

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



“UNIÓN DE ACEROS AUSTENÍTICOS 304 SOBRE SUBSTRATOS DE ALUMINIO DE LA SERIE 6061 POR EL PROCESO BRAZING”

POR

GILBERTO DE JESÚS ZENDEJO COVARRUBIAS

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A JUNIO DE 2015

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



“UNIÓN DE ACEROS AUSTENÍTICOS 304 SOBRE SUBSTRATOS DE ALUMINIO DE LA SERIE 6061 POR EL PROCESO BRAZING”

POR

GILBERTO DE JESÚS ZENDEJO COVARRUBIAS

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A JUNIO DE 2015

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

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **“UNIÓN DE ACEROS AUSTENÍTICOS 304 SOBRE SUBSTRATOS DE ALUMINIO DE LA SERIE 6061 POR EL PROCESO BRAZING”**, realizada por el alumno (a) **GILBERTO DE JESÚS ZENDEJO COVARRUBIAS**, con número de matrícula **14ES-179** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dr. Héctor Manuel Hernández García

Tutor Académico

Dr. Felipe de Jesús García Vázquez

Tutor en Planta

Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila

Asesor

Vo.Bo.

Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés

Coordinador de Posgrado

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

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **GILBERTO DE JESÚS ZENDEJO COVARRUBIAS**, una vez leída y revisada la Monografía titulada “**UNIÓN DE ACEROS AUSTENÍTICOS 304 SOBRE SUBSTRATOS DE ALUMINIO DE LA SERIE 6061 POR EL PROCESO BRAZING**”, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 18 días del junio del 2015.

Dr. Arturo Isaías Martínez Enríquez
Presidente

Dra. Rita Muñoz Arroyo
Secretario

Dr. Héctor Manuel Hernández García

Vocal

DEDICATORIA

A Dios, por dame la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a todas aquellas personas que han sido mi apoyo y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi familia por haber educado en mi la perseverancia y constancia, aquellos valores que los tengo muy presentes en la vida diaria. Por haberme enseñado que con esfuerzo y dedicación puedo conseguir todo lo que uno se propone.

A todas las personas que me apoyaron en todo momento, además de alentarme en llevar a cabo y culminar esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a Dios por la bendición de la vida y la gracia que me ha dado al haberme puesto delante a todas las personas que me han apoyado para realizar y culminar este proyecto además de permitirme estar en donde me encuentro el día de hoy, por la fuerza y la voluntad para seguir adelante con mis proyectos de vida.

Expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores y asesor: Dr. Hector Manuel Hernandez García, Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila, Dr. Felipe de Jesús García Vásquez, ya que sin su ayuda, paciencia y dedicación este trabajo no habría sido posible.

Quiero también agradecer la financiación de esta especialidad como parte de mi capacitación y desarrollo profesional a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A de C.V. (COMIMSA).

A mis padres y familia por su apoyo, por brindarme las herramientas y valores de vida para el cumplimiento de este objetivo.

A todas las personas, especialmente a María ya que me brindaron su apoyo y ayuda a lo largo de este trayecto para lograr culminar este proyecto.

A todos

Gracias

SÍNTESIS

En el presente trabajo monográfico se hace una recopilación de información sobre procesos de unión de materiales disímiles mediante brazing con diferentes técnicas de aporte de calor tales como ultrasonido, láser y equipo para realizar estudio DCS-TG, logrando obtener diferentes parámetros como temperatura y tiempo de residencia. Para unir aceros austeníticos 304 y aleaciones de aluminio de la serie 6061 se consideraron la diferencia en las propiedades fisicoquímicas tanto del acero como del aluminio (densidad, conductividad térmica, etc).

Este tipo de uniones buscan ser aplicadas en construcciones ligeras, unidades de transporte, sistemas de refrigeración además estas uniones tienen un alto potencial económico y técnico.

La unión de este tipo de materiales tiene una dificultad debido a la formación de diferentes tipos y cantidades de compuestos intermetálicos frágiles, provocando bajas propiedades mecánicas.

El empleo de cintas y pastas con materiales fundentes o sales reactivas en su composición química como materiales de aporte, tienen un mayor potencial para lograr la unión de estos materiales, debido a que los materiales o elementos se combinan con el aluminio formando aleaciones con un punto de fusión por debajo de los 600 °C, un ejemplo son las sales $KF-AlF_3$ que contienen potasio fluoroaluminados, o pastas reactivas con alto contenido de zinc. La temperatura de fusión de estos materiales de aporte depende de la energía libre de Gibbs y de la interacción de los intermetálicos formados en las uniones de los materiales base.

Aunado a esto se realizó un caso de estudio empleando como fuente de aporte de calor el equipo para estudio DSC-TG, este caso de estudio se dividió en diferentes etapas tales como la adquisición de materiales, maquinado

acondicionamiento y la unión de los materiales por proceso brazing mediante el equipo antes mencionado, la muestra se pesó para establecer la cantidad de alúmina necesaria para realizar el estudio, se emplearon 650 °C con un tiempo de residencia de 30 minutos logrando una interfaz de soldadura completa entre el acero y el aluminio empleando como material de aporte pasta con alto contenido de zinc y materiales fundentes. Posterior a la unión se realizó una caracterización de la muestra unida obteniendo resultados para lograr validar la unión de dichos materiales, se realizó estudio DSC-TG, microcopia óptica, microscopía electrónica de barrido empleando electrones retrodispersados y EDX

La microscopía electrónica de barrido se realizó en las diferentes zonas de la muestra tales como zona aluminio, zona de unión y zona de acero inoxidable, logrando observar contenido de zinc en las diferentes zonas de la muestra.

Empleando estos resultados como base, se puede continuar con una investigación más amplia y profunda sobre este tema a futuro.

ÍNDICE

DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTOS	6
SÍNTESIS	7
ÍNDICE	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Antecedentes.....	12
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo general	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 Justificación	15
1.4 Planteamiento del problema	15
1.5 Aportación (científica, tecnológica e industrial).....	16
1.6 Alcances y limitaciones.....	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	17
2.1 Acero	17
2.1.1 Tipos de acero	18
2.1.2 Clasificación de aceros	18
2.2 Aceros inoxidables.....	22
2.2.1 Clasificación de los aceros inoxidables	24
2.3 Acero inoxidable AISI 304.....	28
2.4 Aluminio	31
2.4.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio forjado	33
2.4.2 Notación del templado	34
2.4.3 Aleaciones no tratables térmicamente	36

	10
2.4.4 Aleaciones tratables térmicamente	38
2.5 Soldadura	40
2.5.1 Procesos de soldadura	40
2.5.2 Intensidad y fuente de energía para procesos de soldadura por fusión	42
2.5.3 Soldadura por fusión (ciclos térmicos)	44
2.6 Soldadura por proceso brazing	45
2.6.1 Principio de operación	46
2.6.2 Preparación de la superficie	47
2.6.3 Etapas del proceso de brazing	47
2.6.4 Ventajas del proceso de soldadura fuerte (brazing)	48
2.6.5 Limitaciones del proceso de brazing	48
2.6.6 Proceso Brazing vs otros procesos de soldadura	49
2.6.7 Elementos para el proceso brazing	49
2.7 Materiales disímiles	54
2.8 Procesos de unión de materiales disímiles	54
2.8.1 Procesos de unión de aluminio y aceros	57
2.9 Proceso brazing para unión de aluminio y acero	60
2.10 Proceso de unión de pares difusivos mediante equipo para realización de análisis térmico diferencial (DTA)	62
CAPÍTULO III. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA	67
3.1 Procesos de unión de materiales disímiles	67
3.2 Unión de materiales disímiles por proceso brazing	68
3.3 Unión de pares difusivos mediante equipo para realizar análisis térmico diferencial (por sus siglas DTA)	68
CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO	70

	11
4.1 Desarrollo Experimental	70
4.1.1 Adquisición de materiales, equipo y caracterización de los materiales	72
4.2 Resultados y discusión de resultados del caso de estudio	77
4.2.1 Unión de par difusor por proceso brazing	79
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	87
5.1 Conclusiones del estudio bibliográfico	87
5.2 Conclusiones de los resultados experimentales.....	87
BIBLIOGRAFÍA.....	88
LISTA DE FIGURAS	91
LISTA DE TABLAS	95
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO.....	96

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la actualidad el incremento en la contaminación del medio ambiente, obliga a prever una reducción en el consumo de hidrocarburos utilizados en los vehículos de transporte. Esto conlleva a reducir el consumo de hidrocarburos en los vehículos utilizados para el transporte individual o masivo.

En base a lo anterior, una manera de disminuir el consumo de hidrocarburos, es la disminución del peso de sus unidades, equipos o elementos mecánicos de la industria automotriz. Esto es factible mediante la combinación y/o unión de materiales disímiles, sin disminuir las propiedades mecánicas y anti-corrosivas de los componentes del transporte automotriz. Estas uniones se llevan a cabo a través de procesos de soldadura.

Generalmente, la introducción de partes de aluminio en el cuerpo de la carrocería principal de acero es en componentes de refrigeración. La unión de dichos materiales es llevada a cabo por procesos de soldadura convencionales. Sin embargo, en los procesos de soldadura debido a la alta temperatura no

controlada alteran la microestructura. En consecuencia, disminuyen las propiedades mecánicas en la unión; aunado a esto, otro problema que se presenta, es la diferencia que existe en las propiedades físico-químicas y metalúrgicas de los mismos materiales tales como: coeficientes de dilatación, formación de capas oxidantes, precipitación de compuestos intermetálicos ricos en hierro (Fe), los cuales disminuyen las propiedades mecánicas, etc.



Figura 1.- Ejemplos de sistemas para refrigeración del vehículo (1)

Por otro lado, algunos de los procesos comunes de unión por soldadura de materiales disímiles son: 1) Fricción-agitación (conocido como FS, por sus siglas en inglés) y 2) Soldadura con electrodo de tungsteno y empleo de gas inerte como protector (conocido como TIG, por sus siglas en inglés). El primero es limitado a ciertos espesores de unión y a la geometría de la pieza. El segundo proceso, limita su aplicación ya que forma intermetálicos Al_2Fe , $AlFeSi$ entre otros. Además, debido a la diferencia de temperaturas de fusión del acero inoxidable (temperatura de fusión $1400^{\circ}C$ aproximadamente) y del aluminio ($660^{\circ}C$ aproximadamente) genera concentradores de esfuerzos por la formación gradientes térmicos. Así también debido a la diferencia de expansión térmica de cada uno de los materiales.

Con base en lo anterior se propone la revisión bibliográfica de los diferentes procesos de unión del aluminio de la serie T6 y acero inoxidable 304, así mismo de los parámetros de soldadura usados en el proceso brazing.

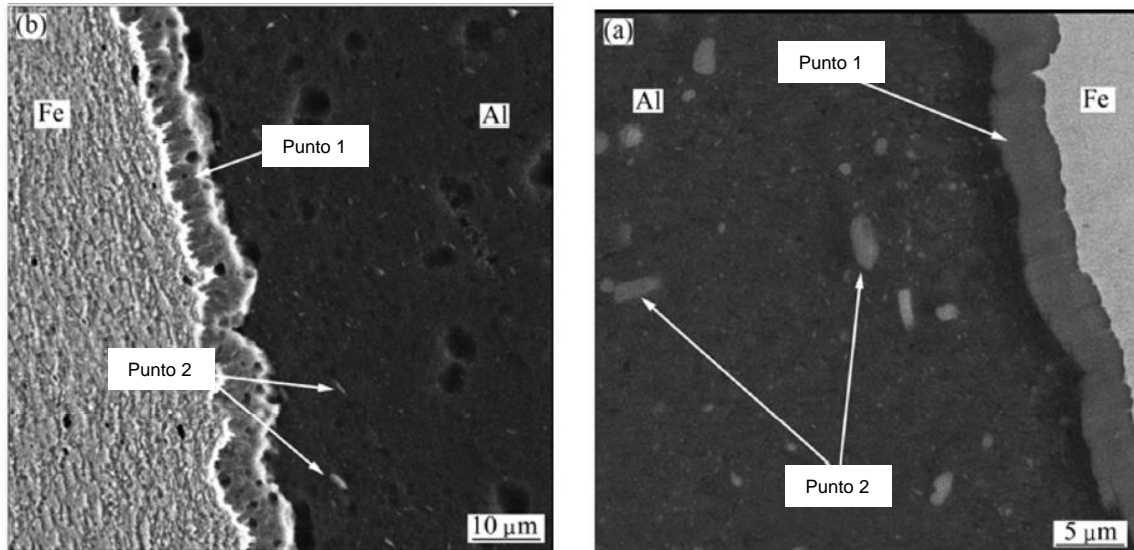


Figura 2.- Formación de intermetálicos Al/Fe (2)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Recopilar y analizar información bibliográfica sobre los parámetros y usos de aportes no metálicos para soldar materiales disímiles de acero inoxidable y aluminio 6061 por el proceso brazing.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Recopilar y analizar la bibliografía de los procesos de unión por soldadura de materiales disímiles de aleaciones ferrosas con aluminios.
2. Establecer los parámetros empleados en el proceso brazing para soldar aceros inoxidables y aluminio de la serie 6061-T6.
3. Realizar un caso de estudio utilizando el análisis térmico diferencial (DTA) mediante un par difusivo del sistema disímil.

4. Evaluar las interfaces por técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido.

1.3 Justificación

En la industria automotriz se sueldan extractores de calor por medio de soldadura brazing empleando materiales disímiles. En estos materiales se aprovechan la acción combinada de las características físicas del aluminio para disipar rápidamente el calor y el de resistencia anticorrosiva del aluminio, así como el del acero inoxidable 304.

En base a lo anterior se propone la revisión bibliográfica del proceso de unión del aluminio de la serie T6 y acero inoxidable 304 con el objetivo de transferir conocimiento al sector industrial, así mismo, establecer los parámetros y variables de acuerdo a la revisión bibliográfica en el uso de soldadura por brazing de estos materiales disímiles.

1.4 Planteamiento del problema

Debido al impacto ambiental que tiene el alto consumo de hidrocarburos, la industria automotriz, aeroespacial, aeronáutica, marítima se ven en la necesidad buscar la disminución del peso de sus unidades, equipos o elementos mecánicos; esto con la finalidad de disminuir el consumo de combustible, pero logrando mantener las propiedades mecánicas deseadas.

La unión de materiales disímiles se hace con el fin de reducir el peso en las unidades, equipos o elementos mecánicos, este proceso de soldadura se logra mediante diferentes técnicas de soldadura, las más usadas son por fricción y TIG. Sin embargo, el primero limita a ciertos espesores de unión y limitado aún más a geometrías simples de las piezas a soldar; el segundo proceso (TIG)

limita su aplicación ya que forma intermetálicos (Al_2Fe_5 y AlFe_5), debido a la diferencia de temperaturas de fusión del acero inoxidable (temperatura de fusión $1400\text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente) y del aluminio ($660\text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente). También por este proceso de soldadura limita su uso, debido a la disminución de propiedades mecánicas debido a la diferencia del coeficiente de expansión térmica.

A causa de esto, es por ello que se pretende usar cintas ricas en Zn con la finalidad de soldar dos materiales disímiles empleando el proceso brazing, además de esto se busca incrementar la humectabilidad de la soldadura, y la formación de intermetálicos con menores efectos sobre las propiedades mecánicas de las piezas soldadas, soldar materiales de diferentes espesores y diferentes geometrías.

1.5 Aportación (científica, tecnológica e industrial)

Se aportará información tecnológica e industrial para poder realizar uniones de materiales disímiles (aceros austeníticos y aluminio de la serie T6), así mismo los parámetros del proceso de unión de soldadura tipo brazing.

1.6 Alcances y limitaciones

Recopilar y analizar la bibliografía para establecer por medio de un caso de estudio si es factible soldar aluminio 6061 y acero inoxidable 304 por proceso brazing.

Adicionalmente se presenta un caso de estudio, con el cual se podrán establecer los parámetros del proceso de soldadura para unir aceros austeníticos con aluminio de la serie T6, tales como temperatura, tiempo, etc.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y ESTADODEL ARTE

2.1 Acero

El acero es una aleación de hierro y carbono (C) máximo 2.11% C, al cual se le adicionan varios elementos de aleación, los cuales le confieren propiedades mecánicas, propiedades fisicoquímicas específicas para su diferente utilización en la industria.

Los principales elementos de aleación son: cromo (Cr), tungsteno (W), manganeso (Mn), níquel (Ni), vanadio (V), cobalto (Co), molibdeno (Mo), cobre (Cu), azufre (S) y fósforo (P). Los productos ferrosos con más de 2.11% de carbono se denominan fundiciones de hierro. (3)

Los aceros al carbono son muy satisfactorios donde la resistencia y otros requisitos no son muy severos. Estos aceros se utilizan también con todo éxito a las temperaturas comunes y en atmosferas que no son altamente corrosivas,

pero su templabilidad relativamente baja limita la resistencia que puede obtenerse, excepto en secciones regularmente delgadas. (4)

2.1.1 Tipos de acero

- Aceros al carbono en función de las fases presentes
- Aceros al carbono en función de su contenido de carbono (5), (3)

2.1.2 Clasificación de aceros

Para clasificar el acero se pueden utilizar varios métodos:

- a) Método de manufactura: Este da lugar al acero Bessemer de horno abierto, de horno eléctrico, de crisol, etc.
- b) Uso: Generalmente se refiere al uso final que se le dará al acero, como acero para máquinas, para resortes, para calderas, estructural o acero para herramientas. (4)
- c) Fases presentes: Se puede clasificar de la siguiente manera.
 - Aceros hipoeutectoides: Son aquellos aceros que contienen menos de 0.77% C, su microestructura a temperatura ambiente está formada por ferrita y perlita.
 - Aceros eutectoides: Son aquellos que poseen exactamente 0.77% C, su microestructura a temperatura ambiente está formada totalmente por perlita.
 - Aceros hipereutectoides: Son aquellos que contienen más de un 0.77% C, su microestructura a temperatura ambiente está formada por cementita y perlita. (3), (5)
- d) Contenido de carbono: Se puede clasificar de la siguiente manera
 - Aceros de bajo carbono
Son aceros con un porcentaje de carbono inferior al 0.25%. No responden al tratamiento térmico para dar martensita y su incremento en la resistencia se consigue por trabajo en frío. Su microestructura está formada por ferrita y perlita por lo que son aleaciones relativamente suaves y débiles pero con una extraordinaria ductilidad y tenacidad. Además son fáciles de maquinar y soldar. Se emplean para fabricar

componentes de automóviles, componentes estructurales y en láminas que van a ser usadas como tuberías y recipientes.

- Aceros de medio carbono

Son aceros cuyo porcentaje de carbono oscila entre 0.25 y 0.6%. Tiene baja capacidad de endurecimiento y solo pueden tratarse térmicamente en secciones delgadas mediante austenización, temple y revenido. Su microestructura suele estar formada por martensita revenida. Son aceros más resistentes pero menos dúctiles y maleables que los de bajo carbono. Se emplean en aquellas aplicaciones que requieren combinar resistencia al desgaste y tenacidad.

- Aceros de alto carbono

Son aceros cuyo porcentaje de carbono oscila entre 0.6 y el 1.4% de C. Casi siempre se utilizan templados y revenidos por lo que son más resistentes y menos dúctiles que el resto de aceros al carbono. Se suelen utilizar para la fabricación de herramientas de corte, matrices, etc. (3), (5)

- e) Composición química: Este método indica, por medio de un sistema numérico, el contenido aproximado de los elementos importantes en el acero. Es el método de clasificación más conocido.

Las especificaciones para los aceros representan los resultados del esfuerzo conjunto de la Sociedad Americana del Hierro y el Acero (conocido como AISI, por sus siglas en inglés) y de la Sociedad de Ingenieros de la industria Automotriz (conocido como SAE, por sus siglas en inglés) en un programa de simplificación destinado a lograr mayor eficiencia para satisfacer las necesidades de acero de la industria de los Estados Unidos.

El primero de los cuatro o cinco dígitos de la designación numérica indica el tipo a que pertenece el acero. De este modo, 1 indica acero al carbono, 2 acero al níquel, 3 acero al níquel cromo, etc. En el caso de acero de aleación simple, el segundo dígito indica el porcentaje aproximado del elemento predominante

de la aleación. Los dos o tres últimos dígitos generalmente indican el contenido de carbono medio dividido entre 100.

Además de los números, las especificaciones AISI pueden incluir un prefijo literal para indicar el proceso de manufactura empleado en la producción del acero. Las especificaciones SAE ahora emplean las mismas designaciones numéricas de cuatro dígitos que las AISI, pero eliminando todos los prefijos literales.

