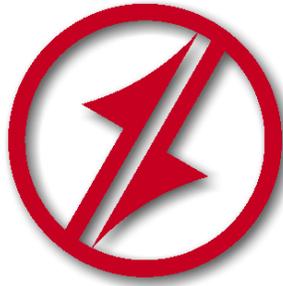


CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTADO DEL ARTE SOBRE LA SOLDABILIDAD DE UNIONES DISÍMILES
MAGNESIO/ALUMINIO Y MAGENESIO/ACERO UTILIZANDO LOS
PROCESOS DE SOLDADURA RSW, BRAZING Y LBW.**

POR

DIEGO ARMANDO GUERRERO MORALES

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA. OCTUBRE 2011

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTADO DEL ARTE SOBRE LA SOLDABILIDAD DE UNIONES DISÍMILES
MAGNESIO/ALUMINIO Y MAGNESIO/ACERO UTILIZANDO LOS
PROCESOS DE SOLDADURA RSW, BRAZING Y LBW.**

POR

DIEGO ARMANDO GUERRERO MORALES

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA. OCTUBRE 2011

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

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **“ESTADO DEL ARTE SOBRE LA SOLDABILIDAD DE UNIONES DISÍMILES MAGNESIO/ALUMINIO Y MAGNESIO/ACERO UTILIZANDO LOS PROCESOS DE SOLDADURA RSW, BRAZING Y LBW”**, realizada por el alumno (a) **DIEGO ARMANDO GUERRERO MORALES**, con número de matrícula **10ES-105** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dr. Felipe de Jesús García
Vázquez
Tutor Académico

M.T. Edgar Daniel Aguilar
Cortés
Asesor

Vo. Bo.
M.C. Claudia A. González Rodríguez
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 **DIEGO ARMANDO GUERRERO MORALES**, una vez leída y revisada la Monografía titulada “**ESTADO DEL ARTE SOBRE LA SOLDABILIDAD DE UNIONES DISÍMILES MAGNESIO/ALUMINIO Y MAGNESIO/ACERO UTILIZANDO LOS PROCESOS DE SOLDADURA RSW, BRAZING Y LBW**”, 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 12 de Octubre de 2011.

Dr. Guillermo González
Múzquiz
Presidente

M.C. Gabriel García
Cerecero
Secretario

Dr. Felipe de Jesús García
Vázquez
Vocal

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT, por la beca de manutención otorgada para la realización de esta Especialidad y proyecto de Monografía.

A COMIMSA, por la beca académica brindada para lograr la culminación de mis estudios de Especialidad.

Y a todas las personas que estuvieron apoyándome durante mi desarrollo profesional, mi más sincero agradecimiento por siempre...

A mis padres y hermanos, por sus consejos y apoyo incondicional.

A Claudia, por su incondicional apoyo que me ha brindado, sin trabas ni condiciones para mi crecimiento profesional. Este es el principio de un largo proyecto que emprenderemos.

Al Dr. Felipe García y el Maestro Edgar Aguilar, por su dedicación, tiempo y conocimientos otorgados para la realización de esta Monografía.

A todas aquellas personas que de alguna u otra forma colaboraron en el desarrollo de este trabajo.

SÍNTESIS

En este trabajo se efectúa un estudio a detalle acerca de las uniones disímiles Magnesio/Aluminio y Magnesio/Acero en base a información documentada. Las principales problemáticas en cuanto a la soldabilidad de estos materiales son los diferentes puntos de fusión, potenciales eléctricos, estructura cristalina, entre otras.

Dentro del análisis, acerca de las uniones Mg/Al se puede mencionar que la principal problemática es la susceptibilidad que presentan este tipo de aleaciones frente a los mecanismos de corrosión, que es adjudicable en gran medida a la diferencia de potenciales presentes en las mismas. Para el caso de una unión Mg/Acero esta problemática se agudiza debido a que la diferencia de potencial que se incrementa con respecto a una unión Mg/Al.

Con respecto a la formación de fases intermetálicas en las uniones Mg/Al, se denota que este tipo de fases conllevan a la fragilización en la zona de soldadura resultando mediante pruebas mecánicas la presencia de agrietamiento ó fractura, dentro de esta clase de uniones disímiles también existen estudios en base a la formación de óxidos.

Es necesaria la realización de un estudio a detalle acerca de este tipo de uniones debido a que las innovaciones dentro de la rama automotriz pretenden reducir las emisiones de CO₂, empleando metales ligeros como lo es el caso del aluminio y el magnesio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

SÍNTESIS	i
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Justificación	3
1.4 Planteamiento del Problema	4
1.5 Aportación Tecnológica	4
1.6 Alcance	4
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 Procesos de Soldadura	6
2.1.1 Soldadura por Resistencia – ERW	8
2.1.1.1 Principios del Proceso ERW	9
2.1.1.2 Proceso de Soldadura RSW	9
2.1.1.3 Electrodo para el Proceso RSW	11
2.1.1.4 Proceso Híbrido Brazing-Resistencia	12
2.1.2 Soldadura con Rayo Laser – LBW	13
2.1.2.1 Principios del Proceso de Soldadura con Rayo Laser	13
2.1.2.2 Láseres de Estado Sólido	14
2.1.3 Soldadura Fuerte – Brazing	15
2.1.3.1 Principios del Proceso de Soldadura Brazing	16
2.1.3.2 Metales de Aporte para el Proceso de Soldadura Brazing	17

2.1.3.3 Fundentes para el Proceso de Soldadura Brazing	18
2.2 Metales de Aplicación	19
2.2.1 Aleaciones Base Magnesio	19
2.2.1.1 Designaciones de las Aleaciones Base Magnesio	19
2.2.2 Aleaciones Base Aluminio	21
2.2.2.1 Designaciones de las Aleaciones Base Aluminio	22
2.2.2.2 Aleaciones Aluminio-Magnesio	23
2.2.3 Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS)	24
2.2.3.1 Aceros Doble Fase (DP)	24
2.3 Corrosión	25
2.3.1 Corrosión Electroquímica	26
2.3.1.1 Corrosión Galvánica	27
2.3.1.2 Aportes Brazing en el Proceso de Soldadura RSW como método para reducir la Corrosión en Uniones Disímiles Aluminio-Magnesio	28
2.4 Fases Intermetálicas	30
2.4.1 Influencia de Fases Intermetálicas en Unión Disímil Aluminio-Magnesio Mediante el Proceso de Soldadura RSW	30
2.4.2 Influencia de Fases Intermetálicas en las Propiedades Mecánicas de la Unión de los materiales Aluminio-Magnesio mediante el proceso LBW	36
2.5 Óxidos	39
2.5.1 Óxidos Metálicos	39
2.5.2 Efecto de Recubrimiento de Zinc en la reducción de Óxidos Metálicos de la Unión Magnesio-Acero mediante el Proceso de Soldadura RSW	40
CAPÍTULO 3 ANALÍISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA	47
3.1 Adición de Aportes Brazing en la Unión Aluminio/Magnesio mediante el Proceso de Soldadura RSW	47
3.2 Formación de Fases Intermetálicas	48

3.3 Alternativa para la reducción de formación de Óxidos Metálicos en la Unión Magnesio/Acero mediante el Proceso de Soldadura RSW	49
--	----

CONCLUSIONES	50
---------------------	----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
-----------------------------------	----

LISTA DE FIGURAS	54
-------------------------	----

LISTA DE TABLAS	56
------------------------	----

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	57
-------------------------------	----

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las tendencias actuales exigen la fabricación de vehículos de transporte más limpios y eficientes. Una de las directrices que ha tomado la industria es el diseño de estructuras de peso reducido, con lo cual se mejora el rendimiento de combustibles no renovables y se incentiva el empleo de fuentes de locomoción alternas como son los motores eléctricos activados por celdas solares y químicas [1].

Una de las opciones propuestas por los diseñadores para la reducción de peso en estructuras de vehículos de transporte, es el empleo de materiales ligeros como son las aleaciones de magnesio y aluminio debido a su baja densidad (el Mg es ~35% más ligero que el aluminio y ~80% más ligero que el acero), ambos tienen buen nivel de conformado, buena amortiguación de ruido y vibraciones, alta resistencia específica y módulo de elasticidad, lo cual hacen de estas aleaciones candidatos ideales para aplicaciones industriales [2].

Sin embargo, el integrar aleaciones de magnesio y aluminio a una estructura fabricada en su mayor parte con acero y sujeta a cargas de operación, requiere de técnicas de unión que garanticen que las propiedades mecánicas y microestructurales sean mejores o por lo menos iguales a las de los materiales a ensamblar, además que estas propiedades permanezcan hasta el final de la vida útil de la estructura, para lo cual se debe cumplir con una serie de requerimientos que incluyen entre otros, los puntos listados [3]. (Ver Figura 1.1)



Figura 1.1 Criterios de selección del proceso de unión en el diseño de estructuras [3].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General:

Realizar un estudio comparativo de los procesos de Soldadura de Puntos por Resistencia (RSW), Brazing y Soldadura Láser (LBW), aplicados en la fabricación de uniones disímiles Magnesio/Aluminio y Magnesio/Acero.

1.2.2 Objetivos Específicos:

1. Determinar la viabilidad de los procesos de soldadura RSW, Brazing y LBW para unir aleaciones Mg/Al y Mg/Acero.
2. Determinar de acuerdo a los reportes de la literatura, bajo qué condiciones de soldadura y diseño de unión se reducen los niveles de corrosión provocados por la diferencia de potencial eléctrico en las uniones Mg/Al.
3. Estudiar los mecanismos de formación de fases intermetálicas y su efecto en las propiedades mecánicas de las uniones Mg/Al.
4. Estudiar los mecanismos de formación de óxidos y su efecto en las propiedades mecánicas de las uniones Mg/Acero.

