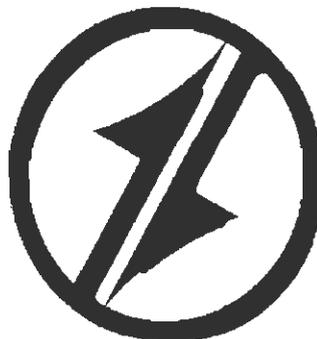


CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**“EFECTO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO SOBRE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNIONES DE ACERO INOXIDABLE
AISI 304 MEDIANTE EL PROCESO BRAZING AL VACÍO”**

POR

Ing. Isidro Guzmán Flores

TESIS

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 20 DE ENERO 2010.

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**"EFECTO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO SOBRE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNIONES DE ACERO INOXIDABLE
AISI 304 MEDIANTE EL PROCESO BRAZING AL VACÍO"**

POR

Ing. Isidro Guzmán Flores

TESIS

MAESTRO EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 20 DE ENERO 2010

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

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis "EFECTO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNIONES DE ACERO INOXIDABLE AISI 304 MEDIANTE EL PROCESO BRAZING AL VACÍO", con número de matrícula 09-MS012 sea aceptada para su defensa como Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial



**Dr. Felipe de Jesús García
Vázquez**
Tutor Académico



**Ing. Juan Francisco Reyna
Valdes**

Tutor en Planta



**Dr. Felipe Arturo Reyes
Valdes**

Asesor



Yo. Do.
M.C. Claudia González Rodríguez
Coordinador de Posgrado

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

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **ISIDRO GUZMÁN FLORES** una vez leída y revisada la Tesis titulada, **“EFECTO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNIONES DE ACERO INOXIDABLE AISI 304 MEDIANTE EL PROCESO BRAZING AL VACÍO”** aceptamos que la referida Tesis revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 18 días del mes de diciembre del año 2009.



**Dra. Ana Arizmendi
Morquecho**
Presidente



**Dr. Jose Jorge Ruiz
Mondragón**
Secretario



**Dr. Felipe de Jesús García
Vázquez**
Vocal

AGRADECIMIENTOS

A Dios a mis padres y a mi esposa por darme su apoyo para seguir a estudiando, a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), al Dr. Alejandro Garza Gomez por darme la oportunidad de desarrollarme en lo profesional como en lo académico, al Dr. Felipe de Jesus Garcia Vazquez ,Dr. David Salvador Gonzalez y Dr. Rolando Javier Praga por compartirme sus conocimientos y amistad, al Dr. Felipe Arturo Reyes, Jorge Acevedo, por sus consejos y aportaciones para elaborar esta monografía y a todos los maestros que de alguna forma me motivaron y me brindaron su incondicional apoyo y conocimiento.

ÍNDICE

SÍNTESIS	1
	2
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes	2
1.2 Problema	4
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos	5
1.5 Hipótesis	7
1.6 Beneficios y Aportaciones	7
1.7 Alcances	8
	9
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	
2.1 Descripción general y aplicación del brazing	9
2.2 Principios físicos del brazing	11
2.2.1 Reacción interfacial que ocurre durante el brazing	12
2.3 Tipos de brazing	15
2.3.1 Brazing en horno	16
2.3.2 Brazing al vacío	16
2.3.3 Criterios para usar un horno de vacío	19
2.4 Parámetros del proceso de brazing	23
2.5 Acero inoxidable AISI 304	26
2.5.1 Aceros inoxidables austeníticos	27
2.5.2 Soldabilidad de los acero inoxidables mediante el proceso brazing	28
2.5.2.1 Prevención de la formación de óxidos.	29
2.5.3 Características de los aceros inoxidables del tipo AISI 304	29
2.6 Materiales de aporte	30
2.6.1 Materiales de aporte base cobre	30
2.6.2 Materiales de aporte base Níquel	30
2.7 Características microestructurales en uniones mediante el proceso brazing	32

2.7.1 Medición del porcentaje en volumen del constituyente eutéctico en la zona central de la unión	33
2.8 Evaluación de propiedades mecánicas en la zona de unión por brazing de aceros inoxidable del tipo AISI 304	34
2.8.1 Relación esfuerzo deformación	39
2.8.2 Relación de esfuerzo deformación entre los metales base y el metal de aporte después del brazing	39
2.9 Métodos de ensayo de propiedades mecánicas en uniones mediante brazing.	41
2.9.1 Geometría de las muestras para evaluación mecánica en Uniones mediante brazing.	42
CAPITULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.	44
3.1 Desarrollo experimental.	44
3.2 Materiales de aporte	45
3.3 Preparación de probetas	47
3.4. Ciclos térmicos del proceso brazing	50
3.5 Diseño de experimento propuesto.	53
CAPITULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES	56
4.1 Introducción	56
4.2 Condiciones del proceso de unión por brazing	56
4.3. Preparación de las muestras para ensayos de tensión de acuerdo a las normas AWS 3.2 y ASTM E8	60
4.4 Evaluación microestructural de la zona de la unión mediante el proceso brazing en muestras de acero inoxidable del tipo 304.	61
4.4.1 Características microestructurales de la zona de difusión	64
4.4.1.1 1120°C por 2 horas con una relación de mezclado de 20/80 polvos de Inconel 738 y pasta Nicrobraz 160	64
4.4.1.2 1120°C por 2 horas utilizando pasta Nicrobraz 160	65
4.4.1.3 1120°C por 4 horas con una relación de mezclado de 20/80 polvos de Inconel 738 y pasta Nicrobraz 160	66
4.4.1.4. 1120°C por 4 horas utilizando pasta Nicrobraz 160	67

4.4.1.5. 1160°C por 2 horas con una relación de mezclado	68
4.4.1.6. 1160°C por 2 horas utilizando pasta Nicrobraz 160	69
4.4.1.7 1160°C por 4 horas con una relación de mezclado de 20/80 polvos de Inconel 738 y pasta Nicrobraz 160.	70
4.4.1.8 1160°C por 4 horas utilizando pasta Nicrobraz 160	71
4.4.1.9 Mediciones del espesor de la zona de difusión en la microestructura de las uniones mediante brazing	73
4.4.2 Formación de intermetálicos en el metal de aporte después de llevar a cabo el proceso de brazing al vacío 1120°C por 2 horas	75
4.5 Evaluación de propiedades mecánicas en la unión	83
4.5.1 Perfil de microdurezas	83
4.6 Resultados del ensayo de tensión.	86
4.7 Diseño de experimentos.	89
4.7.2 Análisis de ANOVA	94
4.8 Conclusiones	95
BIBLIOGRAFIA	96
LISTA DE FIGURAS	101
LISTA DE TABLAS	106

SÍNTESIS

El proceso de brazing al vacío es empleado en la reparación y unión de componentes de turbinas industriales, unión de materiales disímiles y geometrías complejas. Actualmente en la literatura existe poca información sobre el proceso de soldadura brazing al vacío en el acero inoxidable del tipo AISI 304, y de las características microestructurales y propiedades mecánicas que estos exhiben al ser unidos por este método.

Uno de los principios físicos que describen el proceso brazing es el fenómeno de capilaridad, donde el ángulo de contacto está en función de la temperatura y el tiempo y estos dos parámetros influyen directamente sobre la resistencia de la unión entre el metal base y el metal de aporte.

Existen muchos materiales de aporte, los cuales se pueden aplicar al proceso de soldadura brazing al vacío en el acero AISI 304, entre los más importantes, se encuentran los materiales de aporte base níquel y base cobre, estos materiales de aporte exhiben un comportamiento diferente en cuanto a propiedades mecánicas, después de ser unidos con el acero AISI 304 y su aplicación está en función de su uso posterior.

Los materiales de aporte que exhiben mejor resistencia a la tensión son los base níquel, obteniendo en la unión una resistencia superiores a la del metal base de 453 MPa, al realizar la mezcla de los materiales de aporte

NICROBRAZ 160 en pasta con polvos de INCONEL 738 la resistencia a la tensión aumenta hasta los 529 MP.

Este trabajo de investigación se realizó con el objetivo de evaluar el efecto de los parámetros del proceso brazing: temperatura, tiempo y relación de mezclado de los materiales de aporte polvos de INCONEL 738 y pasta de NICROBRAZ 160, en el desarrollo microestructural y las propiedades mecánicas en las uniones mediante este proceso.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En el proceso de unión por brazing dos o más metales son unidos utilizando calor y un metal de aporte que funde y fluye por efecto de capilaridad hacia la junta ensamblada de los metales, ocurre a una temperatura superior a 450°C, pero inferior a la del punto de fusión del metal base que está siendo unido [1,2].

Una parte esencial para poder llevar a cabo cualquier proceso brazing son los materiales de aporte que se van a usar, los cuales tienen la función de hacer la unión metalúrgica con el metal base a unir. Estos materiales están disponibles comercialmente en una gran variedad de formas y la mayoría ofrece excelente mojabilidad y ductilidad en la reparación de defectos menores y grietas angostas. La selección adecuada de los parámetros del proceso brazing al vacío, aplicada en acero inoxidable del tipo AISI 304, es una parte esencial en el desarrollo de la microestructura del metal de aporte, ya que de éstos depende la formación de compuestos intermetálicos tales como eutécticos base silicio o boruros [4], dependiendo de la composición química. Los compuestos intermetálicos son frágiles y quebradizos por lo que son los principales

propagadores de grietas. Incrementando la temperatura y el tiempo de permanencia en el proceso brazing se pueden obtener mayores zonas de difusión y controlar la formación de compuestos intermetálicos por medio de una solidificación isotérmica [5].

El tipo de solidificación en el proceso brazing es muy importante debido a que si el tiempo y temperatura no son los adecuados para permitir una solidificación isotérmica se formarán fases intermetálicas en el centro de la zona de la unión lo cual genera propiedades mecánicas poco favorables [6].

El proceso brazing resulta un método eficaz de reparación y unión de piezas complejas, debido a que se pueden unir muchas piezas en una sola corrida, existen diferentes tipos brazing entre los que destacan, brazing por inducción y brazing al horno, este último dividiéndose en dos tipos, brazing en horno continuo de atmósfera controlada y brazing en horno de vacío obteniéndose en este último las siguientes ventajas

Las ventajas más importantes que presenta el proceso de unión mediante brazing al vacío son las siguientes [2]:

1. Mínima distorsión existente, controlando los parámetros durante el proceso brazing, se reducen gradientes térmicos y distorsiones en el metal base. Las partes a unir se mantienen estáticas y reciben calentamiento y enfriamiento homogéneo.
2. Nula presencia de óxidos lo que favorece la capilaridad.
3. Es prácticamente imposible la aparición de porosidad en la unión debido a gases atrapados.
4. Capacidad de unir materiales disímiles.

5. Se puede automatizar el proceso de unión.

1.2 Planteamiento del problema

La búsqueda continúa en el incremento de eficiencia, desempeño y reducción de costos demanda el uso de materiales resistentes a altas temperaturas y a altos esfuerzos en componentes de turbinas industriales. Actualmente existe poca información en la literatura abierta sobre el proceso de unión por brazing al vacío el acero inoxidable del tipo AISI 304, y de las propiedades mecánicas y microestructurales que se obtienen después de aplicar el brazing al vacío.

1.3 Justificación

Para que el proceso de brazing al vacío, aplicado en aceros inoxidables del tipo AISI 304, sea exitoso, una parte esencial es la selección del material de aporte y la temperatura a la cual se lleva a cabo la unión, ya que de las propiedades que este obtenga durante el proceso, dependerá el desempeño de la pieza en condiciones de servicio. Sin embargo, actualmente en la literatura la evaluación de las propiedades mecánicas de materiales de aporte específicos para este tipo de aceros es limitada. Por lo tanto, con este tema de investigación se pretende evaluar las propiedades mecánicas y microestructurales de diferentes materiales de aporte, así como la temperatura y tiempo de brazing, esto con el objetivo de encontrar el material de aporte y parámetros del proceso brazing que brinden propiedades mecánicas adecuadas en la zona de la unión en piezas como intercambiadores de calor sistemas de enfriamiento, alabes móviles de la turbina compresora.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Generar información fundamental que permita entender el efecto de la temperatura y tiempo al cual se lleva a cabo el proceso brazing sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de diferentes relaciones de mezclado de metales, de aporte en uniones por brazing al vacío en el acero inoxidable del tipo AISI 304.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Determinar el tipo y forma de material de aporte adecuado para la unión por brazing para acero inoxidable 304.

- b) Determinar los parámetros de proceso apropiados y las condiciones de prueba para llevar a cabo el proceso de unión de componentes de acero inoxidable del tipo AISI 304 mediante brazing al vacío.

- c) Realizar la caracterización microestructural de las fases presentes en el metal de aporte que influyen directamente sobre las propiedades mecánicas en la zona de la unión.

- d) Determinar la mejor relación de mezclado del material de aporte que proporcione buenas características microestructurales y de resistencia mecánica en la zona de la unión al utilizar el proceso brazing.

1.5 Hipótesis

El proceso de unión por brazing aplicado con los parámetros y materiales de aporte adecuados producirá uniones sanas en su aplicación en aceros inoxidables del tipo AISI 304, en este sentido a través de ensayos de tensión se puede determinar la mejor relación de mezclado de materiales de aporte que otorguen propiedades mecánicas apropiadas en la unión. Esta práctica permitirá que el proceso brazing pueda ser una alternativa por ejemplo para la reparación de componentes de alabes del compresor utilizadas en las turbinas industriales entre otras aplicaciones.

1.6 Beneficios y aportaciones

El proceso de unión por brazing, representa una técnica alternativa, efectiva y vanguardista para la reparación de los componentes de acero inoxidable del tipo AISI 304, tales como intercambiadores de calor y alabes del compresor, dañados por efectos de operación; satisfaciendo los requerimientos de diseño de componentes e ingeniería de manufactura por obtención de una soldadura apropiada.

La realización de este proyecto de investigación aportará conocimiento científico y tecnológico, que será utilizado directamente en el proyecto de consolidación de conocimiento en COMIMSA, que tiene el objetivo de validar e implementar el proceso de soldadura brazing al vacío, para la manufactura y rehabilitación de componentes de turbinas de gas industriales.

1.7 Alcance

- a) Definir la relación de mezclado del material de aporte (pasta Microbraz 160 y polvos de IN 738) a utilizar en el proceso brazing al vacío.
- b) Determinar los parámetros óptimos (tiempo y temperatura de brazing) que generen propiedades mecánicas y microestructurales adecuadas para el proceso brazing.
- c) Generar un documento técnico-científico que se integre al proceso general de reparación de componentes de turbinas por brazing al vacío de COMIMSA.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Descripción general y aplicación del brazing

El brazing es un proceso eficaz en la unión de formas complejas, es un proceso en el cual un metal de aporte funde y fluye por capilaridad formando la unión [1,2]. La zona de reacción la formación de compuestos intermetálicos, que se forman durante el proceso de brazing al vacío entre el metal base, el metal de aporte y el ángulo de mojado que se obtiene influyen de manera importante para que la unión se lleve a cabo de manera exitosa.

Por otra parte, la selección del metal de aporte es muy importante, debido a que de él depende el comportamiento mecánico de la unión. En el presente trabajo se presenta un estudio referente a la evaluación de los parámetros del proceso brazing y de la relación de mezclado de un metal de aporte base níquel.

En el proceso de unión por brazing al vacío se obtiene una mínima distorsión de la pieza después de aplicar el material de aporte. Entre otras de las ventajas de aplicar el proceso de brazing al vacío es que se previene la formación de

óxidos, los cuales se forman a partir del punto de rocío de -80°C , por lo tanto, este tipo de proceso nos permite trabajar con un punto de rocío de -40°C lo cual nos indica que no se generan óxidos en este punto.

El acero inoxidable del tipo AISI 304 es un acero austenítico, con un excelente comportamiento a ser unidos por el proceso de brazing al vacío, además muestran una muy buena afinidad con diferentes materiales de aporte [7].

Otra aplicación del acero inoxidable AISI 304 es en la fabricación de alabes móviles de la parte del compresor de la turbina Ruston TB 5000, Figura 2.1. Estos alabes pueden ser reparados por el proceso brazing al vacío, puesto que con otros métodos de reparación, por ejemplo GMAW (Gas Metal Arc Welding), se reporta que sufren distorsiones en la geometría y agrietamiento, por la gran cantidad del calor de entrada que se requiere para lograr la unión. Con el proceso brazing como método de reparación se evitan las distorsiones, agrietamiento, porosidades y sobre todo se aprovecha el ciclo térmico para dar un tratamiento térmico a la pieza.



Figura 2.1. Alabes móviles colocados en el compresor de la turbina Ruston TB 5000.

2.2 Principios físicos del brazing

El fenómeno de la capilaridad es el principio que rige el proceso brazing, de este principio depende que se lleven a cabo las uniones de los metales requeridos. Este fenómeno es el resultado de la atracción relativa de las moléculas, entre líquido y sólidos [5].

En la práctica del proceso de soldadura brazing, las características del flujo del metal de aporte también se ven influenciadas por consideraciones dinámicas como lo son la fluidez, presión de vapor y la gravedad. Otros factores que marcan una influencia relevante son el ángulo de contacto del metal de aporte con el metal base y la mojabilidad del metal de aporte con la superficie del metal base [2], como se muestra en la Figuras 2.2 y 2.3.

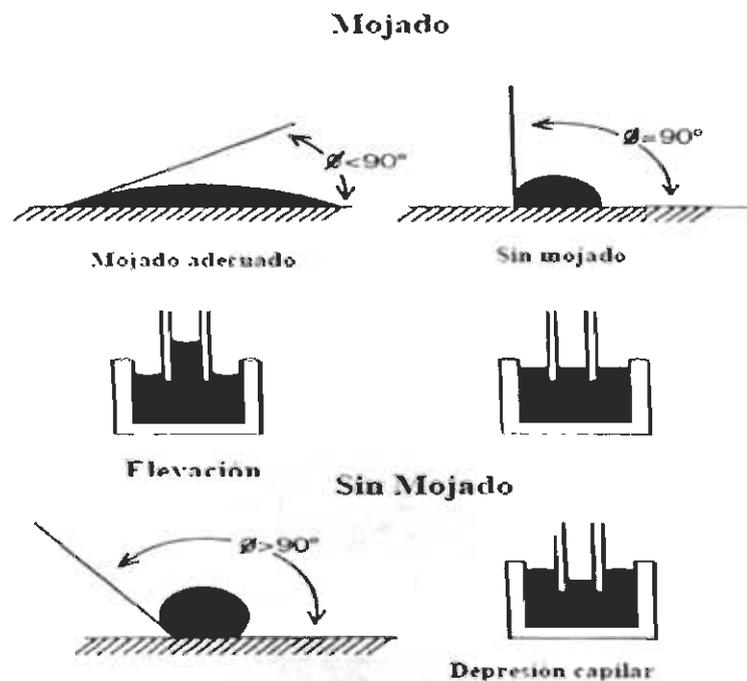


Figura 2.2. Efecto del ángulo de contacto en la capilaridad [2].

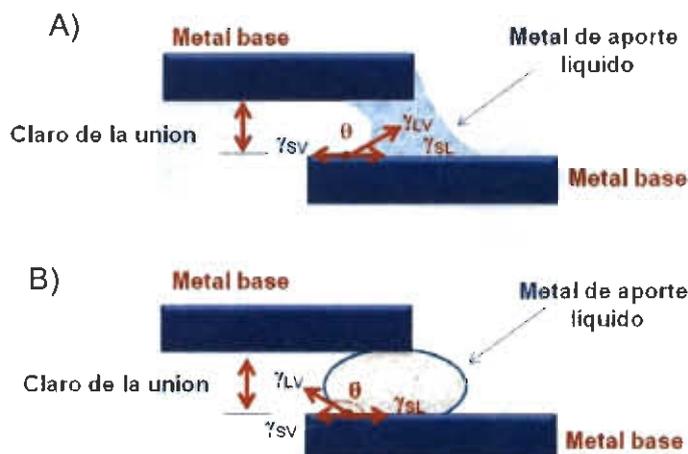


Figura 2.3. Relación del ángulo de contacto con la tensión superficial. (A) sistema de moabilidad y (B) sistema de no moabilidad [5].

2.2.1 Reacción interfacial que ocurre durante el brazing

Durante el brazing al vacío el metal de aporte se funde y reacciona con el metal base, el producto de esta reacción es una línea que, algunas veces, es demasiado delgada para ser observada por el microscopio óptico. De hecho esta línea modifica la moabilidad y la propagación del líquido del metal de aporte en contacto con el metal base; las Figuras 2.4 y 2.5 muestran la reacción interfacial durante el proceso del brazing [5].

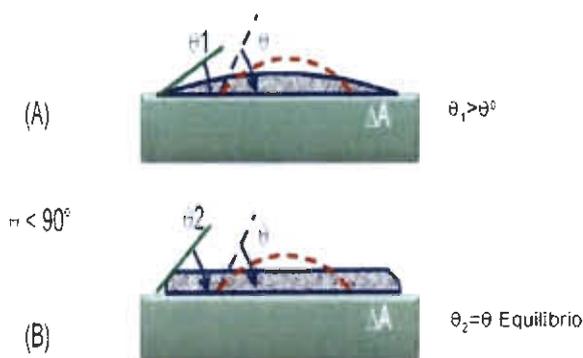


Figura 2.4. Líquido extendido a través de la superficie del sólido con un ángulo $\theta \leq 90^\circ$. (A) $\theta_1 > \theta$ y (B) $\theta_2 = \theta$ equilibrio [5].

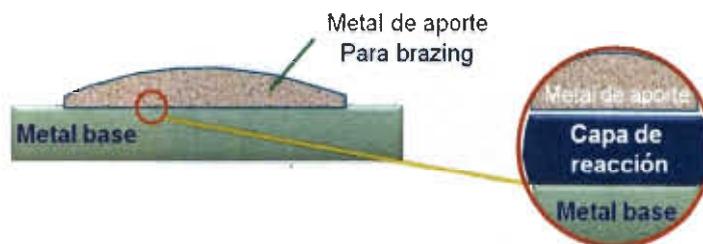


Figura 2.5. Línea de reacción formada durante el proceso brazing [2].

Cuando ocurre una reacción interfacial entre el metal base y el metal de aporte, la energía libre de la reacción por unidad de área y de tiempo (ΔG_T) deberá ser incluida en la siguiente relación:

$$\gamma_{SV} - (\gamma'_{SL} - \Delta G_T) = \gamma_{LV} \cos \theta \quad (1)$$

Donde:

γ_{SV} = Energía superficial Sólido-Vapor

γ'_{SL} = Energía superficial Sólido-Líquido

γ_{LV} = Energía superficial Líquido-Vapor



Debido al cambio en la interfase sólido/líquido el valor de γ'_{SL} es inferior al valor de γ_{SL} . Las variables γ'_{SL} y ΔG_T incrementarán la fuerza motriz para que se lleve a cabo la mojabilidad, si la fuerza de empuje es mayor que $\gamma_{LV} \cos \theta$, la propagación ocurrirá hasta que el líquido tenga reacción completa con el sólido. La Figura 2.6 muestra un ejemplo de una línea de reacción, después del proceso de brazing al vacío, entre el vanadio y acero inoxidable AISI 304.



Figura 2.6. Ejemplo de una línea de reacción entre el Vanadio y acero inoxidable AISI 304.

La presencia de poros y la carencia de llenado por la falta de metal de aporte causado por un flujo inadecuado del metal de aporte fundido, puede ser responsable un deterioro en las propiedades mecánicas de la unión [8]. Además, discontinuidades en la superficie y/o fundente atrapado son otros factores que contribuyen a la calidad de la unión. Cuando se forman compuestos intermetálicos en la interfase, se formará un pequeño abultamiento en la unión como resultado de una alta fracción en volumen de compuestos intermetálicos, los cuales son frágiles y degradan las propiedades mecánicas de la unión.

2.3 Tipos de brazing

2.3.1 Brazing en horno

Es el proceso más utilizado, las piezas que se unen por este proceso pueden pre-ensamblarse y sostenerse en la posición correcta por medio de guías, el metal de aporte se coloca con la unión simultáneamente. Para este proceso es necesario que las piezas, con geometrías complejas, se calienten de manera uniforme a fin de evitar la distorsión que resultaría de un calentamiento local del área de unión [5].

Las piezas que se van a unir se deben ensamblar con el metal de aporte y el fundente, en el caso en que se utilice un fundente éste debe ser colocado dentro de la unión o junto a ella. El metal de aporte puede utilizarse en forma de alambre, papel, limaduras, polvos o pasta. El ensamble se calienta en el horno hasta que las piezas alcanzan la temperatura adecuada de brazing y se efectúa la unión.

A continuación, se retiran las partes ensambladas, obteniéndose resultados satisfactorios si se rocía fundente seco en polvo a lo largo de la unión. En la mayoría de los casos la pasta de fundente es adecuada, pero en ocasiones, retarda el flujo del metal de aporte en la unión. El tiempo para realizar la unión dependerá del espesor de las piezas y de la de éste.

Normalmente, se utilizan de 2 a 4 horas a la temperatura de soldadura brazing para formar la unión, un tiempo más largo, a esta temperatura, puede resultar benéfico en los casos en que es preciso disminuir el punto de fusión del metal de aporte, o en los que la difusión mejora la ductilidad o la resistencia mecánica de la unión.

Los tipos de hornos que se emplean en el proceso brazing se clasifican como hornos de lotes, ya sea con aire o atmósfera controlada y de vacío. La Figura 2.7 muestra un tipo de horno utilizado para el proceso de brazing [3-5].

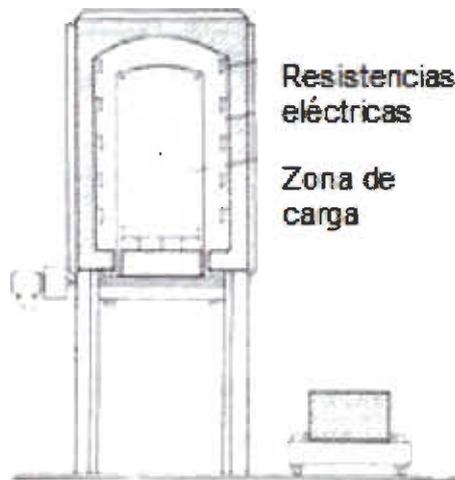


Figura 2.7. Horno elevador para realizar el brazing con atmósfera controlada [3-5].