Los números básicos para la serie de cuatro dígitos de los diversos grados de aceros al carbono y de aleación con porcentajes aproximados de elementos de identificación. (4)

Forma General de la designación

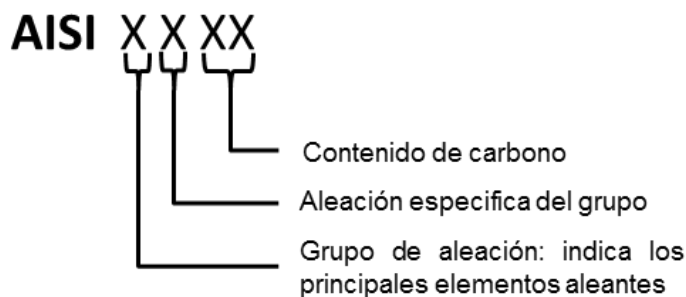


Figura 3. Sistema de designación de los aceros (6)

El AISI usa un sistema de designación con cuatro dígitos para el acero al carbono y aleado, como se ve en la Figura 3. Sistema de designación de los aceros. Los dos primeros dígitos señalan el grupo específico de aleaciones que identifica a los principales elementos aleantes, aparte del carbono en el acero (ver Tabla 1). Los últimos dos dígitos indican la cantidad de carbono en el acero. (6)

Tabla 1.- Grupos de aleaciones en el sistema de numeración AISI (6)

10xx	Acero puro al carbón: sin elementos importantes de aleación, excepto de carbono y manganeso: menos de 1.0% de manganeso. También se les llama no resulturizados.
11xx	Aceros de corte libre: Resulturizado. Su contenido de azufre (por lo regular 0.10%) mejora la maquinabilidad.
12xx	Acero de corte libre. Resulturizado y refosforizado. La presencia de mayor cantidad de azufre y fósforo mejora la maquinabilidad y el acabado superficial.
12Lxx	Acero de corte libre: El plomo agregado al acero 12xx mejora la maquinabilidad
13xx	Acero con manganeso: No resulturizado. Presencia aproximadamente 1.75% de manganeso aumenta la templabilidad
15xx	Acero con carbón: No resulturizado, con más de 1% de manganeso
23xx	Acero con níquel: Nominalmente 3.5% de níquel
25xx	Acero con níquel: Nominalmente 5.0% de níquel
31xx	Acero con níquel-cromo: Nominalmente 1.25% Ni, 0.65% Cr
33xx	Acero con níquel-cromo: Nominalmente 3.5% Ni, 1.5% Cr
40xx	Acero con molibdeno: 0.25% de Mo
41xx	Acero con cromo-molibdeno: 0.95% Cr, 0.2% Mo
43xx	Acero con níquel-cromo-molibdeno: 1.8% Ni, 0.5% a 0.8% Cr, 0.25% Mo
44xx	Acero con molibdeno: 0.5 % Mo
46xx	Acero con níquel-molibdeno: 1.8% Ni, 0.25% Mo
48xx	Acero con níquel-molibdeno: 3.5% Ni, 0.25% Mo
5xxx	Acero con cromo: 0.4% Cr
51xx	Acero con cromo: Nominalmente 0.8% de Cr
51100	Acero con cromo: Nominalmente 1.0% Cr, acero par rodamientos 1.0% C
52100	Acero con cromo: Nominalmente 0.46% Cr, acero para rodamientos 1.0% C
61xx	Acero con cromo-vanadio: 0.5%-1.10% Cr, 0.15% V
86xx	Acero con níquel-cromo-molibdeno: 0.55% Ni, 0.5% Cr, 0.20% Mo
87xx	Acero con níquel-cromo-molibdeno: 0.55% Ni, 0.5% Cr, 0.25% Mo
92xx	Acero con silicio: 2.0% de silicio
93xx	Acero con níquel-cromo-molibdeno: 3.25% Ni, 1.2% Cr, 0.12% Mo

2.2 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables resisten la corrosión (herrumbre) en muchos ambientes, específicamente en la atmósfera: El cromo es el principal elemento de aleación, en una concentración mínima del 11%. La resistencia a la corrosión mejora con adiciones de níquel y molibdeno. Las adiciones de los elementos de aleación en concentraciones significativas producen dramáticas alteraciones en el diagrama de fases hierro-carburo de hierro. (7)

Tabla 2.- Designaciones, composiciones, propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de los aceros inoxidables ferríticos, austeníticos, martensíticos y endurecidos por precipitación (7)

Número AISI	Número UNS	Composición (% peso) ^a				Condiciones	Propiedades Mecánicas			Aplicaciones
		C	Cr	Ni	Otros		Resistencia a la tracción [psi x 10 ³ (MPa)]	Limite elástico [psi x 10 ³ (MPa)]	Ductilidad (% EL en 2 pulg.)	
Ferrítico										
409	S40900	0.08	11		1.0 Mn	Recocido	65 (448)	35 (240)	25	Tubos de escape Válvulas (alta temperatura), moldes para vidrio
446	S44600	0.20	25		2.0, 0.75 Ti 3.0, 1.5 Mn	Recocido	80 (552)	50 (345)	20	
Austenítico										
304	S30400	0.08	19	9	2.0 Mn	Recocido	85 (586)	35 (240)	55	Industria alimentaria Estructuras soldadas
316 L	S31603	0.03	17	12	2.0 Mn 2.5 Mo	Recocido	80 (552)	35 (240)	50	
Martensítico										
410	S41000	0.15	12.5		1.0 Mn	Recocido	70 (483)	40 (275)	30	Cañones de rifles Cuchillería, instrumental quirúrgico
					1.0 Mn	Q y T	140 (965)	100 (690)	23	
440 ^a	S44002	0.70	17		0.75 Mo	Recocido Q y T	105 (724) 260 (1790)	60 (414) 240 (1655)	20 5	
Endurecidos por Precipitación										
17-7PH	S17700	0.09	17	7	1.0 Mn 2.0 1.0 Al	Solución tratada Precipitación	130 (897) 215 (1480)	40 (275) 195 (1345)	35 9	Cuchillos, muelles

Estos se clasifican en función de la microestructura constituyente: martensítica, ferrítica, o austenítica. En la tabla anterior figuran las composiciones químicas, las propiedades mecánicas y las aplicaciones de cuatro clases de aceros inoxidable. La amplia gama de propiedades mecánicas combinadas con la excelente resistencia a la corrosión hacen que este tipo de acero sea muy versátil. (3)

El tratamiento térmico de los aceros martensíticos genera martensita como principal constituyente. En los aceros inoxidables austeníticos, la austenita (fase gama) permanece estable a temperatura ambiente. Los aceros inoxidables ferríticos están constituidos por la fase ferrita (fase alfa) BCC. Los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos endurecen por acritud, ya que no son susceptibles al temple. Los aceros inoxidables son los más resistentes a la corrosión, debido al elevado contenido en cromo y a las adiciones de níquel y por este motivo, también son los más utilizados. Los aceros inoxidables martensíticos y ferríticos tienen comportamiento magnético y los inoxidables austeníticos no. (7)

Algunos aceros inoxidables se utilizan en ambientes a elevadas temperaturas debido a su resistencia a la oxidación y a la integridad mecánica en estas condiciones: en atmósferas oxidantes hasta 1000°C. Las turbinas de gas, generadores de vapor, hornos de tratamiento térmico, aviones, misiles y generadores de energía nuclear están contruidos con este tipo de aceros. (7)

El cromo es también un elemento estabilizador de la ferrita, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ilustra el efecto del cromo en el diagrama de fases hierro carbono; El cromo hace que se contraiga la región de austenita, en tanto que la región de ferrita aumenta de tamaño. En composiciones de bajo carbono y alto cromo, la ferrita está presente como una sola fase por encima de la temperatura de solidus. (3)

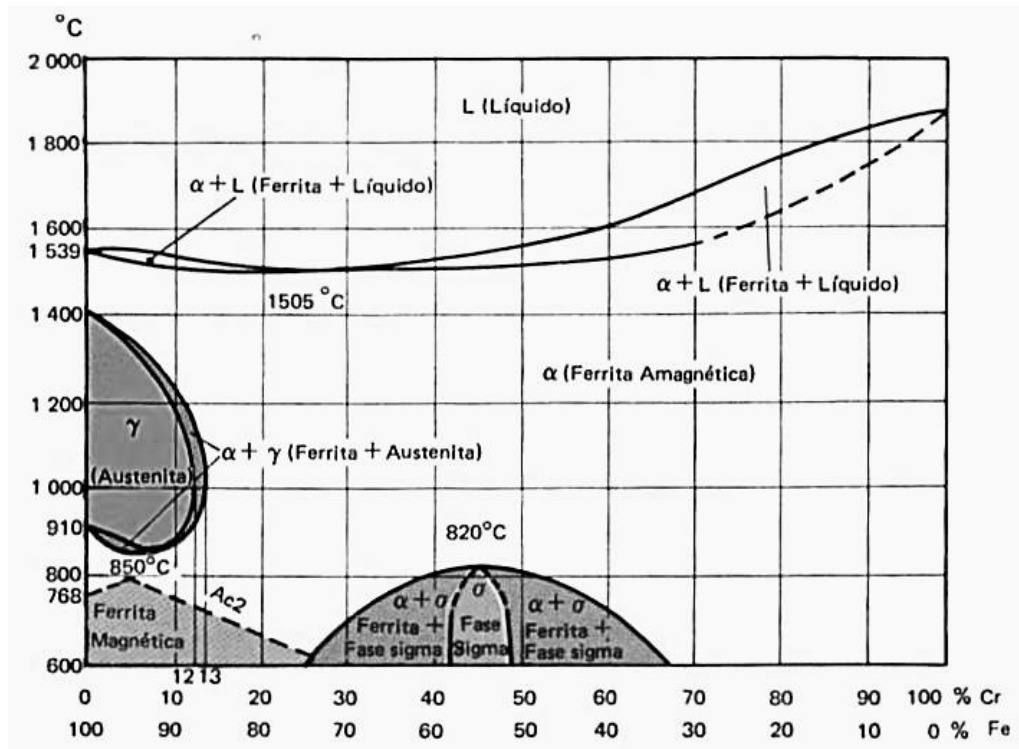


Figura 4.- Diagrama Fe – Cr (8)

2.2.1 Clasificación de los aceros inoxidable

Existen varias clases de aceros inoxidable basados en estructura cristalina y mecanismo de endurecimiento. Las propiedades típicas se encuentran en la Tabla 3: (3)

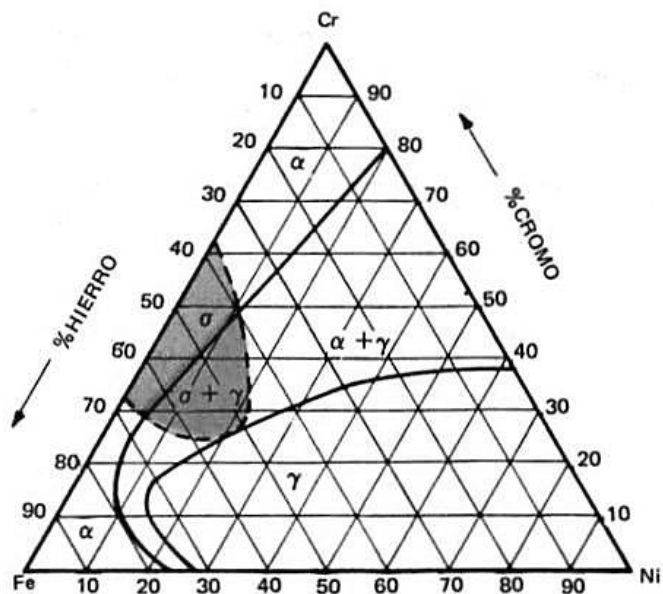


Figura 5.- Diagrama Fe-Cr-Ni a temperatura ambiente (8)

Tabla 3. Composiciones y propiedades típicas de los aceros inoxidable (3)

Acero	% C	% Cr	%Ni	Otros	Resistencia mecánica la tensión (psi)	Esfuerzo de Cedencia (psi)	% elongación	Estado
Austenítico:								
201	0.15	17	5	6.5% Mn	95,000	45,000	40	Recocido
304	0.08	19	10		75,000	30,000	30	Recocido
304L	0.03	19	10	2.5% Mo	185,000	140,000	9	Deformado en frío
316	0.08	17	12	0.4% Ti	75,000	30,000	30	Recocido
321	0.08	18	10	0.8% Nb	85,000	35,000	55	Recocido
347	0.08	18	11		90,000	35,000	50	Recocido
Ferrítico:								
430	0.12	17			65,000	30,000	22	Recocido
442	0.12	20			75,000	40,000	20	Recocido
Martensítico:								
416	0.15	13		0.6 % Mo	180,000	140,000	18	Templado y revenido
431	0.20	16	2					
	1.10	17		0.7% Mo	200,000	150,000	16	Templado y Revenido
440 C					285,000	275,000	2	Templado y Revenido
Endurecidos por precipitación:								
17-4	0.07	17	4	0.4% Nb	190,000	170,000	10	Endurecido por envejecimiento
17-7	0.09	17	7	1.0 % Al	240,000	230,000	6	

a) Aceros inoxidable ferríticos

Los aceros inoxidable ferríticos contienen hasta 30% de Cr y menos de 0.12% C. Debido a su estructura CC, los aceros inoxidable ferríticos tienen buena resistencia mecánica y una ductilidad moderada, derivadas del endurecimiento por solución sólida y endurecimiento por deformación. Además tienen excelente resistencia a la corrosión, una conformabilidad moderada y son relativamente económicos. (3)

b) Aceros inoxidable martensíticos

El contenido de cromo es por lo general menor del 17% Cr, de lo contrario el campo de austenita se hace tan pequeño que se requiere un control muy estricto de la temperatura de austenizado del contenido de carbono. Bajas cantidades de cromo también permiten que varíe el contenido de carbono aproximadamente 0.1%, lo que genera martensita con diferentes durezas. La combinación de dureza resistencia mecánica y resistencia a la corrosión hacen las aleaciones atractivas para su uso en cuchillería de alta calidad, cojinetes y válvulas. (3)

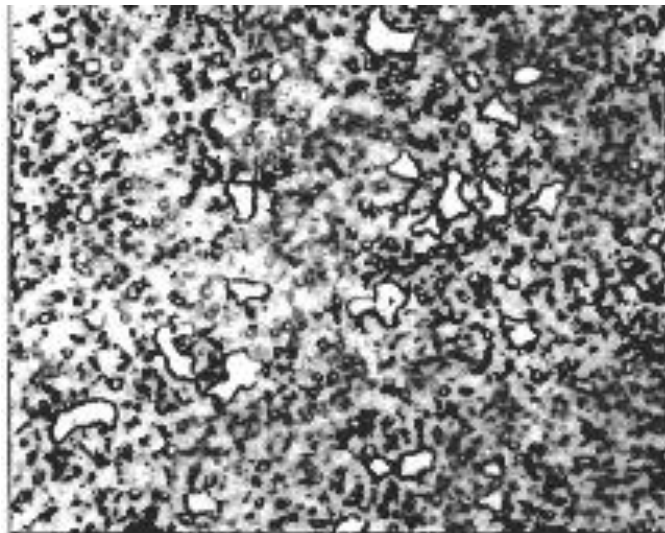


Figura 6.- Acero inoxidable martensítico conteniendo grandes carburos primarios y carburos pequeños formados durante el revenido (x350) (3)

c) Aceros inoxidable austeníticos

El níquel, un elemento estabilizador de la austenita, incrementa el tamaño del campo de austenita y al mismo tiempo prácticamente elimina la ferrita de las aleaciones hierro-cromo-carbono. Si el contenido de carbono queda por debajo de 0.03%, no se forman carburos y el acero estará conformado prácticamente todo de austenita a temperatura ambiente.

Los aceros inoxidable austeníticos CCC tienen excelente ductilidad, conformabilidad y resistencia mecánica a la corrosión. La resistencia mecánica se obtiene mediante un endurecimiento por solución sólida y los aceros inoxidable austeníticos pueden deformarse en frío para obtener más resistencia que los ferríticos. Los aceros tienen excelentes propiedades al impacto a baja temperatura, puesto que no tienen temperatura de transición. Además, los aceros inoxidable austeníticos no son ferromagnéticos. Desafortunadamente, el alto contenido de níquel y de cromo hace que estas aleaciones sean costosas. (3)



Figura 7.- Acero inoxidable austenítico (x500) (3)

d) Aceros inoxidables endurecidos por precipitación (PH por sus siglas en inglés)

Los aceros inoxidables endurecidos por precipitación (PH) contienen aluminio (Al), niobio (Nb), o talio (Ta) y debido a endurecimientos por solución sólida, por deformación, envejecimiento o por transformación martensítica, obtienen sus propiedades mecánicas. El acero es calentado primero y después templado para inducir que la austenita se transforme en martensita. El recalentamiento permite tener precipitados como el Ni_3Al a partir de la martensita. Se obtienen altas propiedades mecánicas, incluso con bajos contenidos de carbono. (3)

e) Aceros inoxidables dúplex

En algunos casos en la estructura de los aceros inoxidables se introducen de manera deliberada mezclas de fases. Mediante un control apropiado de la composición y del tratamiento térmico, se puede producir un acero inoxidable dúplex, que contenga aproximadamente 50% de ferrita y de austenita. Esta combinación proporciona un conjunto de propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, conformabilidad y soldabilidad, que no se obtiene en ningún otro de los aceros inoxidables normales. (3)

2.3 Acero inoxidable AISI 304

El acero inoxidable 304 forma parte de los aceros inoxidables austeníticos, se caracteriza por un contenido de carbono relativamente bajo y alto contenido de cromo, níquel; soporta condiciones severas de corrosión. Este tipo de acero no es magnético (cuando se trabaja en frío se vuelve ligeramente magnético), cuando este tipo de acero está totalmente recocido presenta una alta resistencia a la corrosión ordinaria y a procesos que puedan generar corrosión, como es la presencia de ciertos tipos de ácidos. (9)

Tabla 4.- Composición química del acero AISI 304 (9)

Elemento	Composición Max % e.p
Carbono	0.08
Manganeso	2
Fósforo	0.045
Azufre	0.090
Silicio	1
Cromo	18-20
Níquel	8.0-10.5

Tabla 5.- Propiedades físicas del acero AISI 304 (9)

Temperatura de fusión	1400-1455 °C
Densidad	8.0 g/cm ³
Calor específico a 0-100 °C	502 J/Kg K
Resistividad eléctrica a 20 °C	72 nΩ*m
Resistividad eléctrica a 650 °C	116 nΩ*m

Este tipo de acero es muy versátil, ya que cuenta con excelentes propiedades para el conformado y el proceso de soldadura. Se puede usar en aplicaciones de embutición profunda, de rolado y de corte. Tiene buenas características para la soldadura. La resistencia a la corrosión es excelente, excediendo al tipo 302 en una amplia variedad de ambientes corrosivos, incluyendo productos del petróleo calientes o con vapores de gases de combustión. La norma que involucra a este tipo de aceros es la **ASTM A 276**. (10)

Tabla 6.- Conductividad térmica del acero AISI 304 (9)

Temperatura		Conductividad térmica	
°C	°F	W/mK	Btu/ft ² °F
100	212	16.3	9.4
500	930	21.5	12.4

Tabla 7.- AISI 304: Propiedades mecánicas del acero AISI 304 (9)

Condición	Tamaño		Resistencia a la tracción		Resistencia la fluencia (a)		Elongación (b) %	Reducción de área %	Dureza
	mm	in	Mpa	ksi	Mpa	ksi			
Hojas y tiras									
Recocido	...	...	580	84	290	42	65	...	80 HRB
Alambre (c)									
Recocido	1.6	0.062	725	105	240	35	55	...	...
Recocido	13	0.50	620	90	240	35	60	55	83 HRB
Templado suave	1.6	0.062	860	125	620	90	40	...	...
Templado suave	13	0.50	690	100	415	60	45	65	95 HRB
Templado duro	1.6	0.062	1105	160	860	125	20	...	...
Templado duro	13	0.50	965	140	725	105	25	55	33 HRC
Templado medio	1.6	0.062	1795	260	...	...	...	...	...
Templado medio	6.4	0.25	1240	180	...	...	...	...	...
Templado medio	7.80	0.307	1170	170	...	...	...	...	...
Placa									
Recocido	...	...	565	82	240	35	60	70	149 HB
Barra									
Recocido	...	...	585	85	235	34	60	70	149 HB
Recocido y estirado en frío	25	1.0	690	100	415	60	45	...	212 HB
Estirado en frío, (AR)	22.2	0.875	860	125	655	95	25	...	277 HB
Estirado en frío, (AR)	38	1.5	760	110	515	75	60	...	240 HB

(a) 0.2% de desplazamiento. (b) En 50 mm (2 in), a excepción del alambre. Para un cable de 3.18 mm (0.125 in) de diámetro y más grandes, la longitud de referencia es de 4 x diámetro de la probeta; para diámetros más pequeños, la longitud de la pieza es de 254 mm (10.0 in). (c) El límite elástico es ligeramente más alto cuando está en forma alisado, disminuyendo un 10% en el templado medio.

* AR; alta resistencia

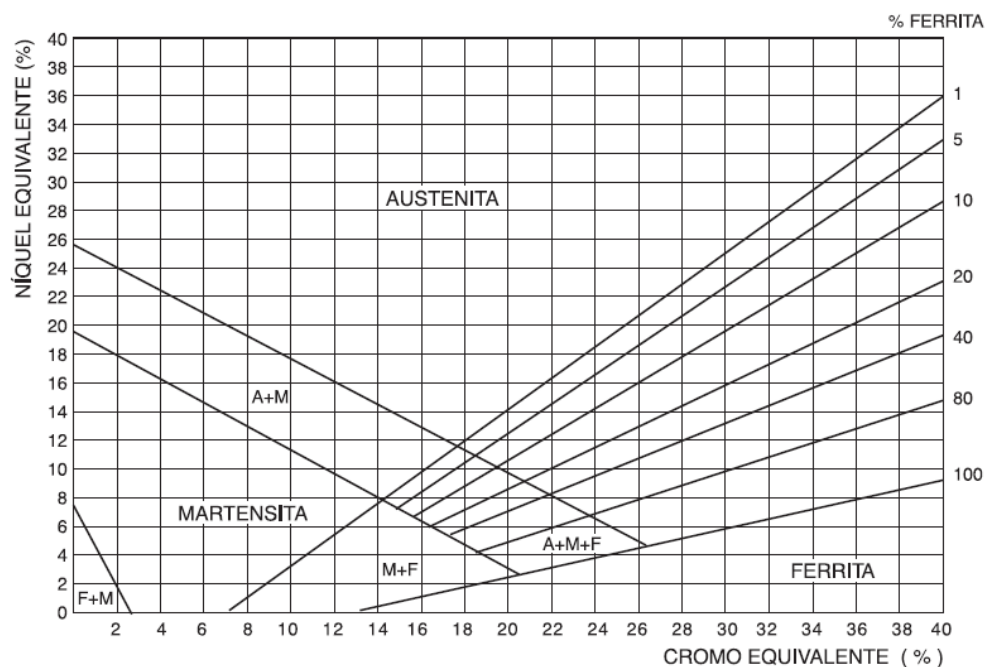


Figura 8.- Diagrama de Schaeffler (8)

El diagrama Schaeffler procede del diagrama de Maurer, el cual presenta las estructuras que se presentaran en un acero de acuerdo al porcentaje presente de Ni-Cr, Antón Scheaffler lo mejoró incorporando la influencia de distintos elementos de aleación en la formación de ferrita y austenita. Con ello se definió el concepto de cromo equivalente y níquel equivalente. El cromo equivalente incorpora los elementos alfa genos (formadores de ferrita) y el níquel equivalente los elementos gamma genos (formadores de austenita), cada elemento es multiplicado por un factor el cual depende del grado de influencia en la formación de ferrita o austenita respectivamente.

