

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**SOLDADURA DE ALUMINIO 7075 POR EL PROCESO BRAZING:
EVALUACIÓN DEL EFECTO DE DEPOSICIÓN DE Bi SOBRE LOS
PARÁMETROS DE SOLDADURA**

POR

EDGAR URIEL TREJO ZAMORAN

REPORTE DE PROYECTO

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

MAYO 2019

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**SOLDADURA DE ALUMINIO 7075 POR EL PROCESO BRAZING:
EVALUACIÓN DEL EFECTO DE DEPOSICIÓN DE Bi SOBRE LOS
PARÁMETROS DE SOLDADURA**

POR

EDGAR URIEL TREJO ZAMORAN

REPORTE DE PROYECTO

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

SALTILLO COAHUILA MAYO 2019

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **“SOLDADURA DE ALUMINIO 7075 POR EL PROCESO BRAZING: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE DEPOSICIÓN DE Bi SOBRE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA”**, realizada por el alumno **EDGAR URIEL TREJO ZAMORAN**, con número de matrícula **18ES-243** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dra. Rita Muñoz Arroyo
Directora de Tesis

**Dr. Juan Carlos Díaz
Guillén**
Tutor en Planta

**Dr. Héctor Manuel
Hernández García**
Asesor

Vo.Bo.
Dr. Pedro Pérez Villanueva
Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **EDGAR URIEL TREJO ZAMORAN**, una vez leída y revisada la Monografía titulada “**SOLDADURA DE ALUMINIO 7075 POR EL PROCESO BRAZING: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE DEPOSICIÓN DE Bi SOBRE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA**”, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a 31 de mayo del 2019

**Dr. Esteban Sánchez
Valdés**
Presidente

**Dr. José Jorge Ruiz
Mondragón**
Secretario

Dra. Rita Muñoz Arroyo
Vocal

DEDICATORIA

Dedicado a todas las personas que me apoyaron durante toda mi formación académica y por siempre brindarme su tiempo cuando lo necesitaba.

Gracias por bríndame siempre todo su amor y cariño incondicional.

A mis padres y hermano:

Gustavo, Lorena, Gustavo Jr.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. por la oportunidad de cursar la especialización, así como las facilidades brindadas para el uso de laboratorios y equipos para la realización de este proyecto.

A CONACYT por el apoyo económico brindado a lo largo de mis estudios cursados durante la especialidad.

Un agradecimiento especial a todos los docentes que participaron directa e indirectamente en mi formación académica, pero sobre todo a la Dra. Rita Muñoz Arroyo y al Dr. Héctor Manuel Hernández García por estar siempre atentos con la mejor disposición cuando los necesitaba y guiarme en mi proceso de formación como especialista.

A mis padres que siempre me apoyaron durante todo el periodo de mis estudios.

A mis amigos que siempre nos apoyábamos entre grupo en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| SÍNTESIS | 1 |
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 1.1. Antecedentes | 3 |
| 1.2. Planteamiento del Problema | 5 |
| 1.3. Objetivos | 6 |
| 1.3.1. Objetivo General | 6 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos | 6 |
| 1.4. Justificación del Proyecto..... | 6 |
| 1.5. Aportación Científico e Industrial | 7 |
| 1.6. Alcance y delimitaciones..... | 7 |
| CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE..... | 8 |
| 2.1. Brazing..... | 8 |
| 2.1.1 Aplicaciones prácticas | 9 |
| 2.2 Definición del brazing..... | 10 |
| 2.3.1 brazing por antorcha | 10 |
| 2.3.2 Brazing por inducción | 11 |
| 2.3.3 Brazing por resistencia | 11 |
| 2.3.4 Brazing por inmersión..... | 11 |

| | |
|--|----|
| 2.3.5 Brazing por infrarrojo | 12 |
| 2.3.6. Brazing por difusión..... | 12 |
| 2.3.7 Brazing en horno | 12 |
| 2.4. Brazing en Aluminios | 13 |
| 2.5 Tipos de aporte Brazing | 15 |
| 2.6. Capilaridad y mojabilidad..... | 16 |
| 2.7. Propiedades del aluminio..... | 17 |
| 2.8. Aleaciones de aluminio | 18 |
| 2.8.1. Designación de las aleaciones | 18 |
| 2.8.2. Aplicaciones del aluminio. | 20 |
| 2.8.3 Aplicaciones y características de la serie 7XXX..... | 21 |
| 2.8.4. Composición química y propiedades mecánicas de la aleación 7075..... | 22 |
| 2.9. El bismuto en aluminio | 23 |
| 2.10 Fases líquidas transitorias (TLP)..... | 28 |
| CAPÍTULO 3 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA..... | 31 |
| CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDIO..... | 34 |
| 4.1 Metodología | 34 |
| 4.2. Desarrollo experimental | 35 |
| 4.2.1 Preparación de las muestras de aluminio..... | 35 |

| | |
|---|----|
| 4.2.2 Preparación y caracterización de las muestras | 36 |
| 4.3 Resultados y Discusión del Caso de Estudio..... | 42 |
| 4.3.1 Análisis de la materia prima para soldar..... | 42 |
| 4.3.2 Análisis y caracterización de las muestras soldadas por brazing sin deposición de películas de Bi..... | 45 |
| 4.3.3 Análisis y caracterización de las muestras soldadas por brazing con deposición de películas de Bi..... | 46 |
| 4.3.4 Pruebas mecánicas elásticas por nanoindentación..... | 51 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES..... | 54 |
| REFERENCIAS..... | 56 |
| LISTA DE FIGURAS..... | 61 |
| LISTA DE TABLAS..... | 63 |
| LISTA DE ECUACIONES..... | 64 |

SÍNTESIS

En este trabajo monográfico, se realizó una búsqueda bibliográfica sobre el efecto del bismuto para soldar el sistema Al/Al por soldadura brazing (ambos de la clasificación 7075), ya que ésta aleación tiene baja soldabilidad. Debido a la formación de capas de óxido de Al y Zn.

En la literatura, no existe información específica sobre el sistema de interés. Solamente soldaduras de otros sistemas de aleación que están relacionados con el bismuto. Sin embargo, sugieren que el bismuto adicionado en el aluminio no forma fases conjuntas, elimina la capa de alúmina formada debido a la dilatación del mismo durante la solidificación y en el proceso de calentamiento actúa como protector de la superficie (reduce la formación de óxidos) debido a la diferencia de densidades y los puntos de fusión del Bi y Al.

Por otra parte, en este trabajo se explica a detalle un caso de estudio donde se muestra la factibilidad de depositar películas delgadas de bismuto por evaporación catódica para soldar el sistema 7075 por brazing, con el fin de mostrar resultados preliminares que puedan abrir un campo de futuras investigaciones que involucren diseños de experimentos.

En este estudio, antes de depositar el bismuto sobre las superficies, se caracterizó el aluminio por técnicas de microscopía óptica donde se hacen notar intermetálicos de Fe. Posteriormente, en base a la literatura consultada, se planteó la soldadura del sistema sin películas de bismuto a 650°, 620°, 635°, 630°, 625 °C por 60 y 90 minutos empleando metal de aporte en forma de pasta Al-Si. Posterior a ello cupones fueron cubiertos por Bi para ser soldados por brazing a 625° y 615 °C por 60 minutos en base a los resultados obtenidos previamente. En los resultados obtenidos en el caso de estudio, se observaron que las muestras procesadas sin la capa de bismuto, no presentaron una unión

completa debido a la formación de capas de óxido (mala soldabilidad). Asimismo, las muestras soldadas a 625 °C por 60 minutos con la cubierta de Bi presentaron un cordón de soldadura incompleta (baja soldabilidad). No obstante, a 615°C se observó en las muestras un cordón de soldadura libre de defectos (soldabilidad) con regiones aisladas de micro-rechupes y una fusión parcial del sistema completo. Debido a la formación de fases líquidas transitorias (TLP, por sus siglas en inglés Transient Liquid Phase) que induce la composición química del metal de aporte (Cs, principalmente). Los valores del módulo elástico y microdureza obtenidos por nanoindentación fueron de 52.99 GPa y 122.23 HV, respectivamente. Con este se concluye que la adición de bismuto ayuda a mejorar la soldabilidad del sistema que cuando no se tiene.

Campo específico: Soldadura Brazing de aluminio con deposición de bismuto.

Palabras clave: Brazing, Aluminio 7075, deposición de bismuto, TLP.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El aluminio es el segundo metal más abundante a nivel mundial debido a esto y a sus propiedades físicas, químicas así como: baja densidad, buena resistencia a la corrosión debido a la formación de una capa pasivada, alta conductividad térmica y buena conductividad eléctrica [1], lo cual ha llevado al aluminio a tener una amplia aplicación industrial y, dictamina el dominio estratégico de la economía mundial [2].

Por si solo el aluminio es un material con gran plasticidad y por ende, tiene excelentes propiedades de formabilidad. Asimismo, las propiedades mecánicas se mejoran mediante la incorporación de elementos aleantes, sin modificar notablemente sus propiedades físicas. En el caso de la serie 7XXX que es designada para la aleación Aluminio-Zinc, tiene mayor resistencia y, con la adición de cobre y magnesio la resistencia incrementa considerablemente [3].

Por otro lado, la aleación 7075 tiene excelentes propiedades mecánicas y es susceptible al tratamiento térmico para mejorar la resistencia a la corrosión

[4]. Básicamente, en combinación con las altas propiedades mecánicas son empleadas en las industrias aeronáutica, automotriz, naval [5], [6].

En el diseño de uniones de las aleaciones de aluminio, se emplean diversos procesos: mecánicos, adhesivos, así como soldaduras que usan procesos como son: CMT, soldadura por plasma, TIG y brazing [7]

La soldadura brazing es un proceso conocido desde la antigüedad, era comúnmente utilizada para unir joyería de oro y plata, ya que el punto de fusión de estos metales no es muy alto. El proceso que usaban era rústico pero de gran confiabilidad para la época [3]. Con el paso de los años se ha diversificado y mejorado el proceso brazing dando como resultado distintos procesos [8]:

- Soldadura brazing manual con antorcha
- Soldadura brazing en horno
- Soldadura brazing por inducción
- Soldadura brazing por inmersión
- Soldadura brazing por infrarrojo
- Soldadura brazing por resistencia

Cabe mencionar que la resistencia a la corrosión en estas aleaciones se debe a la formación de una capa de óxido en toda su área superficial al contacto con el oxígeno [9]. Sin embargo, a temperatura ambiente y a elevadas temperaturas la soldabilidad de la pieza disminuye, por ende, se requiere retirar la capa antes de unir las piezas. Existen diversos métodos para remover la capa de óxido generada en el aluminio como baños químicos que incluyen, la inmersión en soluciones alcalinas, ácido nítrico y también existe el método más común, la remoción mecánica como pulido, cepillado o maquinado [10].

Aun teniendo estas técnicas no siempre es fácil eliminar por completo toda la capa de óxido. Por esto se utiliza como solución el recubrir la superficie con capas de otros elementos como, plata, cobre, níquel, titanio, las cuales se han probado para mejorar diversas propiedades como la mojabilidad de la soldadura y, las propiedades mecánicas de la unión debido a que las capas de estos elementos protegen al aluminio del contacto directo con el oxígeno que promueve la formación de alúmina. En materiales como el aluminio 7075 debido a sus aplicaciones, es de índole crítica poder controlar la formación de la capa de óxido debido que si ocurre una falla durante la operación del componente con soldadura implica tanto pérdidas humanas como económicas.

Por lo tanto, en este trabajo se estudia el efecto de la capa de bismuto sobre los parámetros de soldadura en la unión obtenida por el proceso de brazing en horno para una aleación aluminio-zinc (aleación 7075).

1.2. Planteamiento del Problema

La disminución de las discontinuidades en las soldaduras de aleaciones de Al-Zn depende de la formación de la capa de Al_2O_3 . Este óxido forma una película continua de 5 nanómetros de espesor, que al soldarse promueve la formación de discontinuidades que disminuyen la mojabilidad entre el metal de aporte y el metal base. Cabe mencionar, que estas aleaciones se emplean en las partes estructurales en sectores aeroespaciales, automotrices y navales. Por lo tanto, es indispensable evitar la formación de estas discontinuidades disminuyendo la solubilidad del oxígeno o retrasando la difusión del mismo hacia la soldadura mediante la deposición de bismuto en la superficie del material.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Revisar el estado del arte para determinar las variables involucradas en la soldadura brazing por horno en una aleación Al-Zn, con recubrimiento de bismuto variando el porcentaje de este, para evaluar su soldabilidad.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Revisar el estado del arte sobre el efecto del bismuto como material de aporte en la soldadura y en la aleación de aluminio para analizar su factibilidad.
2. Depositar nanocapas de Bi sobre la superficie para analizar su soldabilidad mediante brazing.
3. Evaluar la soldadura y caracterización de los cordones de soldadura sin y con Bi de la aleación de aluminio por microscopía óptica, electrónica de barrido.
4. Evaluar las microdurezas y módulos elásticos en el cordón de soldadura por nanoindentación para analizar el efecto del Bi en el cordón de soldadura.

1.4. Justificación del Proyecto

Uno de los principales problemas de la soldadura brazing en los aluminios es la formación de una capa de alúmina en la superficie, lo cual provoca discontinuidades en el material y por ende, una mala unión y poca resistencia mecánica en las zonas soldadas. Recientes investigaciones [11] sugieren que con la implementación de bismuto en la superficie se puede llegar a inhibir esta formación y obtener piezas con una mayor resistencia mecánica, así mismo

obtener menores temperaturas para soldar piezas de aluminio, lo cual en conjunto es de suma importancia en el proceso brazing promoviendo el poder garantizar la calidad de las uniones para diversas industrias que utilizan el proceso.

1.5. Aportación Científico e Industrial

Recopilación bibliográfica relacionada con el sistema aluminio- aluminio unido con una capa de bismuto para obtener bases sólidas que permitan reducir la formación de precipitados intermetálicos en el límite que debilitan su estructura en aplicaciones industriales. Formar barreras difusivas para disminuir la formación de óxidos Al_2O_3 a través de la adición de Bi que altere el potencial químico entre el metal base-metal de aporte. Asimismo, formar fases líquidas transitorias y disminuir la temperatura de soldadura.

1.6. Alcance y Delimitaciones

Recopilación bibliográfica, así como un caso de estudio donde se examinan las propiedades mecánicas, microestructurales y topográficas obtenidas de las uniones soldadas con el proceso brazing en horno con la aleación aluminio-zinc (7075), recubiertas superficialmente con bismuto y sin bismuto.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. Brazing

En la soldadura brazing, la temperatura de fusión del componente a ser unido al material base debe de ser menor. En este caso, la temperatura aplicada debe de ser suficiente para fundir al material de aporte y obtener un cordón de soldadura. Asimismo, debe tener una buena fluidez para activar la capilaridad.

