CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL EN LAS UNIONES DE SOLDADURA BRAZING EN ALEACIONES DE ALUMINIO CON APORTE AW 4343 7.5% SI

POR

ING. FERNANDO MACÍAS LÓPEZ

TESIS

EN OPCIÓN COMO MAESTRO EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO COAHUILA. NOVIEMBRE 2010.

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL EN LAS UNIONES DE SOLDADURA BRAZING EN ALEACIONES DE ALUMINIO CON APORTE AW 4343 7.5% SI

POR

ING. FERNANDO MACÍAS LÓPEZ

TESIS

EN OPCIÓN COMO MAESTRO EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO COAHUILA. NOVIEMBRE 2010.

Dedicatoria

A mi madre, Lydia López de la Fuente[†], por darme la vida y enseñarme que el éxito depende de la sinceridad y sencillez del espíritu.

A mi esposa y mis hijos por su paciencia, cariño y brindarme todo su apoyo.

A mis hermanos por compartir conmigo el calor familiar y creer en mí.

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento al Dr. José Jorge Ruíz Mondragón por su asesoría y orientación en la elaboración del documento de tesis.

Gracias al M.C. Mario Trejo Aguirre y al Dr. Jorge Acevedo Dávila por permitirme realizar los estudios de posgrado y su interés en el tema desarrollado.

Gracias a los miembros del jurado conformado por el Dr. Eliezer Ramírez Vidaurri, Dr. Felipe de Jesús Garcia Vázquez, por sus observaciones y ayudarme a mejorar la escritura de la tesis.

Al Ing. Marco A. Garza González por las facilidades prestadas en el desarrollo de las pruebas en las instalaciones de su empresa.

Agradezco a todas aquellas personas que han contribuido con el presente trabajo:

Ing. Lourdes Santiago Bautista, Tec. Alberto Badillo Ramos, Ing. Sergio Cenovio Armendáriz Dávila.

ÍNDICE

	Síntesis	8
1	Capítulo 1 Introducción	10
1.1	Antecedentes	11
1.2	Problema	13
1.3	Justificación	13
1.4	Objetivos	14
1.5	Hipótesis	15
1.6	Alcance	15
2	Capítulo 2 Estado del Arte	16
2.1	Soldadura brazing	16
2.1.1	Definición	16
2.1.2	Perspectiva histórica	16
2.1.3	Principio del proceso brazing	18
2.2	Proceso de soldadura brazing	18
2.2.1	Soldadura brazing en horno	19
2.2.2	Hornos continuos	20
2.2.2.1	Hornos de atmósferas controladas	21
2.2.2.2	Ventajas del proceso y limitaciones del proceso	23
2.2.2.3	Materiales que pueden ser soldados por brazing en horno	24
2.2.2.4	Propiedades del metal de aporte	24

2.2.2.5	Materiales de aporte aluminio silicio	28
2.2.2.6	Fundente	28
2.3	Control de calidad	32
2.3.1	Calificación de procesos brazing	38
2.3.2	Inspección y pruebas	40
2.3.2.1	Métodos de pruebas no destructivas	40
2.3.2.2	Métodos de pruebas destructivas	41
2.3.2.3	Discontinuidades	41
2.4	Aspectos Metalúrgicos	42
2.4.1	Metalurgia de la soldadura brazing	42
2.4.1.1	Fusión y fluidez	42
2.4.1.2	Licuación	43
2.4.1.3	Mojado y adhesión	44
2.5	Metalurgia del aluminio	46
2.5.1	Información general	46
2.5.2	Propiedades del aluminio y sus aleaciones	46
2.5.2.1	Clasificación de las aleaciones de aluminio	48
2.5.2.2	Efecto de los elementos de aleación	50
2.5.2.3	Aleaciones de aluminio no tratables térmicamente	51
2.5.2.4	Propiedades de la soldadura	52
0505	Efecto de las características microestructurales en las	50
2.5.2.5	propiedades mecánicas	52
2.5.2.6	El efecto de partículas intermedias y estructura de grano	53
2.5.2.7	El efecto de precipitados por endurecimiento	53
2.5.2.8	Control de la microestructura	54
2.5.2.9	Secuencia de reacción en aleaciones α Al-Si	55
3	Capítulo 3 Metodología	58
	Descripción del proceso de fabricación de intercambiadores de	
3.1	calor	60
3.2	Diseño experimental	62