Tabla 8.- Elementos presentes en el cromo equivalente y el níquel equivalente (8)

Elemento equivalente	Elementos presentes
Cromo equivalente	$\%Cr + \%Mo + (1,5 \times \%Si) + (0,5 \times \%Nb)$
Níquel equivalente	$\%Ni + (30 \times \%C) + (0,5 \times \%Mn)$

Empleando este diagrama, se logra observar las diferentes fases de los aceros inoxidable cuando son enfriados a velocidades normales de soldadura, además presenta las zonas de fragilización en frío debido a la presencia de martensita, la zona de fragilidad en caliente originada por la presencia de austenita, la zona de fragilidad por presencia de fase sigma y la zona de crecimiento de grano ferrítico. (8)

2.4 Aluminio

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la superficie terrestre, siempre se presenta combinado con otros elementos tales como el hierro, oxígeno y silicio. (11)

Tabla 9.- Composición química de aleaciones de aluminio usadas por la industria marítima (12)

Composición (porcentaje en peso) ^{a,b}										
Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
									Totales	
	0.25									
	0.40									
	0.40									
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2-2.8	0.15-0.35	0.10	---	0.15	Resto
5083	0.25	0.40	0.10	0.40-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	0.25	0.15	0.15	Resto
5086	0.40-	0.50	0.10	0.20-0.7	3.5-4.5	0.05-0.25	0.25	0.15	0.15	Resto
5454	0.8	0.40	0.10	0.50-1.0	2.4-3.0	0.05-0.020	0.25	0.20	0.15	Resto
5456	0.20-	0.40	0.10	0.50-1.0	4.7-5.5	0.05-0.020	0.25	0.20	0.15	Resto
6061	0.6	0.70	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.15	0.15	Resto
6063	0.6-	0.35	0.10	0.10	0.45-0.9	0.10	0.10	0.10	0.15	Resto
6151	1.2	1.0	0.35	0.20	0.45-0.8	0.15-0.35	0.25	0.15	0.15	Resto
6351	0.7-	0.50	0.10	0.40-0.8	0.40-0.8	---	0.20	0.20	0.15	Resto
356.0	1.3	0.60	0.25	0.35	0.20-0.40	---	0.35	0.25	0.15	Resto
A356.0	6.5-	0.20	0.20	0.10	0.20-0.40	---	0.10	0.20	0.15	Resto
514.0	7.5	0.50	0.15	0.35	3.5-4.5	---	0.15	0.25	0.15	Resto
520.0	6.5-	0.30	0.25	0.15	9.5-10.6	---	0.15	0.25	0.15	Resto
535.0	7.5	0.15	0.05	0.10-0.25	6.2-7.5	---	---	0.10-0.25	0.15	Resto
	0.35									
	0.25									
	0.15									

a Los valores individuales son límites máximos

b Registrado en la Asociación del Aluminio (Aluminum Association)

El aluminio y sus aleaciones se caracterizan por la relativamente baja densidad (2.7 g/cm^3 comparada con 7.9 g/cm^3 del acero), elevadas conductividades eléctrica y térmica y resistencia a la corrosión en algunos medios, incluyendo el atmosférico. (7)

El aluminio tiene una estructura cúbica centrada en las caras (CCC) y es dúctil incluso a temperatura ambiente. La principal limitación del aluminio es su temperatura de fusión ($660 \text{ }^\circ\text{C}$) que restringe el campo de aplicación. La resistencia mecánica del aluminio se logra por acritud y por aleación; sin embargo, estos procesos disminuyen la resistencia a la corrosión. (7)

Tabla 10.- Composiciones, propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de ocho aleaciones de aluminio comunes (7)

Número de la Asociación de Aluminio	Número UNS	Composición (% peso)				Condición	Resistencia a la tracción [psi x10 ³ (MPa)]	Límite elástico [psi x 10 ³ (MPa)]	Ductilidad (% EL en 2 pulg)	Aplicaciones Típicas
		Cu	Mg	Mn	Otros					
Aleaciones hechurables no tratables térmicamente										
1100	A91100	0.12				Recocido	13 (90)	5 (34)	35	Utensilios
3003	A93003	0.12		1.2		Recocido	16 (110)	6 (42)	30	cocina
5052	A95052		0.25		0.25 Cr	Recocido	28(195)	13 (90)	25	Partes automotriz
Aleaciones hechurables tratables térmicamente										
2014	A92014	4.4	0.5	0.8	0.8 Si	T. Térmico	70 (485)	60 (415)	13	Estructuras
6061	A96061	0.3	1.0		0.6 Si, 0.2 Cr	T. Térmico	45 (310)	40 (275)	12	Automotriz,
7075	A97075	1.6	2.5		5.6 Zn, 0.23 Cr	T. Térmico	83 (580)	73 (505)	11	torres Aeronáutica
Aleaciones moldeables tratables térmicamente										
295.0	A02960	4.5			1.1 Si	T. Térmico	36 (250)	24 (165)	5	Cárter de motores,
356.0	A03560		0.3		7.0Si	T. Térmico	33 (230)	24 (165)	4	ruedas de avión Bloques de cilindros

2.4.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio forjado

Las aleaciones de aluminio producidas mediante el proceso de forjado (lámina, placa, extrusiones, varilla y alambre) se clasifican de acuerdo a la composición química que presenta (principales elementos aleados). Para lograr identificar las aleaciones forjadas de aluminio se utiliza una clave numérica de 4 dígitos. El primero de ellos indica el grupo de la aleación que contiene elementos aleados específicos. El segundo dígito indica la modificación de la aleación original o los límites de su impureza. Los dos últimos dígitos identifican a la aleación de aluminio o indican su pureza. Esto se puede observar en la siguiente tabla: (11)

Tabla 11.- Grupos de aleaciones de aluminio (11)

Aluminio no aleado (composición pura)	1xxx
Aleaciones de aluminio agrupadas según los principales elementos en una aleación:	
Cobre	2xxx
Manganeso	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Magnesio y silicio	6xxx
Zinc	7xxx
Otros elementos	8xxx
Series no utilizadas	9xxx

2.4.2 Notación del templado

La notación del templado para las aleaciones de aluminio emplean el sistema usado para designar a las aleaciones y están separadas por un guión (por ejemplo 1100-0). Las subdivisiones de un templado básico se indican mediante uno o varios dígitos a los que le sigue la letra de la designación básica (por ejemplo 1100-H14). (11)

2.4.2.1 Notaciones básicas del templado

En estado tosco de fabricación. No hay control sobre la cantidad de

F→ endurecimiento de deformación; no hay límites en cuanto a las propiedades mecánicas.

O→ Recocido y recristalizado. Templado con la más baja solidez y la más alta ductilidad.

H→ Endurecido por tensión (en la siguiente sección se muestran las subdivisiones).

T→ Tratado térmicamente para producir temples estables distintos de F u O (véase las subdivisiones presentadas en la siguiente subsección). (11)

2.4.2.2 Subdivisiones del tratamiento térmico

T1→ Envejecido de manera natural. El producto se enfría después de un proceso de moldeo a temperatura alta y se deja envejecer naturalmente hasta que su condición es sustancialmente estable.

T3→ Solución sometida a tratamiento térmico, trabajada en frío y envejecida naturalmente hasta que alcanza una condición sustancialmente estable.

T4→ Solución tratada térmicamente y envejecida de manera natural hasta que su condición es sustancialmente estable.

T5→ Enfriado a partir de un proceso de moldeo a temperatura alta y luego envejecido artificialmente.

T6→ Solución sometida a tratamiento térmico y luego envejecida artificialmente.

T7→ Solución sometida a tratamiento térmico y estabilizado.

T8→ Solución sometida a tratamiento térmico, trabajada en frío y luego envejecida artificialmente. (11)

2.4.2.3 Subdivisiones endurecidas por tensión

H1→ Endurecido únicamente por deformación. El grado de endurecimiento por tensión se indica con el segundo dígito y varía entre un cuarto de dureza (H12) hasta la dureza total (H18), lo cual se produce con una reducción del área de 75 por ciento aproximadamente.

Endurecido por deformación y parcialmente recocido. Los templados fluctúan entre un cuarto de endurecimiento y el endurecimiento total, y H2→ se obtienen mediante el recocido parcial de materiales trabajados en frío con una resistencia inicial mayor de la deseada. Los templados son H22, H24, H26 y H28.

Endurecido por tensión y estabilizado. Templados para aleaciones de aluminio-magnesio reblandecidas por envejecimiento que se H3→ endurecen por tensión y luego se calientan a baja temperatura para darles mayor ductilidad y estabilizar sus propiedades mecánicas. Los templados son H32, H34, H36 y H38. (11)

Las aleaciones de aluminio pueden dividirse en dos grupos: aleaciones no tratables térmicamente y aleaciones tratables térmicamente.

2.4.3 Aleaciones no tratables térmicamente

Los tres principales grupos de aleaciones de aluminio no tratables térmicamente son los grupos 1xxx, 3xxx, y 5xxx. [10]

- Aleaciones 1xxx. Estas aleaciones tienen como mínimo 99 por ciento de aluminio y sus principales impurezas (elementos de aleación) son el hierro y el silicio. Se les agrega 0.12% de cobre para darles mayor resistencia. La aleación 1100 tiene una resistencia a la tensión de 13 ksi (90 MPa) aproximadamente en su estado recocido y se usa principalmente a base de trabajo con lámina de metal.
- Aleaciones 3xxx. El manganeso es el principal elemento de aleación de este grupo y refuerza al aluminio mediante el aumento en resistencia sólida. La aleación más importante de este grupo es la 3003 que es en esencia una aleación 1100 con la adición de 1.25% de manganeso aproximadamente. La aleación 3003 tiene una resistencia a la tensión de casi 16 ksi (110 MPa) cuando está recocida y se utiliza como una

aleación de aplicación general cuando se requiere un material altamente trabajable.

- Aleaciones 5xxx. El magnesio es el principal elemento de este grupo y se añade para el endurecimiento por solución sólida en cantidades de hasta 5%. Una de las aleaciones de este grupo de los más importante para la industria es el 5052, que contiene casi 2.5 % de magnesio (Mg) y 0.2% de cromo (Cr). En el estado recocido, la aleación 5052 tiene una resistencia a la tensión de 28 ksi (193 MPa) aproximadamente. Esta aleación se usa también para trabajos en lámina de metal, sobre todo para aplicaciones marítimas y automotrices. (11)

Tabla 12.- Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio. (12)

Propiedades mecánicas (mínimas) para aleaciones de aluminio en hoja y placa								
Aleación	Temple	Espesor		Resistencia Mínima				Elongación mínima
				Tensión		Cedencia		
		in	mm	ksi	Mpa	ksi	Mpa	% in 2 in. (51 mm)
5052	H112	1/2 a 3	(13-76)	25	170	9.5	65	12
	H32	1/8 a 2	(3.2-51)	31	210	23	160	9
	H34	1/8 a 1	(3.2-25)	34	230	26	180	7
5083	H112	1/4 a 1-1/2	(6.4-38)	40	280	18	120	12
	H116	1/8 a 1-1/2	(3.2-38)	44	300	31	210	10
	H323	1/8 a 1/4	(3.2-6.4)	45	310	34	230	10
5086	H343	1/8 a 1/4	(3.2-6.4)	50	340	39	270	8
	H112	1/2 a 1	(13-25)	35	240	16	110	10
	H116	1/8 a 2	(3.2-51)	40	280	28	190	8
5454	H34	1/8 a 1	(3.2-25)	44	300	34	230	6
	H112	1/2 a 3	(13-76)	31	210	12	83	11
	H32	1/8 a 2	(3.2-51)	36	250	26	180	8
5456	H34	1/8 a 1	(3.2-25)	39	270	29	200	6
	H112	1/4 a 1-1/2	(6.4-38)	42	290	19	130	12
	H116	1/8 a 1-1/4	(3.2-32)	46	320	33	230	10
	H323	1/8 a 1/4	(3.2-6.4)	48	330	36	250	8
6061	H343	1/8 a 1/4	(3.2-6.4)	53	370	41	280	8
	T451	1/4 a 3	(6.4-76)	30	210	16	110	18
	T651	1/8 a 4	(3.2-100)	40	290	35	240	9

2.4.4 Aleaciones tratables térmicamente

Algunas aleaciones de aluminio pueden incrementar su resistencia por precipitación mediante un tratamiento térmico. Las aleaciones de aluminio forjado térmicamente tratado de los grupos 2xxx, 6xxx y 7xxx aumentan su resistencia por precipitación. (11)

- Aleaciones 2xxx. El principal elemento de aleación de este grupo es el cobre, pero también se adiciona magnesio a la mayoría de esas aleaciones. Además se les añaden otros elementos en pequeñas cantidades. Una de las aleaciones más importantes de este grupo es la 2024, que contiene 4.5% de cobre (Cu), 1.5% de magnesio (Mg) y 0.6% de manganeso (Mn). Esta aleación se endurece en primer término mediante procedimientos por solución sólida y por precipitación. El principal precipitado de endurecimiento es un compuesto intermetálico que tiene aproximadamente la misma composición que el Al_2CuMg . La aleación 2024 en el estado T6 tiene una resistencia a la tensión de unos 64 ksi (442 MPa) y se usa en materiales para la industria aeronáutica.
- Aleaciones 6xxx. Los principales elementos de aleación para el grupo 6xxx son el *magnesio (Mg)* y el *silicio (Si)*, que se combinan para formar un compuesto intermetálico, Mg_2Si , que en forma de precipitado endurece a este grupo de aleaciones. La aleación 6061 es una de las más importantes de este grupo y tiene una composición aproximada de 1.0% de Mg, 0.6% de Si, 0.3% de Cu y 0.2% de Cr. Esta aleación, en el estado de tratamiento térmico T6, tiene una resistencia a la tracción de 42 ksi (290 MPa) aproximadamente y se usa para elementos estructurales de propósito general.
- Aleaciones 7xxx. Los principales elementos de aleación para el grupo de aleaciones de aluminio 7xxx son el zinc, el magnesio y el cobre. El zinc y el magnesio se combinan para formar un compuesto intermetálico, MgZn_2 , que es el precipitado básico para aumentar la dureza de estas aleaciones cuando se tratan térmicamente. La solubilidad relativamente alta del zinc y del magnesio en el aluminio hacen posible crear una alta

densidad de precipitados y, por lo tanto, producir muy grandes incrementos de dureza. La aleación 7075 es una de las más importantes de este grupo y tiene una composición aproximada de 5.6% de Zn, 2.5% de Mg, 1.6% de Cu y 0.25% de Cr. La aleación 7075, cuando es tratada térmicamente hasta el templado T6, tiene una resistencia a la tracción de 73 ksi (504 MPa) aproximadamente y se usa principalmente en elementos estructurales de aeronáutica. (11)

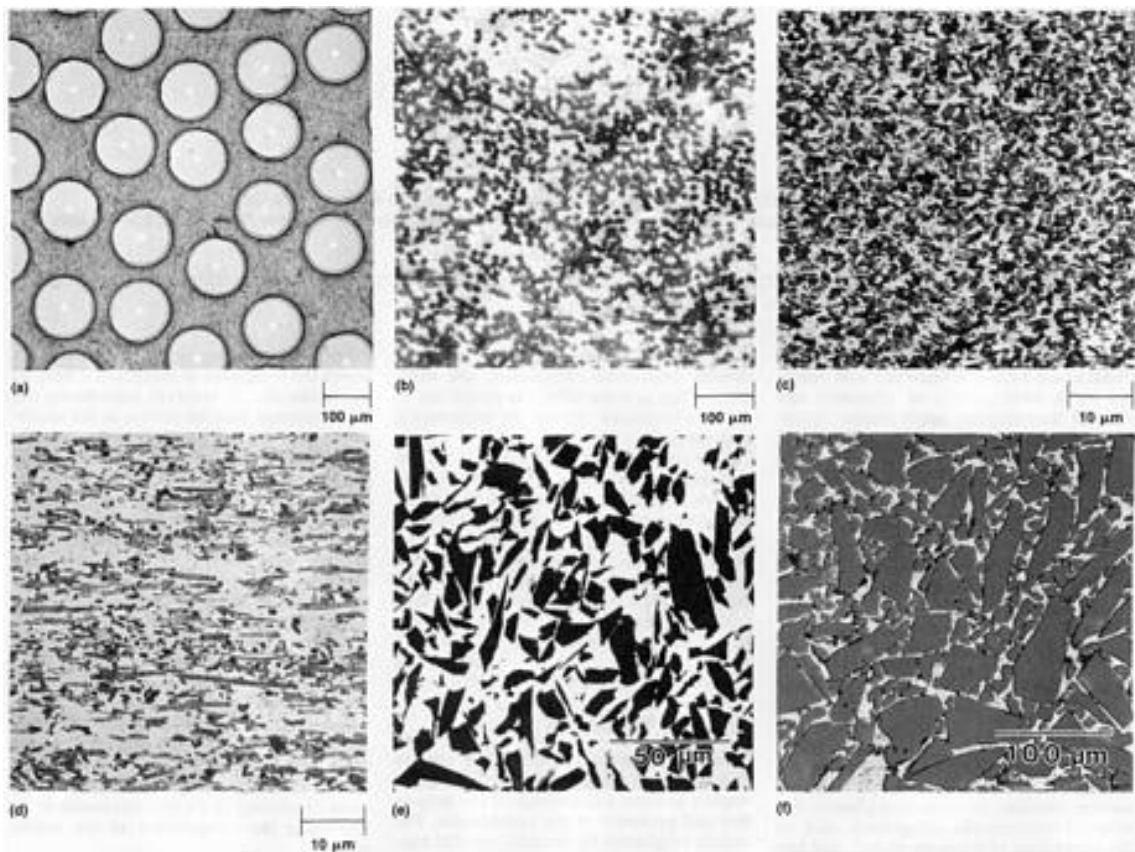


Figura 9.- Las secciones transversales de MMCs reforzados con fibras típicas (a) Compuesto de boro/aluminio continuo reforzado con fibras a 142 micras, los diámetros son recubiertos con carburos de boro en una matriz de aleación 6061. (b) Compuesto de grafito/aluminio, sección transversal con fibras de 10 micras de diámetro de grafito (40% vol.) en una matriz de aleación de aluminio 2014. (c) Una matriz de aleación 6061 de aluminio reforzado con 40% vol. con partículas de carburos de silicio SiC. (d) 20% vol. De SiC en una matriz de aluminio. Y (f) presentan 81% vol. Altamente reforzada con partículas de SiC en una matriz de aleación de aluminio. (13)

2.5 Soldadura

Se define como el proceso de unión que produce la coalescencia de los materiales mediante el calentamiento, con o sin la aplicación de presión, y así mismo con o sin la implementación de un material de aporte. (14)

Los procesos de unión tales como el proceso de soldadura son esenciales para el desarrollo de prácticamente todos los productos fabricados. Sin embargo, estos procesos suelen consumir mayores fracciones del costo del producto, debido a las dificultades de producción de los mismos. (15)

Hay una serie de razones que explican esta situación:

- 1) En primer lugar, los procesos de unión son multifacéticos, tanto en términos de variaciones del proceso (tales como fijación, unión adhesiva, soldadura blanda, soldadura fuerte, soldadura por arco, soldadura por difusión y soldadura por resistencia) y en las disciplinas necesarias para el problema a resolver (como mecánica, ciencia de materiales, física química y electrónica).
- 2) En segundo lugar, en los procesos de soldadura, las dificultades o fallas ocurren ya muy entrado en el proceso de unión, por lo tanto genera un alto costo de las piezas que son desechadas.
- 3) En tercer lugar, un gran porcentaje de fallas en los productos ocurren en el cordón de soldadura, esto debido a que en él se encuentran un contenido mayor de esfuerzos, generando que las partes sean más débiles en esa zona. (15)

2.5.1 Procesos de soldadura

Existen diferentes procesos de unión de materiales por medio de soldadura, los cuales pueden ser diferenciados principalmente de acuerdo al modo de la aplicación del calor, presión o ambas y el tipo de equipo implementado. (16)

Tabla 13.- Tipos de soldadura (17)

Soldadura por arco (AW)	<p>Soldadura por hidrógeno atómico (AHW)</p> <p>Soldadura con arco metálico desnudo (BMAW)</p> <p>Soldadura con arco carbono (CAW)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gas (CAW-G) • Protegido (CAW-S) • Gemelo (CAW-T) <p>Soldadura por electrogas (EGW)</p> <p>Soldadura de arco con flujo de fundente (FCAW)</p>
	<p>Soldadura por arco metálico y gas (GMAW)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arco pulsado (GMAW-P) • Arco por cortocircuito (GMSW-S) <p>Soldadura por arco de tungsteno y gas (GTAW)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arco protegido (GATW-P) <p>Soldadura por arco de plasma (PAW)</p> <p>Soldadura por arco metálico protegido (SMAW)</p> <p>Soldadura Estática (SW)</p> <p>Soldadura por arco sumergido (SAW)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Series (SAW-S)
Soldadura oxicom bustible (OFW)	<p>Soldadura a aire-acetileno (AAW)</p> <p>Soldadura Oxiacetilénica (OAW)</p> <p>Soldadura por oxihidrógeno (OHW)</p> <p>Soldadura con gas a presión (PGW)</p>
Soldadura por resistencia	<p>Soldadura rápida (FW)</p> <p>Soldadura por proyección (PW)</p> <p>Soldadura de costura por resistencia (RSEW)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alta frecuencia (RSEW-HF) • Inducción (RSEW-I) <p>Soldadura de puntos por resistencia (RSW)</p> <p>Soldadura Ultra (UW)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alta frecuencia (UW-HF) • Inducción (UW-I)
Soldadura de estado sólido (SSW)	<p>Soldadura por co-extrusión (CEW)</p> <p>Soldadura fría (CW)</p> <p>Soldadura por difusión (DFW)</p> <p>Soldadura por explosión (EXW)</p> <p>Soldadura por forja (FOW)</p> <p>Soldadura por fricción (FCW)</p> <p>Soldadura caliente a presión (HPW)</p> <p>Soldadura rolada (ROW)</p>

	Soldadura por ultrasonido (USW)
Procesos aleados	Espray térmico (THSP) Corte térmico (TC) <ul style="list-style-type: none"> • Corte con oxígeno (OC) • Corte con arco (AC)
Soldadura fuerte (Brazing, [B])	Brazing por block (BB) Brazing por difusión (CAB) Brazing por inmersión (DB) Brazing exotérmico (EXB) Brazing por fluido (FLDW) Brazing por horno (FB) Brazing por inducción (IB) Brazing infrarrojo (IRB) Brazing por antorcha (TB) Brazing por arco carbono gemelo (TCAB)
Soldadura blanda (Soldering, [s])	Soldering por inmersión (DS) Soldering por horno (FS) Soldering por inducción (IS) Soldering por infrarrojo (IRS) Soldering de hierro (INS) Soldering por resistencia (RS) Soldering por antorcha (TS) Soldering por ultrasonido (USS) Soldering por ondas (WS)
Otras soldaduras	Soldadura por haz de electrones (EBW) <ul style="list-style-type: none"> • Alto vacío (EBW-HV) • Medio vacío (EBW-MV) • Sin vacío (EBW-NV) Soldadura por electro-escoria (ESW) Soldadura por inducción (IW) Soldadura láser (LBW) Soldadura por percusión (PEW) Soldadura por termita (TW)

2.5.2 Intensidad y fuente de energía para procesos de soldadura por fusión

Una característica distintiva de todos los procesos de soldadura por fusión es la intensidad de la fuente de calor utilizado para fundir el material. Prácticamente cada fuente concentradora de calor se ha aplicado a los

procesos de soldadura. Sin embargo, muchas de las características de cada tipo de fuente de calor se determinan por su intensidad. (15)