2.3.2 Brazing al vacío

El brazing al vacío es uno de los métodos de unión de materiales comúnmente usados en la industria aeroespacial. Es utilizado para el ensamble de piezas pequeñas de materiales ferrosos y no ferrosos, debido a que se pueden realizar varias uniones en una sola pieza y es uno de los procesos de unión de materiales que genera mínima distorsión. Además, es un proceso en el cual se evita la formación de óxidos, teniendo así un mayor control de calidad en la unión. En la Figura 2.8 se puede apreciar un esquema de un horno de vacío utilizado para realizar el brazing.

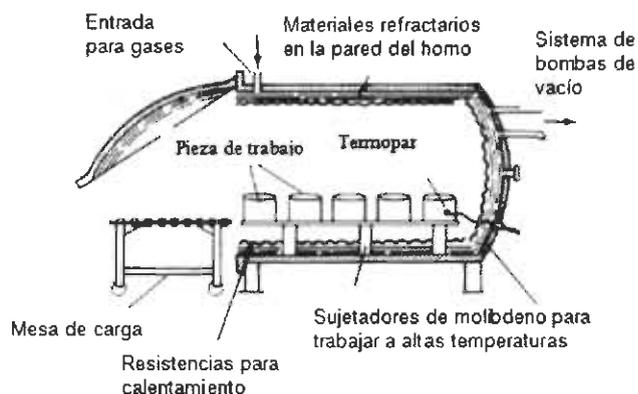


Figura 2.8. Horno de vacío utilizado para operaciones de brazing [5].

Al realizar brazing en un horno de vacío se tiene ventajas sobre los otros procesos convencionales, ya que se pueden controlar los siguientes parámetros:

- Velocidad de calentamiento.
- Temperatura y tiempo del brazing.
- Velocidad de enfriamiento.
- Control de la atmósfera aplicando un gas inerte.
- Se pueden guardar diferentes ciclos de brazing en la memoria del microprocesador.
- Detección de anomalías durante el proceso brazing.

El grado de vacío que puede ser alcanzado en cualquier circunstancia dada está en función de los siguientes parámetros:

- Propiedades físicas del material escogido para espacio encerrado.
- Naturaleza y tipo de gas que tiene.
- Método de bombeo empleado.

La presión dentro del horno está medida en términos de altura de la columna de líquidos, usualmente mercurio Hg o agua. Para la presión a nivel del mar generalmente se acepta el valor de 1 atm; algunas veces se expresa en términos de milibares, 1 atm equivale a 1000 mbar. Otra unidad de medida es el torr en este caso, una presión de 1 atmósfera es igual a 760 torr [9].

El comportamiento de los gases y vapor comienza a ser más complejo en condiciones locales de temperatura y cambios de presión. Los gases ideales obedecen a las leyes de Charles y Boyle [6], pero los gases no condensables no entran en estas leyes. Sin embargo, el grado de vacío está en función de los vapores y de la presión de los mismos [9], como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Diferentes rangos de vacío y presiones obtenidas [9].

Condición	Rango de presión (Pa)
Bajo	3333.05
Medio	133.32
Fino	0.13
Alto	1.3×10^{-4}
Demasiado alto	1.33×10^{-7}
Ultra alto	1.33×10^{-9}

El vacío es creado cuando las moléculas de gas son removidas de un espacio cerrado hasta que quede o permanezca la menor cantidad posible de moléculas de gas, esto se puede lograr empleando un buen sistema de bombas [9].

Es común que en la cámara de vacío se encuentran gases residuales, estos tienen una marcada influencia sobre el grado de protección que ofrece a los

metales que están sometidos al brazing. Los gases residuales derivan de dos fuentes primarias [9]:

1. Fugas en el sistema del horno: ninguna cámara de vacío puede ser perfecta para impedir las fugas. Otra fuente de gases puede ser por el sistema de enfriamiento del horno, el principal contaminante será el oxígeno.

2. Cuando el horno es abierto a la atmósfera ambiente, son absorbidos gases, especialmente vapor de agua, y tienen que ser eliminados durante el siguiente ciclo o proceso. Un ejemplo, es cuando se aplica el proceso brazing para un acero inoxidable AISI 304, pudiéndose alcanzar un vacío de 1.33×10^{-2} Pa, sin embargo, la bomba de vacío puede tener fugas, esto significa que no se logra un vacío adecuado para el proceso y para que el flujo de metal no sea bajo en una temperatura de 980 a 1020°C, en otras palabras para alcanzar un vacío excelente libre de fugas, el grado de éste deberá ser de 1.33×10^{-2} Pa.

3. Otra fuente de gases residuales es el mal sellado de las puertas, de los materiales que están fabricados los o-rings y de las grasas utilizadas para alto vacío.

2.3.3 Criterios para usar un horno de vacío

Con la aplicación del proceso de unión por brazing al vacío se pueden obtener las siguientes ventajas en los distintos materiales sometidos a este proceso:

- a) Mínima distorsión existente, las partes se mantienen estáticas y reciben un calentamiento y enfriamiento homogéneo.
- b) Nula presencia de óxidos favorecido por el fenómeno de capilaridad.

c) Mínima porosidad en la unión debido a gases atrapados.

Un sistema industrial de tratamientos térmicos al vacío se muestra en la Figura 2.9. Éste equipo puede operar en un rango de temperaturas entre 150°C y 1400°C, en el caso del proceso brazing su operación está en función de las características físicas y químicas del metal de aporte utilizado.



Figura 2.9. Horno de vacío para realizar el proceso brazing.

Los materiales de aporte para el brazing deberán tener una baja presión de vapor; esto elimina cualquier aleación que contenga cadmio, zinc o manganeso. Los criterios metalúrgicos dictan que las aleaciones que son comúnmente usadas tienen valores de solidus de 778°C o mayores, y la temperatura del brazing puede exceder los 800°C. Existe una notable excepción a la regla que son las aleaciones Al-Si, Al-Si-Mg y materiales como plata y cobre que son de sistemas ternarios y sus derivados. Todos estos materiales tienen altas especificaciones de uso y pueden ser descritos como los que quedan fuera del brazing al vacío.

Debido a que la transferencia de calor durante el brazing ocurre por radiación, metales de aporte base plata se volatilizan a temperaturas superiores a 1000°C, la aplicación de gases como argón, helio y nitrógeno hacen la función

de suprimir o evitar que la plata se volatilice. En la gráfica de la Figura 2.10 se muestra la presión de vapor y temperaturas de algunos materiales de aporte utilizados en el proceso brazing.

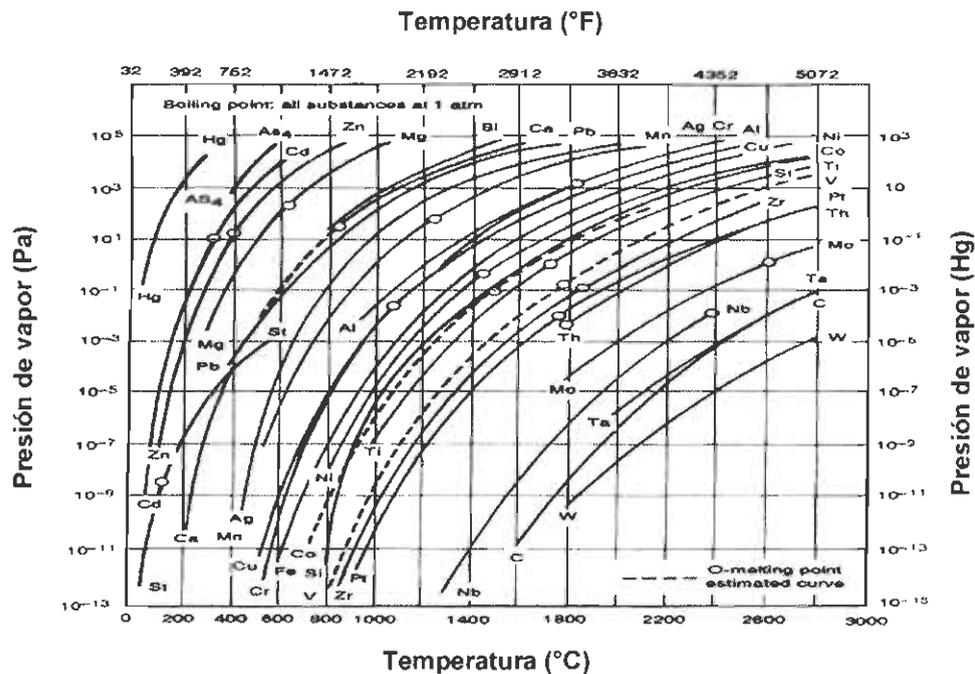


Figura 2.10. Gráfica de materiales de aporte y temperaturas a las cuales se puede aplicar el brazing relacionando la formación de vapor de agua con la temperatura [8].

En la Figura 2.11 se puede apreciar el ciclo de temperatura para realizar un proceso de unión por brazing al vacío. Los hornos de vacío para el brazing también pueden ser usados para hacer los siguientes tratamientos térmicos después del brazing [2]:

- a) Tratamiento térmico por solución, endurecimiento por envejecido, especialmente para aplicaciones aeroespaciales, cuando el material de aporte para el brazing ha sido seleccionado, la temperatura debe coincidir con la del tratamiento térmico de solución del material.

- b) Relevado de esfuerzos y recocido de aceros inoxidable (algunas veces llamado medida de la anti-corrosión en aplicaciones petroleras).

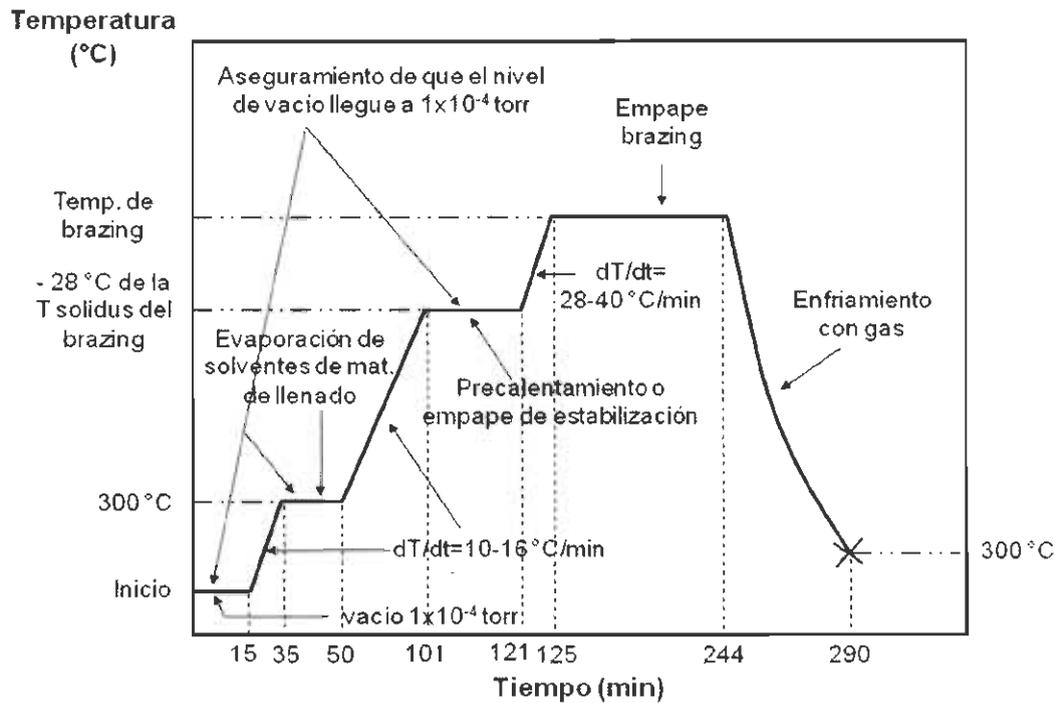


Figura 2.11. Ciclos térmicos utilizados en el proceso de brazing al vacío.

A continuación se presenta un procedimiento para realizar un brazing al vacío:

1. Los materiales se cargan dentro de la cámara del horno.
2. La puerta del horno se cierra.
3. Se enciende el sistema de bombeo.
4. Cuando el nivel de vacío se ha alcanzado, se suministran gases inertes al horno para eliminar los gases residuales, lo cual puede favorecer el fenómeno de la capilaridad.

5. El bombeo continúa y el suministro de gas se corta desde la cámara de vacío (este proceso podría ser repetido dos o tres veces dependiendo de las circunstancias).
6. Las piezas dentro del horno son llevadas a la temperatura de brazing. Esta temperatura puede ser alcanzada por un calentamiento continuo, pero es más común la aplicación de calor, mantenerlo y después continuar para que todas las piezas alcancen la temperatura adecuada como se muestra en la Figura 2.12.

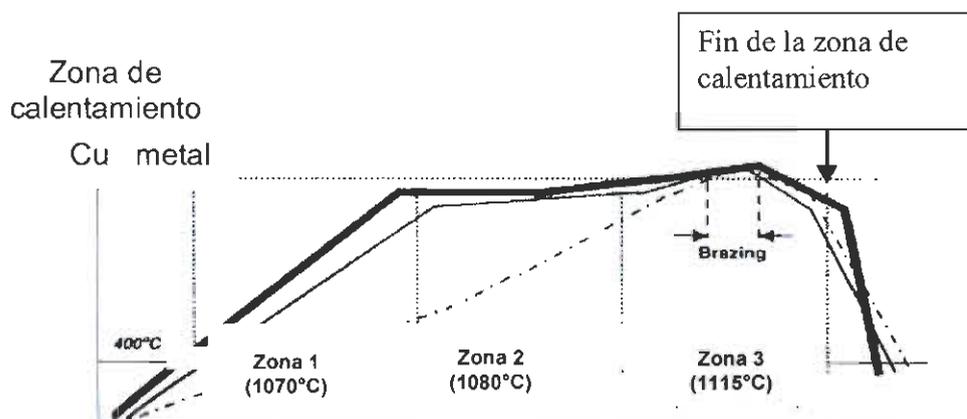


Figura 2.12. Ciclo del proceso brazing: esquema de las velocidades de calentamiento y enfriamiento dividido en 3 zonas [6].

2.4 Parámetros del proceso de brazing al vacío

Este tipo de proceso, en comparación con el horno de lote, trabaja bajo condiciones de vacío. El vacío elimina la aparición de óxidos pero siempre y cuando se mantenga un control de las fugas presentes, una buena limpieza y parámetros adecuados. Para realizar un brazing es recomendable tener un nivel apropiado de vacío, alrededor de 0.133 Pa.

El vapor de agua presente en la atmósfera es un parámetro crítico en términos de su habilidad de remover óxidos por reducción directa de óxidos. En términos generales, cuando se hace el brazing al vacío en componentes de aceros inoxidable, es conveniente mantener el vapor de agua a un nivel de 130 ppm y el contenido de la atmósfera del gas debe mantenerse (teniendo un punto de rocío de -40°C). La Tabla 2.2 muestra los valores del punto de rocío y la relación de vapor de agua. [9]

Tabla 2.2 Valores del punto de rocío para la formación de vapor de agua. [9]

Punto de rocío ($^{\circ}\text{C}$)	VAPOR DE AGUA (Ppm)
-70	2
-60	11
-55	40
-40	130
-30	380
-20	1000
-10	2700

La presencia de oxígeno, al igual que la de nitrógeno, afectan considerablemente la capilaridad debido a la formación de gases reductores, al trabajar bajo condiciones de vacío se favorecerá que se lleve a cabo la capilaridad, facilitando la mojabilidad y el flujo del metal de aporte. [9]

Por otra parte, para obtener un proceso exitoso durante el brazing es conveniente mantener, en buenas condiciones, tanto la superficie del metal base como la del metal de aporte, esto significa tener una superficie limpia y libre de óxidos. En la Figura 2.13, se puede apreciar que la formación de óxidos está en función de la temperatura y del punto de rocío en una atmósfera con hidrógeno, a menores temperaturas se forman óxidos de cobre y de hierro.

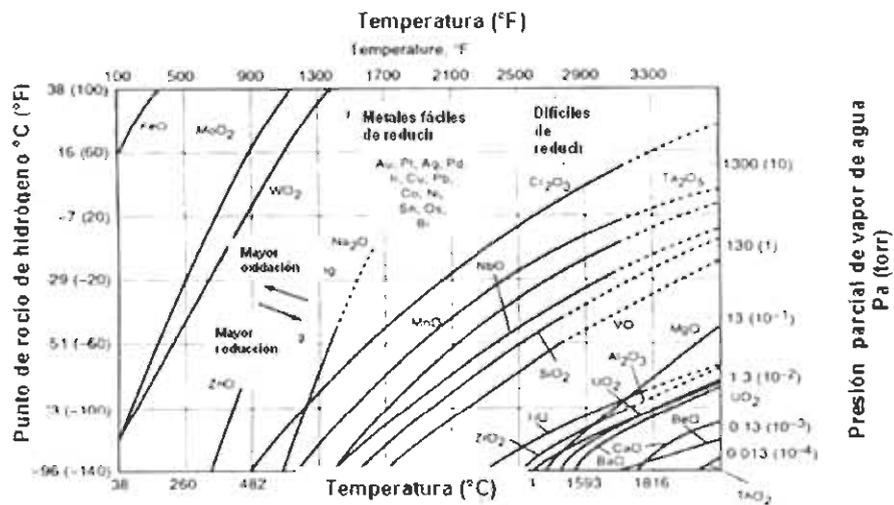


Figura 2.13. Efecto de la temperatura y del punto de rocío sobre la formación de óxidos [8].

La eliminación de óxidos en el proceso brazing comienza a altas temperaturas, con esto se mejora la mojabilidad, lo que indica que el ángulo de contacto es mejor, y por lo tanto, se facilita el flujo del material de aporte. Cuando inicia el ciclo de calentamiento la temperatura de los componentes es muy baja, antes de comenzar la limpieza existen óxidos en la superficie del metal base y del material de aporte. Los óxidos reaccionan con los gases presentes formando una capa de óxidos sobre la superficie del metal base y del material de aporte. Durante el ciclo brazing, los aceros inoxidable AISI 304 pierden su brillo en un rango de temperaturas entre los 600°C y 850°C. Otro factor importante es el control del contenido de oxígeno, dentro de la cámara de vacío, ya que éste es el principal elemento formador de óxidos y en hornos continuos es muy común tener estos defectos.

2.5 Acero inoxidable AISI 304

Los aceros inoxidables han sido clasificados de acuerdo a su microestructura, y son descritos como ferríticos, martensíticos, austeníticos o duplex (austenita y ferrita) y aceros PH, los cuales son endurecidos por precipitación y se obtienen de los martensíticos y ferríticos. La soldabilidad depende del contenido y tipo de elementos de aleación.

Con el propósito de controlar la microestructura y las propiedades mecánicas se adicionan elementos de aleación a los sistemas Fe-Cr, Fe-Cr-C y Fe-Cr-Ni. Entre estos elementos de aleación se incluyen Mn, Si, Mo, Ti y N, funcionando como estabilizadores de la fase α y γ del hierro, modificando incluso con su presencia el diagrama Fe-C, elementos como el Ni, Co Mn abren y expanden el campo de γ mientras que elementos como C, Zn, N abren y contraen el campo de γ , otros elementos que cierran γ y expanden la zona α en el diagrama Fe-C son Cr, W, V, Al, otros elementos como el B, Zr, Ta cierran γ y contraen α , estos elementos pueden cambiar la microestructura de los aceros inoxidables. Elementos como el Cr y Ni también pueden cambiar la microestructura del metal dependiendo de la cantidad en que se encuentren presentes, como se muestra en la Figura 2.14 (diagrama de Scheaffler). De acuerdo al contenido de los elementos de aleación será el tipo de acero inoxidable, martensítico, austenítico o ferrítico. Dentro de estos aceros soldables se encuentran los austeníticos, los cuales pueden ser soldables por varios métodos incluyendo el proceso brazing. [10]

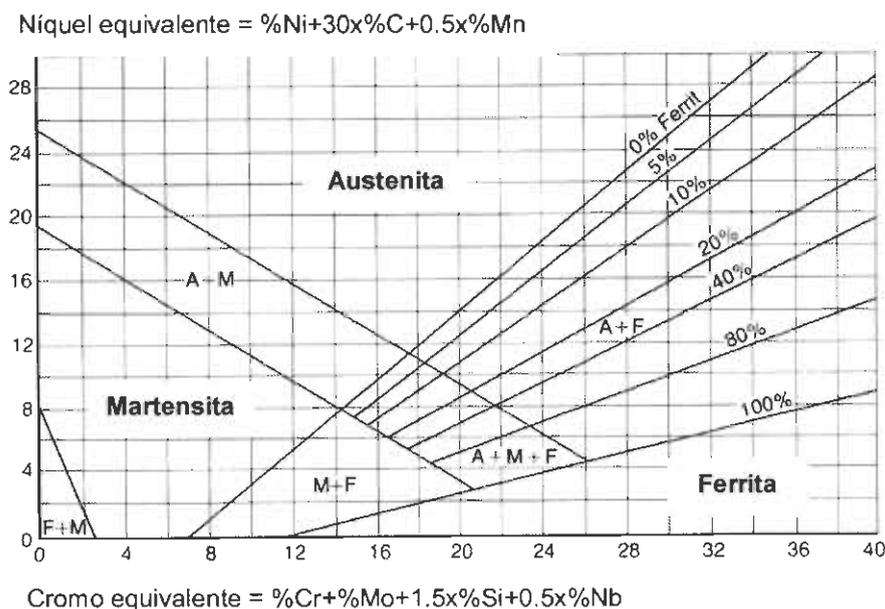


Figura 2.14. Diagrama de Scheaffler.

2.5.1 Aceros inoxidables austeníticos

Estos aceros exhiben una fase cúbica centrada en las caras (fcc), ésta estructura se mantiene estable dentro de un amplio rango de temperatura, resulta de un balance de la adición de elementos de aleación que estabilizan la fase austenítica, a temperaturas elevadas o temperaturas criogénicas. Estas aleaciones sólo pueden ser endurecidas por solución sólida o por trabajado en frío ya que son primordialmente de fase simple. [11]

Los aceros austeníticos inoxidables se desarrollaron para uso de media y alta resistencia al ataque por corrosión, así como a temperaturas criogénicas. Los aceros inoxidables austeníticos se consideran como los más soldables de los aceros de alta-aleación y se pueden soldar por todos los procesos de soldadura de fusión y resistencia. Las aleaciones 304 y 304L son típicas de los aceros inoxidables austeníticos. [11]

Existen 2 aspectos importantes que se deben considerar al estar produciendo juntas soldadas con los aceros inoxidable austeníticos:

1. Preservar la resistencia a la corrosión.
2. Evitar la formación de grietas.

2.5.2 Soldabilidad de los aceros inoxidable mediante el proceso brazing

El brazing es comúnmente usado para unir aceros inoxidable, aceros al carbono y materiales disímiles, aleaciones de cobre y la combinación de estas, produciendo uniones satisfactorias. Existen en el mercado una amplia variedad de materiales de aporte para utilizarse mediante el proceso brazing con diferentes composiciones que alcanzan una buena combinación de resistencia a la corrosión, resistencia al esfuerzo y otras propiedades que se obtienen al unir materiales disímiles. Cuando se aplican las técnicas apropiadas para unir metales por brazing se obtiene una excelente resistencia a la corrosión, y aplicando el calor necesario, aunque las piezas que se unen sean delgadas éstas no se distorsionan.

Las altas cantidades de cromo que están presentes en los aceros inoxidable causa que se formen películas de Cr_2O_3 en la superficie, así como la formación de películas de TiO_2 llamado titanio estabilizado. En el caso de que estos óxidos sean altamente refractarios y fuertemente adherentes y difíciles de remover, evitarán que el material de aporte se funda, dificultando la mojabilidad con el metal base. Por lo tanto, se evita que se lleve a cabo el fenómeno de capilaridad, para unir al metal base con el aporte, y se acelere la formación de CrO_2 cuando son calentados en aire. [9]

2.5.2.1 Prevención de la formación de óxidos [12].

A continuación se especifican una serie de pasos a seguir para evitar la formación de óxidos en aceros inoxidable:

1. Una limpieza química adecuada a temperatura ambiente, seguida por un calentamiento rápido en una atmósfera inerte (mediante gas argón).
2. Calentando el acero a una temperatura muy elevada para tener una atmósfera reductora y hacerla libre de hidrógeno, después aplicar limpieza química y remover los óxidos para favorecer la mojabilidad.
3. Durante el calentamiento del brazing recubrir el área a unir con agentes protectores tales como fundentes que disuelven los óxidos.
4. Calentando en vacío después de la limpieza lo cual reduce la formación de CrO_2 y previene la formación de otros óxidos más perjudiciales.
5. Seleccionando metales de aporte con bajo punto de fusión.

2.5.3 Características de los aceros inoxidable del tipo AISI 304

Los aceros inoxidable del tipo AISI 304 son aceros resistentes a la corrosión y presentan excelentes propiedades mecánicas. Estos aceros se caracterizan por su contenido de cromo de 18% a 20%, ver Tabla 2.3. Estas características de resistencia a la corrosión se deben a la formación de una capa de CrO_2 en la superficie. Este material, aparte de tener una excelente resistencia a la corrosión, tiene diferentes aplicaciones y propiedades mecánicas.

Tabla 2.3 Composición química de un acero inoxidable AISI 304.

Acero AISI	C	Si Max	Mn Max	P Max	S Max	Cr	Ni
304	0.08	1	2	0.045	0.03	18-20	8-10.50

2.6 Materiales de aporte

Los materiales de aporte base cobre y base níquel son los de mayor uso hoy en día, en diferentes componentes pertenecientes al sector de automatización. A continuación se muestran las características de cada una de estas familias de aleaciones.

