de extrema luminosidad.

10.- Si alguna de las 9 reglas anteriores no quedo clara, buscar ayuda con el proveedor de consumibles.

Algo de gran importancia que es necesario recordar es que en este proceso se están uniendo 2 materiales de diferentes características, es decir, a pesar de que ambos son aluminio, tienen diferente composición química. En la Tabla 4 se muestran algunas de las propiedades de aleaciones de aluminio

Material	Solidus (°C)	Liquidus (°C)	Comentarios
1070	640	655	Brazing sin problemas
1145	640	655	Brazing sin problemas
3003	643	654	Brazing sin problemas
3005	640	655	Precaución: El material puede contener arriba de 0.6% de magnesio
3102	645	655	Brazing sin problemas
3105	635	655	Precaución: El material puede contener arriba de 0.8% de magnesio y el mojado puede ser difícil
6061	616	652	Precaución: El material contiene entre el 0.8% y el 1.2% de magnesio y el mojado puede ser difícil pero no imposible
6063	616	652	Precaución: El material puede contener arriba de 0.9% de magnesio y el mojado puede ser difícil
6951	616	654	Precaución: El material puede contener arriba de 0.8% de magnesio y el mojado puede ser difícil

Tabla 4. Propiedades de algunas aleaciones de aluminio

8.

MATERIAS PRIMAS PARA EL BRAZING

8.1 Metales base

8.1.1 Aluminio 3003

La aleación de aluminio 3003 es fácilmente mecanizada y es considerada como una aleación de buena maquinabilidad entre las similares de aluminio. Es una aleación con muy buena resistencia a la corrosión. Esta aleación es fácilmente conformada tanto por trabajo convencional en frío como en caliente.

En la Tabla 5 se puede observar que el elemento principal de aleación es el Manganeso en concentraciones de hasta 1.5 % e.p. La Tabla 6 muestra algunas de las propiedades mecánicas del aluminio 3003 tales como esfuerzo de tensión, a la cedencia, dureza, entre otras.

Aleación	Composición Química (% e.p.)					
	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
3003	0.6	0.7	0.05-0.020	1.0-1.5	0.1	Resto

Tabla 5. Composición química de la aleación de aluminio 3003.

Aleación	Esfuerzo de Tensión		Esfuerzo de Cedencia		Elongación, %	Dureza	Esfuerzo Cortante	
	MPa	ksi	MPa	ksi		HB	MPa	ksi
3003	110	16	42	6	30 – 40	28	76	11

Tabla 6. Algunas propiedades mecánicas del aluminio 3003.

8.1.1.1 Aplicaciones

Las principales aplicaciones es donde el buen conformado, la buena resistencia a la corrosión o buena soldabilidad son las requeridas para este material, además donde la propiedad deseada es mayor esfuerzo que el propio del aluminio sin alear.

Las aplicaciones principales de esta aleación son:

- ❖ Componentes para aire acondicionado en la industria automotriz
- ❖ Latas de bebidas
- ❖ Utensilios de cocina
- ❖ Intercambiadores de calor
- ❖ Tanques de almacenamiento
- ❖ Señales de transito
- ❖ Aplicaciones arquitectónicas.
- ❖ Equipo químico
- ❖ Ductos
- ❖ Recipientes a presión
- ❖ Paneles para refrigeradores
- ❖ Líneas de gas
- ❖ Tanques de Gasolina y
- ❖ Piezas conformadas

8.1.1.2 Propiedades de diseño

El aluminio 3003 es una aleación con muy buena resistencia a la corrosión y resistencia moderada. No es tratable térmicamente y aumenta su resistencia solo con trabajo en frío.

8.1.1.3 Maquinabilidad

La aleación de aluminio 3003 es fácilmente mecanizada y es considerada como una aleación de buena maquinabilidad entre las similares de aluminio.

8.1.1.4 Conformado

Esta aleación es fácilmente conformada tanto por trabajo convencional en frío como en caliente.

8.1.1.5 Soldadura

La soldadura se realiza fácilmente por métodos convencionales. El metal de aporte es generalmente de la aleación de aluminio 1100. Cuando se sueldan otras aleaciones de aluminio con el 3003, tales como 5052, 6061 o 6062 el metal de aporte deberá ser aluminio 4043.

8.1.1.6 Trabajo en caliente

El rango de temperaturas para trabajo en caliente (como para la forja), es entre 260 y 510 °C

8.1.1.7 Trabajo en frío

La aleación de aluminio 3003 es fácilmente trabajada en frío por todos los métodos convencionales.

8.1.1.8 Otras propiedades físicas

40% de la conductividad eléctrica del cobre.

8.1.1.9 Microestructura

La figura 13 muestra una microestructura típica de una aleación de aluminio 3003 donde se puede ver la dispersión de partículas insolubles de (Fe, Mn) Al_6 (largas) y aluminio – magnesio – silicio (ambas, pequeñas y largas)

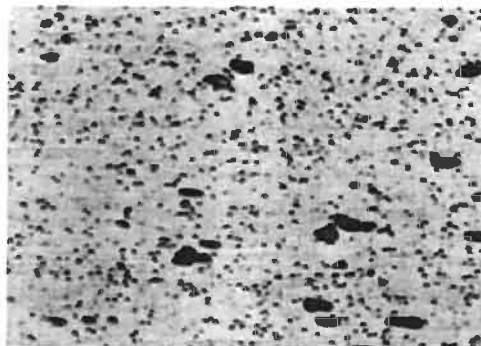


Figura 13. Microestructura típica del metal base 3003

8.1.2 Aluminio 6061

Esta aleación es fácilmente trabajada en frío y conformada en condición recocida. Se pueden realizar fácilmente los procesos de estampado, doblado, repujado o embutido profundo, usando métodos estándar.

Este tipo de aleaciones contienen silicio y magnesio en cantidades necesarias para formar siliciuro de magnesio (Mg_2Si), lo que los hace térmicamente tratables.

Tienen buena capacidad para conformarse, soldarse y maquinarse, además poseen buena resistencia a la corrosión con esfuerzos medios.

Las aleaciones de este grupo pueden ser tratadas térmicamente en T4 (tratamiento térmico de solubilizado sin precipitación) y aumentar su esfuerzo a través de un tratamiento de precipitación T6.

Esta es probablemente la aleación de aluminio tratable térmicamente, de mayor disponibilidad.

Esta aleación es empleada comúnmente en la manufactura de:

- ❖ Estructuras pesadas
- ❖ Componentes de camiones y barcos,
- ❖ Vagones de trenes,
- ❖ Accesorios de tanques,
- ❖ Aplicaciones estructurales y de alta presión,
- ❖ Alambres y tuberías.

8.1.2.1 Aluminio 6061 T6

Esta aleación encuentra una gran aplicación en la industria automotriz para la fabricación de componentes para aire acondicionado.

Este grupo contiene productos que no son trabajados en frío después de un tratamiento de solubilizado, por lo que sus propiedades mecánicas y estabilidad dimensional son proporcionadas por un tratamiento térmico de precipitación.

En la Tabla 7 se muestra la composición química de la aleación de aluminio 6061 T6 y en la Tabla 8 se pueden observar las propiedades mecánicas del aluminio 6061 T6. En comparación con las propiedades del aluminio 3003, el aluminio 6061 T6 tiene un esfuerzo a la tensión mayor, un esfuerzo de cedencia también mayor pero tiene menor % de elongación.

Aleación	Composición Química (% e.p.)							
	Si	Mn	Mg	Cr	Al	Cu	Fe	Zn
6061-T6	0.40-0.80	0.28	0.8-1.2	0.04-0.35	Resto	0.15-0.40	0.7	0.25

Tabla 7. Composición química de la aleación de aluminio 6061-T6.

Aleación	Esfuerzo de Tensión		Esfuerzo de Cedencia		Elongación, %	Dureza	Esfuerzo Cortante	
	MPa	ksi	MPa	ksi		HB	MPa	ksi
6061 T6	310	45	276	40	12	95	207	30

Tabla 8. Propiedades mecánicas del aluminio 6061 - T6.

8.1.2.2 Propiedades de diseño

Esta es probablemente la aleación de aluminio tratable térmicamente de mayor disponibilidad.

8.1.2.3 Maquinabilidad

La maquinabilidad en los endurecimientos T4 y T6 es buena. Es significativamente más difícil mecanizar en condición de recocido.

8.1.2.4 Conformado

Fácilmente trabajada en frío y conformada en condición recocida. Se pueden realizar fácilmente los procesos de estampado, doblado, repujado o embutido profundo usando métodos estándar.

8.1.2.5 Soldadura

La aleación tiene muy buenas características de soldabilidad y puede ser soldada por todas las técnicas comunes de soldadura. Para secciones delgadas (menores a 0.032"), se usa generalmente la soldadura de arco con tungsteno y gas, y la soldadura metálica de arco con gas se emplea en secciones gruesas.