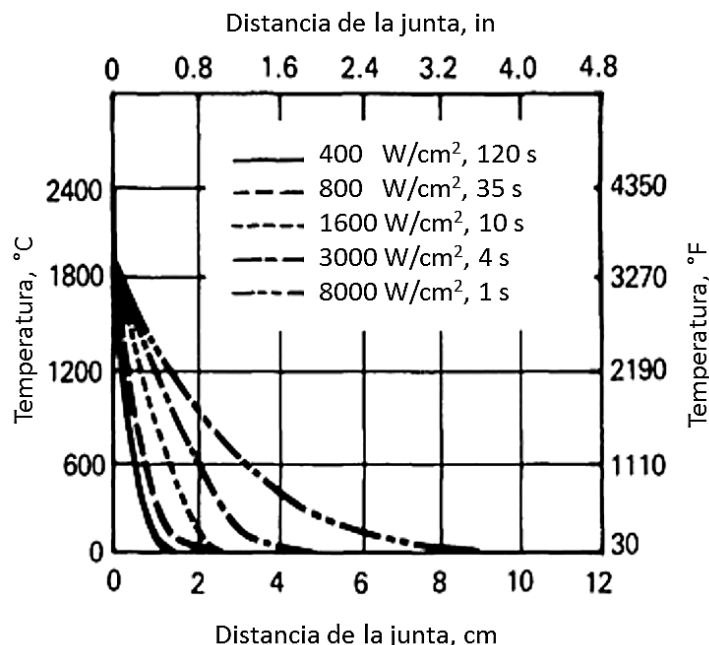


Figura 10.- Distribución de temperatura después de un tiempo de calentamiento específico en una placa de acero gruesa. [15]

La densidad de potencia está inversamente relacionada con el tiempo de interacción de la fuente de calor en el material. Debido a esto representa un problema de conducción de calor transitoria, se puede esperar que el calor se difunda en el material a una profundidad que aumenta como la raíz cuadrada del tiempo, es decir, a partir de la ecuación de Einstein:

$$X \sim \sqrt{\alpha t}$$

Donde X es la distancia que el calor se difunde en el sólido, en centímetros; alfa (α) es la difusividad térmica del sólido en cm^2/s ; y t es el tiempo en segundos. (15)

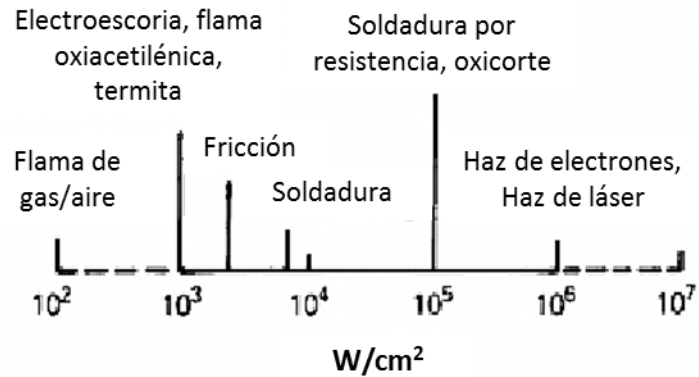


Figura 11.- Espectro de intensidad de calor para diferentes procesos de soldadura por fusión (15)

2.5.3 Soldadura por fusión (ciclos térmicos)

Durante el proceso de soldadura por fusión, los ciclos térmicos producidos por la fuente de calor en movimiento provocan cambios de estado físico, transformaciones de fase, esfuerzos residuales. Después de completar la unión por soldadura, el producto terminado puede contener discontinuidades físicas que se deben a la solidificación excesivamente rápida o microestructuras no deseadas que se deben a un enfriamiento inadecuado, o a esfuerzos residuales y distorsión en los materiales unidos. Para disminuir estos efectos, se realizan modelos de flujo de calor en los procesos de soldadura. (15)

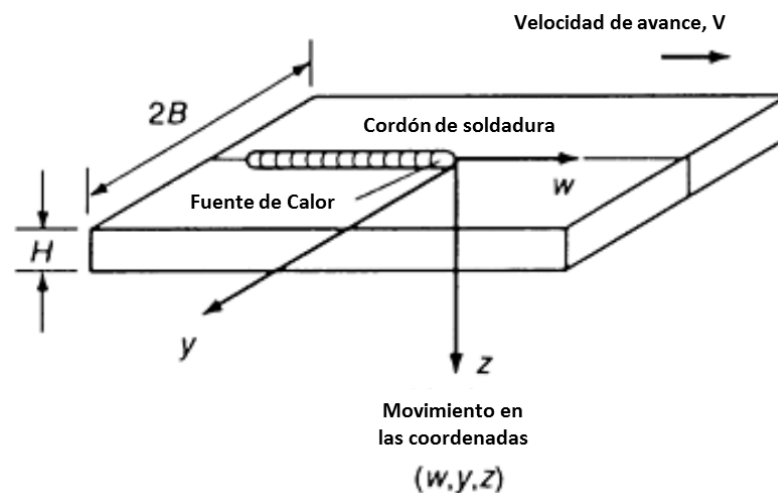


Figura 12.- Esquema de soldadura empleando un modelo térmico. (15)

2.6 Soldadura por proceso brazing

El proceso de Brazing o soldadura fuerte, es un proceso que permite la unión de materiales sólidos mediante la implementación de un metal de aporte con un punto de fusión inferior a la de los metales que se requieren unir (superior a 450 °C); el cual se distribuye por capilaridad entre las superficies. [15]

Tabla 14.- Comparación de los tipos de proceso de soldadura por arco, Soldering, y Brazing (15)

Parámetro	Proceso		
	Soldering	Brazing	Soldadura
Junta formada	Mecánica	Metalúrgica	Metalúrgica
Material de aporte	<450 °C (<840 °F)	>450 °C (>840 °F)	>450 °C (>840 °F)
Metal base	No funde	No funde	- - -
Fundente utilizado para proteger y ayudar en la humectación de la superficie del metal base	Obligatorio	Opcional	Opcional
Fuentes de calor típicos	Soldering, ultrasónicos, resistencias, horno	Horno; reacción química, inducción, antorcha, infrarrojo	Plasma, tungsteno y arco sumergido, resistencia, laser
Tendencia al deformado o quemado del material	atípico	atípico	Distorsión potencial y deformación del material base
Esfuerzos residuales	- - -	- - -	Probablemente alrededor de la zona de soldadura

Para la realización de una unión adecuada es necesario tener en cuenta los parámetros tales como el flujo del metal de aporte, características del metal base y del metal de aporte, la preparación de la superficie, el diseño del tipo de unión, el tiempo del proceso, la temperatura y la fuente de calor para el proceso por Brazing. (18)

El proceso de brazing debe cumplir con los tres criterios mencionados a continuación:

- Las piezas deben unirse sin fusión de los metales base.
- El material de aporte debe tener una temperatura de transformación a líquido mayor a 450 °C.

- El material de aporte debe de mojar las superficies del metal base y penetrar en la unión o mantenerse en la misma por medio de acción capilar. (19)

2.6.1 Principio de operación

El proceso de brazing o soldadura fuerte, se lleva a cabo por acción de flujo capilar, el cual proporciona una unión de soldadura buena cuando las superficies que van a ser unidas son mojadas por el material de aporte al ser fundido. La unión debe tener un espacio apropiado para permitir una acción de capilaridad eficiente, así como una coalescencia adecuada. (15)

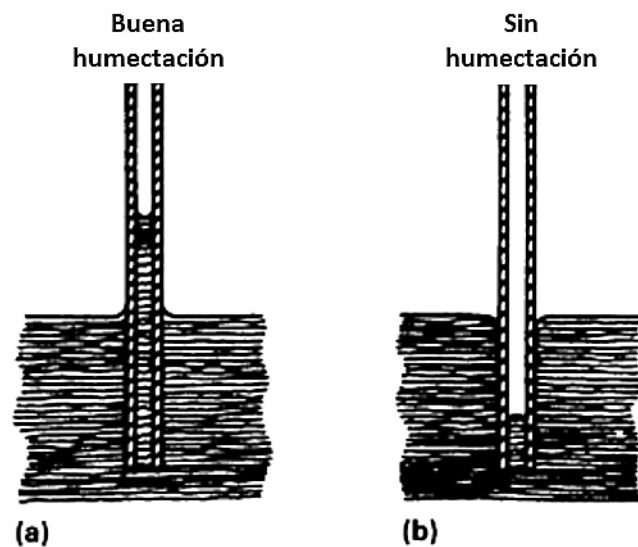


Figura 13.- Esquema del principio de la atracción capilar para líquidos seleccionados cuando el líquido se encuentra entre dos placas de vidrio. (15)

Para obtener un flujo de material de aporte adecuado, se deben de considerar diferentes factores que pueden modificar o alterar el resultado de la soldadura, de los cuales se pueden mencionar: presencia de óxidos, rugosidad de la superficie y el ángulo de contacto. (15)

2.6.2 Preparación de la superficie

Un parámetro importante a considerar en el brazing, es la condición en la que se encuentra la superficie del material, esta debe de estar limpia y libre de óxido para tener una adecuada capilaridad y por lo tanto una buena soldadura.

Debido a lo anterior, se debe de efectuar operaciones de limpieza de las piezas, las cuales pueden ser mecánicas o químicas, siendo éstas últimas las más eficaces para la eliminación de restos de grasas o aceites.

La correcta selección del agente de limpieza química, depende directamente del contaminante presente en el material, el estado de la superficie y el diseño de la junta, además de la limpieza química, se puede emplear el mecanizado de las piezas a unir, siempre y cuando las zonas de unión no resulten afectadas.
(15)

2.6.3 Etapas del proceso de brazing

El proceso de soldadura fuerte o Brazing se lleva a cabo por medio de cuatro etapas distintas:

- 1) El ensamble o la región de las piezas a unir, se calienta a una temperatura de al menos 450 °C (840 °F).
- 2) El ensamble de las piezas unidas por proceso Brazing, se tendrá que calentar a una temperatura lo suficientemente elevada para llegar al punto de fusión del metal de aporte, pero nunca llegar a la temperatura de fusión del material de los componentes a unir.
- 3) El material de aporte fundido, realiza la unión por medio de capilaridad, mojando las superficies metálicas de los materiales base.
- 4) La pieza se enfría, provocando una reacción metalúrgica la cual modifica los enlaces atómicos. (15)

2.6.4 Ventajas del proceso de soldadura fuerte (brazing)

A continuación se mencionan algunas de las ventajas presentes al emplear el proceso brazing (15):

- Fabricación relativamente económica de componentes complejos o con multi-ensambles.
- Excelente distribución de esfuerzos en el metal base debido a la temperatura.
- Capacidad de preservar el revestimiento metálico
- Capacidad de unir materiales disímiles.
- Capacidad de unión de materiales que varían en espesores y en tamaño.
- Capacidad de preservar las características especiales de los materiales (propiedades o características metalúrgicas).
- Capacidad de fabricar ensambles en un estado libre de esfuerzos
- Capacidad de unir componentes con porosidad.
- Capacidad para mantener tolerancias de montaje precisas y así producir un componente cosméticamente más ordenado y sin costosas operaciones secundarias.
- Técnicas de control de calidad fiable y reproducible.

2.6.5 Limitaciones del proceso de brazing

El proceso brazing tiene una serie de limitaciones en su proceso, tales como variación de fases, propiedades físicas y químicas; debido a que los metales unidos por este medio no son un órgano homogéneo, sino más bien es una unión heterogénea, en este proceso, el metal base presenta una disolución parcial, con lo cual en combinación con procesos de difusión, puede cambiar la composición y por lo tanto las propiedades químicas y físicas de la zona frontera formada entre la interfaz del metal base y el metal de aporte se ven modificadas a lo largo de toda la unión. (15)

2.6.6 Proceso Brazing vs otros procesos de soldadura

Debido al hecho de que el proceso brazing no llega a realizar una fusión sustancial de los metales base, esto ofrece una serie de ventajas sobre otros procesos de soldadura. En general, es posible mantener tolerancias de montaje más estrechas para producir un componente cosméticamente más ordenado y sin costosas operaciones secundarias. Aún más importante, es que la soldadura fuerte hace que sea posible la unión de materiales disímiles (metales-cerámica) que debido a incompatibilidades metalúrgicas, no puede ser acompañado por procesos de soldadura por fusión tradicionales. Si los metales de base no tienen que ser fundido para poder realizar la unión, no importa la diferencia entre sus puntos de fusión. (15)

La soldadura fuerte también produce generalmente menos distorsión inducida térmicamente o deformación de los materiales de unión. Una parte entera puede ser llevada hasta la misma temperatura de soldadura, evitando así que el tipo de calentamiento localizado que causa la distorsión en el proceso de soldadura. (15)

Por último, y quizás lo más importante, es que la soldadura fuerte se presenta fácilmente para una producción en serie. Debido a que es relativamente fácil automatizar, ya que la aplicación de calor ya sea por horno, antorcha, bobinas de inducción, resistencias eléctricas, etc.; no tiene que estar localizada, como en otros procesos de soldadura por fusión. (15)

2.6.7 Elementos para el proceso brazing

El proceso de unión por brazing, requiere una evaluación cuidadosa de los siguientes elementos con el fin de producir uniones satisfactorias (15)

- Flujo del metal de aporte
- Características del metal base
- Características del metal de aporte
- Preparación de la superficie

- Diseño de la junta y el espacio entre las piezas a unir
- Temperatura y tiempo
- Protección por atmosfera o flux

2.6.7.1 Flujo del metal de aporte

Como se mencionó anteriormente, la humectación es solo una faceta importante en el proceso de soldadura fuerte. Para un flujo adecuado del material de aporte es necesario un ángulo de contacto bajo, así mismo una viscosidad baja. En este tipo de proceso, los materiales de aporte con puntos de fusión que están cerca del punto eutéctico, generalmente tienen menor viscosidad que aquellos con temperatura de fusión mayor. Por lo tanto, una tensión superficial alta de metal de aporte líquido, un ángulo de contacto bajo y baja viscosidad, sería lo ideal para un proceso de unión por soldadura brazing.

La fluidez es la propiedad que determina la distancia que viajará lejos de su punto de origen, debido a la acción de fuerzas capilares. Para fluir de manera adecuada, un metal de aporte no debe tener un aumento apreciable de su temperatura de líquidus a pesar de que su composición, se ve modificada debido a la adición de metal base que se haya disuelto. Esto es importante porque la operación de soldadura se lleva a cabo justo por encima del liquidus del material de aporte. (15)

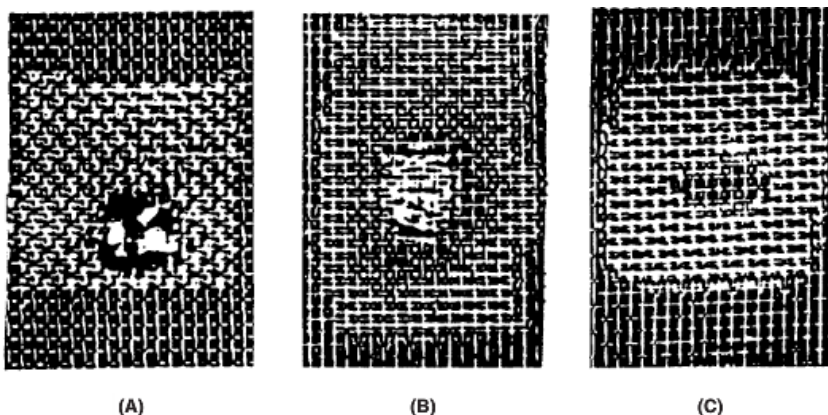


Figura 14.- Diferencia en las propiedades de flujo entre materiales de aporte eutécticos y no eutécticos (A) Calentamiento lento en horno de AWS BAg-2 produce un flujo no uniforme por capilaridad teniendo una acción de licuación; (B) Un calentamiento rápido de AWS BAg-2, se tiene resultados en una mejor fluidez por acción de capilaridad; (C) Calentamiento lento en horno de AWS Bag-1 se tiene como resultado una soldadura uniforme debido a que no presenta licuación, además de un calentamiento uniforme. (20)

Durante el proceso de soldadura brazing se producen una serie de interacciones tales como:

- Difusión de metal base en la soldadura
- Difusión de metal de aporte en granos de metal base
- Penetración de metal base a lo largo de los límites de grano
- Formación de compuestos intermetálicos

Generalmente se minimizan las interacciones mediante la selección adecuada del material de aporte, manteniendo la temperatura tan baja como sea posible, pero lo suficientemente alta como para producir el flujo del material de aporte. (15)

2.6.7.2 Características del metal base

El metal base tiene un efecto primordial en la resistencia de la unión soldada. Una metal base de alta resistencia produce uniones de mayor resistencia que los fabricados con metales base más suaves. Cuando los materiales son endurecibles, la fuerza conjunta se vuelve menos predecible. Esto se debe a reacciones metalúrgicas complejas entre los metales base endurecibles y los materiales de aporte involucrados. Estas reacciones pueden provocar cambios en la capacidad de endurecimiento del metal base y pueden crear tensiones residuales. (15)



Figura 15.- Horno continuo para brazing (20)

En los casos en que diferentes materiales conforman el ensamble, los espacios para el material de aporte (gap) se pueden ver modificados debido a la expansión térmica, es por esto que el coeficiente de expansión térmica se convierte de vital importancia.

Varios fenómenos metalúrgicos influyen en el comportamiento de las uniones soldadas y, en algunos casos, requieren procedimientos especiales. Estos efectos de los metales base pueden producir precipitaciones de carburos, generando agrietamientos por tensión; hidrógeno, fósforo, y azufre generan agilización y estabilidad a la oxidación, este tipo de fenómenos se tienen cuando el metal base está compuesto de aceros aleados.

El grado de interacción es muy variable, dependiendo de la composición del metal base y del metal de aporte. Siempre hay algún tipo de interacción, excepto en casos de solubilidad mutua.

La resistencia del metal base tiene un profundo efecto sobre la resistencia de la unión por soldadura fuerte. Por lo tanto, esta propiedad debe ser cuidadosamente considerada en el diseño de una unión, esto con la finalidad de obtener propiedades específicas. (15)

2.6.7.3 Características del metal de aporte

Las características necesarias de metales de aporte son:

- Adecuada fluidez a temperaturas del proceso de brazing, esto para asegurar el flujo por acción capilar y la provisión de distribución completa del material de aporte a lo largo de toda la unión.
- Estabilidad para evitar la liberación prematura de elementos de bajo punto de fusión.
- Capacidad para mojar la superficie de unión con el metal base.
- Volatilidad baja de elementos de aleación del metal de aporte a temperaturas propias del proceso de soldadura fuerte.
- El control de lavado o control de la erosión entre el metal de aporte y el metal base en los límites requeridos para el proceso de soldadura.

Cabe señalar que la fuerza de la unión por este tipo de procesos, no está directamente relacionado con el método de fusión del material de aporte.

El grado en que interactúa el metal de aporte con el metal base al momento de la penetración depende de la intensidad de los procesos de difusión mutuos que se producen entre ambos materiales. En aplicaciones que requieren uniones fuertes para alta temperatura, condiciones de servicio de alto esfuerzo (rotor de turbina, componentes de motores), es generalmente aconsejable especificar un metal de aporte que tiene altas propiedades de difusión y solución con el metal base. (15)

La temperatura del proceso de soldadura, está directamente ligado a la temperatura de fusión del material de aporte, el primer criterio de selección del material de aporte es su temperatura de fusión. (15)

2.7 Materiales disímiles

Los materiales disímiles son aquellos que químicamente presentan diferencias tales como: aluminio, níquel, cobre, o aleaciones de un metal particular que son significativamente diferentes desde un punto de vista metalúrgico como el acero al carbono y el acero inoxidable. Pueden ser de metal base, o material de aporte. (21)

La mayoría de las combinaciones de metales diferentes pueden ser unidas por soldadura de estado sólido, soldadura fuerte o soldadura de aleación. (21)

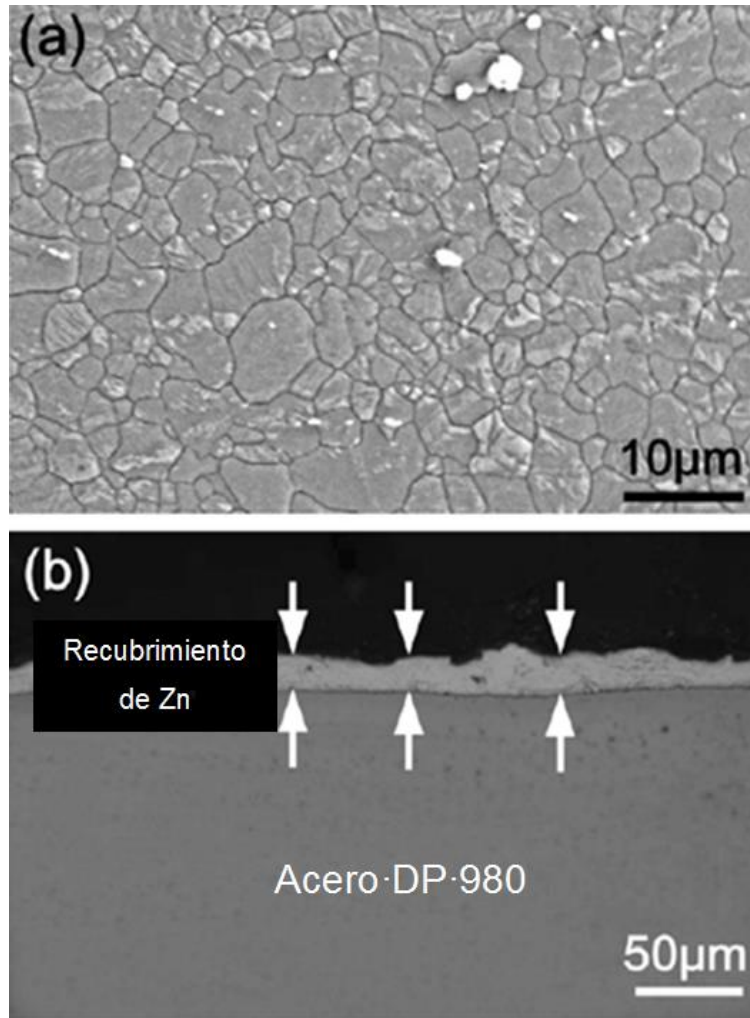
El unir materiales disímiles, tienen una infinidad de aplicaciones, por ejemplo aparatos de aire acondicionado, refrigeradores, cables, radiadores, condensadores, etc., debido a que se pueden mezclar las diferentes propiedades tales como la alta conductividad térmica y eléctrica. (22)