3.2.1	Determinación de variables de proceso	62
3.2.2	Diseño de experimentos	63
3.2.3	Equipos y materiales	64
		~~~
4	Capitulo 4 Discusion de Resultados	66
4.1	Análisis del metal base aleación de aluminio AA 3005	66
4.2	Análisis del metal base aleación de aluminio AA 3003	69
1 2	Análisis de la unión de soldadura Material de Aporte AW 4343	71
4.3	7.5% Si	11
4.4	Análisis de microdureza	75
4.5	Análisis de fases y porosidad en el área de soldadura	78
4.5.1	Porcentaje de Al-Si, Al Matriz y en el área de soldadura	79
4.5.2	Porosidad	81
4.6	Resultados del diseño de experimentos	82
	Conclusiones	88

Recomendaciones y trabajo futuro	90
Listado de figuras	91
Listado de tablas	93
Bibliografía	94

# SÍNTESIS

Las aleaciones de aluminio son comúnmente usadas en la fabricación de intercambiadores de calor para la industria automotriz debido a su interesante combinación de propiedades (baja densidad, buena conductividad térmica, adecuadas propiedades mecánicas y buena resistencia a la corrosión) ^[1]. El ensamble mecánico de los intercambiadores de calor fue desplazado por el proceso de soldadura brazing de aleaciones de aluminio, principalmente por costos y el reciclaje de materiales ^[2].

Se han utilizado numerosos materiales de aporte principalmente aleaciones Al-Si, sin embargo, durante el proceso de brazing se llegan a presentar diferentes defectos entre ellos la presencia de huecos en la soldadura concerniente a la falta de fusión del material de aporte y la fusión incipiente en los componentes debido a los elevados puntos de fusión del material de aporte. Lo cual promueve las fugas en los intercambiadores de calor y afecta las propiedades mecánicas del componente, respectivamente.

Con el fin de evitar la fusión incipiente de los componentes y evitar la presencia de huecos, en éste trabajo se propone utilizar un diferente material de aporte diferente (AW-4343 7.5% Si).

Las piezas del intercambiador de calor fueron cubiertas con el material de aporte mediante espreado seguido de una etapa de secado. Para el proceso de brazing el ciclo térmico se llevo a cabo en un horno continuo, el cual contempla las etapas de precalentamiento, fusión, solidificación y enfriamiento por etapas. Cabe mencionar que las pruebas fueron realizadas en instalaciones industriales y bajo condiciones de operación del proceso.

En éste estudio se realiza la evaluación de las variables de temperatura y velocidad de desplazamiento para contrarrestar los efectos de las discontinuidades presentes en los procesos de soldadura brazing siendo el de mayor importancia la falta de fusión que originan la presencia de fugas en los ensambles requeridos en manejo de fluidos.

Se muestran los resultados obtenidos en la experimentación de las soldaduras de intercambiadores de calor base aluminio unido por el proceso de soldadura brazing. Se realizó un diseño de experimentos a fin de evaluar cómo las variables seleccionadas afectan la soldabilidad. Para la experimentación se emplea un diseño factorial de la serie 2² con tres puntos centrales.

Los resultados sugieren que los rechupes (shrinkages) y porosidades (voids) ^[3]. No tienen relación alguna con las variables de temperatura de fusión en el horno y la velocidad de desplazamiento en la banda transportadora de los ensambles. Estas se deben a la contaminación en el sistema del horno por la presencia de oxido.

Las condiciones de operación de temperatura y velocidad intermedia proporcionan la optimización del proceso esto debido a que mejora sustancialmente las propiedades mecánicas específicamente la dureza.

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio poseen la ventaja de tener alta conductividad térmica, buena maquinabilidad, bajo costo, y resistencia a la corrosión. Estas aleaciones han sido empleadas para la manufactura de intercambiadores de calor y sistemas de flujo, como evaporadores, condensadores de aplicación factible en la industria automotriz y de refrigeración, donde el proceso de soldadura brazing es esencial en la producción de estos artículos base aluminio.

Generalmente en la unión de este tipo de componentes es usado materiales de aporte como Al-12%Si, composición cercana al eutéctico de las aleaciones binarias Al-Si presentando un punto de fusión de alrededor de 577°C. Debido a esto, el brazing con metales de aporte tradicionales requieren procesos con temperaturas de fusión por encima de 600 °C. Promoviendo que las piezas de aluminio sean fundidas parcialmente durante el proceso de brazing en horno industrial. Hasta hace algunos años, se han realizado esfuerzos para desarrollar metales de aporte de bajo punto de fusión para soldar aluminios que podría tener buena resistencia ^[4,29].

Debido a esto el índice de rechazo es considerable aproximadamente el 4.7 % de la productividad, por lo que es necesario controlar el proceso de soldadura brazing mediante el análisis y estudio de las variables implícitas para su optimización, por ejemplo, metal de aporte, metal base, fundentes, temperaturas de fusión y/o velocidad de desplazamiento de las piezas en el horno continuo.

Garantizando así la soldabilidad de los ensambles de aluminio haciéndolos intrínsicamente más confiables y minimizando la presencia de discontinuidades que produzcan fugas en los componentes, reflejando un ahorro de costos del orden del 4.7% en rechazos.

Las aleaciones 3XXX son empleadas de generalmente en la manufactura de intercambiadores de calor y sistemas de fluidos como evaporadores y condensadores, de aplicación factible en la industria automotriz y de refrigeración, en donde el proceso de soldadura brazing es esencial en la producción de estos ensambles base aluminio. Empleando generalmente materiales de aporte de la serie 4XXX^[5].

# **1.1 Antecedentes**

Las aplicaciones de la soldadura fuerte van desde juguetes baratos hasta motores de avión y vehículos espaciales. Se utiliza este proceso donde no se pueden utilizar otros procesos de unión.

En años recientes los intercambiadores de calor se fabrican en materiales base aluminio y cuentan con elementos aleantes principales como los siguientes: cobre, silicio, magnesio, zinc ^[25], estaño; y en menor proporción cromo al manganeso, y algunos otros. Los sistemas usados para identificar y agrupar las fundiciones de aluminio con que se fabrican los intercambiadores no

están estandarizados internacionalmente, pues cada país ha desarrollado su propia nomenclatura de aleación. En Norteamérica, las aleaciones de fundición de aluminio están agrupadas de acuerdo a los límites de composición registrados en la Asociación del Aluminio. La cual clasifica a las aleaciones en términos de composición química, de acuerdo al siguiente esquema ^[5]:

- 1xx.x: Composiciones controladas sin aleantes.
- 2xx.x: Aleaciones de aluminio que contienen cobre como elemento de aleación principal.
- 3xx.x: Aleaciones aluminio-silicio que contienen además magnesio y/o cobre.
- 4xx.x: Aleaciones binarias aluminio-silicio.
- 5xx.x: Aleaciones de aluminio que contienen magnesio como elemento de aleación principal.
- 6xx.x: Aleaciones base que contienen silicio y magnesio en proporciones aproximadas para hacer a la aleación tratable térmicamente.
- *7xx.x*: Aleaciones de aluminio que contienen zinc ^[25] como elemento de aleación principal, y que usualmente contienen cobre, magnesio, cromo, manganeso, o combinaciones de estos elementos.
- 8xx.x: Aleaciones de aluminio que contienen estaño como elemento de aleación principal.

Con esta gama de elementos, se forman los sistemas de aleación del metal base aluminio y el metal de aporte Al-Si, utilizados para equipos de calefacción y aire acondicionado principalmente en la industria automotriz.

Dependiendo del tamaño de la unidad y cantidad a producir lo siguientes métodos de brazing se pueden utilizar ^[6].

1. Soldadura brazing con soplete.

- Soldadura brazing en horno (con aplicación de fundente y de vacío con atmosfera controlada sin aplicación de fundente).
- 3. Soldadura brazing por inducción.
- 4. Soldadura brazing por resistencia.
- 5. Soldadura brazing por inmersión.
- 6. Soldadura brazing al infrarrojo.
- 7. Procesos especiales.

### 1.2 Problema

La principal preocupación del sector automotriz, en el ramo de la manufactura de los intercambiadores es el mejoramiento de la eficiencia y reducción de rechazos debido a la presencia de fusión incipiente en la unión por soldadura brazing y por consiguiente el origen de fugas en el manejo de fluidos que reduzca considerablemente la vida útil de los sistemas de manejo de fluidos en equipos de aire acondicionado. A la fecha se realizan modificaciones de manera empírica en las variables del proceso sin un éxito real ocasionando un alto índice de rechazo.

# 1.3 Justificación

En los sistemas de refrigeración actuales, los radiadores son utilizados como un elemento importante de soporte para el resto de accesorios del sistema de climatización del automóvil como son los ventiladores, condensador y el filtro deshidratante. Debido a esto la tendencia de la tecnología y los esfuerzos de la industria automotriz es reducir el peso de los automóviles haciéndolos más ligeros mediante el desarrollo tecnológico de los materiales utilizados en las refacciones y accesorios que a la par buscan reducir los costos e impacto ambiental. Además, se busca la sustitución de los aceros por materiales no ferrosos más ligeros y resistentes a la corrosión para realizar estas metas requiere de la innovación de diseños, materiales y procesos de unión de alta tecnología.

Sin embargo, una de las principales dificultades en los procesos de soldadura, es la poca información existente en los cambios microestructurales y la recurrencia de discontinuidades presentes que en gran medida determinan las propiedades mecánicas de la unión y afectan la integridad estructural del producto final.

Debido a lo anterior se requiere establecer un adecuado estudio de las variables involucradas en la selección de los materiales y método de procesamiento que satisfagan los requerimientos de calidad de los ensambles manteniéndolos libres de fugas.

# 1.4 Objetivos

#### **Objetivo General**

Determinar el efecto que presenta las variables involucradas en el proceso de soldadura brazing en horno en la unión de componentes de aluminio utilizados en la manufactura de intercambiadores de calor y sistemas de fluidos aplicados en la industria automotriz.

#### **Objetivos Específicos**

- Optimizar las variables involucradas en el proceso de soldadura brazing mediante horno aplicado en la industria automotriz.
- Estudiar el efecto de las variables implícitas en el proceso de soldadura en horno como son velocidad de desplazamiento y temperatura de fusión del metal de aporte sobre las propiedades de la unión soldada.

- Analizar las variables esenciales utilizadas en el proceso de soldadura mediante horno, y elegir los materiales y condiciones de proceso favorables para la optimización del proceso.
- Definir en base a los resultados los parámetros óptimos para minimizar el índice de rechazo por defectos inherentes al proceso de horneado en la productividad de intercambiadores.

# 1.5 Hipótesis

Mediante este estudio se pretende conocer el efecto de las variables implícitas en los procesos de soldadura brazing sobre el comportamiento microestructural de las aleaciones Al-Si y sus propiedades mecánicas que permitan establecer los parámetros óptimos en los procesos de manufactura de intercambiadores de calor minimizando así, la probabilidad de discontinuidades que originan fugas que a su vez afecten el desempeño y la vida útil del componente.

### 1.6 Alcance

Conocer el efecto de los parámetros y su interacción con las discontinuidades implícitas en la manufactura de intercambiadores de calor del tipo "Radiador" en hornos de atmosfera controlada (CAB), de aplicación frecuente en la industria automotriz^[7].

De forma adicional verificar la relación que existe entre la modificación microestructural con respecto a la variación de los parámetros de operación y su dureza.

# CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

# 2.1. Soldadura Brazing

Las aplicaciones de la soldadura brazing van desde juguetes hasta motores de avión y vehículos espaciales. Se utiliza este proceso donde no se pueden utilizar otros procesos de unión.

Recientemente las exigencias en las estructuras complejas han obligado más a los técnicos e ingenieros para fomentar a los productores de metal a aplicar sus conocimientos metalúrgicos para producir soldadura de metales de aporte que reúnan necesidades más específicas.

#### 2.1.1. Definición del proceso brazing

Una soldadura brazing es un material el cual une materiales calentándolos en presencia de un metal de aporte que tiene una temperatura de *liquidus* por encima de 450 °C pero por debajo de la temperatura de *solidus* del metal base ^[8].

#### 2.1.2. Perspectiva Histórica

La soldadura brazing es quizás la técnica más vieja para unir metales más que en las uniones mecánicas, su desarrollo histórico ha ido en paralelo con el desarrollo de los materiales, las primeras evidencias muestran mezclas sales de metales y agentes reductores orgánicos, ejemplo el hidrato de cobre y la goma orgánica fueron utilizados para unir oro y plata. La Figura 2.1 muestra una pintura de mural de una tumba, en Thebes, Egipto que data de 1475 a.C. esta muestra un esclavo realizando soldadura brazing en oro utilizando carbón como fuente de energía, una caña en forma de soplete y pinzas. Los avances posteriores permitieron el uso de cobre y aleaciones de bronce como metales de aporte. Conforme al uso de aleaciones metálicas y cerámica, la evolución paralela del proceso brazing en metales con mayor sofisticación. Los avances en el tratamiento y métodos de control de calidad han dado lugar a una similar sofisticación de las técnicas de soldadura ^[9,20].



**Figura 2.1.** Pintura de mural de una tumba en Tebas, Egipto, realizada alrededor de 1475 a.C. Muestra un esclavo dedicado a la soldadura de oro (esta cifra se ha tomado de octubre 1979 de una revista soldadura)^[9,20].

#### 2.1.3. Principio del proceso brazing

Se calienta el área de la unión hasta que el fundente se derrite y limpia los metales base quedando protegidos contra la oxidación. El metal de aporte se funde en algún punto de la superficie de la unión, la capilaridad existente entre el metal base y el metal de aporte es debido al espacio estrecho entre las paredes de los componentes y la atracción es mayor entre el metales base, la afinidad entre el material de aporte y el metal base es mayor que la generadas entre el fundente y el metal base, por lo que el metal de aporte fundido desplaza al fundente en la zona de la unión.

Al enfriarse la unión quedará llena de metal de aporte sólido y el fundente se encontrará en la periferia de la unión. En ocasiones la soldadura brazing se realiza mediante un gas activo como el hidrógeno, un gas inerte o en vacío ^[9,20]. 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 que es promovido 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 en las superficies que se van a unir se limpian para eliminar contaminantes y óxidos, luego se cubren con fundente que es capaz de disolver los óxidos metálicos sólidos y evitar una nueva oxidación ^[9,20].

### 2.2. Procesos de soldadura Brazing

Existen distintos procesos los cuales se puede realizar soldadura brazing en donde la principal diferencia es el medio de calentamiento el cual es

seleccionado de acuerdo con los requerimientos y necesidades que representen los ensambles como son:

- Soldadura brazing manual con antorcha.
- Soldadura brazing en horno.
- Soldadura brazing por inducción.
- Soldadura brazing por inmersión.
- Soldadura brazing por infrarrojo (cuarzo).
- Soldadura brazing exotérmica.
- Soldadura brazing por resistencia^[7].

### 2.2.1. Soldadura Brazing en horno

En el presente trabajo hablaremos específicamente del proceso brazing en horno ya que es el proceso industrial utilizado en la fabricación de los intercambiadores de calor aplicados en la industria automotriz.

Para poder aplicar la soldadura brazing en horno es necesario que cumpla con los siguientes puntos:

(1) Las piezas que se van a soldar pueden preensamblarse o sostenerse en la posición correcta por medio de guías.

(2) El metal de aporte puede colocarse en contacto con la unión.

- (3) Se van a formar simultáneamente varias uniones por soldadura brazing.
- (4) Se van a unir muchos ensambles similares.

(5) Hay necesidad de calentar de manera uniforme piezas complejas, a fin de evitar la distorsión que resultaría de un calentamiento local del área de unión^[10].

Las piezas que se van a soldar en el horno se deben ensamblar con el metal de aporte y el fundente (si se usa) colocado dentro de la unión o junto a ella. El metal de aporte previamente colocado puede venir en forma de alambre, papel metálico, limaduras, cilindros, polvo, pasta o cinta. El ensamble se calienta en el horno hasta que las piezas alcanzan la temperatura de soldadura brazing y se efectúa la unión. A continuación se retira el ensamble, se obtienen resultados satisfactorios si se rocía fundente seco en polvo a lo largo de la unión. En la mayor parte de los casos la pasta de fundente es adecuada, pero en algunos retarda el flujo de la aleación de aporte.

El tiempo de soldadura dependerá hasta cierto punto del espesor de las piezas y de la masa de las fijaciones que se necesiten para posicionarlas. El tiempo de soldadura deberá ser el mínimo necesario para que el metal de aporte fluya al interior de la unión, a fin de evitar una interacción excesiva entre el metal de aporte y el metal base. Normalmente bastan uno o dos minutos a la temperatura de soldadura brazing para formar la unión. Un tiempo más largo a la temperatura puede resultar benéfico en los casos en que es preciso elevar el punto de refusión del metal de aporte, o en los que la difusión mejora la temperatura de soldadura brazing de 30 a 60 minutos cuando se desea elevar el punto de refusión de la unión soldada ^[9,20].

Los hornos que se emplean para soldadura brazing se clasifican como^[7]:

- 1. En lotes, ya sea con aire o atmósfera controlada.
- 2. Continuos, ya sea con aire o atmósfera controlada.
- 3. De cabina con atmósfera controlada.
- 4. De vacío.

# 2.2.2. Hornos continuos, ya sea con aire o atmósfera controlada ^[20]

La necesidad de proceso de soldadura brazing para ensambles más rápidos fue posible con el horno de lote (batch) dirigidos para soldaduras en hornos continuos y semi-continuo. Dentro de los cuales el más común es el de banda transportadora. Con este sistema, debe pasar a través de tres zonas, en las cual una presión positiva de la atmósfera controlada de gas es introducido continuamente. Ambos entrada y salida están equipadas con cortinas de llamas. Ensambles (con metal de aporte) procesados a través de la primera zona donde las partes son calentadas a una temperatura uniforme. La siguiente es una "zona caliente", o zona de soldadura brazing. La zona de enfriamiento bajo atmósfera es usualmente más extensa, con el fin de proporcionar un trabajo limpio, no oxidado en la salida final.

Ensambles con soldadura brazing son ambos cargados individualmente, ya sea en la banda o en canastas en la puerta de salida. El éxito depende de la masa de las partes, la velocidad de la banda transportadora y la temperatura establecida para la soldadura deseada. Con ello es aconsejable un proceso de pocos ensambles con algunos ajustes predeterminados y luego hacer los ajustes necesarios para banda de velocidad y temperatura.

#### 2.2.2.1 Hornos de atmósferas controladas

La abreviación CAB, tiene su significado en "controlled-atmosphere brazing", por sus siglas en inglés, denotando atmósferas controladas para soldadura brazing que son de uso común en hornos continuos.

Las atmósferas controladas son usadas durante el proceso de soldadura brazing para prevenir la formación de óxidos u otros componentes no deseados. En muchos casos, las atmósferas controladas también se utilizan para reducir los óxidos que permiten que el metal de aporte moje y fluya en el metal base limpio.

Las atmósferas controladas generalmente son empleadas en soldadura brazing en horno para la producción de uniones de alta calidad de cualquier manera ellas pueden ser usadas en otros procesos, (ej. inducción, resistencia, infrarrojo, etc.) siempre y cuando se necesite fundente, provee suficiente atmósfera reductora al proceso de soldadura brazing en horno. Una atmosfera de nitrógeno, es utilizada en este tipo de hornos con un punto de rocío de –50°F (–6°C) o por debajo de este y una presión parcial de oxigeno de 50 partes por millón (ppm) es utilizada ^[9].

Se adiciona una fina capa de un fundente soluble en agua no corrosivo rociándose en los ensambles, asegurándose que estos sequen antes de que entren en el horno de soldadura brazing.

A continuación se proporciona una breve descripción del efecto de estas atmósferas en los procesos de soldadura brazing en horno ^[9].

<u>Nitrógeno</u>. El nitrógeno (N₂) se utiliza en una atmósfera controlada para desplazar el aire del horno y actuar como constituyente del gas para los demás constituyentes. La alta pureza típica de nitrógeno permite el uso de los bajos niveles de gases de reducción. El nitrógeno es inerte en la mayoría de los metales, pero los altos niveles de nitrógeno deben utilizarse con precaución cuando se trabaja con metales que son susceptibles a la nitruración. Estos metales incluyen al cromo, molibdeno, titanio y zirconio. El nitrógeno no es combustible ni explosivo, es recomendable desde el punto de vista de seguridad.

<u>Oxígeno.</u> Además de las fuentes ya mencionadas, el oxígeno (O₂) puede ser consecuencia de los gases absorbidos en las superficies de la cámara de calefacción. La presencia de oxígeno libre en la atmósfera de soldadura es siempre indeseable. La presión de disociación de Al₂O₃ incrementa con la temperatura, así que la solubilidad de oxígeno en aluminio líquido incrementa con la temperatura. Si este es el caso de las partículas de alúmina se formará en el metal líquido de soldadura y en el enfriamiento actuarán como núcleos para la formación de poros por gas.

<u>Hidrógeno.</u> El Hidrógeno (H₂) es un agente activo para la reducción de los óxidos de metal a temperaturas elevadas, puede dañar algunos metales base debido a la fragilización, el hidrógeno reacciona como combustible en el aire de 2 a 75%, por lo que deben de tenerse ciertas precauciones para asegurar que el horno este purgado a temperatura ambiente antes de que sea adicionado y llevarlo a temperaturas de 1400°F (760°C) el aire puede ser quemado llevando solamente hidrógeno, debido a esto se deben extremar precauciones.

### 2.2.2.2 Ventajas del proceso y limitaciones del proceso

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.

Las principales limitaciones 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 quebradizas intermetalicas que reducen la ductilidad.
- 4.- Requiere personal altamente capacitado^[7].

# 2.2.2.3 Materiales que pueden ser soldados por el proceso de soldadura brazing en horno

Es necesario considerar el efecto de la soldadura brazing sobre las propiedades mecánicas del metal de un ensamble soldado y la fortaleza final de la unión. Por su naturaleza, el ciclo de soldadura brazing casi siempre genera un tratamiento de recocido en el metal base trabajado en frío, a menos que la temperatura de soldadura brazing sea mas baja y el metal permanezca muy poco tiempo en esa temperatura los materiales comprendidos en este proceso, son aleaciones no ferrosas como son Al, Ni, Ti, Zr, por otra parte también aceros inoxidables, hierros colados, refractarios, metales preciosos y materiales disímiles.

En la tabla 2.1 se proporcionan las combinaciones de los materiales base y los materiales de aporte para obtener una buena soldabilidad.

#### 2.2.2.4 Propiedades de los metales de aporte

Los metales de aporte para soldadura brazing deben tener las siguientes propiedades:

- (1) Compatibilidad con el metal base y el diseño de la unión.
- (2) Requisitos de servicio del ensamble soldado. La composición elegida debe satisfacer los requisitos de operación, como temperatura de servicio (alta o criogénica), ciclaje térmico, vida útil, esfuerzos de carga, condiciones corrosivas, estabilidad ante radiaciones y operación en vacío.
- (3) Temperatura de soldadura brazing requerida. En general se prefieren bajas temperaturas de soldadura brazing a fin de economizar energía calorífica, minimizar los efectos térmicos sobre el metal base (recocido, crecimiento de granos, deformación), minimizar la

interacción metal base-metal de aporte y prolongar la vida útil de las fijaciones y otras herramientas. Se usan temperaturas de soldadura brazing altas cuando se desea: utilizar un metal de aporte, con punto de fusión más alto pero que resulta más económico; combinar con la soldadura brazing el recocido, la liberación de tensiones o el tratamiento térmico del metal base; realizar un procesamiento subsecuente a temperatura elevada, promover las interacciones metal base-metal de aporte a fin de elevar la temperatura de refusión de la unión; o promover la eliminación de ciertos óxidos refractarios al vacío o con una atmósfera especial.

(4) Método de calentamiento. Los metales de aporte con intervalos de fusión angostos de menos de 28 °C entre solidus y liquidus pueden usarse con cualquier método de calentamiento, y el metal de aporte de soldadura brazing se puede colocar previamente en el área de la unión en forma de anillos, rondanas, alambre moldeados, calzas, polvo o pasta.

Como alternativa, este tipo de aleaciones se pueden alimentar en forma manual o automática a la unión una vez que se ha calentado el metal base. Los metales de aporte que tienden a la licuación sólo deben usarse con métodos de calentamiento que lleven la unión a la temperatura de soldadura brazing con mucha rapidez, o bien introducirse después de que el metal base haya alcanzado dicha temperatura.

Los metales de aporte están divididos en siete categorías y en varias clasificaciones dentro de cada categoría. Con objeto de simplificar la selección del metal de aporte. En la tabla 2.2 se indica la clasificación de los materiales de aporte. La tabla 2.3 nos muestra la combinación metal base-metal de aporte, en donde se indican claramente las temperaturas de fusión. Por otra parte la tabla 2.4 muestra la composición química de metales de aporte de acuerdo a la normativa ANSI/AWS A5.8^[11].

Metales Base Ale	Al y eaciones Al	Mg y Aleaciones de Mg	Cu y Aleaciones de Cu	Carbono y Aceros de Baja Aleación	Hierro	Acero Inoxidable	Ni y Aleacione de Ni	Tiy s Aleaciones de Ti	Be, Zr, V y Aleaciones Metales Reactivos	W, Mo, Ta, Nb y Aleaciones de Metales Refractarios	Aceros Herramienta
Aly Aleaciones Al	BAI-Si	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Mg y Aleaciones de M	g X‡	BMg	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Cuy Aleaciones de Cu	х	X	BAg, BAu, BCuP, BNi, RBCuZn	_	-	_	_	_	_	-	_
Carbono y Aceros de Baja Aleación	X#	X	BAg, BAu, RBCuZn, BNi	BAg, BAu, BCu, RBCuZn, BNi	-	-	-	_	_	_	_
Hierro	Х	х	BAg, BAu, BNi, RBCuZn	BAg, BNi, RBCuZn	BAg, BNi, RBCuZn	_	-	_	_	_	_
Acero Inoxidable	BAI-Si [#]	х	BAg, BNi, BAu	BAg, BAu, BCu, BNi, RBCuZn	BAg, BAu, BCu, BNi, RBCuZn	BAg, BAu, BCu, BNi	-	_	_	_	_
Niy Aleaciones de Ni	BAI-Si	Х	BAg, BAu, RBCuZn, BNi	BAg, BAu, BCu, BNi, RBCuZn	BAg, BCu, BNi, RBCuZn	BAg, BAu, BCu, BNi	BAg, BAu, BCu, BNi	_	_	_	_
Ti y Aleaciones de T	BAI-Si	Х	BAg†	BAg†	BAg†	BAg*†	BAg†	BAg, BAI-Si*	_	_	_
Be, Zr, Vy Aleacione Metales Reactivos	es ^{Y§}	X	BAg	BAg	BAg	BAg†	BAg†	Y	Y	-	-
W, Mo, Ta, Nb y Aleaciones de Metales Refractario	s X	x	BAg	BAg, BCu, BNi, BAu	BAg, BCu, BAu, BNi	BAg, BCu, BNi, BAu	BAg, BCu, BNi, BAu	Y	Y I	BCu, BAg, BNi, BAu	_
Aceros Herramienta	Х	Х	BAg, BAu, BNi, RBCuZn	BAg, BNi, BAu, BCu, RBCuZn	BAg, BAu, RBCuZn, BNi, BCu	BCu, BNi, BAg, BAu, RBCuZn	BAg, BAu, BCu, BNi, RBCuZn	X	Х	BCu, BAg, BA BNi, BAu Bi F	Ag, BAu, Cu, BNi, BCuZn

 Tabla No. 2.1. Combinaciones metal base- metal de aporte
 [11]

* Consulte el texto de información sobre la composición específica dentro de cada clasificación.

+ Metales de aporte especiales estan disponibles y son adecuados para combinacion de metales especificas.

[‡] X-llo se recomienda, sin embargo, técnicas especiales puede ser factibles para determinadas combinaciones de diferentes metales.

§ Y-Generalizaciones sobre estas combinaciones no se puede hacer. Consulte determinados capítulos de metales de aporte que puedan utilizarse.

#Recomendados solamente para aleaciones sin aluminioes níquel principalmente.

	-	
Clasificación BAISi		Aleaciones de Aluminio - Silicio
BMg	-	Aleaciones de Magnesio
Bcu	-	Aleaciones de Cobre
CBCuZn	-	Cobre - Zinc
BCuP	-	Aleaciones de Cobre - Fósforo
BAg	-	Aleaciones de Plata
BAu	-	Aleaciones de Oro
BNi	-	Aleaciones de Níquel
Bco	-	Aleaciones de Cobalto

**Tabla 2.2.** Clasificación AWS de metales de aporte ^[11]. (Especificación AWS A5.8).

Tabla No. 2.3. Temperaturas de fusión de acuerdo a la clasificación AWS [11].

AWS Clasificación	Soli	dus	Liqu	idus	Rango Tempera Soldao	o de tura de dura
	°F	°C	°F	°C	°F	°C
BAISi-2	1070	577	1142	617	1110-1150	599-621
BAISi-3	970	521	1085	585	1060-1120	571-604
BAISi-4	1070	577	1080	582	1080-1120	582-604
BAISi-5	1070	577	1110	599	1090-1120	588-604
BAISi-7	1038	559	1105	596	1090-1120	588-604
BAISi-9	1044	562	1080	582	1080-1120	582-604
BAISi-11	1038	559	1105	596	1090-1120	588-604

Tabla No. 2.4. Composición química de metales de aporte para aluminio y magnesio AWS ^[11].

AWS	UNS													Ot elem	ros entos
Clasificación	Numero	Si	Cu	Mg	Bi	Fe	Zn	Mn	Cr	Ni	Ti	Ве	AI	Cada	Total
BAISi-2	A94343	6.8-8.2	0.25			0.8	0.2	0.1					Remanente	0.05	0.15
BAISi-3	A94145	9.3-10.7	3.3-4.7	0.15		0.8	0.2	0.15	0.15				Remanente	0.05	0.15
BAISi-4	A94047	11.0- 13.0	0.3	0.1		0.8	0.2	0.15					Remanente	0.05	0.15
BAISi-5	A94045	9.0-11.0	0.3	0.05		0.8	0.2	0.05			0.2		Remanente	0.05	0.15
BAISi-7	A94004	9.0-10.5	0.25	1.0-0.20		0.8	0.2	0.1					Remanente	0.05	0.15
BAISi-9	A94147	11.0- 13.0	0.25	0.1-0.5		0.8	0.2	0.1					Remanente	0.5	0.15
BAISi-11	A94104	9.0-10.5	0.25	1.0-2.0	0.02- 0.20	0.8	0.2	0.1					Remanente	0.5	0.15
BMg-1	M19001	0.05	0.05	Remanente		0.005	1.7- 2.3	0.15- 1.5		0.01		.0002- .0008	8.3-9.7		0.3

#### 2.2.2.5 Metales de aporte de Aleación α Al-Si

Estos metales de aporte se usan 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 (Cladding) son aleaciones aluminio-silicio (véase tabla 2.5), 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 ^[3].

#### 2.2.2.6 Fundente

Se usan fundentes, atmósferas, protectoras y vacío para evitar las reacciones indeseables durante la soldadura brazing. Algunos fundentes y atmósferas pueden además reducir los óxidos que ya están presentes.

El empleo de fundentes o atmósferas (véase tabla 2.7) no elimina la necesidad de limpiar las piezas antes de soldarla en brazing.

DESIGNACIÓN	ALEACIONES	COMPONENTES	SE ESPECIFICA EL GROSOR DEL	CARAS RECUBIERTAS	ESPESOR DEL REVESTIMIENTO POR LADO (% del Espesor del Compuesto)			
	METAL BASE	<b>RECUBRIMIENTO¹</b>	PRODUCTO EN		NOMINAL	PROM	PROMEDIO ²	
Alclad 3003 lamina y placa	3003	7072	Todos	Ambos	5	4	63	
Alclad 3003 en tubo	3003	7072	Todos	Interior Exterior	10 7			
Alclad 3004 lamina y placa	3004	7072	Todos	Ambos	5	4	63	
No.11. lamina de soldadura brazing	3003	4343	A través de 0.063, 0.064 y más	Uno Uno	10 5	8 4	12 6	
No.12. lamina de soldadura brazing	3003	4343	A través de 0.063, 0.064 y más	Ambos Ambos	10 5	8 4	12 6	
Cladding 3003 Reflector	3003	1175	A través de 0.064, 0.065 y más	Ambos Ambos	15 7½	12 6	18 9	

Tabla No. 2.5. Componentes de productos con revestimiento^[5].

NOTA: Esta tabla no incluye todos los productos con recubrimiento (clad) registrados en la Asociación de Aluminio.

1. Composición del recubrimiento (cladding) sólo es aplicable a la aleación de aluminio y la composición del revestimiento puede ser posteriormente modificado por la difusión entre el núcleo y el revestimiento, debido al tratamiento térmico.

2. El espesor de cada lado es determinado por el promedio del espesor de revestimiento, las mediciones son realizadas con un aumento de 100 diámetros en la sección transversal de una muestra transversal pulida y atacada para el análisis microscópico.

3. Aplicable para el espesores de 0,500 pulgadas y mayores.

