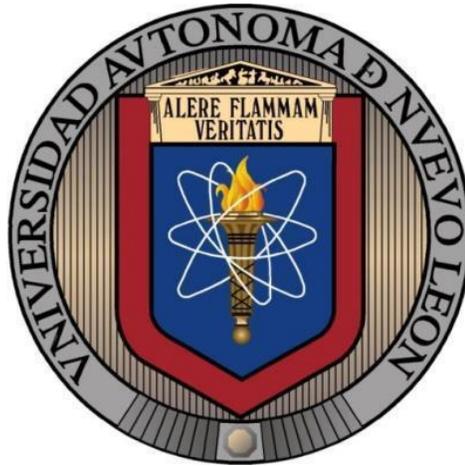


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



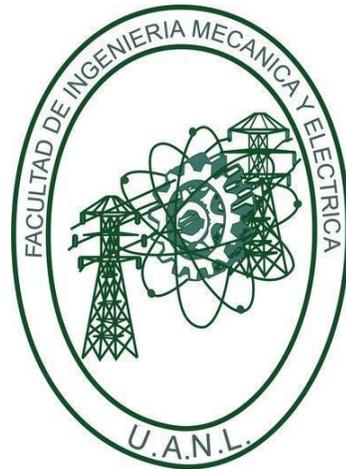
ESTUDIO Y ANÁLISIS DE UNIONES SOLDADAS MEDIANTE EL  
MÉTODO BRAZING DE ALEACIONES Ti-6Al-4V Y SiC UTILIZANDO  
COMO MATERIAL DE APORTE ALEACIONES BASE Ag-Cu-Ti.

POR  
ING. Alejandro José García Fernández.

EN OPCIÓN AL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES.

JULIO 2018

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE UNIONES SOLDADAS MEDIANTE EL  
MÉTODO BRAZING DE ALEACIONES Ti-6Al-4V Y SiC  
UTILIZANDO COMO MATERIAL DE APORTE ALEACIONES  
BASE Ag-Cu-Ti.**

**POR**  
**ING. Alejandro José García Fernández.**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE:**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD  
EN MATERIALES.**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.

JULIO 2018

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **“Estudio y análisis de uniones soldadas mediante el método brazing de aleaciones Ti-6Al-4V y SiC utilizando como material de aporte aleaciones base Ag-Cu-Ti”** realizada por el alumno Ing. Alejandro José García Fernández, matrícula 1836859, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

**El Comité de Tesis**

---

Dr. Edgar Omar García Sánchez.  
Asesor

---

Dr. Marco A. Loudovic Hernández Rdgz.  
Revisor

---

Dr. Lizangela Guerra Fuentes.  
Revisor

---

Dr. Simón Martínez Martínez.  
Subdirector  
División de Estudios de Posgrado.

# Agradecimientos

Muchas gracias a mi familia por ser siempre mi apoyo y sostén, a mis compañeros con los que compartí día a día y en especial la Universidad Autónoma de Nuevo León, especialmente a las facultades de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, por realizar éste tipo de maestrías que vinculan fuertemente al alumno con la industria y que crean mejores profesionistas para el futuro. Gracias a todos los catedráticos que compartieron sus conocimientos y su tiempo conmigo, que me hicieron madurar como estudiante. Al gobierno mexicano y a su pueblo con acogerme como un hijo más y al CONACyT por ser el motor impulsor de estos programas que benefician a tantos y yo me siento afortunado de ser uno de ellos.

Alejandro J. García Fdez.

## Resumen

La soldadura es la forma más común de unir permanentemente piezas metálicas. Debido a su fortaleza, la soldadura se utiliza en la construcción naval, fabricación y reparación de automóviles, aplicaciones aeroespaciales y miles de otras actividades de fabricación. La presente investigación se basó en el estudio de soldaduras brazing específicamente entre la aleación Ti-6Al-4V y el compuesto cerámico SiC, utilizando como material de aporte distintas combinaciones de las aleaciones a base de Ag-Cu-Ti en las que también se agregó Cr y Ni.

La finalidad del mismo es lograr que estas uniones sean lo más fuerte posible y evaluar la influencia del Cr y Ni como material de aporte en la resistencia a la corrosión de la unión, así como los parámetros óptimos para una correcta unión, dígame temperatura, tiempo de permanencia, velocidad de calentamiento y enfriamiento, y la influencia del medio donde se desarrolla la soldadura brazing.

Se caracterizaron los materiales base y las diferentes combinaciones de aleaciones de aporte, se realizaron ensayos de dureza, microscopía óptica, análisis de resistencia a la corrosión y otros métodos que sirvieran de punto de partida. Se realizaron ensayos y análisis a las uniones obtenidas con el fin de evaluar la calidad de la misma y la influencia de las diferentes combinaciones en la aleación de aporte en la unión.

De esta manera se pudo concluir que elementos como el Cr y el Ni mejoran la soldabilidad, siendo este último el de mayor impacto en las mejoras de los parámetros de la unión y el primero el de mayor impacto en la resistencia a la corrosión de la aleación de aporte. También se concluyó que temperaturas mayores a los 750°C para el brazing en atmosfera inerte pueden ser perjudiciales para la unión.

# Índice

|   |    |
|---|----|
| Resumen .....   | 4  |
| Índice .....  | 5  |
| Capítulo I. Introducción .....  | 7  |
| 1.1 Hipótesis.....  | 7  |
| 1.2 Objetivo General .....  | 7  |
| 1.3 Objetivos Específicos.....  | 8  |
| Capítulo II. Antecedentes. ....   | 9  |
| 2.1 Generalidades sobre las uniones por soldadura. ....   | 9  |
| 2.2 Ventajas y desventajas de las uniones soldadas.....   | 10 |
| 2.3 Procesos de soldadura.....  | 11 |
| 2.3.1 Soldadura por arco eléctrico.....   | 13 |
| 2.3.1.1 Soldadura manual con electrodo revestido. ....  | 15 |
| 2.3.1.2 Soldadura de arco metálico con gas (GMAW).....  | 15 |
| 2.3.1.3 Soldadura de arco de gas de tungsteno (GTAW).....   | 16 |
| 2.3.1.4 Soldadura de arco sumergido (SAW). ....   | 17 |
| 2.3.1.5 Soldadura fuerte (latón).....   | 17 |
| 2.3.1.6 Soldadura con gas oxcombustible. ....   | 17 |
| 2.3.1.7 Soldadura por resistencia. ....   | 18 |
| 2.3.1.8 Soldadura blanda. ....  | 18 |
| 2.3.1.9 Soldadura de estado sólido. ....  | 18 |
| 2.3.1.10 Soldadura por fusión. ....   | 19 |
| 2.3.1.11 Soldadura por presión.....   | 19 |
| 2.3.1.12 Soldadura TIG. ....  | 19 |
| 2.3.1.13 Soldadura por rayo láser.....  | 19 |
| 2.3.1.14 Soldadura ultrasónica.....   | 19 |
| 2.3.1.15 Soldadura GMAW.....  | 20 |
| 2.4 Soldaduras brazing, caracterización y principios, aleaciones de aporte. ....  | 20 |
| 2.4.1 Proceso de soldadura brazing.....   | 21 |
| 2.4.2 Soldadura Brazing en horno. ....  | 21 |
| 2.4.3 Hornos de atmósferas controladas.....   | 22 |
| 2.4.4 Principio del proceso de soldadura brazing. ....  | 23 |
| 2.4.5 Aleaciones de aporte base Ag-Cu.....  | 24 |
| 2.4.6 Fusión de las aleaciones de aporte. ....  | 25 |
| 2.4.7 Mojado y adhesión.....  | 25 |
| 2.4.8 Propiedades de los metales de aporte. ....  | 26 |
| 2.4.9 Uniones por el método brazing de aleaciones Ti-6Al-4V y SiC, utilizando como material de aporte<br>aleaciones base Ag-Cu-Ti. .... | 30 |
| 2.4.10 Ventajas del proceso y limitaciones del proceso de soldadura brazing. ....   | 33 |
| Capítulo III. Metodología experimental. ....  | 34 |
| 3.1 Elaboración y preparación de las muestras para soldadura brazing. ....  | 34 |
| 3.1.1 Correcto ensamble y separación adecuada. ....   | 35 |
| 3.1.2 Limpieza de los materiales bases a unir. ....   | 36 |
| 3.1.3 Correcto ensamble para el brazing.....  | 37 |
| 3.1.4 Control de los parámetros de soldadura.....   | 37 |
| 3.1.5 Limpieza final de la unión soldada. ....  | 38 |
| 3.1.6 Formato (BPS) .....   | 38 |
| 3.2 Análisis y preparación para el brazing de la aleación Ti-6Al-4V.....  | 40 |
| 3.3 Análisis y preparación para el brazing del compuesto SiC.....   | 42 |
| 3.4 Elaboración, análisis y preparación para el brazing de las aleaciones de aporte base Ag-Cu-Ti .....                                 | 42 |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 3.5   | Caracterización de las aleaciones de aporte.....  | 46 |
| 3.6   | Proceso de análisis mecánico de las aleaciones de aporte y preparación antes del brazing..... | 46 |
| 3.7   | Proceso de soldadura brazing.....   | 48 |
| 3.8   | Análisis microscópicos realizados a las uniones después del brazing.....                      | 51 |
| 3.9   | Ensayos de tensión a las uniones soldadas.....  | 52 |
| 3.10  | Pruebas de resistencia a la corrosión de las aleaciones de aporte.....                        | 53 |
| Capitulo IV. Discusión y resultados.....      |   | 55 |
| 5.1   | Análisis de composición química aleación Ti-6Al-4V.....                                       | 55 |
| 5.2   | Microscopia óptica aleación Ti-6Al-4V.....  | 55 |
| 5.3   | Caracterización de las aleaciones de aporte.....  | 58 |
| 5.4   | Pruebas de corrosión a las aleaciones de aporte.....  | 59 |
| 5.5   | Resultados de microscopia óptica a SiC.....   | 61 |
| 5.6   | Composición química del SiC.....  | 62 |
| 5.7   | Análisis Microestructural después del brazing.....  | 63 |
| 5.7.1   | Unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti.....  | 63 |
| 5.7.2   | Unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr.....   | 64 |
| 5.7.3   | Unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni.....   | 65 |
| 5.7.4   | Unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.....  | 66 |
| 5.7.5   | Mapeo de la unión de Ti-6Al-4V y SiC con las diferentes aleaciones de aporte.....             | 67 |
| 5.7.6   | Microanálisis de la unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti.....                                | 68 |
| 5.7.7   | Microanálisis de la unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr.....                             | 70 |
| 5.7.8   | Microanálisis de la unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni.....                             | 72 |
| 5.7.9   | Microanálisis de la unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.....                          | 74 |
| 5.8   | Ensayos mecánicos de tensión después del brazing.....   | 76 |
| 5.8.1   | Análisis ensayos de tensión, aleación Ag-Cu-Ti.....   | 77 |
| 5.8.2   | Análisis ensayos de tensión, aleación Ag-Cu-Ti-Ni.....  | 79 |
| 5.8.3   | Análisis ensayos de tensión, aleación Ag-Cu-Ti-Cr.....  | 80 |
| 5.8.4   | Análisis ensayos de tensión, aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.....                                     | 81 |
| Capitulo V. Conclusión y recomendaciones..... |   | 86 |
| 5.1   | Conclusiones.....   | 86 |
| 5.2   | Recomendaciones.....  | 87 |
| <i>Bibliografía</i> .....                     |   | 88 |
| <i>Índice de anexos</i> .....                 |   | 92 |

## **Capítulo I. Introducción.**

La soldadura brazing o soldadura fuerte tiene la cualidad de que el material de aporte puede unir diferentes materiales, con diferentes composiciones químicas y tamaños. Un claro ejemplo de ellos es la unión de aleaciones y cerámicos. Este tipo de soldadura se basa en la unión de sus materiales bases con la aleación de aporte por atracción atómica y mediante difusión, todo ello provocado por la temperatura. Existen disímiles medios donde se pueden desarrollar este tipo de uniones, desde al aire libre a atmosfera inerte o al vacío, cabe destacar que mientras más controlado sea el medio donde se desarrolla la misma mayor calidad tendrá la unión evitando, oxidación e impurezas no deseadas.

Este tipo de unión es de suma importancia para la industria aeronáutica como automotriz, donde es un punto crítico, ya que el coeficiente de seguridad de estas uniones, las cuales muchas veces están expuestas a altas temperaturas, elevados esfuerzos y ambientes corrosivos. Unos de los materiales más utilizados para estas aplicaciones son la aleación Ti-6Al-4V y el compuesto cerámico SiC, los cuales son unidos por aleaciones a base de Ag-Cu-Ti. El objetivo de esta investigación consiste en estudiar y analizar este tipo de uniones basándonos en la influencia de la aleación de aporte antes mencionada y la adición de elementos como Cr y Ni en diferentes cantidades, y como estos pueden afectar la tenacidad de la unión y su resistencia a la corrosión.

### ***1.1 Hipótesis.***

Ante dicha situación problemática se generó la hipótesis de que es posible mejorar la unión de la aleación Ti-6Al-4V y el compuesto cerámico SiC, mediante el método de soldadura brazing utilizando como material de aporte aleaciones base Ag-Cu-Ti con adiciones de Cr y Ni, con el fin de mejorar la tenacidad y la resistencia a la corrosión.

### ***1.2 Objetivo General.***

Determinar el efecto del Cr y Ni como elementos adicionales a la aleación de aporte Ag-Cu-Ti, y los efectos de estos en la unión de los materiales bases tales como Ti-6Al-

4V y el SiC, Determinando que temperatura es la más propicia para el desarrollo de la unión.

### **1.3 *Objetivos Específicos.***

1. Caracterizar los materiales base y analizar cómo influyen sus diferentes características y propiedades en la unión brazing.
2. Crear diferentes aleaciones de aporte base Ag-Cu-Ti las cuales tendrán diferentes combinaciones de Cr y Ni, caracterizar microestructuralmente, químicamente y mecánicamente la misma y analizar qué impacto tienen estos dos últimos componentes en con la resistencia a la corrosión.
3. Analizar la influencia de estos elementos en la aleación de aporte, con las propiedades mecánicas de la unión.
4. Obtener un parámetro óptimo de temperatura para la soldadura brazing en atmosfera inerte para los materiales base y aleaciones de aporte.

## **Capítulo II. Antecedentes.**

### ***2.1 Generalidades sobre las uniones por soldadura.***

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, (generalmente metales o termoplásticos), usualmente logrado a través de la coalescencia (fusión), en la cual las piezas son soldadas fundiendo y agregando un material de relleno fundido (metal o plástico), el cual tiene un punto de fusión menor al de la pieza a soldar, para conseguir un baño de material fundido (el *baño de soldadura*) que, al enfriarse, se convierte en una unión fija.

Muchas fuentes de energía diferentes pueden ser usadas para la soldadura, incluyendo una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, un rayo de electrones, procesos de fricción o ultrasonido. Las energías necesarias para formar la unión entre dos piezas de metal generalmente provienen de un arco eléctrico. La energía para soldaduras de fusión o termoplásticos generalmente proviene del contacto directo con una herramienta o un gas caliente. Durante el proceso hay que proteger al material fundido contra los gases nocivos de la atmósfera, principalmente contra el oxígeno y el nitrógeno.

Los efectos de la soldadura resultan determinantes para la utilidad del material soldado. El metal de aporte y las consecuencias derivadas del suministro de calor pueden afectar a las propiedades de la pieza soldada. Deben evitarse porosidades y grietas añadiendo elementos de aleación al metal de aporte, y sujetando firmemente las piezas que se quieren soldar para evitar deformaciones, también puede suceder que la zona afectada por el calor quede dura y quebradiza.

Para evitar estos efectos indeseables, se realizan precalentamientos o tratamientos térmicos posteriores. Por otra parte, el calor de la soldadura causa distorsiones que pueden reducirse al mínimo eligiendo de modo adecuado los elementos de sujeción y estudiando previamente la secuencia de la soldadura. La soldadura se usa ampliamente para fabricar y reparar los productos hechos de metal. Casi todo lo hecho de metal está soldado por ejemplo el edificio más alto del mundo, los motores de los cohetes espaciales, etc. La soldadura es el método más económico de unir en forma permanente partes metálicas. Para fusionar dos partes mediante pernos o remaches se

requiere de orificios en ambas a efecto de acomodarlos. Estos orificios reducen el área transversal 10%, la junta puede requerir también el uso de una o dos placas de hierro angular, incrementándose así el peso del material requerido y el costo. Este gasto puede eliminarse usando un trabajo de soldadura. Cambiar de piezas fundidas a soldadas permite al diseñador disminuir el peso reduciendo el espesor del metal. La soldadura es un concepto de diseño que permite libertad y flexibilidad, que no son posibles en la construcción de piezas de fundición. La soldadura es la mejor forma de proteger y conservar los materiales, protegiendo su superficie con recubrimientos especiales metálicos. En un trabajo de soldadura se depositan aleaciones especiales sobre los materiales base para proporcionar superficies resistentes a la corrosión; soldando se pueden hacer recubrimientos que endurecen la superficie para proporcionar a ciertas aleaciones especiales resistencia al desgaste (47).

Hay muchas formas de hacer una soldadura y muchos y diferentes tipos de soldaduras. Soldar se ha vuelto algo complejo y técnico, requiere de un conocimiento considerable para seleccionar el proceso adecuado para un trabajo específico. Mientras que con frecuencia es un proceso industrial, la soldadura puede ser hecha en muchos ambientes diferentes, incluyendo al aire libre, debajo del agua y en el espacio. Sin importar la localización, sin embargo, la soldadura sigue siendo peligrosa, y se deben tomar precauciones para evitar quemaduras, descarga eléctrica, humos venenosos, y la sobreexposición a la luz ultravioleta.

## ***2.2 Ventajas y desventajas de las uniones soldadas.***

La soldadura es un proceso de producción muy eficiente y altamente aplicable que cuenta con características benéficas como:

- La soldadura proporciona una unión permanente, las partes soldadas se vuelven una sola unidad.
- La unión soldada puede ser más fuerte que los materiales originales siempre y cuando se use un metal de relleno que tenga propiedades de resistencia superiores y se empleen las técnicas de soldadura adecuadas.
- En general, la soldadura es la forma más económica de unir componentes, en términos de uso de materiales y costos de fabricación, los métodos mecánicos

alternativos de ensamble requieren alteraciones más complejas de las formas (por ejemplo, taladrado de orificios) y adición de sujetadores (remaches o tuercas). El ensamble mecánico resultante por lo general es más pesado que la soldadura correspondiente.

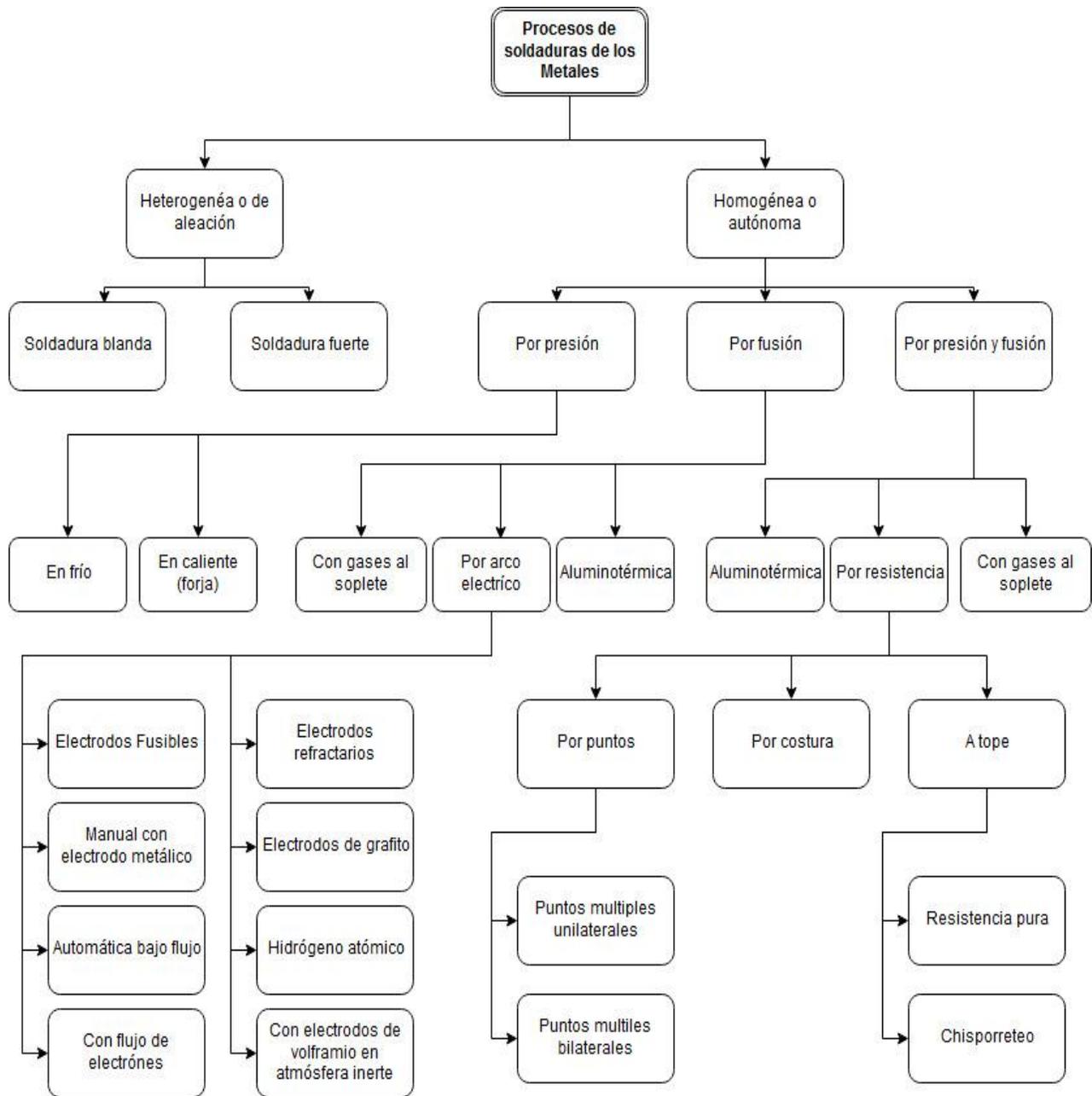
- La soldadura no se limita al ambiente de fábrica. Puede realizarse en campo, y en algunos casos puede ser aplicada por personal sin mucha experiencia.

Como todo proceso de manufactura siempre tendrá algunos inconvenientes como los que a continuación se mencionan:

- La mayoría de las operaciones de soldadura se realizan en forma manual y son elevadas en términos de costo de mano de obra.
- Muchas operaciones de soldadura se consideran cuestiones especializadas y no son muchas las personas que las realizan.
- Casi todos los procesos de soldadura implican el uso de mucha energía, y por consiguiente son peligrosos.
- Dado que la soldadura obtiene una unión permanente, no es posible el desensamble.
- La unión soldada puede padecer ciertos defectos de calidad que son difíciles de detectar. Los defectos pueden reducir la resistencia de la unión (48) (39).

### ***2.3 Procesos de soldadura.***

En el campo de las estructuras metálicas se emplea con mayor profusión el proceso SMAW (Shielded Metal Arc Welding) soldeo manual con electrodo revestido, empleado siempre en obra, pero también en taller. La unión por soldadura tiene varios procedimientos, que entre otras ventajas tienen el ser semiautomáticos o automáticos, dentro de estos destacan los procesos SAW (Submerged Arc Welding) y GMAW (Gas Metal Arc Welding) de soldeo por arco en atmosfera de gas con electrodo o combustible o GTAW (Gas Tugnsten Arc Welding) con electrodo no consumible. Los gases además de proteger la soldadura durante la fusión pueden participar en el proceso MAG (Metal Active Gas) o no participar en el mismo MIG (Metal Inert Gas).



**Figura 2.1.** Clasificación de los procesos de soldadura según AWS.

Los anteriores procedimientos son expresamente autorizados por la Norma Básica de la Edificación Estructuras de Acero, NBE-EA95. Otro procedimiento admitido por la NBE es el de soldadura por resistencia eléctrica ERW (Electrical Resistance Welding), que combina el calor producido por una corriente eléctrica y la presión mecánica para conseguir la unión. Es un procedimiento únicamente aplicable para soldaduras a tope y

a sondeo de chapas fina es decir soldadura por punto. La American Welding Society (AWS) ha hecho una clasificación de los procesos de soldadura. El listado oficial de procesos y su agrupación (39).

La sociedad de soldadura formuló la definición de los procesos desde el punto de vista operativo en vez del metalúrgico. La AWS ha agrupado los procesos de acuerdo con el “modo de transferencia de energía” como consideración primaria. Un segundo factor es la “influencia de la atracción capilar al efectuar la distribución del metal de aporte” en la unión. Ver Figura 2.1.

### ***2.3.1 Soldadura por arco eléctrico.***

Es el procedimiento más importante y casi exclusivamente utilizado para las estructuras metálicas. Para realizar este tipo de soldadura se lleva a cabo el siguiente procedimiento se induce una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza a soldar, con lo cual ioniza el aire entre ellos y pasa a ser conductor, de modo que se cierra el circuito y se crea el arco eléctrico. Las piezas se unen al provocarse el arco eléctrico y un electrodo revestido que constituye el metal de aportación, el electrodo está sujeto a una pinza que sujeta al soldador (es el polo negativo) y el positivo son las piezas que se quieren unir; una buena soldadura depende de los siguientes factores:

- Diámetro del electrodo.
- Distancia del electrodo a las piezas para unir (tamaño del arco).
- Velocidad de avance del electrodo (habilidad del soldador).
- Temperatura en el proceso; de 3000 a 4000 °C.

El calor del arco funde parcialmente el material base y funde el material de aporte, el cual se deposita y crea el cordón de soldadura. Pueden usar tanto corriente continua (DC) como alterna (AC), y electrodos consumibles o no consumibles. A veces, la región de la soldadura es protegida por un cierto tipo de gas inerte o semi inerte, conocido como gas de protección, y el material de relleno a veces es usado también.

Para proveer la energía eléctrica necesaria para los procesos de la soldadura de arco, pueden ser usadas un número diferentes de fuentes de alimentación. La clasificación más común son las fuentes de alimentación de corriente constante y las fuentes de

alimentación de voltaje constante. En la soldadura de arco, la longitud del arco está directamente relacionada con el voltaje, y la cantidad de entrada de calor está relacionada con la corriente.

Las fuentes de alimentación de corriente constante son usadas con más frecuencia para los procesos manuales de soldadura tales como la soldadura de arco de gas tungsteno y soldadura de arco metálico blindado, debido a que mantienen una corriente constante incluso mientras el voltaje varía. Esto es importante en la soldadura manual, ya que puede ser difícil sostener el electrodo perfectamente estable, y como resultado, la longitud del arco y el voltaje tienden a fluctuar.