En base a la literatura [8], [10] los egipcios fueron de las primeras civilizaciones en implementar esta tecnología en su tiempo muy rústica pero eficaz, con el tiempo y con recursos más avanzados el brazing fue mejorando y evolucionando en varios métodos de aplicación, hasta los que se conocen hoy en día.

Existen diversos métodos de función del proceso brazing como son: inducción eléctrica, horno al vacío, en horno con atmósfera controlada, inmersión, soplete, infrarrojo, etc. En la actualidad existen más procesos para

realizar brazing pero debido a su bajo y especial uso solo se mencionan los anteriores como los principales.

Para que una soldadura brazing sea exitosa depende de varios factores que se deben de cumplir si se desea una unión lo más resistente y sana posible de los cuales se enlistan a continuación [8][12][13]:

- Buena fluidez del metal de aporte.
- Temperaturas y tiempos controlados.
- Buena protección en atmósferas controladas o fundentes.
- Preparación superficial.
- Características adecuadas al proceso del material base y material de aporte.
- Buen diseño de unión.
- Adecuado mantenimiento y fuente de temperatura.

Comparativamente con otros procesos de soldadura, el brazing tiene las ventajas siguientes:

- Unión de partes muy delgadas.
- Piezas donde se requieran la unión de múltiples partes o de difícil acceso.
- Uniones de metales disimiles.

2.1.1 Aplicaciones Prácticas

Las aplicaciones y las piezas que se sueldan por el proceso brazing, se aplican especialmente en las industrias automotriz, espacial, energía nuclear,

naval, etc. Algunos de los ejemplos más comunes de piezas que se producen por esta técnica son los radiadores, evaporadores, condensadores, intercambiadores de calor [13].

2.2 Definición del Brazing

La AWS define el brazing como un proceso de unión en donde los materiales a unir se calientan en presencia del material de aporte con una temperatura de liquidus superior a los 450°C pero sin llegar a la fusión del material base [14].

2.3 Tipos de Brazing

El proceso brazing se subdivide en otros tipos, sin embargo, su fundamento no cambia, sino la manera en que se aplica el calor en las piezas a unir y esto existe debido a las características y restricciones que puedan tener las piezas, como por ejemplo, la geometría de la pieza, el tipo de material, los tiempos de calentamiento o enfriamiento que se necesiten en las piezas, productividad, entre otros [13], [14].

2.3.1 Brazing por Antorcha

En el método de brazing el calor aportado a la pieza es mediante la llama aportada por la antorcha la cual sirve como alimentador y mezclador de gases de hidrocarburo como acetileno, propano o gas natural, así mismo se acompaña de la presencia de oxígeno o aire. De las principales desventajas que se presenta con este método es la baja productibilidad, la temperatura que se está aportando no es controlable sino su ajuste se da por simple observación del operador. Las ventajas que se pueden mencionar es su portabilidad, practicidad y que es un proceso económico tanto en aplicación como en equipo utilitario.

2.3.2 Brazing por Inducción

En el brazing por inducción la manera en que se consigue el calor es por medio de una corriente eléctrica generada por una bobina enfriada con agua. Las bobinas que se utilizan pueden variar de geometría (Figura 2.1) según sea lo más conveniente para la unión de las piezas, pueden ser rectangulares, en espiral, en plato, internas, redondas, etc.

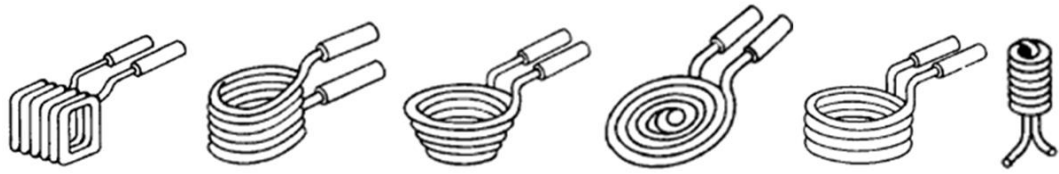


Figura 2.1 Forma de las bobinas de inducción usadas para brazing [14]

2.3.3 Brazing por Resistencia

En este método el calor es aportado mediante la resistencia producida al paso de la corriente eléctrica a través de electrodos y de las piezas a unir, esto quiere decir que dichas piezas se convierten en parte del circuito eléctrico. En este método como en todo proceso brazing es necesario de la aplicación de un fundente y de su material de aporte, y esto es lo que hace diferencia con el proceso de proyección que en ocasiones se llega a confundir ambos métodos.

2.3.4 Brazing por Inmersión

El calor necesario para unir las piezas lo proporciona un baño metálico o químico, que como el nombre del proceso indica se sumerge un determinado tiempo y después se extraen fuera del baño y se dejan solidificar, este último paso es importante debido a que las piezas deben de estar debidamente sujetadas para evitar un posible movimiento de las piezas antes de completar la solidificación.

Cada uno de los baños (metálico y químico) proporciona ciertas ventajas en el proceso, cuando se utiliza un baño químico comúnmente ya no es necesario el uso del fundente y cuando se usa un baño metálico puede ser remplazado el uso de un metal de aporte.

2.3.5 Brazing por Infrarrojo

En este método el calor es suministrado por radiación de luz infrarroja, esta luz es capaz de brindar hasta 5000 Watts de energía radiante. Este método también podría ser considerado como una variante del brazing por horno debido a que el proceso se lleva a cabo en un espacio aislado con temperatura controlada por termopares, atmósfera protectora y vacío.

2.3.6. Brazing por Difusión

En este método el proceso se lleva a cabo en un horno, el cual es la fuente que genera el calor para la coalescencia de las piezas. La apropiada temperatura y tiempo dentro del horno hace que el metal de aporte difunda a través del material base.

2.3.7 Brazing en Horno

El brazing en horno llamado por su nombre en inglés furnace brazing (FB), es un proceso en el cual las piezas a unir, se introducen dentro de un horno (Figura 2.2) el cual llega hasta la temperatura de brazing. Comúnmente los hornos utilizados usan una atmósfera protectora o vacío para evitar una interacción química con el ambiente y, así evitar la posible oxidación de las piezas. Uno de los puntos importantes de proceso en horno es el control riguroso de la temperatura el cual debe estar $\pm 6^{\circ}\text{C}$, ya que compromete la eficiencia de la unión [8], [14].

Existen distintas configuraciones de hornos en las cuales se puede llevar a cabo la soldadura como hornos con atmósfera controlada las cuales utilizan

gases como argón, helio u hornos de vacío. Así mismo, se diseñan hornos continuos los cuales son empleados en altas tasas de producción.

En este tipo de procesos, es posible dejar a un lado el uso de fundentes, ya que no es necesario para crear la unión deseada. Debido a que la atmósfera controlada o el vacío la sustituyen. Este proceso por lo regular se utiliza cuando es crítico el control riguroso de la temperatura, los lugares a soldar no son accesibles, son muchas las zonas a unir o es un área grande.

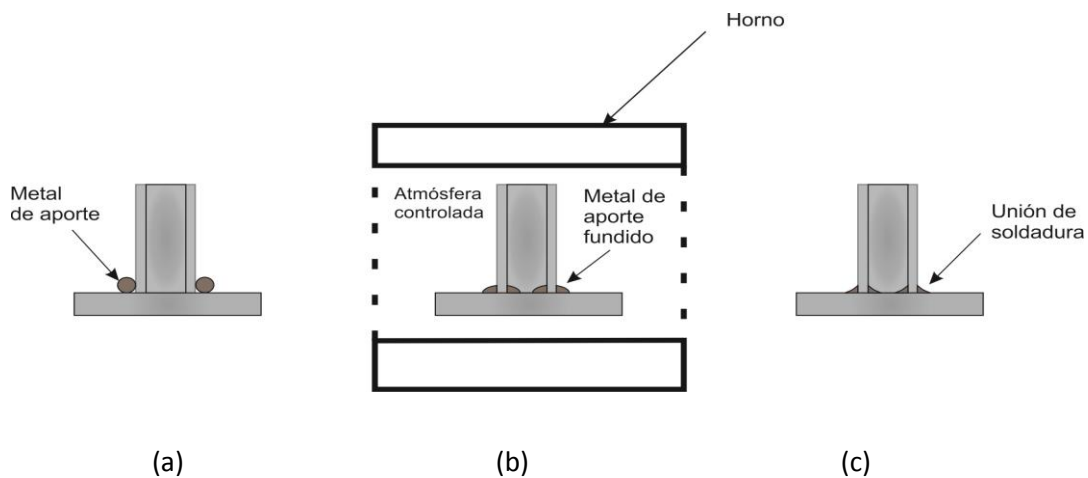


Figura 2.2 a) Piezas posicionadas con el metal de aporte a usar, b) piezas dentro del horno, c) piezas unidas [14].

2.4. Brazing en Aluminios

El desarrollo de la soldadura brazing en los últimos 40 años en aluminios ha crecido de manera exponencial. En 1980 el principal problema era la estrecha brecha de temperaturas para obtener buenas soldaduras. Por lo tanto, las únicas técnicas que tienen un control estricto son la soldadura brazing en horno y la soldadura brazing en baño de sales. No obstante, estas técnicas no resultaban de todo favorables, ya que era un proceso caro y muy contaminante [8].

A finales de los años 80 cuando se empezó a tener una preocupación seria por mejorar estos procesos. Debido a que el aluminio es de gran interés para la industria automotriz (baja densidad, principalmente). Debido a su afinidad y bajo punto de fusión en relación con el aluminio, así mismo, se hicieron mejoras en procesar las piezas bajo atmósferas protectoras que ayudan a cumplir con los requerimientos necesarios para la industria automotriz: alta producción, evitar oxidación y disminuir costos.

El proceso brazing también conocido como soldadura fuerte, se emplea en aluminios de diversas formas y métodos, así como con o sin fundente. Con respecto al fundente, contiene elementos químicos que ayudan a dos aspectos: 1) fluidez y 2) remoción de impurezas (desoxidante). En este caso, el fundente se presenta en diversas configuraciones: polvo, láminas, líquido o en pasta.

En la investigación Niu y colaboradores [15] estudian el efecto de la temperatura y tratamiento post-soldadura en brazing de la aleación 7075 usando una interfase de cobre. En esta investigación se estudió a fondo el efecto de la temperatura en la microestructura, morfología de grano y propiedades mecánicas, se encontró que a mayores temperaturas de unión se reduce la formación de compuestos intermetálicos en la zona de unión y es más homogénea, pero por otro lado el tamaño de grano aumenta, por el contrario, las piezas unidas a menores temperaturas contenían una mayor fracción de compuestos intermetálicos en la zona de unión, pero el tamaño de grano se mantenía a menor tamaño.

Aunque se muestre mediante micrografías la menor formación de compuestos intermetálicos en la zona de unión a mayores temperaturas, esto no quiere decir que sean las que mejores propiedades tengan, debido a que si excedemos la temperatura se puede llegar a fundir el material dañando la integridad de la pieza a unir o debido a la formación de grieta en la unión. Es por esto que la temperatura que mejores propiedades mecánicas tuvo en las pruebas fue a 600°C con una resistencia a la cizalla de 42 MPa mientras que a

610°C la resistencia fue de 24MPa, y la de menor temperatura (560°C) tuvo una resistencia de 22MPa.

Por otra parte también se analizó el efecto de un tratamiento post soldadura en las piezas que obtuvieron las mejores propiedades mecánicas y el resultado fue que la resistencia de dichas uniones aumento un 160% lo cual da a 108MPa, esto debido a que durante el proceso se homogenizan los granos y precipitados en el material.

2.5 Tipos de Aporte Brazing

Los principales problemas para seleccionar el material de aporte adecuado para la unión brazing en aluminio es: reducir la corrosión, evitar uso de metales pesados contaminantes al medio ambiente (Pb). En la Tabla 2.1 se resumen las aleaciones de aporte que se utilizan comúnmente en aluminios:

Tabla 2.1 Composición química de materiales de aporte para aleaciones de aluminio [16]

| Aleación | Ag % | Cu % | Zn % | Sn % | Cd % | P % | Mn % | Ni % | Al % | Si % | Fe % | Rango de Fusión, °C | Temperatura de trabajo °C |
|----------------------------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|---------------------|---------------------------|
| Plata y Cadmio | 55 | 21 | 22 | 2 | | | | | | | | 630-660 | 650 |
| | 45 | 27 | 25 | 3 | | | | | | | | 640-680 | 670 |
| | 49 | 16 | 23 | | | | 7.5 | 4.5 | | | | 625-705 | 690 |
| | 49 | 27.5 | 20.5 | | | | 2.5 | 0.5 | | | | 670-690 | 690 |
| | 34 | 36 | 27 | 3 | | | | | | | | 630-730 | 710 |
| | 44 | 30 | 26 | | | | | | | | | 680-740 | 730 |
| | 20 | 44.9 | 35 | | | | | 0.1 | | | | 690-810 | 810 |
| Aleación de plata y cadmio | 40 | 19 | 21 | | 20 | | | | | | | 595-630 | 610 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----|------|------|-----|--|-----|-----|-----|----|-----|-----|---------|-----|
| Aleación de Cobre y fosforo | 5 | 89 | | | | 6 | | | | | | 650-810 | 715 |
| | 2 | 91.8 | | | | 6.2 | | | | | | 650-810 | 710 |
| | 15 | 80 | | | | 5 | | | | | | 650-800 | 705 |
| | | 92 | | | | 8 | | | | | | 710-740 | 850 |
| | | 93 | | | | 7 | | | | | | 710-820 | |
| | | 94 | | | | 6 | | | | | | 710-850 | 850 |
| Materiales de altas temperaturas | 85 | | | | | | 15 | | | | | 960-970 | 960 |
| Bronce/Latón | | 48 | 41.8 | | | | | 10 | | 0.2 | | 880-910 | 900 |
| | | 60 | 39.7 | 0.1 | | | | | | 0.2 | | 885-900 | 900 |
| | | 58 | 40 | 0.8 | | | 0.3 | 0.4 | | 0.1 | 0.4 | 875-890 | 890 |
| | | 47.5 | 41.5 | 0.1 | | | 0.3 | 10 | | 0.3 | 0.3 | 890-900 | 900 |
| Aleaciones de aluminio | 4 | | | | | | | | 86 | 10 | | 520-586 | 550 |
| | | | | | | | | | 87 | 13 | | 575-582 | 580 |

2.6. Capilaridad y Mojabilidad

Dos fenómenos importantes en el proceso brazing son la capilaridad y la mojabilidad. La mojabilidad se define como la capacidad de un líquido para extenderse y adherirse sobre una superficie, mientras que la capilaridad es la capacidad de fluir de un líquido puesto en contacto con dos sólidos próximos.

La capilaridad está ligada a múltiples variables como, 1) la capilaridad, 2) la densidad y viscosidad del líquido y 3) la geometría de la unión.