2.6.1 Materiales de aporte base cobre

Estos materiales presentan una ductilidad excelente, costo medio y una buena resistencia a la corrosión. Son utilizados en tubos, para aislar el circuito gas del exterior. No obstante, debido a la presencia de ácido sulfúrico en el condensado de gas de escape, no es aconsejable su uso para aislar el circuito de gas del refrigerante debido a las siguientes consideraciones [7]: la extrema gravedad de una fuga de refrigerante y las zonas frías presentan alta condensación.

2.6.2 Materiales de aporte base níquel

Estos materiales presentan una baja ductilidad y un alto costo, pero con su uso se obtiene una excelente resistencia a la corrosión. Todos los metales de aporte están aleados con cromo para mejorar las propiedades anti-corrosión. Como las aleaciones Cr-Ni tienen un punto de fusión muy alto (>1400 °C), es necesario recurrir a mezclas que tengan un punto de fusión más bajo que permitan realizar el brazing, sin dañar el material base. Los elementos utilizados para disminuir la temperatura de fusión son principalmente: boro, fósforo y silicio. Según el elemento adicionado, pueden formar 3 tipos:

1. Adicionando boro (NiCrB), presentan dos limitaciones importantes:
 - a) Sensibiliza el metal base al formar boruros de cromo.
 - b) Reacciona con el nitrógeno de la atmósfera de los hornos continuos restringiendo su uso a los hornos de vacío.

2. Adicionando fósforo (NiCrP), son los más utilizados ya que no reaccionan con ninguno de los componentes de la atmósfera reductora. El fósforo es muy eficaz disminuyendo el punto de fusión del níquel.

3. Adicionando silicio (NiCrSi), estos presentan las siguientes características:
 - a) Capacidad limitada para disminuir el punto de fusión.
 - b) El uso de este elemento genera una menor proporción de fases frágiles.

Para utilizar las ventajas de estos metales y reducir sus desventajas se han generado nuevas clasificaciones de los metales de aporte basados en los NiCrP con una mejor tenacidad. Recientemente, se ha desarrollado un material de aporte en forma de pasta NiCrPSi, con composición intermedia entre los materiales NiCrPCu y NiCrSi, éste presenta una mejor tenacidad que el aporte NiCrP, pero con un punto de fusión más bajo que el NiCrSi. [12]

2.7 Características microestructurales en uniones mediante el proceso brazing

El proceso de unión por brazing se ha convertido en una alternativa atractiva para la reparación de componentes dañados en servicio fabricados de acero inoxidable AISI 304 [13]. No obstante, la microestructura en la zona central de las uniones mediante el proceso brazing, presenta fases intermetálicas duras y frágiles en forma de constituyentes eutécticos, las cuales son perjudiciales en las propiedades mecánicas de la unión [14]. Los elementos que disminuyen el punto de fusión (boro, silicio, fósforo) usados como metales de aporte base níquel tienden a formar microestructuras frágiles y duras en la unión [15].

Para prevenir estas fases perjudiciales se ha desarrollado un proceso de unión, el cual está basado en una solidificación isotérmica completa de la fase líquida transitoria que existe temporalmente a la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso brazing [16]. La Figura 2.15 muestra un ejemplo de la microestructura del constituyente eutéctico en la zona central de la unión, utilizando Microbraz 150 como metal de aporte [17].

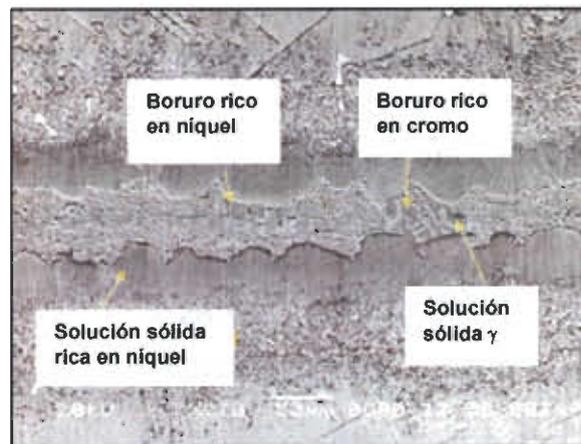


Figura 2.15. Imagen obtenida con electrones secundarios del constituyente eutéctico en la microestructura de la zona central de la unión.

En la Figura 2.16 muestra la microestructura del constituyente eutéctico formado en el centro de la unión utilizando los metales de aporte BNi-3: Ni-3.2B-4.5Si [18] y BNi-1 (Ni-14Cr-4.5Si-4.5Fe-3B) [19] como materiales de aporte, respectivamente.

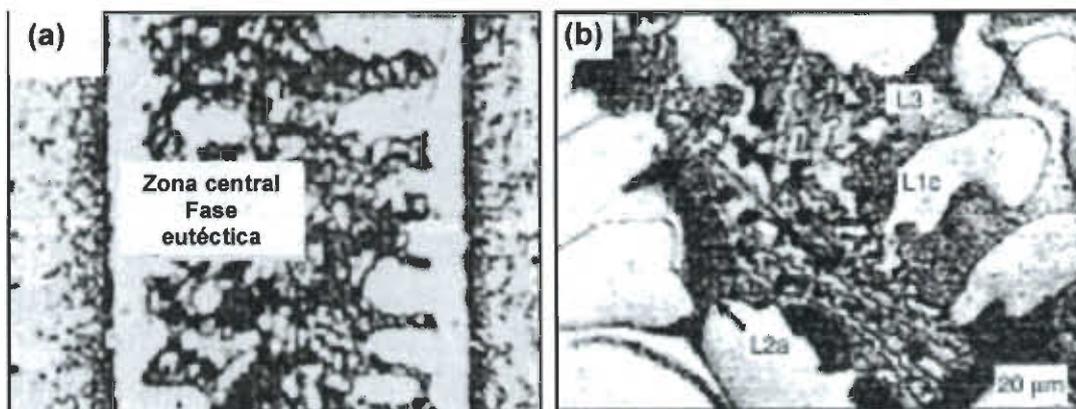


Figura 2.16. Imágenes que ilustran la microestructura del constituyente eutéctico en la zona central de la unión, utilizando metales de aporte con boro y silicio. (a) BNi-3: Ni-3.2B-4.5Si, (b) BNi-1: Ni-14Cr-4.5Si-4.5Fe-3B.

2.7.1 Medición del porcentaje en volumen del constituyente eutéctico en la zona central de la unión

En un estudio reciente [20], se realizó la medición del porcentaje en volumen del constituyente eutéctico en la microestructura de la zona central de uniones mediante brazing, ver Figura 2.17. Se ha encontrado que, para tamaños de claro de 2 mm, el porcentaje en volumen del constituyente eutéctico promedio es de 39.50%. Cuando se reduce el tamaño del claro a 0.5 mm, este porcentaje en volumen disminuye a un 28.36%, esto es debido a que se tiene menor distancia para que los elementos difundan y se lleve a cabo la solidificación isotérmica. [21]

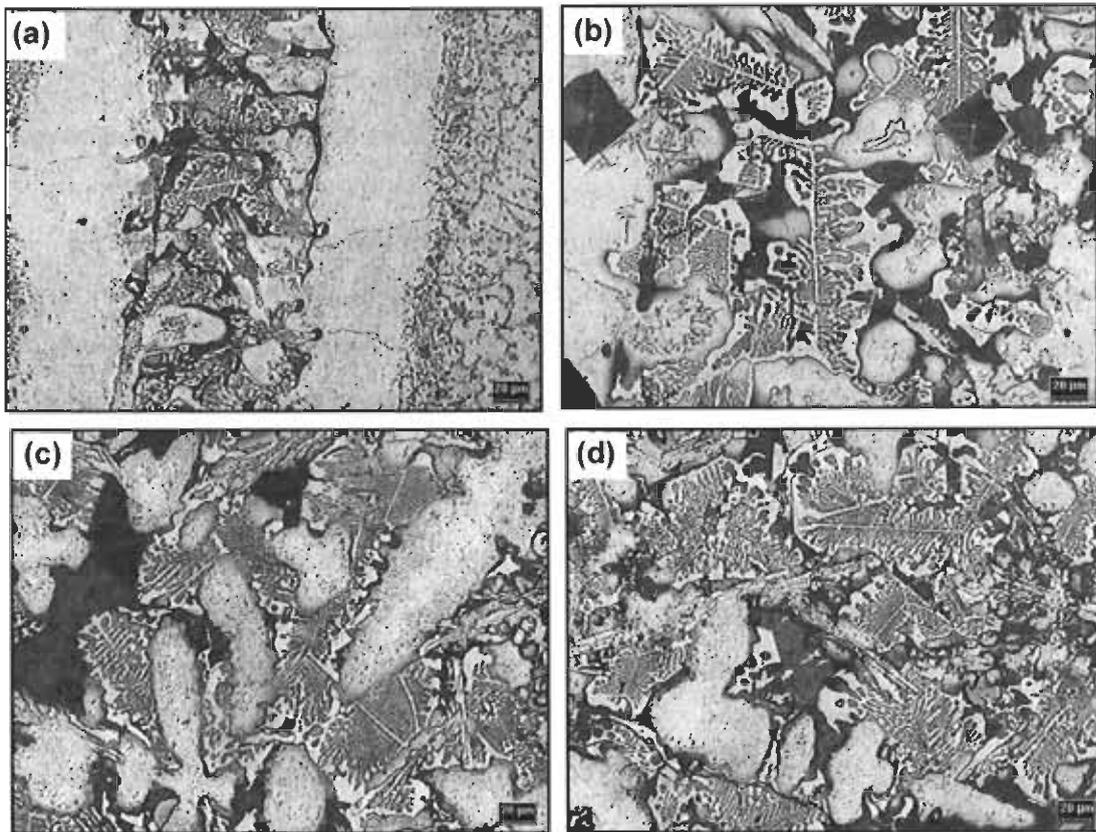


Figura 2.17. Imágenes del microscopio óptico que muestran la microestructura del constituyente eutéctico en uniones por brazing (a) tamaño de claro de 0.5 mm 100X y (b) 200X, (c) y (d) tamaño de claro de 2 mm (200X) [20].

2.8 Evaluación de propiedades mecánicas en la zona de unión por brazing de aceros inoxidable del tipo AISI 304

En la revisión bibliográfica se ha encontrado que en el proceso de unión por brazing al vacío, existen diferentes metales de aporte para unir a los aceros inoxidables AISI 304 [22], dependiendo del efecto que tengan en la capilaridad que se tenga, estos metales de aporte reaccionarán a diferentes temperaturas de brazing.

Un ejemplo, en la unión de materiales disímiles es el unir aleaciones de vanadio con acero inoxidable AISI 304, unido con el material de aporte Au-Ni₁₈ [22], al unirlo bajo condiciones de alto vacío este proceso proporciona propiedades mecánicas excelentes dando un proceso de unión confiable.

Se han realizado ensayos de tensión en este tipo de uniones, con muesca y sin muesca para determinar el comportamiento mecánico de este tipo de uniones. Se identificaron los mecanismos de fractura para cargas estáticas en la unión. Además, se comprobó que el metal de aporte V-5Ti-5Cr utilizado para unir el acero inoxidable 304 y aleaciones de vanadio, exhibió una excelente mojabilidad. El esfuerzo último a la tensión en la unión alcanzó los 245 MPa. El porcentaje de deformación fue de 1.3% y el módulo de Young fue de 351 MPa [22]. La prueba se llevó a cabo con un nivel de vacío entre 10^{-4} y 10^{-5} Pa. La unión que se hizo fue a tope a una temperatura de 970°C (ver Tabla 2.4).

Tabla 2.4 Composición química y condiciones en las que se llevó a cabo el brazing [22].

Metal de aporte	Composición	Punto de fusión	Temperatura de brazing	Tiempo de brazing	Velocidad de calentamiento	Velocidad de enfriamiento
Au-Ni	Au ₁₈ Ni	950°C	970°C	5 min	10°C/min	10°C/min

Las probetas se fabricaron con muesca y sin muesca. Para las probetas con muesca éstas tenían un ángulo de 60° en forma de V con un radio menor a 0.05 mm, ver Figura 2.18.

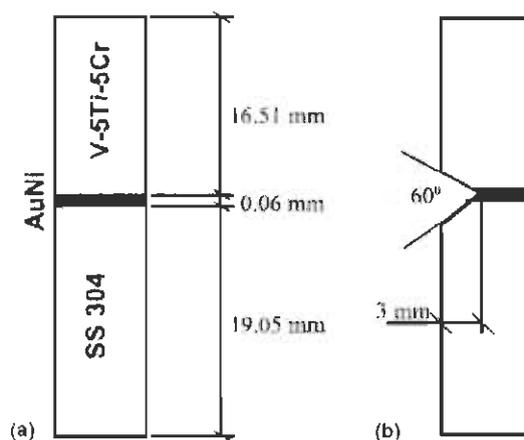


Figura 2.18. Geometría de las pruebas de tensión para la unión de V-5Ti-5Cr/Au-Ni / Acero 304 inoxidable (a) probeta sin muesca, (b) con muesca [22].

La prueba de tensión se realizó a temperatura ambiente de 25°C. Cuando el metal de aporte (Au₁₈Ni) se fundió, éste entró en contacto con (gama) formando una reacción peritética con alto contenido de Au. El metal de aporte fue consumido lentamente por γ -Fe en el acero inoxidable 304. Esta reacción peritética favoreció un proceso rápido de mojabilidad o empape entre el metal de aporte y el acero inoxidable y el ángulo que se obtuvo fue $\theta \leq 77^\circ$ dando un excelente ángulo para llevar a cabo una buena mojabilidad. [22]

La aleación V-5Ti-5Cr presentó un ángulo apropiado para favorecer la mojabilidad, de $\theta \leq 85^\circ$ mientras que la aleación Au₁₈Ni presentó una ligera diferencia de capacidad de mojabilidad en el acero inoxidable 304 y en la aleación de vanadio. Por lo tanto, existe un ángulo de contacto en la aleación V-5Ti-5Cr mayor que en el acero inoxidable 304. Comparando las Figuras 2.19 y 2.20 se puede decir que la aleación de vanadio presentó un ángulo de contacto mayor que la aleación 304, lo cual significa que la mojabilidad de Au₁₈Ni en V-5Ti-5Cr no es buena, en comparación con la aleación de acero inoxidable AISI 304.

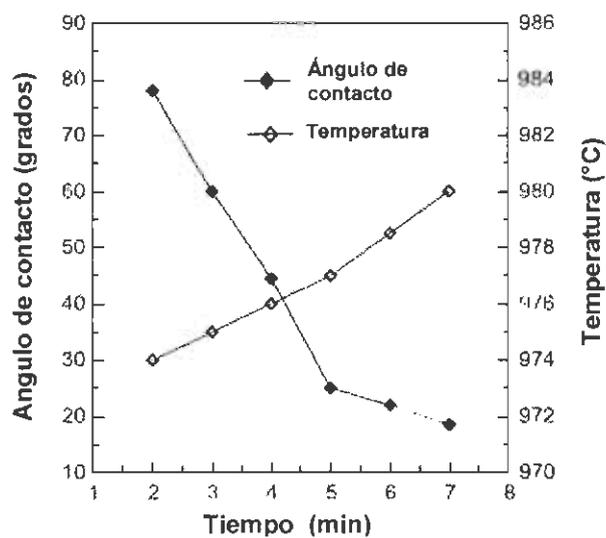


Figura 2.19. Gráfica que muestra el perfil de tiempo-temperatura contra el ángulo de contacto en el sistema Au₁₈Ni/aceró 304 [22].

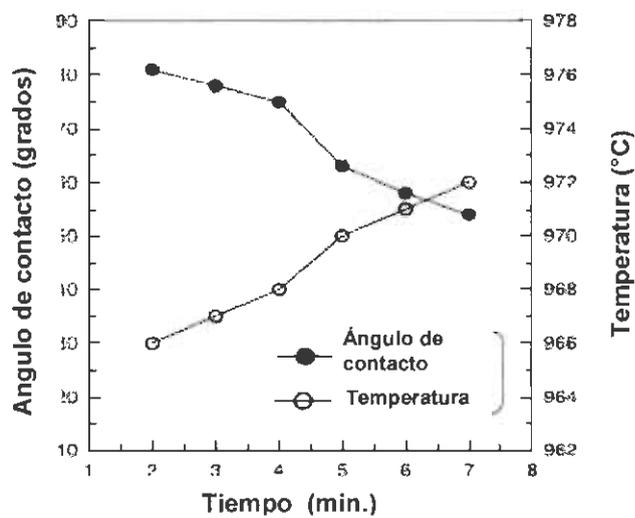


Figura 2.20. Gráfica que muestra el perfil de Tiempo – Temperatura y el ángulo de contacto entre el sistema Au₁₈Ni/V-5Ti-5Cr [22].

Esto es debido a la reacción peritética que se presenta en el diagrama V-Au a aproximadamente 555 °C, temperatura menor que la del sistema Au-Fe, ver Figura 2.21. Así, el ángulo de contacto es mayor en la aleación de vanadio que en la de los aceros inoxidables [23].

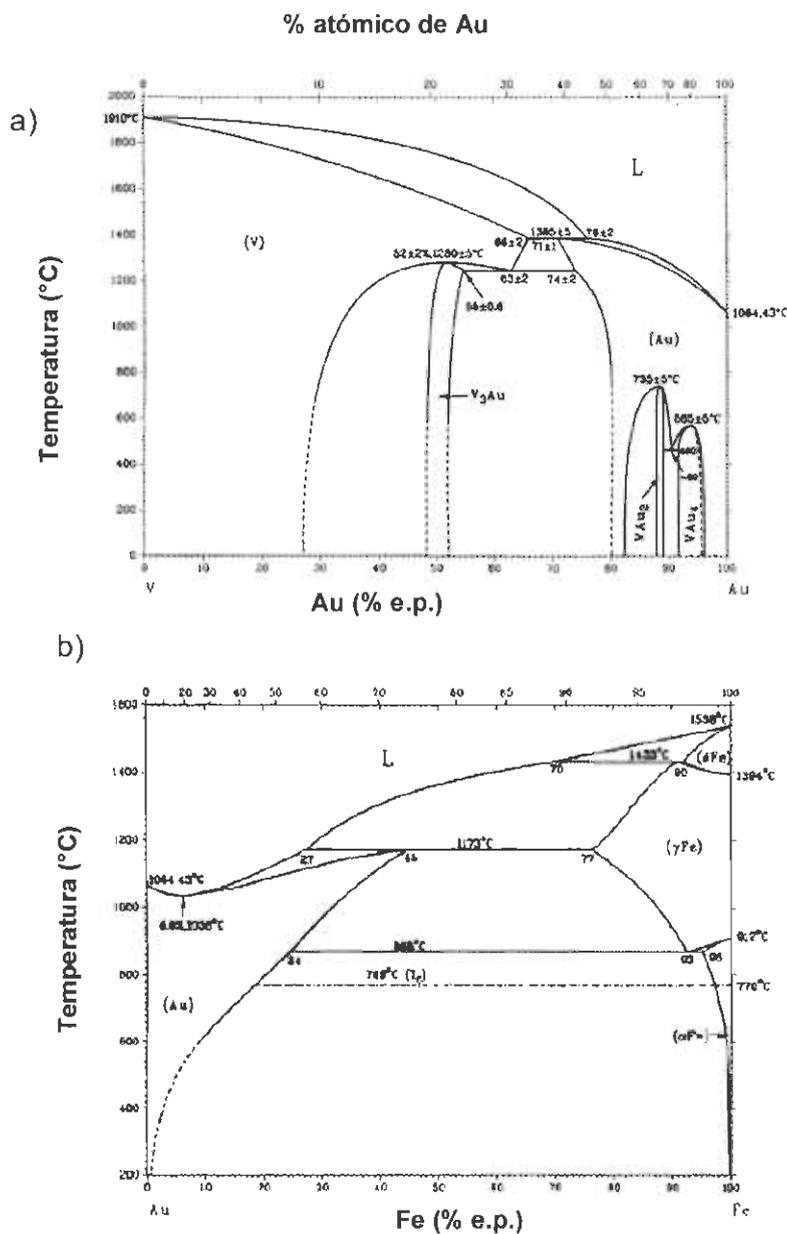


Figura 2.21. Diagrama binario (a) V-Au y (b) Fe- Au [23].

2.8.1 Relación esfuerzo deformación

Antes de realizar el proceso brazing y realizar la prueba de tensión en las uniones se determinaron los esfuerzos de tensión y el porcentaje de deformación de los metales base, el acero inoxidable presentó una resistencia a la tensión de 725 MPa y un 32% de deformación mientras que la aleación V-5Ti-5Cr se obtuvo 550 MPa y 12.5 % de deformación, ver Figura 2.22 [22].

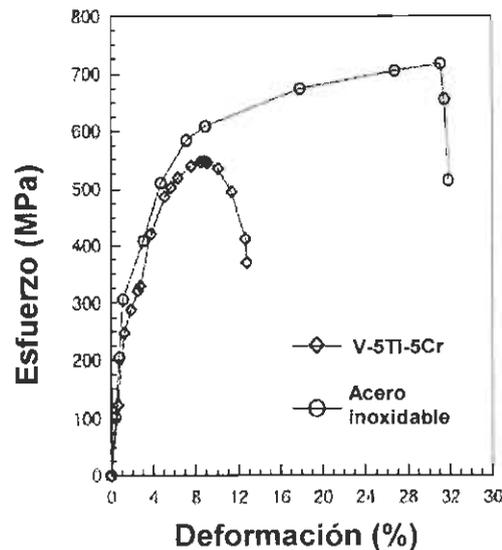


Figura 2.22. Gráfica de la relación esfuerzo-deformación de los metales base V-5Ti-5Cr y acero inoxidable 304 [22].

2.8.2 Relación de esfuerzo deformación entre los metales base y el metal de porte después del brazing

La relación que se obtiene en la gráfica de la Figura 2.23 corresponde al material unido con muesca y sin muesca después del brazing, obteniendo propiedades diferentes dependiendo de la condición de la muestra. El esfuerzo se determinó a través de la sección transversal de donde se realizó el brazing [22].

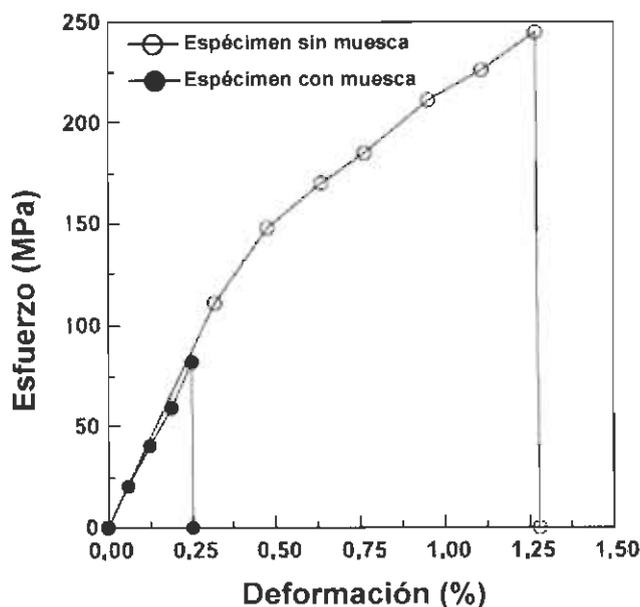


Figura 2.23. Gráfica de la relación esfuerzo-deformación de las muestras con muesca y sin muesca para la unión completa de V-5Ti-5Cr/Au-Ni / Acero inoxidable 304 [22].

La muestra exenta de muesca alcanzó un esfuerzo último a la tensión de 245 MPa y su valor máximo de elongación fue de 1.3%. El esfuerzo en la unión fue menor que en la aleación de vanadio V-5Ti-5Cr y 1/3 de la del acero inoxidable 304. En el rango de esfuerzo de hasta 0.3% la relación entre esfuerzo y deformación es lineal, y el módulo de Young fue de 351 GPa. Este valor es un 75% mayor que el de V y el acero inoxidable como metal base en el rango de deformación de 1.3% a 0.3%.

La relación de esfuerzo-deformación presentó un comportamiento no lineal indicativo del límite de deformación plástica. La muestra con muesca presentó un comportamiento completamente elástico y un esfuerzo de tensión mucho más bajo, en comparación con la prueba sin muesca.

2.9 Métodos de ensayo de propiedades mecánicas en uniones mediante brazing

Se realizó una revisión en la literatura acerca de los métodos de evaluación de propiedades mecánicas en uniones mediante brazing. Desafortunadamente, existe poca información acerca de este tipo de evaluación, y la información proporcionada por las diferentes industrias que realizan brazing, no es muy clara y precisa debido a varios factores:

- a) La evaluación de las propiedades mecánicas a altas temperaturas puede ser de costo elevado.
- b) Existen pocos estándares en cuanto a unicidad geométrica para realizar este tipo de pruebas mecánicas en uniones mediante brazing. Los estándares publicados por la norma ASTM cubren básicamente todas las propiedades mecánicas, sin embargo, esos estándares sólo aplican para muestras fabricadas de una aleación.
- c) De forma similar a los estándares referentes a la geometría de las muestras, no existen estándares para la evaluación, de los parámetros tales como temperatura y rango de esfuerzo aplicado.

Antes de presentar la geometría de algunas muestras encontradas en la literatura, es importante señalar cuáles son los factores que afectan la calidad de las propiedades mecánicas en las uniones mediante brazing:

- a) La preparación y limpieza de la superficie antes del brazing.
- b) El diseño de la unión y la cantidad de metal de aporte requerido para llevar a cabo la unión.

- c) La composición del metal de aporte y sus características difusivas durante el ciclo brazing.
- d) La temperatura y tiempo del ciclo brazing.
- e) La velocidad y fuente de calentamiento (por ejemplo, utilizar horno de vacío o de inducción).