Las fuentes de alimentación de voltaje lo mantienen constante y varían la corriente, y como resultado, son usadas más a menudo para los procesos de soldadura automatizados tales como la soldadura de arco metálico con gas, soldadura por arco de núcleo fundente, y la soldadura de arco sumergido.

En estos procesos, la longitud del arco es constante, puesto que cualquier fluctuación en la distancia entre material base es rápidamente rectificado por un cambio grande en la corriente. Por ejemplo, si el alambre y el material base se acercan demasiado, la corriente aumentará rápidamente, lo que a su vez causa que aumente el calor y la extremidad del alambre se funda, volviéndolo a su distancia de separación original.

El tipo de corriente usado en la soldadura de arco también juega un papel importante. Los electrodos de proceso consumibles como los de la soldadura de arco de metal blindado y la soldadura de arco metálico con gas generalmente usan corriente directa, pero el electrodo puede ser cargado positiva o negativamente. En la soldadura, el ánodo cargado positivamente tendrá una concentración mayor de calor, y como resultado, cambiar la polaridad del electrodo tiene un impacto en las propiedades de la soldadura. Si el electrodo es cargado negativamente, el metal base estará más caliente, incrementando la penetración y la velocidad de la soldadura.

Alternativamente, un electrodo positivamente cargado resulta en soldaduras más superficiales. Los procesos de electrodo no consumibles, tales como la soldadura de arco de gas tungsteno, pueden usar cualquier tipo de corriente directa, así como también corriente alterna. Sin embargo, con la corriente directa, debido a que el electrodo solo crea el arco y no proporciona el material de relleno, un electrodo

positivamente cargado causa soldaduras superficiales, mientras que un electrodo negativamente cargado hace soldaduras más profundas.

La corriente alterna se mueve rápidamente entre estos dos, dando por resultado las soldaduras de mediana penetración. Una desventaja de la CA (Corriente Alterna), el hecho de que el arco debe ser reencendido después de cada paso por cero, se ha tratado con la invención de unidades de energía especiales que producen un patrón cuadrado de onda en vez del patrón normal de la onda de seno, haciendo posibles pasos a cero rápidos y minimizando los efectos del problema (53).

### ***2.3.1.1 Soldadura manual con electrodo revestido.***

Uno de los tipos más comunes de soldadura de arco es la soldadura manual con electrodo revestido (SMAW, Shielded Metal Arc Welding), que también es conocida como soldadura manual de arco metálico (MMA) o soldadura de electrodo. La corriente eléctrica se usa para crear un arco entre el material base y la varilla de electrodo consumible, que es de acero y está cubierto con un fundente que protege el área de la soldadura contra la oxidación y la contaminación por medio de la producción del gas CO<sub>2</sub> durante el proceso de la soldadura. El núcleo en sí mismo del electrodo actúa como material de relleno, haciendo innecesario un material de relleno adicional.

El proceso es versátil y puede realizarse con un equipo relativamente barato, haciéndolo adecuado para trabajos de taller y trabajo de campo. Un operador puede hacerse razonablemente competente con una modesta cantidad de entrenamiento. Los tiempos de soldadura son algo lentos, puesto que los electrodos consumibles deben ser sustituidos con frecuencia y porque la escoria, el residuo del fundente, debe ser retirada después de soldar. Además, el proceso es generalmente limitado a materiales de soldadura ferrosos, aunque electrodos especializados han hecho posible la soldadura del hierro fundido, níquel, aluminio, cobre, y de otros metales.

### ***2.3.1.2 Soldadura de arco metálico con gas (GMAW).***

También conocida como soldadura de gas de metal inerte o soldadura MIG, es un proceso semiautomático o automático que usa una alimentación continua de alambre como electrodo y una mezcla de gas inerte o semi-inerte para proteger la soldadura

contra la contaminación. Como con la SMAW, la habilidad razonable del operador puede ser alcanzada con entrenamiento modesto. Puesto que el electrodo es continuo, las velocidades de soldado son mayores para la GMAW que para la SMAW. También, el tamaño más pequeño del arco, comparado a los procesos de soldadura de arco metálico protegido, hace más fácil hacer las soldaduras fuera de posición (ej., empalmes en lo alto, como sería soldando por debajo de una estructura). El equipo requerido para realizar el proceso de GMAW es más complejo y costoso que el requerido para la SMAW, y requiere un procedimiento más complejo de disposición. Por lo tanto, la GMAW es menos portable y versátil, y debido al uso de un gas de blindaje separado, no es particularmente adecuado para el trabajo al aire libre. Sin embargo, debido a la velocidad en la que las soldaduras pueden ser terminadas, la GMAW es adecuada para la soldadura de producción. El proceso puede ser aplicado a una amplia variedad de metales, tanto ferrosos como no ferrosos (49).

### ***2.3.1.3 Soldadura de arco de gas de tungsteno (GTAW).***

La soldadura de arco de gas de tungsteno (GTAW) o soldadura de gas inerte de tungsteno (TIG) (también a veces designada erróneamente como soldadura heliarc), es un proceso manual de soldadura que usa un electrodo de tungsteno no consumible, una mezcla de gas inerte o semi-inerte, y un material de relleno separado. Especialmente útil para soldar materiales finos, este método es caracterizado por un arco estable y una soldadura de alta calidad, pero requiere una significativa habilidad del operador y solamente puede ser lograda en velocidades relativamente bajas.

La GTAW puede ser usada en casi todos los metales soldables, aunque es aplicada más a menudo acero inoxidable y otras aleaciones. Con frecuencia es usada cuando son extremadamente importantes las soldaduras de calidad, por ejemplo, en aviones y aplicaciones navales. Un proceso relacionado, la soldadura de arco de plasma, también usa un electrodo de tungsteno, pero utiliza un gas de plasma para hacer el arco. El arco es más concentrado que el arco de la GTAW, haciendo el control transversal más crítico y así generalmente restringiendo la técnica a un proceso mecanizado. Debido a su corriente estable, el método puede ser usado en una gama más amplia de materiales gruesos que el proceso GTAW, además es mucho más rápido. Puede ser

aplicado a los mismos materiales que la GTAW excepto al magnesio, y la soldadura automatizada del acero inoxidable es una aplicación importante del proceso. Una variación del proceso es el corte por plasma, un eficiente proceso de corte de acero.

#### ***2.3.1.4 Soldadura de arco sumergido (SAW).***

La soldadura de arco sumergido es un método de soldadura de alta productividad en el cual el arco se pulsa bajo una capa de cubierta de flujo. Esto aumenta la calidad del arco, puesto que los contaminantes en la atmósfera son bloqueados por el flujo. La escoria que forma la soldadura generalmente sale por sí misma, y combinada con el uso de una alimentación de alambre continua, la velocidad de deposición de la soldadura es alta. Las condiciones de trabajo presentan una ventaja sobre otros procesos de soldadura de arco, puesto que el flujo oculta el arco y casi no se produce ningún humo. El proceso es usado comúnmente en la industria, especialmente para productos grandes y en la fabricación de los recipientes de presión soldados.

#### ***2.3.1.5 Soldadura fuerte (latón).***

La soldadura fuerte es “un grupo de procesos de soldadura que produce coalescencia de materiales calentándolos a la temperatura de licuefacción en presencia de un metal de aporte con un punto de fusión por arriba de 450°C (840°F) y por debajo del punto de solidificación del metal base. El metal de aporte se distribuye entre las superficies a empalmar de la unión, estrechamente unidas por atracción capilar”. La soldadura de latón se refiere a los procesos de soldadura que usan latón o bronce como metal de aporte, donde dicho metal no se distribuye por acción capilar.

#### ***2.3.1.6 Soldadura con gas oxcombustible.***

La soldadura con gas oxcombustible (OFW) es “un grupo de procesos de soldadura que produce la coalescencia de las piezas de trabajo calentándolas con una flama de gas oxcombustible. Los procesos se usan con o sin la aplicación de presión y con o sin el uso de metal de aporte”. El calor de la flama se crea por reacción química o por quemado de los gases. Este proceso de soldadura normalmente usa acetileno como

gas combustible. Los procesos de corte térmico con oxígeno tienen mucho en común con los procesos de soldadura.

### ***2.3.1.7 Soldadura por resistencia.***

La soldadura por resistencia (RW) es un grupo de procesos de soldadura que produce la Coalescencia de las superficies a empalmar con el calor obtenido de la resistencia de las piezas de trabajo al flujo de la corriente de soldadura en un circuito del cual forman parte las piezas de trabajo, y por la aplicación de presión. En casi todos los casos los procesos se aplican automáticamente, puesto que las máquinas de soldadura incorporan tanto el control eléctrico como las funciones mecánicas. Las dos piezas de metal que van a unirse son presionadas juntas por los electrodos de la máquina soldadora de manera que hagan un buen contacto eléctrico, entonces se pasa la corriente eléctrica a través de ellos, los calienta hasta que empiecen a derretir en el punto donde están en contacto el metal fundido de las dos piezas fluye y las piezas se unen; entonces la corriente se apaga y el metal fundido se solidifica, formando una conexión metálica sólida entre las dos piezas. El término "Soldadura de Resistencia" viene del hecho de que la resistencia del metal a ser soldado la que causa el calor que se generará cuando la corriente fluye a través de este (47) (53).

### ***2.3.1.8 Soldadura blanda.***

La soldadura blanda es "un grupo de procesos de soldadura que produce la coalescencia de los materiales calentándolos a temperatura de fusión y usando un metal de aporte cuyo punto de licuefacción excede los 450°C (840°F) y por debajo del punto de solidificación de los metales base. El metal de aporte se distribuye entre las superficies a empalmar de la unión, estrechamente ajustadas por atracción capilar. Un factor fundamental es la calidad del estaño: éste debe tener una mezcla de 60-40, es decir, una aleación de 60% de estaño y 40% de plomo.

### ***2.3.1.9 Soldadura de estado sólido.***

El equipo y los métodos implicados son similares a los de la soldadura por resistencia, pero en vez de corriente eléctrica, la vibración proporciona la fuente de energía. Soldar

metales con este proceso no implica la fusión de los materiales; en su lugar, la soldadura se forma introduciendo vibraciones mecánicas horizontalmente bajo presión. Cuando se están soldando plásticos, los materiales deben tener similares temperaturas de fusión, y las vibraciones son introducidas verticalmente. La soldadura ultrasónica se usa comúnmente para hacer conexiones eléctricas de aluminio o cobre, y también es un muy común proceso de soldadura de polímeros.

#### ***2.3.1.10 Soldadura por fusión.***

La acción del calor origina la fusión localizada de las piezas y estas se unen sin o con la aportación de otro material. Las altas temperaturas facilitan la difusión de los materiales a unir.

#### ***2.3.1.11 Soldadura por presión.***

Las piezas se calientan hasta hacerse plásticas y luego se unen mediante una presión mecánica.

#### ***2.3.1.12 Soldadura TIG.***

El Tugnsten Inert Gas emplea un electrodo permanente de tungsteno, aleado a veces con torio o zirconio en porcentajes no superiores a un 2%. El tungsteno (funde a 3410 °C), acompañada de la protección del gas, la punta del electrodo apenas se desgasta tras un uso prolongado.

#### ***2.3.1.13 Soldadura por rayo láser.***

Esta utiliza la energía aportada por un haz láser para fundir y recristalizar el material o los materiales que se desea unir, resultando así la unión entre los elementos involucrados. La soldadura se realiza por el calentamiento de la zona a soldar.

#### ***2.3.1.14 Soldadura ultrasónica.***

Es un tipo de soldadura que utiliza una máquina con punta de base plana, superponiendo los materiales y luego haciendo bajar la punta de la máquina para provocar la fundición.

### ***2.3.1.15 Soldadura GMAW.***

Este utiliza un electrodo consumible y continuo que es alimentado a la pistola junto con el gas inerte en soldadura MIG o gas activo en soldadura MAG que crea la atmósfera protectora.

### ***2.4 Soldaduras brazing, caracterización y principios, aleaciones de aporte.***

La soldadura brazing une materiales calentándolos en presencia de un metal de aporte que tiene un cambio a fase líquida por encima de 450 °C, pero por debajo del cambio a fase sólida (solidus) del metal base. Se calienta el área de la unión y el fundente cuando alcanza el estado líquido 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, 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. 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 (40).

### ***2.4.1 Proceso 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.

### ***2.4.2 Soldadura Brazing en horno.***

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

- Las piezas que se van a soldar pueden pre-ensamblarse o sostenerse en la posición correcta por medio de guías.
- El metal de aporte puede colocarse en contacto con la unión.
- Se van a formar simultáneamente varias uniones por soldadura brazing.
- Se van a unir muchos ensambles similares.
- 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.

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.

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 fusión del metal de aporte, o en los que la difusión mejora la ductilidad y la resistencia mecánica de la unión. Es frecuente usar tiempos a la temperatura de soldadura brazing de 30 a 60 minutos cuando se desea elevar el punto de fusión de la unión soldada (36).

Los hornos que se emplean para soldadura brazing se clasifican como:

- En lotes, ya sea con aire o atmósfera controlada.
- Continuos, ya sea con aire o atmósfera controlada.
- De cabina con atmósfera controlada.
- De vacío (46).

### ***2.4.3 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 o argón puede ser utilizada en este tipo de hornos con un punto de rocío de  $-50^{\circ}\text{F}$  ( $-6^{\circ}\text{C}$ ) o por debajo de este y una presión parcial de oxígeno de 50 partes por millón (ppm) es utilizada.

A continuación, se proporciona una breve descripción del efecto de estas atmósferas en los procesos de soldadura brazing en horno. El nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) se utiliza en una

atmósfera controlada para desplazar el aire del horno y actuar como constituyente del gas para los demás constituyentes. El uso de nitrógeno de alta pureza permite 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.

La presencia de Oxígeno ( $O_2$ ), además de las fuentes ya mencionadas, 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  $Al_2O_3$  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 (46) (44).

El Hidrógeno ( $H_2$ ) 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  $1400^{\circ}F$  ( $760^{\circ}C$ ) el aire puede ser quemado llevando solamente hidrógeno, debido a esto se deben extremar precauciones (37).

#### ***2.4.4 Principio del proceso de soldadura brazing.***

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 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. Se calienta el área de la unión hasta que el fundente se derrite y limpia los metales base quedando protegidos contra la oxidación (45) (38).

### 2.4.5 Aleaciones de aporte base Ag-Cu.

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 2.2 muestra el diagrama de equilibrio del sistema binario plata-cobre. Durante el calentamiento la línea de cambio a fase sólida, ADCEB, indica la temperatura de comienzo de la fusión de las aleaciones, en tanto que la línea de cambio a fase líquida, ACB, indica las temperaturas a las que las aleaciones se vuelven completamente líquidas (42).

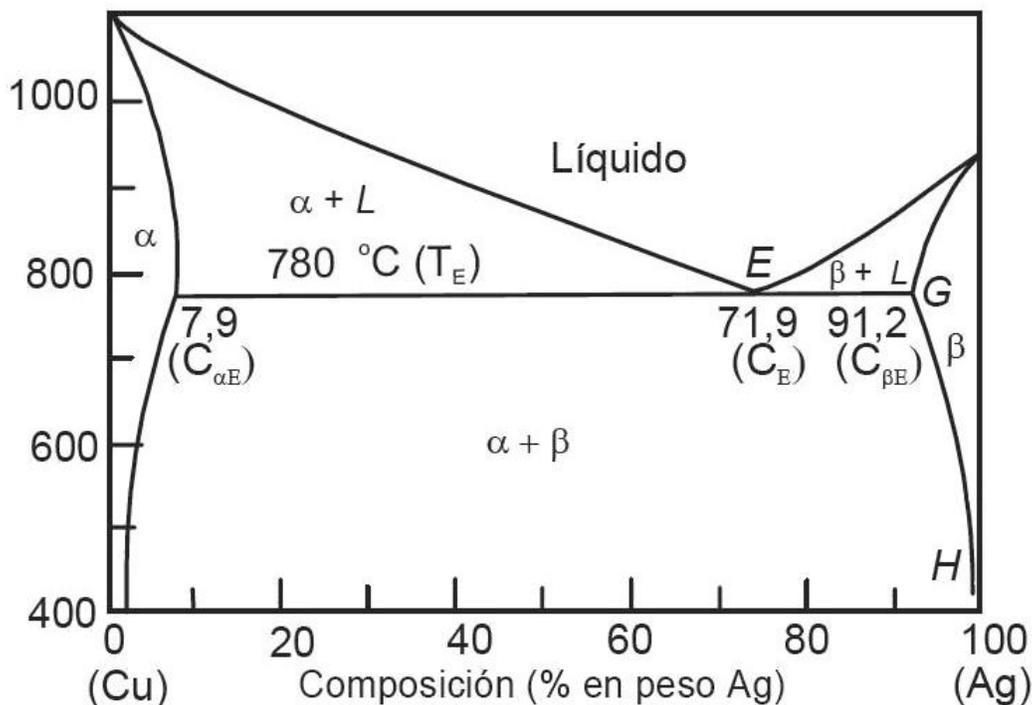


Figura 2.2. Diagrama de equilibrio del sistema binario plata-cobre.

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.

#### ***2.4.6 Fusión de las aleaciones de aporte.***

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.

Las aleaciones de aporte con intervalos de fusión estrechos no tienden a separarse, de modo que fluyen libremente al interior de uniones con separaciones extremadamente angostas. Las aleaciones de aporte con intervalos de fusión amplios deben calentarse rápidamente o colocarse en la unión después de que el metal base haya alcanzado la temperatura de soldadura brazing, a fin de minimizar la separación. Este tipo de aleaciones de aporte fluyen lentamente, sólo penetran en uniones bastante separadas y forman filetes grandes en las extremidades de las uniones (43) (42).

#### ***2.4.7 Mojado y adhesión.***

Para ser efectivo, un metal de aporte de soldadura brazing debe alearse con la superficie del metal base sin difundirse de manera indeseable al interior del metal base, diluirlo, erosionarlo ni formar compuestos frágiles. Los efectos dependen de la solubilidad mutua entre el metal de aporte y el metal base presente y de la temperatura y duración del ciclo de soldadura brazing. 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 (15).

La erosión del metal base ocurre cuando el metal base y el metal de aporte de soldadura brazing son mutuamente solubles. Hay ocasiones en tal aleación produce compuestos intermetálicos quebradizos que reducen la ductilidad de la unión. La composición de los metales de aporte se ajusta con el fin de controlar los factores anteriores y conferir características deseables, como resistencia a la corrosión en medios específicos, temperaturas de soldadura brazing favorables o ahorro de materiales. Así, por ejemplo, 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 zinc, cadmio, o ambos, que bajan las temperaturas de liquidus y solidus. Se añade estaño en lugar de zinc 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 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, estos metales de aporte son autofundentes (36) (37) (38).

#### ***2.4.8 Propiedades de los metales de aporte.***

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

- Compatibilidad con el metal base y el diseño de la unión.
- 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.
- 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 fusión de la unión; o promover la eliminación de ciertos óxidos refractarios al vacío o con una atmósfera especial.

- 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 2.1 se indica la clasificación de los materiales de aporte. La Tabla 2.2 nos muestra aleaciones base plata para brazing donde se observa entre otras cosas su temperatura de fusión. Por otra parte, la Tabla 2.3 muestra la composición química de metales de aporte para aleaciones base Ag-Cu de acuerdo a la normativa ANSI/AWS A5.8 (42).

Tabla 2.1. Clasificación AWS de metales de aporte.

| 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. Aleaciones base Ag según AWS, rangos de temperatura de brazing.

| Table S-3<br>Solidus, Liquidus, and Brazing Temperature Ranges for Silver Filler Metals* |         |      |          |      |                           |           |
|--|---------|------|----------|------|---------------------------|-----------|
| AWS Classification   | Solidus |      | Liquidus |      | Brazing Temperature Range |           |
|  | °C      | °F   | °C       | °F   | °C                        | °F        |
| BAg-1  | 607     | 1125 | 618      | 1145 | 618-760                   | 1145-1400 |
| BAg-1a   | 627     | 1160 | 635      | 1175 | 635-760                   | 1175-1400 |
| BAg-2  | 607     | 1125 | 702      | 1295 | 702-843                   | 1295-1550 |
| BAg-2a   | 607     | 1125 | 710      | 1310 | 710-843                   | 1310-1550 |
| BAg-3  | 632     | 1170 | 688      | 1270 | 688-816                   | 1270-1500 |
| BAg-4  | 671     | 1240 | 779      | 1435 | 779-899                   | 1435-1650 |
| BAg-5  | 663     | 1225 | 743      | 1370 | 743-843                   | 1370-1550 |
| BAg-6  | 688     | 1270 | 774      | 1425 | 774-871                   | 1425-1600 |
| BAg-7  | 618     | 1145 | 652      | 1205 | 652-760                   | 1205-1400 |
| BAg-8  | 779     | 1435 | 779      | 1435 | 779-899                   | 1435-1650 |
| BAg-8a   | 766     | 1410 | 766      | 1410 | 766-871                   | 1410-1600 |
| BAg-9  | 671     | 1240 | 718      | 1325 | 718-843                   | 1325-1550 |
| BAg-10   | 691     | 1275 | 738      | 1360 | 738-843                   | 1360-1550 |
| BAg-13   | 718     | 1325 | 857      | 1575 | 857-968                   | 1575-1775 |
| BAg-13a  | 771     | 1420 | 893      | 1640 | 893-982                   | 1600-1800 |
| BAg-18   | 602     | 1115 | 718      | 1325 | 718-843                   | 1325-1550 |
| BAg-19   | 760     | 1400 | 891      | 1635 | 877-982                   | 1610-1800 |
| BAg-20   | 677     | 1250 | 766      | 1410 | 766-871                   | 1410-1600 |
| BAg-21   | 691     | 1275 | 802      | 1475 | 802-899                   | 1475-1650 |
| BAg-22   | 680     | 1260 | 699      | 1290 | 699-830                   | 1290-1525 |
| BAg-23   | 960     | 1760 | 970      | 1780 | 970-1038                  | 1780-1900 |
| BAg-24   | 660     | 1220 | 750      | 1305 | 750-843                   | 1305-1550 |
| BAg-26   | 705     | 1305 | 800      | 1475 | 800-870                   | 1475-1600 |
| BAg-27   | 605     | 1125 | 745      | 1375 | 745-860                   | 1375-1575 |
| BAg-28   | 649     | 1200 | 710      | 1310 | 710-843                   | 1310-1550 |
| BAg-33   | 607     | 1125 | 682      | 1260 | 682-760                   | 1260-1400 |
| BAg-34   | 649     | 1200 | 721      | 1330 | 721-843                   | 1330-1550 |

\*Solidus and liquidus shown are for the nominal composition in each classification

**Tabla 2.3.** Combinaciones metal base- metal de aporte.

| Metales Base                                       | Al y Aleaciones Al  | Mg y Aleaciones de Mg | Cu y Aleaciones de Cu       | Carbono y Aceros de Baja Aleación | Hierro                     | Acero Inoxidable           | Ni y Aleaciones de Ni      | Ti y Aleaciones de Ti    | Be, Zr, V y Aleaciones Metales Reactivos | W, Mo, Ta, Nb y Aleaciones de Metales Refractarios | Aceros Herramienta         |
|--|---------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--|--|----------------------------|
| Al y Aleaciones Al                                 | BAI-Si              | —                     | —                           | —                                 | —                          | —                          | —                          | —                        | —  | —  | —                          |
| Mg y Aleaciones de Mg                              | X <sup>‡</sup>      | BMg                   | —                           | —                                 | —                          | —                          | —                          | —                        | —  | —  | —                          |
| Cu y Aleaciones de Cu                              | X                   | X                     | BAG, BAu, BCuP, BNI, RBCuZn | —                                 | —                          | —                          | —                          | —                        | —  | —  | —                          |
| Carbono y Aceros de Baja Aleación                  | X <sup>‡</sup>      | X                     | BAG, BAu, RBCuZn, BNI       | BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNI        | —                          | —                          | —                          | —                        | —  | —  | —                          |
| Hierro   | X                   | X                     | BAG, BAu, BNI, RBCuZn       | BAG, BNI, RBCuZn                  | BAG, BNI, RBCuZn           | —                          | —                          | —                        | —  | —  | —                          |
| Acero Inoxidable                                   | BAI-Si <sup>#</sup> | X                     | BAG, BNI, BAu               | BAG, BAu, BCu, BNI, RBCuZn        | BAG, BAu, BCu, BNI, RBCuZn | BAG, BAu, BCu, BNI         | —                          | —                        | —  | —  | —                          |
| Ni y Aleaciones de Ni                              | BAI-Si              | X                     | 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 Ti                              | BAI-Si              | X                     | BAG <sup>†</sup>            | BAG <sup>†</sup>                  | BAG <sup>†</sup>           | BAG <sup>*†</sup>          | BAG <sup>†</sup>           | BAG, BAI-Si <sup>*</sup> | —  | —  | —                          |
| Be, Zr, V y Aleaciones Metales Reactivos           | Y <sup>§</sup>      | X                     | BAG                         | BAG                               | BAG                        | BAG <sup>†</sup>           | BAG <sup>†</sup>           | Y                        | Y  | —  | —                          |
| W, Mo, Ta, Nb y Aleaciones de Metales Refractarios | X                   | X                     | BAG                         | BAG, BCu, BNI, BAu                | BAG, BCu, BAu, BNI         | BAG, BCu, BNI, BAu         | BAG, BCu, BNI, BAu         | Y                        | Y  | BCu, BAG, BNI, BAu                                 | —                          |
| Aceros Herramienta                                 | X                   | X                     | 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                        | X  | BCu, BAG, BNI, BAu                                 | BAG, BAu, BCu, BNI, RBCuZn |

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

+ Metales de aporte especiales están disponibles y son adecuados para combinación de metales específicas.