En la realidad, controlar todos estos factores se hace complicado en la práctica, sin embargo, en análisis y experimentos se ha deducido la Ecuación 2.1, con la cual el flujo capilar puede aumentar [12].

$$\frac{(\gamma_{LV})(\cos\theta)}{\eta}$$

Ecuación 2.1

Definido brevemente el concepto de mojabilidad al principio, este concepto también engloba al ángulo de contacto (θ) que depende de las energías superficiales interfaciales sólido-vapor (γ_{sv}), sólido-líquido (γ_{sl}), líquido-vapor (γ_{lv}). Este factor es de relevancia debido a que está relacionado con la capilaridad que se presentara en la soldadura esto se representa en la Figura 2.3 y la Ecuación 2.2.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

En la literatura [13] se menciona qué para tener una superficie con buena mojabilidad, el ángulo de contacto debe de estar entre 0° y 90° . Generalmente, una buena soldadura brazing debe tener un ángulo de contacto entre 10° y 45° (Figura 2.3).

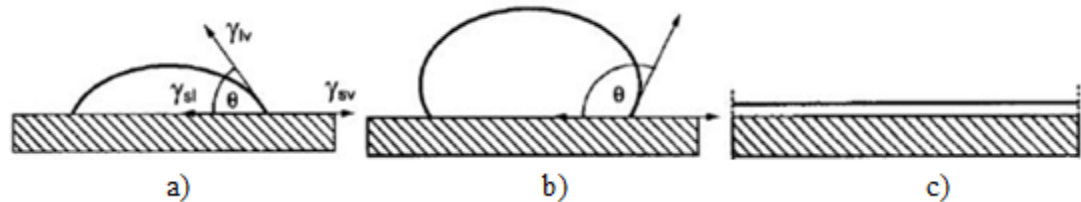


Figura 2.3 Esquema representativo de la mojabilidad entre una fase sólida y líquida, a) Buena mojabilidad $\theta < 90^\circ$ b) baja mojabilidad $\theta > 90^\circ$ c) Completa mojabilidad $\theta > 0^\circ$ [12]

2.7. Propiedades del Aluminio

La combinación única de propiedades del aluminio por si solo lo hace uno de los metales más versátiles en aplicaciones ingenieriles, alta resistencia mecánica similar a los aceros estructurales y mayor resistencia a la corrosión [1], [2].

Las adiciones de elementos de aleación como Zn, Cu, Si, Mg, Mn, Li, Ni y Sr en el aluminio mejoran substancialmente las propiedades mecánicas y los hace susceptibles a los tratamientos térmicos [5], [17], [18]. Cabe mencionar, que la resistencia a la corrosión se mejora más en ciertas aleaciones, como es la aleación de la serie 7XXX, principalmente [4].

2.8. Aleaciones de Aluminio

Las aleaciones de aluminio han sido un material principal en la construcción de componentes para la industria aérea, automotriz, naval y militar desde los años de 1930. La manufactura se centra en fuselaje, alas, soportes estructurales para cohetes, pisos anti-corrosivos, partes del soporte de los motores para autos [6].

2.8.1. Designación de las Aleaciones

Los aluminios forjados son comúnmente designados por 4 dígitos numéricos implementados por la Asociación del Aluminio. La nomenclatura ha sido aceptada por casi todos los países del mundo y mundialmente conocido como: sistema internacional de designaciones de aleaciones por sus siglas en inglés IADS. El primer número indica el elemento de aleación principal, el segundo dígito indica las modificaciones del elemento principal o límite de impurezas y los últimos dos dígitos indican la aleación en específico [1]. Comúnmente las aleaciones de aluminio se clasifican en 8 series, y como se indicó previamente el número indica los elementos de aleación presentes [19]:

Serie 1XXX. Esta serie consta de aluminio comercial 99% puro y superpuros con grados de 99.99%. Sus principales características son: endurecidos por trabajo, tiene alta formalidad, resistente a la corrosión y buen conductor eléctrico.

Serie 2XXX. El principal elemento es el cobre, esta serie es tratable térmicamente. Tiene buenas resistencias mecánicas de tensión, impacto especialmente a elevadas temperaturas y, algunas aleaciones de esta serie son soldables. Esta aleación no es tan resistente a la corrosión atmosférica como las otras aleaciones, sin embargo, es común encontrarlas pintadas o recubiertas para mayor protección a la intemperie.

Serie 3XXX. Su principal elemento de aleación es el manganeso, con contenidos mayores de 1.25%. Las adiciones de Mn promueven el endurecimiento por solución sólida, pero en altos niveles con impurezas de Fe forma partículas de Al_6Mn generando fragilización. Esta aleación se endurece por tratamiento térmico y tiene excelente resistencia a la corrosión, sin embargo, tiene baja soldabilidad.

Serie 4XXX. Su principal aleación es el silicio. Esta aleación se caracteriza debido a su excelente fluidez. Además, se emplea como material de aporte en soldadura GMAW y GTAW. Estas aleaciones son tratables térmicamente y son fáciles de unir mediante soldadura brazing y soldering.

Serie 5XXX. Su principal elemento de aleación es el magnesio, incrementa la resistencia mecánica y es endurecido por trabajo en frío. Por otro lado, tiene excelentes propiedades contra la corrosión con porcentajes de magnesio por debajo del 3% y alta resistencia al impacto inclusive a temperaturas criogénicas. Tiene buena soldabilidad hasta espesores menores a 20 cm. Debido a que tiende a la formación de soluciones sólidas en su composición.

Serie 6XXX. Esta serie cuenta con dos elementos de aleación principal, el magnesio de 0.6 a 1.2% en peso y silicio de 0.4 a 1.3%. Esta aleación es tratable térmicamente, formando precipitados intermetálicos Mg_2Si . Tiene buena resistencia a la corrosión, pero moderada resistencia mecánica y, fácilmente soldado con procesos GMAW y GTAW.

Serie 7XXX. Su principal elemento de aleación es el zinc, es tratable térmicamente, esta aleación es más susceptible al endurecimiento que la serie 2XXX, por lo que se obtienen mejores propiedades mecánicas. La aleación de esta serie que contiene Al-Zn-Mg-Cu, alcanza la mayor dureza con respecto a las otras aleaciones anteriormente mencionadas. Es comúnmente unido por soldadura de fricción-agitación y brazing. En contraste, las aleaciones 7049, 7050, 7075, 7175, 7178 y 7474, son las más resistentes, no obstante, tienen menor resistencia a la corrosión; por lo que son tratadas térmicamente (T7), que se ha aplicado como un tratamiento térmico que mejora la resistencia a la corrosión.

Serie 8XXX. Se designa esta serie para todos aquellos aluminios que sus principales elementos de aleación no entren en las anteriores mencionadas, como hierro, níquel, y litio.

2.8.2. Aplicaciones del Aluminio.

Existen ilimitadas aplicaciones en las que el aluminio tiene alto desempeño mecánico y funcional. En la Tabla 2.2 se enlistan algunas de las más importantes.

Tabla 2.2. Manufactura y aplicaciones de las aleaciones de aluminio [19], [20].

| Grado de aluminio | Forma del producto | Aplicación |
|--------------------------|--|---|
| Aluminio puro 1XXX | Lámina, roles, extrusiones | Empaques, recubrimientos, ornamentaría, equipo químico, conductores eléctricos. |
| 2XXX (Al-Cu) | Placas roladas, láminas, forjas, extrusiones | Partes para altas resistencias, partes estructurales, pistones, cilindros |
| 3XXX (Al-Mn) | Placas roladas, láminas, fojas, extrusiones | Empaques, cubiertas, recubrimientos, tanques de químicos y comidas. |
| 4XXX (Al-Si) | Cables, coladas. | Material de aporte, cabezas de cilindros, mono bloques de motores |
| 5XXX (Al-Mg) | Placas roladas, láminas, extrusiones, forjas, tuberías | Recubrimientos, casco para buques, cascos de tanques, vehículos, estructuras de puentes, recipientes a presión |
| 6XXX (Al-Si-Mg) | Placas roladas, láminas, extrusiones, forjas, tuberías | Estructuras de alta resistencia, vehículos, marinos. |
| 7XXX (Al-Mg-Zn) | Placas roladas, láminas, extrusiones, forjas | Estructuras de alta resistencia, secciones pesadas en aeronaves, aplicaciones militares, armaduras, partes pesadas en vehículos |

2.8.3 Aplicaciones y Características de la Serie 7XXX

La serie 7XXX contiene principalmente como elemento aleante el zinc, y en combinación con cobre y magnesio proveen al material alta resistencia mecánica. Por lo tanto, son utilizadas como materiales estructurales para la industria aérea. Asimismo, tiene alta ductilidad, tenacidad, baja densidad, resistencia a la fatiga y desgaste [5], [21]. Esta combinación de propiedades permite emplearlo en accesorios aéreos, engranajes, fuselajes, partes de misiles, válvulas, piñones, vehículos todo terreno, aplicaciones de defensa militar, entre otros [22].

Este tipo de aluminio alcanza altos niveles de resistencia, sin embargo, son susceptibles a agrietamiento por corrosión bajo tensión (SSC), cuando se aplica un tratamiento de envejecimiento. Un reporte en la literatura [1] sugiere que este problema se soluciona mediante un tratamiento térmico de sobre-envejecido, aunque, disminuye cerca de 10% la resistencia mecánica. Otro estudio [23] establece tratamientos térmicos para disminuir el efecto SSC sin afectar las propiedades mecánicas.

2.8.4. Composición Química y Propiedades Mecánicas de la Aleación 7075

Esta aleación tiene una gran importancia en el sector aeroespacial. Debido a las propiedades mecánicas y físicas que se resumen en la Tabla 2.3 Mientras que en la Tabla 2.4 se enlista la composición química que hace posible lo anterior.

Tabla 2.3 Propiedades físicas y mecánicas de la aleación 7075[24].

| Propiedades mecánicas y físicas | |
|--|-----------|
| Densidad | 2.81 g/cc |
| Dureza Brinell | 150 |
| Dureza, Vickers | 175 |
| Ultima resistencia a la tensión | 572 MPa |
| Resistencia a la tensión | 503 MPa |
| Elongación | 11% |
| Módulo elástico | 71.7 GPa |
| Solidus | 477 °C |
| Liquidus | 635 °C |

Tabla 2.4 Composición química en porcentaje en peso (% e.p.) de la aleación 7075 [25].

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Otros | Al |
|------|------|---------|------|---------|-----------|---------|------|-------|-------|
| 0.40 | 0.50 | 1.2-2.0 | 0.30 | 2.1-2.9 | 0.18-0.28 | 5.1-6.1 | 0.20 | 0.20 | Resto |

2.9. El Bismuto en Aluminio

El bismuto es el elemento químico número 83 de la tabla periódica. Dicho elemento no ha sido muy estudiado en conjunto con otros sistemas metálicos, por lo que sus beneficios exactos aportados aún pueden estar por descubrirse. Sin embargo, lo que se sabe es que el bismuto en aleaciones de aluminio aumenta la ductilidad, mejora su maquinabilidad y en general ayuda a disminuir y romper la capa pasiva de alúmina que genera el aluminio [26], [27]. En la Tabla 2.5 se muestran algunas propiedades físicas del bismuto.

Tabla 2.5 Propiedades del bismuto.

| Propiedades físicas | |
|---|--------------|
| Numero atómico | 83 |
| Punto de fusión | 271 °C |
| Punto de ebullición | 1560 °C |
| Conductividad térmica | 7.87 W/(m.K) |
| Coefficiente de expansión térmica 0-100°C | 13.4 |

Uno de los efectos que tiene la adición de bismuto en la aleación de aluminio es que disminuye la tensión superficial del material afectando la

formación de la capa de óxido en la superficie. Cabe mencionar que el bismuto no es soluble en aluminio por arriba de 3.4% en peso a 660°C (Figura 2.4).

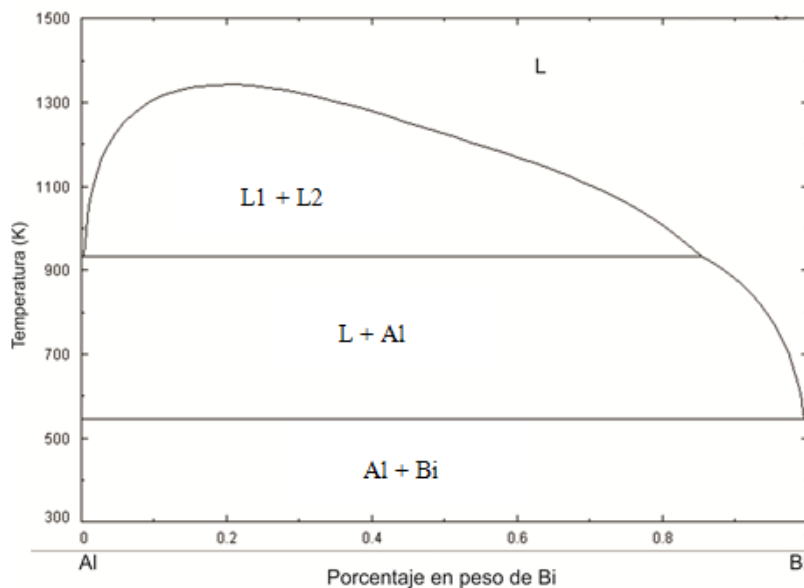


Figura 2.4 Diagrama binario del sistema de aleación Al-Bi

Aunque el diagrama mostrado en la Figura 2.4 es el utilizado comúnmente hoy en día investigaciones realizadas por **Laurent Pilote** junto con colaboradores estudiaron la variación de los límites de solubilidad de Bi, Pb y Sn en función de la temperatura en aluminio y se estimó un error de solubilidad en la aleación binaria Al-Bi de 45%, el cual en términos de porcentaje en volumen se predice un máximo de solubilidad de $0.2\% \pm 0.0902$ de Bi. [27].

Durante el enfriamiento, el bismuto forma fases sólidas en el aluminio con un cambio de volumen a 270 °C. Debido a la formación de la capa de óxido que forma interrupciones entre la capa de óxido y provoca el desprendimiento de la capa (Figura 2.5 y 2.6) [26].