1.3 Justificación

Este proyecto de especialidad se propone como una referencia bibliográfica que aporte al conocimiento de uniones disímiles para aquellas industrias que

requieran integrar tecnologías que permitan optimizar el consumo de combustibles, a través de la reducción de peso en las estructuras de sus productos, sin la modificación significativa de los procesos de fabricación ya establecidos, que estas emplean.

1.4 Planteamiento del Problema

Debido a las regulaciones cada vez más estrictas respecto al control de emisiones contaminantes y uso eficiente de combustibles no renovables, se propone este trabajo de especialidad para contribuir a la reducción de peso en los sectores automotriz y aeroespacial mediante la incorporación de aleaciones ligeras de magnesio y aluminio en estructuras tradicionalmente fabricadas con acero, utilizando procesos convencionales de soldadura.

1.5 Aportación Tecnológica

Análisis del estado del arte acerca de la soldabilidad de aleaciones disímiles Mg/Al y Mg/Acero mediante procesos convencionales de soldadura para su posterior investigación y desarrollo en la fabricación de estructuras automotrices y aeronáuticas.

1.6 Alcance

En esta monografía se realiza un estudio del estado del arte sobre la soldabilidad de las uniones disímiles Mg/Al y Mg/Acero utilizando los procesos de: Soldadura de Puntos por Resistencia (RSW), Brazing y Soldadura Láser (LBW).

Para lo cual se realiza un estudio de la metalurgia de los procesos de soldadura RSW, Brazing y LBW, así como la caracterización de los materiales en este caso magnesio, aluminio y acero, por lo cual se determinará mediante el estudio bibliográfico, el comportamiento mecánico y microestructural de las uniones Mg/Al y Mg/Acero.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Procesos de Soldadura

A la hora de seleccionar un determinado proceso de unión se tienen en cuenta multitud de factores, tales como; el material a unir, el tamaño, longitud de la unión, la aplicación a la que va a estar destinada la pieza, el costo, la capacitación del que ejecuta la unión, la facilidad de fabricación, la resistencia de la unión, entre otros factores [13].

Para estar a la par con el cambio constante en el diseño de estructuras automotrices y aeronáuticas, los ingenieros de diseño deben ser capaces de

modificar o cambiar por completo muchos de los materiales y procesos utilizados para la fabricación cotidiana. Ciertamente, la unión de piezas metálicas es uno de esos procesos en los que se debe ser capaz de enfrentar el reto de cambiar de material de un momento a otro [13].

En un análisis rápido a los procesos de unión empleados en la industria automotriz y aeronáutica, podemos mencionar que de todo el universo que existe en la actualidad para unir piezas metálicas, los ingenieros de diseño seleccionan generalmente uno de cuatro procesos básicos para unir los materiales empleados en la fabricación de productos [13]. (Ver Figura 2.1)

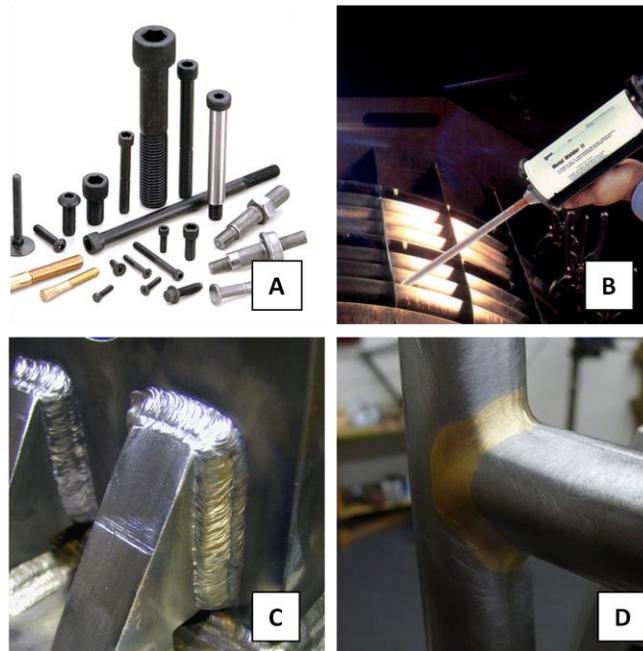


Figura 2.1 Ejemplos de los cuatro principales proceso de unión utilizados en la “Industria Ligera”: A) Fijación Mecánica; B) Adhesivos; C) Soldadura por Fusión; D) Soldadura mediante Capilaridad [13].

Dado que la orientación de este trabajo monográfico se enfoca a procesos de soldadura únicamente, la selección de los métodos de unión a estudiar estuvieron en función de los procesos de mayor uso industrial. (Ver Figura 2.2)

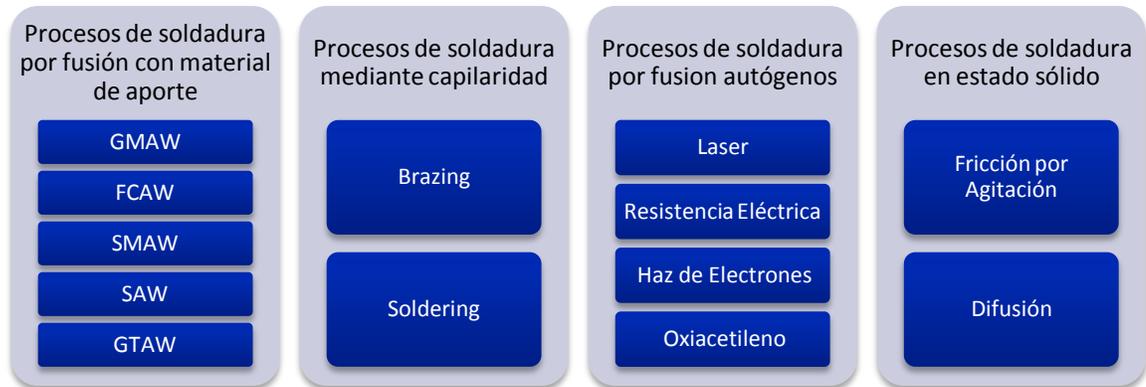


Figura 2.2 Clasificación de las Tecnologías de la Soldadura consideradas en este documento¹ [13].

Así, se encontró que los procesos más eficaces para unir materiales disímiles son; el proceso RSW, LBW y Brazing.

2.1.1 Soldadura por Resistencia - ERW

El principio de Soldadura por Resistencia Eléctrica (ERW, Electric Resistance Welding) por sus siglas en inglés, se define como una corriente eléctrica que pasa a través de un metal, la fricción causada por los electrones al chocar con los átomos de los materiales producen el calor suficiente para fundirlos [4].

El término “Soldadura por Resistencia” incluye una variedad de aplicaciones de soldadura. Los procesos de soldadura por resistencia más comunes incluyen: Soldadura de Puntos por Resistencia (RSW, Resistance Spot Welding), Soldadura por Proyección (PW, Projection Welding), y Soldadura de Costura por Resistencia (RSEW, Resistance Seam Welding) por sus siglas en inglés [4].

¹ GMAW (Gas Metal Arc Welding), FCAW (Flux Cored Arc Welding), SMAW (Shielded Metal Arc Welding), SAW (Submerged Arc Welding), GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), por sus siglas en inglés.

El proceso de Soldadura por Resistencia posee algunas ventajas: es rápido, muy poca distorsión en el metal, y el proceso puede ser controlado con precisión, además de no requerir un material de aporte [4].

2.1.1.1 Principios del proceso ERW

Cuando dos piezas están en contacto, el área de unión tiene una alta resistencia para el flujo eléctrico de corriente, por lo cual al pasar el flujo de corriente se genera calor. Las dos piezas son presionadas mientras sus superficies son fundidas, finalmente las piezas son soldadas [4].

Las corrientes de trabajo usadas en las máquinas de soldadura por resistencia pueden ser corriente alterna (CA) o corriente directa (CD). Pero la mayor parte de las máquinas de este proceso utilizan corriente alterna [4].

Una maquina de soldadura por resistencia de CA es básicamente un transformador, la soldadura por resistencia requiere muy alta corriente (alto amperaje) con un bajo voltaje [4].

2.1.1.2 Proceso de soldadura RSW

El proceso de Soldadura de Puntos por Resistencia o RSW, es el más común de los procesos de Soldadura por Resistencia. El proceso consiste básicamente en el traslape de dos piezas de metal y en presionar ambas piezas con dos electrodos. Una corriente pasa a través de los electrodos. Un pequeño punto fundido se forma. Después de esta acción el flujo de corriente se detiene, los electrodos continúan presionando el metal, hasta que el punto de metal fundido solidifica [4].

Las dos piezas de metal ahora están unidas por un punto de soldadura o botón [4]. La Figura 2.3 muestra el circuito de una máquina básica de Soldadura por Puntos.

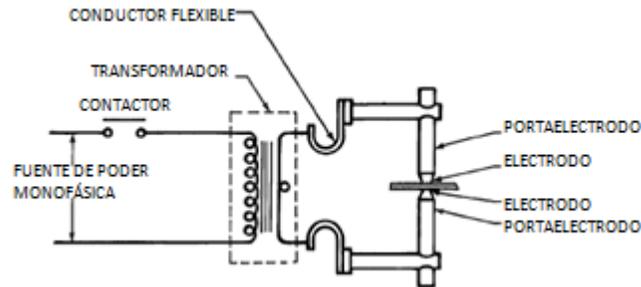


Figura 2.3 Diagrama típico de un circuito de Soldadura por Puntos monofásico [5].