2.9.1 Geometría de las muestras para evaluación mecánica en uniones mediante brazing

La Figura 2.24 muestra el tipo de probeta utilizado por Hickham Industries para evaluar el esfuerzo de ruptura [24]. Aparentemente, la geometría de la muestra está basada en la norma ASTM 139 para muestras "subsize" (4.06 mm de diámetro), no obstante, la geometría sugiere que la aplicación de este tipo de brazing es en forma de recubrimiento. Esta configuración de brazing se aplica en la reparación de superficies, pero no se recomienda para la reparación de grietas.

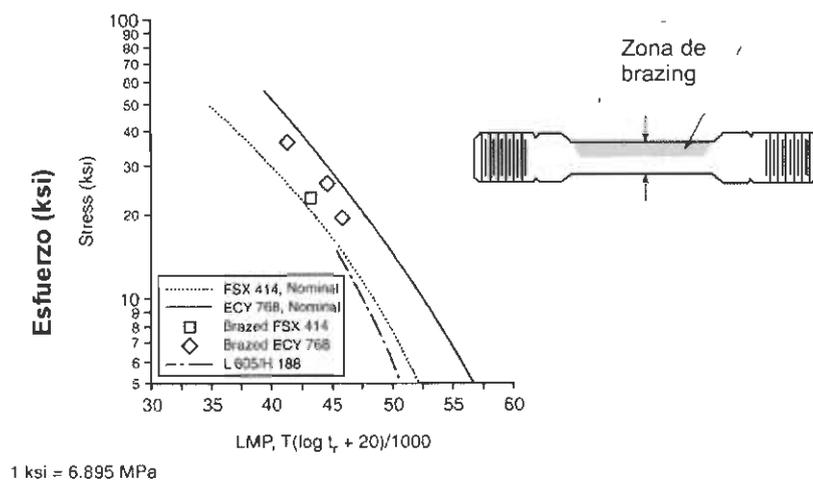


Figura 2.24. Probeta para evaluación de propiedades mecánicas utilizada por Hickham Industries [22].

La Figura 2.25 muestra la geometría de las probetas utilizadas por Liburdi [25]. Se puede apreciar que la zona de unión por brazing es de 6.3 mm de espesor y está compuesta sólo del metal de aporte.

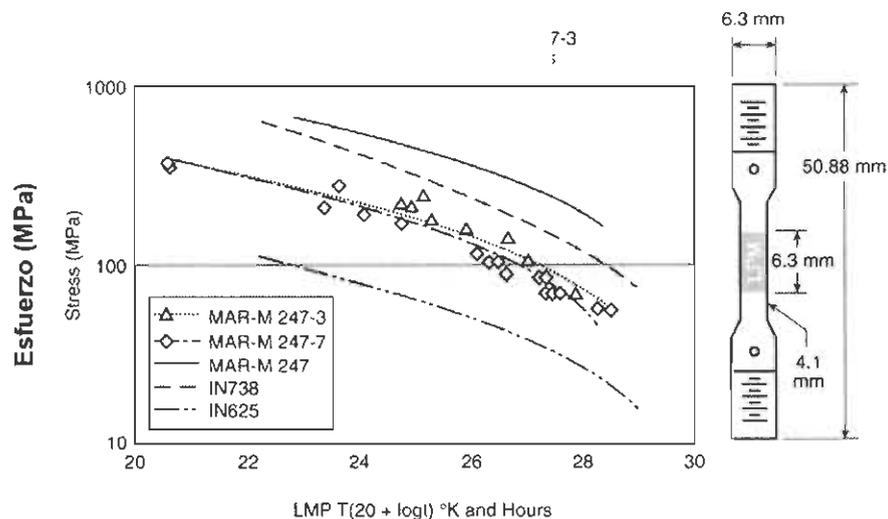


Figura 2.25. Probeta utilizada por Liburdi para la evaluación de propiedades mecánicas en uniones por brazing. [26]

La Figura 2.26 muestra otro tipo de geometría de las probetas utilizado en una prueba realizada por la Universidad de Tokyo en Japón [27].

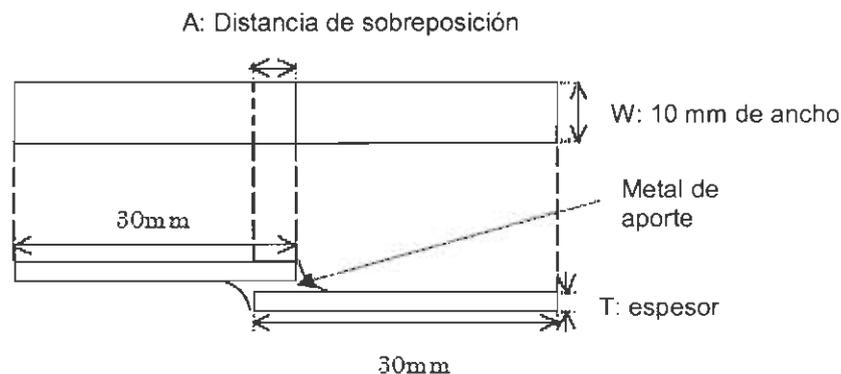


Figura 2.26. Probeta utilizada por la Universidad de Tokyo en Japón. [27]

CAPÍTULO 3

Metodología experimental

3.1 Desarrollo experimental

La metodología experimental de este trabajo de investigación se muestra esquemáticamente en el diagrama de flujo de la Figura 3.1. En esta investigación se estudió el comportamiento de los parámetros del proceso brazing: tiempo, temperatura y materiales de aporte en el esfuerzo de tensión en las probetas unidas por brazing al vacío. Se utilizaron muestras de acero inoxidable del tipo AISI 304 como metal de aporte, ya que los alabes del compresor de la turbina Ruston TB5000 son de este material.

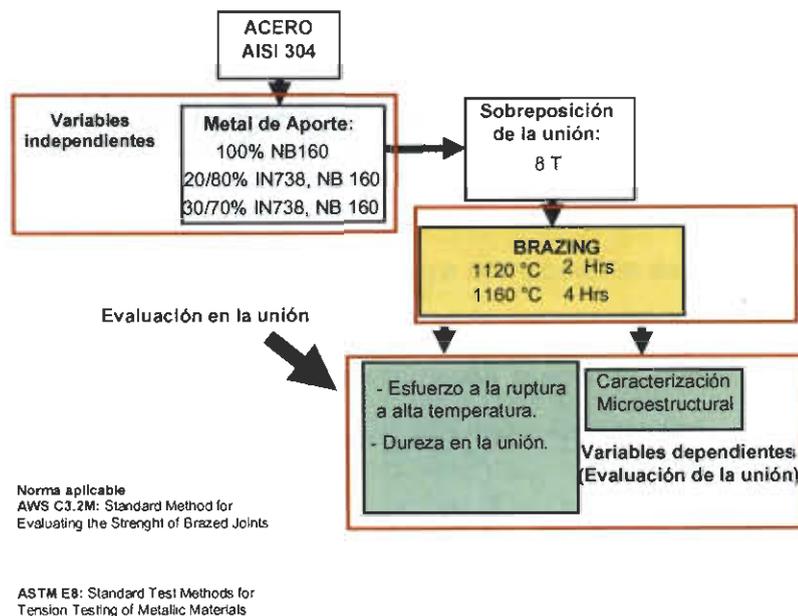


Figura 3.1. Esquema del procedimiento experimental.

3.2 Materiales de aporte

Los materiales de aporte que se emplearon en esta investigación son polvos de Inconel 738 cuya composición química se presenta en la Tabla 3.1 Este material de aporte se fabrica por metalurgia de polvos, se necesita utilizar un aglomerante, para poder hacer una pasta o una preforma de este material. Estos polvos de Inconel 738 tienen un punto de fusión de 1400°C, por eso, el uso de aglomerantes que contienen fundentes, generalmente se emplea en la reparación de grietas pequeñas en componentes de turbinas. Los materiales de aporte en polvo de IN 738 son los que comúnmente se emplean en la reparación de alabes y toberas de la turbina Ruston TB-5000 fabricados de IN 738 e IN 939.

Tabla 3.1. Composición química (% e.p.) del metal de aporte en polvos de Inconel 738.

	C	Cr	Co	B	Ti	Al	Ta	Mo	W	Nb	Zr	Ni
IN738	0.17	16	8.5	0.01	3.4	3.4	1.75	1.75	2.6	0.09	0.1	bal

El material de aporte Nicrobraz 160 cuya composición se muestra en la tabla 3.2 en presentación de pasta es un material de aporte comercial empleado para grietas amplias. Estos son polvos atomizados mediante número de malla 140 mezclados con cemento Nicrobraz y un aglomerante orgánico.

El principal propósito de este material de aporte es brindar una buena ductilidad y maquinabilidad en la zona de la unión teniendo una dureza relativamente baja. Esta dureza está en función del tiempo y temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso brazing. El material de aporte Nicrobraz 160 fue diseñado para emplearse en la reparación de grietas amplias de 0.25 mm. Tiene una temperatura de solidus de 970°C y una temperatura de liquidus de 1160°C. Este material de aporte tiene una excelente resistencia a la oxidación a temperaturas de 925°C, para piezas que trabajan por más de 500 horas de manera continua.

Tabla 3.2. Composición química (% e.p.) del metal de aporte en pasta Nicrobraz 160.

Cr	Fe	C	Si	B	Ni
11.0	3.5	0.5	3.5	2.25	bal

3.3 Preparación de probetas

En la Figura 3.2 se muestra la geometría del ensamblado de la probeta de traslape simple para realizar la prueba de tensión y la aplicación del metal de aporte. Las probetas deben estar completamente alineadas y se puede recurrir al uso de dos puntos de soldadura en estos lugares. El objetivo es mantener una posición fija durante el proceso brazing. El claro de la unión debe ser el óptimo recomendado para el metal de aporte que se esté utilizando. El claro de la unión puede ser establecido y mantenido por insertar espaciadores entre las probetas a lo largo de los límites del área de unión, en este caso se usó un claro de 2 mm. Los espaciadores fueron de la misma composición química que el metal base o un metal que tenga la mínima reacción con el metal base y el metal de aporte. La introducción de un tercer material como espaciador puede resultar en una interacción entre el material de aporte y el material espaciador entre el brazing, el cual podría afectar las propiedades de la unión.

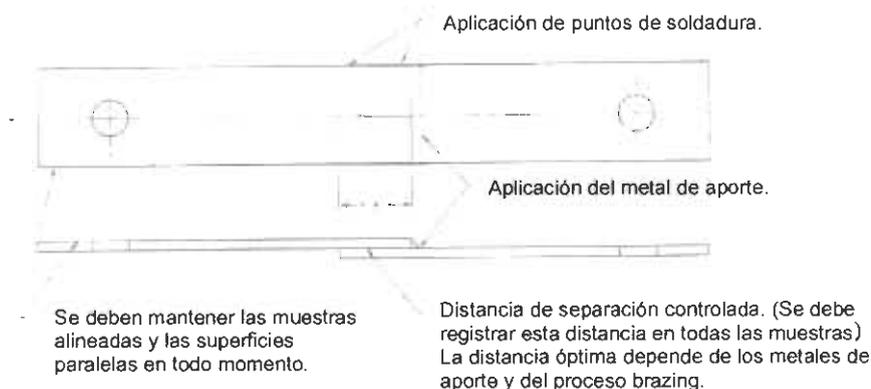


Figura 3.2. Esquema representativo del ensamblado de la probeta de traslape simple para prueba de esfuerzo de tensión y la aplicación del material de aporte.

Las muestras de material base para las pruebas fueron rectángulos de 130 mm x 30 mm (5 pulg. x 1.250 pulg.), el espesor fue de 3 mm como se muestra

en la Figura 3.3. Estas probetas se perforaron en ambos extremos para lograr un agarre apropiado cuando durante el ensayo de tensión en la máquina Instron. La superficie de estas probetas debe ser uniforme por lo que fue necesario someterlas a una limpieza mecánica mediante soplado de arena.

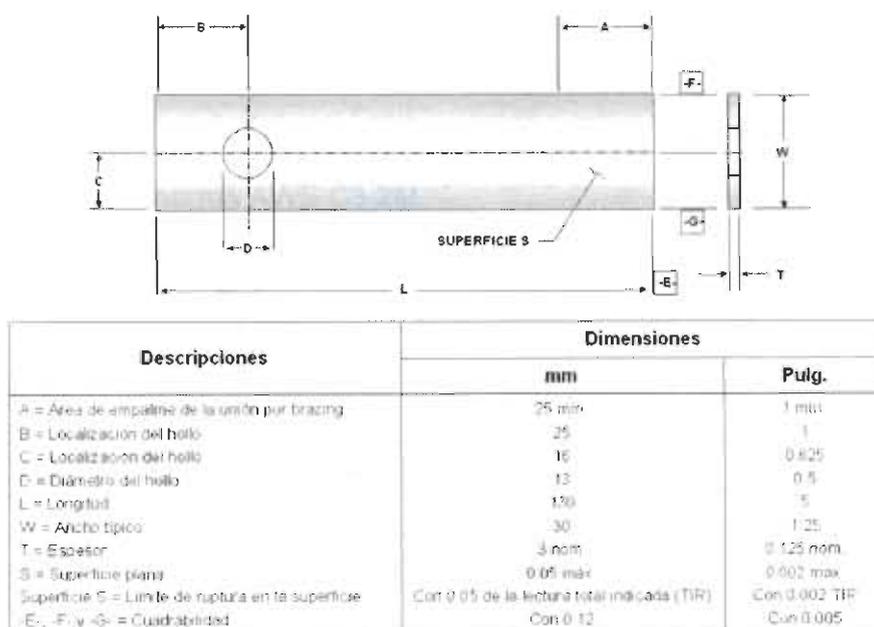


Figura 3.3. Esquema para preparar la probeta de traslape simple para la evaluación del esfuerzo de tensión.

Después del proceso brazing los bordes en todas las probetas fueron maquinados a 0.5 mm de radio máximo. Posteriormente, se maquinó la probeta de tensión a la configuración y tolerancias dadas en la Figura 3.4. Los ensayos de tensión de las probetas se realizaron de acuerdo con la norma AWS 3.2, la cual hace referencia a ASTM E- 8, antes de la prueba se realizaron mediciones de la distancia de sobreposición, ancho y espesor (A, W, y T, respectivamente) de cada probeta.

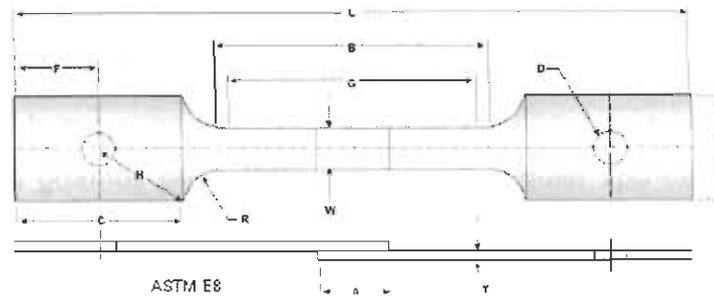
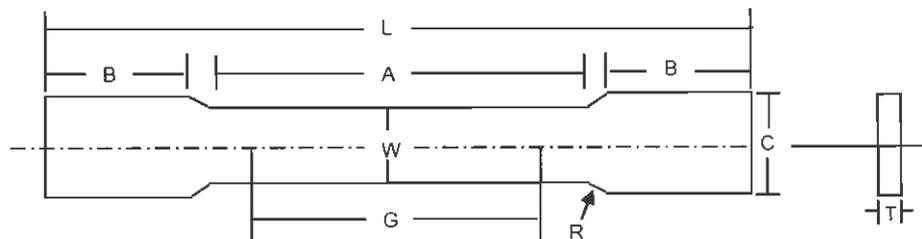


Figura 3.4. Geometría de la probeta para evaluación de propiedades mecánicas bajo la norma AWS C3.2M.



G - Longitud de gage
W - Ancho
T - Espesor
R - Radio de B
L - Longitud total
A - Longitud
B - Sección de agarre
C - Ancho de B

Figura 3.5. Dimensiones para la fabricación de probetas para ensayos de tensión bajo la norma ASTM E8.

3.4. Ciclos térmicos del proceso brazing.

Las muestras completamente limpias y con el metal de aporte colocado se introdujeron al horno para realizar el proceso brazing. Las muestras deben de manejarse con guantes para evitar que haya cualquier tipo de contaminación. La Figura 3.6 muestra la gráfica del ciclo brazing que se utilizó en este proyecto de investigación.

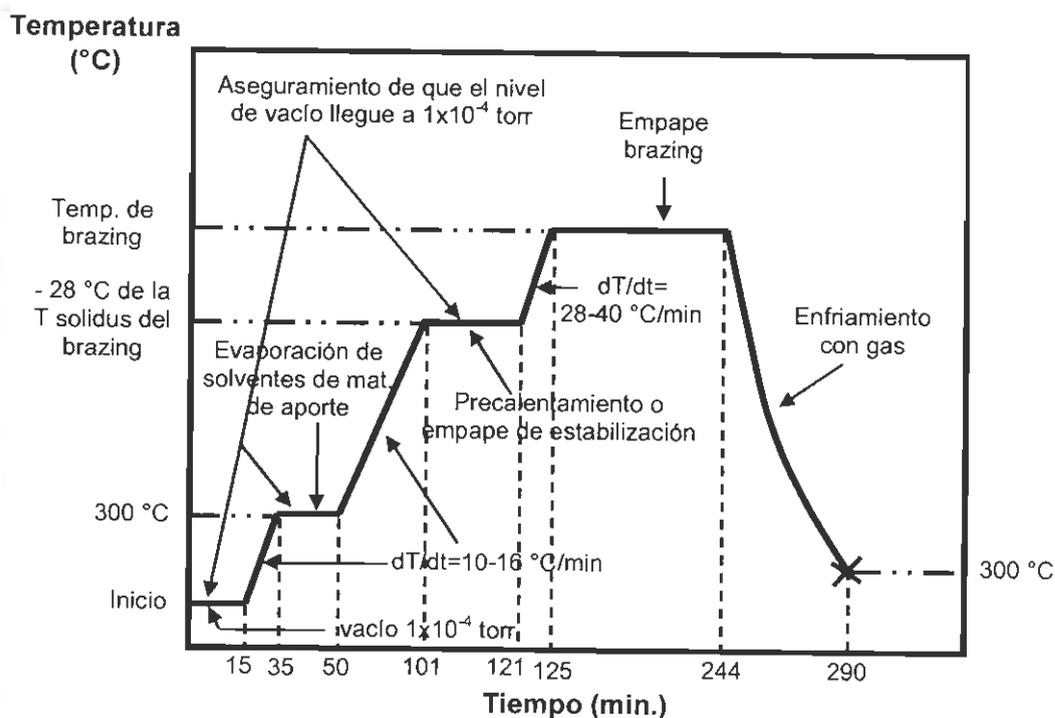


Figura 3.6. Esquema representativo del ciclo térmico utilizado durante el proceso brazing al vacío.

El procedimiento para llevar a cabo el proceso brazing se describe a continuación primeramente se tiene que realizar el vacío antes del calentamiento, establecer la presión atmosférica en el horno por un período de tiempo de aproximadamente 15 minutos. A continuación, la primera rampa de calentamiento es una velocidad que oscila entre 10 y $16 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$. Velocidades de calentamiento más rápidas no se recomiendan al inicio, debido a que es posible

la distorsión o el desprendimiento de la aleación de metal de aporte aplicada [27]. Además, puede haber un exceso de gas debido a que si los materiales de aporte tienen solventes y empieza a vaporizar.

Al alcanzar una temperatura de aproximadamente 300°C se tiene una etapa de 15 minutos de permanencia. Esta etapa es necesaria debido a que a esta temperatura se están liberando los aglomerantes del metal de llenado y estabilización de temperatura por pérdidas debidas a la acción del calentamiento inicial.

La segunda rampa de calentamiento se lleva a cabo a la misma velocidad hasta alcanzar una temperatura de 28°C debajo de la temperatura de solidus del metal de llenado. Esta temperatura se mantiene por 15 minutos y es llamada la etapa de "empape" de estabilización. Esta etapa permite homogeneizar la temperatura en todas las partes del horno y de las piezas para que con la etapa posterior de brazing todas lo hagan a la misma temperatura y al mismo tiempo. Además esta etapa es importante para asegurar que la presión de vacío sea suficientemente baja antes del brazing.

La última etapa de calentamiento se lleva a cabo a una velocidad de calentamiento mayor de 28 a 40 °C/min. Este calentamiento es crítico y debe ser rápido para evitar la licuación (segregación) excesiva de la aleación brazing o metal de llenado, subsecuente aleamiento y erosión con el metal base. Estas velocidades se utilizan más frecuentemente en la industria.

Finalmente, se lleva a cabo el brazing al alcanzar la temperatura de fusión del metal de aporte. Se recomienda usar la temperatura más baja del rango recomendado para producir una unión satisfactoria. Además, esta temperatura es esencial en aplicaciones para llenado de espacios amplios. El tiempo de brazing debe ser de aproximadamente 2 a 4 horas para asegurar que todas las secciones alcancen la temperatura deseada. La temperatura y el tiempo son

considerados eventos críticos en el proceso brazing y es imperativo que se garantice el punto de "empape" del brazing.

Después de este tiempo se desactiva el calentamiento y se deja enfriar la pieza aún en vacío. Al alcanzar una temperatura de aproximadamente 300°C se puede enfriar la pieza con gas, si se desea. Se recomienda retirar las piezas del horno cuando las piezas tengan una temperatura menor a los 100°C o cuando el termopar indique aproximadamente 95°C. La Figura 3.7 muestra 3 fotografías del horno de vacío que se utilizó en este proyecto.



Figura 3.7. Fotografías del horno de vacío empleado para realizar el proceso brazing.

El horno de vacío mostrado en la figura 3.7 marca Vacuum Industries VI con capacidad de 45 Kg. Se puede apreciar el sistema de control y el paquete de bombas para realizar el vacío.

El vacío que se alcanzó en el horno para esta experimentación fue de 1×10^{-3} Torr, vacío medio, para el enfriamiento se utilizó gas argón, además de introducir Argón a la cámara del horno de vacío se encendió el ventilador del horno de vacío que se encuentra en la parte posterior del horno, alcanzando una velocidad de enfriamiento de $60 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, no se observaron distorsiones en las probetas por método y velocidad de enfriamiento en el horno de vacío.

3.5 Diseño de experimento propuesto

Para realizar la metodología experimental se propone un diseño de experimentos factorial $2^k, 2^3$ con dos niveles y tres factores es un diseño exploratorio para analizar como influyen cada una de las variables sobre la resistencia a la tensión. En algunos experimentos se desea llegar a conclusiones acerca de más de una variable o factor. Los experimentos factoriales y sus correspondientes cálculos de la ANOVA, son diseñados para determinar conclusiones simultáneas acerca de dos o más factores. Se usa el término "factorial" porque las condiciones experimentales incluyen todas las combinaciones posibles de factores. Ejemplo: Si hay a niveles del factor A y b niveles del factor B, en el experimento se reunirán datos acerca de " ab " combinaciones de tratamientos [30].

En estadística, un experimento factorial completo es un experimento cuyo diseño consta de dos o más factores, cada uno de los cuales con distintos valores o "niveles", y cuyas unidades experimentales cubren todas las posibles combinaciones de esos niveles en todo los factores. Este tipo de experimentos permiten el estudio del efecto de cada factor sobre la variable respuesta, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre la dicha variable. En la Tabla 3.3 se muestra la matriz del diseño de experimentos propuesto como metodología experimental para realizar este proyecto de investigación.

Tabla 3.3. Matriz de diseño de experimentos.

NUMERO DE PIEZA	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (Hr)	R MEZCLADO	GRUPO
1	1160	4	80/20	4
2	1120	4	80/20	2
3	1120	4	80/20	2
4	1160	4	100	4
5	1160	4	80/20	4
6	1120	2	100	1
7	1120	2	80/20	1
8	1160	2	100	3
9	1120	4	100	2
10	1120	4	100	2
11	1120	2	100	1
12	1160	2	80/20	3
13	1160	2	80/20	3
14	1160	4	100	4
15	1120	2	80/20	1
16	1160	2	100	3

Se realizó el diseño de experimentos para determinar cual de las tres variables influyen directamente en el proceso brazing haciendo un análisis estadístico con el software MINITAB ® del cual podemos saber o indicar cual variable o cuales variables hacen inferencia en el proceso.

Las muestras se caracterizaron de acuerdo a la norma ASTM E3, el ataque aplicado para caracterizar las microestructuras presentes en el metal de aporte fue ataque electroquímico para revelar las fases presentes en el metal de aporte, las muestras se sumergieron en una solución química la cual esta compuesto de 10 ml H_3PO_4 + 50ml H_2SO_4 + 40ml HNO_3 + 100mL de H_2O .

Para caracterizar las fases presente a través de la sección longitudinal de la unión, se utilizo microscopia óptica mediante analizador de imágenes, microscopia electrónica de barrido MEB utilizando 15 kV, electrones secundarios con un tamaño de spot de 40 empleando una distancia de trabajo de 11 milímetros y análisis semicuantitativo EDX para determinar (% e.p.) de los elementos presentes.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Introducción

Se llevó a cabo una investigación, con el objetivo de determinar el efecto de los parámetros del proceso de unión por brazing en las características microestructurales y propiedades mecánicas en la unión de placas de acero inoxidable del tipo AISI 304. Los parámetros estudiados fueron el material de aporte, temperatura y tiempo de brazing.

4.2 Condiciones del proceso de unión por brazing

Para la adquisición de datos se empleo el software CN9-SW OMEGA y Microsoft Excel 2009, el termopar se coloco en las probetas para censar la temperatura de las piezas, de la misma manera se estuvieron registrando manualmente cada 2 minutos las temperaturas del ciclo térmico.

A continuación se describen las gráficas del proceso de unión por brazing utilizados en esta investigación. Las Figuras 4.1 - 4.4 muestran los ciclos del proceso brazing realizado, utilizando temperaturas de 1120°C y 1160°C por 2 y 4 horas, utilizando 2 materiales de aporte: (1) una relación de mezclado de 20/80 (% e.p.) de polvos de Inconel 738 y pasta de Nicrobraz 160 respectivamente y (2) 100 (% e.p.) Pasta de Nicrobraz 160.