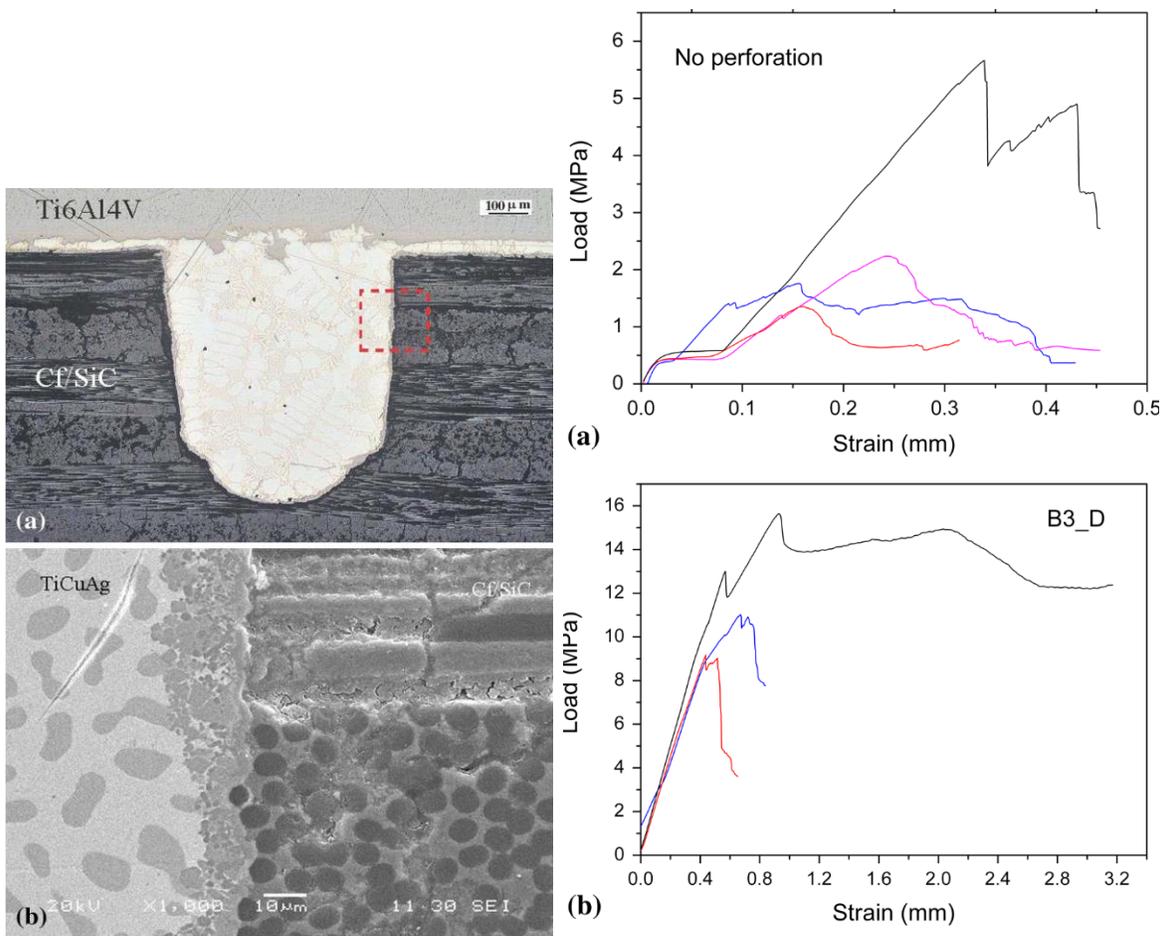
‡ X-No se recomienda, sin embargo, técnicas especiales puede ser factibles para determinadas combinaciones de diferentes metales.

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

# Recomendados solamente para aleaciones sin aluminio níquel principalmente.

### 2.4.9 Uniones por el método brazing de aleaciones Ti-6Al-4V y SiC, utilizando como material de aporte aleaciones base Ag-Cu-Ti.

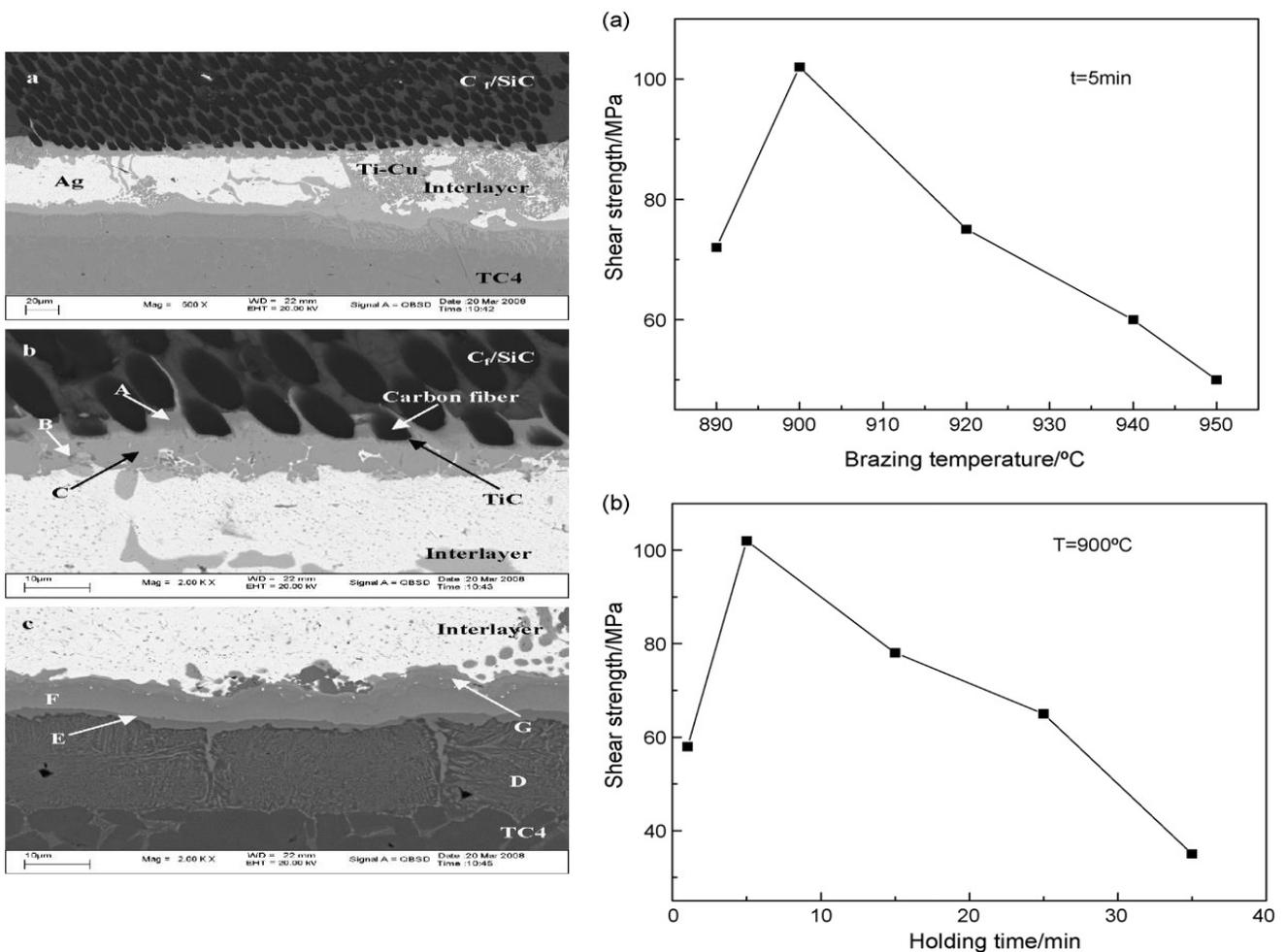
Estudios anteriores sobre este tipo de uniones con estos materiales base no muestran que el rango de temperaturas y tiempo de permanencia de la misma es similar en diferentes estudios. En el siguiente caso analizado se realizó un estudio comparativo del aumento de la resistencia de la unión realizando una serie de agujeros en la placa de SiC con lo que se pretende aumentar la resistencia de la unión. La composición química del material de aporte es Ag-26.7Cu-4.5Ti (wt %), la velocidad de calentamiento y enfriamiento es de 4 °C/min y 2 °C/min respectivamente, el vacío del horno 10<sup>-5</sup> mbar, la temperatura de brazing de 935 °C con un tiempo de permanencia de 10 min (2).



**Figura 2.3.** EDX realizado a la interface de la unión y estudio comparativo de los ensayos mecánicos de la unión.

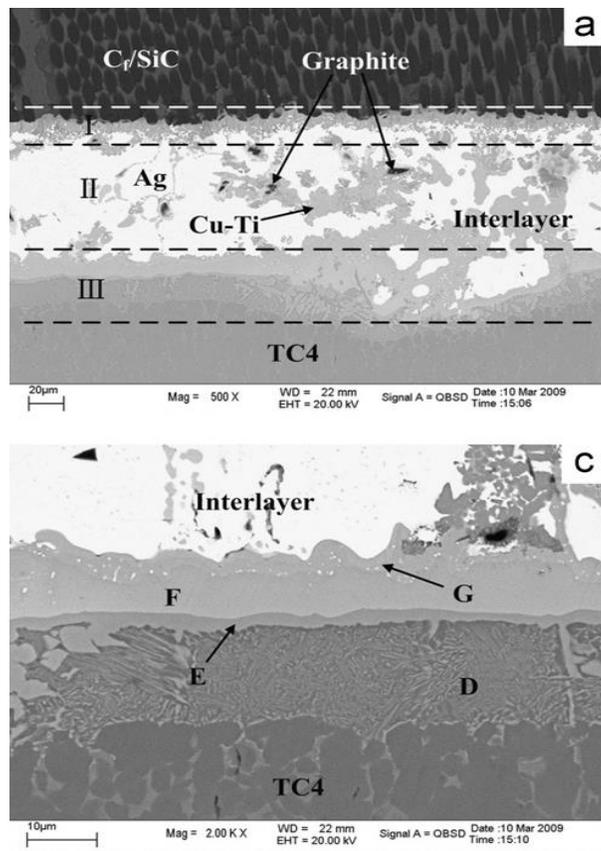
En la Figura 2.3 se puede apreciar la excelente humectabilidad del material de aporte en ambos materiales bases, no se observan grietas ni defectos en la zona de unión. En los ensayos mecánicos realizados las piezas que fueron perforadas presentaron hasta 6 veces mayor resistencia mecánica que las que no lo tenían, pero con una característica que todas las piezas fallaron por el carburo de silicio, y no por la zona de unión lo que demuestra la efectividad de este método.

En el siguiente caso analizado se realizó un estudio comparativo del comportamiento de la unión a diferentes temperaturas y tiempos de permeancia buscando así un rango óptimo para la misma donde se obtendrían mayores propiedades mecánicas.



**Figura 2.4.** EDX realizado a la interface de la unión y estudio comparativo de los ensayos mecánicos de la unión a diferentes temperaturas de brazing y diferentes tiempos de permanencia.

La composición química del material de aporte es 72Ag-28Cu-6Ti (wt %), la velocidad de calentamiento es de 15°C/min y la de enfriamiento se realizó a temperatura ambiente, el vacío del horno  $6 \times 10^{-3}$  Pa, la temperatura de brazing se realizó en el rango entre los 890°C y 950°C con un tiempo de permanencia entre 1 min y los 35 min. Al igual que el caso anterior como se aprecia en la Figura 2.4 la unión es homogénea en toda la zona de unión sin defectos tales como grietas y cavidades con una muy buena humectación de la misma. Los ensayos mecánicos arrojaron que las mayores propiedades mecánicas se obtenían a 900 °C con un tiempo de permanencia de 5 min (55). Otro estudio analizado se centró en mejorar un problema presentado frecuentemente en las uniones de estos materiales como es la aparición de defectos a causa de los diferentes coeficientes de dilatación térmica de los materiales base. Para ello se agregó a la zona de unión una mezcla de titanio y carbono en polvo disueltos en alcohol.



**Figura 2.5.** EDX realizado a la interface de la unión.

La composición química del material de aporte es 71Ag-23Cu-6Ti + (Ti+C) powders (wt %), la velocidad de calentamiento es de 15°C/min y la de enfriamiento se realizó a temperatura ambiente, el vacío del horno  $6 \times 10^{-3}$  Pa, la temperatura de brazing se realizó en el rango entre los 910°C y 950°C con un tiempo de permanencia entre 1 min y 25 min. En el análisis microscópico de la unión se observaron las nuevas fases formadas causadas por Ti y C en polvo, así como el estado de la unión en el cual se apreció que era homogénea y sin defectos visibles para este tipo de análisis. Los análisis mecánicos de tensión arrojaron que se obtuvieron hasta 145 Mpa a temperatura ambiente, 70Mpa a 70°C y 39 Mpa a 800°C, estos resultados se obtuvieron con una aleación que se le realizó el brazing 910 °C con un tiempo de permanencia de 25 min con un contenido de la mezcla agregada a la interface de la unión de un 25 vol% (Ti+C). Ver la Figura 2.5 (8).

#### ***2.4.10 Ventajas del proceso y limitaciones del proceso de soldadura brazing.***

Las principales ventajas de la soldadura brazing son:

- Es económica para ensambles complejos.
- Es sencilla para ensambles grandes.
- La distribución térmica y de esfuerzos es excelente.
- Conserva los recubrimientos y revestimientos.
- Puede unir metales disímiles.
- Permite unir metales y no metales.
- Permite unir piezas de precisión.
- Se pueden unir muchas piezas al mismo tiempo.

Las principales limitaciones de la soldadura brazing son:

- Posibilidad de interacciones desfavorables del metal líquido con la pieza.
- Erosión del metal base.
- Formación de fases quebradizas intermetálicas que reducen la ductilidad.
- Requiere personal altamente capacitado.

## Capítulo III. Metodología experimental.

### 3.1 Elaboración y preparación de las muestras para soldadura brazing.

Para la realización de la soldadura brazing hay que tener ciertas medidas, se ha mencionado que en una soldadura brazing la acción capilar, más que la habilidad del operador asegura la distribución del metal de aporte en la junta. La habilidad real más bien está en el diseño y la ingeniería de la junta. Pero incluso una junta diseñada apropiadamente puede servir de poco, si los procedimientos de brazing correctos no se siguen.

Estos procedimientos consisten en algunos 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 brazing, si se desea una soldadura sana, fuerte, y de buena apariencia. 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. Los siguientes pasos serán imprescindibles para la correcta unión de los materiales de estudio. La Figura 3.1 muestra el diagrama de flujo llevado a cabo en esta investigación.



Figura 3.1. Diagrama experimental.

### ***3.1.1 Correcto ensamble y separación adecuada.***

El brazing, 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 más cerrada posible. La gráfica de la Figura 3.2 se basa en juntas a tope soldadas con brazing de acero inoxidable, usando un metal de aporte específico. En esta Figura se puede observar como la resistencia a la tensión varía con la cantidad de separación entre las piezas que son unidas.

Cuando la separación es más estrecha, el metal de aporte es más difícil de fluir o distribuirse a través de toda la junta y por lo tanto se reduce la resistencia de la unión. Inversamente, si la separación es más ancha de lo necesario, la resistencia de la soldadura será reducida considerablemente. También bajando la resistencia de la soldadura se reduce la acción capilar, así que el metal de aporte puede no poder llenar completamente la unión. La separación ideal de una junta para unirse por brazing del ejemplo anterior es cercana a .0015" (.038mm). Pero ordinariamente en una soldadura brazing, no se logra tener en forma precisa esta distancia, para conseguir una soldadura con esa resistencia máxima. Traducido a la práctica diaria, es fácil ajustar la separación y obtener una soldadura perfecta en una unión tubular. Si se unen dos partes planas, simplemente se pueden empalmar una encima de la otra. El contacto metal sobre metal es toda la separación que se necesitará generalmente, puesto que el "acabado de fabricación" de metales proporciona la rugosidad de la superficie suficiente para las "trayectorias capilares" para el flujo del metal de aporte fundido. Por otro lado, las superficies altamente pulidas, tienden a restringir el flujo del metal de aporte. Sin embargo, hay un factor especial que se debe considerar cuidadosamente en la preparación de las separaciones el cual es el efecto del espesor de la unión sobre la resistencia a la tensión. En la Figura 3.2 se puede observar esta relación.

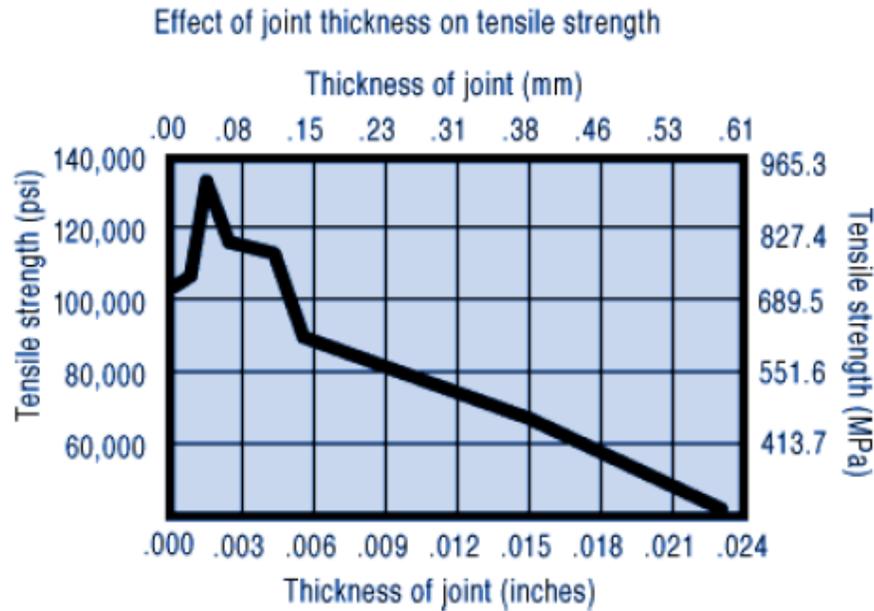


Figura 3.2. Efecto del espesor de la unión sobre la resistencia a la tensión (41).

### 3.1.2 Limpieza de los materiales bases a unir.

La acción capilar trabajará correctamente solamente cuando las superficies de los materiales están limpias. Si se contaminan con aceite, grasa, moho, cascarilla o suciedad, esos contaminantes tienen que ser eliminados. Si permanecen, formarán una barrera entre las superficies del metal base y el brazing. Un material base aceitoso, por ejemplo, repelerá el fundente, formando puntos de óxido formados por el calor y el resultado serán huecos en la soldadura.

El aceite y la grasa se carbonizarán cuando se calienta, formando una película la cual no permitirá al metal de aporte fluir. Y el metal de aporte no se adhiere a superficies con moho. La limpieza del material algunas veces es un trabajo complicado, pero siempre tiene que realizarse. Se debe eliminar el aceite y la grasa, en la mayoría de los casos puede hacerse muy fácilmente sumergiendo las piezas en un solvente desengrasante, mediante desengrase a vapor, o por limpieza alcalina o acuosa. Si las superficies del metal están cubiertas con óxido o cascarilla, se puede quitar esos contaminantes químicamente o mecánicamente. Para la remoción química, se utiliza un tratamiento con ácido pícrico, cerciorándose de que los productos químicos son

compatibles con los metales base que son limpiados, y que no permanecerán trazas de este ácido en hendiduras o cavidades (36).

La remoción mecánica se conoce como limpieza abrasiva. Particularmente en la reparación, donde las partes pueden estar muy sucias o enmohecidas, se puede utilizar un método rápido de limpieza usando un esmeril de paño o un disco abrasivo, un lima o limpieza con arena, seguida por una operación de enjuague. Una vez que las partes estén completamente limpias, es una buena idea soldar cuanto antes. Haciendo esto será mínima la posibilidad de recontaminación de las superficies por polvo de taller o manos grasosas depositadas durante el manejo.

### ***3.1.3 Correcto ensamble para el brazing.***

Ya se mencionó anteriormente que las piezas a soldar se limpian antes del proceso de brazing. Ahora se tiene que tener una posición adecuada para soldar. Así mismo se debe asegurar que esta posición permanecerá en la alineación correcta durante los ciclos de enfriamiento y calentamiento del brazing y que la acción capilar hará su trabajo. Si la forma y el peso de las piezas lo permiten, la manera más simple de mantenerlas juntas es por gravedad. Si se tiene un número de ensambles a soldar y su configuración es demasiado compleja para sujetarla por sí sola, puede ser una buena idea utilizar un sujetador de ayuda para aplicar el brazing.

Cuando se diseñe el sujetador se debe considerar que no sea de una gran masa y minimizar el contacto con las partes a unir. De preferencia se deben utilizar los materiales en los sujetadores con baja conductividad térmica, tales como acero inoxidable, inconel o cerámica. Puesto que éstos materiales son de baja conductividad térmica, extraen menos calor de la junta. Se deben elegir los materiales compatibles en cuanto a su velocidad de expansión para no alterar la alineación del ensamble durante el ciclo térmico (37).

### ***3.1.4 Control de los parámetros de soldadura.***

Es importante el constante monitoreo de la temperatura, así como las velocidades de calentamiento y enfriamiento durante todo el proceso, se sabe de antemano que unimos materiales con diferentes coeficientes de expansión térmica por lo que se debe

ser muy cuidadosos en este aspecto. En caso de soldadura utilizando atmosfera inerte es importante controlar el flujo de gas inerte normalmente argón y mantener los parámetros correctos de flujo y presión para cada sistema.

### ***3.1.5 Limpieza final de la unión soldada.***

Por lo general las uniones por soldaduras brazing tienen la cualidad de ser uniones muy limpias que generan pocos defectos como cambios de coloración y sobrante de material de aporte a remover, como sucede en las uniones soldadas por métodos convencionales. De llegar a ocurrir algunos de estos efectos en la unión antes mencionados es que se está realizando un correcto procedimiento de la unión ya sea por no existir la atmósfera inerte suficiente para evitar corrosión del material de aporte y/o cambio de coloración en los materiales bases en este caso de la aleación de titanio. Y en caso de ser necesario remover exceso de material de aporte es que a la hora de preparar la unión aplicamos un exceso del mismo. Ambos problemas los podemos corregir el primero con la aplicación de ácido pícrico y el segundo con los métodos mecánicos convencionales, pero siempre evitando dañar la zona de contacto de las piezas.

### ***3.1.6 Formato (BPS)***

Para procesos y operaciones de brazing se debe elaborar un procedimiento conforme lo es requerido en el estándar ANSI/AWS B2.2-91 "Standard for Brazing Procedure and Performance Qualification". Donde se muestra una forma estándar en la cual se registran todos los parámetros utilizados durante el proceso como se puede observar en la Figura 3.3. (43) (45) (37).

**Form A1**

**BRAZING PROCEDURE SPECIFICATION (BPS)**

BPS No. \_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_ B PQR NO. \_\_\_\_\_

Company \_\_\_\_\_

Brazing Process \_\_\_\_\_ Manual  Mechanized  Automatic

Brazing Equipment \_\_\_\_\_

**BRAZING CONDITIONS**

**BASE METAL:**

Identification \_\_\_\_\_ BM No. \_\_\_\_\_

Thickness \_\_\_\_\_ Preparation \_\_\_\_\_

Other \_\_\_\_\_

**FILLER METAL:**

FM No. \_\_\_\_\_ AWS Classification \_\_\_\_\_

Form \_\_\_\_\_ Method of Application \_\_\_\_\_

FLUX: AWS Type \_\_\_\_\_ Other \_\_\_\_\_

ATMOSPHERE: AWS Type \_\_\_\_\_ Other \_\_\_\_\_

TEMPERATURE: \_\_\_\_\_ TEST POSITION: \_\_\_\_\_

TIME: \_\_\_\_\_ CURRENT: \_\_\_\_\_

FUEL GAS: \_\_\_\_\_ TIP SIZE: \_\_\_\_\_

POSTBRAZE CLEANING: \_\_\_\_\_

POSTBRAZE HEAT TREATMENT: \_\_\_\_\_

OTHER: \_\_\_\_\_

**JOINT:**

Type \_\_\_\_\_

Clearance \_\_\_\_\_

UTS \_\_\_\_\_

Other \_\_\_\_\_

Approved for production by \_\_\_\_\_  
Employer

JOINT SKETCH

**Figura 3.3.** Formato Brazing Procedure Specification de AWS (45).

### **3.2 *Análisis y preparación para el brazing de la aleación Ti-6Al-4V.***

Inicialmente la aleación de Ti-6Al-4V se encontraba en forma de barra de diámetro de una pulgada como se muestra en la Figura 3.4, la cual se cortó en discos de aproximadamente 3.5 mm de espesor como se muestra en la Figura 3.5



**Figura 3.4.** Barra de Ti-6Al-4V de una pulgada de diámetro.

Una vez cortada la barra en forma de discos se realizó la caracterización microestructural de la aleación. Las muestras se cortaron con un disco de carburo de silicio y durante este proceso se lubrico con agua para evitar modificación microestructural por el calor generado en el corte.



**Figura 3.5.** Discos de la aleación de Ti-6Al-4V de 3-4 mm de espesor y una pulgada de diámetro.

Después cada sección se montó en baquelita y se inició con el procedimiento de desbaste y pulido mecánico convencional para este tipo de aleaciones hasta alcanzar un acabado espejo. La secuencia de desbaste y pulido se presenta en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Secuencia de desbaste y pulido de la aleación Ti-6Al-4V.

| Paso | Superficie         | Lubricación/Suspensión                | Tiempo              |
|------|--------------------|---------------------------------------|---------------------|
| 1    | Lija de SiC, #320  | Agua                                  | lo que se necesite* |
| 2    | Lija de SiC, #1200 | Agua                                  | 5 min               |
| 3    | Paño MD-Largo      | Suspensión Alúmina 1 $\mu\text{m}$    | 10 min              |
| 4    | Paño MD-Largo      | Suspensión Alúmina 0.3 $\mu\text{m}$  | 15 min              |
| 5    | Paño MD-Largo      | Suspensión Alúmina 0.05 $\mu\text{m}$ | 20 min              |

\*Tiempo necesario para obtener una superficie visualmente plana.

La microestructura de la superficie del Ti6Al4V se puede observar cuando se logra un acabado espejo. Para diferenciar la fase ( $\beta$ ) dentro de la muestra se ataca químicamente la superficie pulida con el reactivo Kroll's, la composición de este es:

- 100 ml agua
- 1-3 ml ácido fluorhídrico
- 2-6 ml ácido nítrico

Este reactivo permitió realizar un mapeo de la aleación y observar su microestructura. También se realizó análisis de EDX para comprobar si la composición química era la correcta en la aleación y si la misma poseía otros elementos que luego pudieran crear fases no deseadas durante el proceso de brazing. Por último, se realizaron ensayos de dureza en la muestra tomando varias mediciones en distintos puntos con el objetivo de obtener un valor promedio. Se realizaron test de dureza en HRC y HV.

Después de los cortes de la aleación, la superficie de la aleación Ti-6Al-4V se limpió hasta obtener visualmente superficies limpias de polvo y otros posibles contaminantes. Cabe destacar que antes de realizar el proceso de brazing hay que realizar una nuevamente la limpieza de los discos de Ti-6Al-4V.

### ***3.3 Análisis y preparación para el brazing del compuesto SiC.***

El compuesto de carburo de silicio (SiC) se cortó en secciones de 15x17x5 mm (ver Figura 3.6) luego de realizar el corte se utilizó una lija numero 80 hasta dejar la superficie y lados lo más homogénea posible de cualquier irregularidad causada por el corte, con esto se aseguró que la superficie de SiC tuviese una rugosidad favorable para la adherencia de la misma con la aleación de aporte. En el compuesto cerámico de SiC se realizaron ensayos de dureza en varias muestras y en varias zonas.