8.1.2.6 Tratamiento térmico

Esta aleación se trata térmicamente por solución a 532 °C por un tiempo adecuado para permitir el calentamiento de toda la sección transversal y después se enfría en agua.

8.1.2.7 Otras propiedades físicas

40% de la conductividad eléctrica del cobre.

8.1.2.8 Otras propiedades mecánicas

La resistencia al cortante para endurecimiento T6 es 30 Ksi

8.1.2.9 Microestructura

La microestructura típica de la aleación 6061-T6 se muestra en la Figura 14 la cual consiste de dos fases en la estructura del material, una fase α rica en aluminio la cual es dúctil y suave y una fase oscura correspondiente a la fase β , la cual es una fase intermetálica dura y frágil de Mg_2Si .

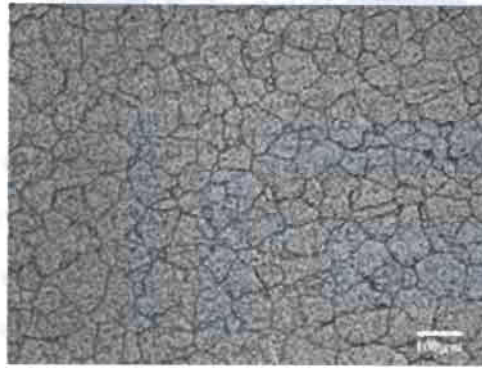


Figura 14 Microestructura típica del metal base 6061-T6.

Se puede observar que ambos materiales tienen las características necesarias para poder ser utilizados en el proceso, a continuación se describirá el efecto del magnesio del metal base y en las etapas del brazing.

8.1.3 Efecto del magnesio del metal base en el proceso brazing

Cuando el material base tiene contiene magnesio, existen severos problemas en el proceso. El magnesio es agregado al aluminio con el fin de aumentar su esfuerzo y dar maquinabilidad, en algunos materiales de la serie 6000 la cantidad agregada es cerca de 1%. A temperaturas arriba de 400 °C el magnesio tiende a migrar a la superficie del material donde reacciona con la capa de óxido de aluminio formando óxido de magnesio (MgO) y un óxido de aluminio-magnesio complejo (Al_2MgO_4).

En los procesos brazing el magnesio también reacciona con el flux para formar una serie de sales de Fluor-Magnesio (MgF_2 , $KMgF_8$ y K_2MgF_4).

Debido a esto la composición del flux cambia causando un incremento en su temperatura de trabajo.

En el caso de la migración de magnesio, la superficie del material también sufre un cambio en su composición y el nuevo material tiene un alto grado de oxidación.

Todos estos efectos se combinan para causar una contaminación del flux que reduce significativamente su efectividad. Estos efectos aumentan sustancialmente el nivel de porosidad y discontinuidades en la junta como se puede observar en las Figuras 15 y 16

Nótese en la figura 15 como al aumentar en un 0.3% la cantidad de Magnesio en el metal base se disminuye la aceptabilidad de la pieza. Es por esto que, como resultado de los problemas mencionados, se sugiere que cuando se emplean fluxes estándar no corrosivos, el contenido total de magnesio del material debe tener los siguientes límites.

1. Para uso en atmósfera controlada en brazing al horno : entre 0.4% y 0.5 %
2. Para uso con calentamiento con flama o inducción: máximo superior de 1.5%.

Los métodos estándar para contrarrestar los problemas de magnesio son:

- 1.- Incrementar la carga de flux llevada al ensamble
- 2.- Reducir el ciclo de brazing
- 3.- Implementar promedios de calentamiento mas rápidos

Los mejores resultados son reportados hasta ahora al usar fluxes para brazing de aleaciones de aluminio con un contenido de Magnesio entre 0.6% y 0.8%. Los efectos al usar estas cantidades se mencionan a continuación:

- ✓ Pocos defectos en las uniones comparados con un flux convencional
- ✓ Menos porosidad en el área de junta
- ✓ Mejor acabado en la superficie de unión
- ✓ Cargas de flux sin tanta variabilidad
- ✓ Ciclos de brazing mas uniformes

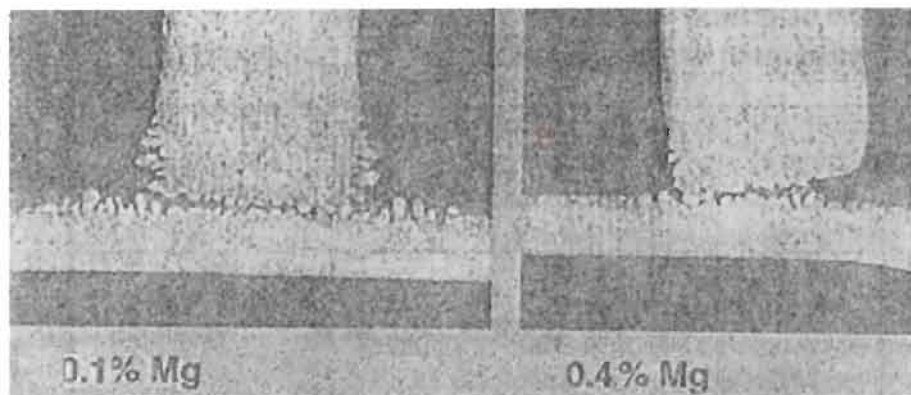


Figura 15. Disminución de la aceptabilidad de junta debido al incremento del porcentaje del magnesio en el material base



Figura 16. Discontinuidades y porosidades debidas a la presencia del magnesio en el metal base

En la Tabla 9 se muestra la facilidad de someter algunas aleaciones de aluminio al proceso brazing y algunos comentarios en cada caso.

Metal	Brazeabilidad	Comentarios
Serie 1000	Buena	Sin problemas
Serie 3000	Buena	Sin problemas
Serie 5000	Limitada	Las dificultades del brazing se incrementan cuando el contenido de magnesio es superior a 0.7%
Serie 6000	Buena (ver comentarios)	Precaución: hay una perdida de esfuerzo a la tensión, checar siempre la temperatura de solidus del material; el envejecimiento después del brazing es una posibilidad
Serie 2000	No recomendada	El brazing resulta en un deterioro metalúrgico irreversible en el material
Serie 7000		
Fundición	Puede ser muy difícil	Brazing con BS EN1044 del tipo al104 es imposible, es mejor tratar con BS EN1044 del tipo al201 aunque probablemente el resultado sea no Satisfactorio

Tabla 9. Brazeabilidad de algunas series de aleaciones de aluminio.

8.2 El material de aporte

El material de aporte principal usado para el brazing de las aleaciones de aluminio consideradas en el presente trabajo son las aleaciones Al-Si. Este grupo se usa para unir aluminio de los grados 1060, 1100, 1350, 3003, 3004, 3005, 5005, 5050, 6053, 6061, 6951 y las aleaciones coladas A712.0 y C711.0. Todos estos tipos se prestan a la soldadura brazing en horno y por inmersión, y algunos de ellos también pueden soldarse en brazing con soplete empleando uniones traslapadas en lugar de uniones a tope.

Las láminas o tubos para soldadura brazing son fuentes útiles de metal de aporte de aluminio y un recubrimiento de metal de aporte con más bajo punto de fusión. Los recubrimientos son aleaciones aluminio-silicio, aplicadas a uno o ambos lados de la lámina. Con frecuencia se utiliza lámina para soldadura brazing como uno de los miembros de un ensamble; el otro miembro se fabrica con una aleación soldable en brazing sin revestimiento.

El recubrimiento de la lámina o tubo para soldadura brazing se funde a la temperatura de soldadura brazing y fluye por atracción capilar y la acción de la gravedad hasta llenar las uniones.

Para el caso de la empresa Cooper Std. la presentación de este aporte es en forma de anillo (o'ring) con medidas de 0.515 pulg. de diámetro exterior x 0.050 pulg. de espesor como se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Presentación en forma de o'ring del metal de aporte empleado en la empresa Cooper Std.

Las Tablas 10 y 11 muestran la composición química y las propiedades del aporte aluminio – silicio pertenecientes al grupo BAISi-4 según la clasificación de la AWS.

Aleación	Composición Química (% e.p.)						
	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Mn	Al
Material de aporte BAISi-4	11.0-13.0	0.30	0.10	0.80	0.20	0.15	Resto

Tabla 10. Composición química del aporte usado en aleaciones de aluminio.

Aleación	Propiedades			
	Clasificación AWS	Solidus	Liquidus	Rango de Temperatura para el brazing
Material de aporte	BAISi-4	577°C	582°C	582°C-604°C

Tabla 11. Temperaturas usadas en el brazing con el aporte BAISi-4

Nota: Materiales de aporte del tipo BAISi-4 son recomendados para usarse con flux.