Además de esto, recientemente este tipo de uniones han tenido mucho interés debido a la tendencia en las industrias automotriz y aeroespacial, más específicamente en la industria del automóvil ya que lo que se busca es la reducción de peso en los vehículos y la mejora de la eficiencia del combustible. Es por esto que se busca implementar este tipo de uniones, en las cuales se mezclen las propiedades físicas, químicas, térmicas de materiales (aceros de alta resistencia, aceros de doble fase, aceros inoxidables, unirlos con materiales de baja densidad tales como el magnesio o el aluminio. (23)

2.8 Procesos de unión de materiales disímiles

La mayoría de los materiales disímiles pueden ser unidos por medio de procesos de soldadura de estado sólido, fuerte o de aleación. Una combinación de metales con diferencia significativa en su composición química y sus propiedades mecánicas y físicas, pueden presentar fácilmente problemas

durante y después de la soldadura. La combinación puede ser de dos diferentes metales base o tres metales diferentes, el cual uno de ellos es un metal de aporte. La soldadura resultante y la composición del metal serán diferentes de cualquiera de los componentes y pueden variar con el diseño de la junta, el proceso de soldadura, el material de aporte y el procedimiento de soldadura. (21)



Sin embargo, el unir materiales disímiles presentan un gran desafío, ya que tienen una diferencia significativa en cuanto a las propiedades termofísicas y químicas entre los materiales, uno de los principales obstáculos para poder

llevar a cabo este tipo de unión metalúrgica son la formación de intermetálicos, esto debido a la presencia de óxidos sobre la superficie del sustrato (en el caso de aluminio, etc.), aunado a esto, algunas aleaciones a unir presentan una entalpía de mezcla fuertemente negativa, lo cual conduce a la fácil formación de compuestos metálicos quebradizos, los cuales pueden perjudicar seriamente la conductividad eléctrica, propiedades mecánicas, y la resistencia a la corrosión. (22)

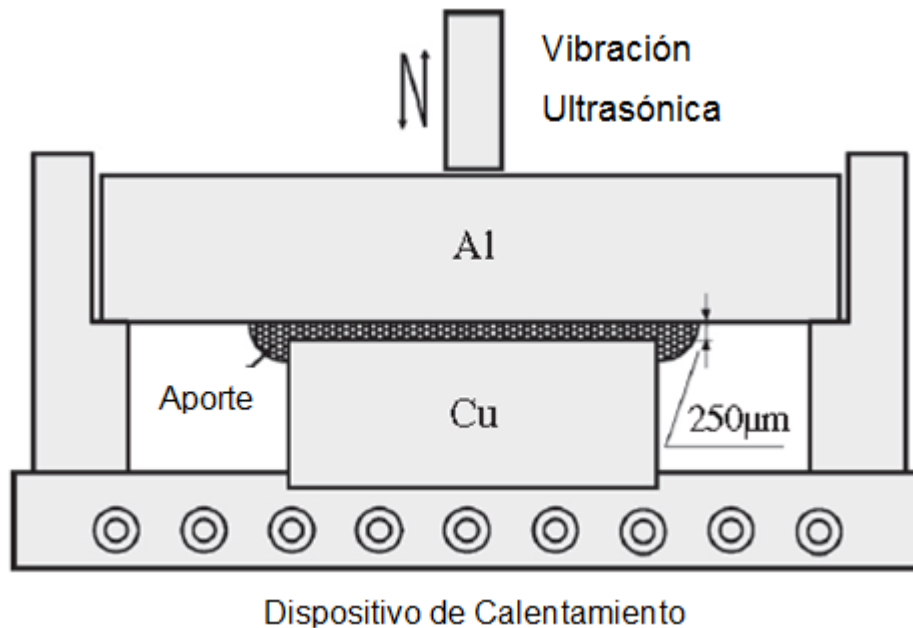


Figura 17.- Diagrama esquemático del proceso de brazing asistido por ultrasonido. (22)

La soldadura brazing es uno de los métodos más utilizados para unir materiales disímiles. Por ejemplo, se ha realizado este tipo de proceso para unir aluminio y cobre, debido a la baja temperatura de unión (480°C, aproximadamente), además se ha encontrado que la adición de un metal de aporte disminuye la tensión residual entre los materiales a unir; así mismo, se obtienen pueden lograr microestructuras homogéneas y menor número de defectos (poros y grietas). (22)

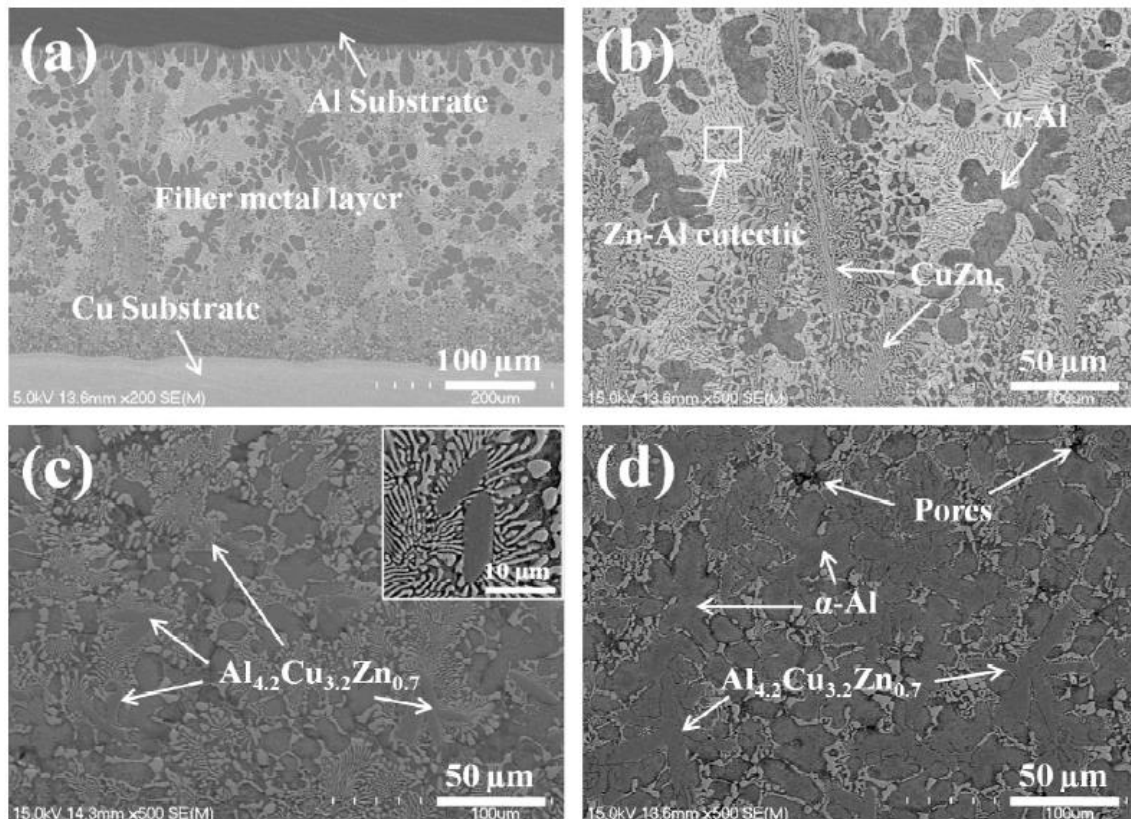


Figura 18.- Imágenes SEM de (a) unión típica de Cu/Al (400 °C), (b) empleando láminas de Cu/Al como material de aporte (400 °C), (c) 440 °C y (d) 480 °C. (22)

2.8.1 Procesos de unión de aluminio y aceros

Debido a las características fisicoquímicas tanto del acero como del aluminio (densidad, conductividad térmica, etc.) se busca unir este tipo de materiales para ser aplicadas en construcciones ligeras de unidades de transporte, además este tipo de estructuras entre la aleación de aluminio y el acero tienen un alto potencial técnico y económico.

Sin embargo, la unión de aleaciones de aluminio y acero tienen una dificultad por soldadura, en especial por los procesos de fusión, debido a que se forman una cantidad de compuestos intermetálicos frágiles. (24)

Otro tipo de proceso que se emplea es la de estado sólido mediante el control de la formación de intermetálicos a distancias micrométricas de la zona

de unión, el problema de este tipo de procesos de unión es la restricción de forma y tamaño de la unión. (24)

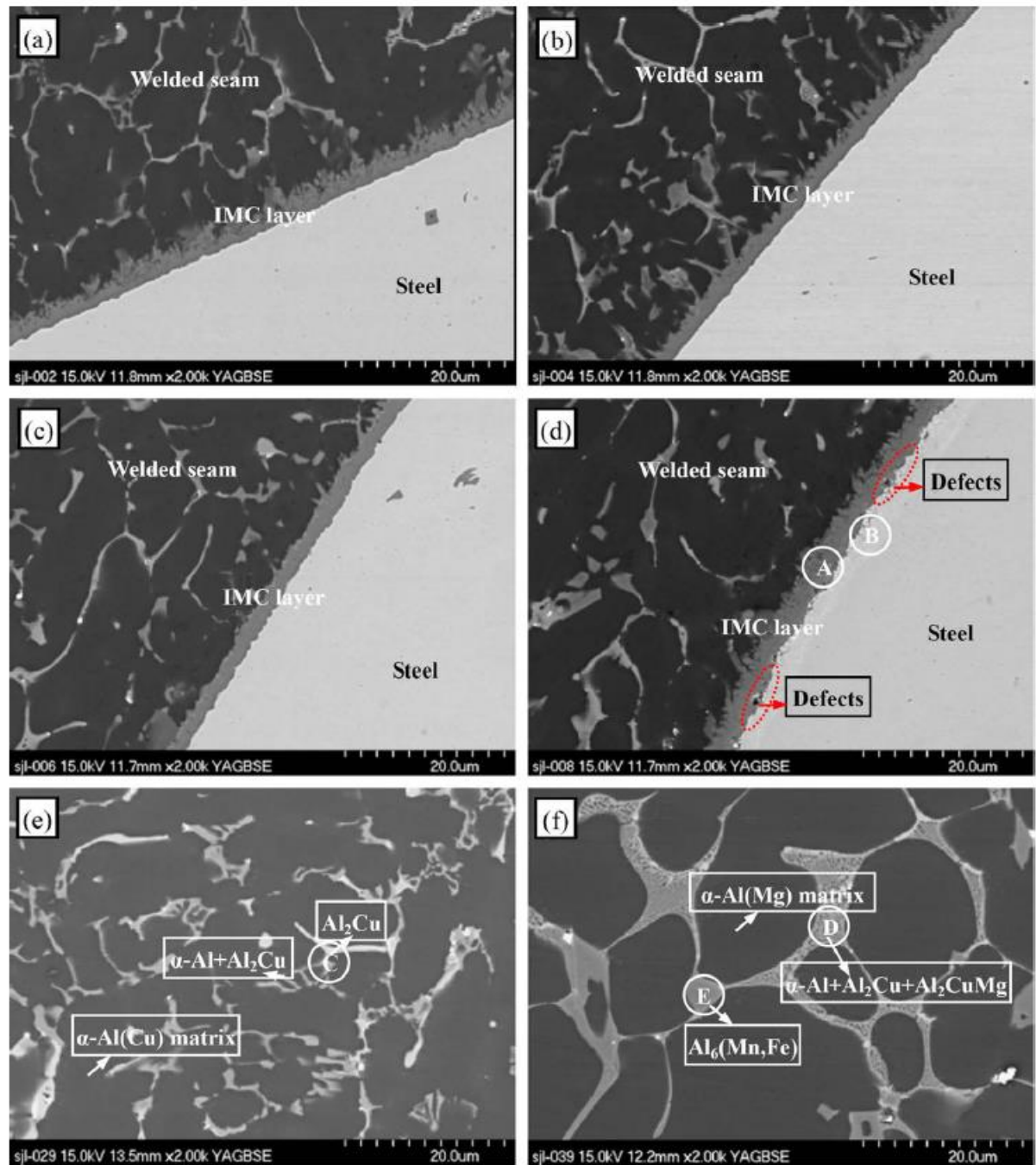


Figura 19.- Imágenes SEM, en diferentes posiciones en la unión aluminio-acero (24)

Para este tipo de uniones se utiliza el proceso TIG empleando material de aporte (aluminio, zinc, etc.) con cierta compatibilidad química entre los dos materiales a unir. En este proceso es complicado controlar el crecimiento o formación de intermetálicos debido a la diferencia existente entre la temperatura de fusión de las aleaciones de aluminio y las de las aleaciones de acero. (24)

El proceso brazing se implementa para unir materiales disímiles, a este proceso se le conoce también como fase líquida transitoria de unión (TLP por sus siglas en inglés), en el cual contiene un metal con un punto de fusión más bajo entre los componentes disímiles. Las presentaciones comerciales del metal de aporte son: láminas, cintas, pastas, etc. Generalmente, el procedimiento inicial del es alcanzar la temperatura de fusión del metal de aporte. Este proceso actúa por capilaridad, mientras que el metal base adquiere por intercambio difusivo de elementos la composición líquida de equilibrio. (25)

El proceso brazing presenta buenos resultados en hornos al vacío, esto debido a que presenta atmósfera libre de oxígeno o de agentes que contaminen o alteren los mecanismos difusivos entre el material base y el material de aporte en la zona de unión. (26)

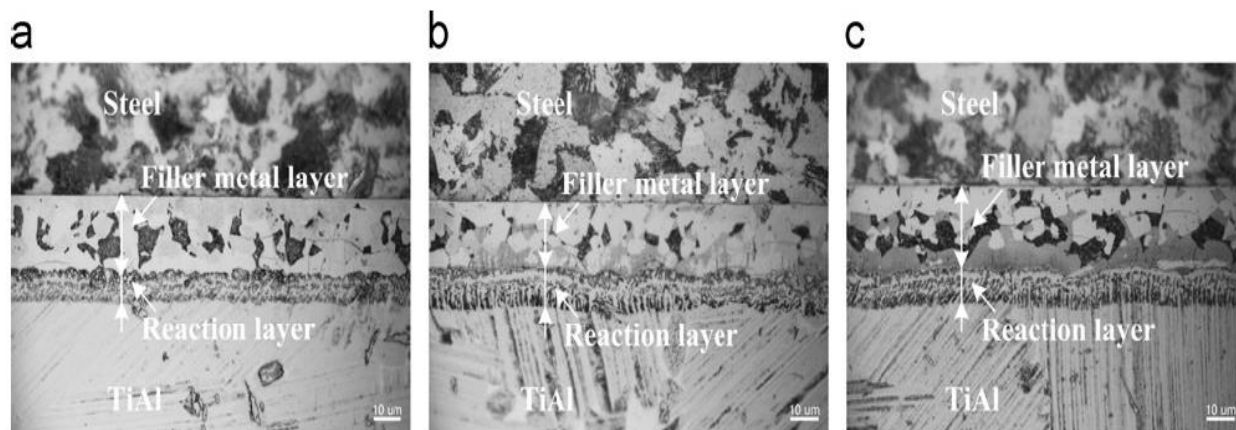


Figura 20.- Microestructura de la junta empleando proceso brazing a una temperatura de 900 °C para (a) 5 minutos, (b) 10 minutos y (c) 15 minutos. (26)

2.9 Proceso brazing para unión de aluminio y acero

En el proceso brazing para este tipo de materiales disímiles, se logra observar en la interface entre el metal sólido (de aluminio) un mayor potencial en el desarrollo de reactivos de soldadura. En este proceso, se emplean sales para lograr que estos actúen como depresores y, se combinen con el aluminio para formar aleaciones con un punto de fusión por debajo de los 580°C, por ejemplo, sales de KF-AlF₃ que contienen potasio fluoroaluminados. Sin embargo, las propiedades de equilibrio de fases y físicoquímicas de uniones de aluminio y acero empleando como materiales de aporte sales de fluoruro con estos elementos han sido poco estudiados hasta el momento. (27)

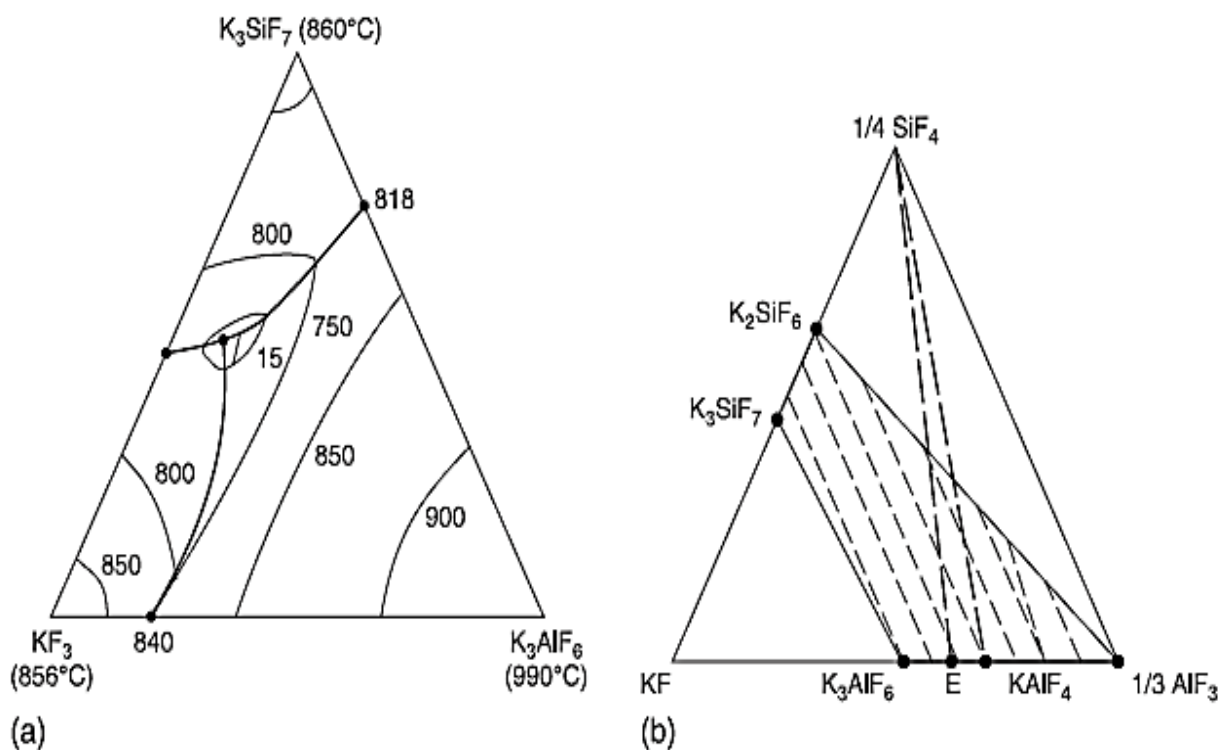


Figura 21.- Diagrama de fases de las sales de fluoruros y aluminio. (27)

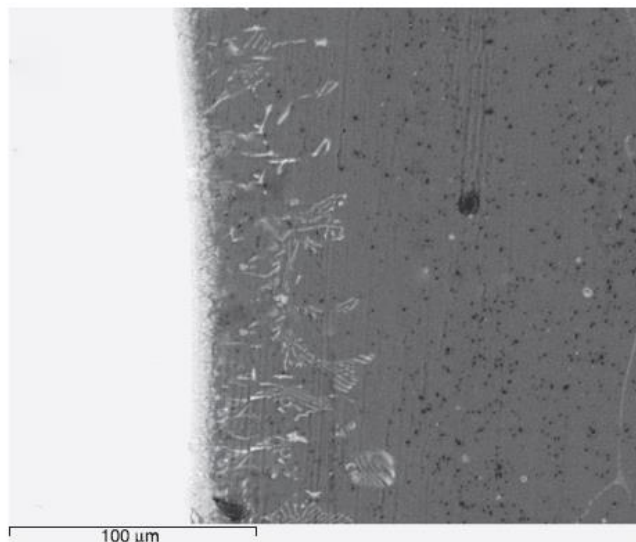


Figura 22.- Microestructura de una unión soldada entre aluminio 1050 (negro) y acero inoxidable 12Kh18N10T (sin material de aporte, empleando fundente FAF540 a una temperatura de 605 °C +/- 5°C

La temperatura de fusión del material de aporte depende de la energía libre de Gibbs y de la interacción de los intermetálicos formados en las uniones de este tipo de materiales disímiles por proceso brazing. (27)

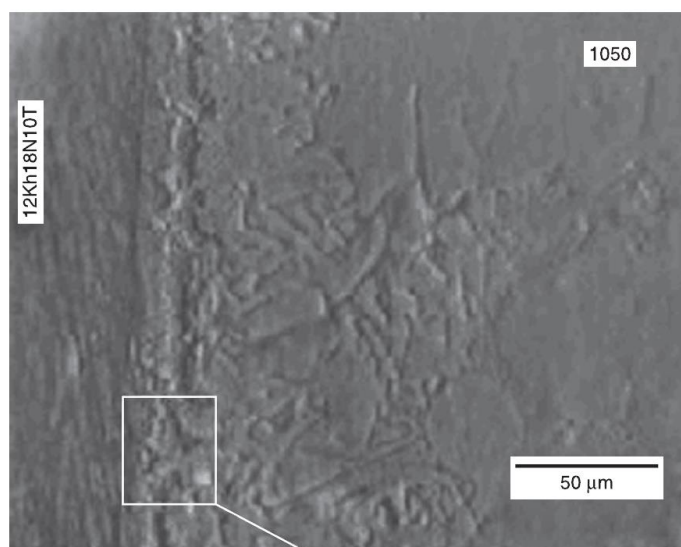


Figura 23.- Microestructura de una unión soldada entre aluminio 1050 y acero inoxidable 12Kh18N10T (material de aporte: mezcla de FAF540 y polvo de AKD12 (Al-12Si) en relación 50/50 %peso; empleando proceso brazing a temperatura de 605 °C +/- 5°C.