En RSW, existen cinco variables que deben de ser controladas. Esas variables son:

- Tiempo
- Corriente
- Fuerza
- Área de contacto del electrodo
- Selección de máquina [4]

El tiempo requerido para hacer un punto de soldadura está dividido en cuatro diferentes periodos de tiempo:

- Tiempo de Compresión (Squeeze Time)
- Tiempo de Soldadura (Weld Time)
- Tiempo de Retención (Hold Time)
- Tiempo Inactivo (Off Time) [4]

Tiempo de Compresión: es el tiempo requerido para que los electrodos opriman el metal y apliquen la fuerza apropiada.

Tiempo de Soldadura: es el tiempo en el cual la corriente fluye y calienta el metal.

Tiempo de Retención: es el periodo, después de que la corriente es cortada, cuando la presión aún es aplicada para que el punto de metal fundido solidifique.

Tiempo Inactivo: es el tiempo durante el cual los electrodos se despegan de la pieza de trabajo ya unida, y estos se desplazan hasta la siguiente posición de soldadura; este término generalmente se aplica cuando el ciclo de soldadura es repetitivo [4].

2.1.1.3 Electrodo para el Proceso RSW

Los electrodos en la Soldadura por Resistencia conducen la corriente hacia el material base. Existen ciertos requerimientos que los electrodos deben poseer. Un electrodo debe ser:

- Buen conductor de la electricidad
- Buen conductor de calor
- Tener buena resistencia mecánica y alta dureza
- Tener una tendencia mínima a alearse con el metal base [4]

Por las razones anteriores, la mayoría de los electrodos son fabricados utilizando aleaciones de cobre. Cada electrodo tiene una cara y un cuerpo en forma de caña. La cara del electrodo es la parte que transfiere el trabajo. La cara tiene diferentes formas como puede verse en la Figura 2.4. El cuerpo del electrodo debe ser lo suficientemente grande para transferir la fuerza y la corriente de soldadura. Con el fin de cubrir los requerimientos del proceso, algunos electrodos tienen el cuerpo en forma de caña doblada [4].

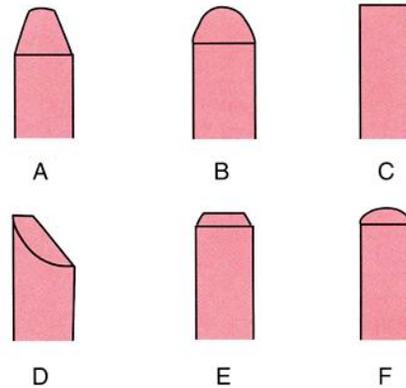


Figura 2.4 Diseño de cara para electrodos comúnmente usados en el proceso RSW [4].

2.1.1.4 Proceso Híbrido Brazing–Resistencia

El proceso Brazing–Resistencia es un proceso de soldadura a baja temperatura, mediante el calor y la presión generada por los electrodos se logra fundir el aporte Brazing [30].

Metales como níquel, acero y otros materiales de alta resistencia eléctrica pueden generar suficiente calor para completar la operación de soldadura, no obstante en partes grandes o materiales de baja resistencia eléctrica, tales como el cobre o el latón, será necesario aplicar un procedimiento alternativo para ayudar a su calentamiento [30].

Casi todos los metales y aleaciones pueden ser soldados, con excepción de aquellos que tienen un punto de fusión por debajo de los 800°F como el plomo y el estaño. Es imprescindible que las piezas a unir estén libres de óxido superficial, de esta manera se logra una unión con calidad y sanidad. Si la grasa, aceite, suciedad y óxidos han sido cuidadosamente eliminados tanto del metal base como del metal de aporte, hay una mayor posibilidad de producir una buena junta, debido a que se produce una acción capilar uniforme [30].

La limpieza se divide en dos categorías: Química y Mecánica. El método de limpieza más eficaz es el químico, debido a su capacidad para eliminar todo

rastros de aceite o grasa. En el proceso RSW algunos aceites ligeros pueden ser tolerados en la superficie de los metales antes de ser soldados. Sin embargo en el proceso de soldadura Brazing esto interfiere con la mojabilidad y la acción capilar del metal de aporte [30].

2.1.2 Soldadura con Rayo Láser - LBW

La soldadura por haz de LASER (acrónimo en inglés de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, Amplificación de Luz Mediante Emisión Inducida de Radiación), utiliza un dispositivo que produce un haz de luz coherente concentrada, estimulando transiciones electrónicas a niveles de energía más bajos. El término coherente significa que todas las ondas de luz están en fase [5].

Muchos láseres emplean varillas cristalinas de granete de itrio y aluminio dopado con neodimio (Nd: YAG) para producir rayos monocromáticos continuos con potencias del orden de 1 a 2kW, también se han desarrollado láseres gaseosos excitados eléctricamente, de pulsos y onda continua (CW) además de láseres de dióxido de carbono (CO₂) con salidas de hasta 25kW, y se emplean en una amplia gama de tareas de procesamiento de materiales en la industria. Estos láseres pueden soldar acero de hasta 32mm (1.25 pulgadas) de espesor con una sola pasada de penetración completa [5].

2.1.2.1 Principios del Proceso de Soldadura con Rayo Láser

La Soldadura con Rayo Láser (LBW, Laser Beam Welding) por sus siglas en inglés; es un proceso de unión por fusión que produce la coalescencia de materiales gracias al calor derivado de un haz concentrado de luz coherente monocromática que incide sobre la unión que se va a soldar. En el proceso LBW, el rayo láser se dirige mediante elementos ópticos planos, como espejos, y luego se enfoca a un pequeño punto en la pieza de trabajo empleando

elementos de enfoque reflejante o bien lentes. La Soldadura LBW es un proceso sin contacto, por lo que no requiere la aplicación de presión [5].

2.1.2.2 Láseres de Estado Sólido

Los láseres de estado sólido emplean una impureza en un material anfitrión como medio activo. Así, el ion neodimio (Nd^{+++}) se usa como un “contaminante” o impureza añadida deliberadamente, en una varilla de vidrio o bien un cristal de YAG, y la longitud de onda del rayo producido ($1.06\mu m$) la determina el ion neodimio. El material productor del láser, o anfitrión, es un cilindro de unos 150mm de largo por 9mm de diámetro. Ambos extremos del cilindro se hacen planos y paralelos con tolerancias muy estrictas, se pulen hasta un acabado óptico fino y luego se platean para formar una superficie reflejante. El cristal se excita por medio de una lámpara de criptón o xenón muy intensa [5]. En la Figura 2.5 se muestra un esquema simplificado de la disposición de la varilla, la lámpara y los espejos.

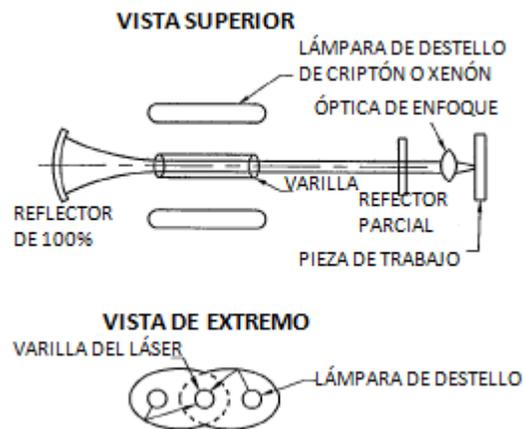


Figura 2.5 Representación esquemática de un Láser de Estado Sólido [5].

En el modo a pulsos, el medio activo del láser de YAG se excita en forma intermitente, no continua, utilizando una fuente de potencia pulsada para alimentar la lámpara de destello. La Figura 2.6 muestra la relación temporal de los pulsos de salida de la lámpara de destello y del láser en un láser de estado sólido a pulsos representativo. El inicio del pulso de la lámpara de destello establece una inversión de la población en el medio activo [5].

A causa de los picos en la salida, resulta difícil determinar la potencia máxima de un láser de estado sólido a pulsos, que además tiende a variar de un pulso a otro, aunque la energía y la duración de cada pulso permanezcan constantes [5].

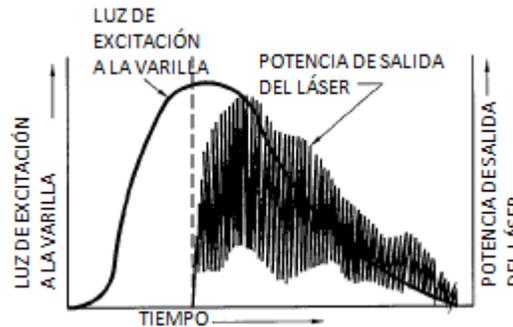


Figura 2.6 Salida de un Láser de Estado Sólido a pulsos típico, comparada con el aporte de luz de excitación a la varilla en función del tiempo [5].

2.1.3 Soldadura Fuerte - Brazing

La Soldadura Fuerte o Soldadura Brazing por su nombre en inglés, une materiales calentándolos en presencia de un metal de aporte que tiene un cambio a fase líquida (liquidus) por encima de 450°C pero por debajo del cambio a fase sólida (solidus) de los metales base. El calentamiento puede proveerse de muy diversas maneras. El metal de aporte se distribuye entre las superficies de unión, que embonan, por acción capilar. La capilaridad es una fuerza creada por la tensión superficial entre la aleación (material de aporte) y los metales que se están uniendo, provoca la acción de jalar el material fundido además de distribuirlo alrededor de la unión [5].