8.3 El flux utilizado en el brazing

El flux siempre será necesario cuando el brazing de aluminio esta expuesto al aire. Su uso asegura que las superficies de la unión estén libres de óxidos debidos al mojado del metal de aporte fundido.

Si el gap capilar es muy pequeño, no habrá suficiente flux para disolver las capas de óxido presentes en el trabajo.

De manera alternativa las propiedades del flux como rango de fusión, viscosidad y tensión superficial pueden cambiar y con esto no ser suficientes para evitar la capa de óxido en la unión.

Los siguientes puntos dan un resumen de algunas situaciones que puedan presentarse:

1. La cantidad de erosión del metal base debido al aporte es potencialmente alta.

2. La temperatura de liquidus del metal crece tanto como la disolución de aluminio desde el sustrato en el cual fluye.
3. Solidificación prematura de la aleación en la junta es experimentada comúnmente.
4. Debido a la reducción progresiva en la fluidez experimentada por la aleación durante el proceso de brazing, los fluxes no pueden fácilmente actuar en uniones estrechas debido al avance del material fundido y tienden a quedar atrapados dentro de la junta.
5. Debido a los anteriores puntos es probable que el resultado final del proceso sea una junta parcialmente llenada.
6. La ventana del proceso es muy estrecha, lo que significa que un control preciso de la temperatura de brazing es fundamental para un exitoso proceso.

8.3.1 Composición del flux

8.3.1.1 Nombre comercial

Al-FLUX 0726/2zG. Flux-Orgánico en pasta para el brazing de materiales de Aluminio

8.3.1.2 Tipo de sustancia

Pasta de soldadura brazing de aluminio compuesta del metal de aporte en polvo AlSi12 (DIN 8511), fundente cab al-flux 2805 (tipo: f-lh2 según la norma alemana DIN 8511) y una sustancia portadora orgánica.

8.3.1.3 Ingredientes

Mezcla de LiCl, NaCl, KCl, complejos e inorgánicos fluoruros más un agente orgánico

8.3.1.4 Componentes

Potasio Tetrafluoruro de Aluminato:

Mezcla de Glicol (Portador Orgánico):

Metal de Aporte en Polvo AlSi12

La Tabla 12 muestra algunos de los principales tipos de flux utilizados con varios materiales de aporte utilizados en el brazing de aleaciones de aluminio.

No. AWS Flux para Brazing	Material Base recomendado	Metal de Aporte recomendado	Rango de Temperaturas recomendado, °C	Constituyentes
1	Todas las aleaciones de Aluminio	BAISi	371 - 643	Cloratos Fluoratos
2	Todas las aleaciones de Magnesio	BMg	482 - 649	Cloratos Fluoratos
3A	Cualquiera, excepto los listados en 1, 2 y 4	BCuP, Bag	566 - 871	Ácido Bórico Boratos Fluoratos Fluoroboratos Agente para el mojado
3B	Cualquiera, excepto los listados en 1, 2 y 5	BCu, BCuP, BAg, BAu, RBCuZn, BNi	732 - 1149	Ácido Bórico Boratos Fluoratos Fluoroboratos Agente para el mojado
4	Aluminio Bronce Aleaciones con base Níquel - Hierro que contengan Al o Ti	BAg, BCuP (Solo aleaciones con base Cobre)	566 - 871	Cloratos Fluoratos Boratos Agente para el mojado
5	Cualquiera, excepto los listados en 1, 2 y 4	Mismo que 3B (excluyendo desde BAg-1 hasta BAg-7)	760 - 1204	Bórax Ácido Bórico Boratos Agente para el mojado

Tabla 12. Tipos de flux para brazing de aleaciones de aluminio.

9.

VARIABLES Y PARAMETROS DEL PROCESO

Como ya se había explicado, el proceso de torch brazing usado en la empresa Cooper Std., se requiere para la unión de dos elementos de aluminio, uno de ellos es aluminio 3003 (tubing) y el otro es aluminio 6061-T6 (bloque). En la Figura 18 se muestra la pieza terminada que ha sido manufacturada en la empresa, ya lista para embarque.

Con el fin de conocer un poco más sobre los materiales que son unidos por dicho proceso, se explicarán de manera breve las características de cada uno de ellos antes de entrar de lleno en el proceso. Es importante también comentar que se incluyen además las características del metal de aporte que se esta usando (Aluminio al Silicio BAISI-4).

En la Figura 19 se muestra el diagrama de flujo de la empresa Cooper Std para el proceso de torch brazing, es importante observar en forma general el proceso antes de iniciar con la explicación.



Figura 18. Pieza lista para embarque.

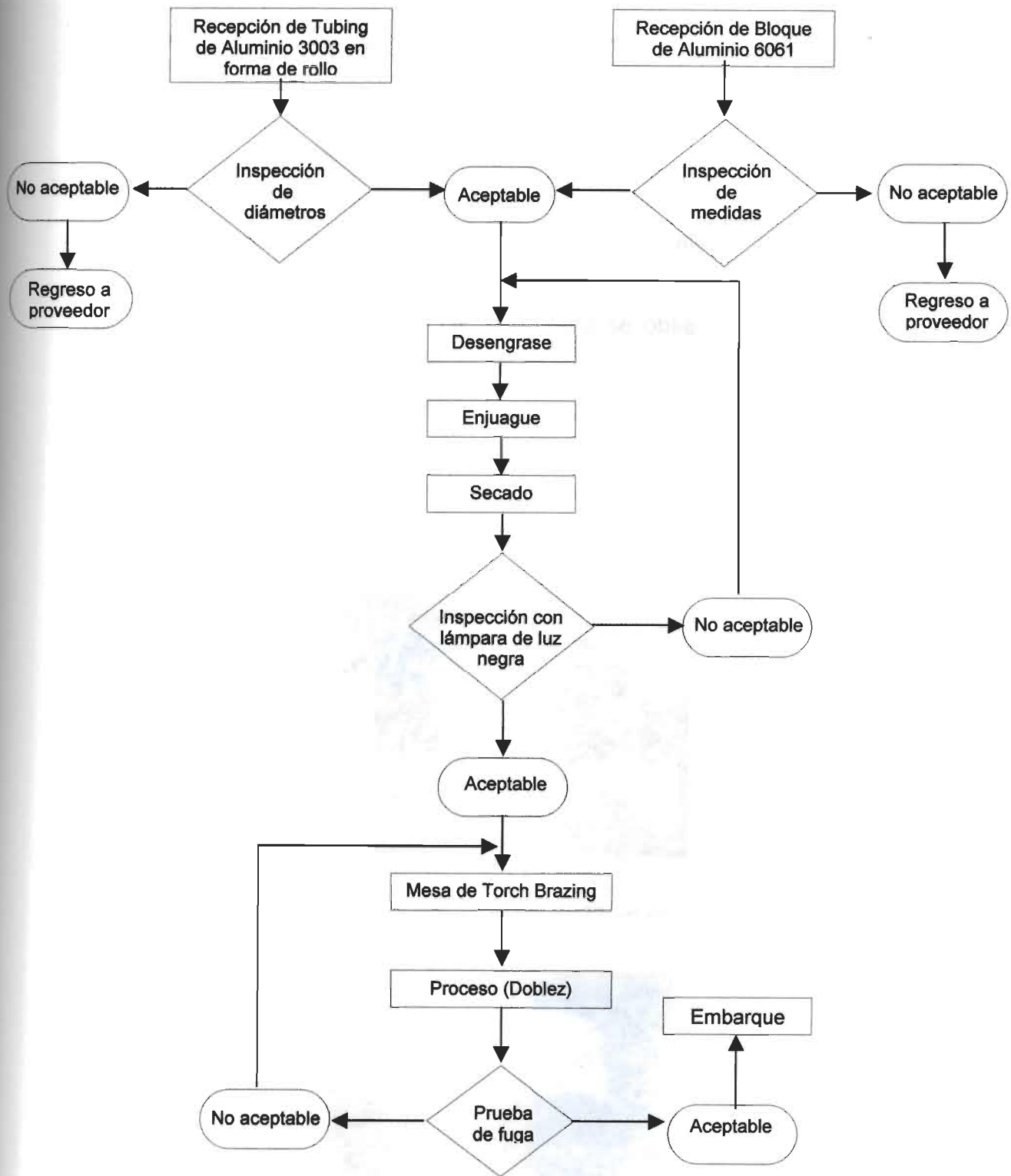


Figura 19. Diagrama de flujo del proceso brazing en la planta.

A continuación se describirá brevemente en que consiste cada una de estas etapas.