2.10 Proceso de unión de pares difusivos mediante equipo para realización de análisis térmico diferencial (DTA)

Owczarski et al. (1970) patentó el proceso de Pratt y Whitney, unión de componentes metálicos mediante soldadura fuerte isotérmica, también llamada soldadura brazing o soldadura en fase líquida transitoria (TLP). Este fenómeno iniciado por la formación de un líquido en la primera etapa del brazing, ha sido empleado en materiales metálicos y cerámicos unidos en los procesos industriales. El principio TLP se esquematiza en la Figura 24, de manera simple se ejemplifica con dos hojas de un metal puro, los cuales son soldados utilizando una aleación binaria eutéctica de cierta composición química. (28)

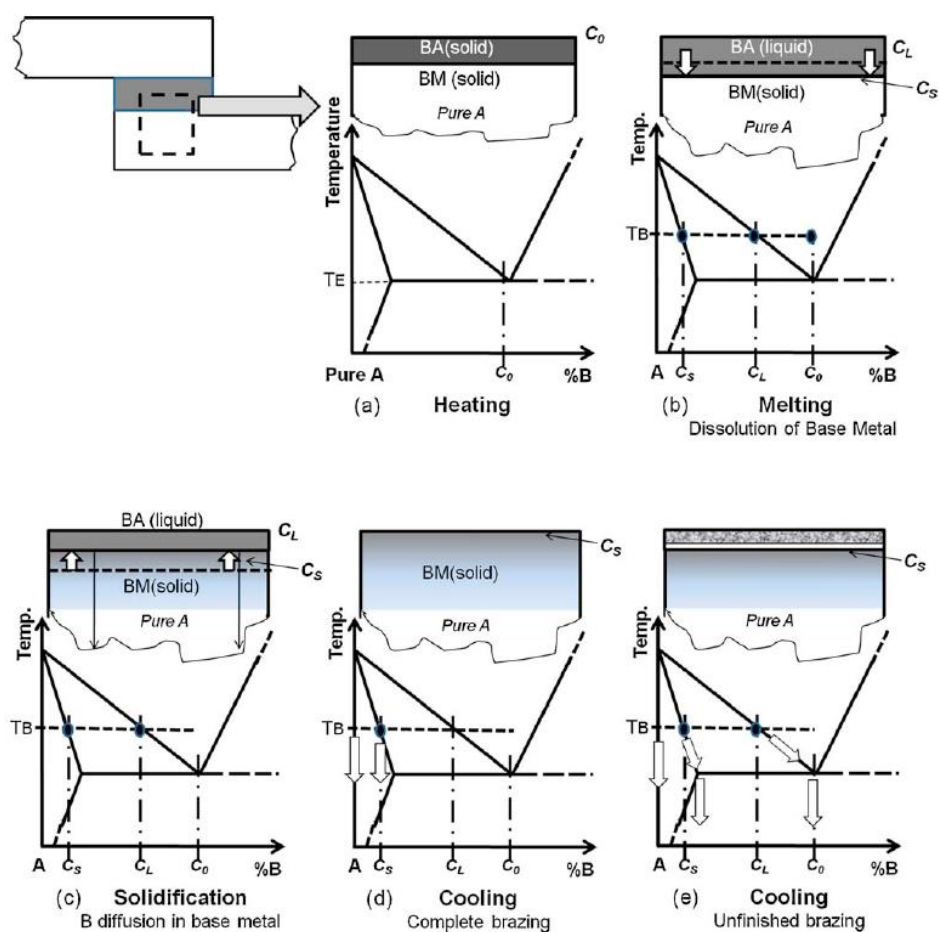


Figura 24.- Ilustración esquemática de las diferentes etapas de soldadura fuerte isotérmica en el caso de un metal puro. Uniones soldadas por brazing usando una aleación de bajo punto de fusión

Esta aleación de soldadura se coloca inicialmente entre los dos componentes del metal base a unir, el material para la unión puede estar en forma de una hoja delgada, una pasta o un recubrimiento. Este sistema difusivo se calienta hasta la temperatura de soldadura fuerte establecida, la cual es inferior a la temperatura de *solidus* de los materiales metálicos a unir. En este tipo de sistemas difusivos, la composición de equilibrio sólo se alcanza en el interfaz entre el sólido y el líquido. (28)

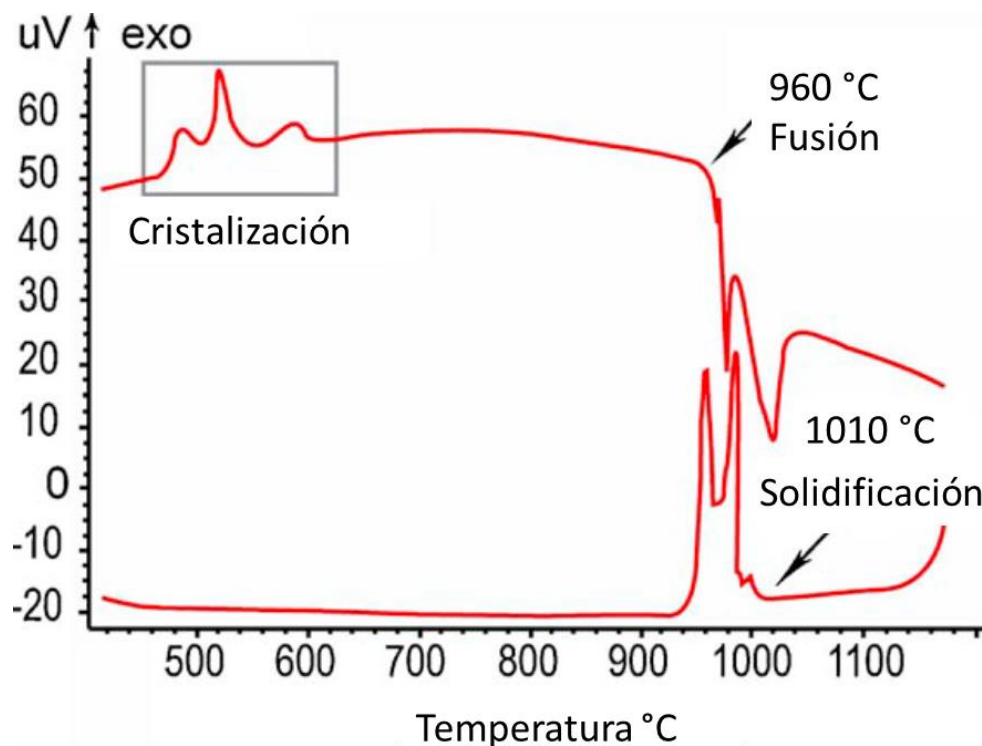


Figura 25.- Diagrama DTA registrado durante el calentamiento el enfriamiento adicional a una lámina de BNi-2 (28)

La difusión del proceso TLP se asocia con el movimiento en la interface líquido/sólido para compensar la pérdida de un elemento en la unión y conservar la composición de equilibrio de líquido a la temperatura de soldadura brazing (solidificación isotérmica).

Actualmente, el proceso brazing se ha estado empleando en la industria aeronáutica para unir componentes del sistema de turbinas o para el rellenado de grietas en piezas expuestas a altos tiempos de servicio. Por lo tanto, es necesario asimilar el origen de la formación de las fases frágiles mediante un mejor control de las variables que involucra el proceso de soldadura brazing (temperaturas, tiempos y ciclos térmicos). (28)

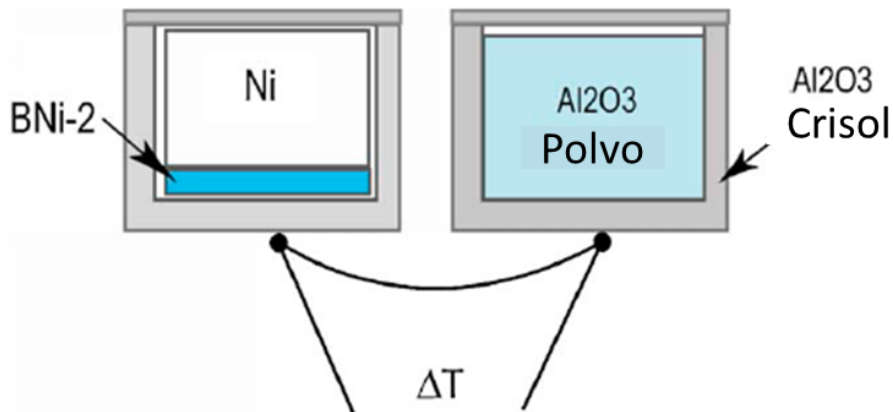


Figura 26.- Esquema del montaje experimental utilizado para el análisis de datos durante el Ni/BNi-2 unido mediante soldadura brazing (28)

Al realizar el proceso brazing a temperatura controlada, se logra observar las posibles variaciones existentes en el proceso de unión de materiales por este proceso. (25), (28)

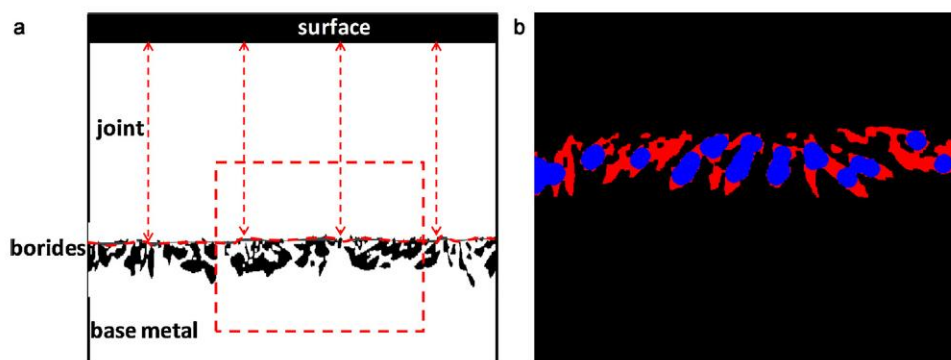


Figura 27.- Análisis cuantitativo de microestructuras: (a) representación esquemática de las diferentes capas de una muestra de soldadura fuerte, junto con el método utilizado para medir el espesor de la junta.; (b) Imagen de una etapa interrumpida del proceso iterativo utilizado para medir el tamaño de partícula del boro. (25)

Logrando de esta manera al tener todas las consideraciones o dificultades existentes tener la información necesaria para lograr establecer las condiciones o parámetros para este proceso necesarios para controlar la formación de fases frágiles existentes en la unión. (25), (28)

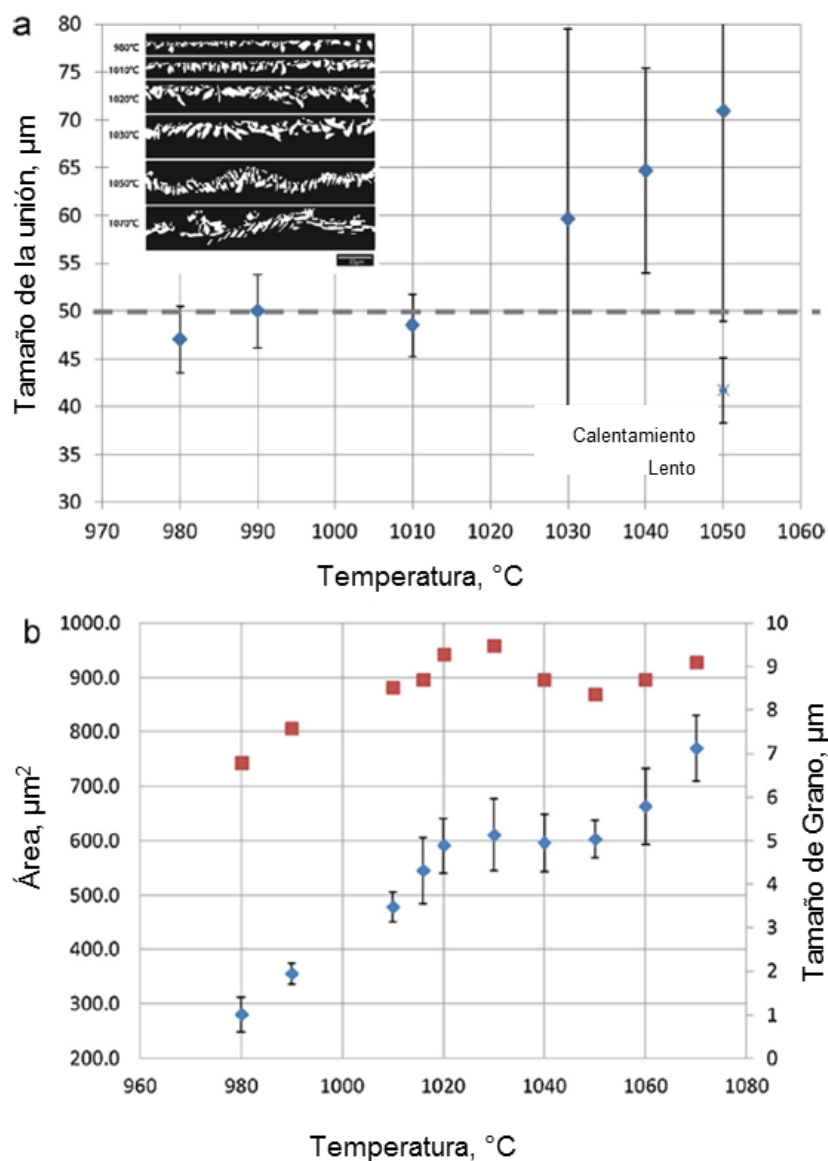


Figura 28.- (a) Evolución del espesor de la capa de soldadura fuerte como una función de la máxima temperatura de calentamiento. La velocidad de calentamiento es de $25^{\circ}\text{C}/\text{min}$, excepto para el punto a que se refiere como «calentamiento lento», el cual se calentó a $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para longitudes iguales a 2», (b) Evolución de la zona media y el tamaño medio de la interfaz de borrosos en función de la máxima temperatura de calentamiento (25)

Para lograr establecer parámetros en el proceso de soldadura brazing es necesario realizar estudios a diferentes temperaturas (ciclos de calentamiento), esto para analizar las posibles fases presentes en cada uno de estos ciclos de calentamiento. (25), (28)

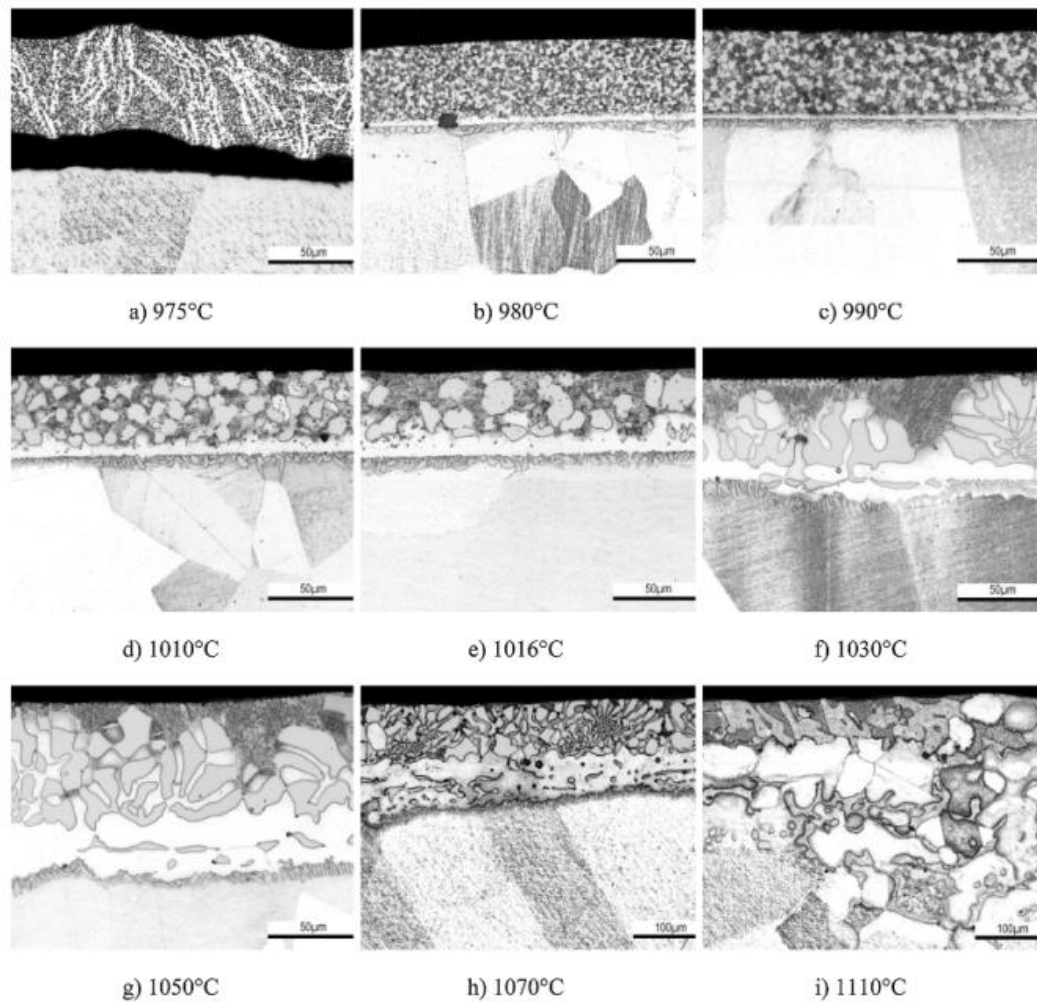


Figura 29.- Microestructuras ópticas observadas después de ciclos de calentamiento, los cuales se detuvieron a diferentes temperaturas (25)

CAPÍTULO III. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA

3.1 Procesos de unión de materiales disímiles

La soldadura por procesos de TIG, GMAW, SAW, etc. son empleados para unir diferentes materiales tanto disímiles como no disímiles, sin embargo, en ocasiones no es recomendable emplear estos procesos. Debido a que presentan zonas amplias afectadas por el calor y por lo tanto, la formación de fases fragilizadoras e intermetálicos. Estas disminuyen las propiedades mecánicas en la zona de unión.

En contraste, el proceso de soldadura brazing es empleado para unir materiales disímiles para diferentes aplicaciones, esto debido a que no provoca la fusión de los metales base, y en consecuencia, no se tienen zonas afectadas por el calor y, las propiedades mecánicas en el cordón de soldadura son similares al del metal base.

3.2 Unión de materiales disímiles por proceso brazing

Existen diferentes métodos de unión por el proceso brazing, los cuales son inducidos por diferentes métodos de aportación calorífica a las muestras a unir como son: láser, ultrasonido, además del proceso brazing en horno de resistencias.

Por otro lado, se sugiere el empleo de cintas como material de aporte para unir materiales disímiles por el proceso brazing inducido por ultrasonido. Con el objetivo de mejorar la compatibilidad química entre ambos materiales disímiles, obteniendo con ello una zona de unión con una menor cantidad de fases intermetálicas. Así mismo, se tiene un mayor control de las dimensiones del gap de soldadura.

En base a la literatura, se emplean sales fluoroaluminadas (sales reactivas) como medio fundente para soldar acero inoxidable y aluminio. Con el fin de activar la disolución del metal base e iniciar la difusión de los elementos para generar la unión entre estos materiales. Comúnmente, se emplean temperaturas de 605°C para lograr la unión de los mismos.

3.3 Unión de pares difusivos mediante equipo para realizar análisis térmico diferencial (por sus siglas DTA)

En la actualidad es indispensable conocer las posibles fases frágiles en la unión soldada, y de esta manera lograr establecer los parámetros de proceso tales como temperatura, tiempo de residencia y velocidad de enfriamiento para así obtener uniones soldadas con una menor cantidad de fases fragilizadoras.

Es factible emplear el equipo DTA para realizar analizar la unión de diferentes materiales ya sea metálicos o materiales disímiles. Con el objetivo de lograr uniones a temperaturas controladas teniendo diferentes ciclos de

calentamiento y velocidades de enfriamiento, así mismo analizar las posibles fases presentes en la unión a diferentes parámetros de proceso.

La metodología empleada por Ruiz Vargas, J. et. al. es la base para la realización del caso de estudio desarrollado en esta monografía, debido a la disponibilidad y la factibilidad técnica del equipo para la realización de este estudio. Así establecer como una metodología viable el uso de la técnica del DSC-TG para llevar a cabo un estudio cinético de soldadura de materiales disímiles.

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO

4.1 Desarrollo Experimental

En este caso de estudio, se establece un campo de la soldadura por proceso brazing en horno de resistencias como una opción para la unión de materiales disimiles, empleando cintas de aluminio como material de aporte, así mismo una pasta de aluminio como agente catalizador para favorecer al proceso de unión de aluminio de la serie 6061 y acero inoxidable 304. No obstante, debido a la escasa información de unión de materiales disímiles por proceso brazing en horno, se procedió a realizar un caso de estudio para unir pares difusores de muestras de aluminio-aluminio y aluminio-acero inoxidable. Así mismo, registrar los eventos térmicos por la técnica de Análisis Térmico Diferencial y de Barrido.

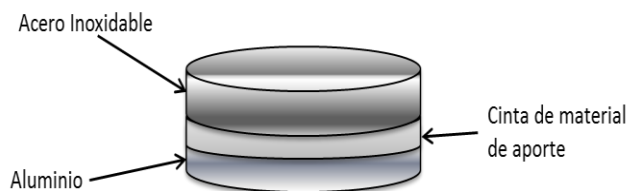


Figura 30.- Diagrama de tipo de unión a implementar en caso de estudio

A continuación se presenta de manera gráfica la metodología llevada a cabo en este caso de estudio.

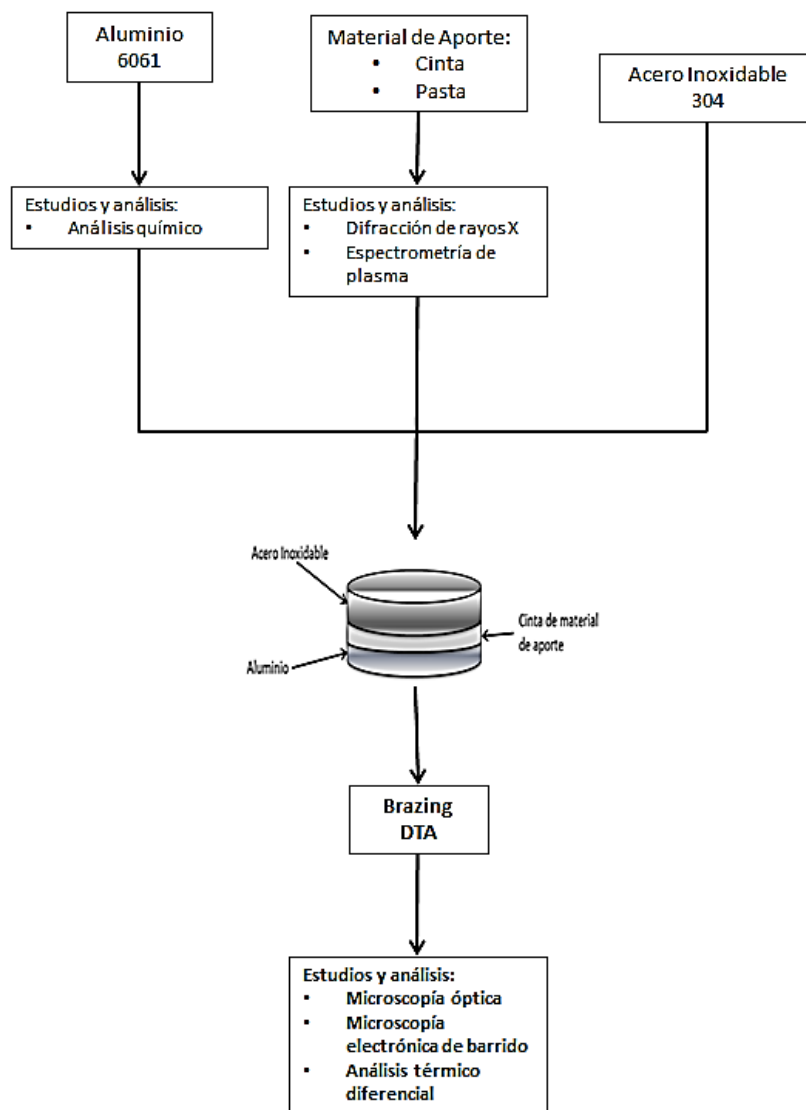


Figura 31.- Diagrama de bloques de la metodología empleada para realizar y analizar la muestra unida de acero inoxidable sobre sustratos de aluminio

Previo al desarrollo experimental, el trabajo se llevó a cabo en 3 diferentes etapas, las cuales consisten en la preparación de las muestras para proceder a realizar la experimentación y conocer la conducta del material.