Se acostumbra designar los Procesos de Soldadura Fuerte de acuerdo con las fuentes o los métodos de calentamiento. Los métodos que actualmente gozan de importancia industrial son los siguientes:

1. Soldadura Fuerte con Soplete
2. Soldadura Fuerte en Horno
3. Soldadura Fuerte por Inducción

4. Soldadura Fuerte por Resistencia
5. Soldadura por Inmersión
6. Soldadura Fuerte al Infrarrojo [5]

La Soldadura Fuerte debe satisfacer tres criterios:

1. Las piezas deben unirse sin fusión de los metales base.
2. El metal de aporte debe tener una temperatura mayor de liquidus mayor que 450°C.
3. El metal de aporte debe mojar las superficies del metal base y penetrar en la unión o mantenerse en ella por acción capilar [5]

2.1.3.1 Principios del Proceso de Soldadura Brazing

El flujo capilar es el principio físico dominante que garantiza una buena unión por Soldadura Fuerte en todos los casos en que el metal de aporte fundido moja ambas superficies de empalme. La unión deberá espaciarse de modo que permita una acción capilar eficiente y la resultante coalescencia [5]. La Figura 2.7 muestra el esquema simple de una unión por Soldadura Fuerte.

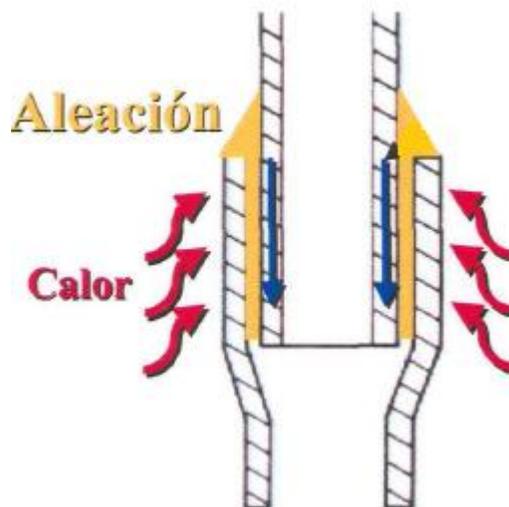


Figura 2.7 Acción de la Capilaridad en la Soldadura de Tubería [26].

Específicamente la capilaridad está en función de la tensión superficial entre los metales base, el metal de aporte, el flux o fundente y el ángulo de contacto entre el metal base y el metal de aporte [26].

El fundente es un compuesto químico aplicado a la superficie de unión que previene la oxidación durante el proceso de soldadura y absorbe algunos óxidos que no son removidos durante la limpieza de la tubería. Es importante resaltar que el fundente no es un limpiador. Las áreas a soldar se liberan de contaminantes y óxidos por la acción del fundente, que debe ser calentado hasta su punto de fusión para que el metal de aporte ocupe su lugar, generándose una acción capilar con el metal base varias veces mayor que la acción de capilaridad entre el fundente y el metal base [26].

Uno de los parámetros que definen la calidad de la soldadura es la mezcla de los gases para formar la antorcha. Los gases a mezclar son normalmente el oxígeno y gas (natural o LP), los cuales deben ser regulados a una presión objetivo, buscando una combustión óptima [26].

Una vez que se fijaron los parámetros de presión de ambos gases el siguiente paso es revisar el porcentaje de cada uno de los gases en la formación de la flama, es importante ajustar la flama dependiendo del trabajo que se va a realizar [26].

2.1.3.2 Metales de Aporte para el Proceso de Soldadura Brazing

Los metales de aporte para el proceso Brazing deben tener las siguientes propiedades:

- Capacidad de formar uniones con propiedades físicas y mecánicas para la aplicación requerida.
- Punto de fusión o intervalo de fusión compatibles con los metales base que se van a unir, suficiente fluidez para penetrar y distribuirse por acción capilar.

- Capacidad para mojar las superficies de los metales base y formar una unión fuerte e íntegra.
- Capacidad para producir o evitar las interacciones del metal de aporte y los metales base [5]

Para ser efectivo un metal de aporte debe alearse con la superficie del metal base sin difundirse de manera indeseable al interior del metal base, diluir el metal base, no erosionar el metal base ni formar compuestos quebradizos [5].

Algunos metales de aporte se difunden excesivamente y alteran las propiedades del metal base. Si se desea controlar la difusión se debe escoger un metal de aporte apropiado, aplicar la mínima cantidad posible y seguir el ciclo de soldadura Brazing correcto [5].

2.1.3.3 Fundentes para el Proceso de Soldadura Brazing

Los metales y las aleaciones pueden reaccionar con la atmósfera a la que están expuestos, sobre todo si se eleva la temperatura. La reacción más común es la oxidación, pero en ocasiones se forman nitruros y carburos [5].

Se usan fundentes, atmósferas protectoras y vacío para evitar las reacciones indeseables durante el proceso de soldadura. Algunos fundentes y atmósferas pueden además reducir los óxidos que están presentes [5].

El titanio, zirconio, niobio y tantalio sufren una pérdida de ductilidad permanente si se sueldan bajo cualquier atmósfera que contenga hidrógeno, oxígeno o nitrógeno. El empleo de fundente o atmósfera no elimina la necesidad de limpiar las piezas antes de soldarlas [5].

Puesto que el propósito del metal de aporte para la soldadura fuerte es fluir sobre el metal base y penetrar por acción capilar, también puede fluir sobre

otras porciones de las piezas se están uniendo. Esta situación puede ser indeseable desde el punto de vista estético, y también puede haber agujeros o depresiones de la pieza que no deban llenarse o taponearse, pues de ocurrir esto el dispositivo dejaría de funcionar correctamente [5].

2.2 Metales de Aplicación

2.2.1 Aleaciones Base Magnesio

El magnesio es un elemento muy abundante en la naturaleza y su principal fuente de obtención, se encuentra en el agua de mar y por consiguiente puede ser obtenido en cualquier parte del mundo. Este elemento forma aleaciones con la mayoría de los metales, exceptuando el hierro y el cromo. Es un elemento más ligero que el aluminio y tiene propiedades de interés de la ingeniería. El aluminio es el metal aleado más usado con el magnesio, pudiendo estar presente entre 3% y 10%. El aluminio refina el grano, aumenta la dureza y la resistencia. El zinc y el manganeso le imparten resistencia a la corrosión, mejorando también las propiedades mecánicas [6].

El magnesio y sus aleaciones tienen una estructura cristalina hexagonal compacta (HCP, Hexagonal Close-Packed) por sus siglas en inglés, tales estructuras cuentan con un deslizamiento limitado [7].

2.2.1.1 Designaciones de las Aleaciones Base Magnesio

Con respecto a la nomenclatura y designaciones de las aleaciones a base de magnesio, la ASTM (American Society for Testing and Materials) y ASM (American Society for Materials) por sus siglas en inglés, así como muchos fabricantes de estas aleaciones tienen sus propias normas [6].

La designación se funda con el contenido de los elementos aleados; así por ejemplo: A10 da a entender que la aleación contiene 10% de aluminio; AZ92 significa que la aleación contiene 9% de aluminio y 2% de zinc; M1 es una aleación que contiene aproximadamente 1% de manganeso. Son 10 las aleaciones fundamentales con las designaciones ASTM, pero pueden aumentar con la variación de dichas aleaciones. La mayor parte de las piezas producidas a base de magnesio tienen su principal aplicación en equipos de transportación aérea, siendo su peso reducido una de sus principales cualidades [6]. La Tabla 2.1 muestra algunas de las principales aleaciones base magnesio.

Tabla 2.1 Composiciones nominales de las aleaciones de magnesio forjado [8].

Aleación			Composición, % en peso					
ASTM No.	UNS No.	Producto (a)	Al	Mn (min)	Zn	Th	Zr	Otra
AZ31B	M11310	F, S, E	3.0	0.20	1.0	...	...	...
AZ31C	M11312	S, E	3.0	0.15	1.0	...	...	...
AZ61A	M11610	F, E	6.5	0.15	0.95	...	...	...
AZ80A	M11800	F, E	8.5	0.12	0.5	...	...	...
HK31A	M13310	S	3.0	...	0.3	3.25	0.7	...
HM21A	M13210	F, S	...	0.45	...	2.0	...	...
LA114A	M14141	S	1.25	0.15	...	...	...	14 Li
M1A	M15100	E	...	1.6	...	...	...	0.3 Ca
ZE10A	M16100	S	...	0.15	1.25	...	...	0.17 TR (b)
ZK40A	M16400	E	...	...	4.0	...	0.45	...
ZK60A	M16600	F, E	...	...	5.5	...	0.45	...

(a) S, hoja y placa; F, forja; E, extruido, barra, tubo, alambre. (b) TR, tierras raras.

Las aleaciones de magnesio (como ASTM-AZ31, ASTM-AZ60, ASTM-AZ61, ASTM-AZ91, etc.) han sido adoptadas por la industria manufacturera por su ligereza, alta resistencia específica y rigidez, buenas características de amortiguación, excelente maleabilidad. Las aleaciones de magnesio son más ligeras que las aleaciones de aluminio y tienen una mayor resistencia a la tracción que los Aceros [9]. La Tabla 2.2 muestra las mínimas propiedades mecánicas para las aleaciones base magnesio.

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas mínimas para aleaciones base magnesio forjado [8].