Durante cada ciclo térmico la primera rampa se realizó a una velocidad de calentamiento de 10°C/min, hasta llegar a una temperatura de 420°C, se mantuvo el horno a esta temperatura por aproximadamente 30 minutos para permitir que los gases del aglomerante se que contiene el metal de aporte en pasta se liberen. La siguiente rampa fue a la misma velocidad de calentamiento para lograr una homogeneidad de temperaturas, entre las muestras y el horno, hasta llegar a una temperatura de 950°C, esta se mantuvo por 30 minutos para homogeneizar la temperatura del metal de aporte y la del metal base. La última etapa de calentamiento también se realizó a una velocidad de calentamiento de 10°C/min por 2 horas, este calentamiento tiene el objetivo de evitar la segregación excesiva la cual origina la licuación de la aleación utilizada como material de aporte y la erosión con el metal base el enfriamiento fue dentro del horno introduciendo Argon y aire forzado por medio del ventilador que se encuentra en la parte posterior del horno de vacío.

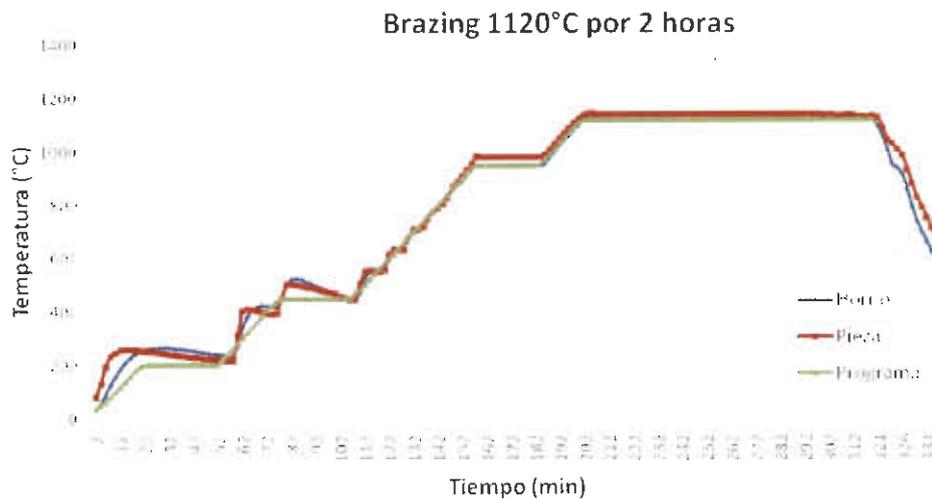


Figura 4.1. Ciclo térmico del proceso brazing realizado a una temperatura de **1120°C por 2 horas** utilizando 2 materiales de aporte: (1) una relación de mezclado 20/80 (% e.p.) de polvos de Inconel 738 y pasta de Nicrobraz 160 y (2) 100 (% e.p.) Pasta de Nicrobraz 160.

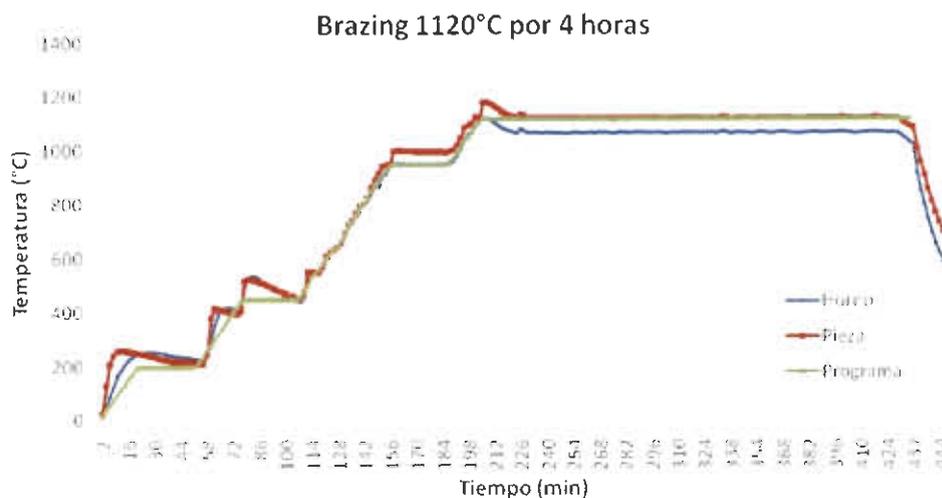


Figura 4.2. Ciclo térmico del proceso brazing realizado a una temperatura de **1120°C por 4 horas** utilizando, 2 materiales de aporte: (1) una relación de mezclado 20/80 (% e.p.) de polvos de Inconel 738 y pasta de Nicrobraz 160 y (2) 100 (% e.p.) Pasta de Nicrobraz 160.

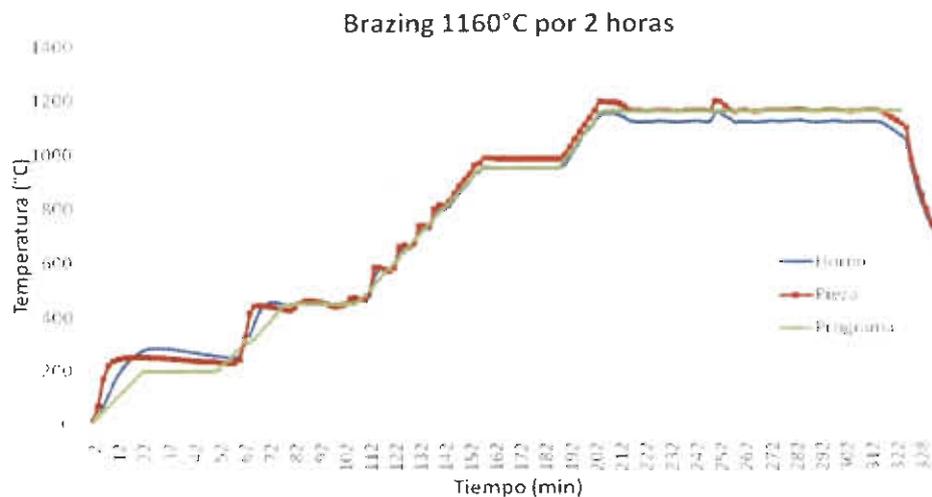


Figura 4.3. Ciclo térmico del proceso brazing realizado a una temperatura de **1160°C por 2 horas** utilizando, 2 materiales de aporte: (1) una relación de mezclado 20/80 (% e.p.) de polvos de Inconel 738 y pasta de Nicrobraz 160 y (2) 100 (% e.p.) pasta de Nicrobraz 160.

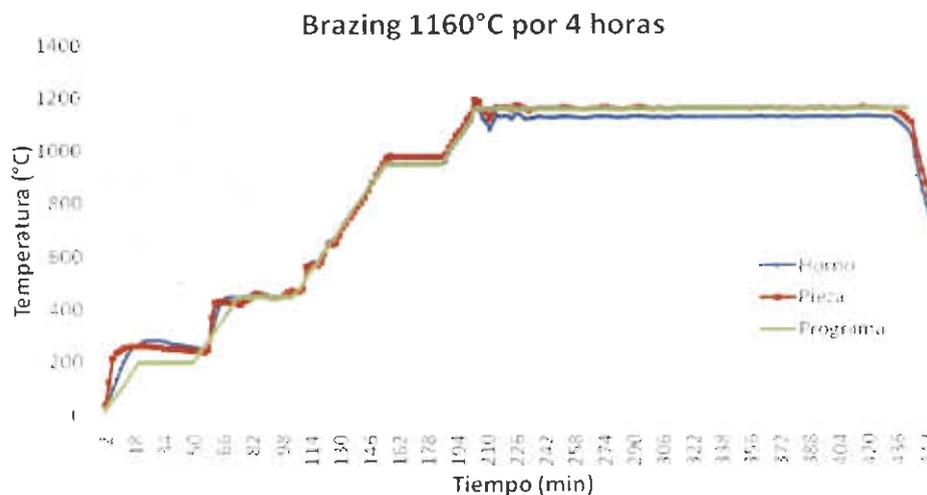


Figura 4.4. Ciclo térmico del proceso brazing realizado a una temperatura de **1160°C por 4 horas**, utilizando 2 materiales de aporte: (1) una relación de mezclado 20/80 (% e.p.) de polvos de Inconel 738 y pasta de Nicrobraz 160 y (2) 100(% e.p.) pasta de Nicrobraz 160.

Como se aprecia en las gráficas anteriores para los distintos tiempos de Brazing el ciclo se sigue como se establece en el programa y se lleva a cabo de acuerdo a lo programado en el horno de vacío.

4.3 Preparación de las muestras para ensayos de tensión

Después de que se realizaron los ciclos del proceso brazing, las probetas se maquinaron con la geometría adecuada indicada en las normas AWS 3.2 y ASTM E8 para realizar la evaluación del esfuerzo de tensión bajo cada condición específica del proceso brazing, ver Figura 4.5.

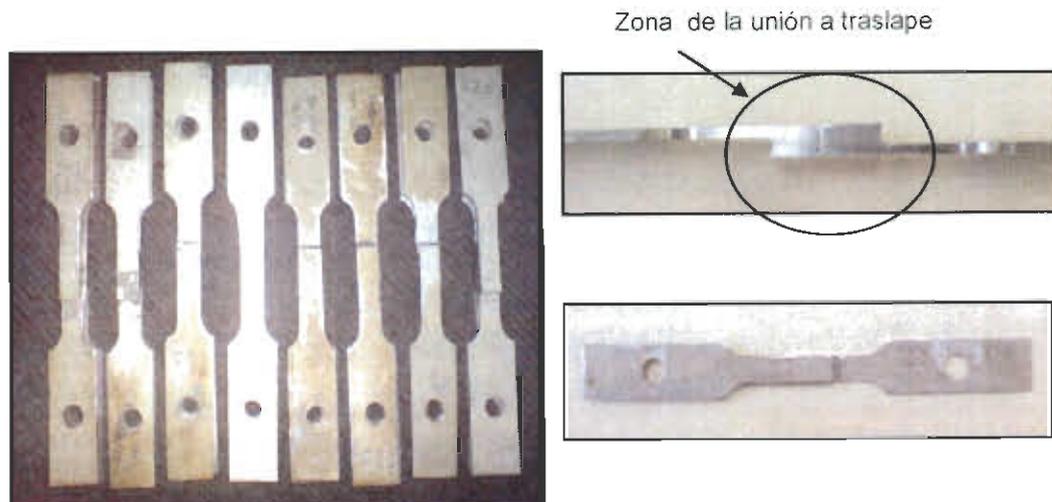


Figura 4.5. Evidencia de las probetas maquinadas según la norma normas AWS 3.2 y ASTM E8.

4.4 Evaluación microestructural de la zona de la unión mediante el proceso brazing en muestras de acero inoxidable del tipo AISI 304

En las Figuras 4.6 y 4.7 se presentan una serie de micrografías de obtenidas por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) mediante electrones secundarios, se utilizo un microscopio electrónico de barrido marca JEOL en estas Figuras se puede apreciar el aspecto general de la microestructura en las uniones sometidas a las 8 condiciones de brazing propuestas en el diseño de experimentos. En los siguientes puntos se detallan las características microestructurales tanto en la zona de difusión, así como de los compuestos intermetálicos encontrados en el centro de la unión.

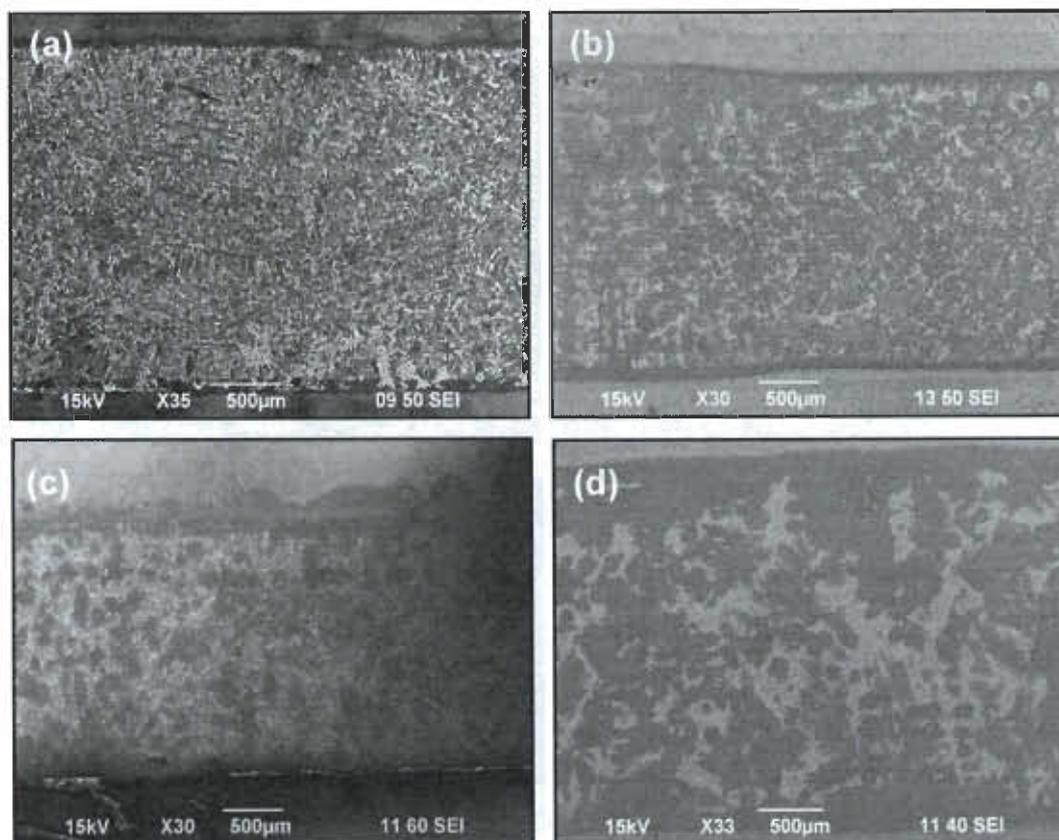


Figura 4.6. Imágenes de la microestructura obtenidas en el MEB mediante electrones secundarios de las muestras sometidas a ciclos brazing de 1120 °C, de (a) 2 horas utilizando una relación de mezclado 20/80 (% e.p.) IN738/NB160 (b) 2 horas utilizando 100 (% e.p.) pasta Nicrobraz 160, (c) 4 horas utilizando una relación de mezclado 20/80 (% e.p.) y (d) 4 horas utilizando 100(% e.p.) pasta Nicrobraz 160.

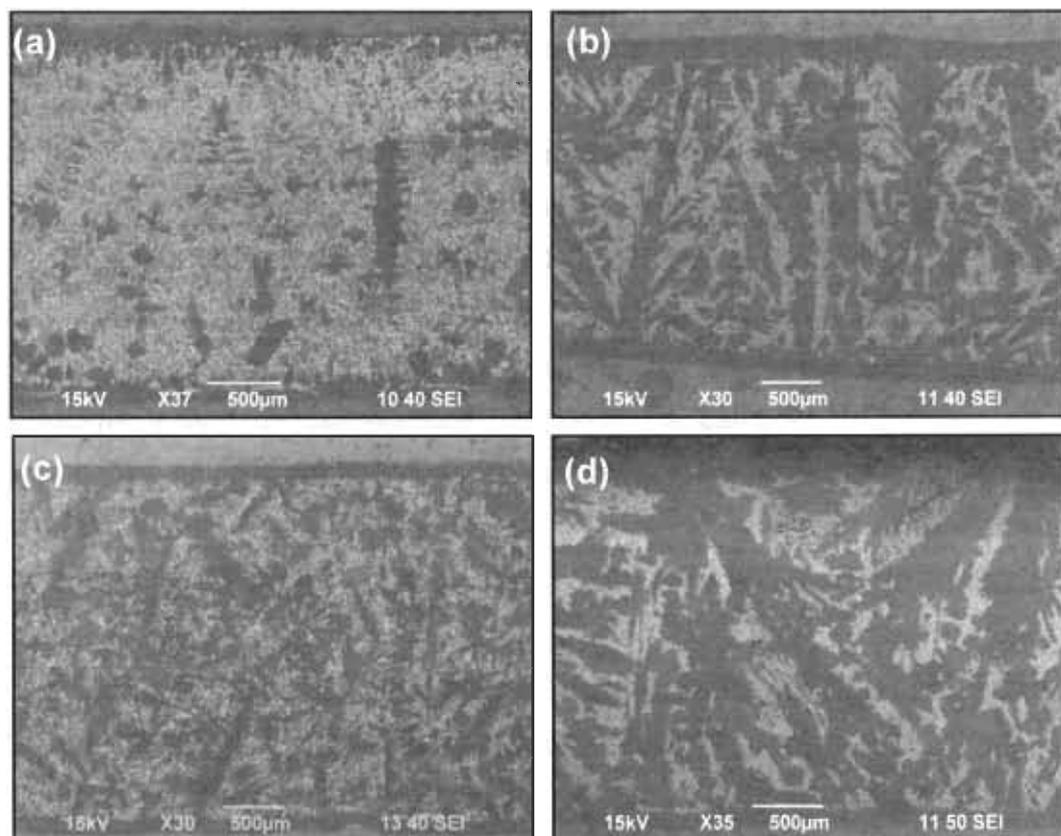


Figura 4.7. Imágenes de la microestructura obtenidas en el MEB mediante electrones secundarios de las muestras sometidas a ciclos brazing de 1160 °C, de (a) 2 horas utilizando una relación de mezclado 20/80 (% e.p.) IN738/NB160, (b) 2 horas utilizando 100(% e.p.) pasta Nicrobraz 160, (c) 4 horas utilizando una relación de mezclado 20/80 (% e.p.) y (d) 4 horas utilizando 100(% e.p.) pasta Nicrobraz 160.

Nótese que en las Figuras 4.7 y 4.8 hay una diferencia notable en la formación de compuestos intermetálicos, para una relación de mezclado 20/80 tenemos una mayor formación de compuestos intermetálicos que en las uniones hechas con el metal de aporte Nicrobraz 160, la formación de compuestos intermetálicos disminuye para ambos metales de aporte al aumentar la temperatura y el tiempo, debido a que en el metal de aporte con

una relación de mezclado 20/80 tenemos mas elementos de aleación, formando compuestos difíciles de disolver a altas temperaturas como el Si-Cr, Cr-Ni.

4.4.1 Características microestructurales de la zona de difusión

Se realizaron análisis semicuantitativos, mediante espectroscopia por dispersión de energía de rayos-X (EDX), en las zonas importantes de la microestructura: (a) en el metal de aporte, (b) zona de compuestos intermetálicos y (c) en la zona de difusión. Los resultados sugieren que la morfología y tipo de compuestos intermetálicos cambian en función de la composición química del metal de aporte, la temperatura y el tiempo de ciclo brazing.

Nomenclatura: (MA) metal de aporte, (MB) metal base. (ZD) Zona de difusión

4.4.1.1 1120°C por 2 horas con una relación de mezclado de 20/80 (%e.p) polvos de Inconel 738 y pasta Nicrobraz 160

La Figura 4.8(a) muestra la microestructura en la zona de difusión (zona solidificada isotérmicamente), como se puede apreciar, esta zona se forma en la interfase entre el metal base y el material de aporte (MA y MB respectivamente). En la Figura 4.8 (b) se presenta el espectrograma EDX correspondiente a esta zona. El análisis semicuantitativo indica que esta zona presenta un alto contenido de níquel, por lo tanto, está formada por una solución sólida formada principalmente por este elemento. Como se puede apreciar en la microestructura el espesor de la zona de difusión es muy heterogéneo midiendo en promedio 120 μm .

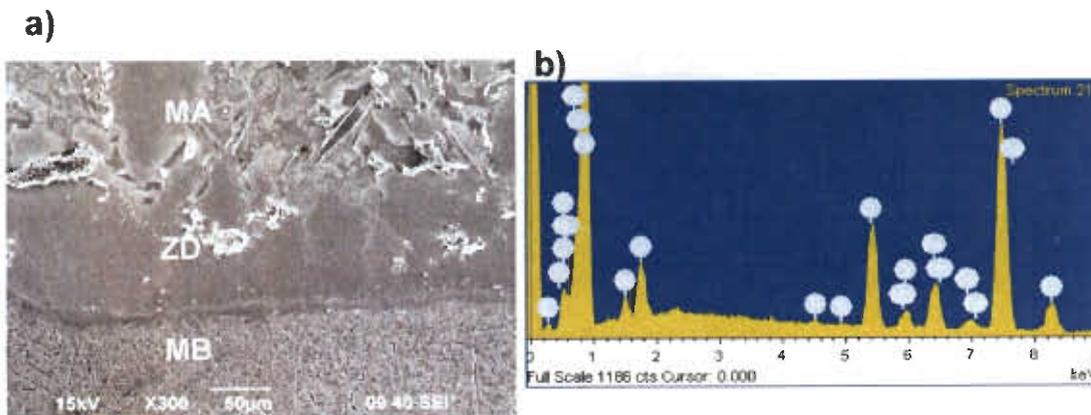


Figura 4.8. (a) Imagen obtenida en el MEB mediante electrones secundarios de la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDX correspondiente a la zona de difusión.

4.4.1.2 1120°C por 2 horas utilizando pasta Nicrobraz 160

La Figura 4.9(a) Muestra la microestructura en la zona de difusión, como se puede apreciar esta zona está más definida comparada con la condición anterior. En la Figura 4.9 (b) se presenta el espectro de composición química EDX correspondiente a esta zona, la cual presenta altos contenidos de Fe, Cr y Si, siendo Ni el elemento con mayor contenido en esta zona. Evidentemente en la zona de difusión se encuentran básicamente los compuestos Fe-Si, Fe-C-Si, Ni-Si y Ni-Fe los cuales son principalmente constituyentes eutécticos y son los que empiezan a difundir primero.

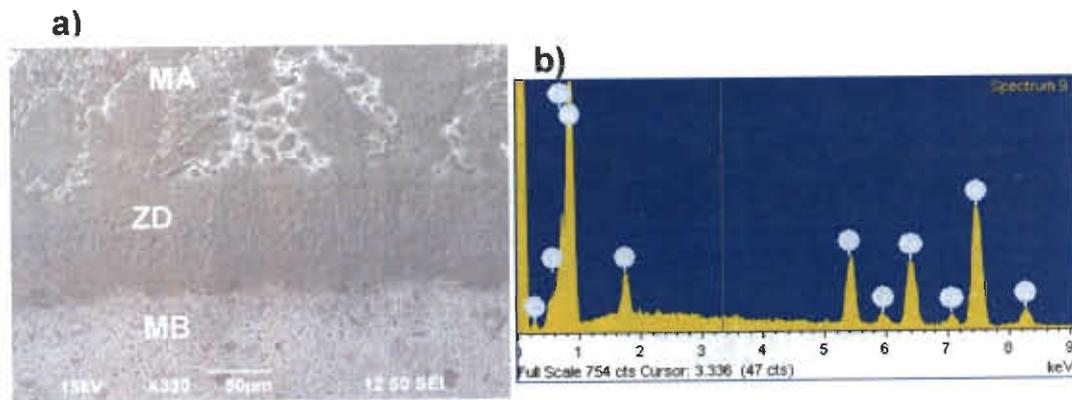


Figura 4.9. (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDX correspondiente a la zona de difusión.

4.4.1.3 1120°C por 4 horas con una relación de mezclado de 20/80(%e.p) polvo de Inconel 738 y pasta Nicrobraz 160

La Figura 4.10 (a) muestra la microestructura de la zona de difusión con su respectivo espectrograma EDX, Figura 4.10 (b). Debido a las concentraciones de Ni y Co (% e.p.) en el metal de aporte en polvo de Inconel 738, estos elementos tienden a difundir en la interfase metal base/metal de aporte, favoreciendo una alta concentración de estos elementos en esta zona, debido a que presentan un radio atómico y estructura cristalina similares. Como se puede apreciar en este caso el Al presente en el polvo de IN738 ya se encuentra visible en la región de difusión sin embargo esta zona después de 4 horas ya no es muy bien delimitada entre el metal base y el material de aporte.

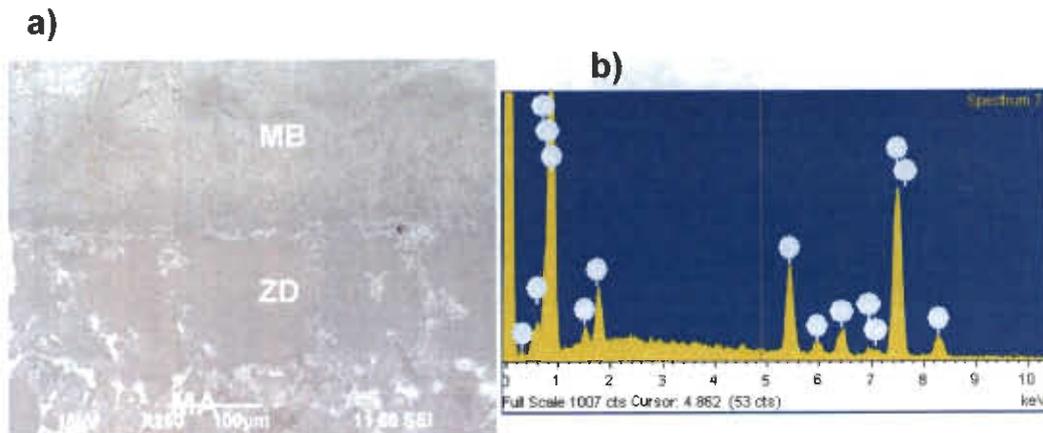


Figura 4.10. (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDX correspondiente a la zona de difusión.

4.4.1.4. 1120°C por 4 horas utilizando pasta Nicrobraz 160

En este caso la zona de difusión tiene un aspecto más uniforme, ver Figura 4.11(a). Sin embargo, resulta evidente que el aumento en el tiempo de permanencia tiene un efecto importante en el desarrollo de la zona de difusión, ya que se permite mayor tiempo para que se lleve a cabo una solidificación del tipo isotérmica. El espectrograma EDX correspondiente a esta zona se muestra en la Figura 4.11 (b), la composición en esta zona no varía significativamente.