**Figura 3.6.** Piezas de SiC después de efectuado el corte.

Finalmente se limpiaron todas las muestras con alcohol para eliminar cualquier impureza o contaminante de la superficie del mismo como grasa o suciedad y evitar defectos en el proceso de unión.

### ***3.4 Elaboración, análisis y preparación para el brazing de las aleaciones de aporte base Ag-Cu-Ti.***

Se planteó la elaboración de 4 aleaciones base Ag-Cu-Ti con adiciones de Cr y Ni. La composición química nominal se muestra la Tabla 3.2. Antes de la fundición de las aleaciones desarrollaron las condiciones óptimas para el correcto desarrollo de este proceso. Se fabricaron crisoles desechables para que se pudieran romper una vez enfriada la aleación, ya que la misma no se podía vaciar en moldes por la alta reactividad del titanio en la aleación este puede ser muy explosivo al reaccionar con el oxígeno presente en el aire. Los crisoles se fabricaron utilizando los siguientes componentes:

- Primcote (aglutinante + sílica coloidal)
- Óxido de zirconio.
- Arena sílice fina

**Tabla 3.2.** Composición química deseada de las aleaciones de aporte a base Ag-Cu-Ti

| Aleación Filler | Ag - Wt.% | Cu - Wt.% | Ti - Wt.% | Cr - Wt.% | Ni - Wt.% |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ag-Cu-Ti        | 70.0      | 25.0      | 5.0       | -         | -         |
| Ag-Cu-Ti-Ni     | 70.0      | 23.0      | 5.0       | 2.0       | -         |
| Ag-Cu-Ti-Cr     | 70.0      | 23.0      | 5.0       | -         | 2.0       |
| Ag-Cu-Ti-Cr-Ni  | 70.0      | 21.0      | 5.0       | 2.0       | 2.0       |

Una vez realizada una mezcla homogénea de estos componentes se aplicaron aproximadamente 18 capas y cada capa se aplicaba cada 2 horas asegurando así que tuviera las propiedades para soportar térmicamente. Estos crisoles luego fueron sinterizados en un horno a 650°C durante 45 minutos aproximadamente. También se elaboró una tapa especial para el crisol con una apertura por donde se introduciría un tubo de alúmina para alimentar el sistema e inyectar del gas inerte.



**Figura 3.7.** Elementos a utilizar para crear las aleaciones de aporte (Ag, Cu, Ti, Cr, Ni).

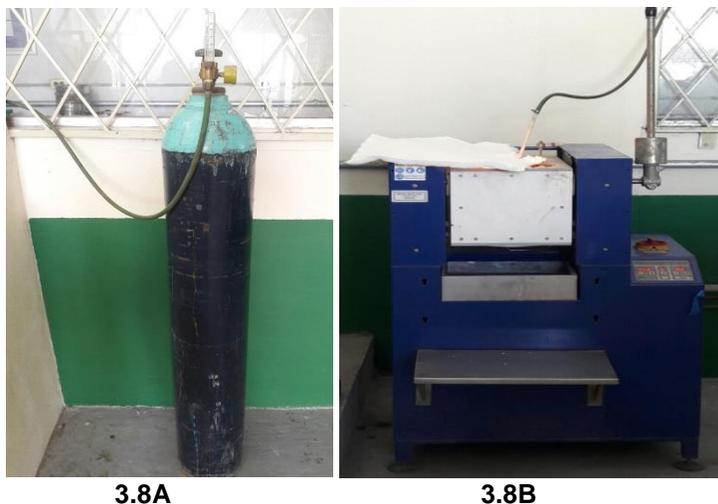
Se realizó el cálculo analítico para que las composiciones químicas de las aleaciones quedaran en los porcentajes deseados. Para ellos se estimó un peso de la aleación deseada y utilizando una balanza analítica se pesaron todos los componentes para cada aleación, de esa manera se aseguró que el porcentaje de cada elemento en peso

quedara en los óptimos valores que se calcularon. La Figura 3.7 muestra los componentes para la fabricación de las aleaciones de aporte.

El primer paso antes de realizar el proceso de fundición fue la colocación de un sistema simple de alimentación de gas argón para crear una atmósfera inerte dentro del crisol y evitar varios efectos no deseados los que se enlistan a continuación:

- Evitar la oxidación de la plata que es uno de los materiales base de estas aleaciones. Evitando que se oxide la plata evitamos también que la composición química de la aleación se mantenga en los parámetros deseados.
- Evitamos la reacción del titanio líquido con el oxígeno presente en el aire lo cual pudiera provocar explosiones dada la alta reactividad de este elemento.

La Figura 3.8 muestra como quedo la conexión del tanque de argón con el horno de inducción.



**Figura 3.8A** Tanque de argón lejos del horno por medidas de seguridad. **3.8B** Horno de inducción con el tubo de alúmina introducido en su interior y una colcha de fibra de vidrio encima de la tapa.

El tanque de argón se ubicó en un lugar fuera de la zona del horno por medidas de seguridad. Este sistema simple permitió mantener una atmosfera inerte evitando la oxidación y en general, la reactividad en la superficie del metal líquido.

Ya comenzado el proceso de fundición lo primero que se realizó al horno fue mantener el flujo de argón para desplazar el aire presente en el crisol. Luego se fue incrementando la temperatura gradualmente de manera se pudiera ir controlando el calentamiento, visualmente se verificó que no hubiera ningún cambio de coloración en

la plata, que nos indicara oxidación evidente. Se pudo apreciar que de los componentes de la aleación el primer en llegar a estado líquido fue la plata, el cual estando en ese estado que empezó a disolver el cobre y así otros elementos de aleación sucesivamente.

El último elemento en disolverse fue el titanio y una vez que se observó que ya estaba en estado líquido toda la aleación se le dio un tiempo de permanencia de alrededor de 10 minutos asegurando así que fuera homogénea la aleación. Las aleaciones se llevaron hasta 1100°C lo cual corresponde con el programa número 7 del horno de inducción (ver Figura 3.9).



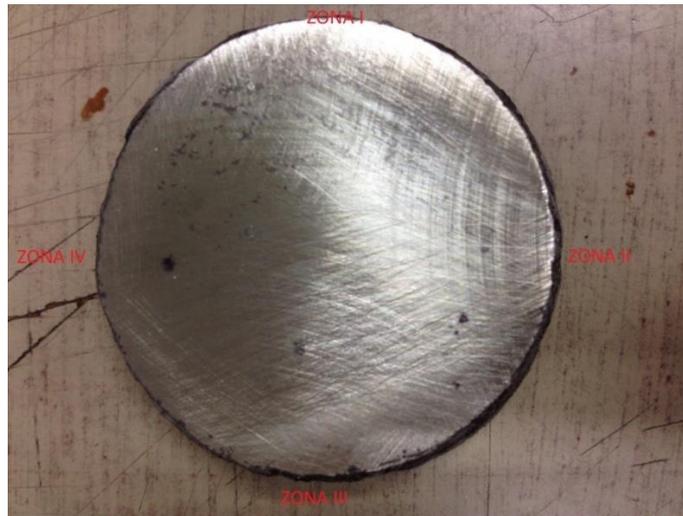
**Figura 3.9.** Horno a 1100 °C, el tiempo de permanencia una vez disuelto todos los componentes de la aleación fueron 10 minutos.

Una vez realizado todo el proceso de fundición satisfactoriamente y asegurándonos la homogeneidad de la aleación, se bajó la temperatura en el horno hasta solidificar la aleación para sacarla e introducir la siguiente, vale destacar que durante todo ese tiempo hasta que no se observó que estuviera sólida la aleación se mantuvo el flujo de argón constante por razones ya explicadas anteriormente. Una vez enfriado el crisol que se extrajo del horno de inducción se rompe el mismo para obtener preforma de la

aleación. Se obtuvieron piezas en forma de disco y mediante métodos mecánicos se removieron todas las impurezas superficiales que quedaban adheridas a la misma.

### ***3.5 Caracterización de las aleaciones de aporte.***

Las aleaciones de aporte a caracterizar por diferentes técnicas se pulieron y se le realizaron análisis de microscopía luego de un mapeo completo en toda la superficie de la misma se pudo observar la microestructura. También se realizó análisis de EDS con el objetivo de analizar si la composición química era la deseada, y la posible fase y de elementos no deseados que pudieran alterar los resultados esperados. Por último, se realizaron ensayos de microdureza en las aleaciones para obtener la mayor información posible de estas aleaciones.



**Figura 3.10.** Superficie del disco antes de realizar el análisis de XRD.

### ***3.6 Proceso de análisis mecánico de las aleaciones de aporte y preparación antes del brazing.***

Una vez concluido con toda la caracterización se realizó el corte de las aleaciones en pequeñas tiras de 1-2 mm (ver Figura 3.11) aproximadamente, las que luego fueron laminadas en frío, para realizar el corte se utilizó un disco de diamante a bajas revoluciones y en todo momento lubricando la zona de corte con agua evitando así que un aumento de la temperatura pudiese modificar la microestructura.



**Figura 3.11.** Corte de la aleación en láminas de 1-2 mm de espesor.

Se realizó el proceso de laminación finalidad de tener cintas metálicas de un espesor promedio de 0.5 mm. En este paso la microestructura resultante no es prioridad ya que el proceso de brazing involucra la fusión del material de aporte.

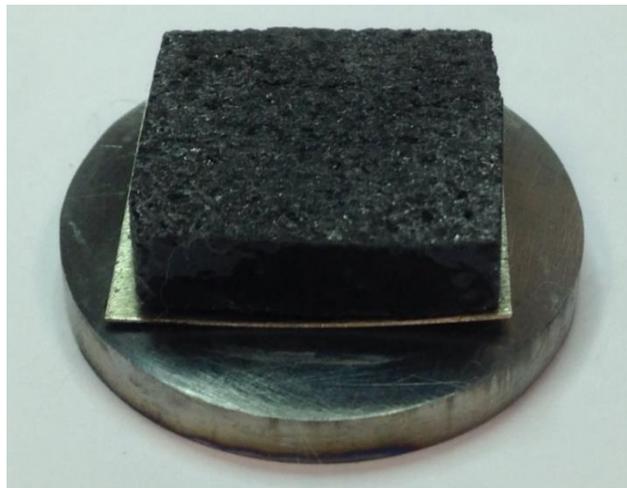


**Figura 3.12.** Aleaciones de aporte luego de laminación.

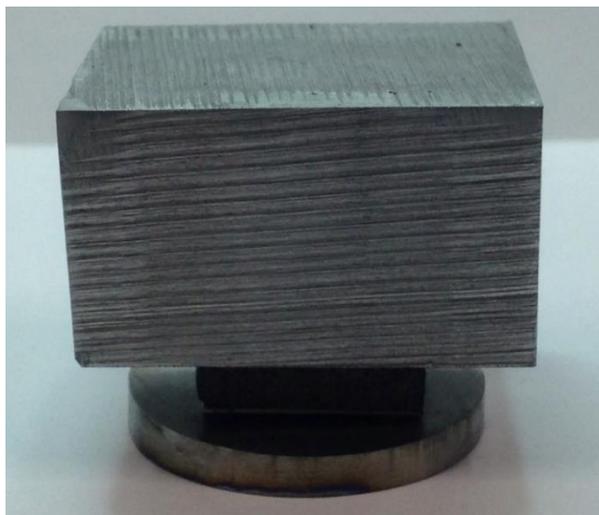
Por último, una vez que se obtuvieron las láminas de la aleación con el espesor deseado y como se muestra en la imagen 3.12, se limpiaron las superficies de las mismas con un equipo de desbaste para retirar toda impureza que se pudiera impregnar en la superficie de la misma sobre todo en el proceso de laminado. Posteriormente se cortó en secciones de 15x17 mm, las mismas dimensiones que poseen las muestras de SiC. Las mismas se limpiaron cuidadosamente para retirar cualquier resto de grasa o suciedad de su superficie.

### ***3.7 Proceso de soldadura brazing.***

Una vez que se limpiaron los materiales base a unir y la aleación de aporte con etanol, justo antes del proceso de brazing, se colocó la misma de la manera que a continuación se muestra ver las Figuras 3.13a y 3.13b, la cual es la forma en que se realizaría la unión. En ella se puede observar cómo está la aleación de Ti-6Al-4V, luego la aleación de aporte y arriba el SiC, encima está colocado un pequeño bloque de acero inoxidable de 95 gramos que tiene la función de ejercer una fuerza de 0.93 N con el objetivo de que se mantengan unidas las superficies a soldar, cabe destacar que todas las medidas explicadas en el inicio de este capítulo se consideraron para garantizar así una buena superficie de contacto de todas las interfaces.



**Figura 3.13A.** Esquema de cómo fueron colocadas las piezas a unir dentro del horno.



**Figura 3.13b.** Esquema de cómo fue colocado las piezas a unir dentro del horno.

Una vez que las piezas están listas para unirse se cierra el horno no sin antes instalar la lanza por la parte superior del mismo la cual tiene la función de crear un flujo de argón hacia la cámara del horno. Se revisó todas las aperturas del horno y verificó que estuvieran lo más herméticas posibles, algunas aberturas se sellaron con silicona de alta temperatura y así se evitó la fuga de gas hacia el exterior del horno (para una mayor comprensión ver las imágenes 3.14 y 3.15).



**Figura 3.14.** Imagen interior del horno donde se realizó el casting por atmosfera inerte.

Una vez sellado todo el horno se realizó un barrido de argón a en la cámara interior del mismo para así desplazar la mayor cantidad de aire posible y evitar oxidación



**Figura 3.15.** Exterior del horno donde se realizó el casting por atmosfera inerte.

Luego del barrido de argón se inició el procedimiento térmico de brazing el cual se realizó según los parámetros que se muestran en la Tabla. 3.3. Fue muy importante el mantener estos parámetros controlados en todo momento ya que de otra manera hubiese podido ocasionar la unión deficiente de los materiales. El deterioro de la calidad de la unión puede ser provocado ya sea por un cambio brusco de temperatura que, debido a los diferentes coeficientes de expansión térmica o un exceso de temperatura, tiempo de brazing afectaría la aleación de aporte.

**Tabla 3.3.** Parámetros de brazing.

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Temperatura de Brazing                   | 750 °C                  |
| Tiempo de permanencia                    | 5 min                   |
| Rango de calentamiento                   | 8.0 °C /min             |
| Rango de enfriamiento I (750 °C -400 °C) | 3.8 °C /min             |
| Rango de enfriamiento II (400 °C -50 °C) | 4.6 °C /min             |
| Flujo de Argón al horno                  | 8.0 l/min               |
| Presión del Argón al horno               | 3.5 kgf/cm <sup>2</sup> |

La muestra al salir quedo como se muestra en Figura 3.16, esta no mostró ningún efecto anormal en la soldadura tal como deformación plástica cambio de coloración u otros efectos no deseados.



**Figura 3.16.** Imagen donde se puede observar las piezas unidas después del brazing (Ag-Cu-Ti-Cr-Ni).

### 3.8 *Análisis microscópicos realizados a las uniones después del brazing.*

Las uniones realizadas se analizaron por diversas técnicas, tales como SEM, y EDX con el objetivo de observar las características microestructurales y de interfaces que se formaron y poder evidenciar fenómenos a nivel microestructural que ocurrieron durante el brazing. Se realizaron también ensayos mecánicos de tensión en una máquina de ensayos universal con el objetivo de observar las propiedades mecánicas de las uniones. Con los estudios antes mencionados fue posible contar con las herramientas necesarias para definir las características y propiedades de las uniones y llegar a las conclusiones de esta investigación.

**Tabla 3.4.** Parámetros de corte de las piezas unidas.

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| Avance                | 0.010 mm/s |
| RPM                   | 1500       |
| Fuerza                | Alta       |
| Método de lubricación | Agua       |
| Tiempo promedio corte | 45 min     |

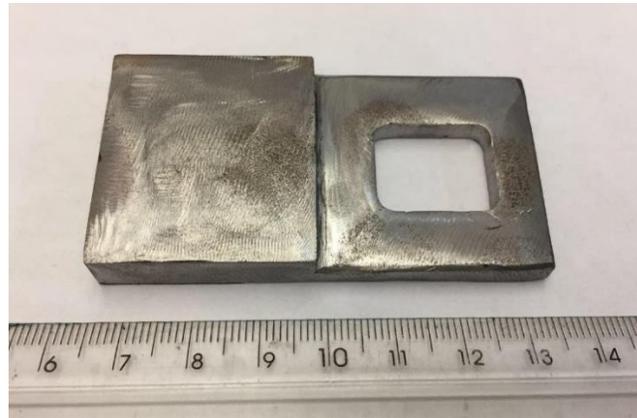
Para llevar a cabo el análisis metalográfico las muestras fueron cortadas y montadas en resina para su posterior preparación para ensayos no destructivos tales como SEM y EDX. Se pulieron utilizando distintos números de lijas de carburo de silicio, empezando por el número 120 y terminando en un paño el tiempo para cada pieza vario según la destreza a la hora de realizar el pulido y el estado de los paños y lijas que como ya conocemos se degradan con el uso. (Ver Figura 3.17)



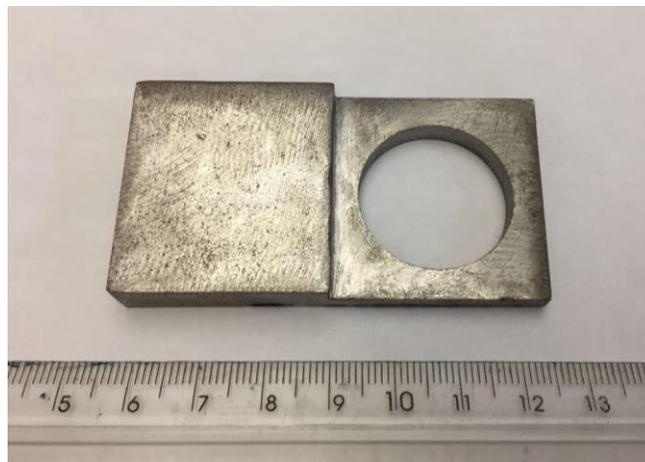
**Figura 3.17.** Uniones después de realizado el corte con disco de diamante aleación de aporte (Ag-Cu-Ti).

### **3.9 Ensayos de tensión a las uniones soldadas.**

Para la realización del ensayo de tensión fue necesario diseñar y fabricar unos soportes que nos permitieran poder montar las piezas en una máquina de ensayos universal. El diseño quedó tal y como se muestra en Figuras 3.18 y 3.19. Todo esto fue necesario por el tamaño y la geometría de las uniones



**Figura 3.18.** Soporte para ensayo de tensión, lado de la probeta SiC.



**Figura 3.19.** Soporte para ensayo de tensión, lado de la probeta Ti-6Al-4V.

Se utilizó una máquina de ensayos universal ZWICK-Z100, (ver Figura 3.20). Inicialmente al montar las muestras como se puede apreciar en la Figura 3.21, se configuró la máquina como una carga inicial de 0.5 MPa, con el objetivo de que las muestras una vez montadas en los soportes se ajustasen, evitando así que queden mal montadas.

Una vez asegurado que las piezas estuvieran en la posición correcta se procedió a realizar los ensayos de tensión, para lo cual fue necesario introducir a la computadora del equipo los diferentes nombres de las aleaciones, área de la unión de ambos materiales,  $255 \text{ mm}^2$  y la velocidad de desplazamiento de la máquina,  $10 \text{ mm}/\text{min}$ . Se realizaron un total de 12 ensayos, 3 por cada tipo de aleación base.

Todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente y con la debida protección, usando para ello un cristal acrílico de  $1.50 \times 2 \text{ m}$  en el frente de la máquina.



**Figura 3.20.** Máquina universal ZWICK-Z100.

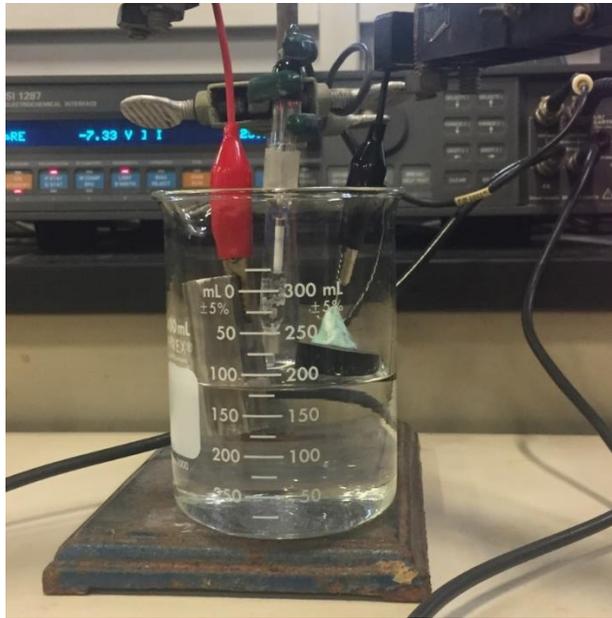


**Figura 3.21.** Muestras montadas en los soportes fabricados, instantes antes de realizar las pruebas.

### ***3.10 Pruebas de resistencia a la corrosión de las aleaciones de aporte.***

Para el ensayo de corrosión se utilizó un potenciómetro Solartron, modelo SI 1287. Las probetas fueron cortadas a  $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}$  para cada aleación las cuales fueron colocadas en baquelita, para poder sumergir solo una cara de la pieza y que la misma estuviera conectada al equipo. Una vez montada la muestra se limpió con alcohol retirando cualquier tipo de impureza o grasa de la superficie a sumergir en la disolución de NaCl al 3.5%. En la Figura 3.22 se muestra la probeta de la aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni momentos antes de comenzar el ensayo electroquímico. Todos los ensayos fueron

realizados con la finalidad de obtener las curvas de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR) de cada aleación.



**Figura 3.22.** Probeta de Ag-Cu-Ti-Cr-Ni momentos antes de comenzar el ensayo.

## Capítulo IV. Discusión y resultados.

### 5.1 *Análisis de composición química aleación Ti-6Al-4V.*

Se realizó un análisis de composición química para comprobar que la muestra se encuentra dentro de los parámetros de la composición según las normas correspondientes a dicho material (ASTM y ASM) (Ti-6-4; UNS R56400; ASTM Grade 5 titanium; UNS R56401 (ELI); Ti6Al4V) la cual se muestra a continuación en la tabla 4.1:

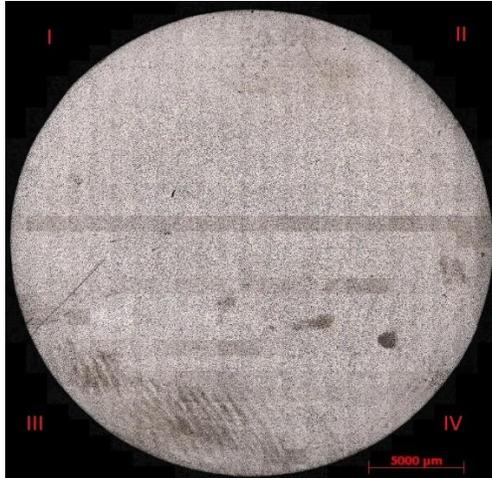
**Tabla 4.1.** Tabla comparativa de composición en Wt. % de la aleación Ti-6Al-4V según la ASM (Aerospace Specification Materials Inc.) y resultados obtenidos en el laboratorio.

| Componente | Standar ASM (Wt.%) | Nominal (Wt. %) |          |
|------------|--------------------|-----------------|----------|
| Al         | 6                  | 6.34            | +/- 0.15 |
| Fe         | Max 0.25           | 0.18            | +/- 0.02 |
| O          | Max 0.2            | -               | -        |
| Ti         | 90                 | 89.47           | +/- 0.43 |
| Va         | 4                  | 4.01            | +/- 0.14 |

En las columnas de la derecha se muestran los valores diferenciales con respecto a la norma. Comprobándose con dicho análisis que la muestra se encuentra en los parámetros especificados por las normas.

### 5.2 *Microscopia óptica aleación Ti-6Al-4V.*

Las superficies pulidas y atacadas químicamente se observaron y analizaron en un microscopio óptico a diferentes magnificaciones. Los resultados de estas observaciones se presentan a continuación. En la Figura 4.1 se presenta el mapeo realizado a la muestra, en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran las magnificaciones de la zona I a 10X, 20X y 50X respectivamente.



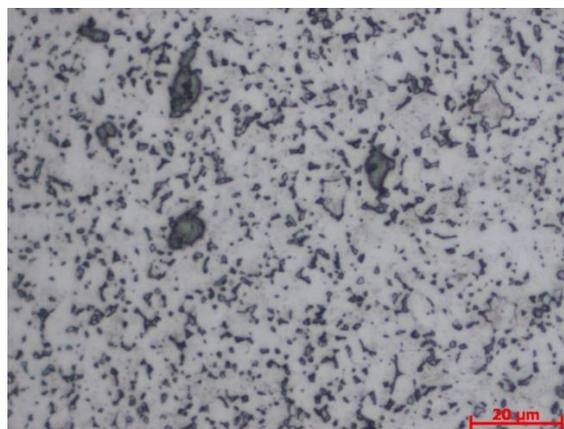
**Figura 4.1.** Mapeo realizado a una muestra de la aleación Ti-6Al-4V.



**Figura 4.2.** Magnificación de la zona I a 10X, aleación Ti-6Al-4V.



**Figura 4.3.** Magnificación de la zona II a 20X, aleación Ti-6Al-4V.



**Figura 4.4.** Magnificación de la zona III a 50X, aleación Ti-6Al-4V.

Como se aprecia en las Figuras anteriores la microestructura consiste en granos equiaxiales de fase  $\alpha$  y placas de Widmanstätten de fase  $\alpha$  de pequeño tamaño. La fase  $\beta$  rodea los granos y las placas de  $\alpha$ . Cuando el material se somete a tratamientos térmicos a temperaturas superiores a la  $\beta$ -transus ( $T=1040^{\circ}\text{C}$ ), los granos se convierten en fase  $\beta$  y al enfriar lentamente se obtiene una estructura totalmente de placas  $\alpha$  de Widmanstätten rodeadas de fase  $\beta$  (54) (28).

Se realizaron 6 ensayos de dureza a la muestra en distintos puntos arrojando los siguientes valores que se pueden observar en la Tabla 4.2. La dureza promedio de la muestra analizada de dicha aleación es de 32.95 HRC. También se realizaron ensayos de durezas Vickers los resultados que se muestran en la siguiente Tabla. Se obtuvo como dureza promedio en varias zonas de la muestra 317.1 HV.