Aleación-condición	Esfuerzo de tensión		Esfuerzo de cedencia		% de elongación en 50mm	Dureza, HB
	Mpa	ksi	Mpa	ksi		
Extruido						
AZ31B-F	220-240	32-35	140-150	20-22	7	...
AZ61A-F	260-275	38-40	145-165	21-24	7-9	...
AZ80A-F	290-295	42-43	185-195	27-28	4-9	...
AZ80A-T5	310-325	45-47	205-230	30-33	2-4	...
M1A-F	200-205	29-32	...	...	2-3	...
ZK40A-T5	275	40	255	37	4	...
ZK60A-F	295	43	215	31	4-5	...
ZK60A-T5	295-310	43-45	215-250	31-36	4-6	...
Forjado						
AZ31B-F	234	34	131	19	6	...
AZ61A-F	262	38	152	22	6	...
AZ80A-F	290	42	179	26	5	...
AZ80A-T5	290	42	193	28	2	...
HM21A-T5	228	33	172	25	3	...
ZK60A-T5	290	42	179	26	7	...
ZK60A-T6	296	43	221	32	4	...
Hoja y placa						
AZ31B-O	221	32	...	...	9-12	...
AZ31B-H26	241-269	35-39	145-186	21-27	6	...
HK31A-O	200-207	29-30	97-124	14-18	12	...
HK31A-H24	228-234	33-34	172-179	25-26	4	...
HM21A-T81	234	34	172	25	4	...
LA141A-T7	124-131	18-19	103	15	10	...
ZE10A-O	200-207	29-30	83-124	12-18	12-15	...
ZE10A-H24	214-248	31-36	138-172	20-25	6	...

2.2.2 Aleaciones Base Aluminio

El aluminio es un metal que se caracteriza por su poco peso, aceptable resistencia a la corrosión, conductividad elevada (tanto eléctrica como térmica), y una gran reflectividad de la energía radiante, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo [10].

El aluminio tiene el inconveniente de la termofluencia o deformación por su propio peso a lo largo del tiempo. A temperaturas relativamente bajas sufre este tipo de deformación [10].

Durante muchos años se han apreciado dificultades y limitaciones que existen en la soldadura del aluminio y sus aleaciones según los procedimientos

convencionales. Los factores que contribuyen a estas dificultades son la película adherente de óxido de aluminio y una pequeña resistencia a la corrosión de la unión resultante, la cual obedece a dos causas: a) la mayoría de los fundentes propuestos para este fin son agresivos, y si se les deja sobre el metal producen un rápido ataque; b) la composición de la mayoría de las soldaduras utilizadas forman con el aluminio un par bimetálico activo, que incide a la corrosión [10].

El aluminio es un metal ligero con una densidad de 2.70g/cm^3 y un moderado punto de fusión 655° , con una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC, Face-Centered Cubic) por sus siglas en inglés, por lo cual la conformabilidad del aluminio y sus aleaciones es buena [10].

2.2.2.1 Designaciones de las Aleaciones Base Aluminio

Un sistema de cuatro dígitos desarrollado por la AA (Aluminium Association) por sus siglas en inglés es usado para designar aleaciones de aluminio forjado. Como es mostrado en la Tabla 2.3 el primer dígito define el mayor elemento de aleación de la serie, los dos últimos dígitos indican el mínimo porcentaje de aluminio. El segundo dígito dentro de la designación indica la modificación de la aleación, cuando el segundo dígito es cero, indica que es la aleación original. Los números del 1 al 9 consecuentemente indican las modificaciones de la aleación original. Los últimos dos de los cuatro dígitos de 2xxx a 8xxx no tienen significado especial pero sirven para identificar solo las diferentes aleaciones de la serie [8].

Tabla 2.3 Designaciones (AA) aleaciones de aluminio forjado [8].

SERIE	Contenido de Aluminio o principal elemento de aleación
1xxx	99.00% mínimo
2xxx	Cobre
3xxx	Manganeso
4xxx	Silicio
5xxx	Magnesio
6xxx	Magnesio y Silicio
7xxx	Zinc
8xxx	Otros
9xxx	Sin usar

2.2.2.2 Aleaciones Aluminio-Magnesio (5xxx)

Las aleaciones del grupo 5xxx tienen las más altas resistencias de las aleaciones no tratadas térmicamente, con esfuerzos de tensión que van de 124 a 434Mpa. Desarrollan moderados esfuerzos cuando es endurecido; tiene una excelente resistencia a la corrosión; y una alta dureza. Estas aleaciones tienen cantidades de 0.8 a 5 de porcentaje en peso de magnesio. La serie 5xxx tiene ductilidad relativamente alta, por lo general un 25% [8]. La Tabla 2.4 muestra la composición de algunas aleaciones de la serie 5xxx.

Tabla 2.4 Composición nominal de Aleaciones de aluminio forjado de la serie 5xxx [8].

Aleación	Porcentaje de Elementos de Aleación							
	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
5005	0.8	...	...	...	...
5050	1.4	...	...	...	...
5052	2.5	0.25	...	...	...
5056	0.12	5.0	0.12	...	...	...
5083	0.7	4.4	0.15	...	...	...
5086	0.45	4.0	0.15	...	...	...
5154	3.5	0.25	...	...	...
5183	0.8	4.8	0.15	...	...	...
5356	0.12	5.0	0.12	...	...	0.13
5454	0.8	2.7	0.12	...	...	...
5456	0.8	5.1	0.12	...	...	...
5457	0.30	1.0	...	...	...	...
5554	0.8	2.7	0.12	...	...	0.12
5556	0.8	5.1	0.12	...	...	0.12
5657	0.8	...	...	...	...
5754	0.5	3.1	0.3	...	...	...

2.2.3 Aceros Avanzados de Alta Resistencia - AHSS

En busca por fabricar automóviles más ligeros y más seguros, las compañías están introduciendo con rapidez los Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS, Advanced High Streght Steels) por sus siglas en inglés. Las aleaciones de los AHSS incluyen altas resistencias a la tensión (de 500Mpa o mayores), una buena formabilidad e incluyen aceros con grado de Doble Fase (DP, Dual Phase), de Fase Compleja (CP, Complex Phase), de Plasticidad Inducida por Transformación (TRIP, Transformation Induced Plasticity), así como los Martensíticos [11].

2.2.3.1 Aceros Doble Fase - DP

La microestructura de los aceros Doble Fase (DP, Dual Phase) por sus siglas en inglés, consiste en una fase primaria Ferrita y una segunda fase de Martensita dura, estos aceros presentan combinaciones únicas de resistencia y ductilidad y por lo tanto han sido considerados para aplicaciones que requieren buena formabilidad [12]. La Tabla 2.5 presenta la composición química del acero DP600.

Tabla 2.5 Composición Química del Acero DP600 (% en peso) [12].

C	Mn	Mo	Si	Cr	Ni	Ti	P	S	Cu	Al	V
0.106	1.530	0.220	0.201	0.190	0.030	0.018	0.012	0.001	0.003	0.031	0.006

Varios hechos importantes relacionados con los mecanismos de deformación se han documentado:

1. La fracción de volumen de Martensita es dominante en el control de las propiedades de tracción, y en el aumento de la cantidad de Martensita disminuye la ductilidad.
2. Para un volumen constante de fracción de Martensita, una microestructura de Martensita fina dispersa tiene una mejor combinación. Los estudios han demostrado que la morfología de las partículas de Martensita juega un papel muy importante en la ductilidad y resistencia.

La Figura 2.8 muestra la microestructura de un acero DP600 con diversos ataques [12].