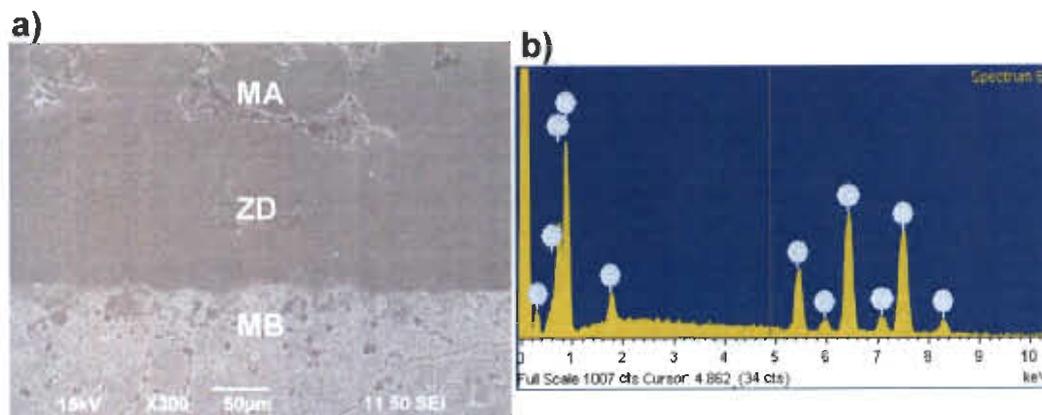


Figura 4.11. (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDX correspondiente a la zona de difusión.

4.4.1.5. 1160°C por 2 horas con una relación de mezclado de 20/80 (%e.p) polvos de Inconel 738 y pasta Nicrobraz 160

La figura 4.12 (a) muestra la microestructura de la zona de difusión con el espectrograma EDX correspondiente a esta zona, figura 4.12 (b). La microestructura de esta zona también se aprecia más uniforme debido al aumento del tiempo de permanencia. Además, se detectó el Al debido a que el material de aporte contiene polvos de Inconel 738.

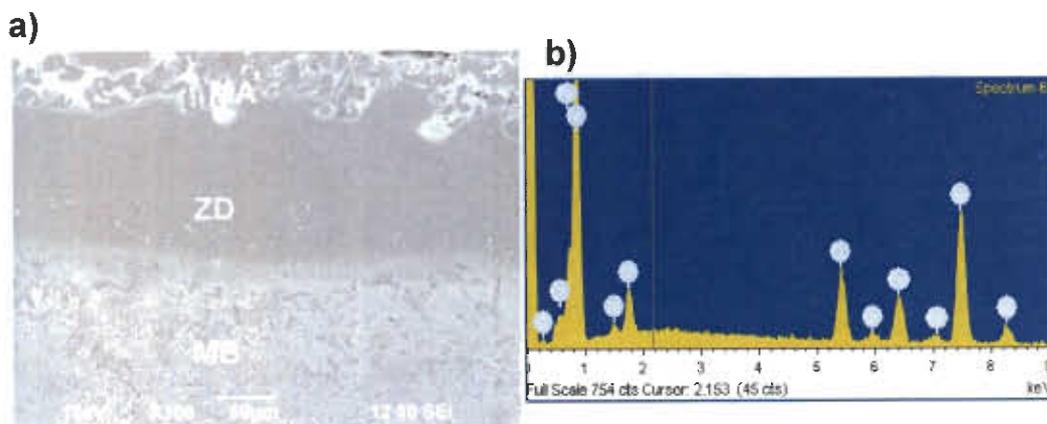


Figura 4.12. (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDXS correspondiente a la zona de difusión.

4.4.1.6. 1160°C por 2 horas utilizando pasta Nicrobraz 160

La Figura 4.13 (a) muestra la microestructura de la zona de difusión con espectrograma EDX correspondiente a esta zona, Figura 4.13 (b). Prácticamente presenta la misma composición química con una ligera disminución en el contenido de Fe respecto a las muestras con tiempos de brazing mayores y utilizando pastas de NICROBRAZ 160, pero también se observa uniforme, en este caso se debe al aumento de temperatura de 1120°C a 1160°C.

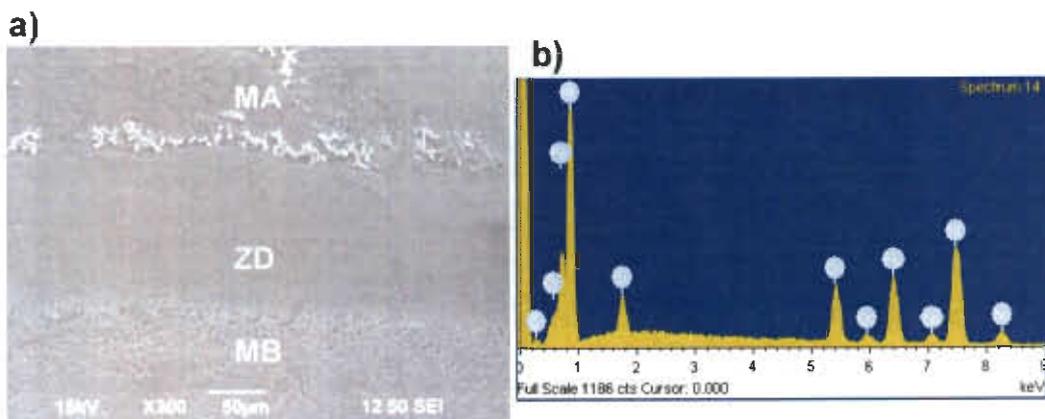


Figura 4.13. (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDX correspondiente a la zona de difusión.

4.4.1.7 1160°C por 4 horas con una relación de mezclado de 20/80 (%e.p) polvos de Inconel 738 y pasta Nicrobraz 160.

La Figura 4.14(a) muestra la microestructura de la zona de difusión con su respectivo espectrograma EDX, Figura 4.14 (b). Nuevamente, como se ha estado presentado al utilizar esta relación de mezclado, la zona de difusión tiene alto contenido de Co, y en general, su aspecto es uniforme. No obstante en esta microestructura se puede observar una cierta cantidad de porosidad entre el material de aporte y la zona de difusión lo cual puede ser perjudicial para las propiedades mecánicas de la unión.

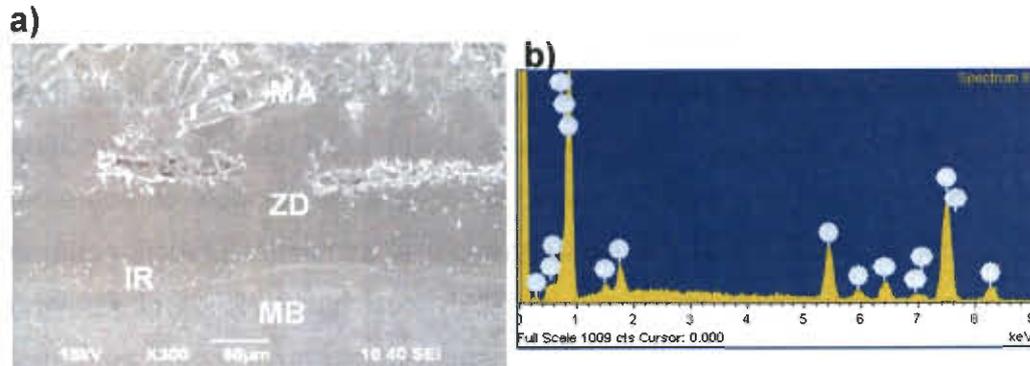


Figura 4.14. (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDX correspondiente a la zona de difusión.

4.4.1.8 1160°C por 4 horas utilizando pasta Nicrobraz 160

La microestructura de la zona de difusión se muestra en la Figura 4.15(a), el espectrograma EDX correspondiente a esta zona se presenta en la Figura 4.15 (b). En este caso se observa un incremento significativo en el espesor de la zona de difusión debido a que hubo mayor tiempo y temperatura para realizar el proceso de brazing.

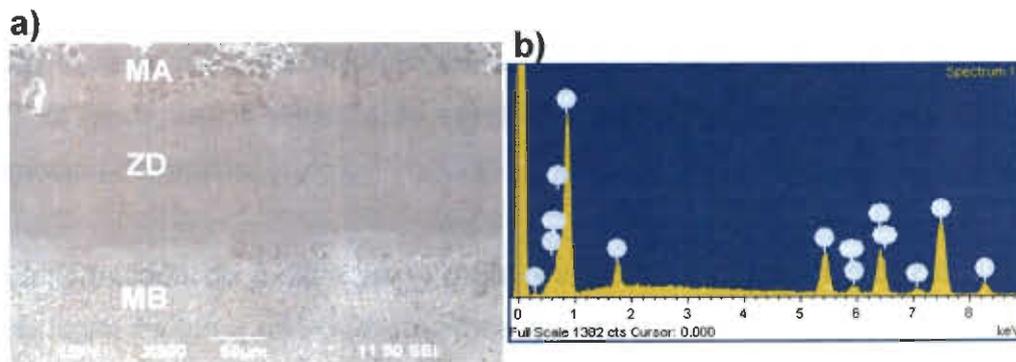


Figura 4.15. (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDX correspondiente a la zona de difusión.

Durante el proceso de difusión por brazing, la capa de aleación de metal de aporte funde y reacciona con el metal base, esto implica una disolución del metal base, por lo que genera una fase líquida. Esta fase logra rápidamente un equilibrio con el metal base sólido. Posteriormente, debido a la inter-difusión de elementos de aleación entre el metal base y el líquido, el punto de fusión de la intercapa líquida comienza a incrementarse en la interfase líquido-sólido, y comienza la solidificación isotérmica del líquido en la interfase. Conforme los elementos B y Si difunden continuamente hacia el metal base, el volumen del líquido, que puede ser mantenido en equilibrio, disminuye. Por lo tanto, la solidificación procede hacia el centro de la unión desde las superficies sólidas adyacentes [29].

Debido a la ausencia de rechazo de soluto en la interface líquido-sólido, en el régimen de solidificación isotérmica, la única fase en formarse es una solución sólida, y se previene la formación de otras fases [29]. No obstante, en situaciones donde no existe suficiente tiempo para llevar a cabo una solidificación isotérmica completa, la fase líquida en el metal de aporte puede transformarse, durante el enfriamiento, en un producto de solidificación del tipo eutéctico. Además, un incremento en la temperatura de brazing podría reducir significativamente el tiempo para que se lleve a cabo la solidificación isotérmica, y por lo tanto, producir uniones sin la presencia de constituyentes eutécticos [17], al tener menor cantidad de eutécticos reducimos áreas susceptibles a la formación de grietas.

La formación de óxidos en el metal de aporte durante el proceso brazing tiene lugar debido a diferentes razones. La limpieza del horno, el punto de rocío (Dew-point), la presencia de Oxígeno, Hidrógeno y partículas de agua dentro del horno de vacío.

En diferentes uniones de esta experimentación se encontró la presencia de óxidos en el metal de aporte. Existen diferentes métodos para eliminar los

óxidos presentes en la unión durante el proceso brazing al vacío, pero ninguno de ellos garantiza la eliminación completa de ellos en la unión. Uno de los métodos comúnmente usados es elevar la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso brazing para aceros inoxidable 304 [6] esta temperatura será mayor a los 900 °C. Otro método es introducir un gas inerte (argón) al horno de vacío, realizando un barrido y llenar la cavidad dentro del horno creando una atmósfera inerte.

Los óxidos no siempre se eliminan en la unión del brazing debido a que estos no se van hacia la superficie del metal de aporte, los óxidos tienen la capacidad de alojarse en las discontinuidades del metal de aporte mientras este está en estado semisólido y posteriormente alojándose en la solución sólida del metal de aporte [6].

4.4.1.9 Mediciones del espesor de la zona de difusión en la microestructura de las uniones mediante brazing

La Figura 4.16 muestra una serie de micro estructuras en la zona de difusión en la interfase entre el metal base y el metal de aporte, para cada una de las condiciones del ciclo brazing realizadas en este proyecto de investigación.

Como se puede apreciar en la Figura 4.16 y en la grafica de la figura 4.17, la zona de difusión tiende a aumentar gradualmente al aumentar el tiempo de 2 a 4 horas bajo las mismas condiciones de temperatura de brazing de 1120°C (condiciones 1 y 2 comparadas con las condiciones 3 y 4) y 1160°C (condiciones 5 y 6 comparadas con las condiciones 7 y 8).

De forma general, se puede apreciar un incremento significativo al aumentar tanto el tiempo de 2 a 4 horas y con un aumento simultáneo en la temperatura de 1120°C a 1160°C (condiciones 1 y 2 comparadas con las condiciones 7 y 8). El aumento de la zona de difusión se aprecia en la grafica de la Figura 4.17, con

una temperatura de 1160 °C y cuatro horas obtenemos una mayor zona de difusión solución sólida rica en Ni llevándose acabo la interdifusión de elementos del metal base como del metal de aporte.

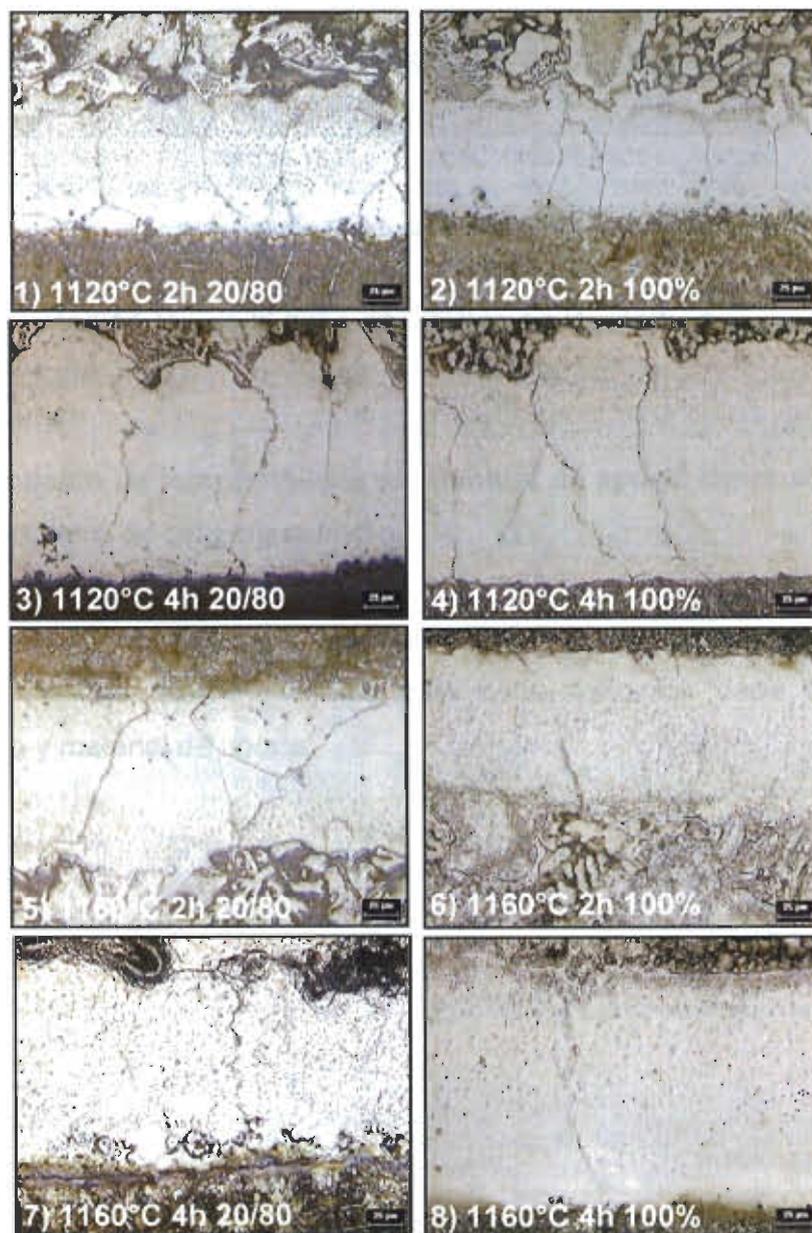


Figura 4.16. Microestructuras de la zona de difusión en la interfase entre metal base y el metal de aporte bajo las condiciones indicadas del ciclo brazing (200X).

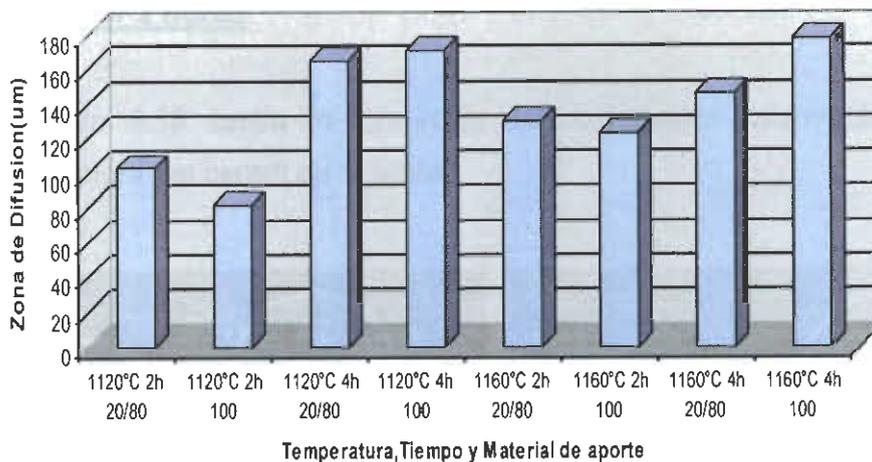


Figura 4.17. Mediciones de la zona de difusión en la interfase entre metal base y metal de aporte.

4.4.2 Formación de intermetálicos en el metal de aporte después de llevar acabo le proceso de brazing al vacío

Durante el proceso brazing la formación de compuestos intermetálicos en el material de aporte es muy variada para cada condición dada de tiempo, temperatura y material de aporte.

1120°C por 2 horas

La Figura 4.18 ilustra la formación de compuestos intermetálicos en la microestructura del centro de la unión.

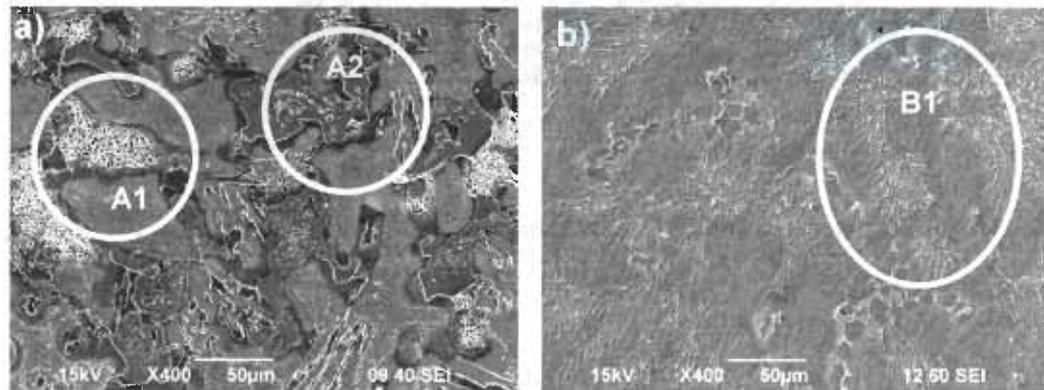


Figura 4.18. Imágenes que ilustran la formación de compuestos intermetálicos en la zona central de la unión (a) relación de mezclado 20/80, (b) 100% pasta Nicrobraz 160.

La Figura 4.18 muestra diferentes morfologías de los compuestos intermetálicos, son identificados como A2 presentan alto contenido de silicio. Este elemento favorece la formación de compuestos intermetálicos del tipo Fe-Si, Fe-C-Si y Fe-Co-Ni. En la fase indicada en A1 se aprecia la formación de un óxido de silicio. La Figura 4.19(a) muestra una ampliación de la zona A1 y el espectrograma EDX correspondiente se presenta en la Figura 4.19 (b). En la Figura 4.20 (a) se muestra una ampliación de la zona indicada como B1 en la Figura 4.18, y en la Figura 4.20 (b) se presenta el espectrograma EDX del análisis de ésta fase. En esta se presenta la formación de una fase con alto contenido de cromo embebida en una matriz de solución sólida de Níquel.

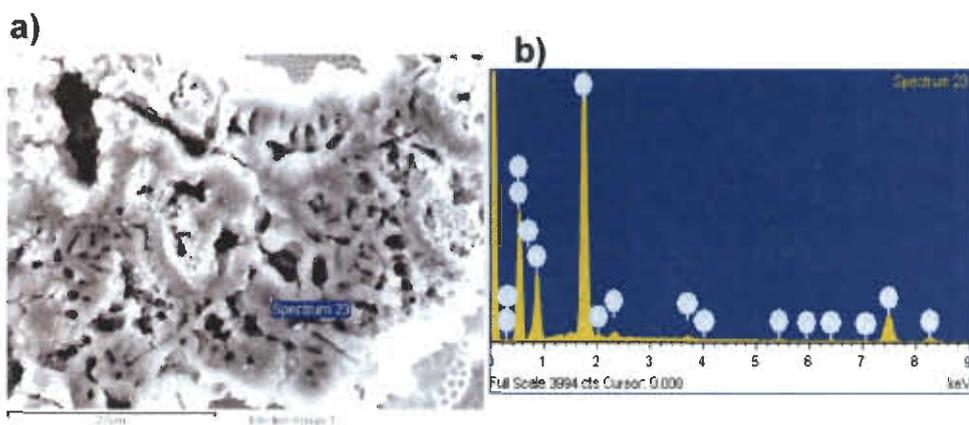


Figura 4.19. (a) Imagen ampliada del óxido indicado en el punto A1, (b) espectrograma EDX correspondiente.

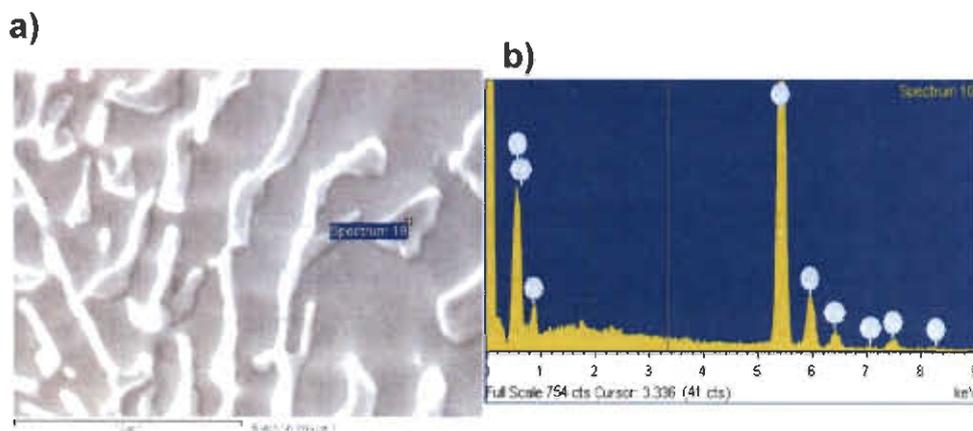


Figura 4.20. (a) Imagen ampliada de la fase con alto contenido de Cr indicada en el punto B1, (b) espectrograma EDX correspondiente al análisis de esta fase.

1120°C por 4 horas

En las Figura 4.21 a) y b), se muestra las fases intermetálicas presentes en la zona central de la unión. Existe una diferencia considerable entre las dos microestructuras debido a que en la Figura 4.21 (b) se muestra una mayor zona de solución sólida de Níquel y una menor cantidad de compuestos intermetálicos.

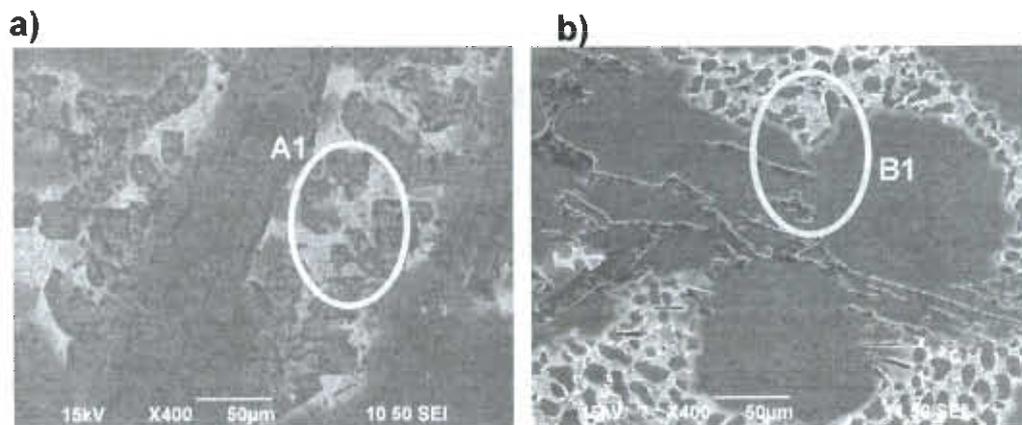


Figura 4.21. Imágenes que ilustran la formación de compuestos intermetálicos en la zona central de la unión (a) relación de mezclado 20/80, (b) 100% pasta MICROBRAZ 160.

La Figura 4.21 a) y b), muestra diferentes morfologías de los compuestos intermetálicos, el identificado como A1 presenta un contenido alto de silicio. Como se había mencionado anteriormente, este elemento favorece la formación de compuestos intermetálicos. En la Figura 4.22(a) se muestra una ampliación de la zona A1 y el espectrograma EDX correspondiente se presenta en la Figura 4.22 (b). En la Figura 4.23 (a) se muestra una ampliación de la zona indicada como B1 en la Figura 4.20; y en la figura 4.23 (b) se presenta el espectrograma EDX del análisis de esta fase. En ésta se presenta la formación de una fase rica en silicio, lo cual es indicativo de que en esta zona se forman constituyentes eutécticos.