4. El revestimiento de componentes, en lugar de la aleación 4343, puede ser del 5% 1xxx con revestimiento de 4343.

AA DESIG.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	OTF	ROS	AI
										Cada	Total	Min.
3003	0.6	0.7	0.05-0.2	1.0-1.5				0.10		0.05	0.15	Resto
3004	0.30	0.7	0.25	1.0-1.5	0.8-1.3			0.25		0.05	0.15	Resto
3005	0.6	0.7	0.30	1.0-1.5	0.20-0.6	0.1		0.25	0.1	0.05	0.15	Resto
3105	0.6	0.7	0.30	0.30-0.8	0.20-0.8	0.2		0.40	0.1	0.05	0.15	Resto
4032	11.0-13.5	1	0.50-1.3		0.8-1.3	010	0.5-1.3	0.25		0.05	0.15	Resto
4043	405.6.0	0.8	0.30	0.05	0.05			0.10	0.2	0.05	0.15	Resto
4045 ¹	9.0-11.0	0.8	0.30	0.05	0.05			0.10	0.2	0.05	0.15	Resto
4047 ¹	11.0-13.0	0.8	0.30	0.15	0.1			0.20		0.05	0.15	Resto
4145 ¹	9.9-10.7	0.8	3.3-4.7	0.15	0.15	0.15		0.20		0.05	0.15	Resto
4343 ¹	6.8-8.2	0.8	0.25	0.1				0.20		0.05	0.15	Resto
4643	3.6-4.6	0.8	0.10	0.05	0.10-0.30			0.10	0.15	0.05	0.15	Resto

 Tabla No. 2.6. Composición química límites de aleaciones de aluminio forjado

1.- Aleaciones de metal de aporte para brazing.

#### Nota

Esta lista no incluye todas las aleaciones registrado en la Asociación de Aluminio. Una lista completa de las denominaciones se encuentra en el "Registro Internacional de denominaciones de aleación, límites de composición química de aluminio y aleaciones de aluminio ". Estas listas son mantenidas por el Comité Técnico de Productos estándares de la Asociación de Aluminio.

		Tipos de	Ingredientes		Actividad de temp	de rango eratura	
Clasificación	Forma	aporte	típicos	Aplicación	٩	°C	Recomendados metales base
FB1-A	Polvo	BAISi	Fluoruros cloruros	Por antorcha u horno de soldadura brazing	1080-1140	560-615	Todos las aleaciones de aluminio soldables
FB1-B	Polvo	BAISi	Fluoruros cloruros	Por horno de soldadura brazing	1040-1140	560-615	Todos las aleaciones de aluminio soldables
FB1-C	Polvo	BAISi	Fluoruros cloruros	Por soldadura brazing de inmersión con BAISi	1000-1140	540-615	Todos las aleaciones de aluminio soldables
FB2-A	Polvo	BMg	Fluoruros cloruros	A causa de una utilización muy limitada de soldadura para magnesio, una clasificación detallada de los fundentes de soldadura de este tipo no se incluye.	900-1150	480-620	Aleaciones de magnesio cuyas designaciones inicio predictivo AZ
FB3-A	Pasta	BAg Y BCuP	Boratos Fluoruros	Fundentes para propósitos generales para la mayoría de ferrosos y no ferrosos y aleaciones. (Excepción de Aluminio bronce, etc.).	1050-1600	565-870	Todos los metales ferrosos y no ferrosos, excepto con aquellos con aluminio o magnesio como uno de los elementos constitutivos; carburos.
FB3-C	Pasta	BAg Y BCuP	Boratos Fluoruros boro	Similar a FB3-A pero con capacidad para ampliar el tiempo de calentamiento o mediante el uso de un aditivo de oxidante	150-1700	565-925	Todos los metales ferrosos y no ferrosos, excepto con aquellos con aluminio o magnesio como uno de los elementos
FB3-D	Pasta	BAg, BCu, BNi, BAu y RBCuZn	Boratos Fluoruros	Similar a FB3-C con un mayor rango de temperatura activa.	1400-2200	760-1205	Todos los metales ferrosos y no ferrosos, excepto con aquellos con aluminio o magnesio como uno de los elementos constitutivos.; carburos.

# Tabla No. 2.7. Fundentes de soldadura [12]

### 2.3 Control de calidad

### Seis pasos básicos ^[7, 9,13]

La soldadura brazing depende en mayor medida de la acción capilar, más que la habilidad del operador, asegura la distribución del metal de aporte en la junta. La habilidad real mas bien esta en el diseño y la ingeniería de la junta. Pero incluso una junta diseñada apropiadamente puede servir de poco, si los procedimientos de soldadura brazing correctos no se siguen. Estos procedimientos consisten de *seis pasos básicos*. Son generalmente simples para realizarse (algunos pueden tomar solamente algunos segundos), pero ningunos de ellos se deben omitir como una operación del proceso de soldadura brazing, si se desea una soldadura sana, brazing y de buena apariencia. Por simplicidad, discutiremos estos seis pasos principalmente en términos de "soldadura manual," es decir, soldando con la antorcha con una mano y con la otra alimentamos el metal de aporte. Por supuesto los pasos para soldar manualmente se aplican también a la soldadura de producción en una línea de ensamble. Las mismas medidas deben ser tomadas, aunque pueden ser realizadas en una manera diversa.

#### Paso 1: Buen ensamble y ajuste (fit) y separación (gap) 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 Figura 2.2 muestra cómo la resistencia a la tensión varía con la cantidad de separación (gap) entre las piezas que son unidas.



Figura 2.2. Efecto del espesor de la unión en el esfuerzo de tensión ^[13].

#### Paso 2: Limpieza de los metales

Es indispensable que las superficies estén limpias y libres de óxidos para asegurar uniones soldadas en fuerte sean integras y de calidad uniforme, 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.

La acción capilar trabajará correctamente solamente cuando las superficies de los metales están limpias. Si "se contaminan" aceite, grasa, moho, cascarilla o suciedad tendrán 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 oxido formados por el calor y el resultado serán huecos en la soldadura. La limpieza de las partes algunas veces es un trabajo complicado, pero tiene que realizarse forzosamente.

Los métodos que siguen son los más comunes:

- a) Limpieza con disolventes.
- b) Desengrasado con vapor.

- c) Limpieza alcalina.
- d) Limpieza con emulsión.
- e) Limpieza electrolítica.

#### Paso 3: Aplicación de fundente en la unión

El fundente es un compuesto químico aplicado a las superficies de la junta antes de soldar. Su uso es esencial en el proceso brazing. La razón de utilizar fundentes es porque durante el calentamiento de la superficie del metal este 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, 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 de abajo, entonces podemos decir que el metal base esta listo con el calor suficiente para fundir el metal de aporte para el brazing.

#### Paso 4: Ensamble para el brazing

Como se comentó anteriormente, las piezas a soldar se limpian y se aplica fundente, también se tiene que tener una posición adecuada para soldar. Debemos asegurarnos que esta posición permanezca en la alineación correcta durante los ciclos de enfriamiento y calentamiento del brazing y que la acción capilar pueda hacer su trabajo. Si la forma y el peso de las piezas lo permiten, la manera más simple de mantenerlas juntas es por gravedad. 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 dispositivo (fixture) de ayuda para aplicar el brazing. Se debe considerar que no sea de una gran masa y minimizar el contacto con las partes a unir. (Un fixture en contacto con las partes a soldar conduce y extrae el calor de esa zona a través del fixture.) El uso puntas y cuchillas reducen el contacto al mínimo. Utilice materiales con baja conductividad térmica, tales como acero inoxidable, Inconel o cerámica. Puesto que éstos son de baja conductividad térmica, extraen menos calor de la junta. Elija los materiales compatibles en cuanto a su velocidad de expansión para no alterar la alineación del ensamble durante el ciclo térmico.





#### Paso 5: Soldadura brazing

Esto implica calentar el ensamble a soldar a la temperatura de brazing y que el metal de aporte fluya a través de la unión, el calor se aplica ampliamente al metal base.

El método de calentamiento más utilizado 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 popular 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 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 1100°F (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 pobres conductores y tienden a conservar el calor lo cual genera sobrecalentamiento fácilmente. Los buenos conductores necesitarán más calor que los conductores pobres, simplemente porque disipan el calor más rápidamente.

El metal de aporte líquido tiende a 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 la figura 2.4, se muestra de forma esquemática la forma de calentamiento de la superficie inferior de la placa más grande, de modo que el calor el metal de relleno baje completamente dentro de la unión.



Figura 2.4. Aplicación de calor en soldadura brazing^[13].

#### Paso 6: Limpieza de la unión brazing

Después de haber soldado el ensamble, este tiene que limpiarse. La limpieza es generalmente una operación de dos etapas. Primero retiro de los residuos del fundente. En segundo lugar quitar con ácido pícrico cualquier cascarilla del óxido formado durante el proceso brazing. El retiro del fundente es una operación simple, pero esencial. (Los residuos del fundente son químicamente corrosivos y, si no se retira, podría 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 (120°F/50°C o mas 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 agrietaran y formará escamas generalmente ya fría la unión. Si se dificulta su remoción, cepíllelos ligeramente con un cepillo de alambre mientras que el ensamble todavía está en agua caliente. Se puede utilizar métodos sofisticados para eliminar los residuos de fundente, por ejemplo un tanque de limpieza ultrasónica para apresurar la acción del agua caliente, o el 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 un tono verde a negro. En este caso, el fundente tiene que ser eliminado utilizando una solución ácida suave. Un baño de ácido hidroclórico del 25% (calentado a 140 - 160°F/60-70°C) disolverá generalmente los residuos más obstinados del fundente. Agite simplemente el ensamble soldado en esta solución por un lapso de 30 a 120 segundos. No es necesario cepillar. No obstante se debe tener precaución las soluciones ácidas usadas en piezas o ensambles grandes, así que al enfriar en agua caliente en un baño ácido, se debe usar guantes y equipo de protección de la cara. Después de que usted haya conseguido eliminar el fundente, utilice 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 oxidante, que contengan ácido nítrico, deben ser evitadas si es posible, pues atacan el metal de
aporte de plata. Si usted encuentra necesario utilizarlos, utilice un tiempo 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 usted necesita un final ultra-limpio, usted puede conseguirlo puliendo el ensamble con un esmeril de paño fino. Si los ensambles serán almacenados para utilizarse posteriormente, se debe aplicar una capa protectora de una sustancia soluble en agua, resistente al moho.

# 2.3.1 Calificación de procedimientos de soldadura Brazing^[14]

Para procesos y operaciones de soldadura brazing (BPS) se debe elaborar un procedimiento conforme lo es requerido a la normativa internacional. Un procedimiento de soldadura brazing calificado proporciona los valores de las pruebas para evaluar la unión soldada. Es necesario que las uniones tengan las propiedades adecuadas para su aplicación. En la tabla 2.8 se muestra el grupo de aleaciones de aluminio, para realizar procedimientos que se puedan utilizar con los materiales pertenecientes al mismo grupo sin la necesidad de realizar pruebas a cada clasificación ya que estas son agrupadas por rangos en las propiedades mecánicas, ej. BM 200, el esfuerzo máximo a la tensión es agrupado en el estándar entre 8 a 13 Ksi.

Los procedimientos de soldadura deben contener las siguientes variables:

- 1. Proceso de soldadura.
- 2. Metal base.
- 3. Rango de espesores.
- 4. Preparación del metal base.
- 5. Metal de aporte.
- 6. Fundente.
- 7. Atmosfera de protección.
- 8. Temperatura de soldadura brazing.

- 9. Tiempo de soldadura.
- 10. Diseño de unión.
- 11. Limpieza.
- 12. Tratamiento térmico post soldadura.

BM			Esf Mír a la T	uerzo nimo Tensión	BM			Esfu Mín a la Te	ierzo imo ensión
No.	UNS No.	Nombre Común	ksi	MPa	No.	UNS No.	Nombre Común	ksi	MPa
200	A91060	1060	8	55	210	A07100	710.0	32	221
	A91100	1100	11	76		A07110	711.0	26	179
	A93003	3003	14	97		A07120	712.0	34	234
	A93003 Alclad	Alc. 3003	13	90					
					220	A93004	3004	22	152
210	A93005	3005	17	117		A95005	5005	15	103
	A93105	3105	14	97		A95050	5050	18	124
	A96063	6063	13	90		A96061	6061	18	124
	A96951	6951	17	117		A96061 Alclad	Alc. 6061	17	117

# 2.3.2 Inspección y pruebas ^[9,20]

La inspección después del proceso soldadura brazing puede realizarse con especimenes de prueba o probando el ensamble ya terminado. Las pruebas pueden ser destructivas o no destructivas. En general las discontinuidades de soldadura brazing pertenecen a tres clases generales:

- 1.- Las asociadas a requisitos dimensionales.
- 2.- Las asociadas a discontinuidades estructurales de la unión por soldada brazing.
- 3.- Las asociadas al metal de soldadura brazing o a la unión soldada.

# 2.3.2.1 Métodos de pruebas no destructivos ^[9,20]

Los objetivos de la inspección no destructiva de uniones en soldada brazing son:

1.- Detectar discontinuidades definidas en normas de calidad o códigos.

2.- Obtener indicios que permitan determinar la causa de irregularidades en el proceso de fabricación.

Los métodos de prueba no destructivos que se pueden utilizar son:

- 1.- Inspección visual.
- 2.- Prueba en servicio.
- 3.- Prueba de fuga.
- 4.-Inspección con líquidos penetrantes.
- 5.- Inspección radiográfica.
- 6.- Inspección ultrasónica.

# 2.3.2.2 Métodos de pruebas destructivos ^[15]

Los métodos de prueba destructivos utilizados son:

- 1.- Inspección metalográfica.
- 2.- Prueba de pelado.
- 3.- Prueba de tensión.
- 4.- Pruebas de torsión.

#### 2.3.2.3 Discontinuidades

Las inspecciones destructivas y no destructivas identifican los siguientes tipos de discontinuidades de la soldadura brazing, las cuales se mencionan a continuación:

- 1.- Fusión incompleta.
- 2.- Fundente atrapado.
- 3.- Filetes discontinuos.

- 4.- Erosión del metal base.
- 5.- Aspecto superficial insatisfactorio.
- 6.- Grietas.
- 7.- Porosidad y rechupes.

Las aleaciones de aluminio no tratables son susceptibles a la porosidad en el metal soldado inducida por hidrógeno, al igual que todas las aleaciones de aluminio en general. Esta porosidad se forma durante la solidificación debido a la abrupta caída en solubilidad de hidrógeno cuando va de líquido a sólido. La porosidad puede evitarse minimizando la cantidad de hidrógeno durante la soldadura, el uso de gas de alto grado (bajo punto de rocío). Se ha determinado que el aporte de la soldadura es muchas veces la fuente primaria de contaminación por hidrógeno. Los metales de aporte serie 5xxx en particular son susceptibles a la hidratación de óxidos superficiales los cuales pueden resultar en porosidad ^[33].

Nota: Las grietas se consideran directamente como un defecto debido a que reducen la resistencia mecánica como la vida de servicio. Actúan como concentradores de esfuerzos, disminuyendo la resistencia mecánica del ensamble soldado y causando falla prematura por fatiga ^[9,20].

## 2.4 Aspectos Metalúrgicos

#### 2.4.1 Metalurgia de la soldadura Brazing ^[7]

Las temperaturas de soldadura brazing están por debajo del solidus de los materiales a unir. Los cambios metalúrgicos que acompañan a la soldadura brazing están limitados a las reacciones del metal base sólido y el metal de aporte líquido.

El flujo capilar del metal de soldadura depende de la tensión superficial característica del mojado y las reacciones físico-metalúrgicas con el metal base, fundente o atmósfera y los óxidos en la superficie del metal base.

#### 2.4.1.1 Fusión y fluidez

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. La Figura 2.5 muestra el diagrama de equilibrio del sistema binario plata-cobre. Durante el calentamiento la línea de cambio a fase sólida (solidus), ADCEB, indica la temperatura de comienzo de la fusión de las aleaciones, en tanto que la línea de cambio a fase líquida (liquidus), ACB, indica las temperaturas a las que las aleaciones se vuelven completamente líquidas. En el punto C las dos líneas se unen (72% en peso plata-28% cobre), lo que indica que esa aleación se funde a esa temperatura específica (la temperatura eutéctica). Esta aleación tiene la composición eutéctica; es tan fluida como un metal puro, en tanto que las demás combinaciones de aleación son pastosas 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 región  $\alpha$  es una solución sólida de cobre en plata, y la región  $\beta$  es una solución sólida de plata en cobre. La zona sólida central consiste en una mezcla homogénea íntima de soluciones sólidas  $\alpha$  y  $\beta$ . Por encima de la línea de liquidus, los átomos de plata y de cobre están distribuidos en forma totalmente homogénea en una solución líquida.