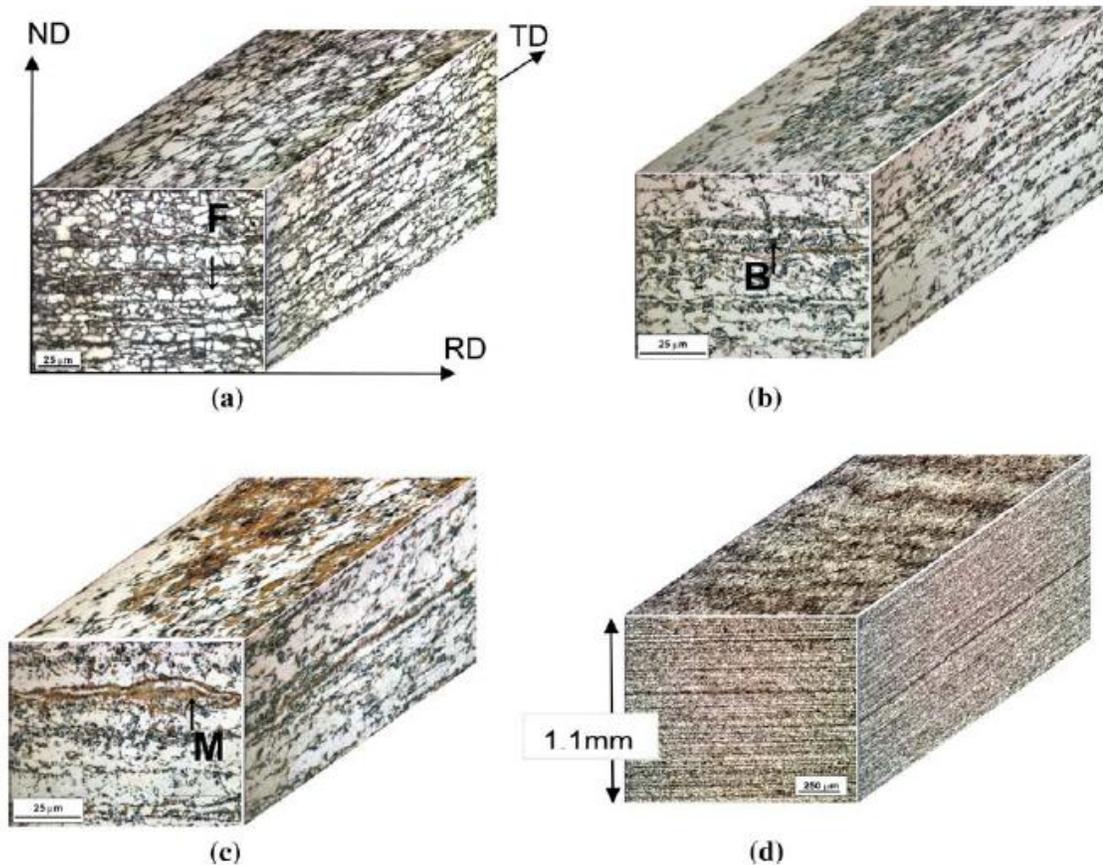


Figura 2.8 Microestructura de un acero DP600 atacado con (a) y (d) nital al 2%, (b) picral al 4%, y (c) picral al 4% seguido por solución SMB. (a) F-granos de ferrita, (b) B-bainita, (c) M-martensita, y (d) distribución de bandas de martensita. Micrografías obtenidas en plano tridimensional. ND-dirección normal, RD-dirección de rolado, y TD-dirección transversal [12].

2.3 Corrosión

La corrosión es el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico en su entorno, la corrosión puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión [14].

Lo que provoca la corrosión es un flujo eléctrico masivo generado por las diferencias químicas entre las piezas implicadas. La corrosión es un fenómeno electroquímico. Una corriente de electrones se establece cuando existe una diferencia de potenciales entre un punto y otro. Cuando una especie química cede y migra electrones hacia otra especie, se dice que la especie que los emite se comporta como un ánodo y se da la oxidación, y aquella que los recibe se comporta como un cátodo y en ella se da la reducción [14].

La corrosión de los metales es un fenómeno natural que ocurre debido a la inestabilidad termodinámica de la mayoría de los metales. En efecto, salvo raras excepciones (el oro, el hierro de origen meteorítico) los metales están presentes en la tierra en forma de óxido, en los minerales (como la bauxita si es aluminio, la hematita si es hierro) [10, 14].



Figura 2.9 Corrosión en Metales [10].

2.3.1 Corrosión Electroquímica

La corrosión electroquímica se establece cuando en una misma superficie metálica ocurre una diferencia de potencial en zonas muy próximas entre sí en donde se establece una migración electrolítica desde aquella en que existe el potencial de oxidación más elevado, llamado área anódica hacia aquella donde

existe el potencial de oxidación más bajo, llamado área catódica. El conjunto de las dos semireacciones constituye una célula de corrosión electroquímica [15].

La corrosión electroquímica se debe a la circulación de electrones entre zonas de diferente potencial, en contacto con el medio conductor. Esta diferencia de potencial puede darse entre dos puntos de un mismo material en cuyo caso la diferencia de potencial no acostumbra a ser elevada o entre diferentes metales dando lugar a una pila galvánica en la que la corriente de corrosión es importante [15].

Entre los tipos de corrosión electroquímica se encuentran:

- Celdas de Composición
- Celdas de Esfuerzo
- Corrosión por Oxígeno
- Corrosión Microbiológica
- Corrosión por Presiones Parciales de Oxígeno
- Corrosión Galvánica
- Corrosión por Actividad Salina Diferenciada
- Corrosión por Heterogeneidad del Material
- Corrosión por Aireación Superficial [14]

2.3.1.1 Corrosión Galvánica

Es la más común de los tipos de corrosiones electroquímicas, se establece cuando dos metales distintos entre sí actúan como ánodo uno de ellos y el otro como cátodo. Aquel que tenga el potencial de reducción más negativo procederá como una oxidación y viceversa aquel metal o especie química que

exhiba un potencial de reducción más positivo procederá como una reducción. Este par de metales constituye la llamada pila galvánica. En donde la especie que se oxida (ánodo) cede sus electrones y la especie que se reduce (cátodo) acepta los electrones [14].

2.3.1.2 Aportes Brazing en el Proceso de Soldadura RSW como método para reducir la Corrosión en Uniones Disímiles Aluminio-Magnesio.

Men'shilov et al. [2] realizó un estudio donde se utilizaron metales de aporte del Proceso Brazing para el proceso RSW. Los metales aporte empleados fueron los sistemas Al-Ge-Si y Al-Y-Si, y la aleación de Brazing VPr27 como materiales de referencia (RM). Estos aportes se utilizaron en forma de tiras con espesor de 5-6 y 60-100mm. En la Tabla 2.6 se muestran las diversas características de los materiales de aporte.

Tabla 2.6 Materiales de Aporte de Referencia [2].

Aporte (tiras de material de referencia, RM)	Sistema	Tamaño de RM (mm)		Punto de Fusión
		Espesor	Ancho	
Aleación 1	Al-Ge-Si	0.05	100	600°C
Aleación 2	Al-Y-Si	0.05	100	550°C
VPr27	Al-Ni-Cr-B	0.06	60	450°C

Los cálculos de los campos de temperatura de aleación la AMg₆ muestran que a temperaturas de 350-730°C se desarrolla en la periferia del punto de soldadura. Estas temperaturas son suficientes para la fundición de aleaciones para Brazing [21].

En las investigaciones [2], después de la preparación de las superficies para la soldadura, se midió la resistencia eléctrica aplicada para el metal base con diversos metales de aporte. Los resultados de las mediciones se presentan en la Figura 2.10

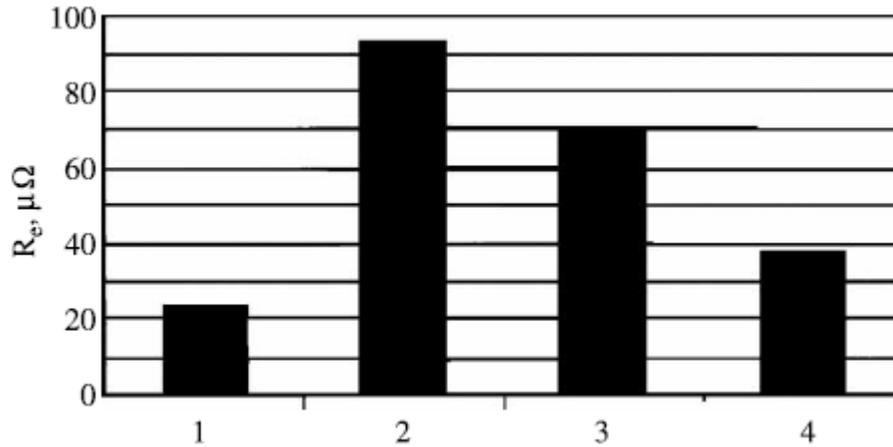


Figura 2.10 Diagrama de los Valores de Resistencia Eléctrica R_e , los Puntos Soldados AMg6+RM+AMg6: 1) Sin RM, 2) Con RM de la Aleación VPr27, 3) y 4) Con las Aleaciones del Sistema Al-Ge-Si y Al-Y-Si, respectivamente [2].

Las pruebas con rayos X en las uniones realizadas con los materiales de referencia, no solo dieron como resultado la detección de un eficiente diámetro del punto en la radiografía, también arrojó un aumento en la resistencia a la corrosión de las uniones debido a la aplicación de aporte Brazing. La Figura 2.11 muestra la junta soldada, producida por la fusión de la tira de RM. El anillo de soldadura protege de forma evidente la unión contra el efecto del medio circundante, y la adición de itrio también aumenta la resistencia de las aleaciones a la oxidación y corrosión a la alta temperatura, este elemento tiene un efecto favorable sobre el comportamiento de las aleaciones en medios corrosivos [2].



Figura 2.11 Radiografía a 20x de la Sección de un Punto de Soldadura de la Aleación AMg₆ con un espesor de 1.8+1.8mm con RM del Sistema Al-Y-Si [2].

2.4 Fases Intermetálicas

Una fase intermetálica es la combinación que resulta de mezclas homogéneas de dos o más metales fundidos. En el caso de una aleación binaria, por ejemplo, un compuesto intermetálico es una fase intermedia entre sus dos elementos constituyentes, y sus características son por tanto diferentes a la de estos [25].

A partir de mezclas homogéneas de metales fundidos pueden separarse en algunos casos fases sólidas con proporción de ambos metales, la fórmula que corresponde a estas fases intermetálicas no puede obtenerse a partir de las normas generales sobre la valencia de los metales constituyentes. Dos clases de átomos pueden originar entre sí más de uno de estos compuestos, por ejemplo: AuCd, Au₅Cd₄, AuCd₃ [25].

Una propiedad que poseen algunos de estos materiales es el polimorfismo, es decir: una misma composición puede presentar diferentes estructuras cristalográficas [25].

2.4.1 Influencia de Fases Intermetálicas en Unión Disímil Aluminio-Magnesio Mediante el Proceso de Soldadura RSW

Hayat y colaboradores [17] realizaron un estudio donde los metales empleados para la unión fueron láminas de la aleación de magnesio AZ31 y de aluminio A1350 de 1.7 y 1.5mm de espesor respectivamente, ambas láminas fueron cortadas en piezas de 100×30mm. La composición química y propiedades termo-físicas se presentan en la Tabla 2.7

Tabla 2.7 Composición Química (% en peso) y Propiedades Termo-Físicas de las Aleaciones AZ31 Y A1350 [17].