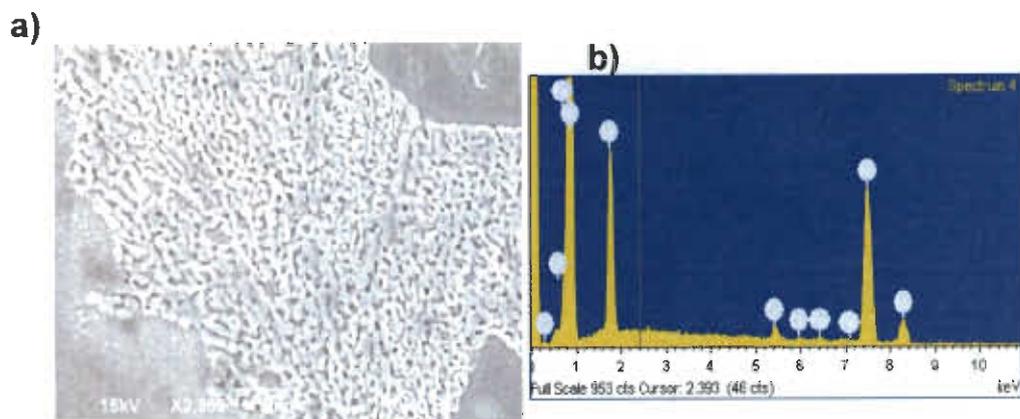


Figura 4.22. (a) Imagen ampliada de la zona indicada en el punto A1, (b) espectrograma EDXS correspondiente.

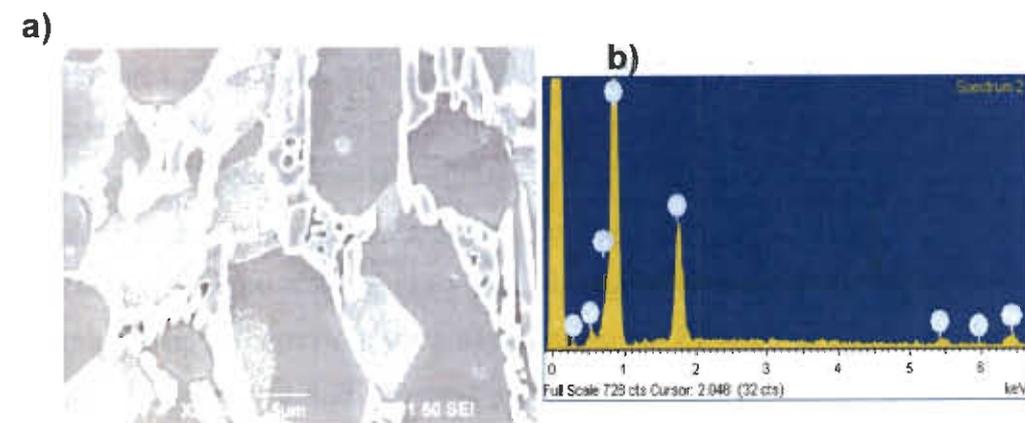


Figura 4.23. (a) Imagen ampliada del compuesto intermetálico indicado en el punto B1, (b) espectrograma EDX correspondiente.

1160°C por 2 horas

En las Figura 4.24 a) y b) se muestra las fases intermetálicas presentes en la zona central de la unión, bajo estas condiciones de brazing. En la Figura 4.24(a) se aprecia la morfología típica de una fase eutéctica, mientras que en la Figura 4.24 (b) se aprecia una menor cantidad de compuestos intermetálicos.

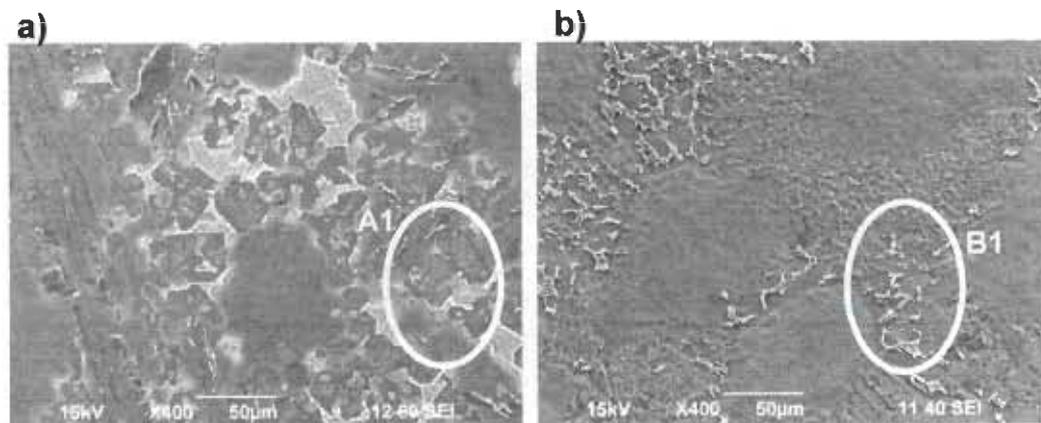


Figura 4.24. Imágenes que ilustran la formación de compuestos intermetálicos en la zona central de la unión (a) relación de mezclado 20/80, (b) 100% pasta MICROBRAZ 160.

Se realizó un análisis semicuantitativo para determinar la composición de los compuestos intermetálicos presentes y determinar cómo influye la temperatura sobre los aspectos microestructurales en la zona de la unión. Se observó que los compuestos intermetálicos sufren un cambio de morfología, tal y como se aprecia en la Figura 4.24. En la Figura 4.25(a) se muestra una ampliación de la zona indicada como A1 y su espectrograma EDX se presenta en la Figura 4.25 (b). En la Figura 4.26 (a) se muestra una ampliación de la zona indicada como B1 y en la Figura 4.26 (b) se presenta el espectrograma EDX del análisis de esta fase. La morfología cambia de acuerdo al contenido de elementos de aleación en el material de aporte, debido a la mezcla y a la temperatura.

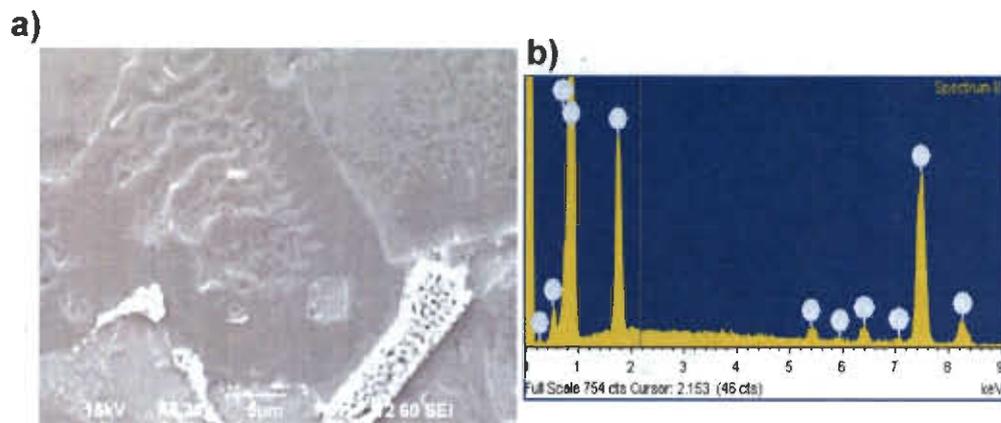


Figura 4.25. (a) Imagen ampliada de la zona indicada en el punto A1, (b) espectrograma EDXS correspondiente.

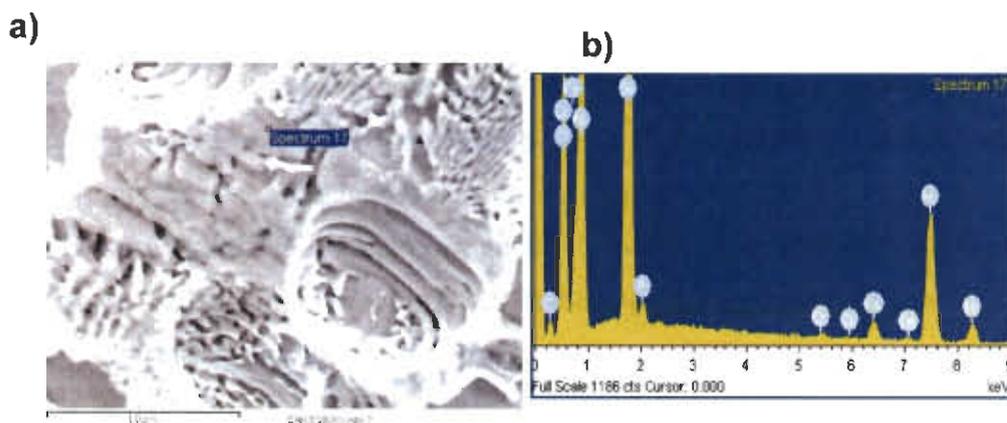


Figura 4.26. (a) Imagen ampliada de la zona indicada en el punto A1, (b) espectrograma EDX correspondiente.

1160°C por 4 horas

El último comparativo de los aspectos microestructurales y los microanálisis semicuantitativos mediante EDX realizado en esta investigación se presenta a continuación. Se pueden apreciar diferencias significativas en las microestructuras de las Figuras 4.27(a) y 4.27 (b), en el punto indicado por B1 existe un contenido de silicio mayor.

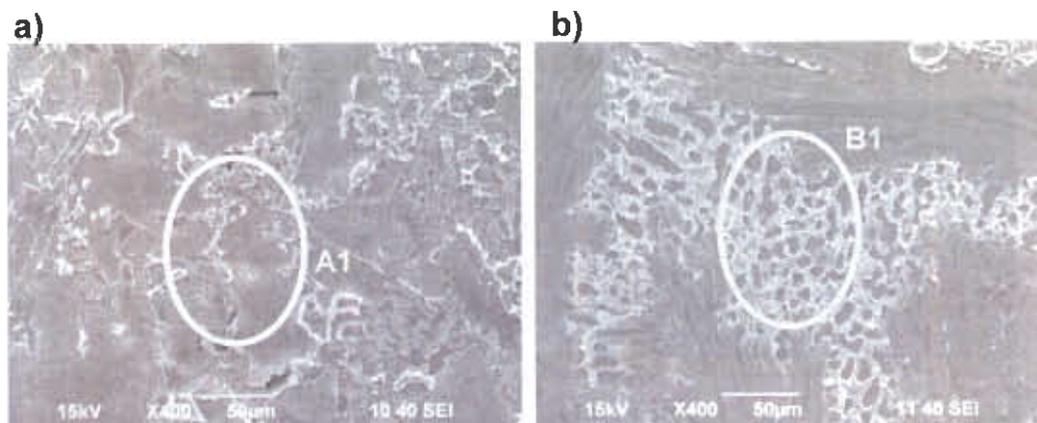


Figura 4.27. Imágenes que ilustran la formación de compuestos intermetálicos en la zona central de la unión (a) relación de mezclado 20/80, (b) 100% pasta NicroBRAZ 160.

En la Figura 4.28(a) se muestra una ampliación de la zona indicada como A1 y su espectrograma EDX se presenta en la Figura 4.28 (b). En la figura 4.29 (a) se muestra una ampliación de la zona indicada como B1 y en la Figura 4.29 (b) se presenta el espectrograma EDX del análisis de esta fase. Para una relación de 100% pasta Nicrobraz 160 disminuye la formación de intermetálicos al aumentar la temperatura y el tiempo, como se explicó anteriormente, esto se debe a la difusión de elementos que favorecen la formación de constituyentes eutécticos, hacia las zonas adyacentes a la interfase del metal base.

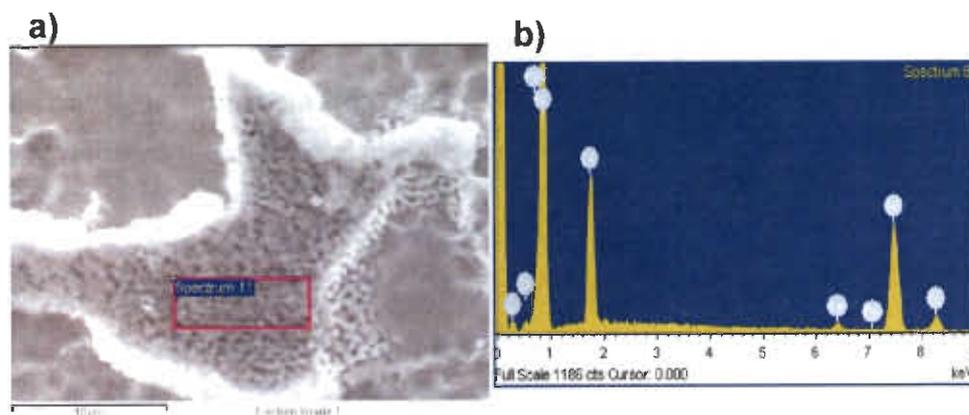


Figura 4.28. (a) Imagen ampliada de la zona indicada en el punto A1, (b) espectrograma EDXS correspondiente.

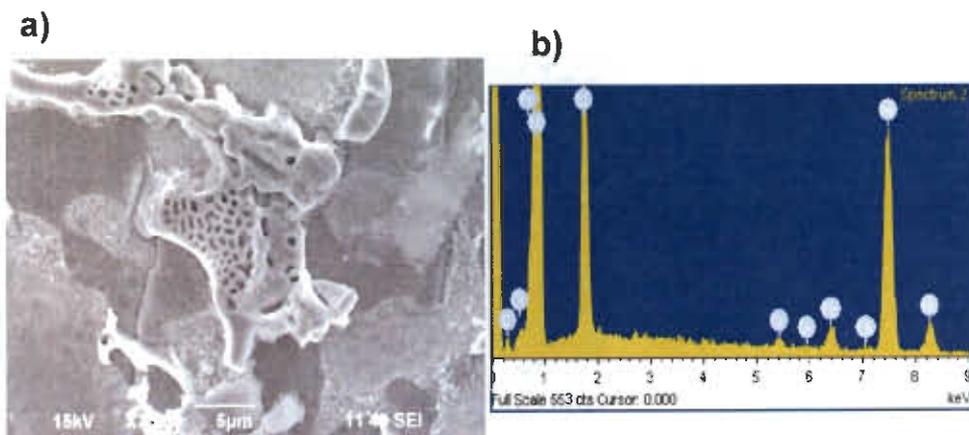


Figura 4.29. (a) Imagen ampliada de la zona indicada en el punto A1, (b) espectrograma EDXS correspondiente.

4.5 Evaluación de propiedades mecánicas en la unión

4.5.1 Perfil de microdurezas

Una vez realizada la caracterización microestructural se procedió a llevar a cabo la evaluación de propiedades mecánicas. Primero se determinaron los valores de microdureza en cada una de las probetas. La medición se realizó mediante un perfil de durezas, desde el metal de base hasta el metal de aporte, como se muestra en el esquema de las Figuras 4.30 y 4.31. Esto con el objetivo de determinar la presencia de compuestos intermetálicos y su influencia en los valores de microdurezas en el metal de aporte.

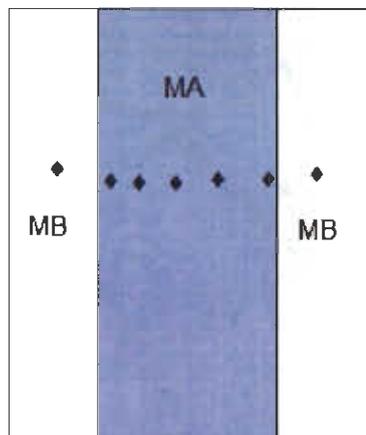


Figura 4.30. Esquema ilustrativo del perfil de durezas realizado en las muestras.



Figura 4.31. Imagen que muestra la indentación sobre la zona de difusión y el metal de aporte sobre un compuesto intermetálicos.

En la evaluación se elaboró un perfil con los valores de las durezas para las diferentes uniones, realizada bajo cada una de las condiciones de brazing al vacío. En la gráfica de la Figura 4.32 se muestra el comportamiento de los perfiles de microdurezas obtenidos para una relación de mezclado 20/80 (% e.p). de IN738/NB160. En la Figura 4.32 muestra una indentación en la zona de difusión y otra en un compuesto intermetálico.

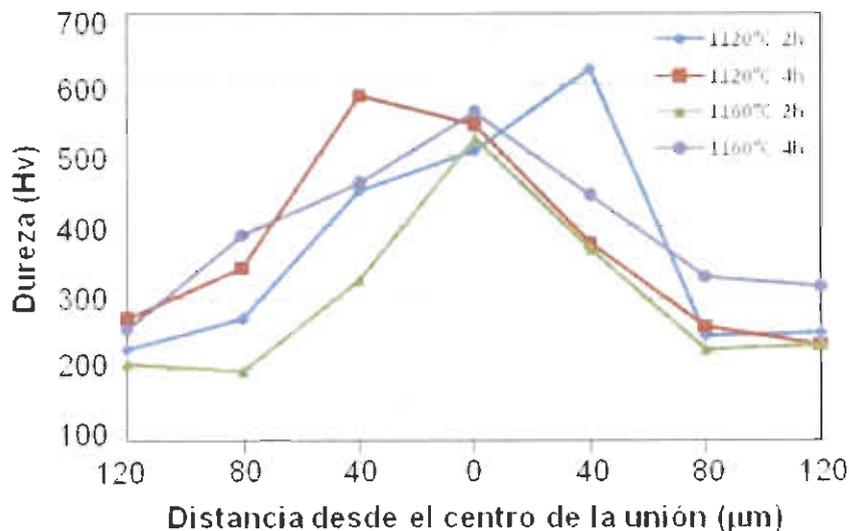


Figura 4.32. Grafica del Perfil de durezas para la relación de mezclado 20/80 % e.p. de IN738/NB160.

De la misma manera se evaluaron las durezas para la unión hecha de 100% pasta de Nicrobraz 160 Figura 4.33. Como se aprecia, tiene un comportamiento distinto a la relación de mezclado 20/80% e.p. de IN738/NB160. Se observa que para una relación de mezclado 20/80% e.p. de IN738/NB160 tenemos una mayor formación de compuestos intermetálicos en el centro de la unión así mismo, existe una menor zona de solidificación isotérmica rica en níquel en el material de aporte. En la Figura 4.33 se muestra una disminución de las durezas en el centro del metal de aporte utilizando 100 (% e.p) pasta Nicrobraz 160 debido a que la pasta de NICROBRAZ 160 solamente esta constituida de elementos como el Fe, C, Cr, como elementos de aleación y utiliza como depresores del punto de fusión del metal de aporte Si, B, al aumentar la temperatura y el tiempo de brazing utilizando solamente pasta de NICROBRAZ 160, las fases intermetálicas que se forman con la combinación de los elementos antes mencionados en el centro de la unión, tienden a disolverse formando zonas mas grandes de solución sólida rica en Ni, mientras que para un metal de aporte 20/80 (% e.p) de IN738/NB160 tenemos otros elementos tales como Ta, Ti, Al, Cr, Co, C, Mo, W, Zr y B formando otro tipo de

compuestos intermetálicos difíciles de disolver a altas temperaturas y tiempos prolongados de brazing esto se puede apreciar en las Figuras 4.6 y 4.7. Evidentemente el polvo de IN738 le da mayor dureza a la unión.

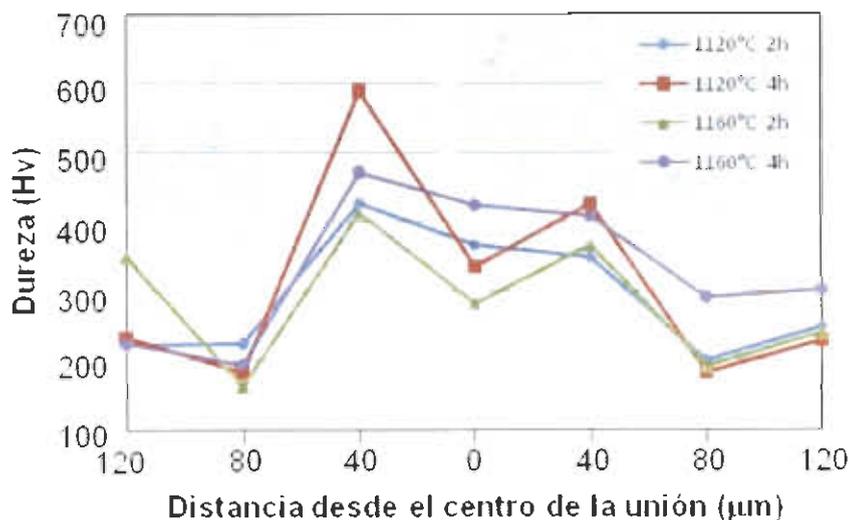


Figura 4.33 .Grafica del perfil de durezas para 100 (%e.p) pasta de MICROBRAZ 160.

4.6 Ensayo de tensión

Después de maquinar las probetas de acuerdo a las normas AWS 3.2 y ASTM E8, se llevó a cabo la evaluación de las propiedades mecánicas la cual se realizó en una máquina TENIOS OLSEN de 100 ton. Las probetas fueron sometidas a la prueba de tensión para evaluar la resistencia a la tensión en la unión, la figura 4.34 muestra una probeta unida por brazing a la cual se le esta aplicando una fuerza durante la prueba de tensión, esto se llevó a cabo para cada una de las condiciones del ciclo brazing con su respectiva réplica. En la tabla 4.2 se presenta la carga máxima de ruptura de las 16 probetas.

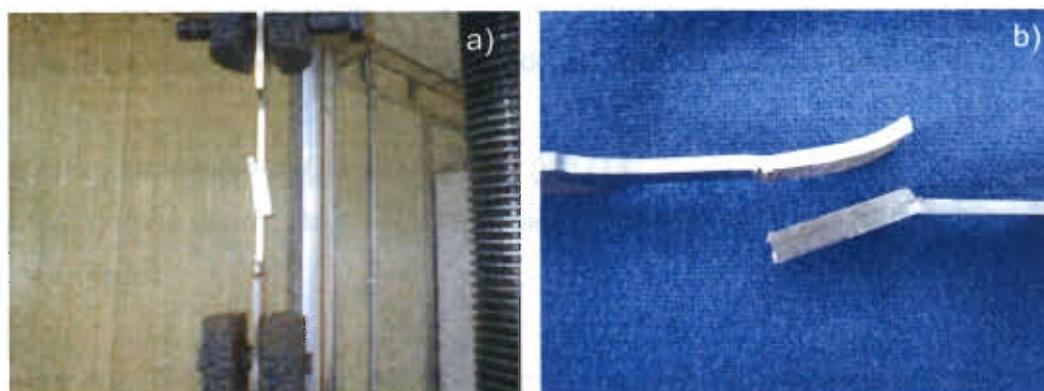


Figura 4.34. a) Fotografía que ilustra la prueba de tensión realizada, b) probeta fracturada.

Tabla 4.2. Carga máxima de las probetas bajo las diferentes condiciones del ciclo brazing.

NO. PROBETA	TEMPERATURA BRAZING (°C)	TIEMPO (hrs)	RELACIÓN MEZCLADO.	CARGA MÁXIMA (KN)
1	1120	2	20/80	16.6
2	1160	2	20/80	16.77
3	1120	4	20/80	15.21
4	1160	4	20/80	18.45
5	1120	2	100	16.33
6	1160	2	100	16.22
7	1120	4	100	15.85
8	1160	4	100	15.63
9	1120	2	20/80	17.54
10	1160	2	20/80	17.39
11	1120	4	20/80	19.04
12	1160	4	20/80	17.7
13	1120	2	100	15.9
14	1160	2	100	17.39
15	1120	4	100	17.61
16	1160	4	100	15.59

Para determinar el esfuerzo de tensión como lo indica la norma AWS 3.2 se utilizó la siguiente ecuación, los resultados se muestran en la Tabla 4.3:

Esfuerzo de tensión = Carga Máxima / (W) (T)

W = Ancho de la probeta en el cuello para el ensayo de tensión

T = Espesor

Tabla 4.3. Determinación del esfuerzo de tensión en probetas a traslape de acuerdo a AWS 3.2.

No. Probeta	Esfuerzo de tensión (MPa)
1	461.18
2	465.82
3	529.01
4	491.69
5	491.69
6	448.65
7	440.21
8	433.13
9	487.34
10	482.98
11	422.5
12	512.4
13	453.56
14	450.56
15	472.73
16	434.22

4.7 Diseño de experimentos

Los resultados obtenidos para el análisis estadístico de las pruebas realizadas a las muestras fueron analizados con la ayuda del software MINITAB[®] versión 14, para esto con la intención de obtener las variables que tienen mayor influencia en el proceso brazing. Este diseño exploratorio fue de la forma factorial completo 2^k , 2 niveles y 3 factores, es decir, con 2^3 los factores: tiempo del proceso brazing, temperatura a la cual se llevó a cabo el brazing y relación de mezclado, los niveles en los que se divide son alto y bajo, tiempo 2 y 4 horas, temperatura 1160 °C y 1120°C y materiales de aporte, ver la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Muestra los factores y niveles del diseño de experimentos factorial propuesto.

Factores	Niveles (alto/bajo)
Temperatura	1160°C, 1120°C
Tiempo	4 horas , 2 horas
Materiales de aporte	100 (%e.p) pasta de Nicrobraz 160, 20/80(%e.p) Polvos de Inconel 738 y pasta de Nicrobraz 160

Se analizaron las interacciones y la influencia de cada una de las variables independientes, tiempo, temperatura y relación de mezclado que influyen sobre las propiedades mecánicas y microestructurales en las uniones mediante el proceso brazing. Como se puede apreciar en la Figura 4.34 la variable que más influye sobre la resistencia a la tensión es la relación de mezclado 20/80 (%e.p IN738/NB160. Como se observó en los análisis microestructurales y medición de durezas, utilizando una relación de mezclado 20/80 80 (%e.p) IN738/NB160 se tiene una cantidad mayor de compuestos intermetálicos, los cuales son el

tipo Fe-Cr-Si, Ni-Co-Si-Fe y Ni-Cr-Co, estos compuestos son duros y frágiles. Mientras que para 100% pasta Nicrobraz 160 se observa una mayor zona de difusión, estas zonas son de menor dureza y más blandas. Ambos metales de aporte tienen Ni, Cr, Si, Fe, pero para una relación de mezclado de elementos como el cromo y cobalto mezclado a la pasta de Nicrobraz 160, tiene un factor positivo en cuanto al incremento de la resistencia a la tensión. Esto es debido a que como lo explica [30] al utilizar mayor tiempo, durante el ciclo brazing, se logra obtener una zona de mayor difusión y mayor disolución de fases intermetálicas en la zona central del metal de aporte, haciendo de la matriz una solución sólida con alto contenido de níquel.