Figura 2.5. Diagrama de equilibrio del sistema binario plata-cobre^[7].

#### 2.4.1.2 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 rangos largos 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 de constituyentes, que se denomina licuación ^[14].

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.

#### 2.4.1.3 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 ni (4) formar compuestos quebradizos. Los efectos (1), (2) y (3) dependen de la solubilidad mutua entre el metal de aporte y el metal de la cantidad de metal de aporte presente y de la temperatura y duración del ciclo de soldadura brazing (3). Ver Figura 2.6. Efecto del Mojado.



Figura 2.6. Efecto del mojado en un tubo capilar^[7].

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 erosión del metal base (3) ocurre cuando el metal base y el metal de aporte de soldadura brazing son mutuamente solubles. Hay ocasiones en tal aleación, donde se producen compuestos intermetálicos quebradizos (4) que reducen la ductibilidad 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, para sobreponerse a la capacidad de aleación (humectabilidad) limitada de las aleaciones plata-cobre que se usan para soldar en hierro y acero, esos metales de aporte contienen cinc o cadmio, o ambos, que bajan

las temperaturas de *liquidus* y *solidus*. Se añade 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 con base de níquel. Otros metales de aporte contienen elementos como litio, fósforo o boro, que 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, los cuales son nombrados autofundentes.

Se calienta el área de la unión hasta que el fundente se derrite y limpia los metales base quedando protegidos contra la oxidación ^[12].

# 2.5 Metalurgia básica y propiedades de las aleaciones base aluminio

#### 2.5.1 Información general

El aluminio es un metal ligero suave y de baja resistencia el cual puede ser fácilmente vaciado, forjado, maquinado, formado y soldado. El aluminio es de color gris claro, muy brillante cuando es pulido y opaco cuando se oxida. Una fractura en el aluminio se muestra de estructura muy brillante. El aluminio no produce chispas y no se pone color rojo antes de fundirse. Una película densa de óxido blanco se forma instantáneamente en al superficie de metal líquido. El aluminio es el segundo metal más popular que es soldado. El aluminio y las aleaciones de aluminio pueden ser satisfactoriamente soldados en diferentes procesos de soldadura^[16].

#### 2.5.2 Propiedades del Aluminio y sus aleaciones

Una única combinación de propiedades hace al aluminio uno de los materiales más versátiles de ingeniería y construcción. Algunas de sus aleaciones tienen resistencias más grandes que los aceros estructurales. Tiene alta resistencia a la corrosión bajo la mayoría de las condiciones de servicio y no se forman sales coloreadas. No tiene reacción tóxica. Tiene buenas conductividades eléctricas, térmicas, alta reflectividad al calor y a la luz. El metal puede ser trabajado fácilmente a cualquier forma y acepta una amplia variedad de acabados superficiales.

El peso del aluminio es 35% menor que el hierro y 30% en comparación al cobre. Comercialmente el aluminio puro tiene una resistencia a la tensión de cerca de 90 MPa. Entonces su utilidad como un material estructural en esta forma es algo limitada. Trabajando el metal por rolado en frío su resistencia puede duplicarse.

Mucha más resistencia puede obtenerse por alear el aluminio con pequeños porcentajes de uno o varios elementos como Mn, Si, Cu, Mg o Zn^[19].

Algunas de las aleaciones son además resistentes y endurecidas por tratamientos térmicos llegando a obtener 700 MPa. Una amplia variedad de características mecánicas o temples están disponibles en las aleaciones de aluminio a través de varias combinaciones de trabajado en frío y tratamientos térmicos.

El aluminio y sus aleaciones pierden parte de su resistencia a elevadas temperaturas, aunque algunas de las aleaciones retienen buena resistencia a temperaturas de 200 a 260°C. A temperaturas subcero su resistencia incrementa sin perdida de ductilidad haciendo al aluminio particularmente usual para aplicaciones a baja temperatura.

El aluminio forma una película de óxido blanca inmediatamente, lo cual lo protege contra oxidación posterior, y esto, da al aluminio alta resistencia a la corrosión. A

menos que se exponga a alguna substancia o condición que destruya su recubrimiento de óxido protector.

El contacto directo con ciertos metales en presencia de un electrolito, forma la corrosión galvánica del aluminio en el área de contacto. Normalmente para evitar esto se usan recubrimientos de pintura o cinta aislante.

El aluminio es uno de los dos metales más comunes teniendo alta conductividad eléctrica suficiente para usarse como un conductor eléctrico. La conductividad del grado eléctrico es cerca de 62 ICAS (EN AW1350 EN 573-3). Esta característica es importante donde la transferencia de energía térmica de un medio a otro es involucrado, ya sea en calentamiento o enfriamiento. Estos intercambiadores de calor de aluminio son comúnmente usados en la industria alimenticia, química, del petróleo, aeronáutica y otras.

El aluminio es también un excelente reflector de energía radiante a través del rango entero de longitud de onda, de ultravioleta hasta el espectro visible de ondas de calor, al igual que ondas electromagnéticas de radio y radar.

Otra ventaja es su facilidad y velocidad a la cual el aluminio puede ser maquinado, permitiendo flexibilidad en manufacturar muchas partes por máquinas de tornillo automáticas.

Casi cualquier método de unión es aplicable al aluminio: remaches, soldaduras brazing o soldering. La unión adhesiva de partes de aluminio es ampliamente empleada, particularmente en componentes para la aeronáutica.

La atractiva apariencia junto con la alta resistencia al ambiente y bajos costos de mantenimiento lo hacen usual para las construcciones de todos tipos.

#### 2.5.2.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio ^[5,23]

**Series 1xxx-** Aluminio de 99 por ciento o alta pureza, tiene muchas aplicaciones, especialmente en los campos químicos y eléctricos. Resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, bajas propiedades mecánicas y maquinabilidad. El incremento moderado en resistencia puede obtenerse por endurecer por deformación. El Fe y el Si son las principales impurezas.

**Series 2xxx-** Cobre es el principal elemento aleante en este grupo, muchas veces con Mg como adición secundaria. Estas aleaciones requieren tratamientos térmicos de solución para obtener propiedades óptimas.

En algunas instancias el envejecido artificial es empleado para incrementar las propiedades mecánicas. Este tratamiento materialmente incrementa la resistencia a la cedencia con asistida pérdida de elongación. Su efecto en resistencia a la tensión no es significante. Las aleaciones en esta serie no tienen buena resistencia a la corrosión como otras aleaciones de aluminio y bajo ciertas condiciones pueden estar sujetas a corrosión intergranular.

**Series 3xxx-** El Manganeso es el elemento aleante mayor de las aleaciones de este grupo, las cuales son generalmente no tratables térmicamente. Debido a que principalmente un porcentaje de Mn, arriba de 1.5%, puede ser efectivamente adicionado al aluminio y es usado como el elemento mayor en solamente pocas instancias.

**Series 4xxx-** El mayor elemento aleante de este grupo es el silicio el cual puede ser adicionado en suficientes cantidades (arriba de 12%) para causar una baja sustancial al punto de fusión sin producir fragilidad en la aleación resultante. Por esta razón las aleaciones Al-Si pueden usarse como alambres de soldadura y como aleaciones para soldadura brazing donde se requiere bajo punto de fusión que el requerido por el metal base.

**Series 5xxx-** El Magnesio es uno de los elementos de aleación más efectivo y ampliamente usado en el aluminio. Cuando es usado como elemento de aleación mayor o con Mn el resultado es moderado a alta resistencia a la aleación no tratable. Las aleaciones en esta serie poseen buenas características de soldadura y buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos.

**Series 6xxx-** Las aleaciones en este grupo contienen silicio y magnesio en proporciones aproximadas para hacer a la aleación tratable térmicamente. Es menos resistente que las aleaciones 2xxx o 7xxx, estas aleaciones poseen buena formabilidad y resistencia a la corrosión con media resistencia.

**Series 7xxx-** El zinc en cantidades de 1 a 8% es el elemento de aleación mayor en este grupo, y cuando se acopla con Mg o Cu (o sin Cu) resulta en una aleación tratable térmicamente de muy alta resistencia.

Comúnmente otros elementos tales como el Mg o el Cr son también adicionados en pequeñas cantidades.

# 2.5.2.2 Efecto de los elementos de aleación ^[9]

**El Cromo**. Es impureza en el aluminio de alta pureza (5 a 50 ppm), lo cual tiene un efecto grande en la resistividad eléctrica. El Cr es un elemento aleante (en cantidades que no exceda 0.35%) en aleaciones de Al-Mg, Al-Mg-Si y Al-Mg-Zn. En exceso de estos límites tiende a formar constituyentes con otras impurezas como el Mn, Fe y Ti. El Cr tiene baja velocidad de difusión y forma fases dispersas finas en productos forjados las cuales pueden inhibir la nucleación y el crecimiento de grano. El Cr se usa para controlar la estructura de grano, prevenir la recristalización en aleaciones Al-Mg-Si durante el tratamiento térmico o el trabajado en caliente. **El Cobre.** Se adiciona al Al en cantidades de 2 a 10% para producir aleaciones las cuales responden a los tratamientos de solución y envejecido incrementando la resistencia y dureza y disminuyendo la elongación.

El Hidrógeno. Tiene una alta solubilidad en el estado líquido en el punto de fusión lo cual puede formar porosidad durante la solidificación. Juega un importante rol en la decohesión de límites de grano durante el agrietamiento por esfuerzo-corrosión. El nivel en metales fundidos se controla por desgasificado o en vacío.

El Hierro. Es la mayor impureza encontrada en el Al. Tiene una alta solubilidad en aluminio líquido y por lo tanto es fácilmente disuelto en todas las etapas de fusión en la producción. La solubilidad del Fe en estado sólido es baja (~0.04%) y por lo tanto mucho del Fe presente en aluminio sobre estas cantidades aparece como intermetálicos de segunda fase.

**El Magnesio.** Es el mayor elemento aleante en las series 5xxx. Su máxima solubilidad sólida en aluminio es 17.4%, pero en aleaciones forjadas no excede el 5.5%. La adición de Mg marcadamente incrementa la resistencia sin disminuir la ductilidad. La resistencia a la corrosión y la soldabilidad son buenas.

**Manganeso.** Es una impureza en el aluminio primario en el rango de 5 a 50 ppm, lo cual disminuye la resistividad. El Mn incrementa la resistencia en solución sólida como una fase intermetálica precipitada.

El Silicio. Después del Fe es la impureza mayor en Al comercial grado electrolítico (0.01 hasta 0.15%). Forma compuestos intermetálicos con el Fe.

#### 2.5.2.3 Aleaciones de aluminio no tratables térmicamente.

La resistencia inicial de las aleaciones de aluminio en este grupo dependen del efecto de endurecimiento de elementos como el Mn, Si, Fe y Mg, solos o combinados. Las aleaciones no tratables térmicamente son usualmente designadas por lo tanto en la serie 1xxx, 3xxx, 4xxx y 5xxx. Debido a que estas aleaciones son endurecidas por trabajado, mayor resistencia puede obtenerse con el trabajado en frío. Las aleaciones que contienen cantidades apreciables de Mg se les proporcionan usualmente un tratamiento final de elevada temperatura para asegurar la estabilidad de sus propiedades.

#### 2.5.2.4 Propiedades de la soldadura

Cuando las aleaciones no tratables térmicamente son soldadas, el daño microestructural es encontrado en la zona afectada por el calor. Diferente al caso de las aleaciones tratables, los precipitados de endurecimiento pueden disolverse o agrandarse, el daño en la zona afectada por el calor en las aleaciones no tratables esta limitado a la recuperación, recristalización y crecimiento de grano. El metal soldado es típicamente la parte más débil de la unión y es la ubicación de la falla cuando la unión es puesta en tensión ^[28].

La microestructura del metal soldado consiste de granos columnares, epitaxiales con una subestructura celular o columnar-dendrítica que tiene constituyentes eutécticos interdendríticos, principalmente (Fe, Mn) Al₆ para las aleaciones 1xxx y 3xxx; silicio para aleaciones 4xxx y Mg₃Al₂ para las aleaciones 5xxx.

Las soldaduras de aleaciones no tratables exhiben significativamente mejor ductilidad en comparación con sus similares soldaduras tratables.

# 2.5.2.5 Efecto de las características microestructurales en las propiedades mecánicas

Las características microestructurales que influyen en una de las propiedades más importantes, la dureza, son las partículas de segunda fase y estructura de grano. Las partículas de segunda fase pueden ser de tres tipos:

- Partículas insolubles gruesas formadas durante el vaciado o partículas gruesas de fases normalmente solubles formadas durante el vaciado o posterior procesamiento.
- Partículas pequeñas intermedia formadas durante el homogenizado.
- Precipitados por envejecidos.

La orientación de grano también juega un papel importante en la determinación de la dureza de aleaciones con partículas gruesas ^[31].

#### 2.5.2.6 El efecto de partículas intermedias y estructura de grano

El papel principal de las partículas intermedias Cr, Zn o Mn es el de retardar la recristalización y el crecimiento de grano. Los elementos más efectivos son el Cr o Zn en aleaciones Al-Zn-Mg y Mn en aleaciones Al-Cu-Mg. Las adiciones de Cr, Zr o Mn permanecen en solución durante el vaciado y son precipitadas durante el homogenizado u otro tratamiento de alta temperatura. Su tamaño, el cual es controlado por la temperatura y el tiempo, tiene efectos importantes.

#### 2.5.2.7 El efecto de precipitados por endurecimiento

La mayor diferencia de tamaño en precipitados por endurecimiento ocurre en aleaciones de la serie 2000. Efectos más pequeños de los precipitados por endurecimiento han sido notados en la serie 7000. El efecto de precipitados por endurecimiento por envejecido en la corrosión de aleaciones AI-Zn-Mg es complejo,

pero en general la presencia de precipitados por endurecimiento metaestables producidos por sobre-envejecimiento se prefiere ya que mejora el módulo de deformación y homogeneidad electroquímica.

El contenido de Cu y la velocidad de enfriamiento después del tratamiento térmico por solubilizado juegan un papel importante en determinar la resistencia a la corrosión por esfuerzos. 1.0% de Cu da buena resistencia a la corrosión por esfuerzos en todas las orientaciones de grano en una condición de sobre-envejecido. El efecto de la velocidad de enfriamiento es diferente para aleaciones Cu-Al-Zn-Mg. La corrosión por esfuerzos en aleaciones de Cu bajo se beneficia por una lenta velocidad de enfriamiento.

Sin embargo, estas aleaciones solo resisten a la corrosión por esfuerzos cuando la estructura de grano no es equiaxial. En general, partículas gruesas de todos tipos y estructuras de grano gruesos recristalizados llevan a disminuir la dureza.

#### 2.5.2.8 Control de la microestructura

**Composición.** Se mejora la dureza al reducir el Fe, Si y otros elementos. Estas reducciones son limitadas por costo y disponibilidad de materiales de alta pureza. Alternativamente, menores beneficios son derivados al alcanzar una distribución más uniforme de las partículas de segunda fase presentes. La disminución de Fe y Si debe ser tratada con precaución ya que puede afectar el proceso de precipitación. El Fe y Si pueden influenciar la nucleación de fases nuevas o cambiar la cinética de precipitación. Mayor reducción en la cantidad de partículas de segunda fase puede ser alcanzada al controlar los elementos aleantes para evitar exceder el límite de solubilidad ^[30].

La sensibilidad al enfriamiento de las aleaciones de la serie 7000 puede ser influenciada por la composición. Específicamente, la menor adición de elementos (Cr, Zn, Mn) los cuales son añadidos para controlar la recristalización, causa una pérdida