**Tabla 4.2.** Análisis de Microdureza en HRC y HV.

| Ensayos de Dureza | HRC   | HV    |
|-------------------|-------|-------|
| 1                 | 31.8  | 322.2 |
| 2                 | 33.0  | 310.1 |
| 3                 | 33.1  | 317.3 |
| 4                 | 33.0  | 315.6 |
| 5                 | 33.3  | 320.3 |
| 6                 | 33.5  | 318,1 |
| Promedio          | 32.95 | 317.1 |

Como se pudo apreciar esta aleación posee alta dureza y como es conocido por su naturaleza química alta resistencia a la corrosión. Su contenido de aluminio comparativamente alto les da excelente resistencia mecánica y buenas propiedades a temperaturas elevadas. Esta aleación por estar formada por fases  $\alpha$  y  $\beta$  tiene una mayor resistencia mecánica y responde a tratamientos térmicos, pero es menos maleable que las aleaciones  $\alpha$ . Permite obtener soldaduras por fusión con eficiencias de hasta el 100%, por lo que es evidente que la misma posee buena soldabilidad, aspecto que para nuestra investigación es de suma importancia. El aluminio como elemento aleante, estabiliza la fase  $\alpha$  y aumentan la temperatura de transformación, en tanto que el vanadio y otros estabilizan la fase  $\beta$  y reducen la temperatura de transformación, otro elemento presente en la aleación de aporte que también reducen la temperatura de transformación es el cromo. Los  $\beta$ -estabilizadores isomorfos, como el vanadio no forman compuestos intermetálicos con el titanio BCC; mientras que el Cromo y el Níquel  $\beta$ -estabilizadores eutécticos, forman sistemas eutécticos con el titanio. Estos dos últimos elementos presentes en las aleaciones de aporte a utilizar para la soldadura brazing. Los  $\beta$ -estabilizadores eutécticos minimizan la formación de compuestos intermetálicos que puede ocurrir en el servicio a altas temperaturas y resulta en una mejora de las propiedades mecánicas (23) (25).

### 5.3 Caracterización de las aleaciones de aporte.

A las aleaciones de aporte obtenidas se le realizó un control de su composición química, para ello se utilizó un equipo de fluorescencia de rayos X, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.3 que se muestra a continuación.

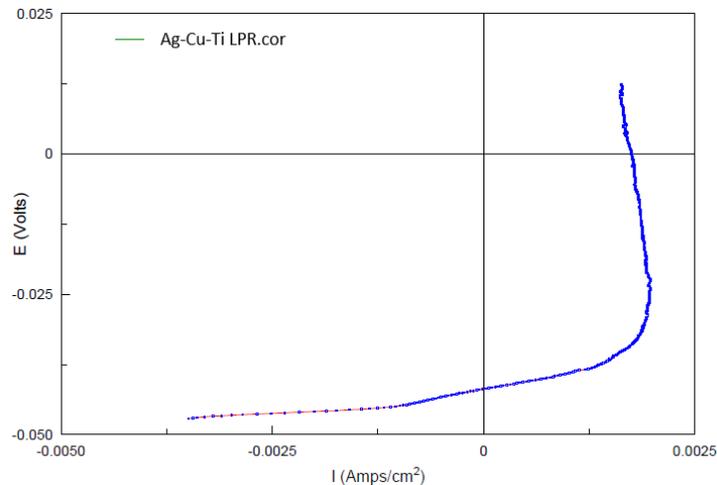
**Tabla 4.3.** Composición química de las aleaciones de aporte a base Ag-Cu-Ti.

| Aleación Filler | Ag-Wt.% | Cu-Wt.% | Ti-Wt.% | Cr-Wt.% | Ni-Wt.% | Al-Wt.% | V-Wt.% | Otros |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|-------|
| Ag-Cu-Ti        | 69.5    | 24.2    | 4.89    | 0       | 0       | 0.27    | 0.18   | 0.96  |
| Ag-Cu-Ti-Ni     | 69.8    | 22.1    | 4.94    | 1.92    | 0       | 0.28    | 0.19   | 0.77  |
| Ag-Cu-Ti-Cr     | 69.7    | 22.1    | 4.92    | 0       | 1.92    | 0.25    | 0.19   | 0.92  |
| Ag-Cu-Ti-Cr-Ni  | 69.6    | 20.4    | 4.96    | 1.87    | 1.77    | 0.26    | 0.17   | 0.97  |

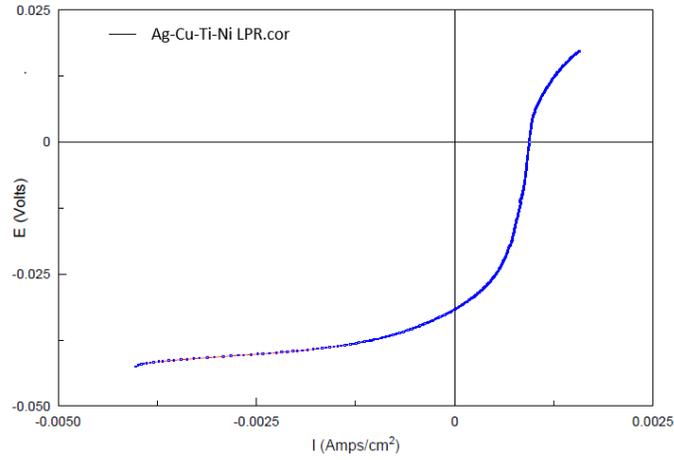
Para la obtención de estos resultados se realizaron varios ensayos por cada muestra y en diferentes zonas de las mismas comprobando así también que la aleación fuera homogénea, ya que presenta elementos de mayor punto de fusión que la plata como el titanio, cromo y níquel. En la Tabla 3.3 se muestran los valores que representan un promedio de esas mediciones. Este ensayo es de suma importancia dado que es uno de los pilares de la investigación dado que se observan las diferencias en el brazing entre las diferentes aleaciones de aporte. Los resultados de composición química corresponden con los cálculos realizados para el diseño de las aleaciones de estudio.

#### **5.4 Pruebas de corrosión a las aleaciones de aporte.**

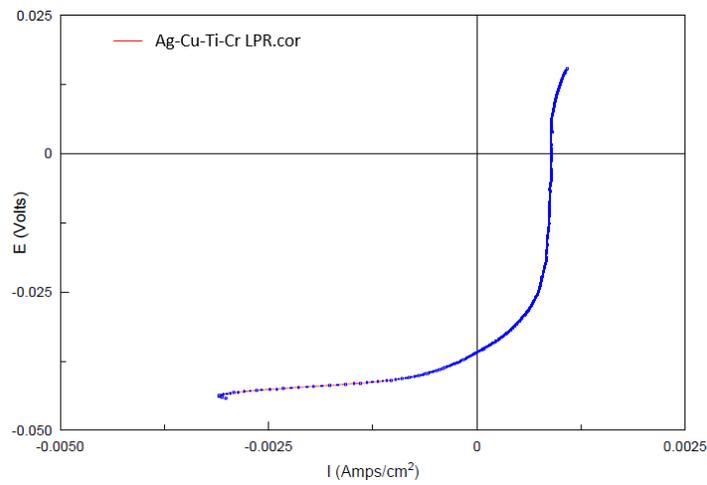
Como resultados de los análisis de resistencia de las aleaciones de aporte a la corrosión se obtuvieron y analizaron curvas de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR) de cada aleación, estas se muestran en las Figuras de la 4.5 a la 4.9. También se muestra un gráfico LPR de todas las aleaciones para facilitar la comprensión de los resultados.



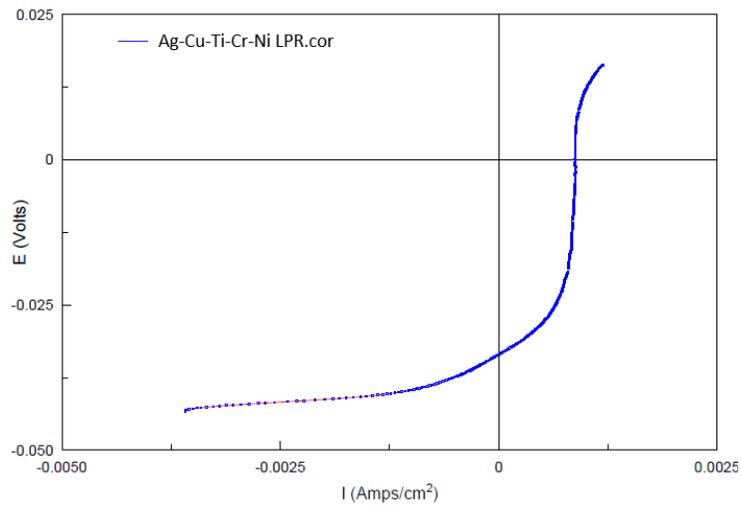
**Figura 4.5.** Resistencia a la polarización lineal LPR. Aleación Ag-Cu-Ti.



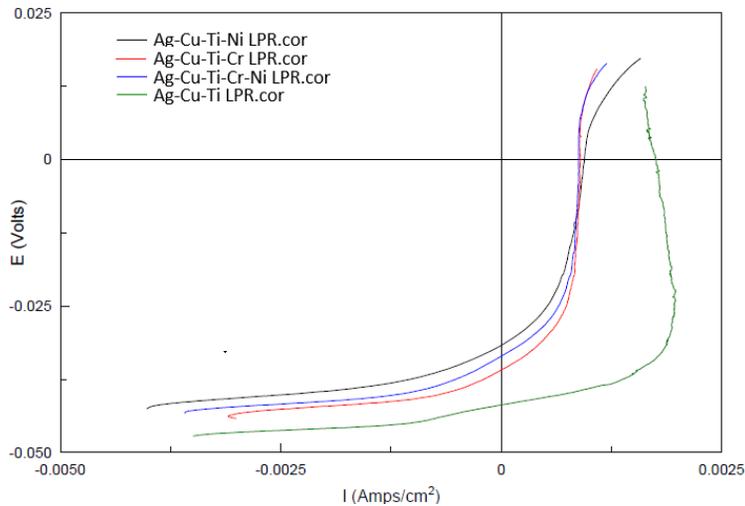
**Figura 4.6.** Resistencia a la polarización lineal LPR. Aleación Ag-Cu-Ti-Ni.



**Figura 4.7.** Resistencia a la polarización lineal LPR. Aleación Ag-Cu-Ti-Cr.



**Figura 4.8.** Resistencia a la polarización lineal LPR. Aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.

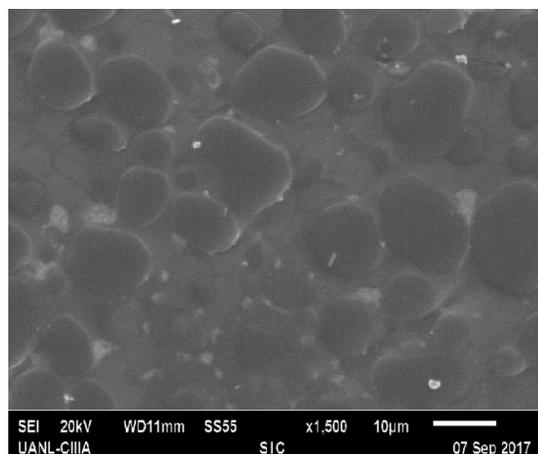


**Figura 4.9.** Resistencia a la polarización lineal LPR, aleaciones de aporte.

Las curvas de LPR obtenidas de los ensayos de resistencia a la corrosión nos muestran que es evidente que elementos como Cr y Ni en la aleación de aporte aumentan este indicador. Existe una ligera diferencia de las curvas de las aleaciones de aporte Ag-Cu-Ti-Ni, Ag-Cu-Ti-Cr y Ag-Cu-Ti-Cr-Ni; son muy similares pero la pendiente de la última es ligeramente mayor a las otras dos. Y entre las dos primeras la que presenta Cr es ligeramente mayor la pendiente que la que presenta Ni. La pendiente y la ubicación de las gráficas nos ofrecen la comparación entre ellas mientras menor sea la Intensidad de la corriente por área  $Amps/cm^2$ , mayor será la resistencia a la corrosión. Similar ocurre con la pendiente de las curvas mientras mayor sea esta, mayor será la resistencia a la corrosión.

### **5.5 Resultados de microscopía óptica a SiC**

El SiC después de haber sido cortado y limpiado fue caracterizado, resultados se muestran a continuación. Las superficies una vez pulidas y limpiado con alcohol, se observaron y analizaron en un microscopio electrónico de barrido, con el fin de tener una mayor perspectiva de sus características superficiales, la cual se muestra en la imagen 4.10.



**Figura 4.10.** Micrografía del SiC a 1500X.

### **5.6 Composición química del SiC.**

Se realizó un análisis de composición química del compuesto SiC y los resultados se muestran a continuación en la Tabla 4.4

**Tabla 4.4.** Composición química del SiC.

| C-Wt.% | Si-Wt.% | Otros |
|--------|---------|-------|
| 29.7   | 64.6    | 5.7   |

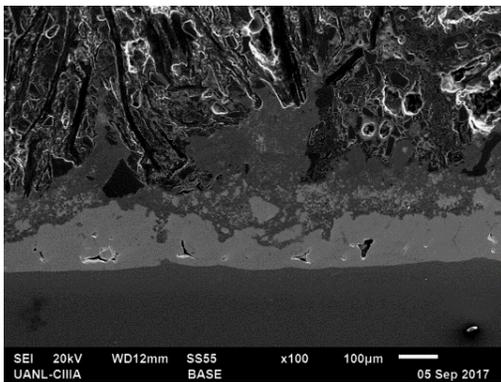
La ficha técnica del producto especifica que su composición es 30% carbono, 65% Si y el restante 5% es otros elementos no metálicos utilizados como aglutinantes.

La alta porosidad presente en el SiC puede ser un punto favorable y negativo a la vez para este tipo de uniones, favorable en el sentido que aumentaría la permeabilidad y nivel de penetración de la aleación de aporte en el SiC, lo que provocaría un aumento de las propiedades mecánicas en la zona sobre todo de la unión; el punto negativo pudiese ser que la alta porosidad sea contraproducente a las propiedades mecánicas de este compuesto. La estabilidad mecánica de la interface dependerá de la permeabilidad, oxidación y formación de fases. El alto contenido de Si será fundamental en la zona de la unión para actuar como un desoxidante e incluso pudiese actuar como un endurecedor, lo que aumentaría las propiedades mecánicas en dichas zonas y evitaría la oxidación de la aleación de aporte.

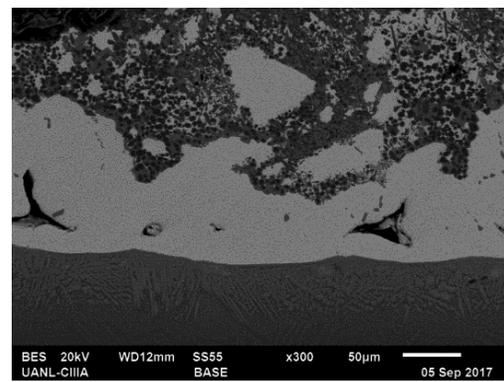
## 5.7 *Análisis Microestructural después del brazing*

Las muestras cortadas y pulidas fueron observadas en un Microscopio Electrónico de Barrido, los resultados se muestran a continuación. Se observan inicialmente cada tipo de aleación a diferentes magnificaciones 100X, 300X y 1500X. En esta última existen dos imágenes representativas mostrando la unión de la aleación de aporte con el SiC y en otra con la aleación de Ti-6Al-4V. En los resultados del EDX se muestra un mapeo y microanálisis en varias secciones de la unión del material de aporte, con ambos materiales base.

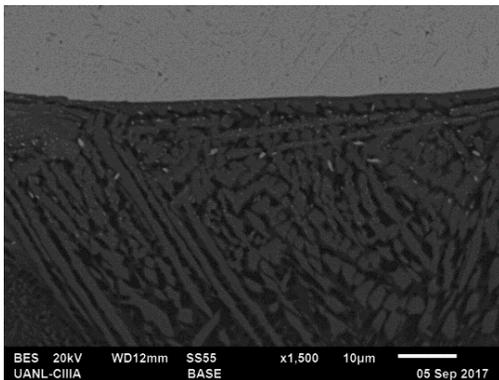
### 5.7.1 *Unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti.*



**Figura 4.11.** Aleación de aporte Ag-Cu-Ti.

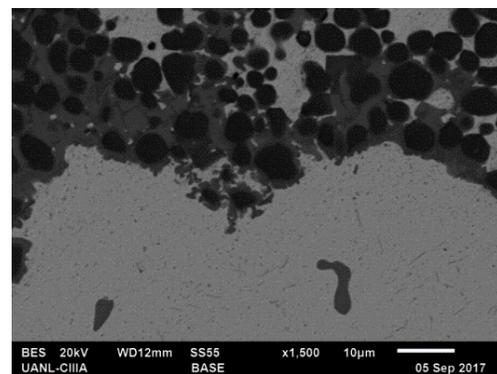


**Figura 4.12.** Aleación de aporte Ag-Cu-Ti.



**Figura 4.13.** Aleación de aporte Ag-Cu-Ti.

Sección de unión entre aleación de aporte y Ti-6Al-4V.



**Figura 4.14.** Aleación de aporte Ag-Cu-Ti.

Sección de unión entre aleación de aporte y SiC.

Como se aprecia en las Figuras de la 4.11 a la 4.14 en todas las zonas la unión se observa buena humectabilidad y penetración de la aleación de aporte Ag-Cu-Ti, en la

zona del SiC se puede apreciar como penetra por las cavidades del material debido a la alta porosidad del mismo. En la zona de la unión con la aleación de Ti-6Al-4V se observa la formación de dentritas, lo que es un aspecto positivo ya que evidencia la penetración de la aleación de aporte y nos asegura mayor resistencia mecánica. Se puede apreciar la presencia de cavidades, las cuales pueden ser consideradas como defectos de la unión, las mismas pudieron ser provocadas por falta de material de aporte, o la no correcta unión de las superficies a unir.

### 5.7.2 Unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr.

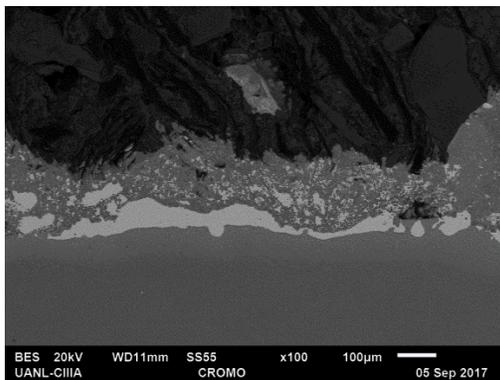


Figura 4.15. Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr

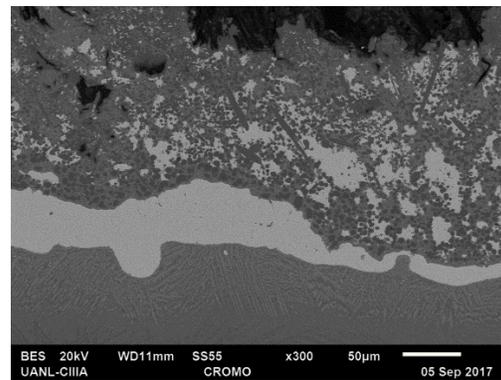


Figura 4.16. Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr

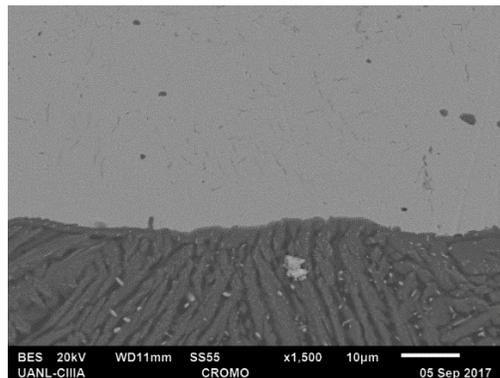


Figura 4.17. Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr.

Sección de unión entre aleación de aporte y Ti-6Al-4V.

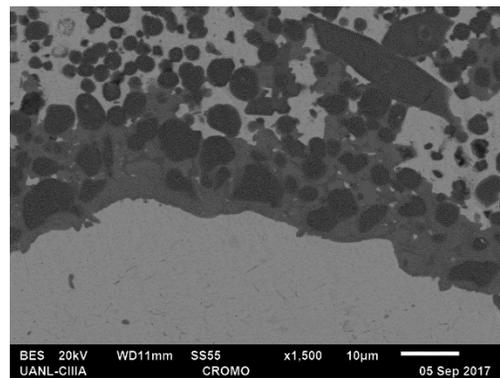


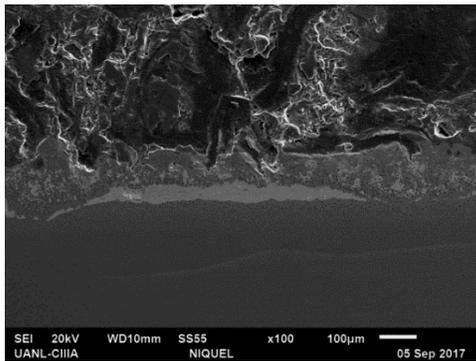
Figura 4.18. Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr.

Sección de unión entre aleación de aporte y SiC.

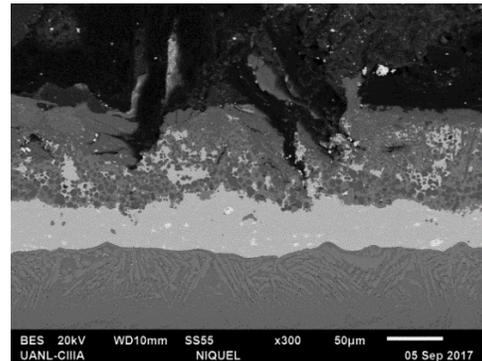
Como se observa en las Figuras de la 4.15 la unión con la aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr presento mayores zonas donde no se logró una correcta unión, como habíamos mencionado anteriormente estas pudieron ser provocadas por falta de material de aporte, o la no correcta unión de las superficies a unir. En las zonas donde se logró una

correcta unión como se observa en las Figuras 4.16 a la 4.18 existe buena humectabilidad y penetración de la aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr, en la zona del SiC se puede observar como difundió debido a la alta porosidad del mismo lo cual facilita dicho efecto. En la zona de la unión con la aleación de Ti-6Al-4V se observa la formación de dendritas, lo que es un aspecto positivo ya que evidencia la penetración de la aleación de aporte y nos asegura mayor resistencia mecánica.

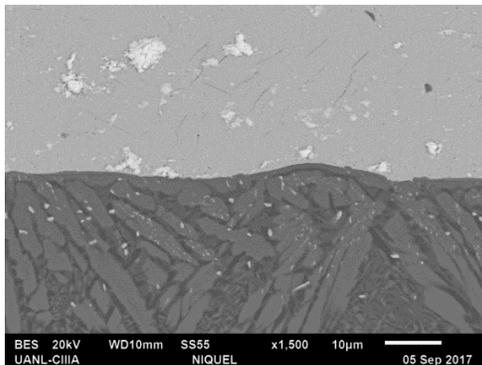
### 5.7.3 Unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni.



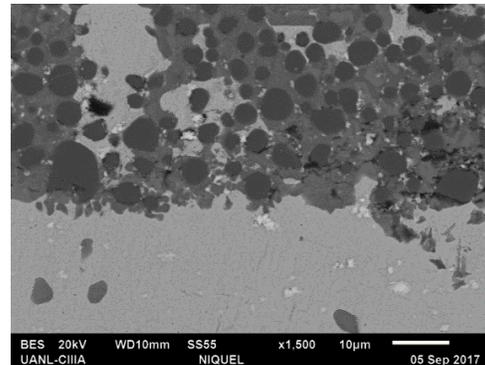
**Figura 4.19.** Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni.



**Figura 4.20.** Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni.



**Figura 4.21.** Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni.  
Sección de unión entre aleación de aporte y Ti-6Al-4V.



**Figura 4.22.** Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni.  
Sección de unión entre aleación de aporte y SiC.

La unión con la aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni como se observa en las Figuras 4.19 a la 4.22 se logró una correcta unión la presencia de cavidades y otros defectos es mucho menor que anteriores aleaciones de aporte también se aprecia buena humectabilidad y penetración de la aleación Ag-Cu-Ti-Ni. En la zona del SiC se puede

observar como la aleación de aporte penetra debido a la alta porosidad, en este caso se aprecia menor penetración que con las aleaciones de aporte Ag-Cu-Ti y Ag-Cu-Ti-Cr en el SiC. En la zona de la unión con la aleación de Ti-6Al-4V se observa la formación de dendritas al igual que en las aleaciones anteriores.

#### 5.7.4 Unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.

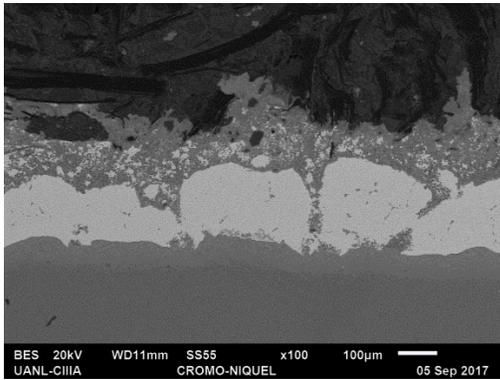


Figura 4.23. Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.

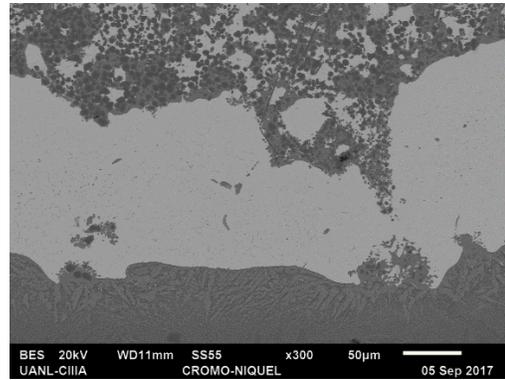


Figura 4.24. Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.

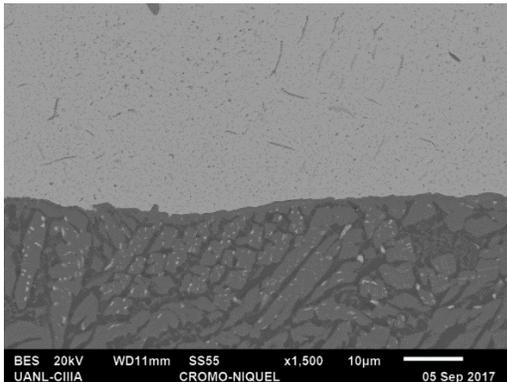


Figura 4.25. Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.  
Sección de unión entre aleación de aporte y Ti-6Al-4V.