A continuación se muestra la Tabla 4.5 las 3 variables independientes analizadas tiempo del brazing, temperatura del proceso y relación de mezclado con su respectiva respuesta que en este caso es el esfuerzo a la tensión en la unión.

Tabla 4.5. Muestra las variables independientes, tiempo, temperatura y material de aporte con la respuesta esfuerzo a la tensión.

NUM. DE PROBETA	TEMP. BRAZING (°C)	TIEMPO (Hrs)	RELACIÓN MEZCLADO	RESPUESTA
	X_1	X_2	X_3	ESFUERZO DE TENSION (MPa)
1	1120	2	20/80	461.18
2	1160	2	20/80	465.82
3	1120	4	20/80	529.01
4	1160	4	20/80	491.69
5	1120	2	100	491.69
6	1160	2	100	448.65
7	1120	4	100	440.21
8	1160	4	100	433.13
9	1120	2	20/80	487.34
10	1160	2	20/80	482.98
11	1120	4	20/80	422.5
12	1160	4	20/80	512.4
13	1120	2	100	453.56
14	1160	2	100	450.56
15	1120	4	100	472.73
16	1160	4	100	434.22

En la Figura 4.35 se puede apreciar el diagrama de Pareto. Como se aprecia claramente, la variable que presenta mayor impacto sobre el proceso es la relación de mezclado 20/80, hecha de polvos de Inconel 738 y Nicrobraz 160. En este análisis también se analizó la interacción que hay entre las tres variables, temperatura tiempo y relación de mezclado. La variable C, indicada en la Figura 4.35 es la relación de mezclado 20/80.

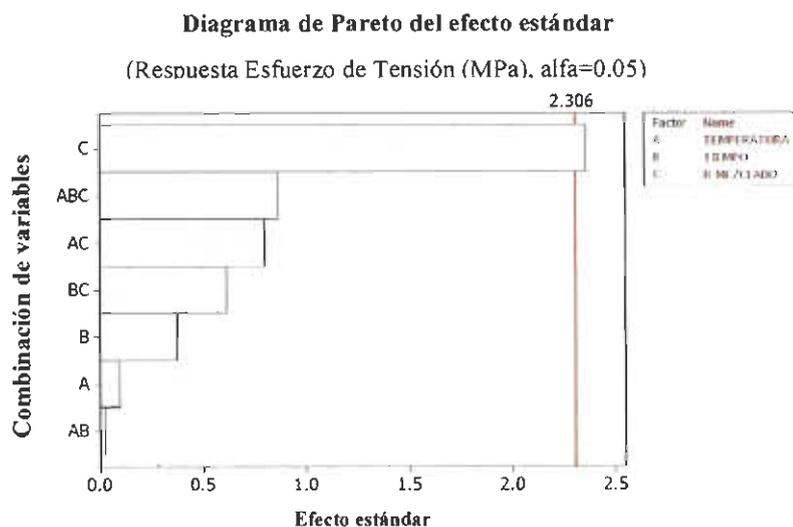


Figura 4.35. Diagrama de Pareto en el cual se muestra el grado de importancia de cada una de las variables sobre el proceso brazing y el esfuerzo de tensión obtenido con efecto estandarizado.

En la Figura 4.36 se puede observar un diagrama de cubo el cual indica el comportamiento de las variables, tiempo, temperatura y relación de mezclado, las esquinas representan las medias μ del proceso para la resistencia a la tensión. La gráfica del cubo indica que para un mayor esfuerzo de tensión, se debe utilizar la relación de mezclado en un nivel bajo: 20/80, la temperatura en un nivel alto: 1160°C, el tiempo en un nivel alto 4 horas.

Diagrama de cubo para el Esfuerzo de Tensión (MPa)

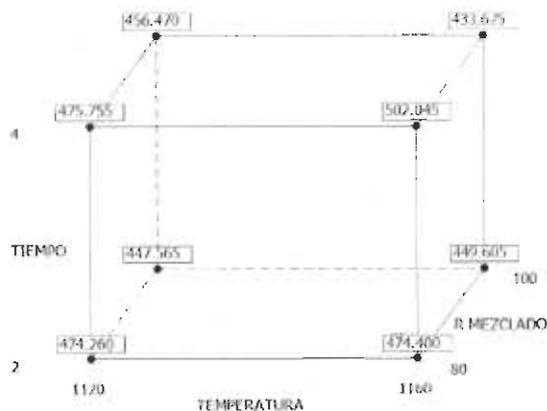


Figura 4.36. Gráfica de cubo del comportamiento de las variables en el proceso brazing y los valores de sus medias.

El efecto de los promedios de las variables, sobre el esfuerzo de tensión es descrito en la Figura 4.37. La variable independiente relación de mezclado 20/80 es la que tiene un efecto de mayor resistencia a la tensión en la probeta.

Gráfica del efecto principal para el esfuerzo de Tensión (MPa)

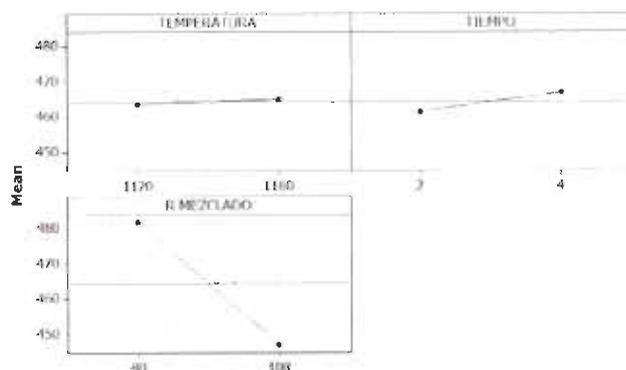


Figura 4.37. Gráfica del efecto de los promedios sobre el esfuerzo a la tensión.

4.7.1 Análisis de ANOVA.

De acuerdo al análisis de varianza, la variable que más influye es la relación de mezclado véase la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Valores obtenidos en el análisis de ANOVA

variable	Coficiente	T	P
Constante	464.22	62.87	0
Temperatura	464.22	0.1	0.926
Tiempo	0.71	0.37	0.718
R mezclado	2.76	-2.36	0.046
Temperatura*tiempo	-17.39	0.02	0.983
Temperatura*R mezclado	0.16	-0.8	0.447
Tiempo*R mezclado	-5.9	-0.61	0.557
Temperatura*tiempo*R mezclado	-4.52	-0.86	0.413

En los datos de la tabla 4.6 se puede observar el valor de P (valor de α) o mínimo valor de significancia específico. Este valor indica el grado de probabilidad de que el estadístico de prueba asuma un valor que sea al menos más extremo como el valor observado del estadístico. Cuando la hipótesis nula H_0 es verdadera, en términos más formales P se define como el nivel de significación menor que llevaría a rechazar H_0 . Esta prueba estadística se realizó con un nivel de significancia de $p = 0.05$. El valor obtenido fue de $p = 0.046$. [31]

4.8 Conclusiones

1. El proceso brazing al vacío resulta ser un proceso eficaz para fabricar uniones sanas en el acero inoxidable del tipo AISI 304, evitándose la sin distorsión del material base, y porosidades.
2. La mezcla de polvos de Inconel 738 y pasta de Nicrobraz 160, en una proporción 20/80(%e.p), fue la que obtuvo mayor resistencia a la tensión debido a la difusión de elementos como el Cr,Co,Fe,Si y B en la matriz de níquel resultando una unión fuerte capas de soportar 512 MPa.
3. El material de aporte pasta de Nicrobraz 160 presentó una menor resistencia a la tensión de 433 MPa, debido a la difusión de compuestos intermetálicos en la solución sólida de Níquel, obteniendo una zona de difusión isotérmica mayor, ésta zona es la de menor resistencia y dureza.
4. El incremento de la temperatura y el tiempo, favorecen la difusión de elementos de aleación en la solución sólida de Níquel, en el metal de aporte.
5. La formación de compuestos intermetálicos en el centro de la unión incrementa la dureza, para 100% pasta de Nicrobraz 160, al aumentar el tiempo y la temperatura, se disminuye la formación de compuestos intermetálicos, formando zonas más amplias de difusión, debido a la solidificación isotérmica.
6. La relación 20/80 favoreció la formación de compuestos intermetálicos, eutécticos en toda la zona central del metal base, disminuyendo la zona de solidificación isotérmica.

7. El DOE utilizado en esta investigación resultó una herramienta útil para determinar cual de las variables tuvo mayor efecto sobre las propiedades mecánicas en la unión, la cual fue la relación de mezclado 20/80 (%e.p) polvo de IN38/NB 160 pasta, alcanzando 502 MPa de resistencia a la tensión promedio.

Bibliografía.

- [1]. Kohl W.h, (1964), Soldering and Vacuum Brazing, vol 14 pag175-198.
- [2]. Metals handbook, (1983) welding, brazing, and soldering, 9ª Ed vol 6, American Society for Metals, p29-995.
- [3]. Jhones. W.r (1986) Vacuum- Another Atmosphere, Heat Treat, Oct, p 39-41
- [4]. Hooven W.t. and Nokes Kww, (1990) Make your Vacuum Brazing Furnaces User Friendly, Cap 1, p 25-29.
- [5]. Metal handbook (1993).Welding, Brazing and Soldering AMS vol.6 9ª Edicion pag 1529 1530.
- [6]. Roberts Philip (2004) Industrial Brazing Practice practice capitulo 1, 7 Pag 6,177,203.
- [7]. Dr.Milner and Lapps R. (1969). Introduction to Welding and Brazing, Pergamon Press.
- [8]. Sharps Pr.,a.p, and Pask j.a (1981) wetting and spreading in cu-ag system, acta metal, vol 29 , p 855 – 865).
- [9]. M.G Nicholas and Mortimer, D.A (1985) ceramic-metal joining for structural applications materials technology, vol 1, p 657-665.
- [10]. Alloy phase diagrams (1992) volume 3 of the ASM handbook.
- [11] Donald R Askeland (1998) Ciencia e Ingeniera de Materiales 3er edición, Capitulo 3, Pág. 320 ed. Internacional thomson.

[12]. Sotelo J. C Rodríguez (2008) Caracterización mecánica a diferentes aperturas de unión de materiales de aporte BNi2, BNi5, Bcu, BNiCrPCu y BNiCrPSi Dpto. Planta de Tecnologías de Unión de AIMEN.

[13] Jang J. S. C., Shih h. p. (2006) Evolution of microstructure of AISI 304 stainless steel joint brazed by mechanically alloyed nickel base filler with different silicon content. University Shou, Kaohsiung, Taiwan, and Republic of China., Journal of Materials Science Letters, Volume 22, Pag (79-82).

[14] ASM Handbook. Vol. 1. (1993) Properties and selection, irons, steel, and high performance alloys.

[15] Matthew J. and Stephen. J. (2002) Superalloys. A Technical Guide". ASM Internacional. Second edition.

[16] Alloy Digest (1972). Data on world wide metals and alloys. Engineering Alloys Digest, Inc. Upper Montclair, New Jersey.

[17] Metal Handbook. (1993) Welding, brazing and soldering. ASM . Vol. 6..

[18] Buschke I. and Lugscheider E., (1998) "New approaches for joining high-temperature materials", Materials Solutions 98, Joining of Advanced and Specialty Materials, ASM International, Rosemont, IL, (51-55).

[19] Lugscheider E., Schmoor H. and Eritt, U. (1995) Optimization of repair-brazing processes for gas turbine blades, Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Welding, Deutscher Verlag fur Schweisstechnik GmbH, Dusseldorf (Germany), pp. 259-261.

[20] Johnson R, Baron M. and Livesey N.J. (1979), International Brazing and Soldering Conference AMS Internacional London. 3^{er} Edicion (BABS).

[21] Duvall D. S., Owczarski W. A and Paulonis D. F., (1974) TLP Bonding--a New Method for Joining Heat Resistant Alloys, *Welding J.*, April (203-215).

[22] Chaturved M. C. i, Ojo O. A. and Richards N.L. (2005). Diffusion Brazing of Cast Inconel 738 Superalloy. *Journal of Materials.* p. 3.

[23] Johnson C, (1981).The Use of TETIG Diagrams in High Temperature Brazing," *Welding Journal.* Page 185.

[

[24] Tung, Lim, and Lai, (1996). Solidification Phenomena in Nickel-Based Brazes Containing Boron and Silicon, *Scripta Materialia.* Vol. 34, No. 5, pp. 763-769.

[25] Wikstrom N.P., O.A. Ojo, Chaturvedi M.C. (2006) Influence of process parameters on microstructure of transient liquid phase bonded Inconel 738LC superalloy with Amdry DF-3 interlayer. *Materials Science and Engineering A* 417 299–306.

[26] Sparling and Liburdi, (2003).6th International Charles Parsons Turbine Conference, Dublin,Ireland.

[27] Van Esch and Greaves, (2000). High Temperature Brazing for Cobalt-Based GT Components. ASME Paper No. 2000-GT-0337, American Society of Mechanical Engineers Turbo Expo 2000, Munich, Germany.

[28]. Gan, Y.X Aglan H.A , Steward R.V. (2001) Microstructure Fracture Toughness Relationship of Vanadium Alloy Steel Stainless Brazed Joints. *Mechanical engineering program 3001 Ross hall auburn university* 2001, vol. 299, Pag. 157-164 (60 ref.).

[30] Douglas C. Montgomery (2006) Diseño y análisis de experimentos 2da edición Editorial Limaza Wily capitulo 2,6 Pág. 37,218

[31] Wenchun Jiang, Gong J.M., S.T. Tu (2009) Effect of holding time on vacuum brazing for a stainless steel plate-fin structure, Materials and Design, vol 31 pag 2157-2162.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1	Alabes móviles colocados en el compresor de la turbina Ruston TB 5000	10
Figura 2.2	Efecto del ángulo de contacto en la capilaridad.	11
Figura 2.3	Relación del ángulo de contacto con la tensión superficial. (a) sistema de mojabilidad. (b) sistema de no mojabilidad.	12
Figura 2.4	Líquido extendido a través de la superficie del sólido con un ángulo $\theta \leq 90^\circ$. (a) $\theta_1 = 0^\circ$ (b) $\theta_1 = \theta$ equilibrio	12
Figura 2.5	Línea de reacción formada durante el proceso brazing	13
Figura 2.6	Ejemplo de una línea de reacción entre el Vanadio y acero inoxidable 304.	14
Figura 2.7	Horno elevador para realizar el brazing con atmósfera controlada	16
Figura 2.8	Horno de vacío utilizado para operaciones de brazing	17
Figura 2.9	Horno de vacío para realizar el proceso brazing	20
Figura 2.10	Gráfica de diferentes materiales de aporte y temperaturas a las cuales se puede aplicar el brazing relacionando la formación de vapor de agua con la temperatura a la cual se aplica el proceso	21
Figura 2.11	Perfiles de temperatura o ciclos utilizados en el proceso de brazing al vacío.	22
Figura 2.12	Ciclo del proceso brazing: esquema de las velocidades de calentamiento y enfriamiento dividido en 3 zonas	23
Figura 2.13	Efecto de la temperatura y del punto de rocío sobre la formación de óxidos	25
Figura 2.14	Diagrama de Scheaffler	27
Figura 2.15	Imagen de electrones secundarios del constituyente eutéctico en la zona central de la unión.	32
Figura 2.16	Imágenes que ilustran la microestructura del constituyente eutéctico en la zona central de la unión, utilizando metales de aporte con B y Si. (a) BNi-3: Ni-3.2B-4.5Si. (b) BNi-1: Ni-14Cr-4.5Si-4.5Fe-3B.	33
Figura 2.17	Imágenes del microscopio óptico que muestran la microestructura del constituyente eutéctico en uniones por brazing. (a) tamaño de claro de 0.5 mm 100X y (b) 200X. (c) y (d) tamaño de claro de 2 mm (200X)	34
Figura 2.18	Geometría de las pruebas de tensión para la unión de V-5Ti-5Cr/Au-Ni / Acero 304 inoxidable. (a) Probeta sin muesca, (b) con muesca	36
Figura 2.19	Gráfica que muestra el perfil de tiempo-temperatura contra el ángulo de contacto en el sistema Au ₁₈ Ni entre acero AISI inoxidable 304	37
Figura 2.20	Gráfica que muestra el perfil de tiempo-temperatura y el ángulo de contacto entre el sistema Au ₁₈ Ni/V-5Ti-5Cr	37
Figura 2.21	Diagrama binario (a) V-Au y (b) Fe- Au	38
Figura 2.22	Gráfica de la relación esfuerzo-deformación de los metales base V-5Ti-5Cr y acero inoxidable 304	39
Figura 2.23	Gráfica de la relación esfuerzo deformación de las muestras con muesca y sin muesca para la unión completa de V-5Ti-5Cr/Au-Ni / Acero inoxidable 304	40

Figura 2.24	Probeta para evaluación de propiedades mecánicas utilizada por Hickham Industries	42
Figura 2.25	Probeta utilizada por Liburdi para la evaluación de propiedades mecánicas en uniones por brazing	43
Figura 2.26	Probeta de tensión utilizada por la Universidad de Tokyo en Japón	43
Figura 3.1	Esquema procedimiento experimental	45
Figura 3.2	Esquema representativo del ensamblado de la probeta de traslape simple para prueba de esfuerzo de corte y la aplicación el material de aporte	47
Figura 3.3	Esquema para preparar la probeta de traslape simple para la evaluación del esfuerzo de corte.	48
Figura 3.4	Geometría de la probeta para evaluación de propiedades mecánicas bajo la norma AWS C3.2M	49
Figura 3.5	Dimensiones para la fabricación de probetas para ensayos de tensión bajo la norma ASTM E8.	49
Figura 3.6	Ciclo para el proceso brazing al vacío	50
Figura 3.7	Horno de vacío empleado para el proceso de tratamientos térmicos y brazing	52
Figura 4.1	Ciclo térmico del proceso brazing realizado a una temperatura de 1120°C por 2 horas utilizando 2 materiales de aporte: (1) una relación de mezclado de polvos de Inconel 738 y pasta de Nicrobraz 160 y (2) 100% pasta de Nicrobraz 160.	58
Figura 4.2	Ciclo térmico del proceso brazing realizado a una temperatura de 1120°C por 4 horas utilizando 2 materiales de aporte: (1) una relación de mezclado de polvos de Inconel 738 y pasta de Nicrobraz 160 y (2) 100% pasta de Nicrobraz 160	58
Figura 4.3	Ciclo térmico del proceso brazing realizado a una temperatura de 1160°C por 2 horas utilizando 2 materiales de aporte: (1) una relación de mezclado de polvos de Inconel 738 y pasta de Nicrobraz 160 y (2) 100% pasta de Nicrobraz 160	59
Figura 4.4	Ciclo térmico del proceso brazing realizado a una temperatura de 1160°C por 4 horas utilizando 2 materiales de aporte: (1) una relación de mezclado de polvos de Inconel 738 y pasta de Nicrobraz 160 y (2) 100% pasta de Nicrobraz 160	59
Figura 4.5	Fotografía de las probetas maquinadas con la geometría indicada en las normas AWS 3.2 y ASTM E8.	60
Figura 4.6	Imágenes de electrones secundarios de la microestructura de las muestras sometidas a ciclos brazing de 1120°C (a) 2 horas utilizando una relación de mezclado 20/80, (b) 2 horas utilizando 100% pasta Nicrobraz 160, (c) 4 horas utilizando una relación de mezclado 20/80 y (d) 4 horas utilizando 100% pasta Nicrobraz 160.	62
Figura 4.7	Imágenes de electrones secundarios de la microestructura de las muestras sometidas a ciclos brazing de 1160°C (a) 2 horas utilizando una	63

relación de mezclado 20/80, (b) 2 horas utilizando 100% pasta Microbraz 160, (c) 4 horas utilizando una relación de mezclado 20/80 y (d) 4 horas utilizando 100% pasta Microbraz 160.

- Figura 4.8** (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDXS correspondiente a la zona de difusión 65
- Figura 4.9** (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDXS correspondiente a la zona de difusión 66
- Figura 4.10** (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDXS correspondiente a la zona de difusión. 67
- Figura 4.11** (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDXS correspondiente a la zona de difusión. 68
1160°C por 2 horas con una relación de mezclado de 20/80 polvos de Inconel 738 y pasta Microbraz 160
- Figura 4.12** (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDXS correspondiente a la zona de difusión. 69
- Figura 4.13** (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDXS correspondiente a la zona de difusión. 70
- Figura 4.14** (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDXS correspondiente a la zona de difusión. 71
1160°C por 4 horas utilizando pasta Microbraz 160
- Figura 4.15** (a) Imagen de electrones secundarios que muestra la microestructura de la zona de difusión en la interfase metal base/material de aporte, (b) espectrograma EDXS correspondiente a la zona de difusión. 71
- Figura 4.16** Microestructuras de la zona de difusión en la interfase entre metal base y el metal de aporte bajo las 8 condiciones indicadas del ciclo brazing. 74
Como se puede apreciar en la figura 4.16 y en la tabla 4.1, la zona de difusión tiende a aumentar gradualmente al aumentar el tiempo de 2 a 4 horas bajo las mismas condiciones de temperatura de brazing de 1120°C (condiciones 1 y 2 comparadas con las condiciones 3 y 4) y 1160°C (condiciones 5 y 6 comparadas con las condiciones 7 y 8).

De forma general, se puede apreciar un incremento significativo al aumentar tanto el tiempo de 2 a 4 horas y con un aumento simultáneo en la temperatura de 1120°C a 1160°C (condiciones 1 y 2 comparadas con las condiciones 7 y 8).

- Figura 4.17** Mediciones de la zona de difusión en la interfase entre el metal base y metal de aporte. 75
- Figura 4.18** Imágenes que ilustran la formación de compuestos intermetálicos en la zona central de la unión (a) relación de mezclado 20/80, (b) 100% pasta NICROBRAZ 160. 76
- Figura 4.19** (a) Imagen ampliada del óxido indicado en el punto A1, (b) espectrograma EDXS correspondiente. 77
- Figura 4.20** (a) Imagen ampliada de la fase con alto contenido de Cr indicada en el punto B1, (b) espectrograma EDXS correspondiente al análisis de esta fase. 77
- Figura 4.21** Imágenes que ilustran la formación de compuestos intermetálicos en la zona central de la unión (a) relación de mezclado 20/80, (b) 100% pasta NICROBRAZ 160. 78
- Figura 4.22** (a) Imagen ampliada de la zona indicada en el punto A1, (b) espectrograma EDXS correspondiente. 79
- Figura 4.23** (a) Imagen ampliada del óxido indicado en el punto B1, (b) espectrograma EDXS correspondiente. 79
- Figura 4.24** Imágenes que ilustran la formación de compuestos intermetálicos en la zona central de la unión (a) relación de mezclado 20/80, (b) 100% pasta NICROBRAZ 160. 80
- Figura 4.25** Imagen ampliada de la zona indicada en el punto A1, (b) espectrograma EDXS correspondiente. 81
- Figura 4.26** (a) Imagen ampliada de la zona indicada en el punto A1, (b) espectrograma EDXS correspondiente. 81
- Figura 4.27** Imágenes que ilustran la formación de compuestos intermetálicos en la zona central de la unión (a) relación de mezclado 20/80, (b) 100% pasta NICROBRAZ 160. 82
- Figura 4.28** a) Imagen ampliada de la zona indicada en el punto A1, (b) espectrograma EDXS correspondiente. 82

Figura 4.29	(a) Imagen ampliada de la zona indicada en el punto A1, (b) espectrograma EDXS correspondiente.	83
Figura 4.30	Perfil de durezas realizado a las muestras	84
Figura 4.31	Muestra la indentación sobre la zona de difusión y el metal de aporte sobre un compuesto intermetálicos	84
Figura 4.32	Grafica del Perfil de durezas para la relación de mezclado 20/80	85
Figura 4.33	Grafica del perfil de durezas para 100 % pasta de NICROBRAZ 160.	86
Figura 4.34	a) Ilustra la prueba de tensión realizada, b) probeta fracturada	87
Figura 4.35	Diagrama de Pareto en el cual se muestra el grado de importancia de cada una de las variables sobre el proceso brazing y el esfuerzo de tensión obtenido con efecto estandarizado.	92
Figura 4.36	Grafica de cubo que muestra el comportamiento de las variables y los valores de sus medias	93
Figura 4.37	Muestra el efecto de los promedios μ sobre el esfuerzo a la tensión.	93

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1	Diferentes rangos de vacío y presiones obtenidas	18
Tabla 2.2	Valores del punto de rocío para la formación de vapor de agua.	24
Tabla 2.3	Composición química de un acero inoxidable 304.	30
Tabla 2.4	Composición química y condiciones en las que se llevó a cabo el brazing	35
Tabla 3.1	composición química del metal de aporte en polvos de IN 738	46
Tabla 3.2	Composición química del metal de aporte en pasta NICROBRAZ 160	46
Tabla 3.3	Matriz de diseño de experimentos.	54
Tabla 4.2	Carga máxima de las probetas bajo las diferentes condiciones del ciclo brazing.	87
Tabla 4.3	Determinación del esfuerzo de tensión en probetas a traslape de acuerdo a AWS 3.2	88
Tabla 4.4	Muestra los factores y niveles del diseño de experimentos factorial propuesto.	89
Tabla 4.5	Muestra las variables independientes, tiempo, temperatura y material de aporte con la respuesta esfuerzo a la tensión.	91
Tabla 4.6	Muestra análisis de ANOVAS para las distintas condiciones dadas.	94