en resistencia al reducir la velocidad de enfriamiento. El Cr causa la mayor sensibilidad al enfriamiento. Zr puede sustituir al Cr ya que permite el mantenimiento de la resistencia a muchas más bajas velocidades de enfriamiento y es un efectivo retardante de la cristalización.

# 2.5.2.9 Secuencia de reacción en aleaciones α Al-Si^[17]

Muchas aleaciones son basadas en sistemas de aluminio silicio, la principal característica de estas aleaciones es la formación del eutéctico en contenidos de 11.5% - 12% de silicio. Figura 2.7. Dependiendo de la cantidad de silicio, las aleaciones son divididas en tres grupos: hipo-eutéctico aleaciones con contenido de silicio entre 5 y 10% Si, aleaciones eutécticas 11 - 13% Si y por último aleaciones hipereutécticas con contenido de silicio entre 14 - 20% de Si.

Dependiendo de la pureza del metal base, las aleaciones Al-Si contienen varias cantidades de impurezas como hierro, manganeso, cobre y zinc. También el cobre y el magnesio son adicionados algunas veces como elementos de aleación para incrementar la resistencia y la dureza del material. Las impurezas y elementos de aleación particularmente van dentro de una solución sólida en la matriz y como intermetálicos durante el proceso de solidificación.



**Figura 2.7.** Curva de enfriamiento obtenida de la aleación 380 utilizada por Bäckerud con una velocidad de enfriamiento de 0.6 °C/s^[17].

En aleaciones hipo eutécticas, la siguiente secuencia de precipitación de fases podría suceder.

- 1.- Formación de una red dendrítica de  $\alpha$  aluminio.
- 2.- Reacción eutéctica de aluminio silicio.
- 3.- Precipitación de fases secundarias eutécticas como Mg₂Si y Al₂Cu.

Las fases mas comunes en las fundiciones de las aleaciones de aluminio son Al₅FeSi y Al₁₅ (Mn, Fe)₃ Si₂. Hacia el final del proceso de solidificación fases de Mg₂Si, Al₂Cu y otras más complejas podrían precipitar desde el líquido restante. Ver tabla 2.9 resume las reacciones durante la secuencia de solidificación, asumiendo que no hay interferencia química entre el silicio y el hierro antes de que estas inicien la formación de partículas inter metálicas (con aluminio y manganeso). La estructura primaria puede predecirse. El proceso de solidificación inicia por la formación de dendritas de aluminio y el líquido inter dendrítico comienza a enriquecerse con hierro y silicio. La segregación penetra en la superficie de la fase Al₅FeSi e inicia la segunda reacción mas tarde esta fase es precipitada. En fases Al₈Mg₃FeSi₆ y Mg₂Si, posteriormente durante la siguiente reacción estas dos fases precipitan juntas hasta enriquecer la composición eutéctica.

Numero de reacción	Reacciones	Temperatura Sugerida, °C
1	Desarrollo de red dendrítica	590
2	$Liquido \to AI + AI_5FeSi$	584
3	$Liquido \rightarrow AI + Si + AI_5 FeSi$	576
4	$Liquido + Al_5FeSi \rightarrow Al + Si + Al_8Mg_3FeSi_6$	567
5	$Liquido \rightarrow AI + Si + Mg_2Si + Al_8Mg_3FeSi_6$	554

Tabla No. 2.9. Reacciones durante la Solidificación^[17].

# CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

El proceso de soldadura brazing en hornos del tipo continuo o semi-continuo es esencial en la producción de intercambiadores de calor base aluminio. En investigaciones anteriores se han realizado esfuerzos por disminuir el punto de fusión de las aleaciones y metales empleados agregando microaleantes como el germanio ^[18] con resultados satisfactorios, pero el costo está muy por encima de la aleación mas común en el mercado (Al-12% Si).

En el presente trabajo se analizaron cupones de prueba de soldadura preparados de un intercambiador de calor (Radiador) base aluminio 3005 y 3003 con un revestimiento de soldadura tipo "Cladding" AW-4343 7.5% Si, su composición química se lista en las Tablas, 3.1, 3.2 y 3.3, respectivamente.

En la Figura 3.1 se muestra las micrografías del material base obtenida mediante el microscopio óptico vistas a 250X. Las muestras fueron pulidas y atacadas con Hatch ^[21]. (3 ml acido fluorhídrico concentrado y 100 ml de agua destilada).

La Figura 3.1a muestra la microestructura del cabezal de la aleación AW-3005, la cual consiste en una matriz de aluminio con inter metálicos AlMnMg_{0.5}. La Figura 3.1b muestra la microestructura del Tubo plano de la aleación AW-3003 la cual consiste en matriz de aluminio con inter metálicos AlMnCu^[15].



Figura 3.1. (A) Cabezal; Microestructura de la aleación AW-3005 (B) Tubo plano. Microestructura de la aleación AW-3003.

DESIGNACIÓN AA (% e.p.)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros	AI
3005	0.6	0.7	0.3	1.0 – 1.5	0.2 – 0.6	0.1		0.25	0.1	0.15	Bal.

Tabla 3.1. Composición química del cabezal de Al.

Tabla 3.2. Composición química del tubo plano de Al.

DESIGNACIÓN AA (% e.p.)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros	AI
3003	0.6	0.7	0.05 – 0.2	1.0 – 1.5				0.1		0.15	Bal.

Tabla 3.3. Composición química material de aporte AW-4343 7.5% Si^[35].

DESIGNACIÓN AA (% e.p.)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros	AI
4343	6.8 – 8.2	0.8	0.25	0.1				0.2		0.15	Bal.

# 3.1. Descripción del proceso de fabricación de intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son sometidos a un proceso de soldadura fuerte (brazing) realizado en un horno continúo para los ciclos de ensamble de los componentes cabezal proveniente de una aleación 3005 (1500µm de espesor de pared) y con un recubrimiento de soldadura del tipo cladding del 7% del espesor de una aleación 4343 7.5% Si (ver tabla 4.2) y el tubo plano proveniente de una aleación 3003 (200µm de espesor de pared) con recubrimiento de soldadura del tipo cladding de una aleación 4343 15% Si, con un espesor de recubrimiento de 17% para el tubo plano (ver tabla 4.4) posteriormente el ensamble es rociado de fundente del tipo FB1-A (ver tabla 2.7) recomendado para brazing en aleaciones de aluminio en horno continuo con un rango de actividad de 560-615 °C, la siguiente etapa es un secado mediante un precalentamiento constante de 585°C. Una vez libre de humedad el ensamble es llevado a través del horno mediante una banda transportadora a una velocidad minima de 92 m/min para fundir el recubrimiento a temperaturas de horneado por encima de 600°C. Finalmente, la unión es sometida a un ciclo de enfriamiento por etapas (lenta y rápida). Dentro del horno se utiliza como atmosfera de protección nitrógeno de alta pureza 99% con un punto de rocío de con un máximo de -6°C manteniendo la presión parcial del oxigeno en 1.7 ppm aproximadamente evitando así la contaminación del metal líquido de soldadura.

En la Figura 3.2 se muestra los componentes del ensamble, las imágenes indicadas con las letras a y b corresponden al tubo plano y al cabezal respectivamente mientras que la letra c indica una discontinuidad en el proceso por falta de fusión, finalmente la letra d y e indican una discontinuidad tipificada como erosión en el tubo plano y el cabezal.

La Figura 3.3 muestra una imagen del horno de cabina de atmosfera controlada utilizado (CAB) por sus siglas en ingles.



Figura 3.2. Intercambiador de calor a) Cabezal b) Tubo plano c) Falta de fusión d) Erosión.



Figura 3.3. Horno de cabina de atmosfera controlada SECO/WARWICK.

# 3.2. Diseño experimental

A fin de profundizar en el conocimiento del efecto de las variables de proceso sobre la eficiencia de la unión por brazing en hornos continuos con atmosfera controlada se decidió realizar un diseño experimental.

Se tiene conocimiento que los experimentos factoriales y sus correspondientes cálculos de análisis de varianza (ANOVA), se emplean en todos los campos de la investigación, son muy útiles en investigaciones exploratorias ^[22]. Muchos experimentos requieren el estudio de los efectos de 2 ó más factores. En un experimento factorial se miden en cada etapa completa o replica del experimento, todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores.

La investigación se enfoca en encontrar la relación existente entre los parámetros de soldadura involucrados en el proceso de soldadura brazing (en horno) y la relación de la microestructura en aleaciones de aluminio para determinar el efecto de estas en la presencia de fugas debido discontinuidades del tipo de fusión.

### 3.2.1. Determinación de variables de proceso

En el proceso de soldadura por brazing en hornos continuos con atmosfera controlada, se tienen diferentes parámetros de operación. Sin embargo en el proceso se mantienen constantes muchos de ellos dejando solo libre la manipulación de dos de ellos:

- Temperatura de Soldadura, Ts, en la zona de fusión en el horno (°C)
- Velocidad de desplazamiento, V, del transportador (m/min)

El diseño experimental se basa en la modificación de estas variables las cuales intervienen en el proceso Brazing.

En la tabla 3.4 se presentan las variables dependientes y las independientes.

## 3.2.2. Diseño de experimentos

Para el análisis de resultados y tratamientos de datos se empleo un diseño factorial de la serie 2² con las siguientes características:

- Diseño: 2² con tres puntos centrales.
- Variables Independientes o factores: Temperatura de soldadura (Ts) y Velocidad de desplazamiento (V).
- Variable dependiente o respuesta: porcentaje de fases presentes en la microestructura de la unión soldada, promedio de durezas obtenidas en la zona afectada por el calor, % de falta de fusión en la zona de soldadura.

Barámetros	Unidadaa	Notación	Limites					
Farametros	Unidades	Notacion	Inferior	Nominal	Superior			
			-1	0	1			
		_						
Temperatura de Soldadura	° C	Ts	600	605	610			
Vel. de Desplazamiento	m/min	V	0.92	0.93	0.94			

#### Tabla 3.4. Parámetros de control de proceso.

El diseño factorial para este experimento, con dos tratamientos de cada factor, tendrá un total de 2 X 2 = 4 combinaciones de tratamientos. En este caso se utilizara tres factores centrales para un total de 7 muestras que intervienen en el estudio. En la Tabla 3.5 se presenta la estructura del diseño.

	Ent	radas		Salidas					
Muestra No.	Ts	v	Microestructura % de fases presentes	Dureza Hv	% Porosidad				
1	600	920	M1	M1	M1				
2	610	920	M2	M2	M2				
3	600	940	М3	МЗ	М3				
4	610	940	M4	M4	Μ4				
5	605	930	M5	М5	М5				
6	605	930	M6	M6	M6				
7	605	930	M7	M7	М7				

|--|

# 3.2.3. Equipos y materiales

Para llevar a cabo el análisis microestructural, las muestras fueron debidamente cortadas, montadas en resina, pulidas y después fueron atacadas con el reactivo reactivo Hatch (3 ml acido fluorhídrico concentrado y 100 ml de agua destilada). Las muestras fueron analizadas por microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido a diferentes magnificaciones. Para pruebas de dureza Vickers, se llevaron a cabo de acuerdo a la norma ASTM E384 utilizando un Micro durómetro con una carga de 200gf. Los equipos utilizados se describen en la tabla 3-6 y 3-7.

Proceso	Identificación	Material Base	Material de aporte cladding	Estándar
Soldadura en horno de	Tubo Plano	AW-3003	AW-4343 15% por un solo lado	AWS A5.8
atmosfera controlada SECO/WARWICK	Cabezal	AW-3005	AW-4343 7.5% Lado aire AW-1050/1145 5% Lado agua	AWS A5.8

**Tabla 3.6.** Equipos y materiales utilizados en soldadura brazing en horno.

Proceso	Equipo	Estándar	Material de aporte cladding	Observaciones
Caracterización	Microscopio óptico OLYMPUS PM6-3	ASTME3	Determinación de las fases presentes y porcentaje de porosidad	Equipado con cámara con KP-D50 digital color, programa Image-Pro Plus
	Microscopio electrónico de barrido	De 20 a 40 kv, trabaja a alto vacío	Microanálisis químico cualitativo EDS	OXFORD Jeol JSM- 6490-LV
Pruebas Mecánicas	Durómetro	ASTM E384	Cuantitativo	Future Tech FM7 y una carga de 200gf.

 Tabla 3.7. Equipos utilizados en la caracterización.

4.

# **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

# 4.1. Análisis del metal base aleación de aluminio AA 3005

El material del cabezal corresponde a la especificación AW3005 (tabla 4.1), cuya microestructura consiste de intermetálicos AlMnMg_{0.5} dispersos en una matriz AI - $\alpha$  rica de Si, ver Figura. 7.1 ^[26].

AA	<b>C</b> :	Fa	Cu	Mn	Ma	Cr	NI:	7.	T:	Otro	)S	41
(% en peso)	51	ге	Cu	IVIII	Mg	Cr	INI	Zn	11	c/u	Total	AI
3005	0.6	0.7	0.3	1.0-1.5	0.20-0.6	0.1		0.25	0.1	0.05	0.15	Remanente

 Tabla 4.1. Composición química del cabezal de aluminio
 [6]



Figura 4.1. Microestructura del cabezal.

El material del cabezal presenta un recubrimiento de soldadura brazing (clading) especificación AW4343 el cual está compuesto por intermetálicos de AlSi_{7.5}, cuyo espesor nominal comparativo de los componentes de indica que es el 7.5% del espesor de pared del cabezal en lado aire. Lo cual corresponde al promedio de 12 mediciones realizadas en el microscopio óptico de 80 µm correspondiente al 7.6% del espesor total de pared de 1.05 mm. Ver Figura 4.2 y tabla 4.2 mediciones.



Figura 4.2. Espesor del recubrimiento de soldadura brazing (cladding) AW 4343.

	Mediciones	Longitud, µm
1	L1	79.6
2	L2	79.7
3	L3	79.7
4	L4	78.3
5	L5	81.5
6	L6	81.0
7	L7	82.4
8	L8	81.5
9	L9	80.1
10	L10	78.8
11	L11	77.8
12	L12	81.5
	Media	80.15

Tabla 4.2. Mediciones del recubrimiento soldadura brazing en el cladding del cabezal.

#### Datos:

- Media 80.15 µm Espesor del recubrimiento obtenido en el microscopio óptico.
- Medio 80 µm Espesor del recubrimiento obtenido en el microscopio óptico conversión.
- Información 1.05 mm es el espesor total del tubo plano, esto equivale al 100%

Espesor del recubrimiento:

$$\frac{S_P}{S_T} * 100 = \frac{0.08}{1.05} * 100 = 7.6\%$$

Se realizó un mapeo de la sección transversal del cabezal ver figura 4.3 donde se observa el recubrimiento de brazing con respecto al espesor total. En la parte superior es notoria la capa del recubrimiento con mayor concentración de intermetálicos, lo que hace notoria la diferencia a simple vista entre el recubrimiento de soldadura brazing (cladding) y el metal base.



Figura 4.3. Mapeo del recubrimiento (cladding) en el material base del cabezal.

# 4.2. Análisis del metal base aleación de aluminio AA 3003

El material del tubo plano corresponde a la especificación AW3003 (Tabla 4.3), cuya microestructura consiste de intermetálicos Al-Mn-Cu dispersos en una matriz rica de aluminio, ver Figura. 4.4.

	<b>c</b> :	Fa	<b>C</b>	Ma	Ma	<b>C</b> *	NI:	7.0	т:	Otro	S	A1
(% en peso)	5	ге	Cu	WIN	wig	Cr	NI	Zn	11	c/u	Total	AI
3003	0.6	0.7	0.05-0.2	1.0-1.5				0.1		0.05	0.15	balance

Tabla 4.3. Composición química del tubo plano de aluminio^[6].



Figura 4.4. Microestructura del tubo plano

El material del tubo plano presenta un recubrimiento de soldadura brazing (clading) especificación AW4343^[32] el cual está compuesto por intermetálicos de AlSi_{7.5}, cuyo espesor nominal indica que es el 15% del espesor del recubrimiento brazing en una pared del tubo plano. Se realizo en el microscopio óptico una medición del recubrimiento brazing y se obtuvo un promedio de 0.036 mm en el que se correspondiente al 17% del espesor total de pared de 0.2 mm. Ver figura 4.5 y tabla 4.3 mediciones.



Figura 4.5. Espesor del recubrimiento de soldadura brazing (cladding) AW 4343.

	Mediciones	Longitud, µm
1	L1	36.8
2	L2	36.3
3	L3	36.8
4	L4	42.3
5	L5	40.5
6	L6	37.7
7	L7	35.9
8	L8	31.8
9	L9	35.0
10	L10	36.8
	Media	36.9

 Tabla 4.4.
 Mediciones del recubrimiento soldadura brazing en el cladding del tubo plano.

Datos:

- Media 36.9 µm Espesor del recubrimiento obtenido en el microscopio óptico.
- Media 36 µm Espesor del recubrimiento obtenido en el microscopio óptico conversión.
- Información 0.2 mm es el espesor total del tubo plano, esto equivale el 100%

Espesor del recubrimiento:

$$\frac{S_P}{S_T} * 100 = \frac{0.032}{0.2} * 100 = 17\%$$

Se realizó un mapeo de la sección transversal del tubo plano ver Figura 7.6 donde se observa el recubrimiento de soldadura brazing con respecto al espesor total. En la parte superior es notoria la capa del recubrimiento con mayor concentración de intermetálicos, lo que hace notoria la diferencia a simple vista entre el recubrimiento de soldadura brazing (cladding) y el metal base ^[26,32].