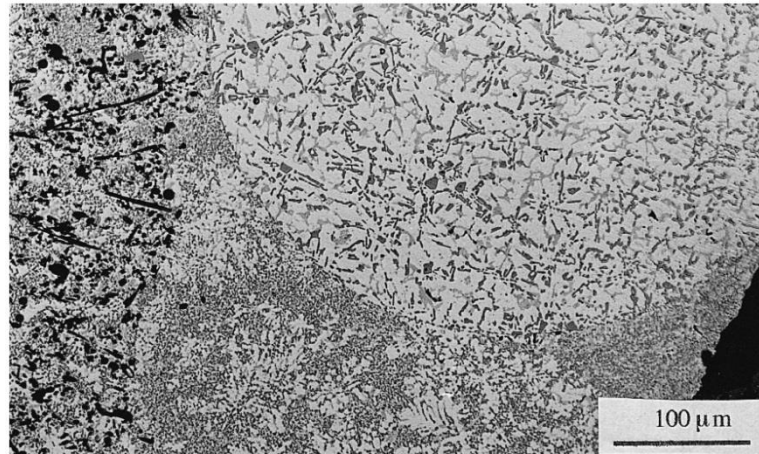


Figura 2.5 Micrografía de la formación de la capa de óxido sobre la superficie del material [26]

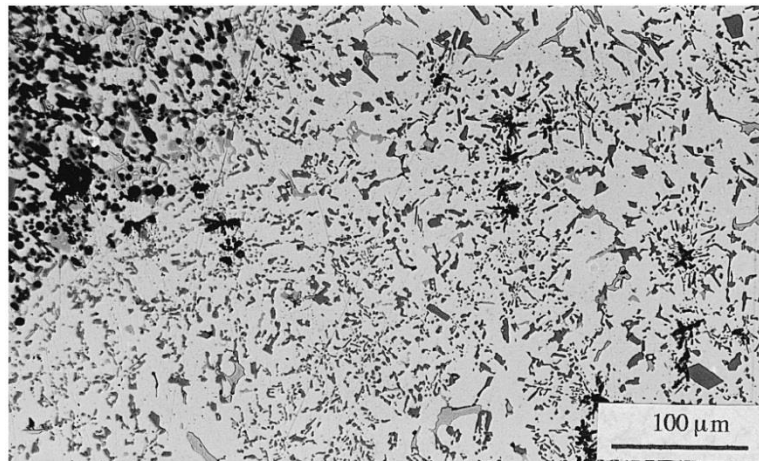


Figura 2.6 Micrografía de la presencia de bismuto puro antes del desprendimiento de la capa de óxido [26].

Por otro lado, al cambiar la tensión superficial del material y eliminar la capa de óxido, mejora el ángulo de contacto. En consecuencia, la soldabilidad del sistema mejora notablemente por el proceso brazing.

Investigaciones realizadas por **Wen-Quan Lu** y colaboradores [28] se observa la evolución en el proceso de fusión de una aleación no miscible de Al-10% en peso de Bi. El sistema Al-Bi tiene un amplio rango de miscibilidad en

estado líquido, pero cuando incrementa la fracción sólida durante la solidificación en cierto rango, esta miscibilidad disminuye, lo cual provoca la separación de las fracciones líquidas por efecto de la diferencia de densidad y composición química. Esta separación provoca que la fase que se encuentre con menor volumen y se presente el líquido en forma globular.

En la aleación conforme la temperatura se incrementa el bismuto empieza a fundir primero debido a que su punto de fusión (271°C) es menor al de aluminio (660°C). Después, el bismuto se empieza a segregar en la superficie y se aglomera hasta el punto en que se alcanza la temperatura donde los dos elementos forman una solución. Esto hace pensar que al formar la capa de bismuto en la superficie protege al aluminio del oxígeno evitando la formación de la oxidación de la superficie, y con esto coadyuva una unión sin el uso de una atmósfera controlada.

Por otro lado, el efecto del bismuto empleando diferentes elementos se ha estado investigando por distintos autores.

Investigaciones realizadas por **Saeed Farahany** y colaboradores [29], estudiaron el desarrollo microestructural de una aleación cuaternaria base Zn con porciones de Bi, las cuales se variaron a 0.1%, 0.3% y 0.5%. Los estudios sugieren que al incrementar el bismuto aumentaba la dureza. Debido a la formación, distribución y refinamiento de las fases ZnMg_4Bi_5 y $\text{Zn}_2\text{Mg}_2\text{Bi}_3$ dentro de los límites de grano. Las mejores propiedades se obtuvieron con un contenido de 0.5wt% Bi con una dureza de 59.6 HV.

Otra de las aplicaciones del bismuto en aluminio es en la creación de hidrógeno para fines energéticos autosustentables como se relata en la investigación realizada por **Qi An** y colaboradores [30]. En los estudios realizados, adicionan bismuto a la aleación de aluminio para evitar la formación de alúmina y evitar la reactividad con el agua para no permitir la formación de hidrógeno. Cabe resaltar que se utilizaron diferentes aleaciones de aluminio con

diferente concentración de elementos de los cuales se variaron. Dichas aleaciones contenían Al-Ga-In-Sn-Bi, variando el bismuto entre 1.41% a 3.01% en peso. Encontraron que con una cantidad de 2.53% en peso de bismuto, disminuye la formación de alúmina.

En investigaciones recientes, **O.B. Dehkordi** [31] ha estudiado la unión entre alúmina con alúmina con una interfaz de óxido de bismuto (Bi_2O_3) mediante fases líquidas transitorias. Los procesos llevados desde 900°C y 1100°C con tiempos variados de 4, 6 y 10 horas. En esta investigación se concluyó que a mayores tiempos de permanencia se obtenían mejores propiedades mecánicas, así mismo, se encontró mediante difracción una interacción entre la alúmina y la interfaz formando AlBiO_3 .

En otra investigación realizada por **Wei Guo** y colaboradores [32] se estudió la evolución microestructural y propiedades mecánicas de la unión mediante brazing entre piezas de alúmina con una interfaz de pasta de Bi_2O_3 - B_2O_3 - ZnO . En dicha investigación se hizo presente la fase ZnAl_2O_4 debido a la interacción que existe entre la alúmina y el óxido de zinc, esta fase en el sistema es la responsable de mejorar las propiedades mecánicas de la unión si se controlan los parámetros, ya que se llegó a la conclusión que las mejores propiedades se obtuvieron a una temperatura de 675°C con 30 minutos. Por otro lado, no se encontró una interacción entre el bismuto con los demás elementos presentes en el sistema.

Chunju Niu y colaboradores [33] evaluaron termodinámicamente la aleación ternaria Al-Bi-Mg, en el cual se reporta por literatura de investigaciones previas que no es posible un compuesto de estos tres elementos juntos, pero si la formación de fases Al_2Mg_3 y Bi_2Mg_3 . Se encontró que agregar cierta cantidad de bismuto a la aleación Al-Mg-Sn forma Bi_2Mg_3 una fase de equilibrio la cual ayuda a mejorar su resistencia a altas temperaturas. Además, se observó que el bismuto tenía un efecto en el refinamiento de grano de la aleación con contenidos de 6% de aluminio y 2% de estroncio.

2.10 Fases Líquidas Transitorias (TLP)

Las fases líquidas transitorias es un proceso de unión mediante el uso de una interfase el cual debe de alcanzar su punto de fusión para así pasar a su fase líquida, dicha fase tiene como propósito llenar los posibles espacios vacíos de una superficie irregular y/o contaminada, así como difundir entre el material base con el pasar del tiempo y solidificar isotérmicamente [34].

En ocasiones se llega a confundir TLP con brazing por difusión, pero lo que diferencia ambas técnicas radica en la formación de una interfase líquida lo que elimina la necesidad de sujetadores y presión en los elementos a unir. La interfase requerida para el proceso TLP puede ser aportada por laminillas, electrodeposición, sputtering o alguna otra técnica que pueda depositar una capa superficial en las zonas donde se desea unir las piezas.

Para un proceso de unión con la máxima calidad posible donde se involucre TLP se da cuando las propiedades mecánicas y microestructurales son lo más parecido al material base y para obtenerlo es necesario el control adecuado de parámetros como la temperatura, tiempo, espesor de la interfase y composición.

Otro factor importante en el resultado del proceso es la mojabilidad que tenga la fase líquida con el metal base, debido a que si no hay una interacción entre las dos superficies difícilmente se pueda producir la unión.

En los últimos años el proceso ha tomado gran relevancia en procesos de unión de distintas aleaciones metálicas y sistemas cerámicos, debido a la bondad del proceso que combina los beneficios de un proceso difusivo y de unión con fases líquidas.

Las principales ventajas que tiene el proceso son: 1) la interfase puesta entre los elementos a unir actúa como un agente depresor del punto de fusión, lo que quiere decir que se aplican menores temperaturas que en procesos de

brazing convencionales, lo cual implica a su vez una menor afección térmica al material y ahorro de energía, 2) evita la formación de fases frágiles, 3) se utiliza para materiales susceptibles al agrietamiento en la zona afectada por el calor [35], [36].

Un ejemplo de lo antes mencionado se muestra en la investigación hecha por Yanni Wei [36], donde muestra y compara las microestructuras del sistema Cu/Al las cuales se unieron por el proceso TLP con una interfase Al-11Si-4Cu-2Mg y Al-4.5Si-2Cu-1Mg y otras piezas las cuales no pasaron por este proceso por no contar con una interfase. Estas condiciones de experimentación mostraron que las piezas que no se unieron con la interfase produjeron fases frágiles eutécticas Al_2Cu y Al_4Cu_9 en las zonas de unión, mientras que las piezas que la tenían no se observó la formación de estas fases como se muestra en la Figura 2.7 a) y b) respectivamente.

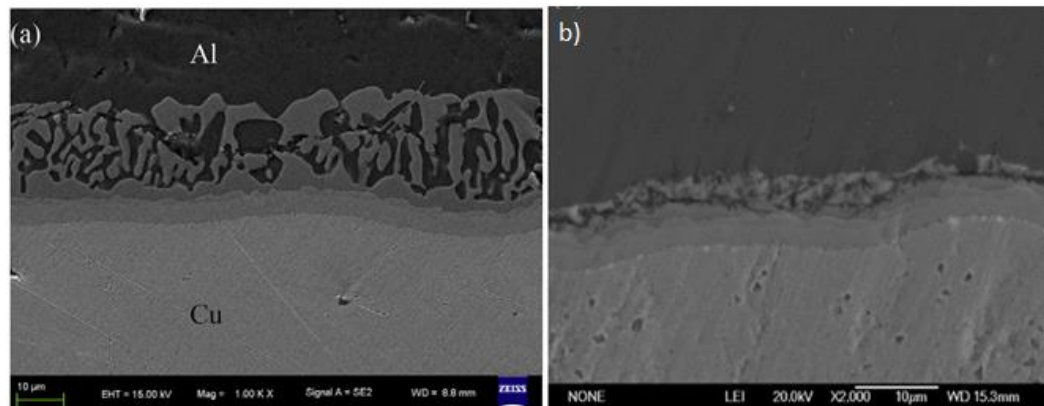


Figura 2.7 Micrografía tomadas en MEB de la zona de unión del sistema Cu/Al, a) muestra unida sin interfase b) muestra unida con una interfase Al-11Si-4Cu-2Mg [36]

En estudios recientes se ha empleado el Bi para unir el sistema aluminio/aluminio mediante una interfase de galio [37]. En este estudio E. Lee y colaboradores [37] analizaron la unión de Al mediante un proceso combinado en estado sólido y TLP (Transient Liquid Phase), comparando la unión Al/Al y

Al/Ga/Al. Los experimentos mostraron una mejora en la unión en el sistema Al/Ga/Al a 200°C por 10 min de permanencia. En este caso, la unión es efectiva con Ga si el aluminio es cubierto adecuadamente por Al_2O_3 . Debido a que si no se cumple con esto el galio difunde en el aluminio, en consecuencia, disminuye las fuerzas cohesivas entre granos debido a la formación de una fase líquida. Cabe mencionar que los autores sugieren que el galio no moja adecuadamente la superficie de la capa de óxido. No obstante, concluyen que el galio mejora la calidad de la unión por medio del proceso TLP.

CAPÍTULO 3 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA

El proceso de unión brazing como se ha descrito en este trabajo es la unión de elementos mediante la aplicación de temperaturas superiores a 450°C, por lo tanto, se restringe el proceso a materiales base con puntos de fusión superiores a esta temperatura. De las ventajas que tiene el proceso es que cuenta con múltiples técnicas por las cuales se puede aplicar el calor a las piezas y esto dependerá de las características geométricas, físicas y microestructurales que se deseen obtener.

Como ejemplo, en el brazing por horno es posible obtener piezas con una microestructura determinada debido a que la temperatura es controlable al 100%, así mismo, en ocasiones es posible controlar la atmosfera para así evitar posibles oxidaciones que dañen la integridad de la soldadura, y en determinados casos se puede aumentar la productividad con esta técnica, por otra parte se tiene el brazing por antorcha en donde la temperatura aportada no es controlada, sino agentes externos como gases de combustión producen la energía necesaria para fundir el material de aporte.

Por otra parte si el proceso es manual se depende de la habilidad del soldador habiendo casos donde se puede mantener en menor o mayor medida

el calor aportado a la pieza afectando así sus propiedades físicas, en ocasiones también no es muy estético a la vista, pero la ventaja que se tiene con respecto al anterior es su economicidad y portabilidad, es por esto que es muy común el uso de esta técnica. Con lo anterior explicado se entiende que para cada aplicación necesaria se deben de evaluar todos los pros y contras de las técnicas de aplicación de calor para así poder seleccionar la mejor.

En este trabajo se estudia el efecto que tiene el bismuto en el aluminio al soldarlo con el proceso brazing en este caso mediante horno. Para este sistema la información que se tiene de su fase sólida es muy limitada y así lo indica L. Pilote y colaboradores [25]. Sin embargo, se cuenta con su diagrama binario, el cual representa sus fases líquidas y sólidas e indica que en estado sólido ambos sistemas no son solubles por lo tanto no forman fases conjuntas.

Aunque en estado sólido no formen fases conjuntas, el bismuto tiene un efecto en el aluminio al solidificar y al fundirse, según investigadores como Papworth y colaboradores [24], Wen-Quan Lu y colaboradores [26]. Papworth muestra que el bismuto al solidificar dentro de la matriz de aluminio debido a sus propiedades físicas, que es un metal que se expande al pasar de su fase líquida a sólida, rompe la capa de óxido formada en la superficie y a su vez al estar presente como una fase pura forma disrupciones en toda la matriz dificultando la formación nuevamente de la capa de óxido.

Por otro lado, Wen-quan Lu muestra el efecto del bismuto desde el lado opuesto, al calentar y llegar a la fusión del bismuto. En este caso lo que ocurre es que, al llegar al punto de fusión del bismuto, el cual es mucho menor que el del aluminio, por diferencia química y densidad, la fracción líquida de bismuto se separa del aluminio segregándose hacia la superficie, lo cual provoca un efecto protector del mismo formando una barrera para el oxígeno.

En este proceso de unión interviene lo que se llaman fases líquidas transitorias el cual define MacDonald y colaboradores [32] como el proceso de

unión por el cual una capa intermedia reduce el punto de fusión del material, lo cual provoca que el elemento intercalado difunden a través del material causando una solidificación isotérmica.