Etapa 1.- Adquisición de materiales, equipo y caracterización de muestras.

Consistió en la adquisición de los materiales, caracterizar la materia prima: pasta, cinta de aluminio, acero inoxidable 304 y aluminio 6061.

Etapa 2.- Maquinado y acondicionamiento de materiales.

Consistió en el maquinado de los materiales base y la cinta de aluminio, tomando como referencia las dimensiones del crisol para realizar el estudio análisis térmico diferencial, esto con la finalidad de lograr la unión del par difusor.

Etapa 3.- Proceso Brazing en equipo para realización de análisis térmico diferencial.

Consistió en realizar la unión del par difuso por proceso brazing al mismo tiempo que se realiza el análisis térmico diferencial a una temperatura de 650 °C con un tiempo de residencia de 30 minutos.

4.1.1 Adquisición de materiales, equipo y caracterización de los materiales

4.1.1.1 Material

En esta etapa se detalla los materiales y sustancias empleadas, así como su rol en la preparación de las muestras de análisis, lo cual se hizo con las debidas precauciones para destacar con una mayor exactitud la influencia que tienen y su comportamiento en la experimentación. Con lo cual nos condujo a obtener una respuesta más real de cada una de ellas con el propósito de lograr un mejor conocimiento y comprensión del fenómeno de influencia.

Se utilizó barras de acero inoxidable 304 y aluminio 6061, los cuales tenían un diámetro de 10 mm para el acero inoxidable y de 19 mm para el caso del aluminio. De estas barras se obtuvieron muestras maquinadas de acuerdo a las dimensiones tomadas del crisol (ver Figura 37) a utilizar para el estudio del análisis térmico diferencial 5 mm de diámetro para ambos materiales, con un

espesor de 1.5 mm para el caso del aluminio y de 0.75 mm para el caso del acero inoxidable.

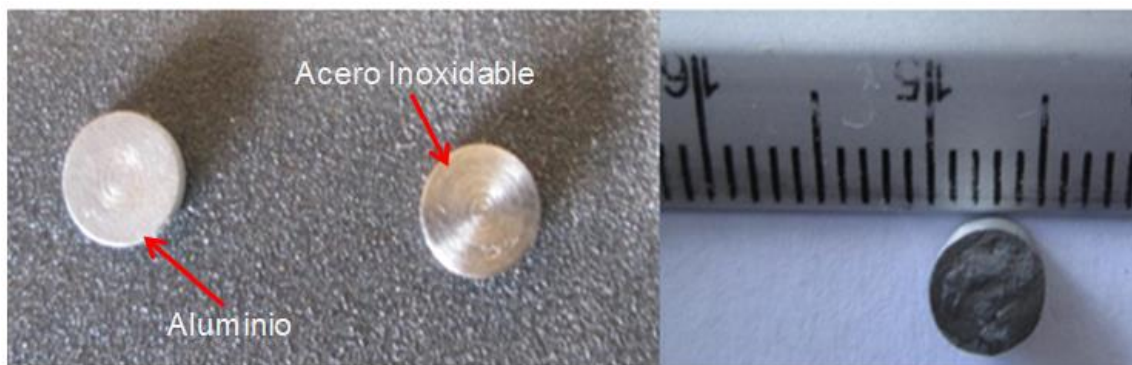


Figura 32.- Muestra de acero inoxidable y de aluminio de 5 mm de diámetro

El material de aporte empleado para el proceso de unión de acero inoxidable 304 y aluminio 6061 fue pasta rica en Zn (zinc) y Al (aluminio) de la marca FUSION serie ASN-892-600, además de cinta de aluminio los cuales se emplearon para la formación del par difusor. Así mismo, se empleó una cinta para llevar a cabo el proceso Brazing (Ver Figura 34).



Figura 33.- Pasta para soldadura

La pasta empleada es ASN 892-600, la cual se recomienda para aplicaciones tales como intercambiadores de calor, condensadores, etc. La composición química de la pasta se observa en la siguiente tabla.

Tabla 15.- Composición química de material de aporte (28)

Material de aporte ASN 892-600							
Número de fusión	Composición química de la aleación		Temperatura de Solidus		Temperatura de Liquidus		Especificación
	Zn	Al	°F	°C	°F	°C	
892	80	20	756	402	892	478	-

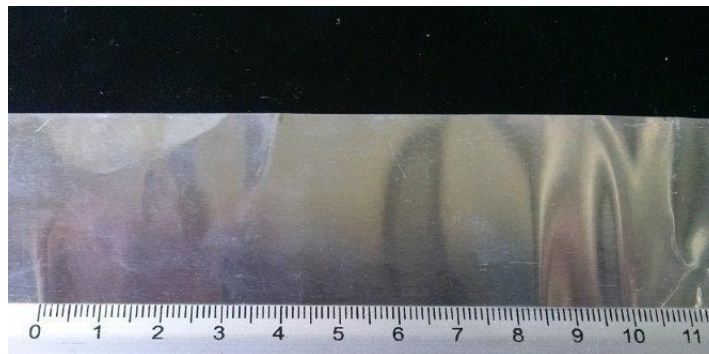


Figura 34.- Cinta de aluminio

Se utilizó gas de argón de alta pureza (99.999%) para generar una atmósfera inerte en el interior del equipo para realizar el análisis térmico diferencial.



Figura 35.- Tanque de gas argón (Ar) de alta pureza

4.1.1.2 Equipo

Se usó un equipo para realizar análisis térmico diferencial con un controlador de velocidades de rampas de calentamiento y enfriamiento, dependiendo del proceso o estudio a realizar.

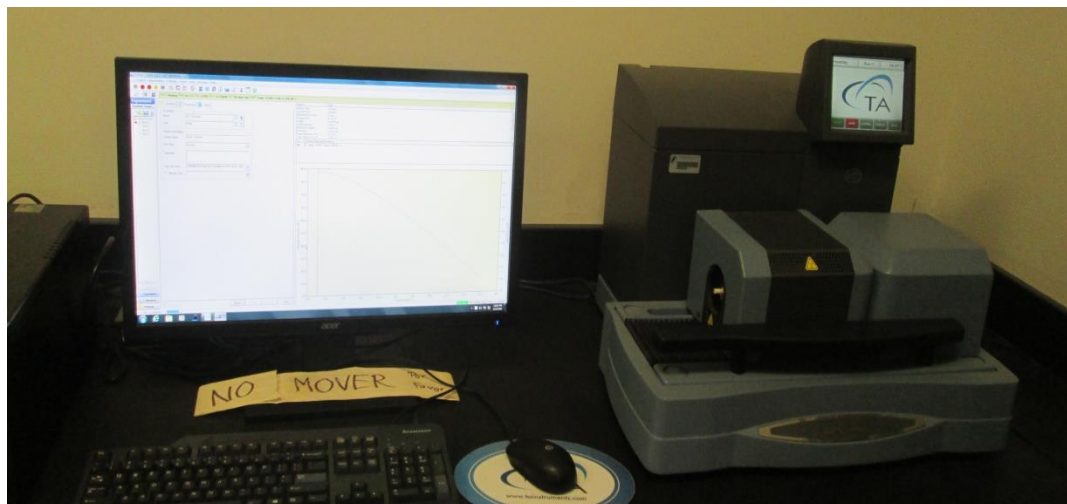


Figura 36.- Equipo para análisis térmico diferencial

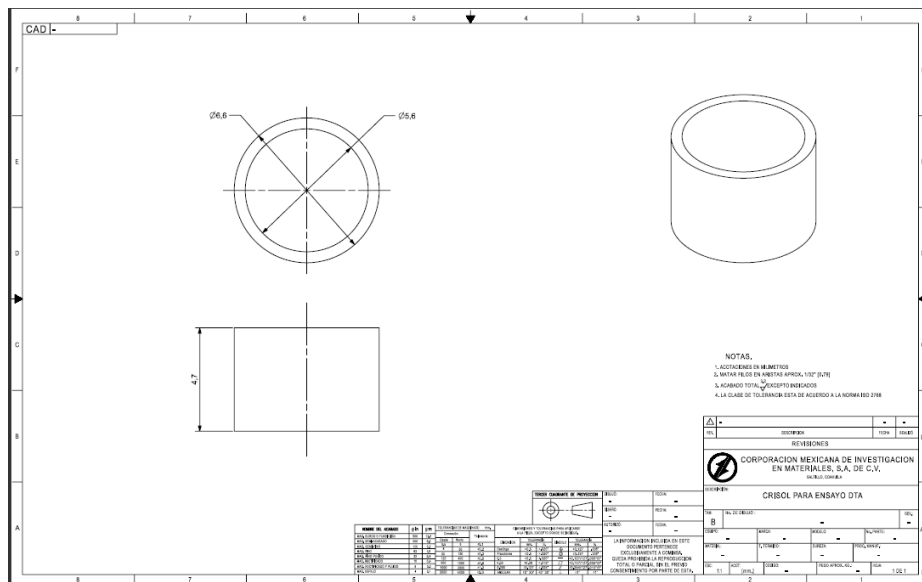


Figura 37.- Plano con las dimensiones del crisol para análisis térmico diferencial

Para la preparación metalográfica se utilizó desbastadoras y pulidoras de velocidad variable (240-300 rpm). La inspección de las muestras se llevó a cabo en un microscopio óptico marca Olympus.

4.1.1.3 Caracterización de los materiales

4.1.1.3.1 Análisis de la cinta (material de aporte)

Se analizó la cinta a emplear como material de aporte para el proceso de unión de materiales disímiles por brazing, primeramente se procedió a realizar la caracterización de la cinta por Difracción de Rayos X marca Phillips X'Pert 3040. En base al análisis de los resultados con esta técnica en DRX, se procedió a caracterizarlo por el método de espectrometría de plasma mediante un equipo marca Bruker.

Las muestras empleadas para la formación del par difusor se introdujeron a al crisol del equipo, previamente recibieron un previo desbaste en las caras de contacto con el material de aporte (cinta de aluminio y pasta de aporte). Se

programó una rampa de calentamiento de 10 °C/min hasta la temperatura de operación de 650 °C con un tiempo de mantenimiento de 30 minutos. Posteriormente, las muestras se dejaron enfriar en el interior de la cámara del equipo.

4.1.2.1 Caracterización de las muestras unidas por brazing

La identificación del estado de los especímenes se realizó mediante un estudio metalográfico, el cual se llevó a cabo mediante las siguientes prácticas:

- Montaje de las muestras en condiciones de temperatura ambiente.
- Montaje a temperatura y presión.
- En el desbaste de las superficies de análisis se emplearon abrasivos de carburo de silicio dentro de un rango que va desde 240 hasta 600.
- El acabado a espejo se realizó sobre paños microcloth y empleando pasta de diamante de 1 μ m y alcohol etílico para la eliminación de los residuos de pulido y formación de ralladuras.
- Ataque electroquímico de las superficies de estudio: este ataque deberá tener una duración de 3 segundos para revelar la microestructura (acero inoxidable). El agente químico a emplear consiste en 10 ml de H₃PO₄, 50 ml H₂SO₄ y 40 ml HNO₃ empleando una fuente de poder de 3V y 5 A.

4.2 Resultados y discusión de resultados del caso de estudio

En esta sección se presenta los resultados obtenidos durante la experimentación y se hará una discusión de los mismos para fundamentar las razones que dieron origen a los diferentes fenómenos que se observaron durante los ensayos experimentales.

La Figura 38 muestra un patrón de difracción de rayos X del material de aporte en forma de cinta. Se aprecia únicamente picos intensos de aluminio. Debido a

que la técnica de DRX detecta compuestos o elementos superiores al 5%. Por lo tanto, se procedió a realizar un análisis por Espectrometría por Plasma para obtener una cuantificación más exacta de la cinta. En este caso, la Tabla 16 muestra los contenidos de los elementos detectados por Plasma.

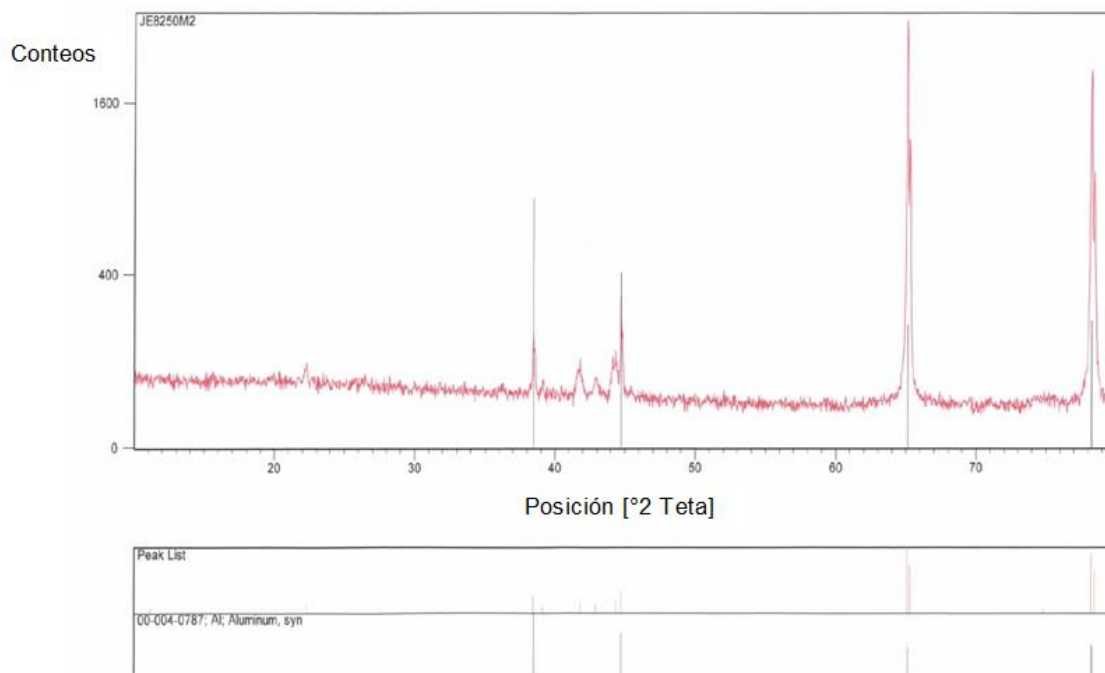


Figura 38.- Ensayo de difracción de rayos X de la cinta de aluminio

Tabla 16.- Composición química de la cinta

Compuesto	Porcentaje
Si	0,502 %
Fe	0,474 %
Cu	0,129 %
Mn	1,05 %
Mg	0,013 %
Cr	0,002 %
Ni	0,004 %
Zn	0,058 %
Sr	0,0001 %
Ti	0,022 %
V	0,003 %
Al	Resto

Los elementos en mayor contenido de Si y Cu permiten formar eutécticos con el aluminio y, de esta manera bajar el punto de fusión en el Brazing. El Mn y el Fe incrementan la resistencia en la zona de unión por Brazing. No obstante, contenidos elevados de Fe y el Si forman intermetálicos aciculares de AlFeSi.

4.2.1 Unión de par difusor por proceso brazing

Se realizó la unión de 2 diferentes pares difusores (composición de materiales), el primero de aluminio-aluminio y el segundo de aluminio- acero inoxidable, esto con la finalidad de obtener información relevante para la comparación de los diferentes materiales unidos.

4.2.1.1 Par difusor aluminio-aluminio

Para la unión del par difusivo de aluminio 6061, se realizó mediante la aplicación combinada de cinta y pasta, con lo cual se logró una unión de los materiales (Ver Figura 39).



Figura 39.- Par difusor de aluminio 6061

La muestra se preparó metalográficamente para realizar un análisis preliminar mediante microscopía óptica, de lo cual se logra observar una fusión completa de los materiales de aporte y por lo tanto una unión de los materiales base (Ver Figura 40).



Figura 40.- Micrografía de la unión del par difusor Al-Al a 650°C por 30 min de permanencia en el equipo de Análisis Térmico Diferencial

Así mismo, se aprecian fases tipo β y eutécticos (Ver Figura 41). Esto sugiere que la combinación de los materiales de aporte (pasta + cinta) en la unión del Al por brazing, cierran completamente el gap de unión. Debido al contenido de fundentes que contiene la pasta y no la cinta.

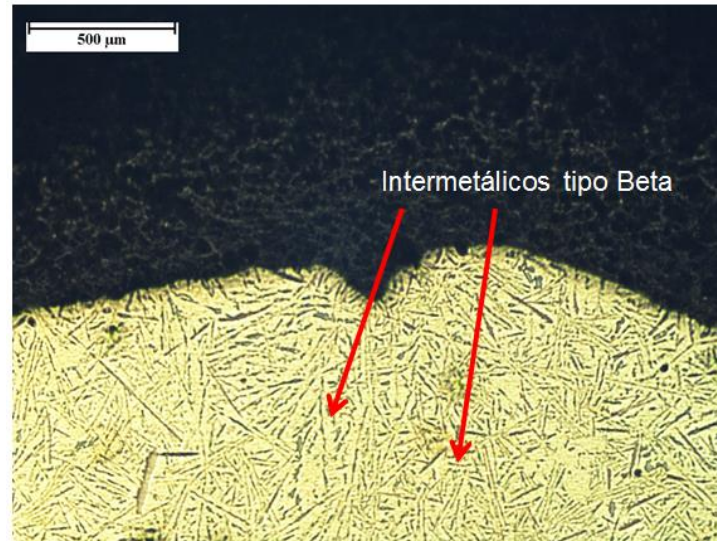


Figura 41.- Micrografía de fases en la zona de unión por Brazing a 650°C y 30 min de permanencia en el equipo de Análisis Térmico Diferencial

La Figura 42 muestra los resultados del análisis térmico diferencial del par difusivo aluminio – aluminio unido por proceso brazing. Se aprecia una curva de flujo de calor exotérmica a 589.22 °C. Este dato numérico indica la temperatura del brazing del par difusor del aluminio-aluminio.

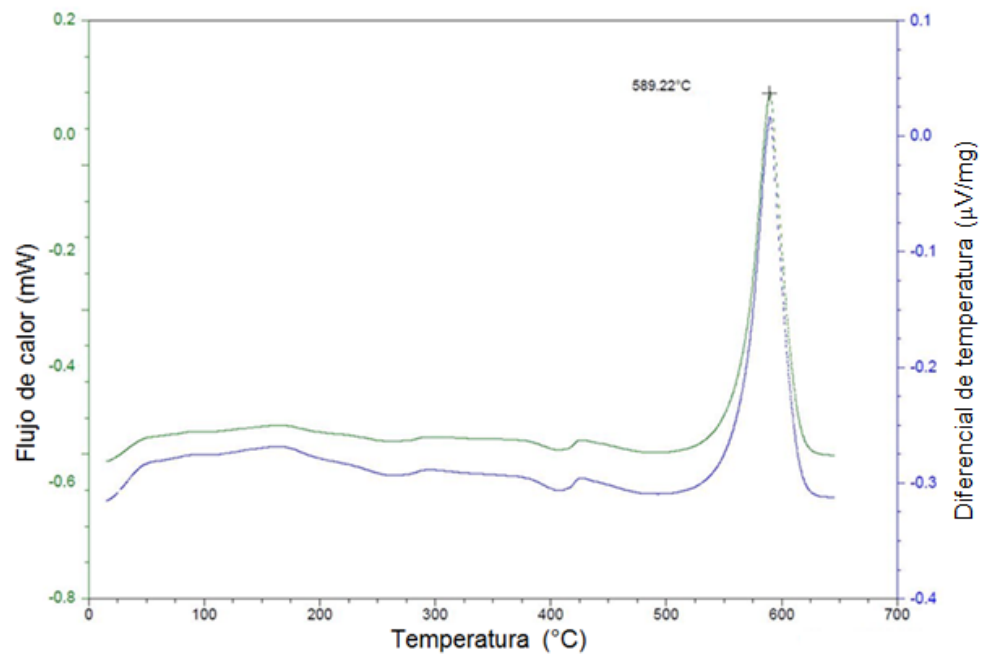


Figura 42.- Análisis térmico diferencial y de barrido del par difusivo de aluminio-aluminio soldado por brazing en el equipo del DSC-TG

4.2.1.1 Par difusor aluminio-acero inoxidable

Para el proceso de unión de aluminio 6061- acero inoxidable 304, se realizó mediante cinta de aluminio, con el cual no se logró observar una unión de los materiales, por lo tanto, se descartó este proceso brazing con la cinta.

Otro par difusor de aluminio y acero inoxidable se empleó para estudiar la factibilidad del proceso brazing en la unión de estos materiales disímiles. En este caso, en base a los resultados obtenidos, se realizó el proceso brazing mediante únicamente aplicando el material de aporte en forma de pasta. Se observa en la unión de estos materiales y la formación de una zona de reacción (zona de unión). La microporosidad es debido a la condición de la muestra de aluminio no del proceso brazing. Cabe mencionar que se observan intermetálicos aciculares en el aluminio y eutécticos. En la interface del aluminio y el acero inoxidable, se aprecia una capa de reacción debido a la formación de una fase líquida transitoria que al solidificar crece de forma isotérmica.