Figura 4.6. Mapeo del recubrimiento (cladding) en el material base del tubo plano.

# 4.3. Análisis de la unión de soldadura Material de Aporte AW 4343 7.5% Si

El análisis microestructural de las uniones se realizó en las secciones transversales de las muestras representativas, tal como se muestra la figura 4.7.



Figura 4.7. Diseño de unión (a) Cabezal, (b) Tubo Plano, (c) Espaciamiento, (d) pared a 90° del cabezal, (e) soldadura.

La Figura 4.8 evidencia un mapeo de la soldadura en donde se observan discontinuidades como faltas de fusión y rechupes (shrinkage) las cuales se indican en la en el recuadro. La microestructura de la soldadura presenta una red de intermetálicos AI-Si en forma de agujas y cuboides en una matriz dendrítica rica en aluminio, la magnificación de esta zona a 200X y 500X se muestra en la Figuras 4.9, a y b respectivamnete.



Figura 4.8. Mapeo de soldadura.

Los intermetálicos de Al-Si con forma de agujas y cuboides en la matriz de aluminio. Producidos por una solidificación rápida, por lo que no les da tiempo de crecer y esto origina una estructura de un material caliente atrapado en un material frió. Las agujas dan como resultado un material frágil pero resistente.



Figuras 4.9. Microestructuras de la soldadura brazing a) 200X y b) 500X, respectivamente [33].

En la Figura 4.10 se observan que la unión presenta discontinuidades en la línea central de la soldadura, dada su morfología irregular se tipifican como rechupes o microrechupes originados por la contracción del metal durante la solidificación.



Figura 4.10 Microestructura de la soldadura. (a) Mapeo de la soldadura en la sección transversal. (b) Acercamiento a las discontinuidades del tipo rechupes (shrinkage).

En la Figura 4.11 se muestra una micrografia de la zona del cabezal 3005, con su respectivo análisis EDS con. Se observa que el material esta compuesto básicamente de AI, Mn y Si. En la micrografia se observan partículas claras las cuales son

magnificadas en la Figura 4.12, en donde se aprecia que las partículas son ricas en Al, Fe y Mg según su espectro EDS, estas particulas se encuentran dispersas de forma homognea en toda la matriz del componente.

Un microanálisis químico cualitativo por energía dispersiva de Rayos X (EDS) fue realizado en ambas zonas; del metal base. Los espectros indican los elementos químicos característicos de un aluminio - manganeso (MEB). Ver la figura 4.11 a 4.13.

Element	Weight%	Atomic%			-	)				Spe	ectrum 2
			Spectrum 2								
O K	1.14	1.93									
Al K	96.09	96.49									
Si K	0.57	0.55									
Mn K	1.35	0.67			6						
Cu L	0.85	0.36			l 💇	<b>a</b>					
			1		<u> </u>	<u>,                                     </u>				,,,,,,	
Totals	100.00				0 1 Full Scale 19182 cts	2 3 Ourson: -0.24	4 52 (0 cte)	5	6	78	9 keV
			800µm Electron	Image 1	an oodio 10102 013	001001. 90.2	02 (0 013)				107

Figura 4.11. Espectro de análisis químico cualitativo realizado en el metal base de la unión cabezal aleación 3005 con un contenido de 1.35 máximo de Mn, característico de un aluminio silicio al manganeso, MEB.

Element	Weight%	Atomic%	Sp 🕼	ectrum 4
F K	1.42	2.30		
Al K	73.31	83.60		
Mn K	19.38	10.85		
Fe K	5.89	3.24	TSpectrum 4	
Totals	100.00			3 9
			Full Scale 15345 cts Cursor: -0.254 (0 cts)	keV

Figura 4.12. Espectro de análisis químico cualitativo realizado en las fases de intermetálicos Al-Fe-Mn (cuboides), MEB.



Figura 4.13. Espectro de análisis químico cualitativo realizado en el metal base de la unión tubo plano aleación 3003 con contenido de 0.89 máximo de manganeso, MEB.

Se realiza un mapeo por energía dispersiva de Rayos X (EDS), en el área de la soldadura en donde se puede observar la presencia del silicio en forma de agujas (blades) en el area de fusión (soldadura) dentro de la matriz de aluminio característico de una aleacion binaria Alumino – Silicio, serie 4XXX. Ver Figura 4.14.



Figura 4.14. Mapeo en el área de soldadura de la aleación 4343 7.5% Si, MEB.

# 4.4. Análisis de Microdureza

Para evaluar el efecto de temperatura con respecto a la dureza del metal base y la zona de fusión se obtuvo un perfil de microdureza en la sección transversal de la unión soldada. La Figura 4.15, muestra la localización de las identaciones a cada 0.06 mm de distancia entre ellas.



Figura 4.15. Resultados del ensayo de microdureza.

Se puede observar en la Tabla 4.5 y en la Figura 4.20 que los valores de microdureza en el metal base aleación 3005 correspondiente al cabezal del ensamble se encuentra por el orden de 44 a 67 Hv, en la zona de soldadura aleación 4343 7.5% Si, se encuentran valores desde 44 a 89 Hv y en I74a aleación 3003 del tubo plano se encuentran los valores desde 40 hasta 81 Hv.

Distancia			Localización					
[mm]	M1	M2	M3	M4	M5	M6	М7	Localization
0.60	46	58	44	58	59	60	61	Metal Base
1.20	47	54	48	64	65	66	67	Metal Base
1.80	53	57	55	61	62	63	64	Soldadura
2.40	68	60	65	64	65	66	67	Soldadura
3.00	80	54	44	63	64	65	66	Soldadura
3.60	69	56	49	75	76	77	78	Soldadura
4.20	67	53	52	86	87	88	89	Soldadura
4.80	60	69	64	78	79	80	81	Soldadura
5.40	49	47	52	42	43	44	45	Metal Base
6.00	56	49	40	44	45	46	47	Metal Base

 Tabla 4.5. Resultados del ensayo de microdureza y su localización.

ótese en la Figura 4.16 que el valor de mayor dureza se encuentra en la zona de fusión (soldadura) en la localización 4.2 (Distancia en mm) con un valor de 89 Hv y el de menor dureza en la zona del metal base tubo plano aleación 3003 en la localización 6 (Distancia en mm) con un valor de 40 Hv.



Figura 4.16. Perfil de resultados del ensayo de microdureza HV 0.25 de las siete muestras.

Ν
En la tabla 4.6 se muestra el promedio de dureza en las zonas de cada una de las muestras realizadas en donde podemos observar que las primeras tres muestras M1 a M3 en el <u>metal base del cabezal aleación 3005</u>, se muestran durezas por debajo de los 60 Hv y en las muestras M4 hasta M7 los valores están por encima de los 60 Hv teniendo un incremento considerable de aproximadamente 12 Hv.

En la <u>zona de soldadura</u> los valores están por debajo de 70 Hv en las primeras tres muestras M1 hasta M3 y en las muestras M4 hasta M7 por encima de los 70 Hv, teniendo un incremento considerable de aproximadamente 12 Hv.

En el material base del <u>tubo plano aleación 3003</u>, los valores de dureza son congruentes entre si en todas las muestras M1 a M7.

**Tabla 4.6.** Resultado promedio del ensayo de microdureza por zona de ensayo.

Zona de Ensayo	M1	M2	М3	M4	M5	M6	M7
Metal Base 3005	47	56	46	61	62	63	64
Soldadura 4347	66	58	55	71	72	73	74
Metal Base 3003	53	48	46	43	44	45	46

Nótese en la Figura 4.17 que el valor de menor dureza lo presenta la muestra Numero 4 y se encuentran en la localización 5.70 (Distancia en mm).



Figura 4.17. Perfil de resultados del ensayo de microdureza HV 0.25 del total de muestras.

En la tabla 4.7 y la figura 4.18 se muestra un promedio del total de las indentaciones de todas las zonas metal base -soldadura- metal base siendo la muestra M7 la que presenta mayor dureza 61 Hv y la muestra M3 la de menor dureza 49 Hv

Zona de Ensayo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	М7
MB-Soldadura-MB	55	54	49	58	59	60	61

Tabla 4.7. Resultado del valor promedio máximo de microdureza HV 0.25 por muestra.



Figura 4.18. Resultados del valor máximo obtenido mediante el ensayo de microdureza HV 0.25 del total de muestras.

### 4.5. Análisis de fases y porosidad en el área de soldadura

Las fases encontradas en las zonas de fusión de las uniones realizadas por el proceso brazing en horno en el área de soldadura Al 4343 7.5% Si, son principalmente trazas de ínter metálicos Al-Si-Mn en forma de agujas (blades) compuesta por Al - Si en una matriz Al –  $\alpha$  rica en aluminio.

El análisis de fase se realiza en 13 campos que representan la longitud total de la sección transversal de las uniones como se muestra la Figura 4.19.



Figura 4.19. Microestructura de la soldadura. (a) Mapeo de la sección transversal de la soldadura, 50X. (b) Soldadura compuesta por una matriz dendrítica (c) porosidad.

#### 4.5.1 Porcentaje de Al-Si, Al Matriz y en el área de soldadura

El porcentaje de las fases presentes Al-α rica en Si, matriz y porosidad, se obtuvieron mediante el software analizador de imágenes, Image-Pro Plus como se representa en la tabla 4.8.

%	<b>M</b> 1	M2	М3	M4	M5	M6	M7
Al-Si	34.271309	57.845413	53.890572	23.780581	38.682491	56.087757	28.712168
Al-Matriz	65.728683	42.154572	46.109425	76.219398	61.317505	43.912243	71.287819
Porosidad	5.2615428	6.4833279	9.1640625	5.997663	3.8817606	4.8579369	10.72933

Tabla 4.8. Resultados del análisis de fases y porosidad en porcentaje.

La figura 4.20 se muestra de forma grafica la variación de la proporción de fases presentes en la muestras (matriz y eutéctico) y el porcentaje de porosidad de cada una de las 7 muestras.



Figura 4.20. Microestructura de la zona de fusión. a) M1 Al Si 34% b) M2 Al Si 58% c) M3 Al Si 54% d) M4 Al Si24% e) M5 Al Si 39% f) M6 Al Si 56% g) M7 Al Si 29% h) M7 Al Si 29%

En la figura 4.21 podemos observar el porcentaje de fases de manera cuantitativa representada en color rojo la fase Al-α rica en Si, en color azul la fase (matriz y eutéctico), por ultimo en color amarillo el porcentaje de porosidad de cada una de las 7 muestras.



Analisis de fases en soldaduras de aluminio por brazing

Figura 4.21. Perfil de resultados de fases y porosidad en % presente en las siete muestras.

De acuerdo al diseño de experimentos (Ver Tabla 3.5) y los resultados obtenidos representados en las Figuras 4.20 y 4.21 podemos observar que se mejora la dureza al reducir el Si y otros elementos.

Alternativamente, menores beneficios son derivados al alcanzar una distribución más uniforme de las partículas de segunda fase presentes.

El Si puede influenciar la nucleación de fases nuevas o cambiar la cinética de precipitación. Mayor reducción en la cantidad de partículas de segunda fase puede ser alcanzada al controlar los elementos aleantes para evitar exceder el límite de solubilidad.

#### 4.5.2 Porosidad

Como podemos observar en el histograma de la figura 4.22 la porosidad se encuentra presente en porcentajes que van desde el 5% hasta el 10% en el total de las muestras analizadas; presentándose el máximo valor en la muestra No. 7 con un porcentaje 10%. Por lo que se realiza un microanálisis químico cualitativo por energía dispersiva de Rayos X (EDS) en las discontinuidades tipificadas como rechupes y porosidades presentes en la zona del metal de soldadura. Ver la figura 4.19 y 4.22.



Figura 4.22. Espectro de análisis químico cualitativo realizado en el la zona de soldadura cladding, 4343 7.5% Si en donde se observa la presencia de 38% de fluor, MEB.

Los espectros indican los elementos químicos característicos de un fundente base flour tipico para procesos de brazing en horno ver tabla No. 2.7. Fundentes de soldadura. Lo cual sugiere que la discontinuidad se encuentra asociada con una contaminación del metal líquido de soldadura con fundente atrapado.

#### 4.6. Resultados del diseño de experimentos

Para sustentar estadísticamente los resultados obtenidos de las pruebas de microdureza, microestructura (fases presentes) y porosidad, se llevó a cabo un diseño factorial de la serie 2^K con tres puntos centrales, como se representa en la tabla 4.9. En estos resultados se pudo observar que las fases presentes de Al-Si y Al matriz además de la porosidad no son dependientes de las variables velocidad y temperatura en las aleaciones de aluminio unidos por el proceso brazing en horno con aporte AW 4343 7.5% Si.

	Er	ntradas		Salidas				
Muestra			Mic	roestructura		%		
No.	Ts	V	% de Al - Si	% de Matriz de Al	Dureza Hv	Porosidad		
M1	600	920	34.27	65.73	55	5.26		
M2	610	920	57.85	42.15	54	6.48		
M3	600	940	53.89	46.11	49	9.16		
M4	610	940	23.78	76.22	58	5.99		
M5	605	930	38.68	61.32	59	3.88		
M6	605	930	56.09	43.91	60	4.85		
M7	605	930	28.71	71.29	61	10.72		

Tabla 4.9. Diseño de experimentos 2 ² con tre	es factores centrales
----------------------------------------------------------	-----------------------

Como se mencionó, en el apartado 4.5, la región del metal de aporte en la zona de fusión tiene valores de dureza más altos, como resultado de una microestructura de Al-Si fuera de equilibrio inducida por el desarrollo de una rápida velocidad de enfriamiento.

Dadas las condiciones anteriores, se puede decir, que el efecto de las variables velocidad de desplazamiento de la banda transportadora y la temperatura de fusión en el horno están intrínsicamente relacionadas y tienen un efecto importante sobre la dureza de la zona de fusión. Con lo cual, considerando los resultados de las mediciones de microdureza se evidenció un incremento de dureza en la zona de fusión, esto queda sustentado con los resultados del análisis del diseño experimental [15].

El análisis de varianza correspondiente al diseño experimental (Tabla 4.10) muestra que los efectos principales (temperatura y velocidad) no son estadísticamente significativos (valor p=0.05), sin embargo, la interacción entre los factores si lo es, lo que representa que realmente al utilizar una temperatura de proceso de soldadura en combinación con cierta velocidad se tiene un efecto importante en la dureza en la zona de fusión. Note que las interacciones entre factores son estadísticamente significativas con un valor de probabilidad p=0.038.

En la interacción temperatura y velocidad, la temperatura tiene mayor relevancia que la velocidad como se muestra en la figura 4.23.



Figura 4.23. Efecto principal en dureza en la zona de fusión.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados secuencial	Suma de cuadrados ajustada	Suma de cuadrados medios	Estadístico (F)	Valor Probabilidad (P)
Efecto principal	2	17.000	17.0000	8.500	8.50	0.105
Interacción de variables	1	25.000	25.000	25.000	25.00	0.038
Curvatura	1	61.714	61.7143	61.714	61.71	0.016
Error Residual	2	2.000	2.0000	1.000		
Error Puro	2	2.000	2.0000	1.000		
Total	6	105.714				

Tabla 4.10. Análisis de varianza para dureza Hv.

El estadístico R-cuadrada indica la variación explicada por el modelo, el cual debe ser mayor al 80% para que el modelo sea aceptable. Esto debido a que se obtuvo un R-Sq = 98.11% de variación explicada, el modelo tiene un buen ajuste.

El error residual (2.000) es pequeño con respecto a la suma de cuadrados total en el análisis (105.714) de varianza, lo cual también se ver reflejado en el Sq = 98.11%. Esto es conforme el error residual crece, el estadístico  $R_2$  disminuye.

Además, el estadístico R-Sq(adj) = 94.32% ( $R_2$  ajustada) también es mayor que 80%, lo que también indica buen ajuste. Se observa que la diferencia entre  $R_2$  y  $R_2$  adj no es mayor al 5%, lo que indica que las variables independientes que se están considerando (s,v) en el modelo son la adecuadas para explicar el comportamiento de la dureza en el material.

La interacción ocurre cuando el efecto de un factor depende del nivel de un segundo factor lo cual se presenta en la relación temperatura-velocidad.

La figura 4.24 revela que al utilizar el factor central, presentará siempre mayor valor de dureza.



Figura 4.24. Interacción entre (v) velocidad y (s) temperatura en el proceso brazing en horno.

Como se observa en la Figura 4.24 la temperatura tiene un efecto mayor en la dureza de la zona de fusión, lo cual se corrobora con la prueba de significancia de factores en la Tabla 4.11.

Termino	Efecto	Coeficiente	SE Coeficiente	т	Р
Constante		54.0000	0.5000	108.00	0.000
Ts	4.000	2.0000	0.5000	4.00	0.057
ν	-1.0000	-0.50000	0.5000	-1.00	0.423
Ts* v	5.0000	2.50000	0.5000	5.00	0.038

**Tabla 4.11** Prueba de significancia de factores.

Los resultados obtenidos previamente sugieren que los valores de velocidad y temperatura analizados de manera individual no tienen un valor significativo (valor p=0.05) sin embargo la interacción Ts*v muestra un efecto estadísticamente significativo (valor-p=0.038).

Por otro lado, la gráfica de cubo mostrada en la Figura 4.25 indica que la combinación de velocidad y temperatura genera una mayor dureza en la zona de fusión. Además, se puede observar que usando los puntos centrales de velocidad y temperatura, se obtiene una mayor dureza.