En la literatura no se cuenta con gran información relevante donde se involucre al bismuto, aluminio y silicio juntos, sin embargo, existe una amplia investigación con otros sistemas, por ejemplo Yannin Wei y colaboradores [34] investigaron el proceso TLP con un sistema Cu/Al con diversas interfaces, el cual reitera lo antes mencionado, piezas que no contaban con las interfaces que propiciaran el proceso TLP generaron fases eutécticas frágiles de Al_2Cu y Al_4Cu_9 mientras que las que tenían las interfaces no ocurrió lo mismo. Obteniéndose mejores propiedades mecánicas.

CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDIO

4.1 Metodología

Para la realización de este trabajo se siguió una metodología, la cual consiste primeramente en la obtención de la materia prima utilizada (aluminio 7075). Lo siguiente es realizar los cortes necesarios para obtener las dimensiones necesarias, enseguida se procesan las piezas con y sin recubrimiento para que una vez se termine el proceso se realice la caracterización microestructural y se hagan nanoindentación para obtener sus durezas y módulos elásticos. En la figura 4.1 se resumen los pasos antes mencionados y en los temas siguientes se desglosa más a detalle.

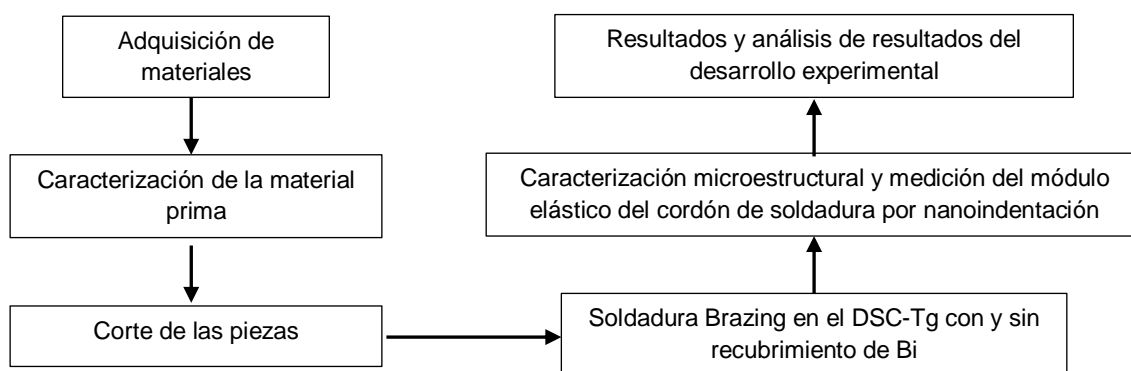


Figura 4.1 Diagrama de flujo de la metodología usada

4.2. Desarrollo Experimental

La meta de este caso de estudio exploratorio, es establecer el efecto del Bi en la soldadura de aleaciones de aluminio de baja soldabilidad. En este caso, se pretende evidenciar la modificación superficial a través de la deposición de películas delgadas de Bi por la técnica de pulverización catódica. En este sentido, se realizaron soldaduras de aleaciones de aluminio (7075) sin y con películas delgadas de Bi

4.2.1 Preparación de las Muestras de Aluminio.

Las muestras de aluminio se cortaron en un equipo de corte con un disco de diamante marca Struers, ya que este tiene mayor precisión y menor efecto térmico en las zonas de corte (ver Figura 4.2).



Figura 4.2 Equipo de corte con disco de diamante.

Una vez cortadas las muestras, se sumergieron en un vaso de precipitado con etanol de grado industrial, con el fin de evitar la oxidación superficial del aluminio. Debido a que este óxido interfiere con la mojabilidad durante la soldadura brazing y con la deposición de las películas con bismuto.

Cabe mencionar que la geometría y dimensiones (mm) de las muestras de aluminio tienen las dimensiones internas de los crisoles de alúmina del equipo DSC-Tg (ver Figura 4.3). Por otra parte, el peso máximo de las muestras debe ser menor a 200 miligramos, ya que la balanza del equipo es muy sensible al peso y pueden romperse durante el calentamiento/enfriamiento.

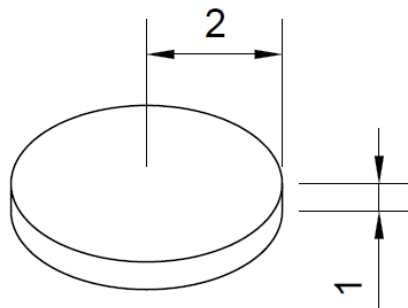


Figura 4.3 Esquema de la geometría y dimensiones (mm) de las muestras de aluminio.

4.2.2 Preparación y Caracterización de las Muestras

En esta sección, se detalla de forma general la preparación de las muestras de aluminio sin y con soldadura para todas las etapas de este desarrollo experimental. Las muestras se lijaron sobre lijas de SiC de la 800 a 1600. Posteriormente, se les realizó una limpieza ultrasónica en un equipo marca Brandon por 15 min, con el fin de eliminar partículas incrustadas de la etapa de desbaste. Libre las superficies desbastadas de partículas incrustadas, se procedió a pulirlas sobre paños microcloth empleando como agente de pulido, pasta de carburo de diamante (SiC monocristalino) marca Struers. Una vez obtenido a espejo la superficie de la muestra a analizar, se llevó a cabo una limpieza ultrasónica con etanol por 15 min., con el objetivo de eliminar residuos del pulido. Terminada esta limpieza, se pasaron las muestras sobre un paño microcloth impregnado de silica gel para dar un acabado fino, posteriormente se limpiaron y secaron alternadamente con algodón impregnado de etanol bajo un

flujo de aire caliente. Finalmente, las muestras después del proceso de soldadura brazing, se montaron en frío mediante el empleo de una resina de rápido termofraguado Acryfix marca Struers y, se inspeccionaron bajo el microscopio óptico marca Olympus a diferentes aumentos, con el fin de inspeccionar la zona de la soldadura.

4.2.3 Soldadura Brazing.

En esta sección, se detalla de manera general el proceso de la preparación de las muestras a soldar, así como el uso del equipo DSC-Tg marca T Instruments modelo 660 para soldar el aluminio sin y con Bi (ver Figura 4.4). Las superficies de las muestras se desbastan con lija 200 en direcciones de tal forma que, se marque una cuadrícula sobre ambas superficies. Posteriormente, se limpian con ultrasonido en un vaso de precipitado con etanol por 30 min. para eliminar incrustaciones de las lijas sobre la superficie. Libres de impurezas, se embarra en ambas superficies el metal de aporte de aluminio marca NPA-1070-400-M01. La cantidad de pasta a usar está en función del área a cubrir y el gap a dejar durante la presión manual de ambas superficies. El exceso de la pasta se elimina mediante la espátula. Posteriormente, se abre el horno del equipo y se taran los crisoles de alúmina vacíos (el de referencia y el de la muestra a soldar). Una vez tarados los crisoles, se coloca el sistema a soldar dentro del crisol de la muestra a soldar y, se cierra la cámara del horno. Se abre el flujo de gas de Ar y se capturan las condiciones del proceso brazing en el equipo DSC-Tg mediante el paquete computacional At Instruments. Terminado el proceso de soldadura, se extrae la muestra del crisol para su posterior preparación metalográfica para la caracterización microestructural y mecánica por nanoindentación.



Figura 4.4 Equipo DSC-Tg para realizar la soldadura brazing de las muestras de aluminio sin y con películas de Bi

Cabe mencionar, que se realizaron primero 5 experimentos sin el recubrimiento de Bi, los cuales se resumen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Parámetros utilizados en la soldadura brazing en piezas sin película de Bi

| Muestra | Parámetros de brazing | | |
|---------|-----------------------|------------------------|--------------|
| | Temperatura (C°) | Calentamiento (°C/min) | Tiempo (min) |
| Al-1 | 650 | 10 | 60 |
| Al-2 | 620 | 10 | 60 |
| Al-3 | 635 | 10 | 90 |
| Al-4 | 630 | 10 | 60 |
| Al-5 | 625 | 10 | 60 |

4.2.4 Pruebas Mecánicas de Nanoindentación a Piezas Unidas

La técnica de nanoindentación permite evaluar los módulos elásticos mediante algoritmos que consideran los desplazamientos antes y después de la nanoindentación y, las correlacionan con la resistencia a la deformación plástica y elástico empleando una punta tipo Berkovich. Ambos casos se resumen en dos ecuaciones básicas dentro del algoritmo del paquete computacional: (1) y (2) [38]:

$$\frac{P}{h_p^2} = \alpha_1 H \quad \text{Ecuación 4.1 Plástica}$$

Donde P es la carga de nanoindentación, α_1 es un factor geométrico adimensional, H es la dureza y h_p^2 es el desplazamiento plástico.

$$P = \frac{\pi \tan \psi}{2\gamma^2} \frac{E}{(1-\nu^2)} h^2 \quad \text{Ecuación 4.2 Elástica}$$

Donde $\gamma = \pi/2$, que es la razón de la profundidad total, ν es la razón de Poisson, E es el módulo elástico. En este caso, la expresión $(E/(1-\nu^2))$ considera la deformación plana debido a los planos cortantes que incide el indentador Berkovich.

La evidencia de la medición de los módulos elásticos, así como del trabajo plástico y elástico, lo representa mediante una curva de carga-descarga (ver Figura 4.5). Donde el área bajo la curva ABC estima el trabajo plástico y de ABD determina el trabajo elástico. La suma de ambas áreas resulta en el trabajo total que tiene el material durante la nanoindentación.

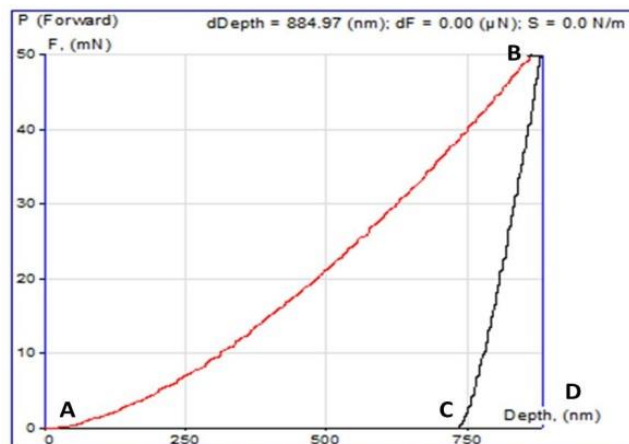


Figura 4.5 Curva de carga-descarga de un ensayo de nanoindentación

En base a lo anterior, se procedió a realizar la determinación de los módulos elásticos en el cordón de soldadura en muestras sin y con película de Bi, usando el equipo marca Rtec Instruments (Figura 4.6). Los parámetros de entrada para realizar las nanoindentaciones se tomaron de la literatura [11].

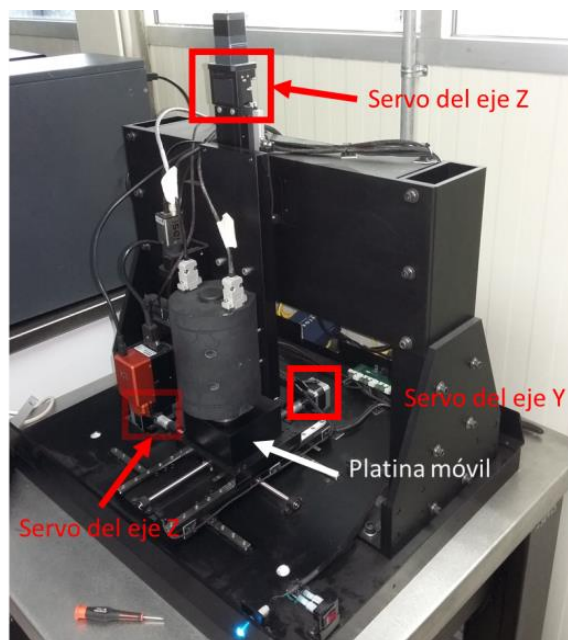


Figura 4.6 Equipo de nanoindentación para determinar los módulos elásticos: 1) Celda de carga.

4.2.5 Deposición de Películas de Bi Sobre Muestras de Aluminio y Brazing

Antes de llevar a cabo la soldadura brazing, se depositaron sobre la superficie las películas de Bi mediante una máquina secuencia de doble objetivo de marca Quorum Tech, modelo Q300TD. Los parámetros para la deposición de Bi se resumen en la Tabla 4.2. Por otro lado, se muestran los parámetros de soldadura brazing en las muestras con películas de Bi en la Tabla 4.3.

Tabla 4.2 Parámetros para la deposición de películas de Bi sobre el aluminio

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------|---------|
| Material | Bismuto |
| Corriente del sputtering (mA) | 20 |
| Tiempo del sputtering (s) | 120 |
| Factor de sputtering | 1.70 |

Tabla 4.3 Parámetros de unión en las piezas con Bi.

| Muestra | Parámetros de brazing | | |
|---------|-----------------------|------------------------|--------------|
| | Temperatura (°C) | Calentamiento (°C/min) | Tiempo (min) |
| Al-Rec1 | 625 | 10 | 60 |
| Al-Rec2 | 655 | 10 | 60 |

4.3 Resultados y Discusión del Caso de Estudio

4.3.1 Análisis de la Materia Prima para Soldar

La Figura 4.7 muestra la superficie de la aleación de aluminio en condición de pulido por microscopía óptica. Se aprecian partículas de intermetálicos ricos en Fe indicados con el número 1 embebidas en una matriz de aluminio (núm. 2). Por otro lado, se enlista en la Tabla 4.4 la composición química reportada por el proveedor.