9.1 Recepción de materia prima

El proceso comienza en la recepción de la materia prima de ambos componentes. El Tubing de aluminio 3003 es enviado por el proveedor y recibido en la planta en forma de rollo como se observa en la Figura 20. El bloque de aluminio 6061 es recibido en su forma original, como se puede ver en la Figura 21, listo para ensamblarse si necesidad de maquinar o modificar su estructura. En esta etapa se inspecciona la apariencia en ambos materiales, diámetros (exterior e interior) y espesor para el tubing y con respecto al bloque se inspecciona que sus medidas en general esten dentro de tolerancia.



Figura 20. Material 3003 en rollo.



Figura 21. Bloque 6061.

9.2 Corte

Debido a que el tubing es recibido en forma de rollo, es necesario enderezarlo y cortarlo a medida. El rollo es llevado al área de corte, donde es seccionado de acuerdo a las dimensiones deseadas, en una maquina cortadora de tubo automática. Cuando entra el tubing de aluminio en la maquina de corte, éste es enderezado mediante una serie de rodillos como se puede observar en la figura 22. Una vez cortada la sección deseada de tubing, ésta se acomoda y almacena en un carro para ser transportada a la siguiente estación como se puede apreciar en la Figura 23. Cabe señalar que en este punto solo se hace muestreo para verificar el largo del corte.



Figura 22. Serie de rodillos para enderezado



Figura 23. Carro – Almacen de tubing.

9.3 Limpieza de los componentes

Una vez cortadas las piezas, éstas junto con los bloques pasan al área de lavado donde son introducidas (en lotes por separado) en una lavadora industrial con agua previamente tratada y mezclada con jabón alcalino líquido, con la finalidad de limpiar las piezas de grasa, polvo, tierra, u otros agentes, después se procede a enjuagarlas.

Al término del lavado y enjuagado las piezas son llevadas a una secadora la cual extrae toda el agua y humedad que pudieran contener las piezas seccionadas.

La Figura 24 muestra tres tinas en las cuales se lleva a cabo de manera sucesiva la limpieza de los componentes. Este proceso consta de 3 etapas:

1. La primera tina sirve como desengrase del material y éste es lavado con jabón alcalino.
2. La segunda tina sirve como enjuague por medio de agua tratada (pasada a través de filtros) sin residuos de cloro para no perder brillo ni color del material.
3. Y la tercera tina es un secado con aire caliente que extrae toda la humedad que pudiera quedar.



Figura 24. Tinas de desengrase, enjuague y secado

9.4 Inspección

En esta etapa se hace un muestreo para la inspección de las piezas lavadas, tal inspección se lleva a cabo en un cuarto oscuro por medio de lamparas de luz negra que ayudan a detectar la suciedad, polvo grasa, etc., que se pudiera quedar en los componentes.

9.5 Proceso de torch brazing

Una vez limpio, el material es llevado a la mesa de torch brazing donde deberá ser soldado. En esta etapa el operario toma un bloque de 6061 y lo coloca en el fiixture de la mesa, coloca el anillo de soldadura y una vez hecho lo anterior, fija el tubing sobre el bloque, en este momento el carrusel gira, detecta pieza y aplica el flux en forma de slurry. A continuación el carrusel vuelve a girar y la pieza pasa por varias estaciones de antorchas las cuales por medio de la flama calienta el flux, la pieza y funde el material de aporte.

Al término de estas estaciones el material es enfriado y limpiado por agua para quitar los residuos de soldadura.

La mesa de torch brazing construida en forma de carrusel con capacidad para 12 estaciones se muestra la Figura 25. Es una mesa giratoria donde en cada una de las estas se coloca el ensamble y se programan desde los tiempos por cada estación hasta la cantidad de flux y presion de aplicación del mismo.

Este proceso, se lleva a cabo calentando con 8 pares de sopletes de gas distribuidos es 4 estaciones. Dependiendo de la temperatura y de la cantidad de calor requerida, el gas combustible (acetileno, propano, gas natural, etc.) se puede quemar con aire, aire comprimido u oxígeno.

Los sopletes de aire-gas natural usados en esta mesa son los que producen la temperatura de flama más baja y también el mínimo de calor. Lo bajo de la temperatura reduce la posibilidad de sobrecalentar el ensamble durante la soldadura.

El metal de aporte se coloca previamente en la unión y se cubre con flux antes del calentamiento.



Figura 25. Mesa de torch brazing

Primero se debe aplicar calor a la unión para que se funda el flux, seguido por el metal de aporte que entonces fluye al interior de la unión. Es preciso evitar el sobrecalentamiento del metal base y del metal de aporte, ya que este último podría difundirse con rapidez y salir de la unión bajo la acción de la gravedad. El gas natural es adecuado para la soldadura brazing con soplete porque la temperatura relativamente baja de su flama reduce el peligro del sobrecalentamiento.

Algo digno de llamar la atención es que en esta operación el calor primero se aplica directamente sobre el flux, y después gradualmente va aplicándose más abajo sobre la pieza de mayor masa como se puede ver en la Figura 26.

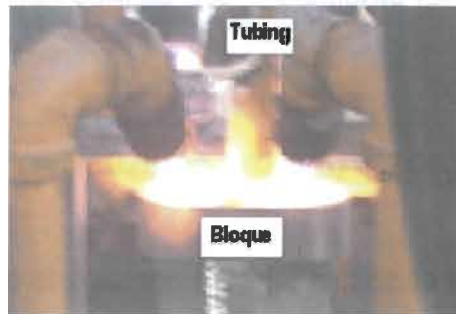


Figura 26. Aplicación de flama directamente sobre el flux

La pieza una vez que ha pasado por las 4 estaciones de calor, se enfría por medio de aire y después por un baño de agua donde se limpia la pieza de los residuos de soldadura.

9.5.1 Metal de aporte

Como ya se mencionó anteriormente el metal de aporte utilizado para unir ambos componentes es un anillo de soldadura (tipo o'ring) con un nombre comercial de Al718 pero que corresponde con el BAlSi-4 descrito anteriormente. En este paso, el operario coloca las 2 piezas de aluminio y las sujeta en el fixture,

Algo importante de mencionar es que el gap utilizado en este proceso de ensamble esta entre 0.003" y 0.004".

Para obtener la relación de llenado, se procedió a determinar el volumen del anillo (tipo o'ring) para el cual se usó la siguiente fórmula:

$$V = \pi r^2 \times \pi d \quad (1)$$

$$V = \pi (.025)^2 \times \pi (0.515) = \underline{0.0031767 \text{ in}^3}$$

También calculamos el volumen a llenar midiendo la pieza y obtuvimos:

$$V = \text{Largo} \times \text{gap} \times \text{altura} \quad (2)$$

$$V = 1.5865 \times 0.006 \times 0.25 = \underline{0.0023798 \text{ in}^3}$$

Después calculamos la relación de llenado y pudimos observar que:

$$\text{Relación de llenado} = \text{Volumen del anillo} / \text{Volumen a llenar} \quad (3)$$

$$\text{Relación de llenado} = 0.0031767 \text{ in}^3 / 0.0023798 \text{ in}^3$$

$$\text{Relación de llenado} = \underline{1.334}$$

Es decir, existe un excedente de soldadura de un 33 %.

Con estos valores se hicieron cálculos y se encontró que el gap recomendado para este ensamble es de 0.008".

La Tabla 13 muestra los claros recomendados para diferentes tamaños de junta para diferentes metales de aporte utilizadas para el brazing de aleaciones de aluminio.

Metal de Aporte Clasificación AWS	Holgura de Junta, (En Pulgadas)
Grupo BAISi	0.000 - 0.002 para brazing al horno con atmósfera al vacío y brazing con baño de sales 0.002 - 0.008 para un largo de traslape menor a 0.25 pulgadas 0.008 - 0.010 para un largo de traslape mayor a 0.25 pulgadas
Grupo BCuP	0.001 - 0.005 para brazing con y sin flux con un largo de junta menor de 1 pulgada 0.007 - 0.015 para brazing con y sin flux con un largo de junta mayor de 1 pulgada
Grupo BAg	0.002 - 0.005 para flux de brazing 0.000 - 0.002 para atmósfera brazing
Grupo BAu	0.002 - 0.005 para flux de brazing 0.000 - 0.002 para atmósfera brazing
Grupo BCu	0.000 - 0.002 para atmósfera brazing
Grupo BCuZn	0.002 - 0.005 para flux de brazing
BMg	0.004 - 0.010 para flux de brazing
Grupo BNi	0.002 - 0.005 aplicaciones en general (Flux / atmósfera) 0.000 - 0.002 tipos libres de fluidez, atmósfera brazing

Tabla 13. Gap recomendado para los diferentes tipos de metales de aporte

9.5.2 Flux

Ya colocado el material en el fixture, el carrusel gira y en la siguiente estación un sensor detecta la pieza y un dosificador aplica el flux al ensamble en forma de slurry (pasta) las cantidad de flux es facilmente programable, y para este ensamble aplica 0.3782 gr. con una tolerancia de ± 0.0001 gr. a una presión de 72 Psi con un tiempo de inyectado de 0.09 segundos

9.5.3 Calentamiento de la pieza

La mesa cuenta con cuatro estaciones para el calentamiento y fusión del metal de aporte, en la Figura 27 se muestran éstas cuatro etapas y los lugares en los cuales se aplica la flama, empezando en la parte superior del ensamble (lugar donde esta el flux) hasta la parte baja del componente con mayor masa (bloque).