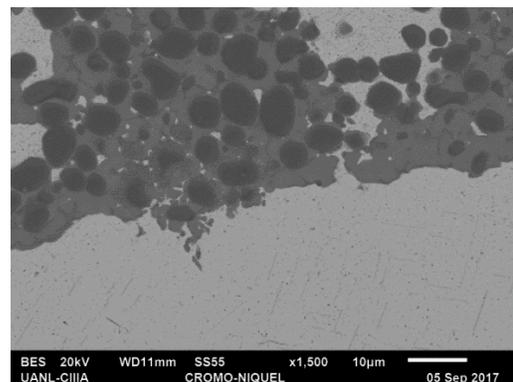
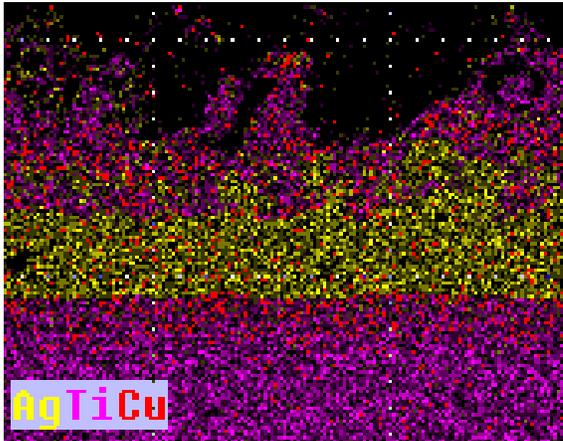


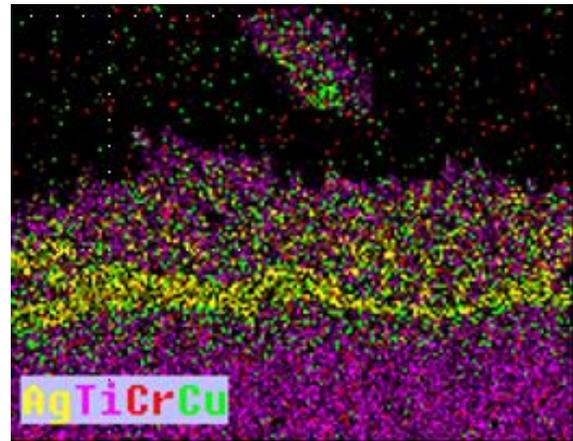
Figura 4.26. Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.  
Sección de unión entre aleación de aporte y SiC.

El brazing con la aleación de aporte como se observa en la Figuras de la 4.23 a la 4.26 presento mejor humectabilidad y la presencia de impurezas y cavidades es mucho menor que las aleaciones anteriores. Las dendritas son más abundantes y de mayor tamaño a medida que aumentan los componentes de aleación como Cr y Ni.

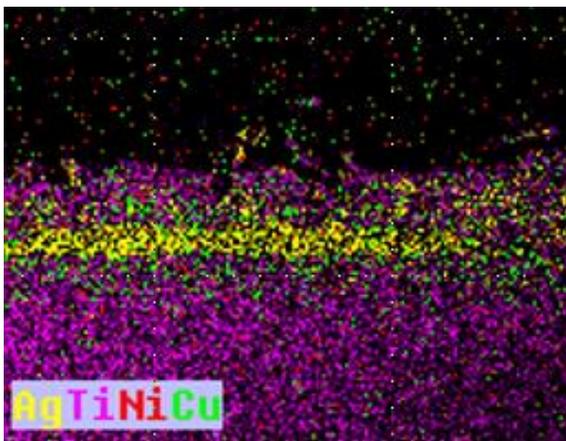
### 5.7.5 Mapeo de la unión de Ti-6Al-4V y SiC con las diferentes aleaciones de aporte.



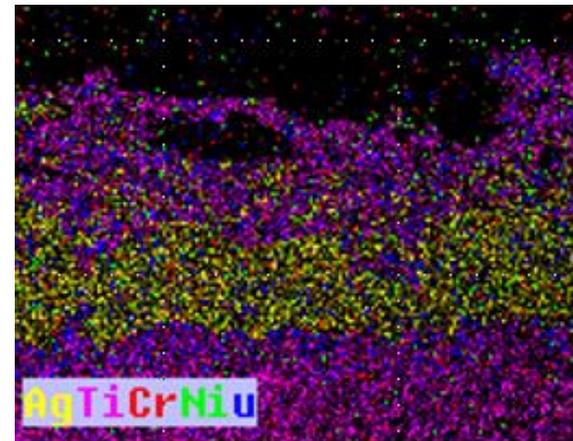
**Figura 4.27.** Mapeo a 100X de la aleación de aporte Ag-Cu-Ti, zona unión.



**Figura 4.28.** Mapeo a 100X de la aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr, zona unión.



**Figura 4.29.** Mapeo a 100X de la aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni, zona unión.



**Figura 4.30.** Mapeo a 100X de la aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni, zona unión.

En las Figuras de la 4.27 a la 4.30 se observa el comportamiento de cada aleación de aporte en la zona de la unión con ambos componentes bases, se aprecia como en la zona de unión con la aleación Ti-6Al-4V hay una correcta difusión aspecto antes observado en los análisis de EDX con la formación de dendritas (ver Figura 4.13, 4.17, 4.21 y 4.25). En las zonas de las aleaciones de aporte se observan zonas de color oscuro, estas corresponden a defectos de la unión. Este defecto se puede apreciar que van desapareciendo según las aleaciones de aporte presentan Cr y Ni como elementos

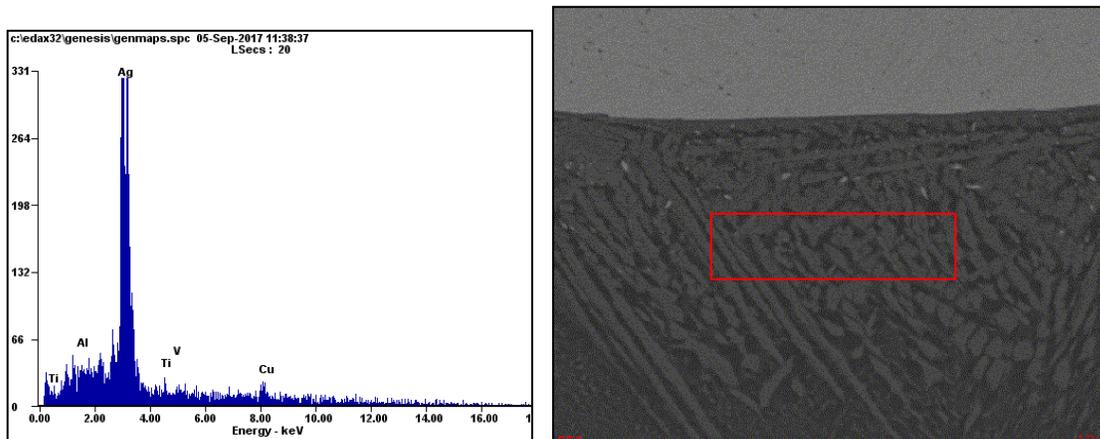
añadidos. Los elementos que se encuentran dispersos aleatoriamente por la superficie del SiC, lejos de la zona de unión son elementos que presentan el aglutinante de este compuesto cerámico.

### 5.7.6 Microanálisis de la unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti.

En la Tabla 4.5 y 4.6 se muestra el porcentaje atómico (At. %) y porcentaje de peso (Wt. %) de los componentes de la aleación Ag-Cu-Ti en la zona de unión con la aleación Ti-6Al-4V y el compuesto cerámico SiC respectivamente, en las Figuras 4.31 y 4.32 se muestran los gráficos resultados del microanálisis.

**Tabla 4.5.** Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti y material base Ti-6Al-4V.

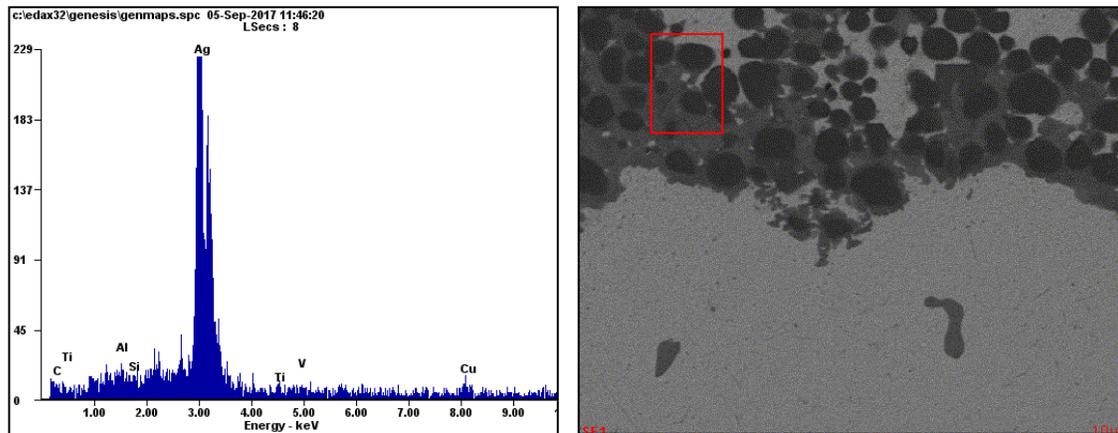
| Elemento | Wt. % | At %  |
|----------|-------|-------|
| Al       | 7.43  | 14.05 |
| Ag       | 13.16 | 6.22  |
| Ti       | 58.26 | 62.03 |
| V        | 3.64  | 3.65  |
| Cu       | 17.50 | 14.05 |



**Figura 4.31.** Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti y material base Ti-6Al-4V.

**Tabla 4.6.** Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti y material base SiC.

| Elemento | Wt.%  | At %  |
|----------|-------|-------|
| C        | 5.45  | 20.84 |
| Al       | 2.83  | 4.84  |
| Si       | 0.52  | 0.86  |
| Ag       | 20.18 | 8.60  |
| Ti       | 57.13 | 54.81 |
| V        | 0.19  | 0.17  |
| Cu       | 13.69 | 9.90  |



**Figura 4.32.** Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti y material base SiC.

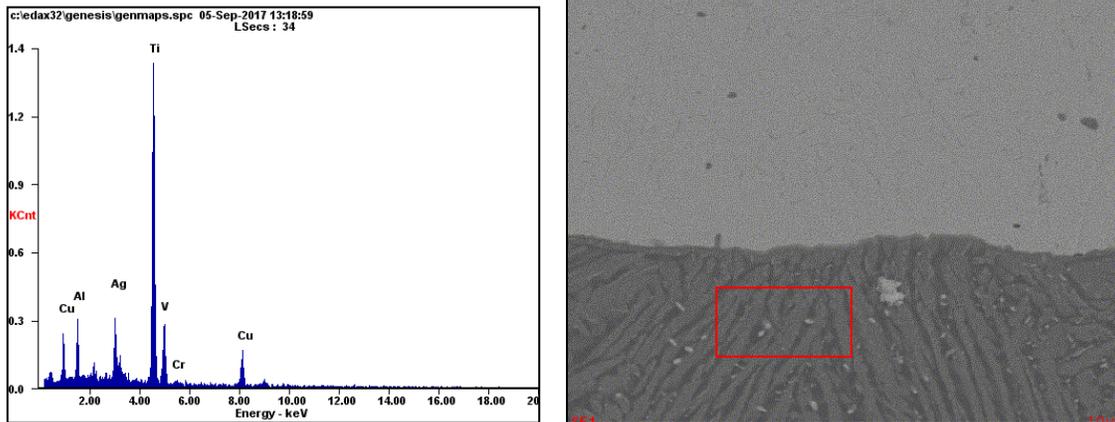
En la Figura de la 4.31 se aprecia el análisis de microanálisis de la aleación de aporte Ag-Cu-Ti con la aleación Ti-6Al-4V, se aprecia que el componente que más difunde en el material base es la plata, al igual que en la Figura 4.32, donde el análisis es en la zona de unión con el SiC, la plata es la que presenta mayor penetración. Se evidencia así la humectabilidad y la penetración de la aleación de aporte en ambos materiales bases. Tampoco se presentan elementos no deseados, que a su vez pudieran ser formadores de compuestos como carburos y óxidos. En las tablas 4.5 y 4.6 se puede comprender numéricamente lo antes expresado.

### 5.7.7 Microanálisis de la unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr.

En la Tabla 4.7 y 4.8 se muestra el porcentaje atómico (At. %) y porcentaje de peso (Wt. %) de los componentes de la aleación Ag-Cu-Ti-Cr en la zona de unión con la aleación Ti-6Al-4V y el compuesto cerámico SiC respectivamente, en las Figuras 4.33 y 4.34 se muestran los gráficos resultados del microanálisis.

**Tabla 4.7.** Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr y material base Ti-6Al-4V.

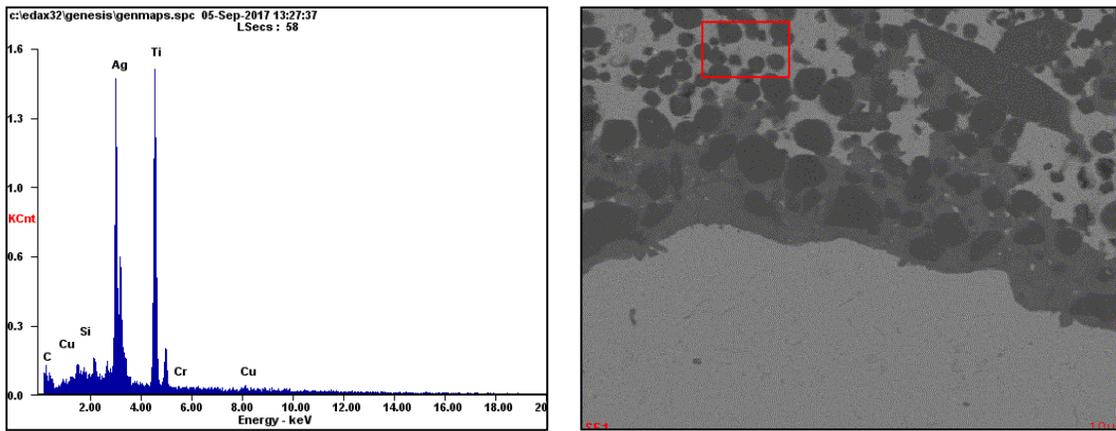
| Elemento | Wt. % | At %  |
|----------|-------|-------|
| Al       | 7.32  | 14.01 |
| Ag       | 13.98 | 6.71  |
| Ti       | 54.25 | 58.61 |
| V        | 3.46  | 3.52  |
| Cr       | 0.27  | 0.27  |
| Cu       | 20.73 | 16.88 |



**Figura 4.33.** Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr y material base Ti-6Al-4V.

**Tabla 4.8.** Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr y material base SiC.

| Elemento | Wt. % | At %  |
|----------|-------|-------|
| C        | 4.95  | 22.49 |
| Si       | 0.73  | 1.42  |
| Ag       | 48.17 | 24.53 |
| Ti       | 43.29 | 49.35 |
| Cr       | 0.35  | 0.35  |
| Cu       | 2.57  | 2.21  |



**Figura 4.34.** Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr y material base SiC.

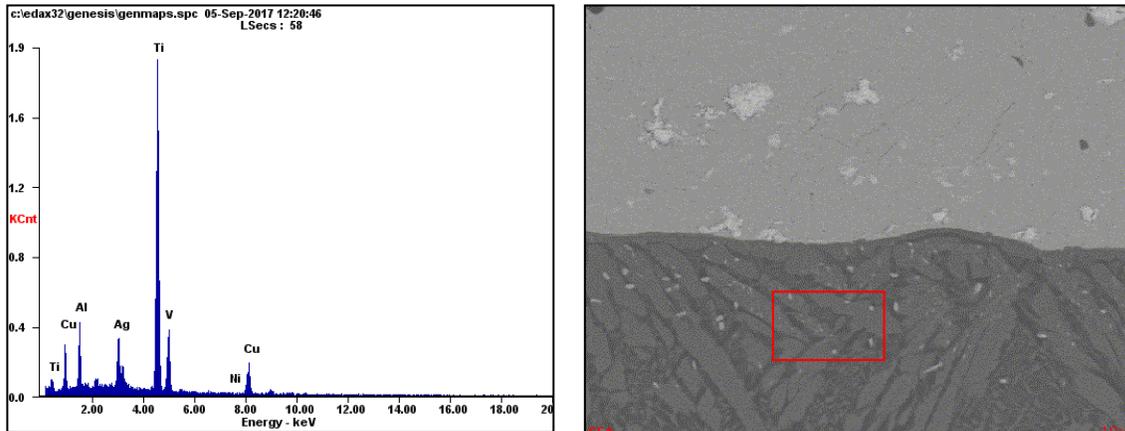
En las Figuras 4.33 y 4.34 donde se observa el microanálisis de la aleación Ag-Cu-Ti-Cr con la aleación Ti-6Al-4V y el cerámico SiC respectivamente, se aprecia que el Ti junto a la Ag fueron los elementos que presentaron mayor difusión hacia las aleaciones de aporte antes mencionadas. El Cr presentó mayor penetración en el SiC que en el Ti-6Al-4V, esto puede ser debido a la porosidad del primero facilitando así la difusión de este. En ninguna de las zonas de unión se aprecia elementos y fases no deseables. Un aspecto importante a destacar es que las dendritas formadas en la zona de unión de la aleación de aporte y el Ti-6Al-4V, son más abundantes y de mayor espesor. En las tablas 4.7 y 4.8 se puede comprender numéricamente lo antes expresado.

### 5.7.8 Microanálisis de la unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni.

En la Tabla 4.9 y 4.10 se muestra el porcentaje atómico (At. %) y porcentaje de peso (Wt. %) de los componentes de la aleación Ag-Cu-Ti-Ni en la zona de unión con la aleación Ti-6Al-4V y el compuesto cerámico SiC respectivamente, en las Figuras 4.35 y 4.36 se muestran los gráficos resultados del microanálisis.

**Tabla 4.9.** Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni y material base Ti-6Al-4V.

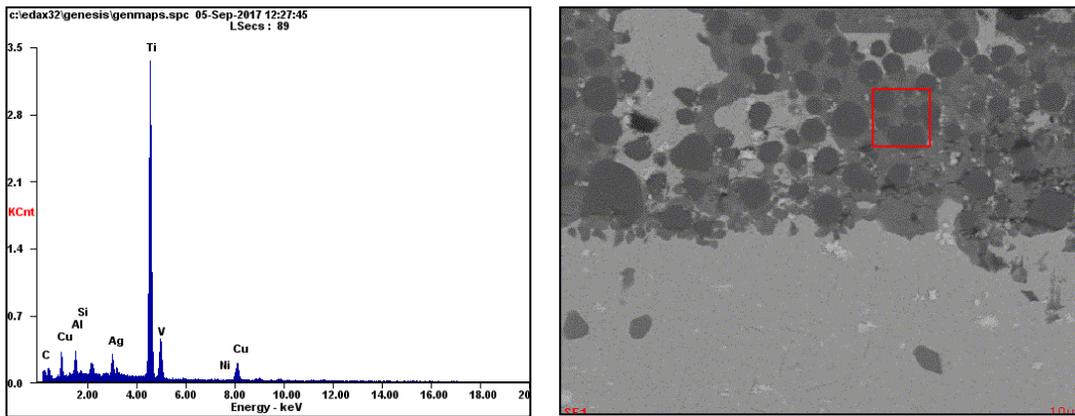
| Elemento | Wt.%  | At %  |
|----------|-------|-------|
| Al       | 8.05  | 15.14 |
| Ag       | 12.35 | 5.81  |
| Ti       | 56.33 | 59.63 |
| V        | 4.25  | 4.23  |
| Ni       | 0.29  | 0.25  |
| Cu       | 18.73 | 14.95 |



**Figura 4.35.** Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni y material base Ti-6Al-4V.

**Tabla 4.10.** Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni y material base SiC.

| Elemento | Wt. % | At %  |
|----------|-------|-------|
| C        | 7.17  | 24.22 |
| Al       | 4.03  | 6.06  |
| Si       | 0.47  | 0.69  |
| Ti       | 68.54 | 58.05 |
| Ag       | 6.27  | 2.36  |
| Ni       | 0.36  | 0.36  |
| Cu       | 13.51 | 8.63  |



**Figura 4.36.** Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni y material base SiC.

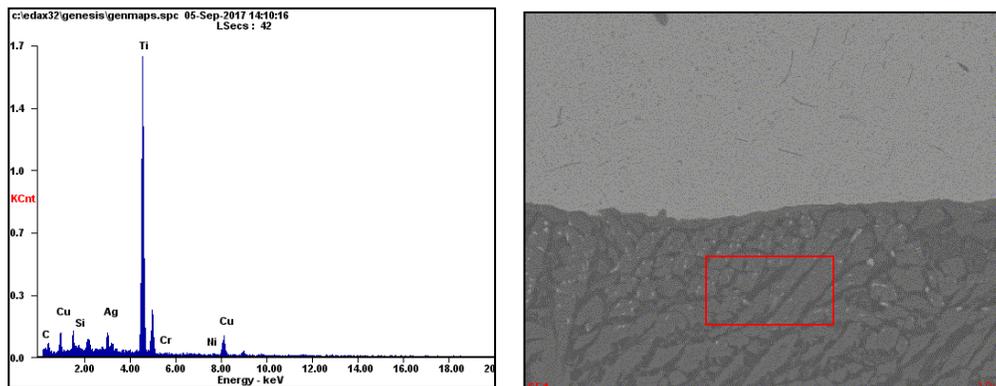
En las Figuras 4.35 y 4.36 donde se observa el microanálisis de la aleación Ag-Cu-Ti-Ni con la aleación Ti-6Al-4V y el cerámico SiC, se aprecia que la misma tuvo un comportamiento similar a la aleación Ag-Cu-Ti-Cr en cuanto a la difusión del Ti como elemento, hacia la aleación Ti-6Al-4V y el SiC, no así el Ni, el cual se evidencia que no presenta casi difusión hacia la zona de unión con los antes mencionados metales bases. Un aspecto importante a destacar es que las dendritas formadas en la zona de unión de la aleación de aporte y el Ti-6Al-4V son más abundantes y de mayor espesor que con la aleación Ag-Cu-Ti-Cr. Las tablas 4.9 y 4.10 ayudan a comprender numéricamente lo antes expresado.

### 5.7.9 Microanálisis de la unión con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.

En la Tabla 4.11 y 4.12 se muestra el porcentaje atómico (At. %) y porcentaje de peso (Wt. %) de los componentes de la aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni en la zona de unión con la aleación Ti-6Al-4V y el compuesto cerámico SiC respectivamente, en las Figuras 4.37 y 4.38 se muestran los gráficos resultados del microanálisis.

**Tabla 4.11.** Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni y material base Ti-6Al-4V.

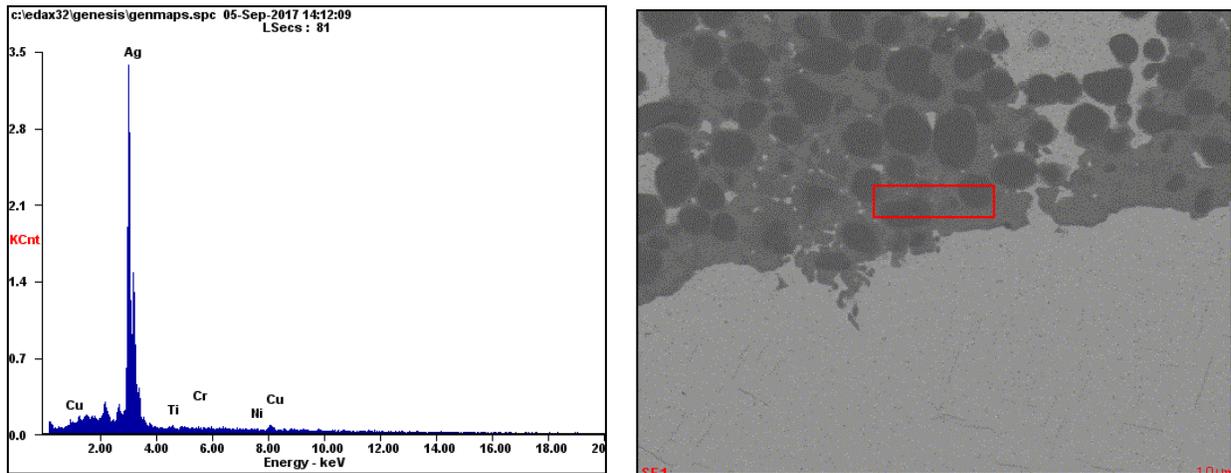
| Elemento | Wt. % | At %  |
|----------|-------|-------|
| Al       | 6.77  | 12.97 |
| Ag       | 13.52 | 6.48  |
| Ti       | 56.57 | 61.03 |
| V        | 3.01  | 3.05  |
| Cr       | 0.39  | 0.39  |
| Ni       | 0.40  | 0.36  |
| Cu       | 19.32 | 15.72 |



**Figura 4.37.** Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni y material base Ti-6Al-4V.

**Tabla 4.12.** Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni y material base SiC.

| Elemento | Wt. % | At %  |
|----------|-------|-------|
| C        | 5.64  | 20.56 |
| Si       | 0.73  | 1.15  |
| Ag       | 6.04  | 2.45  |
| Ti       | 68.35 | 62.50 |
| Cr       | 0.34  | 0.28  |
| Ni       | 0.62  | 0.46  |
| Cu       | 18.28 | 12.60 |



**Figura 4.38.** Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni y material base SiC.

En las Figuras 4.37 y 4.38 donde se observa el microanálisis de la aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni con la aleación Ti-6Al-4V y el cerámico SiC, se aprecia como en la zona de unión con la aleación Ti-6Al-4V el elemento de mayor difusión es el Ti y las dentritas formadas son más abundantes que las anteriores aleaciones de aporte y de mayor espesor, pero menos alargadas. La tabla 4.9 nos brinda numéricamente la posibilidad de comparar la diferencia de este fenómeno con el resto de los elementos. En la zona de unión con el cerámico SiC el elemento de mayor difusión es la Ag. Los valores expresados en la tabla 4.10 nos proveen una mayor comprensión de este fenómeno, el cual es facilitado por la alta porosidad de este compuesto.

Como resultado general de los análisis del SEM y EDX nos muestran que existen tanto en el SiC como en la aleación Ti-6Al-4V una excelente humectabilidad. Se observó la formación de dendritas de aleación de aporte en el Ti-6Al-4V lo cual es resultado positivo para este tipo de uniones. A medida que aumentan los componentes de aleación en las aleaciones de aporte como Cr y Ni se aprecia que las dendritas son más abundantes y de mayor espesor, elementos que aumentan la penetración de las aleaciones de aporte en la aleación Ti-6Al-4V. En el estudio de la aleación Ti-6Al-4V ya había mencionado la buena soldabilidad del mismo al poseer las fases  $\alpha$  -  $\beta$ . En la zona del SiC existió un comportamiento similar pero más marcado, debido a la porosidad de este último compuesto, por lo que la aleación de aporte tuvo mayor penetración.