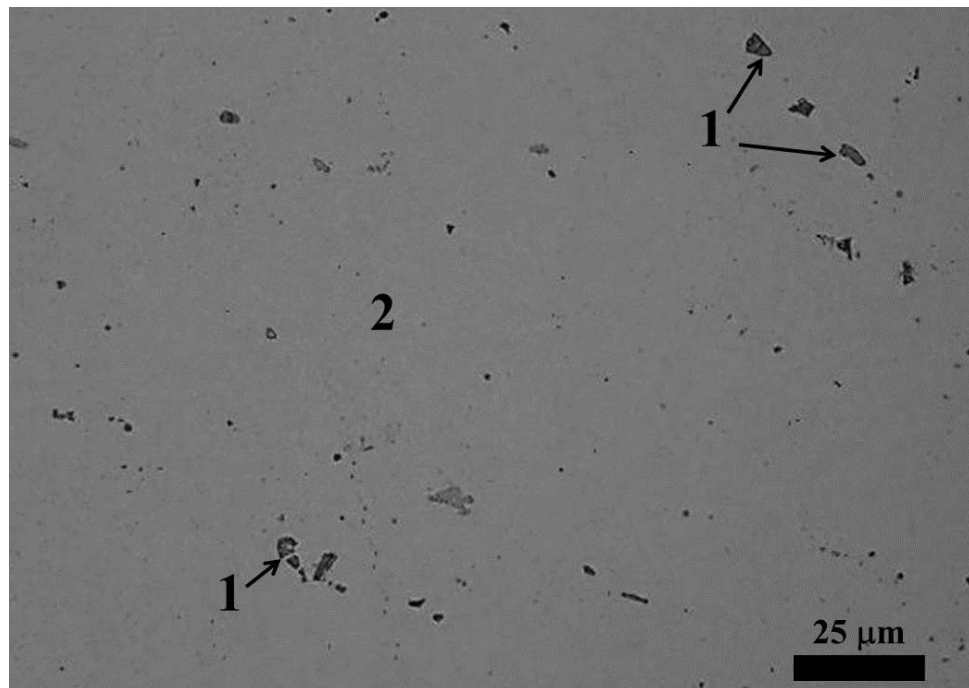


Figura 4.7 Micrografía de la aleación de aluminio en condición de pulido conteniendo intermetálicos: 1) Intermetálicos de Fe y 2) Matriz de la aleación de aluminio

Tabla 4.4 Composición química proporcionada de la carta del proveedor

| % | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Al |
|------|-----|-----|------|-----|------|------|------|-------|
| Mín. | - | - | 1.20 | - | 2.10 | 0.18 | 5.10 | resto |
| Máx. | 0.4 | 0.5 | 2.0 | 0.3 | 2.90 | 0.28 | 6.10 | resto |

En este caso, el Zn confiere una pequeña resistencia en solución sólida o endurecimiento en frío. Sin embargo, los precipitados de Al-Zn-Mg son bases de las aleaciones 7xxx y 7xx.x. Dos fases pueden ser formadas a partir de la descomposición eutéctica: 1) $MgZn_2$ (hexagonal) y $Al_2Mg_3Zn_3$ (BCC). Dependiendo de la razón zinc/magnesio, las aleaciones libres de cobre son resistentes debido a los precursores metaestables: $MgZn_2$ ó $Al_2Mg_3Zn_3$. En las aleaciones de Al-Zn-Mg-Cu, el Cu y Al son substituidos por Zn en $MgZn$ para formar $Mg(Zn,Cu,Al)_2$. Las partículas de Al_2CuMg se forman por descomposición eutéctica y precipitación en estado sólido. El Mg se adiciona para formar precipitados de Mg_2Si , Al-Cu-Mg y Al-Zn-Mg. En el diagrama de fases de este sistema tiene una solvus con pendiente positiva, el cual dificulta la precipitación de Al_3Mg_2 (FCC), por ende, se le adiciona Si, Cu y Zn. En este sentido, la elección del metal de aporte es importante basándose en la formación de eutécticos y la composición química del metal base. Por lo tanto, en este trabajo se empleó el metal de aporte en pasta NPA-1070-400-M01. Aunque, en la literatura [11] se sugiere conocer el sistema a soldar por brazing, ya que algunas aleaciones requieren métodos especiales de soldadura y limpieza (ver Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Rangos de fusión y brazing de las aleaciones de uso común.

| Aleación | °C | Brazing |
|----------------------------------|---------|---------|
| No Tratables térmicamente | | |
| 1350 | 646-657 | A |
| 1100 | 643-657 | A |
| 3003 | 643-654 | A |
| 3004 | 629-652 | B |
| 5005 | 632-652 | B |
| 5050 | 627-652 | B |
| 5052 | 593-649 | C |
| Tratables térmicamente | | |
| 6053 | 593-652 | A |
| 6061 | 593-649 | A |
| 6063 | 616-654 | A |
| 6951 | 616-654 | A |
| 7005 | 607-649 | B |
| Vaciadas | | |
| 443 | 574-632 | B |
| 356 | 557-613 | B |
| 710 | 596-646 | B |
| 711 | 604-643 | A |

A: Generalmente soldables; B: Con técnicas especiales y C: soldabilidad limitada (placas)

4.3.2 Análisis y Caracterización de las Muestras Soldadas por Brazing sin Deposición de Películas de Bi.

La Figura 4.8 muestra soldaduras del sistema de aleación de aluminio a diferentes temperaturas de brazing sin usar la deposición de películas de Bi. En la Figura 4.8 (a) se muestra la zona de unión completa cuando se lleva a cabo el brazing a 650 °C por 60 min., presentándose fusión parcial del metal base. Mismo caso se observa a temperaturas de 635 y 630 °C (Figura 4.8 (b) y (c) respectivamente). No obstante, a 620 °C se aprecia la falta de soldadura en la zona de unión (Figura 4.8 (d)). Se postula que la falta de unión es debido a la no mojabilidad de la soldadura por presencia de una capa de óxido y a la falta de una temperatura adecuada para el proceso.

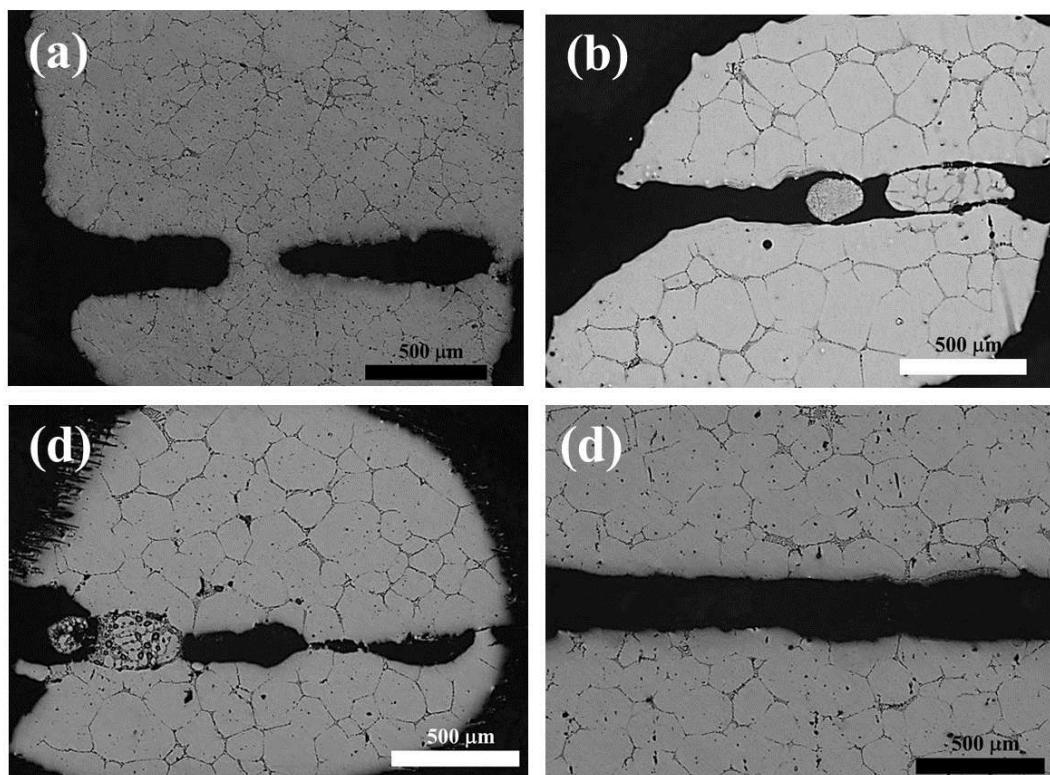


Figura 4.8 Micrografías de las muestras de la aleación de aluminio sin película de Bi soldadas por brazing por 60 min. a) 650 °C; b) 635 °C; c) 630 °C y d) 620 °C.

4.3.3 Análisis y Caracterización de las Muestras Soldadas por Brazing con Deposición de Películas de Bi.

Antes de llevar a cabo la soldadura brazing en las muestras con películas de Bi, se observó bajo estereoscopio la superficie de una muestra. Se aprecia una serie de puntos brillantes que se refieren a aglomeraciones de Bi (Figura 4.9).

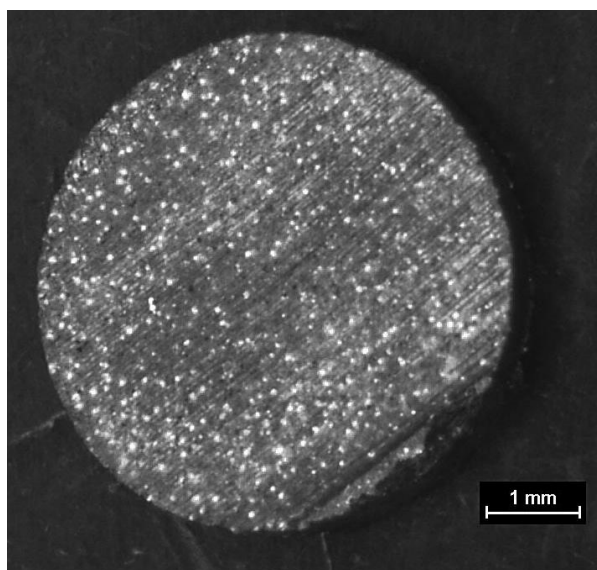


Figura 4.9 Superficie cubierta con una película de Bi por evaporación catódica por 120 s.

Esta superficie se caracterizó por microscopía electrónica de barrido realizando un análisis químico de área sobre la superficie cubierta, esta muestra que la película de Bi se distribuye de forma homogénea en la muestra y de forma adicional se sigue observando el acabado superficial del sustrato (Figura. 4.10 (b) y (c)). Debido a que, durante el plasma, el vapor generado cae sobre la superficie y es capaz de llenar huecos que favorezcan la mojabilidad del sistema, ya que el óxido de aluminio forma una capa que impide la soldabilidad.

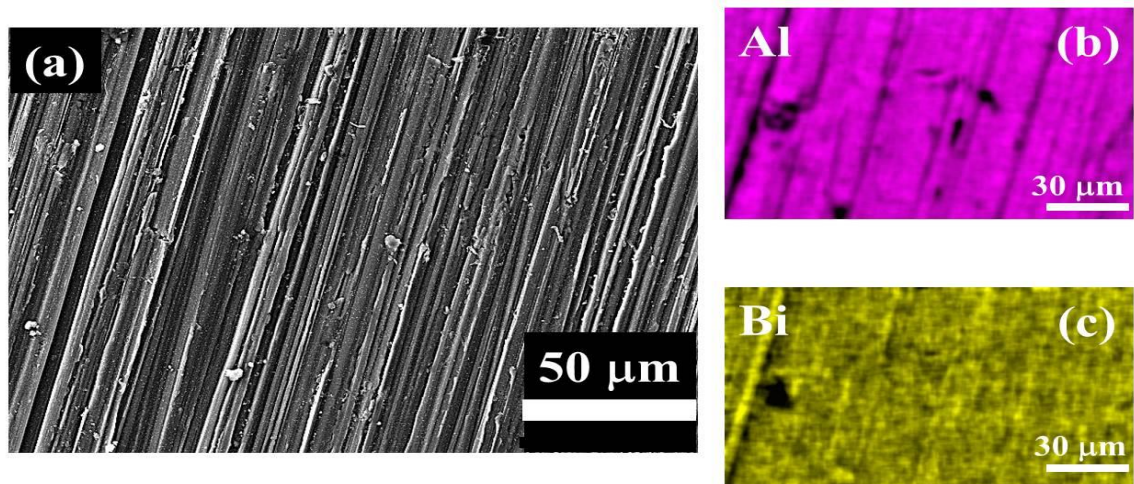


Figura 4.10 a) Imagen de electrones retrodispersados y análisis químico de área por EDS (b) y (c) de la superficie de la aleación de aluminio cubierta con Bi previo al brazing.

En base a los resultados analizados en las muestras soldadas sin Bi, se procedió a llevar a cabo el brazing a temperaturas y tiempos resumidos en la Tabla 4.3. Se aprecia, en la Figura 4.11, una cavidad sin soldadura que está marcada con una línea discontinua soldada a 625 °C por 60 min. Este es debido a la formación de una película de óxido o suciedad de las superficies de la muestra. Además, se aprecian en los círculos de color azul, pequeñas microcavidades. Debido a la contracción que se llevó a cabo durante la solidificación. Lo cual sugiere que aún, a estas temperaturas de brazing se aprecia una fusión parcial del metal base.

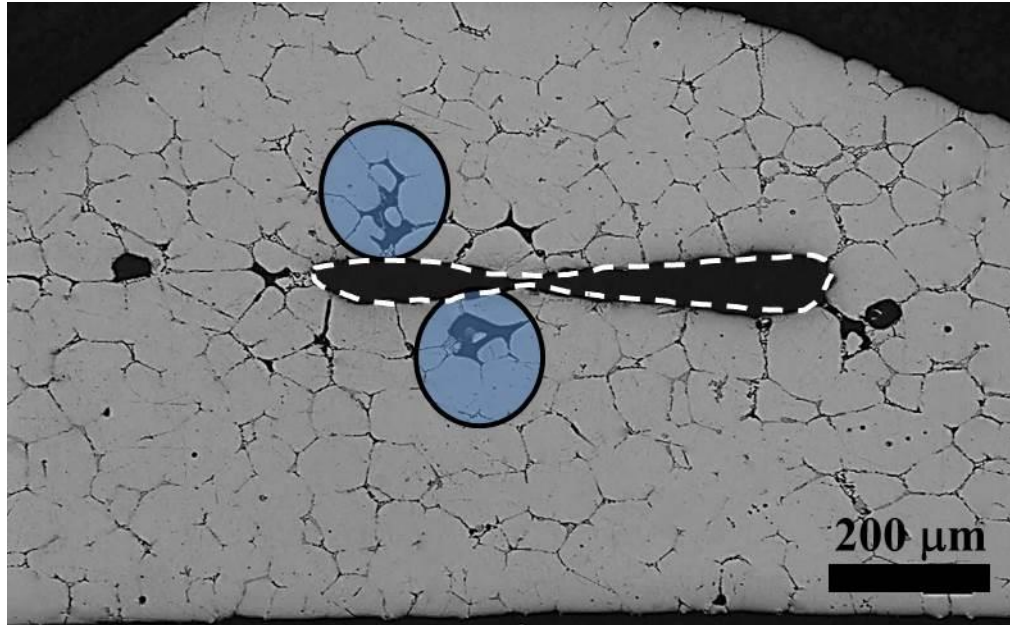


Figura 4.11 Micrografía de la muestra de aleación de aluminio soldada por brazing a 625 °C por 60 min con una película de Bi.

Por otra parte, en la Figura 4.12, se observa una soldadura libre de discontinuidades en la aleación de aluminio soldada a una temperatura brazing de 655 °C por 60 min. Sin embargo, se aprecian en los círculos de color azul la formación de pequeñas microcavidades en el metal base, así como la fusión parcial del sistema de unión de aluminio.