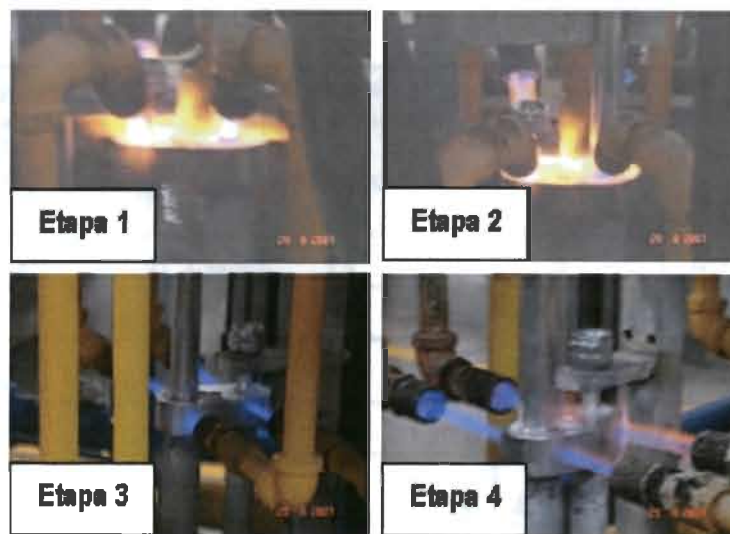


Figura 27. Aplicación de calor en las estaciones de flama

Al llegar a la ultima estación de flama el flux pasa por sus diferentes etapas con respecto a la temperatura (Ver Tabla 2) y el metal de aporte ha sido fundido, lo que resulta en la union soldada por brazing.

9.5.4 Tipo de gas utilizado

El tipo de gas utilizado en este proceso es gas natural el cual es utilizado para llevar a la temperatura de fusión el metal de aporte, esto con temperaturas de llama hasta aproximadamente de 2774 °C, el gas natural tiene un poder calorífico de 1050 BTU/ft³.

En la Tabla 14 se muestran algunas características del gas natural.

Gas de combustión	Fórmula	Gravedad Especifica 15.6°C (60 °F) Aire = 1	Volumen por unidad de masa (15.6 °C)		Cantidad de Oxígeno por unidad de gas	Temperatura de la flama para el Oxígeno		Primario		Secundario		Total	
			m ³ /kg	ft ³ /lb		°C	°F	MJ/m ³	BTU/ft ³	MJ/m ³	BTU/ft ³	MJ/m ³	BTU/ft ³
Acetileno	C ₂ H ₂	0.906	0.91	14.6	2.5	3087	5589	19	507	36	963	55	1470
Propano	C ₃ H ₈	1.52	0.54	8.7	5	2526	4579	10	255	94	2243	104	2498
etil - Acetileno propano (MPS)	C ₃ H ₄	1.48	0.55	8.9	4	2927	5301	21	571	70	1889	91	2460
Propileno	C ₃ H ₆	1.48	0.55	8.9	4.5	2900	5250	16	438	73	1962	89	2400
Gas Natural (Metano)	CH ₄	0.62	1.44	23.6	2	2538	4600	0.4	11	37	989	37	1050

Tabla 14. Características de algunos gases de combustion

9.5.5 Enfriamiento y limpieza

Al finalizar la etapa donde el material ha sido soldado, el ensamble pasa a través de un enfriador el cual aplica agua a la pieza para disminuir su temperatura, enfriarla y eliminar residuos de soldadura.

9.5.6 Tiempo de ciclo

Es importante explicar que existen 2 tiempos que nos dan el tiempo de ciclo, uno es el tiempo que tarda la pieza en cada estación y el otro es el tiempo en que tarda la pieza en pasar de una estación a otra.

Para este trabajo en específico se ha establecido un tiempo de ciclo de 8.5 segundos ya que la pieza tarda 6.5 segundos en cada estación y el traslado de la pieza entre estaciones adyacentes es de 2 segundos.

Si queremos obtener la cantidad de piezas por hora:

$$\text{Piezas por hora} = 3600 \text{ seg} / \text{ tiempo de ciclo} \quad (4)$$

$$\text{Piezas por hora} = 3600 \text{ seg} / 8.5 \text{ seg} = 423 \text{ piezas por hora}$$

$$\text{Piezas por turno} = 423 \times 8 \text{ hrs} = 3384 \text{ piezas}$$

La Tabla 15 muestra los trabajos de cada estación en la mesa rotatoria para el proceso de soldadura torch brazing de Cooper Std.

No Estación	Actividad
1	Carga de Ensamble
2	En Espera
3	Aplicación de Flux
4	En Espera
5	Pre calentamiento
6	Pre calentamiento
7	Pre calentamiento
8	Fin de Brazing
9	Aire a presión
10	Enfriamiento con agua
11	Descarga
12	En Espera

Tabla 15. Actividades de cada estación en la mesa de torch brazing.

En la Figura 28 se muestra el perfil ideal que debe tomar un proceso de torch brazing en una mesa rotatoria. Las 5 estaciones mostradas son a partir de la primera de pre calentamiento hasta la de enfriamiento por aire.

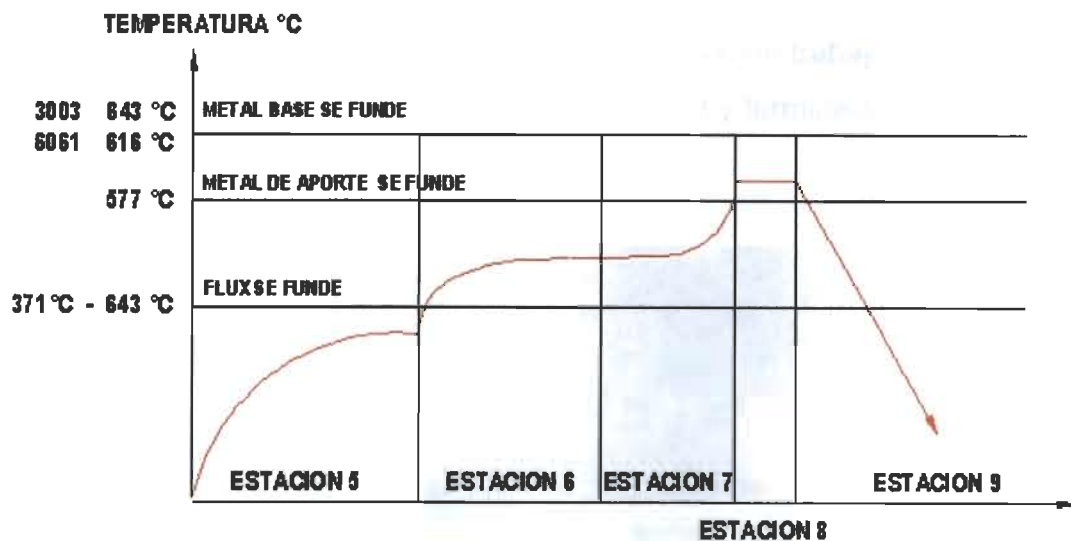


Figura 28. Perfil ideal de temperaturas en la mesa de torch brazing

9.6 Doblez

El material ya soldado se lleva a otro proceso en donde se deforma para darle sus medidas exactas y su acabado final.

En la primera etapa mostrada en la Figura 29, se deforma el extremo del tubing en una prensa y queda lista en sus dimensiones.

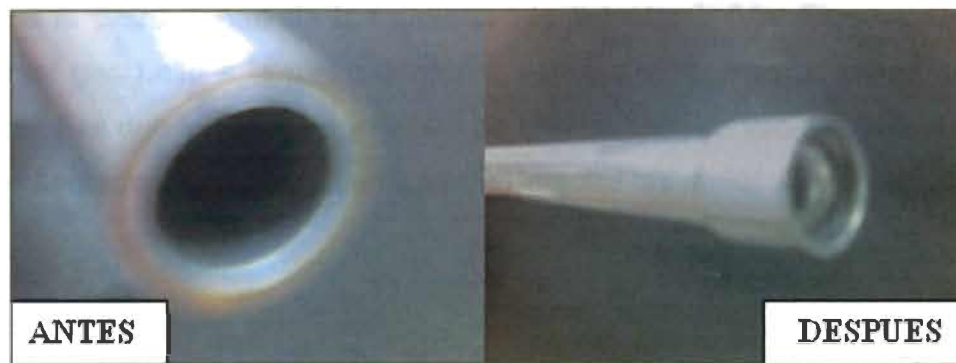


Figura 29. Deformación del extremo del tubing

Enseguida las piezas son llevadas a otra estación de trabajo la cual se muestra en Figura 30 donde se procede a doblar la pieza y terminarla completamente en cuanto a sus dimensiones.