En algunas zonas se observaron defectos como cavidades y zonas donde existía poco material de aporte. Este primero puede ser provocado por contracciones del material de aporte en el enfriamiento o porque el material de aporte fue insuficiente. Otro factor que también puede haber provocado este tipo de defectos en la unión es la rugosidad de las superficies de contactos del SiC y el Ti-6Al-4V. En el microanálisis obtenido en el EDX no se observó la presencia de ninguna fase que pudiese ser contraproducente en la unión y evidenció aún más en el mapeo como se difundió la aleación de aporte hacia ambos materiales bases.

### ***5.8 Ensayos mecánicos de tensión después del brazing.***

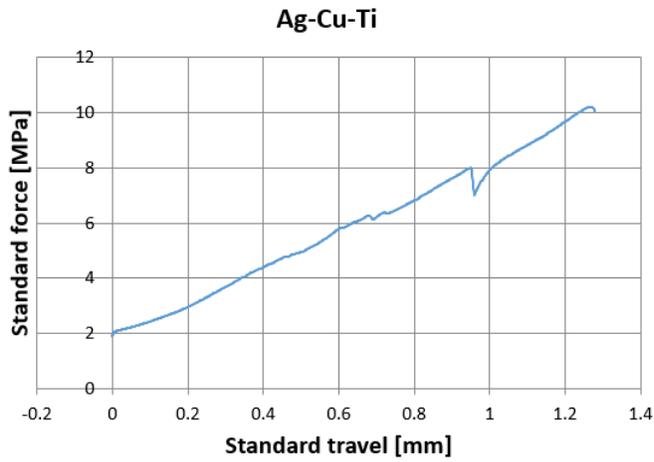
La Tabla 3.5 muestra los datos obtenidos en los ensayos por cada muestra para todas las aleaciones en ella se observan los valores en MPa de fractura de la unión y el área de la misma. Los Gráficos del 4.1 al 4.12 muestran los gráficos de tensión en MPa, contra deformación en mm, e imágenes de las muestras correspondientes a cada gráfico para cada aleación unión ensayada de las diferentes aleaciones de aporte. El Grafico 4.13 de tensión en MPa, contra deformación en mm, contiene todas las curvas de los ensayos antes expresados. Esto con el objetivo de facilitar el análisis y comprensión de los valores obtenidos, según el tipo de fractura o falla de la unión soldada.

**Tabla 4.13.** Resultados de los ensayos mecánicos de tensión.

|           | Parámetros              | $R_m$ | $S_0$           |
|-----------|-------------------------|-------|-----------------|
| No Ensayo | Aleación de aporte      | MPa   | mm <sup>2</sup> |
| 1         | Ag-Cu-Ti (Test 1)       | 10.21 | 255.00          |
| 2         | Ag-Cu-Ti (Test 2)       | 12.52 | 255.00          |
| 3         | Ag-Cu-Ti (Test 3)       | 9.23  | 255.00          |
| 4         | Ag-Cu-Ti-Ni (Test 1)    | 11.09 | 255.00          |
| 5         | Ag-Cu-Ti-Ni (Test 2)    | 9.95  | 255.00          |
| 6         | Ag-Cu-Ti-Ni (Test 3)    | 13.94 | 255.00          |
| 7         | Ag-Cu-Ti-Cr (Test 1)    | 11.45 | 255.00          |
| 8         | Ag-Cu-Ti-Cr (Test 2)    | 9.52  | 255.00          |
| 9         | Ag-Cu-Ti-Cr (Test 3)    | 11.42 | 255.00          |
| 10        | Ag-Cu-Ti-Cr-Ni (Test 1) | 14.02 | 255.00          |
| 11        | Ag-Cu-Ti-Cr-Ni (Test 2) | 11.12 | 255.00          |
| 12        | Ag-Cu-Ti-Cr-Ni (Test 3) | 9.10  | 255.00          |

### ***5.8.1 Análisis ensayos de tensión, aleación Ag-Cu-Ti.***

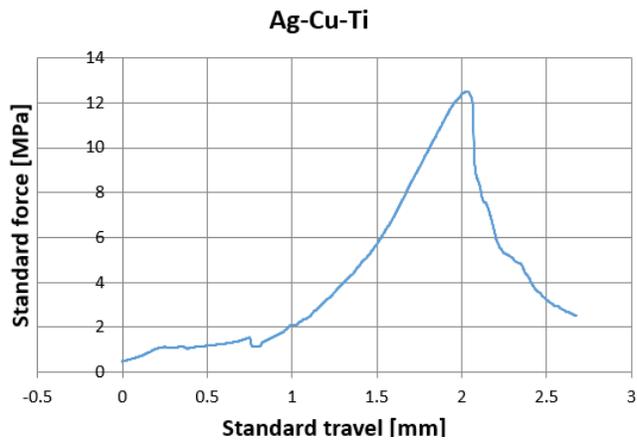
Los Gráficos 4.1, 4.2 y 4.3 muestran los ensayos de tensión realizados a las uniones con aleación de aporte Ag-Cu-Ti, los dos primeros gráficos muestran que se obtuvieron valores de 10.21 MPa y 12.52 MPa respectivamente. Se puede apreciar en la imagen 4.39 correspondiente al Grafico 4.1 que la fractura se efectuó en el SiC a lo largo de la sección longitudinal de la pieza con respecto a la zona de unión, igual patrón de comportamiento presento el tercer ensayo el cual se muestra en la Grafica 4.3 al cual corresponde la Figura 4.41, donde se muestra este modo de falla, sin embargo, esta muestra es la que presento los valores más bajos de Tensión, 9.23 MPa. Este valor bajo obtenido puede ser debido a un desalineamiento de la probeta en las mordazas. En la Figura 4.40 se observa que la falla al igual que las anteriores fue en el material base SiC, pero para este caso en particular solo fallo una sección del mismo y en este ensayo se obtuvieron los valores más altos de tensión, 12.52 MPa. Es de destacar que en ninguno de los modos de fallas presentado se afecta la zona unión soldada.



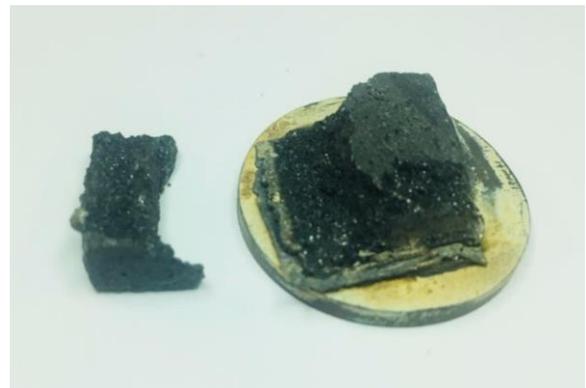
**Gráfico 4.1.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti.



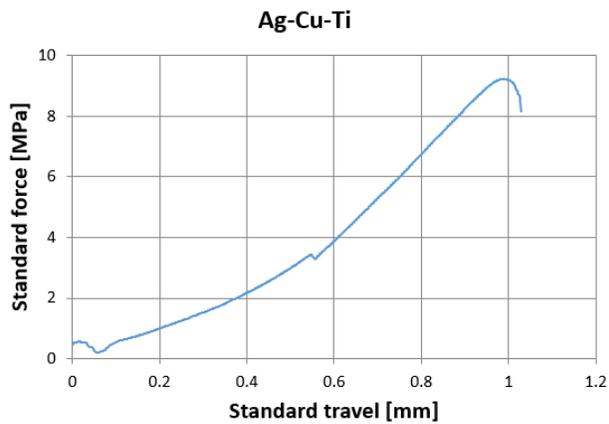
**Figura 4.39** Probeta aleación Ag-Cu-Ti.



**Gráfico 4.2.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti.



**Figura 4.40.** Probeta aleación Ag-Cu-Ti.



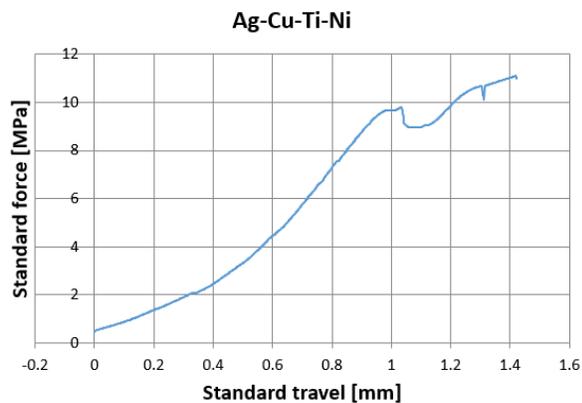
**Gráfico 4.3.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti.



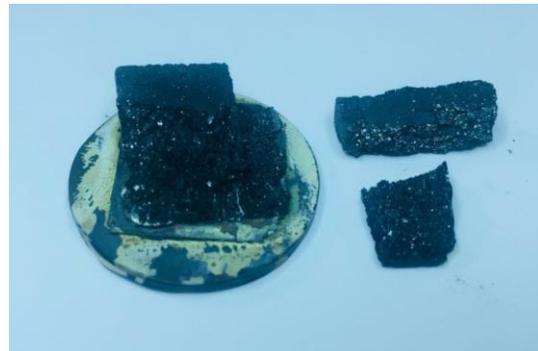
**Figura 4.41.** Probeta aleación Ag-Cu-Ti.

### 5.8.2 Análisis ensayos de tensión, aleación Ag-Cu-Ti-Ni.

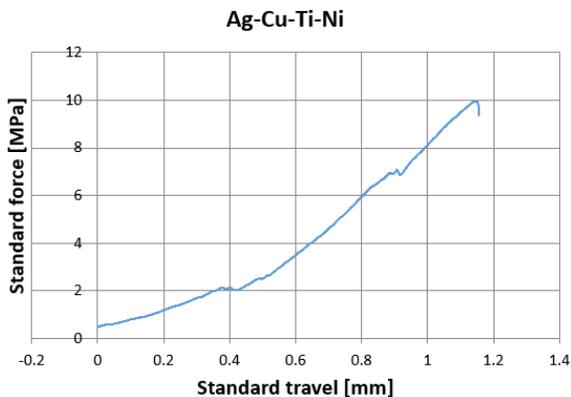
Los Gráficos 4.4, 4.5 y 4.6 muestran los ensayos de tensión realizados a las uniones con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni, los valores arrojados en el ensayo de tensión fueron 11.09 MPa, 9.95 MPa y 13.94 MPa respectivamente. En las Figuras 4.42 y 4.43 se observa que el modo de falla fue por la zona del SiC, fracturándose una sección del mismo. La Figura 4.44 nos muestra un modo diferente de falla, el comportamiento de la misma es longitudinal a la zona de unión, donde se obtuvo el valor más alto de tensión 13.94 MPa. El modo de falla de las dos primeras uniones y los valores obtenidos de las mismas, pueden ser debido a un pequeño desalineamiento de la probeta en las mordazas, provocando una componente de fuerza que no sea longitudinal a la zona de unión de ambos materiales bases. Ninguno de los modos de fallas presentado se afecta la zona unión soldada.



**Gráfico 4.4.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Ni.



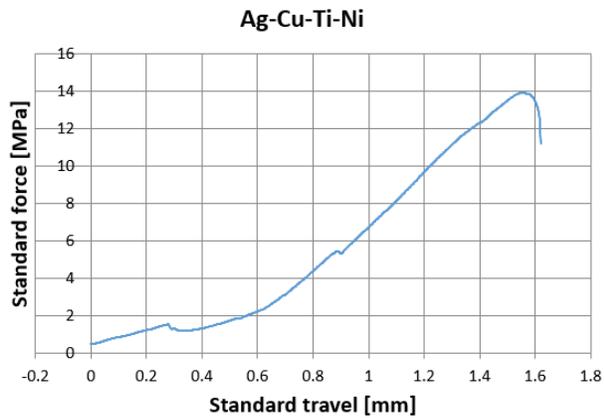
**Figura 4.42.** Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Ni.



**Gráfico 4.5.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Ni.



**Figura 4.43.** Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Ni.



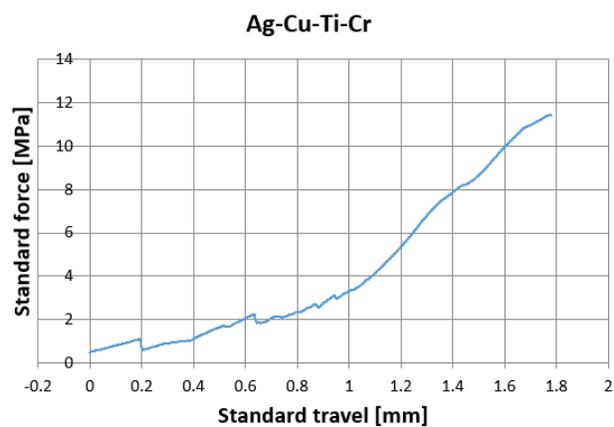
**Gráfico 4.6.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Ni.



**Figura 4.44.** Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Ni.

### 5.8.3 Análisis ensayos de tensión, aleación Ag-Cu-Ti-Cr.

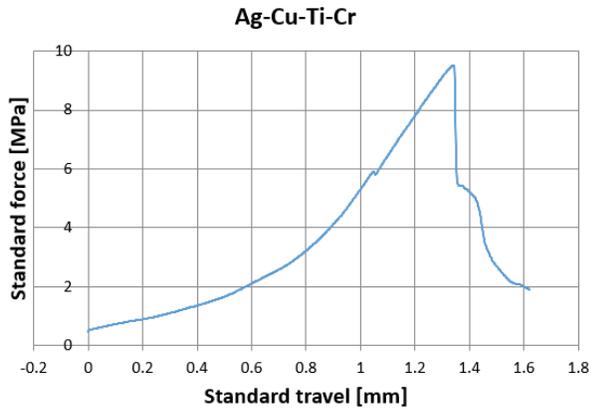
Los Gráficos 4.7, 4.8 y 4.9 muestran los ensayos de tensión realizados a las uniones con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr, los valores más altos de tensión los arrojan los gráficos 4.7 y 4.8 en el cual se obtienen valores de 11.45 MPa y 12.42 MPa respectivamente, en las Figuras 4.45 y 4.47 correspondientes con dichos ensayos se observa que el modo de falla presente es en la zona del SiC, longitudinal a la zona de unión, donde no se refleja que allá afectado la zona de unión la fractura. El valor más bajo obtenido para esta aleación se observa en el gráfico 4.8, donde se obtuvo un valor de 9.95 MPa, se aprecia en la Figura 4.46 que la falla se concentró solo en una sección del SiC.



**Gráfico 4.7.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr.



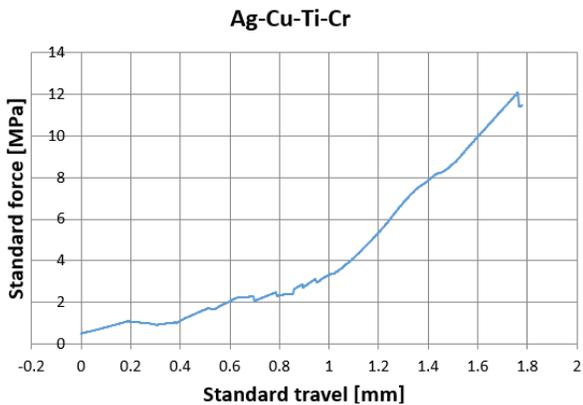
**Figura 4.45.** Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr.



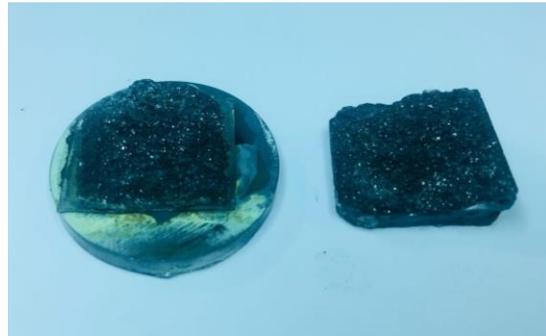
**Gráfico 4.8.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr.



**Figura 4.46.** Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr.



**Gráfico 4.9.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr.

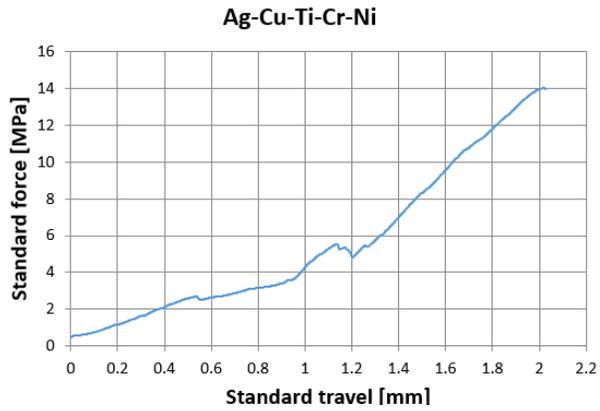


**Figura 4.47.** Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr.

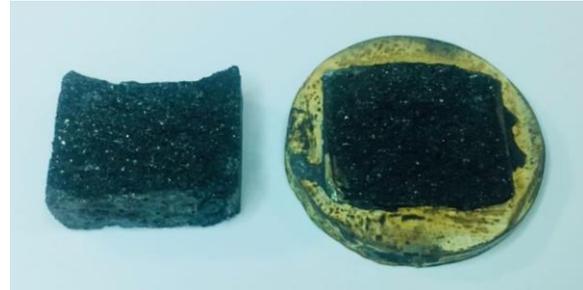
#### **5.8.4 Análisis ensayos de tensión, aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.**

Los Gráficos 4.10, 4.11 y 4.12 muestran los ensayos de tensión realizados a las uniones con aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni, el valor más alto obtenido en los ensayos de tensión corresponde al Gráfico 4.10, 14.02 MPa, luego le sigue el ensayo del Gráfico 4.11, donde se observa que se obtuvo 11.12 MPa. Las Figuras 4.49 y 4.50 corresponden con los ensayos de estos gráficos y se observa que el modo de falla es en la sección longitudinal a la unión con el compuesto cerámico SiC. Un último ensayo realizado se obtuvo valores de 9.10 MPa, en el Gráfico 4.12 se observa su comportamiento y la Figura 4.51 nos muestra que existe cierto ángulo entre la zona de unión y la de falla en el SiC, este fenómeno pudo ser provocado por desalineamiento a

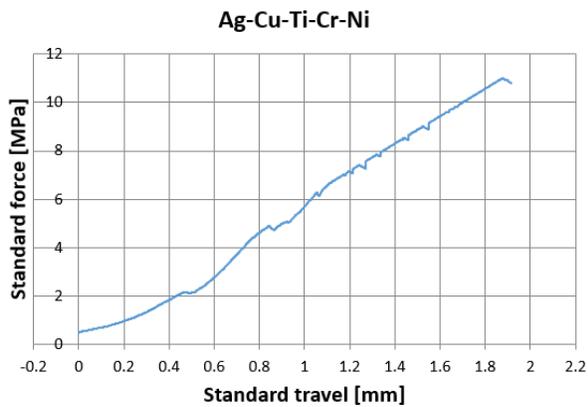
la hora de realizar el ensayo entre la probeta y las mordazas. En ningunos de los ensayos se evidencia daños a la zona de unión.



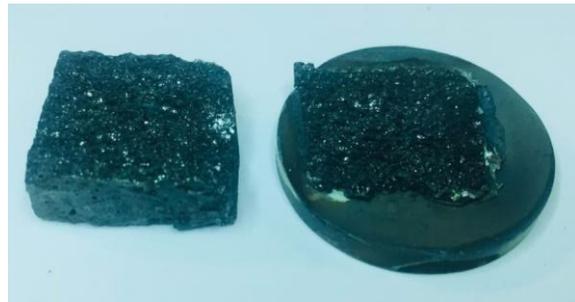
**Grafico 4.10.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.



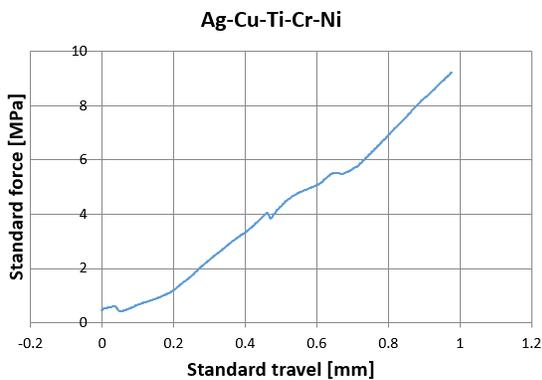
**Figura 4.49.** Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.



**Grafico 4.11.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.



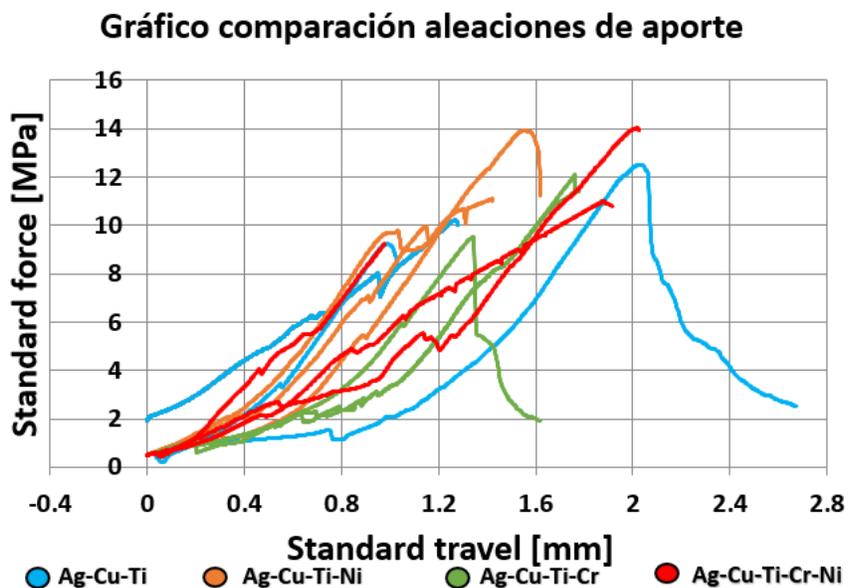
**Figura 4.50.** Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.



**Grafico 4.12.** Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.



**Figura 4.51.** Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.



**Grafico 4.13.** Diagrama esfuerzo – deformación comparativa de todas las aleaciones de aporte.

El Grafico 4.13 muestra un comparativo de todos los ensayos realizados, los mayores resultados en los ensayos mecánicos se presentaron en las aleaciones bases que presentaban Ni, esto evidencia lo que en conclusiones de ensayos anteriores se mencionaba, que estos materiales junto al Cr eran  $\beta$ -estabilizadores eutécticos, los cuales forman sistemas eutectoides con el titanio. También ya es conocido que los  $\beta$ -estabilizadores eutécticos minimizan la formación de compuestos intermetálicos que puede ocurrir en el servicio a altas temperaturas y resulta en una mejora de las propiedades mecánicas.

Los parámetros de las aleaciones bases que presentaban Ni como aleante, aleaciones Ag-Cu-Ti-Ni y Ag-Cu-Ti-Cr-Ni oscilaron entre valores de 11.09 y 14.02 MPa, este último resultado corresponde al valor más alto obtenido que fue en una aleación que presentaba Cr y Ni. Las que poseían solo Cr estuvieron entre 11.42 y 11.45 MPa. Es evidente que estos elementos por los resultados obtenidos y su efecto en la unión, mejoran la soldabilidad sobre todo de la aleación base con el Ti-6Al-4V. Ver Tabla 4.13. Los ensayos que presentaron valores por debajo de los 10 MPa que en casi todos los tipos de aleaciones existió al menos uno de ellos, fue debido a desalineación entre los soportes fabricados para la colocación de las muestras y las mismas, al existir un pequeño juego a la hora de realizar el montaje. Incluso siendo evidente en algunos de los casos a la hora de realizar el ensayo de que no tendrían un resultado concluyente.

Al no existir una correcta alineación la fuerza de cortante que debería incidir en la zona de la unión provoca una componente de fuerza sobre ambos materiales bases, siendo dependiente dicha componente del ángulo de desalienación.

Todas las muestras a las que se les realizaron ensayos fallaron no por la zona de la unión tal y como se aprecia en las imágenes anteriores, si no por el cuerpo del material base del SiC, esto pudo ser provocado por la porosidad de dicho material, la cual pudo haber debilitado sus propiedades mecánicas. El lado positivo de este modo de falla presente en los ensayos es que es evidente que la unión posee mayores propiedades mecánicas que el material base elegido para la misma. El desplazamiento de las mordazas en los ensayos estuvo entre 1.6-2.0 mm los valores más altos obtenidos fueron para las aleaciones Ag-Cu-Ti-Cr-Ni de hasta 2.0 mm, donde también se obtuvo también el valor más alto de tensión, 14.02 MPa. En los ensayos que se obtuvieron los mayores valores para cada aleación Ag-Cu-Ti, Ag-Cu-Ti-Ni, Ag-Cu-Ti-Cr, Ag-Cu-Ti-Cr-Ni los cuales fueron 12.52 MPa, 13.94 MPa, 11.45 MPa y 14.02 MPa respectivamente, el modo de falla fue longitudinal a la zona de unión siempre en SiC, en ninguno de los ensayos se evidenció que las pruebas hayan afectado a la zona de unión.

Similar comportamiento se ha presentado en otras investigaciones citadas como referencia (X. Hernández, 2014), donde obtuvieron valores en los ensayos de tensión por inferiores, valores entre 5-6 MPa. Mejorando los mismo hasta valores entre 15-16 MPa, agregando cavidades a los materiales bases para así obtener una mejor resistencia a la tensión (ver Figura 2.3). El desplazamiento de las mordazas estuvo en valores 0.4-0.6 mm para las probetas con las perforaciones, factor que nos indica que la ductilidad en la zona de falla es menor al que se obtuvo en esta investigación. En dicha investigación también se obtuvo buena humectabilidad en toda la zona de unión, pero a diferencia nuestra las dentritas formadas en la zona de unión con la aleación Ti-6Al-4V son de menor tamaño y espesor, el comportamiento en la zona de unión con el SiC fue similar.

Para Jin Hui Xiong, 2014; los resultados obtenidos son superiores, obteniendo valores de tensión de hasta 102 MPa, la clave de la diferencia está en el Cf/SiC utilizado, los fallos presentados por el citado autor todos se refieren a la zona de unión, donde la

resistencia a la flexión de dicho material ronda los  $285.7 \pm 22.6$  MPa, el modulo elástico los  $57.1 \pm 3.2$  MPa y la tenacidad a la fractura  $10.4 \pm 0.9$  MPa m<sup>1/2</sup> (31) (34).

Se observa que los resultados obtenidos de la microscopia óptica de la zona de unión del material de aporte y la aleación Ti-6Al-4V, no muestran la formación de dentritas, ni la penetración es tan efectiva en el material base a su vez muestran también mayor cantidad de defectos en las uniones (ver Figura 2.4).