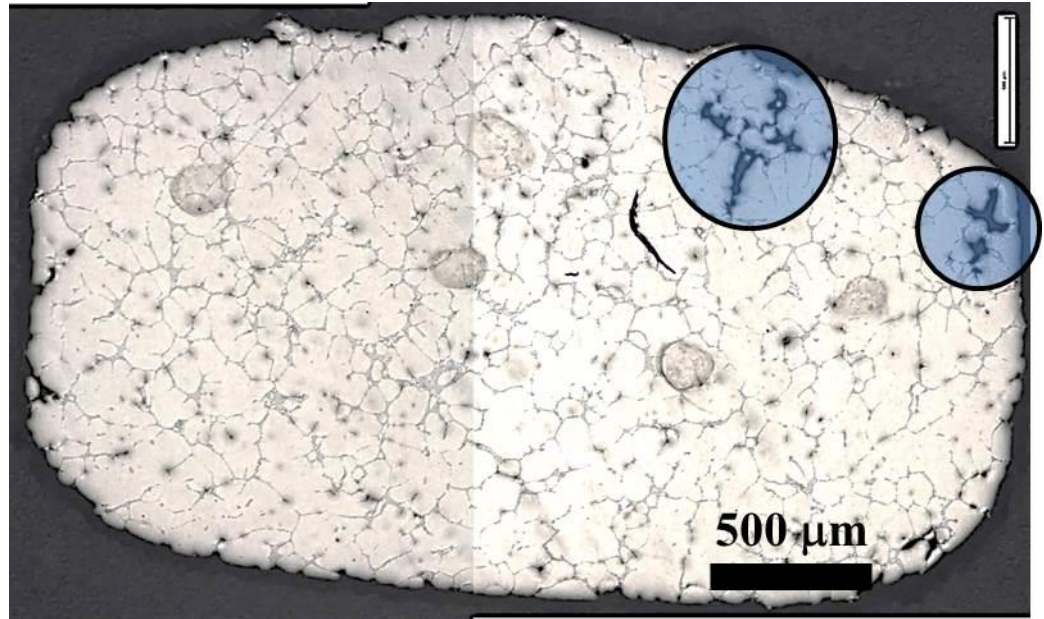


Figura 4.12 Micrografía de la muestra de aleación de aluminio soldada por brazing a 655 °C por 60 min con una película de Bi.

Cabe mencionar, que las microcavidades, así como la fusión parcial del sistema de unión, es debido a la formación de una fase líquida transitoria (TLP: Transient Liquid Phase). Se postula que el TLP es debido a los elementos supresores del punto de fusión que contiene la pasta y, esta fase líquida se transporta a través de los límites de grano. Este fenómeno es consistente con la formación de eutéticos en los límites de grano del tipo $AlFeSi$ (Figura 4.13 (a) y (b)). Por otro lado, en puntos triples se genera la mayor cantidad de fracción líquida, durante la solidificación la contracción de este líquido da lugar a la formación de micro-rechupes (Figura 4.14). Este fenómeno hace que haya una diferencia en composición química en los límites de grano dando lugar a la formación de microsegregación y formación de segundas fases.

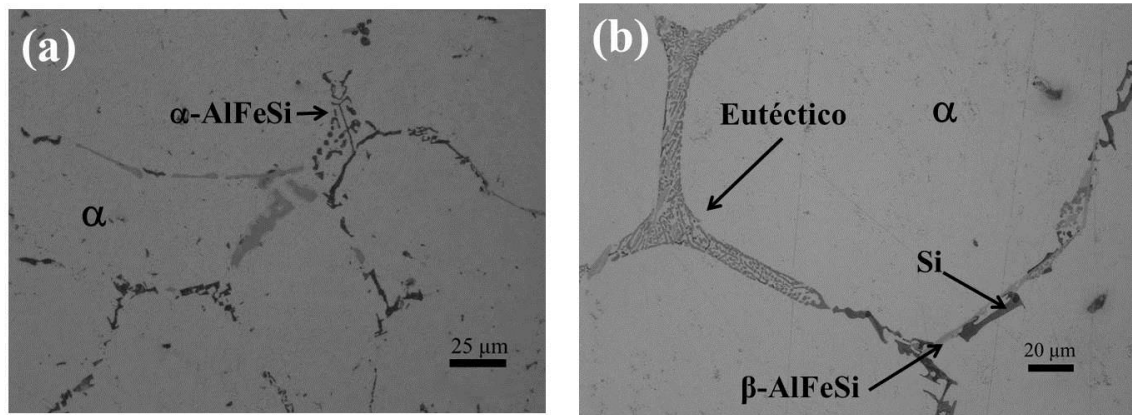


Figura 4.13 a) Micrografía de una estructura eutética α -AlFeSi y b) Formación de eutéticos en el límite de grano y del Si.

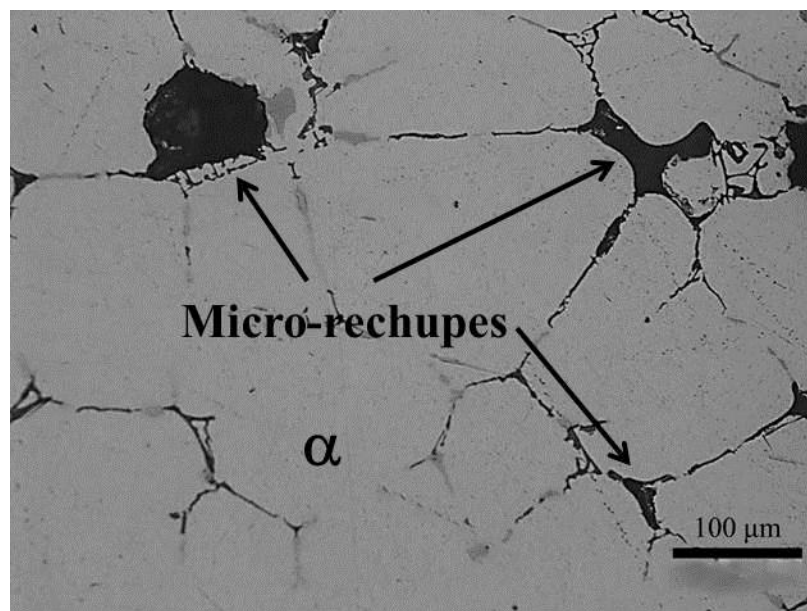


Figura 4.14 Micrografía de micro-rechupes en puntos triples del brazing del sistema de aleación de Al.

Reportes en la literatura [39] sugieren que los líquidos últimos en solidificar son ricos en soluto, ya que es el último eutético en solidificar. En este sentido, la acumulación del soluto es capaz de desplazar el líquido y, provocar el

crecimiento para formar una segunda fase (Si, por ejemplo). En estos sistemas, la composición química a un lado del eutéctico y la ausencia en el otro indica que la zona conjunta es asimétrica. Básicamente, este fenómeno es establecido por la composición química del metal de aporte a la temperatura de 615°C por 60 min de brazing. En este caso, en el cordón de soldadura se subenfía el líquido un poco por debajo de la temperatura de equilibrio eutéctico, y por procesos de difusión, el cristal en el líquido forma un cristal primario el cual crece independientemente en el líquido. Esta magnitud de crecimiento se realiza a través de la difusión en estado sólido, a partir del TLP. Motivo por el cual no aparece una zona de fusión en las muestras de Bi. Cabe mencionar, qué debido al alcance de este trabajo de especialización, se requiere de mayor número de pruebas bajo diseño de experimentos, técnicas de medición y análisis químico y microscópico para corroborar el efecto del metal de aporte en presencia del Bi.

4.3.4 Pruebas Mecánicas Elásticas por Nanoindentación

En esta sección, se muestran los valores del módulo elástico y microdureza de las muestras que se soldaron sin y con películas de Bi. Las soldaduras que no se soldaron bien no se les consideraron buena práctica de la soldadura. Sin embargo, es necesario conocer el efecto del Bi cuando difunde de la zona de la fase líquida hacia el metal base. En este sentido se realizaron pruebas en tres muestras.

La Tabla 4.6 resume los valores de las microdurezas y módulos elásticos medidos por nanoindentación empleando 350 mN de carga. En los resultados obtenidos se observan un incremento en las microdurezas de las piezas con Bi respecto a las que no lo tienen. En las muestras sin Bi se observan valores entre 66.3 y 86.85 HV mientras que en las recubiertas valores de 97.97 y 122.23 HV. Esta misma tendencia se aprecia en los valores de los módulos elásticos de las muestras sin y con Bi. Sin embargo, se resalta que el módulo

elástico en la muestra soldada a 615 °C por 60 min alcanza valores de 122.23 GPa.

Se postula que la distribución de Bi en el sistema de unión permite endurecer la zona de unión de forma sustitucional. Una mejor apreciación del efecto del Bi en la zona de unión se aprecia en las Figuras 4.15 y 4.16. Es importante mencionar que los módulos elásticos en las muestras Al-4 (sin Bi) y Rec1 (con Bi) tienen valores muy parecidos. Se plantea que esto es debido a que la muestra Rec1 se soldó a temperaturas de 625 °C por 60 min y, reblandece el material. En contraste, la muestra soldada a 615 °C por 60 min marca una gran diferencia, ya que no se aprecia un efecto que reblandezca la zona de unión y que el Bi este mejor distribuido en dicha zona.

Tabla 4.6 Propiedades mecánicas de tres muestras diferentes.

| Propiedades mecánicas | Al-1 | Al-4 | Rec1 | Rec2 |
|-----------------------|------|-------|-------|--------|
| HV | 66.3 | 86.85 | 97.95 | 122.23 |
| E (GPa) | 40.1 | 44.1 | 44.95 | 52.89 |

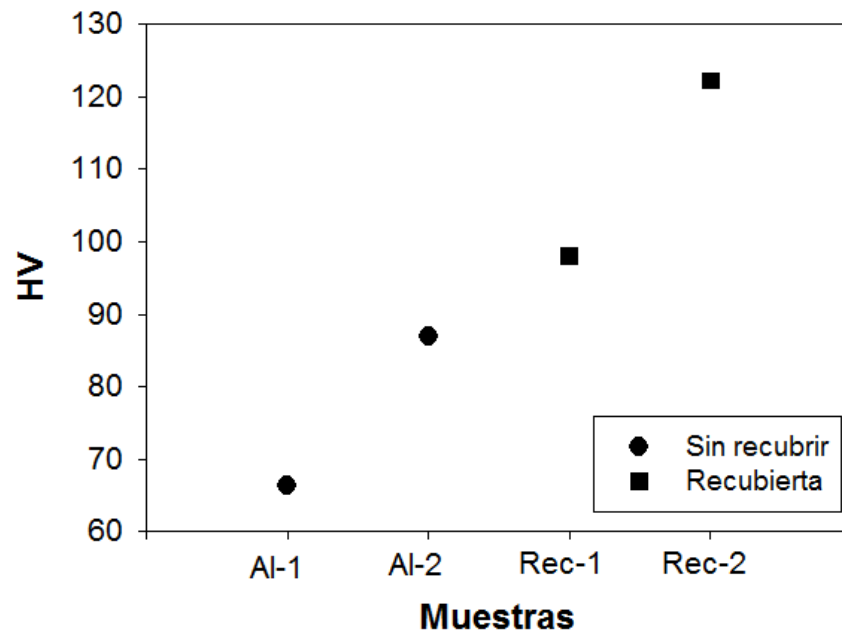


Figura 4.15 Variación de la microdureza Vickers en función de las muestras sin y con Bi.

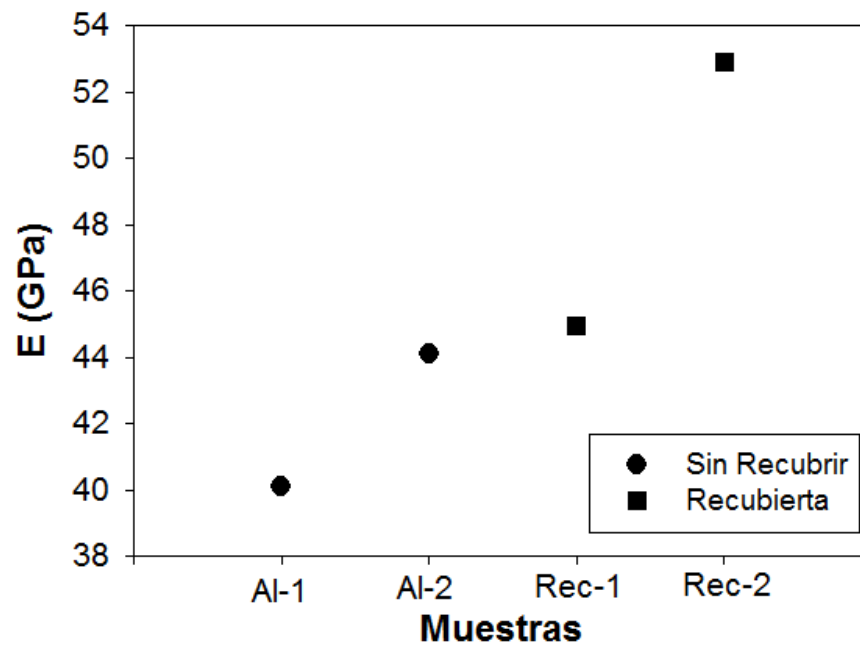


Figura 4.16 Variación del módulo elástico en función de las muestras sin y con Bi.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Según lo analizado en el estado de arte se puede concluir lo siguiente:

- El bismuto tiene un efecto positivo en el aluminio para remover e inhibir la capa de óxido que forma el aluminio en un proceso de unión como brazing.
- El bismuto y el aluminio en estado sólido no forman fases sólidas conjuntas que puedan afectar sus propiedades mecánicas.
- El no uso de bismuto en la interfase de los componentes promueve la unión intermitente de los componentes de aluminio debido a la presencia de la capa de óxido.

Por otra parte, mediante el caso de estudio se puede concluir lo siguiente:

- La mejor unión se muestra una unión continua y mejor solubilidad del Bi en el Al. En consecuencia, se tiene el mejor módulo elástico de **52.89 GPa** y una microdureza de **122.23 HV**, por contraparte de

las que no están recubiertas de bismuto las cuales muestran falta de unión y más bajas propiedades mecánicas.

- La unión entre el sistema aluminio-aluminio es posible mediante la intervención de una capa de bismuto en su superficie que ayude a disminuir los óxidos generados en el aluminio mediante la formación de fases transitorias líquidas.

Es necesario para poder llegar a una unión óptima en el aluminio 7075 más estudio, este trabajo sirve como preámbulo exploratorio para futuras investigaciones que se lleguen a hacer en el tema.