Figura 30. Estación de deformación final

9.7 Prueba de fuga

Como ya se había mencionado, la pieza esta aprobada en cuanto a sus medidas, solo falta realizar una prueba de fugas, porque, como recordaremos esta pieza es un componente automotriz que conduce gas para el sistema de refrigeración, por lo tanto se realiza una prueba de fuga con gas helio para detectar moléculas de este gas en una cámara de vacío.

Se coloca la pieza dentro de la maquina " leak tester ", (Ver Figura 31) se le hace pasar gas helio a la pieza debido a que las moléculas de este gas son mas pequeñas que las del aire y dentro de una cámara de vacío existen ciertos sensores llamados " sniffers " capaces de detectar las moléculas de dicho gas.



Figura 31. Máquina Leak tester utilizada para prueba de fugas.

Un caso que requiere especial atención y es digno de mencionarse es aquel en el cual se tomaron 2 piezas aprobadas por control de calidad de Cooper Std. a las cuales se les hicieron ciertas pruebas entre las que están:

- 1.- Inspección visual (completo llenado)
- 2.- Prueba de fuga con helio (probada en leak tester)
- 3.- Macro ataque después del pulido y atacado con ácido fluorhídrico al 3%.

Entre los resultados hallados se pudo encontrar que a simple vista la pieza se observa con un completo llenado y en buenas condiciones de apariencia, lo que hace que la primera prueba sea superada.

Al llevarla a la prueba de fuga la máquina que realiza tal prueba aprobó la pieza, por lo que se puede decir que la segunda prueba fue también superada. Y por último en la prueba 3 la pieza fue seccionada, pulida y sometida a un macroataque con ácido fluorhídrico al 3% y al observar la metalografía la cual se muestra en la Figura 32, se observa una falta de llenado del metal de aporte y se detecta hueco de 1.4mm en una longitud de soldadura de 6 mm.

Lo que representa el 23.33% del área total. Al consultar la norma ANSI/AWS B2.2-91 apartado 2.2.4.2 esta pieza se rechaza ya que la falta de llenado es mayor al 20%.

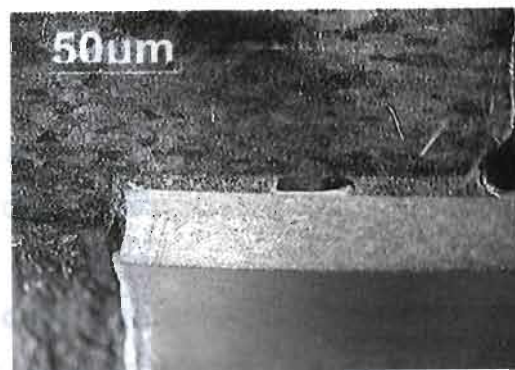


Figura 32. Pieza escogida como terminada donde se muestra falta de llenado superior al 20%

10.

DISCUSION

Entre una variedad de técnicas, el brazing ha sido adoptado como un método confiable para la unión de componentes de aluminio [1], donde una aleación eutéctica Al-12Si (% e.p.) es reconocida como el metal de aporte más popular [2,3]. En los últimos años se han realizado grandes esfuerzos para desarrollar materiales de aporte con bajos puntos de fusión que cumplan con esfuerzos satisfactorios en el brazing de aleaciones de aluminio. Por ejemplo Suzuki et. al. [4] desarrollaron un metal de aporte con una composición de Al-4.2Si-40Zn (% e.p.) el cual funde a 535 °C, esta temperatura es adecuada sin embargo también encontraron que este material tiene la desventaja de que provoca una alta presión de vapor de zinc lo cual que afecta el proceso de brazing.

Por otra parte Kayamoto et. al [5] desarrollaron una serie de metales de aporte compuestos de Al-Ge-Si-Mg los cuales en su composición química contenían un alto contenido de germanio. Ellos encontraron que un incremento en la adición de este elemento incrementa significativamente las temperaturas de liquidus y solidus del metal de aporte. Esto, evidentemente causará un comportamiento de solidificación diferente en cada caso después del brazing.

La modificación de la composición química del material de aporte puede traer muchas ventajas como por ejemplo con la adición de algún elemento se puede disminuir del punto de fusión con lo cual se pueden obtener mejor flujo capilar, menor tiempo de brazing y con esto una disminución de costos del proceso.

En algunas ocasiones la adición de ciertos elementos, le pueden dar buenas propiedades al brazing como el germanio. Sin embargo esta adición equivale a un incremento considerable en el precio del material de aporte, lo que limitaría en gran medida las aplicaciones debido al costo.

De acuerdo a los resultados de estos investigadores los metales de aporte usados en aleación de aluminio 6061 lograban esfuerzos arriba de 200 MPa. Por otra parte cuando estos mismos materiales de aporte fueron aplicados a otro metal base de aluminio 5052 el esfuerzo disminuyó a valores debajo de 100 MPa. Evidentemente estos resultados pudieron haber variado con respecto a los parámetros del proceso brazing utilizados. Se puede decir que el comportamiento del material de aporte en el brazing definitivamente influirá en las propiedades finales de la unión.

Por otra parte Humpston et. al [6] y Jacobson et. al. [7] desarrollaron otro metal de aporte el Al-5Si-20Cu-2Ni (% e.p.) con un rango de fusión de 518°C a 538°C. Cuando este fue usado en una aleación de aluminio 3031 se obtuvieron esfuerzos cortantes arriba de 75 MPa.

En otro trabajo de investigación de L.C. Tsao et. al. [8] se han realizado evaluaciones de algunos tipos de metales de aporte con especímenes de aluminio 3003 como se muestra en la Figura 33.

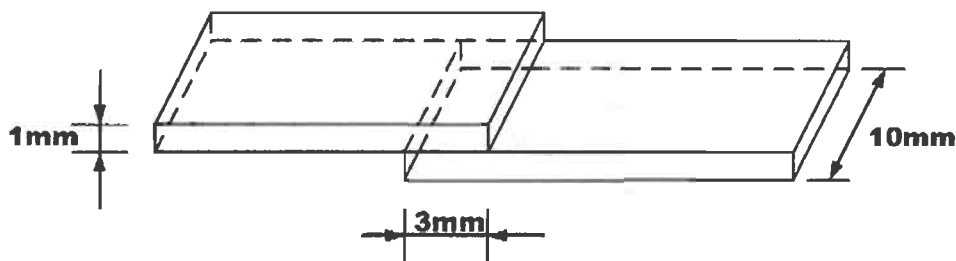


Figura 33. Especimen de uniones por brazing de Aluminio 3003.

En este trabajo el proceso de brazing se llevó a cabo en un horno de vacío a una presión de 5×10^{-5} torr, con un tiempo de exposición de 30 min. En este trabajo se realizaron pruebas de análisis térmico diferencial (DTA) los cuales mostraron las temperaturas de fusión (solidus y liquidus) de los metales de aporte. Estos resultados se muestran en la Figura 34 y en la Tabla 16. Como se puede observar al agregar una cantidad de cobre al material de aporte se reducen las temperaturas de fusión en aproximadamente 50°C , después al agregar un 2% e.p. de estaño se reduce aún mas la temperatura de fusión (aproximadamente 20°C) y finalmente la aleación con magnesio es la que obtiene el menor punto de fusión (501°C a 522°C) el cual es muy bajo comparado con el tradicional Al-12Si (% e.p.).