Bing Cui, 2013, en su investigación utilizó también el material base Cf/SiC, el mismo utilizado en la investigación referenciada anteriormente y que como ya se ha expresado posee cualidades mecánicas superiores al SiC, obteniendo así valores tensión de 145 MPa. A diferencia nuestra el tiempo de permanencia a la temperatura máxima de brazing es superior siendo 25 minutos por lo que se puede considerar que este factor puede aumentar la difusión de la aleación de aporte a los materiales bases y queda evidenciado al observar los resultados análisis de microscopia óptica donde se puede ver una excelente humectabilidad y la formación de dentritas en toda la zona de unión con la aleación Ti-6Al-4V, no así en la unión con el Cf/SiC donde ese aprecia defectos y no se observa que la penetración del material base sea tan profunda y abundante como la obtenida en otras investigaciones (ver Figura 2.5).

## Capítulo V. Conclusión y recomendaciones.

### 5.1 Conclusiones.

En base a los resultados que se obtuvieron en esta investigación, es posible enunciar las siguientes conclusiones:

- La aleación Ti-6Al-4V posee excelente soldabilidad por soldadura brazing debido a la presencia de las fases  $\alpha$ - $\beta$ , con aleaciones de aporte base Ag-Cu-Ti. Elementos como el Cr y el Ni mejoran la soldabilidad, siendo este último el de mayor impacto en las mejoras de las características evaluadas de la unión.
- La presencia de Cr y Ni en las aleaciones de aporte aumentan además la resistencia a la corrosión como se puede apreciar en las curvas de LPR obtenidas de los ensayos.
- Las temperaturas mayores a 750°C son contraproducente para este tipo de uniones por soldadura brazing en atmosfera de gas inerte. Puede provocar uniones débiles y el material de aporte es seriamente afectado, así como la presencia de residuos de los materiales bases provocados por el calentamiento.
- La alta porosidad presente en el SiC fue un factor contraproducente por ser la principal causa de modo de falla en los ensayos a las uniones.
- La técnica implementada mediante gas inerte durante la fabricación de la aleación de aporte resulto ser efectiva para controlar la composición de la aleación en las escalas de fabricación que se utilizaron.
- El uso de gas inerte durante el proceso de brazing permitió formar interfaces con características similares a las que se obtienen usando sistemas de vacío, esto ofrece una ventaja tecnológica y económica importante.
- La temperatura de permanencia brazing puede influenciar en la calidad de la unión, ya que aumenta la difusión de la aleación de aporte hacia los materiales bases.

## **5.2 Recomendaciones.**

Las recomendaciones que se desprenden de los resultados obtenidos son las siguientes:

- Buscar un SiC que posea menor porosidad y mayores propiedades mecánicas, lo que permitirá realizar una comparación de la composición de las aleaciones de aporte.
- Verificar y/o tratar de lograr una correcta alineación antes de los ensayos mecánicos, para así evitar posibles muestras que por desalienación con el mecanismo de soporte puedan provocar un modo de falla el cual no sea concluyente con los resultados de la investigación.
- Realizar estudios de dilatación térmica de las probetas para estudiar a fondo el comportamiento de las uniones de metales y cerámicos los cuales como es conocido poseen diferentes coeficientes de dilatación.
- Aumentar la cantidad de Cr y Ni de manera que los cambio puedan ser mayores y poder comprender a mayor escala la influencia de estos como elementos de aporte a las uniones por soldadura brazing.
- Realizar pruebas con diferentes tiempos de permanencias para el brazing, y evaluar el impacto de la misma en la unión.

## **Bibliografía.**

1. *Joints of Carbon Fiber-Reinforced SiC Composites to Ti-Alloy Brazed by Ag-Cu-Ti Short Carbon Fibers.* **G.B. Lin, J.H. Huang, and H. Zhang.** 2007.
2. *An Innovative Joint Structure for Brazing Cf/SiC Composite to Titanium Alloy.* **X. Hernandez, C. Jimenez, K. Mergia, P. Yialouris, S. Messoloras, V. Liedtke, C. Wilhelmi, and J. Barcena.** 2014.
3. *Bonding of Cf/SiC composite to Invar alloy using an active cement, Ag-Cu eutectic and Cu interlayer.* **Zhao Lei, Li Xiaohong, Hou Jinbao, Sun Qianga, Zhang Fuli.** 2012.
4. *Brazing of ceramic-matrix composites to Ti and Hastelloy using Ni-base metallic glass interlayers.* **M. Singh, R. Asthana, T.P. Shpargel.** 2007.
5. *Direct joining of 2D carbon/carbon composites to Ti-6Al-4V alloy with a rectangular wave interface.* **J.T. Xiong, J.L. Li, F.S. Zhang, X.Lin, W.D. Huang.** 2008.
6. *Oxidation behavior of Ag-Cu-Ti brazing alloys.* **D.B. Lee, J.H. Woo, S.W. Park.** s.l. : Department of Metallurgical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Kyonggi, 440 -746, South Korea, 1999.
7. *Joining of CBN abrasive grains to medium carbon steel with Ag Cu/Ti powder mixture as active brazing alloy.* **W.F. Ding, J.H. Xu, M. Shen, H.H. Su, Y.C. Fu, B. Xiao.** s.l. : College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, PR China, 2006.
8. *Reaction-composite brazing of carbon fiber reinforced SiC composite and TC4 alloy using Ag-Cu-Ti-(Ti+C) mixed powder.* **Bing Cui, Ji Hua Huang, Jin Hui Xiong, Hua Zhang.** s.l. : School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, PR China, 2013.
9. *Ultrasonic-assisted brazing of SiC ceramic to Ti-6Al-4V alloy using a novel AlSnSiZnMg filler metal.* **Xiaoguang Chen, Jiuchun Yan, Sichao Ren, Jinghui Wei, Qian Wang.** s.l. : State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, PR China, 2013.
10. *Joining of SiC ceramic to graphite using Ni-Cr-SiC powders as filler.* **Yangwu Mao, Shujie Li, Liansheng Yan.** s.l. : School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, PR China, 2007.
11. *Preliminary investigation on joining performance of SiCp-reinforced aluminium metal matrix composite (Al/SiCp-MMC) by vacuum brazing.* **X.P. Zhang, G.F. Quan, W. Wei.** s.l. : School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 10049, People's Republic of China, 1998.
12. *Microstructure and mechanical properties of the GH783/2.5D C/SiC joints brazed with Cu-Ti + Mo composite filler.* **Xing Wang, Laifei Cheng, Shangwu Fan, Litong Zhang.** s.l. : Key Laboratory of Thermostructure Composite Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China, 2011.

13. *Interfacial reactions and joining characteristics of a Cu–Pd–V system filler alloy with C/SiC composite.* **Hua-Ping Xiong, BoChena, YuPanb, WeiMaoa, Yao-YongChenga.** s.l. : aLaboratory of Welding and Forging, Beijing Institut eof Aeronautica lMaterials ,Beijing 100095, PR China, 2013.
14. *Interfacial structure and fracture behavior of TiB whisker-reinforced C/SiC composite and TiAl joints brazed with Ti–Ni–B brazing alloy.* **Z.W. Yang, L.X. Zhang, P. He, J.C. Feng.** s.l. : State Key Lab of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, 2011.
15. *Wettability and interfacial reactions of PdNi-based brazing fillers on C-C composite.* **CHEN Bo, XIONG Hua-ping, MAO Wei, CHENG Yao-yong.** s.l. : Laboratory of Welding and Forging, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China, 2009.
16. *Active Metal Brazing and Characterization of Brazed Joints in C-C and C-SiC Composites to Copper-Clad-Molybdenum System.* **Asthana, M. Singh and R.** s.l. : Ohio Aerospace Institute, 2008.
17. *Cu + TiB<sub>2</sub> composite filler for brazing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ti–6Al–4V alloy.* **Minxuan Yang, Tiesong Lina, Peng Hea.** s.l. : State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, 2011.
18. *Titanium Alloys. Modelling of Microstructure, Properties and Applications.* **Malinov.** s.l. : Woodhead Publishing, 2009.
19. *Through thickness dynamic impact response in textured Ti–6Al–4V plates.* **Kad, B.K., Schoenfeld, S.E., Burkins, M.S.** s.l. : Materials Science and Engineering, 2002, págs. 241-251.
20. *Structure and properties of alloys .* **Brick, Gordon, Phillips.** s.l. : Mc.Graw Hill, 1965.
21. *Relación entre microestructura y resistencia a corrosión de la aleación biocompatible Ti6Al4V deformada en caliente .* **Córdoba Román, L.C. Medellín.** s.l. : Universidad Nacional de Colombia, 2009.
22. *Effect of UV irradiation on the surface Gibbs energy of Ti6Al4V and thermally oxidized Ti6Al4V.* **Pacha-Olivenza, M.A., Gallardo-Moreno, A. M., Méndez-Vilas, A., Bruque, J. M., González-Carrasco, J. L., González-Martín.** s.l. : Journal of Colloid of Colloid Science, 2008, págs. 117-124.
23. *Mechanical behavior of Ti–6Al–4V at high and moderate temperatures.* **Majorell, A., Srivatsa, S., Picu, R.C.** [ed.] Materials Science and Engineering. 2002, Vol. Part I: Experimental results, págs. 297-305.
24. *Recrystallization and related annealing phenomena.* **Humphreys, F.J., Hatherly, M.** [ed.] Elsevier. Oxford : s.n., 2004, Vol. Second, pág. 574.
25. *Dislocation density based model for plastic deformation and globularization of Ti-6Al-4V.* **Babu, B., Lindgren.** [ed.] International Journal of Plasticity. 2012, págs. 94-108.
26. *Modeling of microstructure property relationships in Ti-6Al-4 V.* **Tiley, J.S.** s.l. : Ohio State University, 2002.

27. *Anisotropy of the hot plastic deformation of Ti–6Al–4V single-colony samples*. **Salem, A.A., Semiatin.** [ed.] Materials Science and Engineering. 2009, págs. 114-120.
28. *Deformation mechanisms during superplastic testing of Ti–6Al–4V–0.1B alloy*. **Roy, S., Suwas, S.** [ed.] Materials Science and Engineering. 2013, págs. 205-217.
29. *Cold and hot forging: Fundamentals and applications*. **Altan, Ngaile, Shen.** s.l. : ASM Intl, 2004.
30. *Hot Working guide: A compendium of processing maps*. **Y. V. R. K. Prasad, S. Shashidara.** s.l. : ASM Intl, 1997.
31. **Alvarado, C. I.** *Mecanosíntesis del compuesto carburo de silicio (SiC) y su caracterización*. s.l. : Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2006.
32. **Benito, L. M.** *Uniones Heterogéneas aceros especiales CERMET obtenidas mediante procesos de fusión (Diffusion bonding y diffusion brazing)*. Madrid; España : Universidad Complutense de Madrid, 2011.
33. *Obtención de B-SiC mediante una fuente alterna de energía como las microondas*. **Gonzalez, C. A.** San Nicolás de los Garza, Monterrey, Nuevo León, México : Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, 1999.
34. *Síntesis de materiales cerámicos estructurales (SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiAlO)*. **Romero, F. J.** Alicante, España : Universidad de Alicante, 1992.
35. *Unión de aceros austeníticos 304 sobre sustratos de aluminio de la serie 6061 por el proceso brazing*. **Covarrubias, Gilberto de Jesús Zendejo.** Saltillo, Coahuila, México : Corporación mexicana de investigación de materiales, 2015.
36. *Estudio del comportamiento microestructural en las uniones de soldadura brazing en aleaciones de aluminio con aporte AW 4343 7.5% Si*. **Lopez, Fernando Macias.** Saltillo, Coahuila : Corporación mexicana de investigación de materiales, 2010.
37. *Alternativas de materiales de aporte libres de cadmio en procesos de soldadura brazing*. **Lopez, Fernando Macias.** Saltillo Coahuila : Corporación mexicana de estudios de materiales, 2010.
38. *Procesos de unión y estudio de interfaces en Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> y ZrO<sub>2</sub>*. **Rodriguez, Raquel Polanco.** Madrid : Instituto de cerámica y vidrio consejo superior de investigaciones científicas, 2007.
39. **ASME.** *ASME Boiler and Pressure Vessel Code IX, Welding and Brazing Qualifications*. 2007.
40. **(AWS), American Welding Society.** *AWS Brazing Handbook*. 5th. 550 N.W. LeJeune Road, Miami, FL 33126 : s.n., 2011.
41. **Harman, Handy &.** *The brazing book*. s.l. : Handy & Harman, 1977.

42. *Specification for Filler Metal for Brazing and Braze Welding. (AWS), American Welding Society.* Miami, Florida : American Welding Society, 2004. AWS A5.8/A5.8M:2004.
43. *Specification for Fluxes for Brazing and Braze Welding. (AWS), American Welding Society.* Miami, Florida. : American Welding Society, 2012. AWS A5.31M/A5.31:2012.
44. *Specification for Furnace Brazing. (AWS), American Welding Society.* Miami, Florida : American Welding Society , 2008. AWS C3.6M/C3.6:2008.
45. *Specification for Brazing Procedure and Performance Qualification. (AWS), American Welding Society.* Miami, Florida : American Welding Society, 2010. AWS B2.2/B2.2 M:2010.
46. **Andersson Rolf, Holm Torsten, Wiberg Sören, Åstrom Anders.** *Brazing of Metals Furnace Atmospheres No. 4.* s.l. : Linde Gas Special Edition, 2004.
47. **Espinoza, Ana María Fernández.** *La importancia de la inspección de soldadura en la fabricación y montaje de estructuras metálicas.* Coatzacoalcos, Veracruz : Universidad Veracruzana, 2010.
48. **Sarabia, Victor Manuel Luciano.** *Pruebas de soldabilidad de diversos materiales por el metodo de soldadura "TIG".* Estado de Mexico : Universidad Autonoma Nacional de Mexico, 2013.
49. **Tlaseca, Pedro Luciano Garcia.** *Guía comparativa de procesos de fusión con depósito de material.* Estado de Mexico : Instituto Politecnico Nacional, 2009.
50. **Boado, Mónica Gómez.** *Obtención de piezas de SiC por inmersión de preformas de si en lechos carbonosos.* Galicia; España : Universidad de Santiago de Compostela Instituto Ceramico de Galicia, 2008.
51. **Carballo, Roberto Arpón.** *Preparación de piezas de carburo de silicio reforzadas con siliciuros refractarios mediante infiltración reactiva.* Alicante; España : Universidad de Alicante, 2008.
52. **International, ASTM.** *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.* s.l. : American Standards Testing in Materials Internacional, 1999.
53. **Internacional, ASM.** *ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering.* [ed.] T.A. Siewert, S. Liu, G.R. Edwards D.L. Olson. s.l. : American Society Materials Internacional, 1993.
54. **International, ASM.** *Metallography and Microstructures. Handbook,* s.l. : American Society Materials Internacional, 2009. Vol. 9.
55. *Brazing of carbon fiber reinforced SiC composite and TC4 using Ag–Cu–Ti active brazing alloy.* **Jin Hui Xiong\*, Ji Hua Huang, Hua Zhang, Xing Ke Zhao.** Beijing : Materials Science and Engineering A, 2009.

## **Índice de anexos.**

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 2.1.</b> Clasificación de los procesos de soldadura según AWS.....   | 12 |
| <b>Figura 2.2.</b> Diagrama de equilibrio del sistema binario plata-cobre.....   | 25 |
| <b>Figura 2.3.</b> EDX realizado a la interface de la unión y estudio comparativo de los ensayos mecánicos de la unión .   | 32 |
| <b>Figura 2.4.</b> EDX realizado a la interface de la unión y estudio comparativo de los ensayos mecánicos de la unión a diferentes temperaturas de brazing y diferentes tiempos de permanencia.....                 | 33 |
| <b>Figura 2.5.</b> EDX realizado a la interface de la unión .....  | 34 |
| <b>Figura 3.1.</b> Diagrama experimental .....   | 36 |
| <b>Figura 3.10:</b> Superficie del disco antes de realizar el análisis de XRD.....   | 49 |
| <b>Figura 3.11.</b> Corte de la aleación en láminas de 1-2 mm de espesor .....   | 49 |
| <b>Figura 3.12.</b> Aleaciones de aporte luego de laminación.....  | 50 |
| <b>Figura 3.13a:</b> Esquema de cómo fueron colocadas las piezas a unir dentro del horno.....  | 51 |
| <b>Figura 3.13b:</b> Esquema de cómo fue colocado las piezas a unir dentro del horno.....  | 51 |
| <b>Figura 3.14:</b> Imagen interior del horno donde se realizó el casting por atmosfera inerte.....  | 52 |
| <b>Figura 3.15:</b> Exterior del horno donde se realizó el casting por atmosfera inerte.....   | 52 |
| <b>Figura 3.16:</b> Imagen donde se puede observar las piezas unidas después del brazing (Ag-Cu-Ti-Cr-Ni).....   | 53 |
| <b>Figura 3.17:</b> Uniones después de realizado el corte con disco de diamante aleación de aporte (Ag-Cu-Ti) .....  | 55 |
| <b>Figura 3.18:</b> Soporte para ensayo de tensión, lado de la probeta SiC.....  | 55 |
| <b>Figura 3.19:</b> Soporte para ensayo de tensión, lado de la probeta Ti-6Al-4V.....  | 55 |
| <b>Figura 3.2.</b> Efecto del espesor de la unión sobre la resistencia a la tensión (41).....  | 37 |
| <b>Figura 3.20:</b> Máquina universal ZWICK-Z100 .....   | 56 |
| <b>Figura 3.21:</b> Muestras montadas en los soportes fabricados, instantes antes de realizar las pruebas.....   | 56 |
| <b>Figura 3.22:</b> Probeta de Ag-Cu-Ti-Cr-Ni momentos antes de comenzar el ensayo.....  | 57 |
| <b>Figura 3.3.</b> Formato Brazing Procedure Specification de AWS. (45).....   | 41 |
| <b>Figura 3.4.</b> Barra de Ti-6Al-4V de una pulgada de diámetro.....  | 42 |
| <b>Figura 3.5.</b> Discos de la aleación de Ti-6Al-4V de 3-4 mm de espesor y una pulgada de diámetro.....  | 43 |
| <b>Figura 3.6.</b> Piezas de SiC después de efectuado el corte.....  | 44 |
| <b>Figura 3.7.</b> Elementos a utilizar para crear las aleaciones de aporte (Ag, Cu, Ti, Cr, Ni).....  | 46 |
| <b>Figura 3.8A</b> Tanque de argón lejos del horno por medidas de seguridad. <b>3.8B</b> Horno de inducción con el tubo de alúmina introducido en su interior y una colcha de fibra de vidrio encima de la tapa..... | 46 |
| <b>Figura 3.9:</b> Horno a 1100 °C, el tiempo de permanencia una vez disuelto todos los componentes de la aleación fueron 10 minutos.....  | 48 |
| <b>Figura 4.1.</b> Mapeo realizado a una muestra de la aleación Ti-6Al-4V .....  | 59 |
| <b>Figura 4.10.</b> Micrografía del SiC a 1500X .....  | 66 |
| <b>Figura 4.11.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti.....   | 67 |
| <b>Figura 4.12.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti.....   | 67 |
| <b>Figura 4.13.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti. Sección de unión entre aleación de aporte y Ti-6Al-4V.....  | 68 |
| <b>Figura 4.14</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti. Sección de unión entre aleación de aporte y SiC.....   | 68 |
| <b>Figura 4.15.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr .....   | 68 |
| <b>Figura 4.16.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr .....   | 68 |
| <b>Figura 4.17.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr. Sección de unión entre aleación de aporte y Ti-6Al-4V.....   | 69 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 4.18.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr. Sección de unión entre aleación de aporte y SiC.....           | 69 |
| <b>Figura 4.19.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni.....  | 70 |
| <b>Figura 4.2.</b> Magnificación de la zona I a 10X, aleación Ti-6Al-4V .....                                      | 59 |
| <b>Figura 4.20.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni.....  | 70 |
| <b>Figura 4.21.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni. Sección de unión entre aleación de aporte y Ti-6Al-4V.....     | 70 |
| <b>Figura 4.22.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni. Sección de unión entre aleación de aporte y SiC.....           | 70 |
| <b>Figura 4.23.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.....   | 71 |
| <b>Figura 4.24.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.....   | 71 |
| <b>Figura 4.25.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni. Sección de unión entre aleación de aporte y Ti-6Al-4V.....  | 71 |
| <b>Figura 4.26.</b> Aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni. Sección de unión entre aleación de aporte y SiC.....        | 71 |
| <b>Figura 4.27.</b> Mapeo a 100X de la aleación de aporte Ag-Cu-Ti, zona unión.....                                | 72 |
| <b>Figura 4.28.</b> Mapeo a 100X de la aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr, zona unión.....                             | 72 |
| <b>Figura 4.29.</b> Mapeo a 100X de la aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni, zona unión.....                             | 72 |
| <b>Figura 4.3.</b> Magnificación de la zona II a 20X, aleación Ti-6Al-4V .....                                     | 60 |
| <b>Figura 4.30.</b> Mapeo a 100X de la aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni, zona unión.....                          | 72 |
| <b>Figura 4.31.</b> Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti y material base Ti-6Al-4V .....    | 74 |
| <b>Figura 4.32.</b> Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti y material base SiC .....          | 74 |
| <b>Figura 4.33.</b> Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr y material base Ti-6Al-4V ..... | 76 |
| <b>Figura 4.34.</b> Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr y material base SiC .....       | 76 |
| <b>Figura 4.35.</b> Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni y material base Ti-6Al-4V.....  | 78 |
| <b>Figura 4.36.</b> Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni y material base SiC.....        | 79 |
| <b>Figura 4.37.</b> Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni y material base .....        | 80 |
| <b>Figura 4.38.</b> Microanálisis de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni y material base SiC.....     | 81 |
| <b>Figura 4.39</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti.....  | 84 |
| <b>Figura 4.4.</b> Magnificación de la zona III a 50X, aleación Ti-6Al-4V .....                                    | 60 |
| <b>Figura 4.40.</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti.....   | 84 |
| <b>Figura 4.41.</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti.....   | 85 |
| <b>Figura 4.42.</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Ni.....  | 86 |
| <b>Figura 4.43.</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Ni.....  | 86 |
| <b>Figura 4.44.</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Ni.....  | 86 |
| <b>Figura 4.45.</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr.....  | 87 |
| <b>Figura 4.46.</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr.....  | 87 |
| <b>Figura 4.47.</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr.....  | 88 |
| <b>Figura 4.49.</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.....   | 89 |
| <b>Figura 4.5.</b> Resistencia a la polarización lineal LPR. Aleación Ag-Cu-Ti.....                                | 63 |
| <b>Figura 4.50.</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.....   | 89 |
| <b>Figura 4.51.</b> Probeta aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni.....   | 90 |
| <b>Figura 4.6.</b> Resistencia a la polarización lineal LPR. Aleación Ag-Cu-Ti-Ni.....                             | 63 |
| <b>Figura 4.7.</b> Resistencia a la polarización lineal LPR. Aleación Ag-Cu-Ti-Cr.....                             | 64 |
| <b>Figura 4.8.</b> Resistencia a la polarización lineal LPR. Aleación Ag-Cu-Ti-Cr.....                             | 64 |
| <b>Figura 4.9.</b> Resistencia a la polarización lineal LPR, aleaciones de aporte.....                             | 65 |
| <b>Grafico 4.1.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti.....  | 84 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Grafico 4.10.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni. ....  | 89 |
| <b>Grafico 4.11.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni. ....  | 89 |
| <b>Grafico 4.12.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr-Ni. ....  | 90 |
| <b>Grafico 4.13.</b> Diagrama esfuerzo – deformación comparativa de todas las aleaciones de aporte. ....   | 90 |
| <b>Grafico 4.2.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti. ....   | 84 |
| <b>Grafico 4.3.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti. ....   | 85 |
| <b>Grafico 4.4.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Ni. ....  | 86 |
| <b>Grafico 4.5.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Ni. ....  | 86 |
| <b>Grafico 4.6.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Ni. ....  | 86 |
| <b>Grafico 4.7.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr. ....  | 87 |
| <b>Grafico 4.8.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr. ....  | 87 |
| <b>Grafico 4.9.</b> Diagrama esfuerzo - deformación, aleación Ag-Cu-Ti-Cr. ....  | 88 |
| <b>Tabla 2.1.</b> Clasificación AWS de metales de aporte. ....   | 28 |
| <b>Tabla 2.2.</b> Aleaciones base Ag según AWS, rangos de temperatura de brazing. ....   | 29 |
| <b>Tabla 2.3.</b> Combinaciones metal base- metal de aporte. ....  | 30 |
| <b>Tabla 3.1:</b> Secuencia de desbaste y pulido de la aleación Ti-6Al-4V. ....  | 43 |
| <b>Tabla 3.2:</b> Composición química deseada de las aleaciones de aporte a base Ag-Cu-Ti. ....  | 45 |
| <b>Tabla 3.3:</b> Parámetros de brazing. ....  | 53 |
| <b>Tabla 3.4:</b> Parámetros de corte de las piezas unidas. ....   | 54 |
| <b>Tabla 4.1:</b> Tabla comparativa de composición en Wt. % de la aleación Ti-6Al-4V según la ASM (Aerospace<br>Specification Materials Inc.) y resultados obtenidos en el laboratorio. .... | 58 |
| <b>Tabla 4.10:</b> Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni y material base<br>SiC. ....  | 78 |
| <b>Tabla 4.11:</b> Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni y material<br>base Ti-6Al-4V. ....   | 79 |
| <b>Tabla 4.12:</b> Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr-Ni y material<br>base SiC. ....   | 80 |
| <b>Tabla 4.13:</b> Resultados de los ensayos mecánicos de tensión. ....  | 82 |
| <b>Tabla 4.2:</b> Análisis de Microdureza en HRC y HV. ....  | 61 |
| <b>Tabla 4.3:</b> Composición química de las aleaciones de aporte a base Ag-Cu-Ti. ....  | 62 |
| <b>Tabla 4.4:</b> Composición química del SiC. ....  | 66 |
| <b>Tabla 4.5:</b> Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti y material base Ti-<br>6Al-4V. ....   | 73 |
| <b>Tabla 4.6:</b> Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti y material base SiC<br>. ....   | 74 |
| <b>Tabla 4.7:</b> Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr y material base<br>Ti-6Al-4V. ....   | 75 |
| <b>Tabla 4.8:</b> Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Cr y material base<br>SiC. ....   | 76 |
| <b>Tabla 4.9:</b> Composición química del Microanálisis. de la unión entre aleación de aporte Ag-Cu-Ti-Ni y material base<br>Ti-6Al-4V. ....   | 77 |