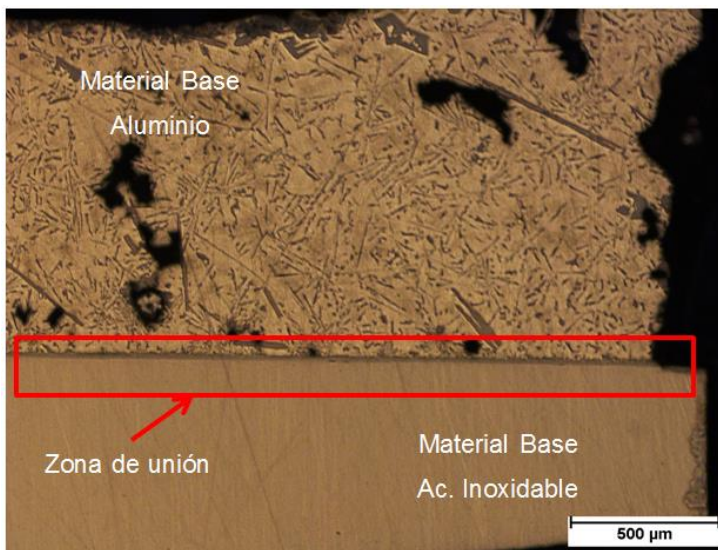


Figura 43.- Brazing de par difusivo con materiales disímiles acero inoxidable-aluminio (imagen tomada a 50x)

En contraste, en la Figura 43 se muestra el análisis térmico diferencial de una reacción endotérmica a los 550°C, que es la temperatura del brazing del material disímil aluminio y acero inoxidable, la cual es menor al brazing del aluminio-aluminio (Ver Figura 44). Por otro lado, este evento térmico detectado a 550°C, es un resultado que es consistente con la postulación descrita anteriormente, en la formación de una fase líquida transitoria entre el aluminio y el acero inoxidable. Así mismo, antes de los 550°C se muestra una serie de eventos térmicos que son ajenos al proceso brazing. Es decir, son atribuidos a transformaciones de fases y, probablemente a las fluctuaciones del peso de las muestras en ambos crisoles. Por lo tanto, debido al alcance de este caso de estudio monográfico no se contempla describirlos, ya que requiere de un estudio cinético riguroso con mayor tiempo y, bajo un sistema de un diseño de experimentos.

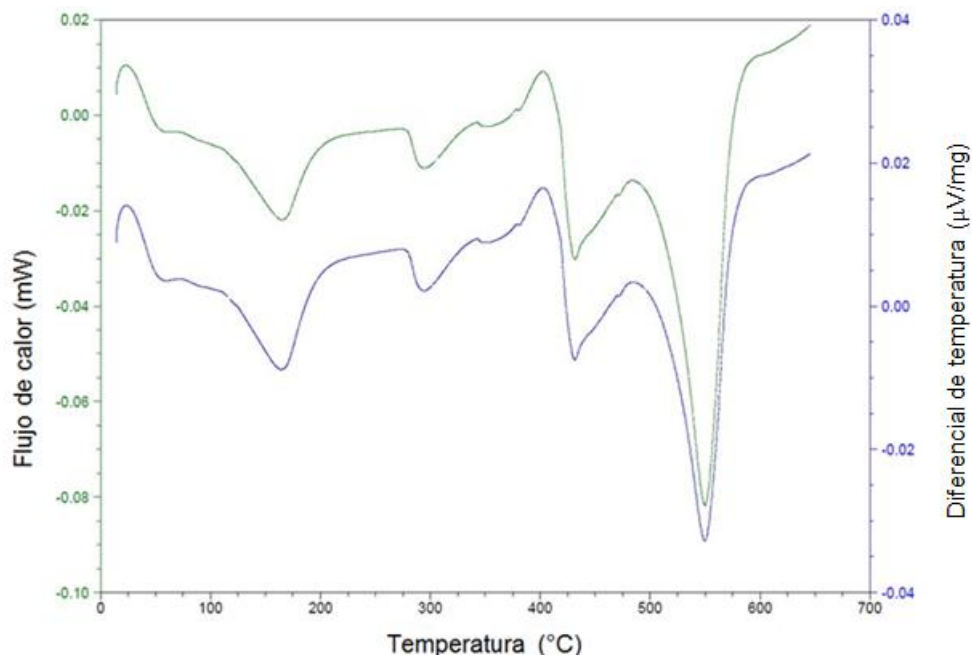


Figura 44.- Análisis térmico diferencial y de barrido del par difusivo de aluminio-acero inoxidable soldado por brazing en el equipo del DSC-TG

En este caso de estudio, se analizó por Microscopía Electrónica de Barrido el cordón de soldadura del sistema acero inox. 304 y aluminio unido por brazing

empleando el equipo de DSC-TG. Con el objetivo de inspeccionar la zona de unión y analizar la composición química de diversas zonas por EDX.

La Figura 45 muestra una imagen de electrones retrodispersados y la naturaleza química de tres zonas analizadas por EDX de la zona de unión del sistema acero inox. 304 y aluminio. Se aprecia que la zona I tiene mayor contenido de Fe y Cr y en menor contenido Mn, Ni. Estos elementos corresponden a la composición química del metal base. Por otro lado, las trazas de Al y Zn son elementos que difunden sustitucionalmente de la zona de unión hacia el metal base. Se postula que los elementos de N y S son impurezas de los reactivos químicos empleados en el ataque electroquímico para revelar microestructura.

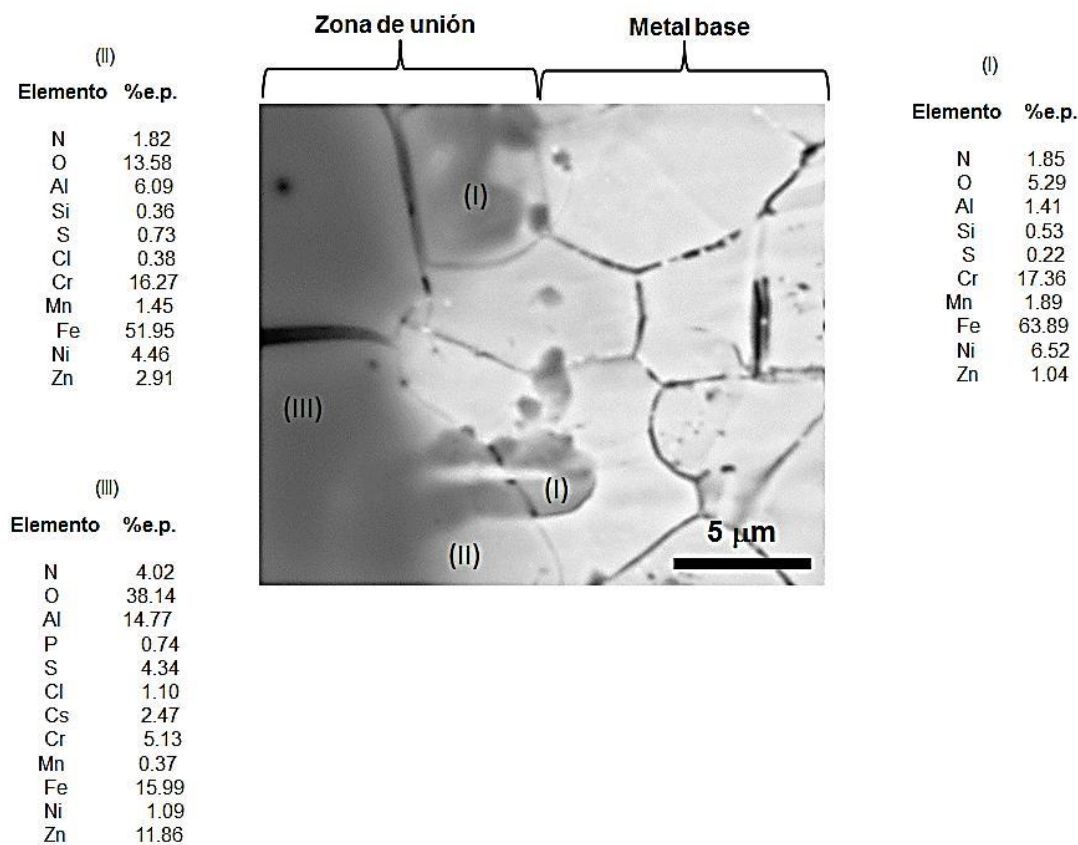


Figura 45.- Imagen de electrones retrodispersados y EDX sobre las zonas de unión del sistema disímil acero inoxidable 304 y aluminio soldado por brazing en el equipo del DSC-TG

En la zona II, los contenidos de Fe, Cr, Mn, Ni, Al y N no varían significativamente. Mientras que el contenido de O incrementa considerablemente de 5.29 a 13.58 % e.p. debido a una ligera oxidación del Fe u otros elementos de transición (Ni, Cr, principalmente). Por otro lado, se sugiere que el contenido de Zn se incrementa debido a la composición química de la pasta y a la cercanía que tiene con la zona de unión. Esta afirmación es consistente con el alto contenido de 11.86 % e.p. de Zn en el análisis químico detectado por EDX de la zona III (zona de unión). Cabe resaltar, el incremento del contenido de O debido a la oxidación del Al y Fe. Los elementos de Cl, S, P y N son impurezas provenientes de los ácidos del ataque electroquímico. En la composición química de la zona III se resalta un contenido de 2.47 % e.p. de Cs. En la literatura (30) se establece que este elemento es un catalizador e ingrediente de los materiales de aporte base Al. Con el fin de bajar el punto de fusión por reacciones altamente exotérmicas del metal base a través de la descomposición química del nitrato de Cs.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones del estudio bibliográfico

- Es factible la unión de pares difusivos mediante equipo para realizar análisis térmico diferencial y termogravimétrico
- Es factible la unión de materiales disímiles mediante proceso brazing
- Es de suma importancia para la formación de compuestos intermetálicos la energía libre de Gibbs, debido a que a mayor negatividad mayor será la cantidad de intermetálicos y por lo tanto la unión soldada presentara una mayor fragilidad debida a los ellos.

5.2 Conclusiones de los resultados experimentales

- Es factible la unión de pares difusivos mediante equipo para realizar análisis térmico diferencial y termogravimétrico
- Es factible la unión de materiales disímiles mediante proceso brazing mediante el empleo de pasta

BIBLIOGRAFÍA

1. **BEHR-HELLA**. Refrigeración del vehiculo, conocimientos básicos para el taller.
2. *Effects of welding parameters and tool geometry on properties of 3 003-H18 aluminum alloy to mild steel friction stir weld*. **Dehghani, M., Akbari Mousavi, S.A.A. y Amadeth , A.** Teheran : Elsevier, 2012.
3. **Askeland, Donald R.** *Ciencia e ingeniería de los materiales*. s.l. : Internacional Thomson.
4. **Avner, Sydney H.** *Introduccion a la metalurgia fisica*. Naucalpan de Juárez, Edo. de México : Mc Graw Hill, 1988. 968-6046-01-1.
5. **AIMEN, Centro Tecnológico**. Obtesol. *Observatorio Tenológico de la Soldadura*. [En línea]
http://www.obtesol.es/index.php?option=com_content&task=view&id=109&Itemid=30.
6. **Mott, Robert L. y P.E.** *Diseño de elementos de máquinas*. Naucalpan de Juaréz, Edo. de México : Pearson Education, Inc., 2006. 970-26-0812-0.
7. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. **Callister, William D.** s.l. : Reverte S. A. .
8. <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/26/7-aceros-inoxidables/>.
<http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/26/7-aceros-inoxidables/>. [En línea]
 [Citado el: 10 de Febrero de 2015.]
<http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/26/7-aceros-inoxidables/>.
9. **Harvey, Phillip D.** *Engineering properties of steel*. s.l. : American Society for Metals, 2011.
10. **SUMITEC**. [sumiteccr.com](http://www.sumiteccr.com). [En línea]
<http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>.

11. **Smith, William F. y Hashemi, Javad.** *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales.* s.l. : Mc Graw Hill, 2006.
12. **ANSI/AWS D3.7-90. construction, AWS Committte on welding in marine.** Miami : American Welding Society, 1997.
13. **International, ASM.** *ASM Handbook Volume 2 Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials.* s.l. : ASM INTERNATIONAL.
14. **symbols., American Welding Society (AWS) A2 committe on definitions and.** *Standard Welding Terms and Definitions.* s.l. : American Welding Society, 2009.
15. **INTERNATIONAL, ASM.** *ASM HANDBOOK, VOLUME 6 Welding Brazing and Soldering.* s.l. : ASM INTERNATIONAL.
16. **Jeffus, Larry.** *Soldadura: principios y aplicaciones.* s.l. : Paraninfo, 2009.
17. *Modelado matemático de la transferencia de masa en la unión soldada, entre titanio grado uno con material de forma, mediante soldadura fuerte al vacío.* **Rodriguez Miramontes, Jorge.** México : s.n., 2003.
18. **Schwartz, Mel M.** *Brazing second Edition.* s.l. : ASM Internation.
19. **Society, American Welding.** *Welding Handbook Volume 2.* s.l. : American Welding Society.
20. **Soldering, AWS C3 Committe on Brazing and.** *Brazing Handbook (5th Edicion).* s.l. : American Welding Society (AWS), 2007. 978 0 87171 046 8.
21. **Society, American Welding.** *Welding Handbook: Volume 4 Metals and Their Weldability.* 0 87171 218 0.
22. *Ultrasound-assisted brazing of Cu/Al dissimilar metals using a Zn-3Al filler metal.* **Yong, Xiao, y otros, y otros.** s.l. : Elsevier, 2013.
23. *CO2 laser welding-brazing characteristics of dissimilar metals AZ31BMg alloy to Zn coated dual phase steel with Mg based filler.* **Liqun Li, y otros, y otros.** s.l. : Elsevier, 2012.

24. *Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding-brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al-Cu filler metal.* **S.B, Lin, y otros, y otros.** s.l. : Elsevier, 2009.
25. *First melting stages during isothermal brazing, of Ni/BNI-2 couples.* **Ruiz Vargas, J., y otros, y otros.** s.l. : Elsevier, 2013.
26. *Vacuum brazing of TiAl alloy to 40Cr steel with Ti60Ni22Cu10Zr8 alloy foil as filler metal.* **Dong, Honggang, y otros, y otros.** s.l. : Elsevier, 2012.
27. *Brazing of aluminium and aluminum to steel.* **Khorunov, V.F. y Sabadash, O.M.** Ucrania : Paton Electric Welding Institute.
28. *Microstructure development during isothermal brazing of Ni/BNi-2 couples.* **Ruiz Vargas, J., y otros, y otros.** Montreal : elsevier, 2012.
29. **INCORPORATED, FUSION.** FUSION-INC. [En línea] [Citado el: 10 de Enero de 2015.] <http://www.fusion-inc.com/>.
30. **Valencia, Asdrúbal.** *Tecnología del tratamiento térmico de los materiales.* Antioquia : Universidad de Antioquia, 1992.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Ejemplos de sistemas para refrigeración del vehículo (1)	13
Figura 2.- Formación de intermetálicos Al/Fe (2)	14
Figura 3. Sistema de designación de los aceros (6)	20
Figura 4.- Diagrama Fe – Cr (8).....	24
Figura 5.- Diagrama Fe-Cr-Ni a temperatura ambiente (8)	25
Figura 6.- Acero inoxidable martensítico conteniendo grandes carburos primarios y carburos pequeños formados durante el revenido (x350) (3).....	26
Figura 7.- Acero inoxidable austenítico (x500) (3)	27
Figura 8.- Diagrama de Schaeffler (8).....	30
Figura 9.- Las secciones transversales de MMCs reforzados con fibras típicas (a) Compuesto de boro/aluminio continuo reforzado con fibras a 142 micras, los diámetros son recubiertos con carburos de boro en una matriz de aleación 6061. (b) Compuesto de grafito/aluminio, sección trasversal con fibras de 10 micras de diámetro de grafito (40% vol.) en una matriz de aleación de aluminio 2014. (c) Una matriz de aleación 6061 de aluminio reforzado con 40% vol. con partículas de carburos de silicio SiC. (d) 20% vol. De SiC en una matriz de aluminio. Y (f) presentan 81% vol. Altamente reforzada con partículas de SiC en una matriz de aleación de aluminio. (13)	39
Figura 10.- Distribución de temperatura después de un tiempo de calentamiento específico en una placa de acero gruesa. [15]	43
Figura 11.- Espectro de intensidad de calor para diferentes procesos de soldadura por fusión (15)	44
Figura 12.- Esquema de soldadura empleando un modelo térmico. (15)	44
Figura 13.- Esquema del principio de la atracción capilar para líquidos seleccionados cuando el líquido se encuentra entre dos placas de vidrio. (15)	46
Figura 14.- Diferencia en las propiedades de flujo entre materiales de aporte eutécticos y no eutécticos (A) Calentamiento lento en horno de AWS BAg-2 produce un flujo no uniforme por capilaridad teniendo una acción de licuación; (B) Un calentamiento rápido de AWS BAg-2, se tiene resultados en una mejor	

fluidez por acción de capilaridad; (C) Calentamiento lento en horno de AWS Bag-1 se tiene como resultado una soldadura uniforme debido a que no presenta licuación, además de un calentamiento uniforme. (20).....	50
Figura 15.- Horno continuo para brazing (20)	52
Figura 16.- Microestructura de la aleación AZ31B y (b) espesor del recubrimiento de zinc en un acero DP980. (23).....	55
Figura 17.- Diagrama esquemático del proceso de brazing asistido por ultrasonido. (22).....	56
Figura 18.- Imágenes SEM de (a) unión típica de Cu/Al (400 °C), (b) empleando láminas de Cu/Al como material de aporte (400 °C), (c) 440 °C y (d) 480 °C. (22)	57
Figura 19.- Imágenes SEM, en diferentes posiciones en la unión aluminio-acero (24)	58
Figura 20.- Microestructura de la junta empleando proceso brazing a una temperatura de 900 °C para (a) 5 minutos, (b) 10 minutos y (c) 15 minutos. (26)	59
Figura 21.- Diagrama de fases de las sales de fluoruros y aluminio. (27)	60
Figura 22.- Microestructura de una unión soldada entre aluminio 1050 (negro) y acero inoxidable 12Kh18N10T (sin material de aporte, empleando fundente FAF540 a una temperatura de 605 °C +/- 5°C.....	61
Figura 23.- Microestructura de una unión soldada entre aluminio 1050 y acero inoxidable 12Kh18N10T (material de aporte: mezcla de FAF540 y polvo de AKD12 (Al-12Si) en relación 50/50 %peso; empleando proceso brazing a temperatura de 605 °C +/- 5°C.	61
Figura 24.- Ilustración esquemática de las diferentes etapas de soldadura fuerte isotérmica en el caso de un metal puro. Uniones soldadas por brazing usando una aleación de bajo punto de fusión	62
Figura 25.- Diagrama DTA registrado durante el calentamiento el enfriamiento adicional a una lámina de BNi-2 (28).....	63
Figura 26.- Esquema del montaje experimental utilizado para el análisis de datos durante el Ni/BNi-2 unido mediante soldadura brazing (28).....	64

Figura 27.- Análisis cuantitativo de microestructuras: (a) representación esquemática de las diferentes capas de una muestra de soldadura fuerte, junto con el método utilizado para medir el espesor de la junta.; (b) Imagen de una etapa interrumpida del proceso iterativo utilizado para medir el tamaño de partícula del boro. (25).....	64
Figura 28.- (a) Evolución del espesor de la capa de soldadura fuerte como una función de la máxima temperatura de calentamiento. La velocidad de calentamiento es de 25°C/min, excepto para el punto a que se refiere como «calentamiento lento», el cual se calentó a 1 °C/min para longitudes iguales a 2», (b) Evolución de la zona media y el tamaño medio de la interfaz de boruros en función de la máxima temperatura de calentamiento (25)	65
Figura 29.- Microestructuras ópticas observadas después de ciclos de calentamiento, los cuales se detuvieron a diferentes temperaturas (25)	66
Figura 30.- Diagrama de tipo de unión a implementar en caso de estudio	70
Figura 31.- Diagrama de bloques de la metodología empleada para realizar y analizar la muestra unida de acero inoxidable sobre sustratos de aluminio ...	71
Figura 32.- Muestra de acero inoxidable y de aluminio de 5 mm de diámetro..	73
Figura 33.- Pasta para soldadura.....	73
Figura 34.- Cinta de aluminio	74
Figura 35.- Tanque de gas argón (Ar) de alta pureza	75
Figura 36.- Equipo para análisis térmico diferencial	75
Figura 37.- Plano con las dimensiones del crisol para análisis térmico diferencial	76
Figura 38.- Ensayo de difracción de rayos X de la cinta de aluminio.....	78
Figura 39.- Par difusor de aluminio 6061	80
Figura 40.- Micrografía de la unión del par difusor Al-Al a 650°C por 30 min de permanencia en el equipo de Análisis Térmico Diferencial.....	80
Figura 41.- Micrografía de fases en la zona de unión por Brazing a 650°C y 30 min de permanencia en el equipo de Análisis Térmico Diferencial.....	81
Figura 42.- Análisis térmico diferencial y de barrido del par difusivo de aluminio-aluminio soldado por brazing en el equipo del DSC-TG	82

Figura 43.- Brazing de par difusivo con materiales disímiles acero inoxidable-aluminio (imagen tomada a 50x).....	82
Figura 44.- Análisis térmico diferencial y de barrido del par difusivo de aluminio-acero inoxidable soldado por brazing en el equipo del DSC-TG.....	83
Figura 45.- Imagen de electrones retrodispersados y EDX sobre las zonas de unión del sistema disímil acero inoxidable 304 y aluminio soldado por brazing en el equipo del DSC-TG.....	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.- Grupos de aleaciones en el sistema de numeración AISI (6)	21
Tabla 2.- Designaciones, composiciones, propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de los aceros inoxidables ferríticos, austeníticos, martensíticos y endurecidos por precipitación (7).....	22
Tabla 3. Composiciones y propiedades típicas de los aceros inoxidables (3) ..	25
Tabla 4.- Composición química del acero AISI 304 (9).....	29
Tabla 5.- Propiedades físicas del acero AISI 304 (9).....	29
Tabla 6.- Conductividad térmica del acero AISI 304 (9).....	29
Tabla 7.- AISI 304: Propiedades mecánicas del acero AISI 304 (9)	30
Tabla 8.- Elementos presentes en el cromo equivalente y el níquel equivalente (8)	31
Tabla 9.- Composición química de aleaciones de aluminio usados por la industria marítima (12).....	32
Tabla 10.- Composiciones, propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de ocho aleaciones de aluminio comunes (7).....	33
Tabla 11.- Grupos de aleaciones de aluminio (11)	34
Tabla 12.- Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio. (12)	37
Tabla 13.- Tipos de soldadura (17).....	41
Tabla 14.- Comparación de los tipos de proceso de soldadura por arco, Soldering, y Brazing (15)	45
Tabla 15.- Composición química de material de aporte (28)	74
Tabla 16.- Composición química de la cinta	79