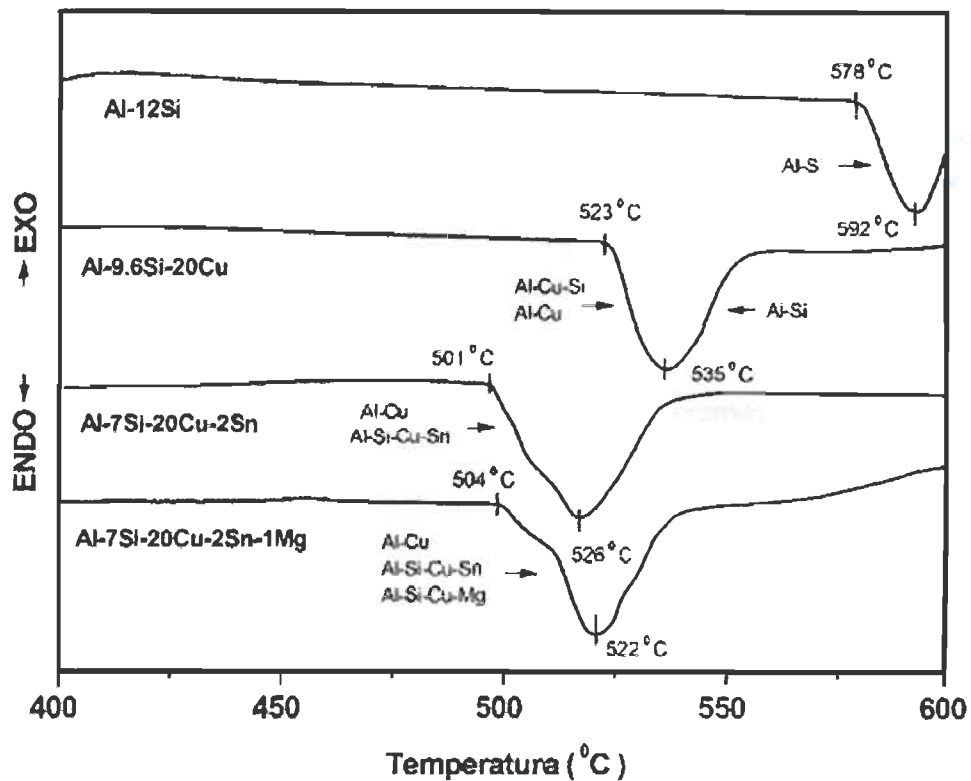


Figura 34. Resultados del análisis térmico diferencial realizado a diferentes materiales de aporte para el brazing de aleaciones de aluminio [8].

Metal de Aporte	Ts, °C	TL, °C	ΔT, °C
Al-12Si	579	593	14
Al-9.6Si-20Cu	524	543	19
Al-7Si-20Cu-2Sn	504	526	22
Al-7Si-20Cu-2Sn-1Mg	501	522	21

Ts = Solidus
 TL = Liquidus
 ΔT = Rango de fusión

Tabla 16. Temperaturas de solidus y liquidus de varios aportes obtenidos por DTA [8].

La Figura 35 muestra las microestructuras obtenidas del análisis de estos materiales de aporte. La Microestructura del material de aporte Al-9.6Si-20Cu esta compuesta de fases eutécticas de Al-Cu y Al-Cu-Si, también posee un compuesto intermetálico CuAl_2 y partículas de silicio puras. Las partículas de silicio desaparecen en los materiales Al-7Si-20Cu-2Sn y Al-7Si- 20Cu-2Sn-1Mg, sus microestructuras contienen una dendrita α en una solución sólida de aluminio así como algunas fases eutécticas.

Los esfuerzos para separar las uniones de los especímenes de aluminio 3003 se muestran en la Tabla 17.

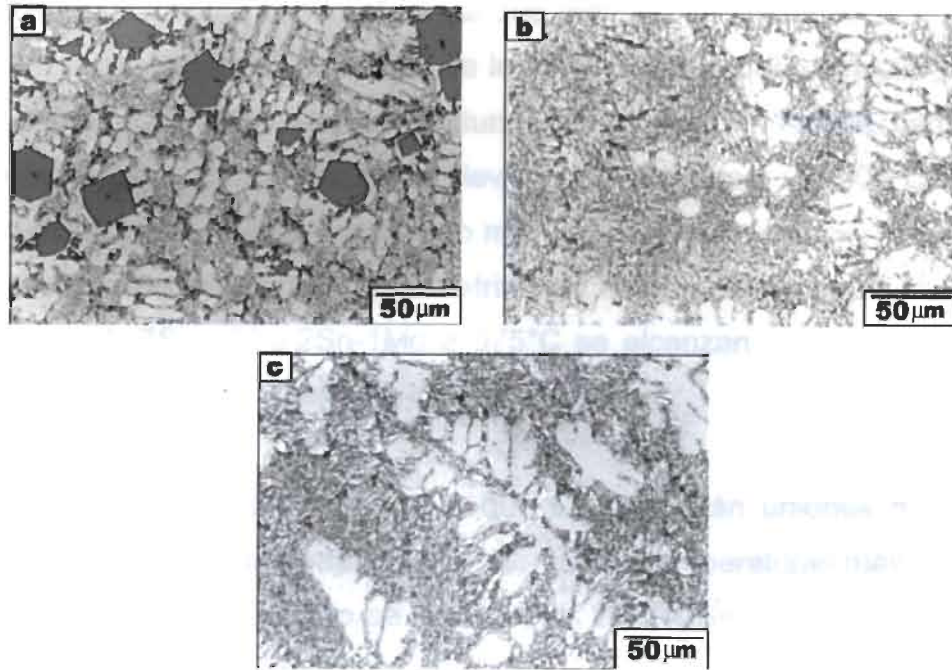


Figura 35. Microestructura de (a) Al-9.6Si-20Cu, (b) Al-7Si-20Cu-2Sn y (c) Al-7Si- 20Cu-2Sn-1Mg [8].

Metal de Aporte	Temperatura de Unión, °C	Esfuerzo de Separación, MPa	Lugar de Fractura
Al-12Si	575	Fallido	Unión
Al-12Si	600	>112 (a)	Matriz
Al-9.6Si-20Cu	550	77±14	Unión
Al-7Si-20Cu-2Sn	550	83±15	Unión
Al-7Si-20Cu-2Sn-1Mg	550	95±12	Unión
Al-7Si-20Cu-2Sn-1Mg	575	>112 (a)	Matriz

(a) Esfuerzo ultimo de tensión del Aluminio 3003

Tabla 17. Resultados del esfuerzo de separación calculado con el uso de los diferentes materiales de aporte.

De estos resultados se puede observar que material de aporte Al-12Si (% e.p.) posee un punto eutéctico alrededor de los 577°C por lo que cualquier proceso de brazing alrededor de esta temperatura esta destinado a la falla, pero puede ser perfectamente unido cuando se eleva la temperatura a los 600°C, en este caso el esfuerzo de la unión es mucho mayor que el de la aleación de aluminio y por eso la fractura ocurrirá en la matriz del metal base. Se observa también que al usar Al-7Si- 20Cu-2Sn-1Mg a 575°C se alcanzan esfuerzos mayores que el de la aleación de aluminio.

De estos trabajos se puede concluir que se obtendrán uniones más sanas usando material de aporte basado en Al-Si-Cu con temperaturas más bajas que el tradicional Al-12Si. Cuando se usa Al-7Si- 20Cu-2Sn-1Mg a 575°C por 30 minutos.

Por otra parte Nayeb-Hashemi y M. Lockwood [9], estudiaron el efecto de las variables del proceso en la microestructura y propiedades de uniones brazing de aleaciones de aluminio 3003 con un material de aporte 4047. Ellos encontraron que la cantidad de eutéctico obtenido en la microestructura final de la unión disminuye con el incremento en el tiempo del brazing y con la disminución del espesor de la unión, lo cual fue atribuido a la difusión del silicio de la unión del material y la disolución del metal base y su entrada al líquido de la unión. Esta disolución y el incremento en el período del brazing incrementaron el porcentaje de porosidad en la zona de reacción lo cual evidentemente influenció las propiedades de resistencia de la unión.

En el proceso analizado en el presente trabajo el brazing se realiza con un solo material de aporte, ahí influyen muchas cosas, se desconoce si anteriormente ya hayan realizado pruebas de brazing con otros materiales de aporte, o si tienen contratos por largo tiempo con los proveedores del material de aporte que están utilizando actualmente.

Lo que si es un hecho es que se sigue teniendo un porcentaje alto de rechazo por piezas que no cumplen con el 100% de calidad con el brazing desarrollado. Se recomienda en un futuro hacer experimentaciones con materiales de aporte con diferente composición química, ya sea de fábrica o desarrollar un procedimiento para la fabricación y probarlos.

Por otro lado Woods [10] investigó la fluidez del metal de aporte aluminio silicio y concluyo que la fluidez esta gobernada por un mecanismo local de fusión eutéctica.

El propósito de estos trabajos fue encontrar los efectos del periodo de brazing y espesor de junta en la microestructura y propiedades mecánicas de la junta soldada. Aquí los resultados fueron los siguientes:

La cantidad de contracción de la porosidad en la zona de reacción se incrementa al aumentar el tiempo de brazing.

El esfuerzo último de tensión de la junta disminuye cuando se incrementa el periodo de brazing y disminuye el espesor de la junta debido a que la cantidad de microestructura eutéctica formada en la junta disminuye y la cantidad de contracción de porosidad aumenta.