Aleación de Aluminio A1350							
Mg	Zn	Fe	Ni	Cr	Mn	Ga	Al
0.0020	0.0094	0.2620	0.0017	0.0010	0.0110	0.0110	99.60
Si	Cu	Sb	V	B	Ti	P	
0.0736	0.0480	0.0016	0.0057	0.0010	0.0092	0.0010	
Aleación de Magnesio AZ31							
Al	Zn	Fe	Ni	Cr	Mn	Ga	Mg
2.5-3.5	0.6-1.4	0.005max	0.005max	...	0.20max	...	97.00
Si	Cu	Sb	V	B	Ti	Ca	
0.10max	0.05max	...	...	...	...	0.04max	
Materiales	Punto de Fusión	Densidad	Dureza (Vickers)	Esfuerzo de Tensión			
A1350	646-660°C	2.70g/m ³	40	96.5MPa			
AZ31	605-630°C	1.77g/m ³	73	275MPa			

Los valores de la corriente de entrada fueron 22, 23, 25, 27, 29, 31 y 33kA, las muestras fueron soldadas con una máquina neumática de Soldadura de Puntos por Resistencia de corriente alterna (CA), con una capacidad de 0 a 40kA de corriente de soldadura y una capacidad de 120kVA. Para la unión, un tiempo de soldadura de 15 ciclos, mientras que la presión del electrodo fue de 500kPa y un tiempo de presión del electrodo de 20 ciclos. (1 ciclo es igual a 0.02 segundos).

Como es conocido el calor de entrada en las uniones del Proceso de Soldadura de Puntos por Resistencia aumenta con el incremento de la corriente de soldadura. La cantidad de calor generado depende de tres factores: (1) el amperaje, (2) la resistencia del conductor, y (3) la duración de la corriente. Esto se puede deducir en la ecuación 2.1 [4]:

$$Q = I^2Rt \quad (2.1)$$

Donde Q es el calor generado en Joules (J), I es la corriente en Amperes (A), R es la resistividad eléctrica de los materiales para A1350=0.028Ωmm²/m y AZ31=0.092Ωmm²/m y t es la duración de la corriente en segundos (s). Como es ilustrado en la Figura 2.12, el incremento en la corriente de soldadura en la unión a traslape de las aleaciones de aluminio (A1350) y magnesio (AZ31) es directamente proporcional con el incremento en el calor de entrada [17, 18, 19].

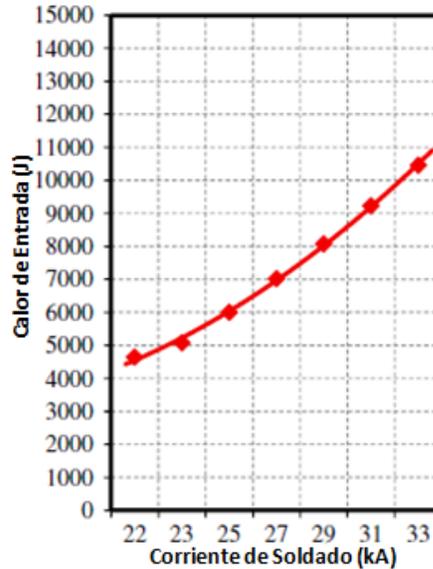


Figura 2.12 Variación en la Corriente de Soldado y Calor de Entrada [17].

Las muestras fueron examinadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, Scanning Electron Microscope). La Figuras 2.13a y b muestran el ancho del compuesto intermetálico y el ancho de la zona soldada establecidos después de una corriente de soldadura de 22kA, mientras que las Figuras 2.13c y d ilustran estas características pero con un valor de 33kA [17].

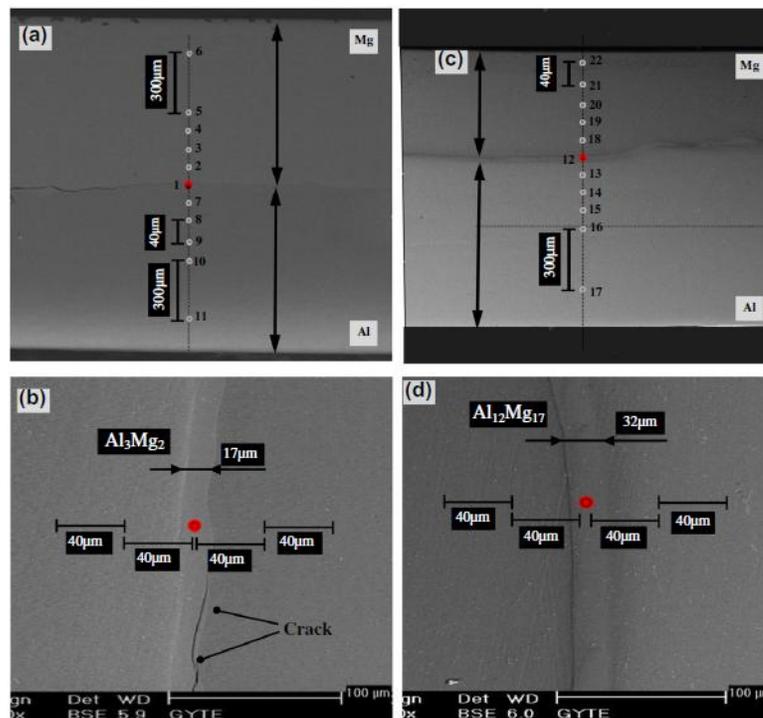


Figura 2.13 Análisis de las Muestras en las Zonas Soldadas (Mediante SEM): a) 22kA a 100x, b) 22kA a 500x, c) 33kA a 100x y d) 33kA a 500x [17].

Las Figuras 2.13b y d revelan que la anchura de los intermetálicos aumenta a medida que se incrementa la corriente de soldadura. Mientras que la anchura fase de la fase intermetálica fue de $17\mu\text{m}$ a 22kA , aumentó a $32\mu\text{m}$ a 33kA . La razón detrás de este resultado es que una mayor cantidad de magnesio entra en la fusión con el aumento del calor de entrada estableciendo un área de mayor cantidad de intermetálicos [17].

Se realizaron diversos ensayos [17] con el fin de evaluar las uniones; la Figura 2.14 ilustra la microdureza de los metales base, metales soldados y la zona afectada por el calor (ZAC).

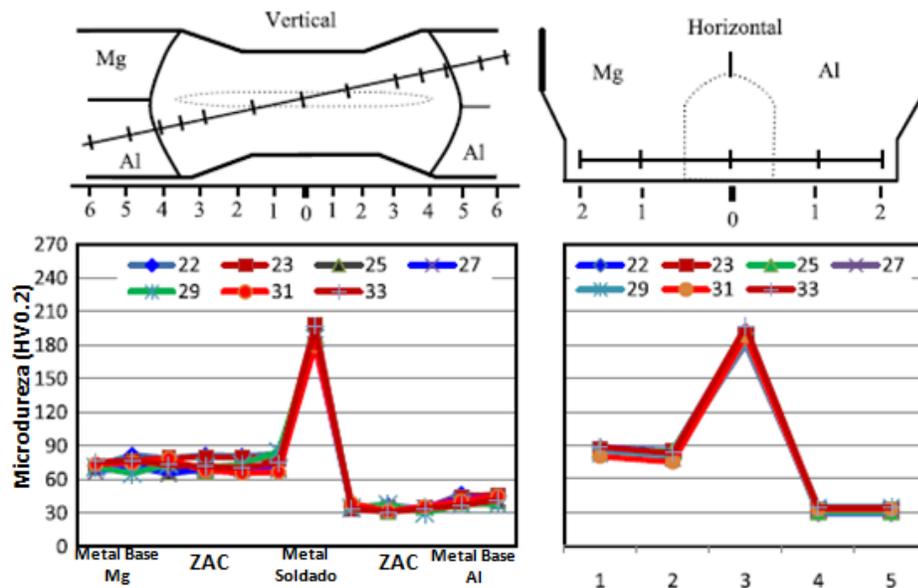


Figura 2.14 Perfiles de Microdureza con Diferentes Parámetros después de Soldado [17].

Debido a la naturaleza de la composición química de los materiales disímiles se observó una diferencia significativa en el valor de la dureza del núcleo de soldadura y los metales base en ambos lados de la soldadura. Los resultados obtenidos indican que el metal base de la cara de la hoja de Al de los materiales soldados es menor que el de la hoja de Mg. Los valores de microdureza fueron de aproximadamente 40 ± 5 de HV en el lado de Al y 73 ± 5 de HV en el lado Mg. Los valores de microdureza observados en el núcleo de soldadura fueron de 190 ± 10 HV. Los valores de microdureza obtenidos en el metal de soldadura demostraron la existencia de fases intermetálicas duras y frágiles en la región.

Los resultados mostrados en la Figura 2.13 son consistentes con los resultados obtenidos de microdureza [17]. (Ver Figura 2.14)

Otro ensayo realizado [17] fue el de esfuerzo cortante donde, uno de los resultados obtenidos fue que la capacidad de carga de esfuerzo cortante de los materiales se incrementó con el aumento de las corrientes pico de soldadura. Como se muestra en la Figura 2.15, la evaluación de los valores de carga de esfuerzo cortante reveló que los valores aumentaron hasta una corriente de soldadura, de 29kA, y luego disminuyeron. A medida que la temperatura en el diámetro del punto de soldadura se incrementó con el aumento de la corriente de soldadura, la unión se produjo en una zona más amplia. En cierta medida, una unión soldada con mayor fuerza y elongación (%) se logró con esta expansión.