Figura 4.25. Gráfica de cubo para factor dureza.

El software estadístico (Minitab) contiene entre sus herramientas un optimizador con un método de gradiente (derivada) que en conformidad a lo

s parámetros de inicio proporciona la combinación de los niveles sugeridos de las variables independientes (Ts,V) que maximicen la respuesta de la variable dependiente (Dureza).

Para este caso, lo que se pretende encontrar la combinación optima de variables (Ts, V) que manipule la dureza de la soldadura, de tal manera que para obtener el mayor valor de dureza el optimizador sugiere utilizar V=930 y S=605, dando como resultado una dureza de 60 Hv 0.25. Correspondiendo con la figura 4.25, donde se observa que mayor valor de dureza se obtiene con la combinación mencionada.

## 4.7. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

#### Conclusiones.

En base a los resultados de microanalisis, fases presentes, propiedades mecanicas (microdureza) y diseño experimental, de las uniones realizadas mediante brazing en hornos de atmosfera controlada en aleaciones aluminio al manganeso series 3XXX con aportes de aleaciones aluminio al silicio serie 4XXX, se puede concluir lo siguiente:

- 1. El análisis de fases muestra que el incremento de la velocidad de desplazamiento no favorece la formación de la fase βAI-Si.
- El modo de solidificación asociado al proceso de soldadura furnace brazing favorece la formación de fases Al-α rica en Si en la zona de fusión, esto debido a las condiciones de enfriamiento fuera del equilibrio presentes.
- La microdureza en la matriz incrementa cuando el porcentaje de Si en solución es mayor.
- 4. El aumento en la temperatura del horno de brazing en la etapa de fusión promueve la precipitación del Si.
- 5. Los resultados del diseño experimental sugieren que la optimización del proceso es alcanzado al utilizar una temperatura y una velocidad intermedia.
- Los resultados del diseño de experimentos muestran que la formación de rechupes (shrinkages) y porosidades (voids) no tienen relación alguna con las variables de temperatura y velocidad desplazamiento de los componentes.
- Los análisis realizados en el MEB en la zona donde se encontraron los poros y microporosidades sugieren que estas se encuentran asociadas a la contaminación en el sistema por excesivo fundente.
- La presencia de oxido en las porosidades proviene del material base, ya que al no fluir el fundente rico en impurezas como oxido queda ocluido formando porosidad en el material.

### **Recomendaciones Y Trabajo Futuro**

Es recomendable realizar un estudio de los fundentes y atmósferas de protección así como los gases implícitos en el proceso furnace brazing para determinar el efecto en la formación de discontinuidades del tipo de rechupes (shrinkages) y porosidades (voids) causantes de las fugas en los sistemas de enfriamiento esto debido a que los resultados del diseño de experimentos nos indica que los valores de salida como son: % de fases, % de porosidad y valores de dureza no tienen significancia entre ellos con este tipo de discontinuidad.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Tierce S, Pébere N, Blanc C, Mankowski G, Robidou H, Vamousse D, and Lacaze J. 2005. Solidification and phase transformations in brazed aluminum alloys transformations in brazed aluminum alloys used in automotive heat exchangers. International Journal of cast Metals Research 2005 Vol. 18 No.6.

2. Lacaze J, Tierce S, Lafont M-C, Thebault Y, Pébere N, Mankowski G, Blanc C, Robidou H, Vamousse D, Daloz D. 2005. "Study of the microstructure resulting from brazed aluminium materials used in heat exchanger". Materials Science and Engineering A 413-414 (2005) 317-321.

3. Gruzleski John E, Closset Bernard M. The treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys. ISBN 0-87433-121-8 COPYRIGHT © 1990. American Foundrymen's Society, Inc. Des Plaines, Illinois 60016-8399 U.S.A. p. 149 – 157.

4. Chuang T.H, Yeh M.S, Tsao L.C, Tsai T.C. and WU C.S. Development of a Low-Melting-Point filler Metal for Brazing Aluminium Alloys. Metallurgical and Materials Transactions A. Volume 31A, September 2000-2239.

5. Aluminum Standards and Data; Edition 2009. The Aluminum Association, Inc. 900 19th Street, N.W. Washington, D.C.20006. p. 7 – 11.

6. Kay & Associates, 4 Lawton Drive Simsbury, CT 06070 USA .Seminar Leader: Daniel Kay. Modern Brazing Technology.

7. 'Metals Handbook, Welding, Brazing, and Soldering', 8th edn, 6, 675-684; 1971 ASM International, Metals Park, USA.

8. Jefferson Welding Encyclopedia Eighteenth Edition, 1997. International Standard Book Number: 0-87 171-506-6, American Welding Society, Miami, FL 33126, USA.

9. Aluminum brazing handbook Fifth Edition 2007. International Standard Book Number, 978-0-87171-046-8, American Welding Society, Miami, FL 33126, USA.

10. AWS C3.7M/C3.7:2005. An American National Standard. 'Specification for Aluminum Brazing' International Standard Book Number: 0-87171-022-6 American Welding Society, Miami, FL 33126, USA.

11. AWS A5.8/A5.8M:2004; An American National Standard 'Specification for Filler Metal for Brazing and Braze Welding' International Standard Book Number, 0-8771-772-0 American Welding Society, Miami, FL 33126, USA.

12. AWS A5.31-92R; An American National Standard, 'Specification for Fluxes for Brazing and Braze Welding' International Standard Book Number 0-87171-384-5, American Welding Society, Miami, FL 33126, USA.

13. Brazing Book Handy & Harman of Canada, Ltd. 290 Carlingview Drive Rexdale, Ontario M9W 5G1.

14. AWS B2.2/B2.2 M:2010 An American National Standard. 'Specification for Brazing Procedure and Performance Qualification'. July 7, 2009. International Standard Book Number: 978-0-871771-762-7, American Welding Society, Miami, FL 33126, USA.

15. AWS C3.6M/C3.6:2008. An American National Standard. 'Specification for Furnace Brazing' International Standard Book Number: 978-0-87171-080-2, American Welding Society, Miami, FL 33126, USA.

16.Totten George E, Scott MacKenzie D, Handbook of aluminum. Volumen 1. Physical Metallurgy and Processes. ISBN: 0-8247-0494-0, G. E. Totten & Associates, Inc. Seattle, Washington, Houghton International Incorporated Valley Forge, Pennsylvania, U.S.A.

17. Backerud L, Chai G, and Tamminen J. 'Solidification Characteristic of Aluminum Alloys'; AFS/Skan Aluminum, Oslo, 1990, Vol 2. Ed. Skan Aluminum Alloys. ISBN 0-87-433-119-6,

18. Valer Juana, Meneses Péricles, Saint-antonin Francois, Suerey Michel. "Microestructural and Mechanical Characterisation of an AI – 21.8 wt. % Ge brazing alloy with a globular morphology of the primary AI – Rich phase". Materials Science and Engineering A272 (1999) 342 – 350.

19. Suzuki K, Kagayama M, and Takeuchi Y: "Eutectic Phase Equilibrium of Al-Si-Zn System and Its Applicability for Lower Temperature Brazing". J. Jpn Inst. Light Met., 1993, 43, pp. 533-38.

20. Andersson Rolf, Holm Torsten, Wiberg Sören, Åstrom Anders, Brazing of Metals Furnace Atmospheres No. 4. for Tube Annealing, Linde Gas Special Edition, 2004.

21. ASTM E407-99 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. Current edition approved October 10, 1999. Published November 1999. American Standards Testing in Materials, International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

22. Montgomery Douglas. C. Diseños y análisis de experimentos. México. Editorial Limusa Willey segunda edición. 2006.

23. Brandes Smithells E. A, Brook G. B, 'Smithells Light Metals Handbook', 1998. ISBN 0 7506 3625 4; Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 225 Wildwood Avenue, Woburn, MA 01801-2041 A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd

24. Standard B 209M – 06, Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate [Metric]. Current edition approved July 1, 2006. Published July 2006. Originally approved in 1978. Last previous edition approved in 2004 as B 209M – 04.American Standards Testing in Materials, International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

25. Shi Q. R., F. Cheadle Liang and B, "Electrochemical Investigations of Four-Layer Core/Cladding Aluminum Brazing Alloy for Automotive Applications". Long Manufacturing Division, Dana Corporation 656 Kerr Street, Oakville, Ontario L6K 3E4 Canada.

26. Gao F, Sekulic D. P, Qian Y. Y. and Morris J. G. "Formation of microlayers of clad residue on aluminium brazing sheet during melting and resolidification in brazing process". Materials Science and Technology May 2004 Vol. 20 577.

27. Hidalgo-Prada B. "Microscopy of Phase Transformations in Commercial Aluminum Alloys", Laboratorio de Caracterización de Materiales, Depto. de Ciencia de los Materiales. Instituto de Investigaciones en Biomedicina y Ciencias Aplicadas. Universidad de Oriente, Cumana, Sucre –Venezuela/ bhidalgo@sucre.udo.edu.ve. Acta Microscópica Vol. 16 No1-2,(Supp.2)2007.

28. Humpston G., Sangha S.P.S, and Jacobson D.M: "New Filler Metals and Process for Fluxless Brazing of Aluminium Engineering Alloys," Mater. Sci. Technol., 1995, 11, pp. 1161-67.

29. Tsao L.C, Weng W.P, Cheng M.D, Tsao C.W, and Chuang T.H, "Brazeability of a 3003 Aluminum Alloy With Al-Si-Cu-Based Filler Metals". Journal of Materials Engineering and Performance 360—Volume 11(4) August 2002.

30. Sekulic Dusan P, Galenko P.K, Krivilyov M.D, Walker L, Gao F, "Dendritic growth in Al–Si alloys during brazing. Part 1: Experimental evidence and kinetics" International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005) 2372–2384.

31. Nayeb-Hashemi H, Lockwood M. "The effect of processing variables on the microstructures and properties of aluminum brazed joints". Department of Mechanical, Industrial and Manufacturing Engneering, Northeastern University, Boston, MA 02115, USA. Journal of Materials Science 37 (2002) 3705 – 3713. 2002 Kluwer Academic Publishers.

32. Sekulic Dusan P. "Molten aluminum equilibrium membrane formed during controlled atmosphere brazing", International Journal of Engineering Science 39 (2001) 229-241.

33. Dehmas M, Valdés R, Lafont M.-C, Lacaze J, Viguier B. "Identification of intermetallic precipitates formed during re-solidification of brazed aluminium alloys". CIRIMAT, ENSIACET-INP, UMR CNRS 5085, 31077 Toulouse cedex 4, France.

34. See D, Atwood R.C, Lee P.D. "A comparasion of three modeling approaches for the prediction of microporosity in aluminum-silicon alloys". Department of Materials, Imperial College, London SW7 2BP, Journal of Materials Science 36 (2001) 3423 – 3435.

35. Carlberg T, Jaradeh M, and Kamgou Kamga H. "Solidification Studies of Automotive Heat Exchanger Materials". JOM. November 2006. www.tms.org.

# LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1	Pintura de mural de una tumba en Tebas, Egipto, realizado en aproximadamente	17
	1475 a.C. Muestra un esclavo dedicado a la soldadura de oro.	
Figura 2.2	Efecto del espesor de la unión en el esfuerzo de tensión	33
Figura 2.3	Dispositivos (fixtures) para ensambles de soldadura brazing	35
Figura 2.4	Aplicación de calor en soldadura brazing	37
Figura 2.5	Diagrama de equilibrio del sistema binario plata-cobre	43
Figura 2.6	Efecto del Mojado en un tubo Capilar	44
Figura 2.7	Curva de enfriamiento obtenida de la aleación 380 utilizada por Bäckerud con	55
	una velocidad de enfriamiento de 0.6 °C/s	
Figure 3.1	(A) Cabezal; Microestructura de la aleación AW-3005 (B) Tubo plano.	59
Figura 5.1	Microestructura de la aleación AW-3003	
Figura 3.2	Intercambiador de calor a) Cabezal b) Tubo plano c) Falta de fusión d) Erosión	61
Figura 3.3	Horno de cabina de atmosfera controlada SECO/WARWICK	61
Figura 4.1	Microestructura del cabezal.	66
Figura 4.2	Espesor del recubrimiento de soldadura brazing (cladding) AW 4343.	67
Figura 4.3	Mapeo del recubrimiento (cladding) en el material base del cabezal.	68
Figura 4.4	Microestructura del tubo plano 200X y 500X, respectivamente	69
Figura 4.5	Espesor del recubrimiento de soldadura brazing (cladding) AW 4343.	70
Figura 4.6	Mapeo del recubrimiento (cladding) en el material base del tubo plano.	71
	Diseño de unión (a) Cabezal, (b) Tubo Plano, (c) Espaciamiento, (d) pared a $90^\circ$	71
Figura 4.7	del cabezal. (e) soldadura	
Figura 4.8	Mapeo de soldadura. 50X	72
Figura 4.9	Microestructuras de la soldadura brazing a) 200X y b) 500X, respectivamente	72
	Microestructura de la soldadura. (a) Mapeo de la soldadura en la sección	73
Figura 4.10	transversal 50X. (b) Acercamiento a las discontinuidades del tipo rechupes	
	(shrinkage) 200X	
	Microestructura de la soldadura. (a) Mapeo de la sección transversal de la	74
Figura 4.11	soldadura, 50X. (b) Soldadura compuesta por una matriz dendrítica (c) Trazas	
	de ínter metálicos Al-Mg-Si en forma de agujas (blades)	
	Espectro de análisis químico cualitativo realizado en el metal base de la unión	74
Figura 4.12	cabezal aleación 3005 con un contenido de 1.35 máximo de Mn, característico de	
	un aluminio silicio al manganeso. SEM	
Figura 4.13	Espectro de análisis químico cualitativo realizado en el metal base de la unión	74
- <u>j</u>	tubo plano aleación 3003 con contenido de 0.89 máximo de manganeso. SEM	

Figura 4.14	Mapeo en el área de soldadura de la aleación 4343 7.5% Si. SEM	75
Figura 4.15	Resultados del ensayo de microdureza.	75
Figura 4.16	Mapeo en el área de soldadura de la aleación 4343 7.5% Si. SEM	76
	Microestructura de la soldadura. (a) Mapeo de la sección transversal de la	77
Figura 4.17	soldadura, 50X. (b) Soldadura compuesta por una matriz dendrítica (c)	
	porosidad	
Figura 4.18	Perfil de resultados de fases y porosidad en % presente en las siete muestras	78
	Microestructura de la soldadura. (a) Mapeo de la sección transversal de la	79
Figura 4.19	soldadura, 50X. (b) Soldadura compuesta por una matriz dendrítica (c)	
	porosidad	
	Microestructura de la zona de fusión. a) M1 Al Si 34% b) M2 Al Si 58% c) M3 Al	80
Figura 4.20	Si 54% d) M4 Al Si24% e) M5 Al Si 39% f) M6 Al Si 56% g) M7 Al Si 29% h) M7	
	AI Si 29%	
Figura 4.21	Perfil de resultados de fases y porosidad en % presente en las siete muestras	80
	Espectro de análisis químico cualitativo realizado en el la zona de soldadura	81
Figura 4.22	cladding, 43434 7.5% Si en donde se observa la presencia de 38% de flour.	
	SEM.	
Figura 4.23	Efecto principal en dureza en la zona de fusión	83
Figura 4.24	Interacción entre (v) velocidad y (s) temperatura en el proceso brazing en horno	85
Figura 4.25	Gráfica de cubo para factor dureza	86

# LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1	Combinaciones de metal base-metal de aporte	26
Tabla 2.2	Clasificación AWS de metales de aporte	27
Tabla 2.3	Temperaturas de fusión de acuerdo a la clasificación AWS	27
Tabla 2.4	Composición química de metales de aporte para aluminio y magnesio AWS	27
Tabla 2.5	Componentes de productos con revestimiento	29
Tabla 2.6	Composición química Límites de aleaciones de aluminio forjado	30
Tabla 2.7	Fundentes de soldadura	31
Tabla 2.8	Grupos de metales base AI y aleaciones de aluminio	39
Tabla 2.9	Secuencia de precipitación de fases en aleaciones Hipo – eutecticas de aluminio silicio	57
Tabla 3.1	Composición química del cabezal de Al	59
Tabla 3.2	Composición química del tubo plano de Al	59
Tabla 3.3	Composición Química material de aporte AW-4343 7.5% Si	60
Tabla 3.4	Parámetros de control de proceso	63
Tabla 3.5	Diseño de experimentos 2 ² con tres factores centrales	64
Tabla 3.6	Equipos y materiales utilizados en soldadura brazing en horno	65
Tabla 3.7	Equipos utilizados en la caracterización	65
Tabla 4.1	Composición química del cabezal de aluminio	66
Tabla 4.2	Mediciones del recubrimiento soldadura brazing en el cladding del cabezal	67
Tabla 4.3	Composición química del tubo plano de aluminio	69
Tabla 4.4	Mediciones del recubrimiento soldadura brazing en el cladding del tubo plano	70
Tabla 4.5	Resultados del análisis de fases y porosidad en porcentaje	76
Tabla 4.6	Resultado promedio del ensayo de microdureza por zona de ensayo	77
Tabla 4.7	Resultado del valor promedio máximo de microdureza HV 0,25 por muestra	78
Tabla 4.8	Resultados del análisis de fases y porosidad en porcentaje	79
Tabla 4.9	Diseño de experimentos 2 ² con tres factores centrales	82
Tabla 4.10	Análisis de varianza para dureza Hv	84
Tabla 4.11	Prueba de significancia de factores	85