La contracción de porosidad es la primera causa de la disminución de esfuerzo en la junta.

Uniones con periodos de 10 minutos de brazing fracturaron en el metal base, mientras que las uniones con periodos de mas de 10 minutos fracturaron en la microestructura eutéctica Aluminio-Silicio de la zona de reacción.

11.

CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

En el presente trabajo se llevó a cabo una revisión de los principales parámetros de proceso del brazing de aleaciones de aluminio. De la inspección en planta se concluye que los parámetros de mayor influencia son la cantidad de flux aplicado y la velocidad de la mesa la cual está relacionada directamente con la aplicación de calor a cada pieza que hace que el material de aporte alcance su temperatura de fusión. De estos materiales no se tienen estudios previos con respecto a las temperaturas exactas de fusión del flux ni del material de aporte. Esto puede estar influenciando que se tenga una gran cantidad de piezas rechazadas por mal llenado.

En un proceso de manufactura de un brazing definitivamente se tiene que tomar en cuenta el gap y el espesor que se va a unir, el período y temperatura del brazing así como las propiedades de resistencia que se obtendrán después. Para la medición de estas últimas propiedades existen normas estandarizadas por la AWS las cuales permiten calcular el esfuerzo de corte en probetas sometidas a brazing y determinar los parámetros óptimos para el brazing.

Por otra parte se observó que en la planta solo se utiliza un material de aporte (Al-12Si % e.p.), de la revisión de la literatura que se llevó a cabo actualmente existen una gran cantidad de estudios donde se ha variado la composición química de este metal de aporte adicionando otros elementos con la finalidad de bajar el punto de fusión e incrementar la fluidez.

Es recomendable que posteriormente se realicen pruebas con varios metales de aporte con algunos elementos de aleación y evaluar las propiedades mecánicas del brazing.

Adicionalmente también se recomienda realizar estudios de análisis térmico diferencial para conocer la secuencia de solidificación y las temperaturas de transformación tanto de los materiales de aporte como los del flux utilizado.

Como puntos importantes se recomienda también que la flama sea aplicada primero al componente que tiene mayor masa (bloque) y después ir modificando el lugar de aplicación hasta lograr que todos los componentes alcancen la temperatura de brazing al mismo tiempo y el calentamiento sea homogéneo.

Con respecto al anillo de aporte, es importante recalcar que se tiene un excedente de 33% de volumen de soldadura, lo que puede provocar problemas de soldadura corrida.

12.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. Sugiyama: Weld. Int., 1989, No. 8, pp. 700-10.
- [2] H. Kawase, T. Takemoto, M. Asano, I. Kawakatsu, and K. Liu: Weld. J., 1989, vol. 68, pp. 396s-403s.
- [3] T. Hattori, S. Sakai, A. Sakamoto, and C. Fujiwara: Weld. J., 1994, vol. 73, pp. 233s-240s.
- [4] K. Susuki, M. Kagayama, and Y. Takeuchi: J. Jpn. Inst. Light Met. 1993, vol. 43 (10), pp. 533-38.
- [5] T. Kayamoto, J. H. Kim, S. Saito, and T. Onzawa: Proc. Workshop. J. Weld. Soc., 1994, vol. 12, pp. 495-501.
- [6] G. Humpston, S.P.S. Sangha, and D.M. Jacobson: Mater: Sci. Technol. 1995, vol. 11, pp. 1161-67.
- [7] D. M. Jacobson, G. Humpston, and S.P.S. Sangha: Weld. J., 1996, vol. 75, pp. 243s-250s.
- [8] L.C. Tsao et. al. Journal of Materials Engineering and Performance. Volumen 11 (4). August 2002-361.
- [9] H. Nayeb-Hashemi, M. Lockwood. Journal of Materials Science 37. (2002) 3705-3713.
- [10] R.A. Woods and I. B. Robinson, ibid 53 (10) (1974) 440
- [11] Roberts P., (2003) Industrial Brazing Practice. CRC Press LLC, Boca Raton Florida USA

- [12] American Welding Society. Brazing Handbook (1991). Miami Florida, USA
- [13] Sheward P., (1985). High Temperature Brazing in controlled atmospheres, A. Wheaton and Co. Gran Bretaña
- [14] ASM. ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering Volume 6 (1993). Ohio, USA
- [15] ASM. ASM Handbook Metallography and microstructures Volume 9 (2004). Ohio, USA
- [16] ANSI/AWS. ANSI/AWS Standard for Brazing Procedure and Performance Qualification B2.2 (1991). Miami Florida, USA
- [17] ANSI/AWS. ANSI/AWS Specification for fluxes for brazing and braze welding A5.31 (1991). Miami Florida, USA
- [18] ANSI/AWS. ANSI/AWS Specification for filler metal for brazing A5.8-89 (1991). Miami Florida, USA
- [19] American Welding Society. Specification for torch brazing C3.4 (1999). Miami Florida, USA
- [20] American Welding Society. Specification for torch brazing C3.7 (1999). Miami Florida, USA

13.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama de equilibrio del sistema binario Aluminio-Silicio.
Figura 2	Ángulos de Mojado Capilar
Figura 3	Efecto del espesor de la unión sobre la resistencia a la tensión
Figura 4	Separación estrecha en uniones por brazing.
Figura 5	Separación holgada en uniones por brazing.
Figura 6	Inspecciones de limpieza con luz negra.
Figura 7	Sujetadores en ensambles para brazing.
Figura 8	Sujetadores con pernos o cuchillas.
Figura 9	Sujetadores con soportes.
Figura 10	Ejemplos de sujetadores
Figura 11	Ejemplo de aplicación de calor y del metal de aporte en el brazing.
Figura 12	Formato Brazing de acuerdo al estándar ANSI/AWS B2.2-9.
Figura 13	Microestructura típica del metal base 3003
Figura 14	Microestructura típica del metal base 6061-T6
Figura 15	Disminución de la aceptabilidad de junta debido al incremento del porcentaje del Magnesio en el material base
Figura 16	Discontinuidades y porosidades debidas a la presencia del Magnesio en el metal base
Figura 17	Presentación en forma de o´ring del metal de aporte empleado en la empresa Cooper Std.
Figura 18	Pieza lista para embarque
Figura 19	Diagrama de flujo del proceso brazing en la planta
Figura 20	Material 3003 en rollo
Figura 21	Bloque 6061
Figura 22	Serie de rodillos para enderezado
Figura 23	Carro – Almacen de tubing
Figura 24	Tinas de desengrase, enjuague y secado
Figura 25	Mesa de torch brazing
Figura 26	Aplicación de flama directamente sobre el flux
Figura 27	Aplicación de calor en las estaciones de flama
Figura 28	Perfil ideal de temperaturas en la mesa de torch brazing
Figura 29	Deformacion del extremo del tubing

Figura 30	Estacion de deformacion final
Figura 31	Máquina Leak Tester utilizada para prueba de fugas.
Figura 32	Pieza escogida como terminada donde se muestra falta de llenado superior al 20%
Figura 33	Espécimen de uniones por brazing de Aluminio 3003.
Figura 34	Resultados del análisis térmico diferencial realizado a diferentes materiales de aporte para el brazing de aleaciones de aluminio [8].
Figura 35	Microestructura de (a) Al-9.6Si-20Cu, (b) Al-7Si-20Cu-2Sn y (c) Al-7Si- 20Cu-2Sn-1Mg [8].

14.

LISTA DE TABLAS

Tabla No 1	Métodos de limpieza como etapa previa para realizar la unión.
Tabla No 2	Apariencia del fundente a diferentes temperaturas
Tabla No 3	Clasificación de fundentes con metales de aporte
Tabla No 4	Propiedades de algunas aleaciones de aluminio
Tabla No 5	Composición química de la aleación de aluminio 3003.
Tabla No 6	Algunas propiedades mecánicas del aluminio 3003.
Tabla No 7	Composición química de la aleación de aluminio 6061-T6.
Tabla No 8	Propiedades mecánicas del aluminio 6061-T6
Tabla No 9	Brazeabilidad de algunas series de aluminio
Tabla No 10	Composición química del aporte usado en aleaciones de aluminio
Tabla No 11	Temperaturas usadas en el brazing con el aporte BAISi-4
Tabla No 12	Tipos de flux para brazing de aleaciones de aluminio
Tabla No 13	Gap recomendado para los diferentes tipos de metales de aporte
Tabla No 14	Características de algunos gases de combustión
Tabla No 15	Actividades de cada estación en la mesa de torch brazing
Tabla No 16	Temperaturas de solidus y liquidus de varios aportes obtenidos por DTA [8]
Tabla No 17	Resultados del esfuerzo de separación calculado con el uso de los diferentes materiales de aporte.