REFERENCIAS

- [1] ASM, *Properties and selection: Nonferrous alloys and Special purposes materials*, vol. 2. 1992.
- [2] S. Das and W. Yin, "Trends in the Global Aluminum Fabrication Industry," 2007.
- [3] J. G. Kaufman and A. S. M. International, *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. ASM International, 2000. ISBN: 087170689X.
- [4] N. E. Zavaleta-gutierrez and E. R. Polo-briceño, "Efecto del tratamiento térmico sobre la resistencia mecánica , corrosión intergranular y exfoliación de la aleación de aluminio 7075 Effect of heat treatment on the mechanical strength , intergranular and exfoliation corrosion of 7075 aluminum alloy," *Materia*, vol. 23, 2018. DOI: 10.1590/s1517-707620180002.0337.
- [5] F. Carreño and O. A. Ruano, "Superplasticity of Aerospace 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) Aluminium Alloy Obtained by Severe Plastic Deformation," vol. 385, pp. 39–44, 2018. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.385.39.
- [6] E. A. Starke and J. T. Staley, "Application of modern aluminum alloys to aircraft," *Elsevier Sci.*, vol. 32, no. 95, pp. 131–172, 1996. DOI: 10.1016/0376-0421(95)00004-6.
- [7] P. Taylor, S. Stano, T. Pfeifer, and M. Ró, "Modern technologies of welding aluminium and its alloys," *Taylor Fr.*, no. November, pp. 37–41, 2014. DOI: 10.1080/09507116.2012.708478.
- [8] C. Were, D. Leroy, T. A. Siewert, S. Liu, and G. R. Edwards, *Welding*,

Brazing, and Soldering ASM HANDBOOK, Volume 6. ISBN: 0-87170-377-7(V.1).

- [9] C. Vargel, *Corrosion of Aluminium*. Elsevier Ltd, 2004. ISBN: 0 08 044495 4.
- [10] T. Anderson, *Welding Aluminum — Questions and Answers*, 2nd ed. American Welding Society (AWS), 2010. ISBN: 9780871710857.
- [11] J. Tapia, “Factibilidad De Unión Del Sistema Disímil: Compósito De Matriz Metálica De Aluminio Reforzado Con Grafito/A380 Mediante El Proceso Brazing Sin Y Con Deposición De Nanocapas De Bismuto,” COMIMSA, 2018. URL:<http://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1022/324>.
- [12] AWS, *Brazing Handbook*, 5th ed. 2007. ISBN: 978-0-87171-046-8.
- [13] P. Roberts, *Industrial Brazing Practice*. USA: CRC, 2004. ISBN: 0849321123
- [14] A. O. Brien, *Welding Handbook*, 9th ed., vol. 2. American Welding Society (AWS), 2004. ISBN: 0871717298.
- [15] C. N. Niu, X. G. Song, S. P. Hu, G. Z. Lu, Z. B. Chen, and G. D. Wang, “Effects of brazing temperature and post weld heat treatment on 7075 alloy brazed joints,” vol. 266, no. July 2018, pp. 363–372, 2019. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.11.023
- [16] K. Weman, *Welding processes handbook*. CRC, 2003. ISBN: 0-8493-1773-8
- [17] Y. Xu, P., Yu, H., Shi, H., Yu, H., & Wang, “Kinematic hardening performance of 5052 aluminium alloy subjected to cyclic compression-tension,” *J. Phys. Conf. Ser.* 1063 012119, 2018. DOI: 10.1088/1742-

6596/1063/1/012119.

- [18] L. Fang, "Development of As-Cast High Strength Aluminum Alloys with Ni and Sr addition," Windsor, 2018. URL: scholar.uwindsor.ca/etd/7474.
- [19] F. C. Campbell, "Lightweight Materials - Understanding the Basics," ASM International, 2012. ISBN: 978-1-61503-849-7.
- [20] G. Mathers, "The Welding of Aluminium and its Alloys," Woodhead Publishing, 2002. ISBN: 0849315514.
- [21] J. C. Williams and E. A. Starke, "Progress in structural materials for aerospace systems," *Acta Mater.*, vol. 51, pp. 5775–5799, 2003. DOI: 10.1016/j.actamat.2003.08.023.
- [22] R. Estrada-Ruiz, R. H., Flores-Campos, R., Treviño-Rodríguez, G. A., Herrera-Ramírez, J. M., & Martínez-Sánchez, "Wear resistance analysis of the aluminum 7075 alloy and the nanostructured aluminum 7075 - silver nanoparticles composites," *Min. Metall.*, vol. 52, no. 2, pp. 163–170, 2016. DOI: 10.2298/JMMB150103011E.
- [23] P. A. Rometsch, Y. Zhang, and S. Knight, "Heat treatment of 7xxx series aluminium alloys — Some recent developments," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 24, no. 7, pp. 2003–2017, 2017. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63306-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63306-9).
- [24] J. . Davis, "Metals Handbook, Desk Edition," in ., 2nd ed., ASM International, 1998. ISBN: 978-0-87 170-654-6.
- [25] ASTM, "Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate (Metric). B209M," 2018. DOI: 10.1520/B0209M-14.
- [26] A. Papworth and P. Fox, "The disruption of oxide defects within aluminium alloy castings by the addition of bismuth," *Elsevier*, no. May, pp. 202–206,

1998. DOI: 10.1016/S0167-577X(97)00244-9.

- [27] L. Pilote, A. E. Gheribi, and P. Chartrand, "Study of the solubility of Pb, Bi and Sn in aluminum by mixed CALPHAD / DFT methods: Applicability to aluminum machining alloys," *Elsevier*, vol. 61, no. February, pp. 275–287, 2018. DOI: 10.1016/j.calphad.2018.04.007.
- [28] W. Lu and S. Z. J. Li, "Observation of Bi Coarsening and Dissolution Behaviors in Melting Al – Bi Immiscible Alloy," *Acta Metal. Sin.*, vol. 29, no. 9, pp. 800–803, 2016. DOI: 10.1007/s40195-016-0453-7.
- [29] S. Farahany, L. Hai, E. Hamzah, H. R. Bakhsheshi-rad, and M. H. Cho, "Microstructure development, phase reaction characteristics and properties of quaternary Zn-0.5Al-0.5Mg-xBi hot dipped coating alloy under slow and fast cooling rates," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 315, pp. 112–122, 2017. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.074.
- [30] Q. An, H. Hu, N. Li, D. Liu, S. Xu, and Z. Liu, "Effects of Bi composition on microstructure and Al-water reactivity of Al-rich alloys with low-In," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 3, no. 43, pp. 1–9, 2018. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.05.009.
- [31] O. B. Dehkordi and A. M. Hadian, "Transient liquid phase bonding of alumina to alumina via Bismuth oxide interlayer," *Adv. Mater. Res.*, vol. 829, pp. 136–140, 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.829.136.
- [32] W. Guo, T. Lin, P. He, T. Wang, and Y. Wang, "Microstructure evolution and mechanical properties of ZnAl₂O₄ -reinforced Al₂O₃ / Al₂O₃ joints brazed with a bismuth borate zinc glass," *Mater. Des.*, vol. 119, pp. 303–310, 2017. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.01.053.
- [33] C. Niu and C. Li, "Assessment of the Al-Bi-Mg system and extrapolation to the Al-Bi-Mg-Sn quaternary system," *Calphad*, vol. 60, no. November

2017, pp. 37–49, 2018. DOI: 10.1016/j.calphad.2017.11.003.

- [34] W. D. Macdonald and T. W. Eagar, “Transient Liquid Phase Bonding Processes,” *Miner. Met. Mater. Soc.*, pp. 93–100, 1992. URL: www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.ms.22.080192.000323?journalCode=matsci.1.
- [35] O. A. Idowu, N. L. Richards, and M. C. Chaturvedi, “Effect of bonding temperature on isothermal solidification rate during transient liquid phase bonding of Inconel 738LC superalloy,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 397, no. 1–2, pp. 98–112, 2005. DOI: 10.1016/j.msea.2005.01.055.
- [36] Y. Wei, F. Sun, S. Tan, and S. Liang, “Study on microstructure and performance of transient liquid phase bonding of Cu / Al with Al-based interlayers,” *Vacuum*, vol. 154, no. February, pp. 18–24, 2018. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.04.036.
- [37] E. Lee, O. Quintana, J. E. Indacochea, L. Wojarski, J. Pfeiffer, and W. Tillmann, “Joining of aluminium sheets by combined solid state and TLP bonding processes,” in *Institute of Materials, Minerals and mining*, 2013, vol. 18, no. 2, pp. 98–103. DOI: 10.1179/1362171812Y.0000000087.
- [38] M. L. Oyen and R. F. Cook, “A practical guide for analysis of nanoindentation data,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 2, no. 4, pp. 396–407, 2009. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2008.10.002.
- [39] M. E. Glicksman, *Principles of Solidification*. USA: Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-1-4419-7344-3

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1 FORMA DE LAS BOBINAS DE INDUCCIÓN USADAS PARA BRAZING [14]..... | 11 |
| FIGURA 2.2 A) PIEZAS POSICIONADAS CON EL METAL DE APORTE A USAR, B) PIEZAS DENTRO DEL HORNO, C) PIEZAS UNIDAS [14]. | 13 |
| FIGURA 2.3 ESQUEMA REPRESENTATIVO DE LA MOJABILIDAD ENTRE UNA FASE SÓLIDA Y LÍQUIDA, A) BUENA MOJABILIDAD $\theta < 90^\circ$ B) BAJA MOJABILIDAD $\theta > 90^\circ$ C) COMPLETA MOJABILIDAD $\theta > 0^\circ$ [12]..... | 17 |
| FIGURA 2.4 DIAGRAMA BINARIO DEL SISTEMA DE ALEACIÓN AL-BI..... | 24 |
| FIGURA 2.5 MICROGRAFÍA DE LA FORMACIÓN DE LA CAPA DE ÓXIDO SOBRE LA SUPERFICIE DEL MATERIAL [26]..... | 25 |
| FIGURA 2.6 MICROGRAFÍA DE LA PRESENCIA DE BISMUTO PURO ANTES DEL DESPRENDIMIENTO DE LA CAPA DE ÓXIDO [26]. | 25 |
| FIGURA 2.7 MICROGRAFÍA TOMADAS EN MEB DE LA ZONA DE UNIÓN DEL SISTEMA CU/AL, A) MUESTRA UNIDA SIN INTERFASE B) MUESTRA UNIDA CON UNA INTERFASE AL-11SI-4CU-2MG [36]..... | 29 |
| FIGURA 4.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA USADA..... | 34 |
| FIGURA 4.2 EQUIPO DE CORTE CON DISCO DE DIAMANTE. | 35 |
| FIGURA 4.3 ESQUEMA DE LA GEOMETRÍA Y DIMENSIONES (MM) DE LAS MUESTRAS DE ALUMINIO. | 36 |
| FIGURA 4.4 EQUIPO DSC-TG PARA REALIZAR LA SOLDADURA BRAZING DE LAS MUESTRAS DE ALUMINIO SIN Y CON PELÍCULAS DE BI..... | 38 |
| FIGURA 4.5 CURVA DE CARGA-DESCARGA DE UN ENSAYO DE NANOINDENTACIÓN..... | 40 |
| FIGURA 4.6 EQUIPO DE NANOINDENTACIÓN PARA DETERMINAR LOS MÓDULOS ELÁSTICOS: 1) CELDA DE CARGA..... | 40 |
| FIGURA 4.7 MICROGRAFÍA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO EN CONDICIÓN DE PULIDO CONTENIENDO INTERMETÁLICOS: 1) INTERMETÁLICOS DE FE Y 2) MATRIZ DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO | 42 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 4.8 MICROGRAFÍAS DE LAS MUESTRAS DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO SIN PELÍCULA DE BI SOLDADAS POR BRAZING POR 60 MIN. A) 650 °C; B) 635 °C; C) 630 °C Y D) 620 °C..... | 45 |
| FIGURA 4.9 SUPERFICIE CUBIERTA CON UNA PELÍCULA DE BI POR EVAPORACIÓN CATÓDICA POR 120 S..... | 46 |
| FIGURA 4.10 A) IMAGEN DE ELECTRONES RETRODISPERSADOS Y ANÁLISIS QUÍMICO DE ÁREA POR EDS (B) Y (C) DE LA SUPERFICIE DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO CUBIERTA CON BI PREVIO AL BRAZING. | 47 |
| FIGURA 4.11 MICROGRAFÍA DE LA MUESTRA DE ALEACIÓN DE ALUMINIO SOLDADA POR BRAZING A 625 °C POR 60 MIN CON UNA PELÍCULA DE BI. | 48 |
| FIGURA 4.12 MICROGRAFÍA DE LA MUESTRA DE ALEACIÓN DE ALUMINIO SOLDADA POR BRAZING A 655 °C POR 60 MIN CON UNA PELÍCULA DE BI. | 49 |
| FIGURA 4.13 A) MICROGRAFÍA DE UNA ESTRUCTURA EUTÉCTICA α -ALFESi Y B) FORMACIÓN DE EUTÉCTICOS EN EL LÍMITE DE GRANO Y DEL Si..... | 50 |
| FIGURA 4.14 MICROGRAFÍA DE MICRO-RECHUPES EN PUNTOS TRIPLES DEL BRAZING DEL SISTEMA DE ALEACIÓN DE AL..... | 50 |
| FIGURA 4.15 VARIACIÓN DE LA MICRODUREZA VICKERS EN FUNCIÓN DE LAS MUESTRAS SIN Y CON BI. | 53 |
| FIGURA 4.16 VARIACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO EN FUNCIÓN DE LAS MUESTRAS SIN Y CON BI. | 53 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE MATERIALES DE APORTE PARA ALUMINIOS [14] | 15 |
| TABLA 2.2. MANUFACTURA Y APLICACIONES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO [17], [18]..... | 21 |
| TABLA 2.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN 7075[22]. | 22 |
| TABLA 2.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA EN PORCENTAJE EN PESO (% E.P.) DE LA ALEACIÓN 7075 [23]. | 23 |
| TABLA 2.5 PROPIEDADES DEL BISMUTO. | 23 |
| TABLA 4.1 PARÁMETROS UTILIZADOS EN LA SOLDADURA BRAZING EN PIEZAS SIN PELÍCULA DE BI | 38 |
| TABLA 4.2 PARÁMETROS PARA LA DEPOSICIÓN DE PELÍCULAS DE BI SOBRE EL ALUMINIO | 41 |
| TABLA 4.3 PARÁMETROS DE UNIÓN EN LAS PIEZAS CON BI. | 41 |
| TABLA 4.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA PROPORCIONADA DE LA CARTA DEL PROVEEDOR.. | 43 |
| TABLA 4.5 RANGOS DE FUSIÓN Y BRAZING DE LAS ALEACIONES DE USO COMÚN. | 44 |
| TABLA 4.6 PROPIEDADES MECÁNICAS DE TRES MUESTRAS DIFERENTES. | 52 |

LISTA DE ECUACIONES

| | |
|--------------------------------------|----|
| ECUACIÓN 2.1 CAPILARIDAD..... | 16 |
| ECUACIÓN 2.2 ÁNGULO DE CONTACTO..... | 17 |
| ECUACIÓN 4.1 PLÁSTICA..... | 39 |
| ECUACIÓN 4.2 ELÁSTICA..... | 39 |