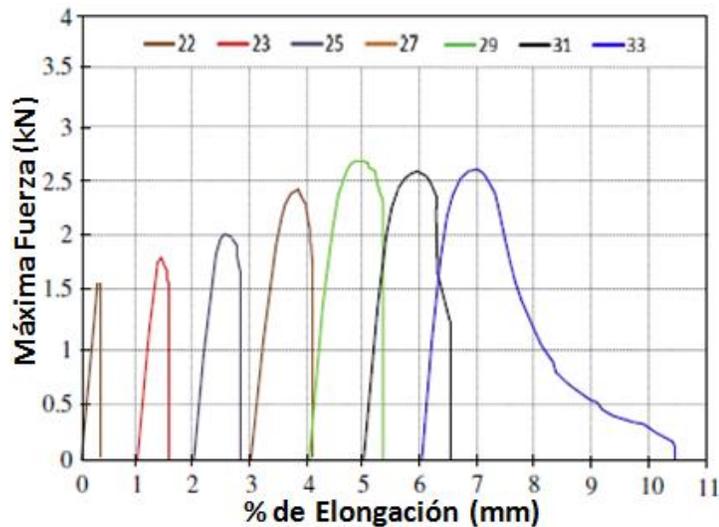


Figura 2.15 Efectos de la Corriente de Soldadura en la Capacidad de Carga de Esfuerzo Constante del Punto de Soldadura [17].

Las Figuras 2.16a-d muestran las superficies de fractura bilateral, tipos de fractura, y los modos de desgarre al final del experimento de corte a la tracción. Las Figuras 2.16a y b muestran las imágenes de las muestras soldadas a 33kA y desgarre, mientras que la Figura 2.16c y d ilustran las imágenes de las muestras soldadas a 22kA y desgarre en el modo de interface parcial. Después de examinar las imágenes de las piezas rotas, se observaron salpicaduras en el

lado del magnesio (Figura 2.16b y d). La fuerza afecta a la zona de soldadura (metal de soldadura y ZAC) durante los experimentos de corte a la tracción, que son el esfuerzo cortante (F_s), y la resistencia a la tensión (F_t) (Ver Figura 2.16e y f).

A medida que la fractura se produce en el núcleo de los parámetros de bajo amperaje (22kA), sólo el esfuerzo de corte se observa, el hecho conocido es que intermetálicos Al-Mg son una fase frágil y considerada como la principal razón de microfisuras en ensayos mecánicos. Las grietas se propagan de manera intercambiable a través de los huecos y las grietas entre los intermetálicos Al_3Mg_2 , Mg, Al y metales. Las grietas, que se propagan en la dirección de la resistencia a la tensión con el efecto del esfuerzo cortante en curso, terminan en el borde de la línea de otros conjuntos donde las dislocaciones son intensas, y por lo tanto causan fracturas. (Ver Figura 2.16f)

En el segundo caso, el ancho de los intermetálicos es mayor durante el proceso de soldadura que se realiza a alta corriente (33kA). El mecanismo de fractura avanza dentro de la región de los intermetálicos $Al_{12}Mg_{17}$, la formación de una zona de intermetálicos en una zona más gruesa (32 μm) de tal modo produce una disminución en la penetración de las grietas a los lados de Mg y Al y los lleva a las profundidades de la intermetálicos [17]. (Ver Figura 2.16e)

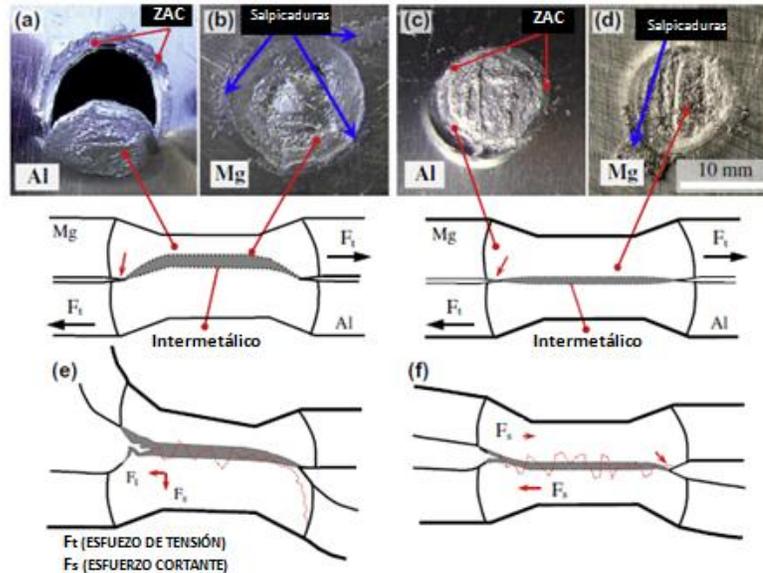


Figura 2.16 Modos de Falla del Proceso de Puntos por Resistencia [17].

En un estudio realizado por Liu et al. [20], usando el proceso de soldadura LBW, donde las fases en el área soldada fueron analizadas utilizando EDS. Se reportó mezcla de estructuras (84.21%Mg, 15.79%Al y 26.78%Mg-73.22%Al, etc.), intermetálicos $Al_{12}Mg_{17}$ y Al_3Mg_2 . No fueron encontradas mezclas de estructuras en este estudio. La razón de este resultado es que el proceso LBW es un método de soldadura por fusión, mientras que el proceso RSW es un método de semi-fundido (solo ocurre fusión parcial en el núcleo).

2.4.2 Influencia de Fases Intermetálicas en las Propiedades Mecánicas de la Unión de los materiales Aluminio-Magnesio mediante el proceso LBW.

Para este caso de estudio realizado por Borrisutthekul [15] los metales empleados fueron la aleación de magnesio AZ31B y la aleación de aluminio A5052-O ambas de 1mm de espesor. Las Tablas 2.8 y 2.9 muestran la composición química y propiedades mecánicas respectivamente.

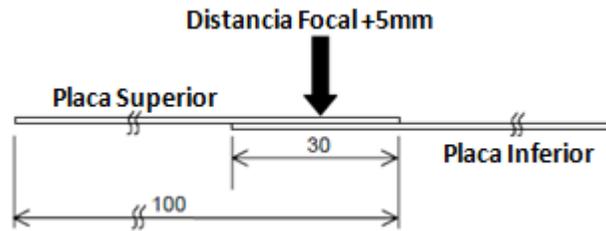
Tabla 2.8 Composición Química de las Aleaciones AZ31B Y A5052-O (% en peso) [15].

Materiales	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ni	Ca	Otros
AZ31B	2.5-3-5	<0.10	<0.03	<0.10	>0.20	Balance	...	0.5-1.5	<0.0050	<0.04	<0.30
A5052-O	Balance	<0.25	<0.40	<0.10	0.15-0.35	2.2-2.8	<0.10	...	...	...	<0.15

Tabla 2.9 Propiedades Mecánicas de las Aleaciones AZ31B y A5052B. [15]

Materiales	Esfuerzo a la Cedencia	Esfuerzo a la Tensión	Elongación
AZ31B	165MPa	257MPa	20%
A5052-O	100MPa	213MPa	24%

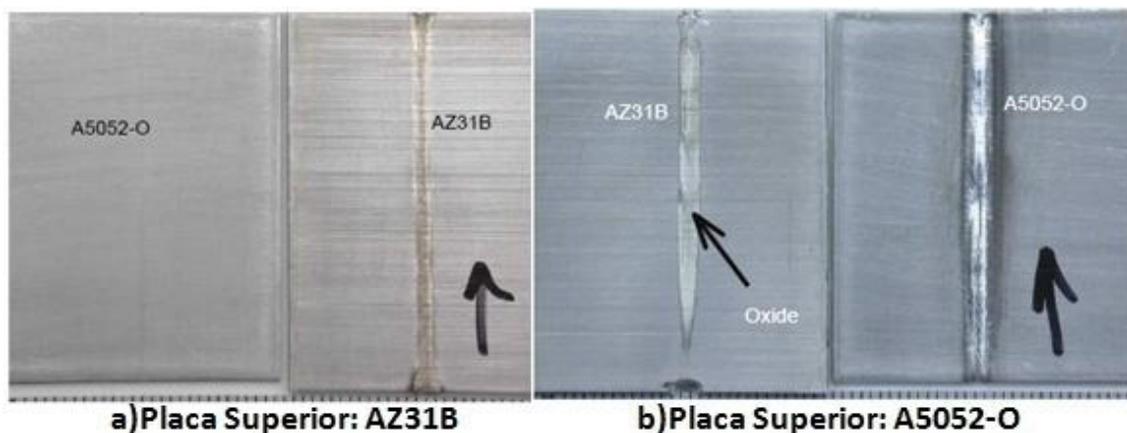
El proceso empleado fue el LBW Nb-YAG Onda Continua, con gas argón de protección (40l/min). La configuración de la unión se muestra en la Figura 2.17.

**Figura 2.17** Unión a Traslape (Línea Central) [15].

Parámetros Utilizados:

- Potencia del Láser: 3kW
- Distancia Focal: +5mm
- Densidad de Potencia: 370W/mm²

De los resultados de los procedimientos experimentales se determinó que la soldadura solo se logró solo cuando la placa superior fue la de la aleación AZ31B. Se encontró una capa de oxidación en la intercara de la aleación de magnesio cuando la placa superior fue la de la aleación de aluminio [15]. (Ver Figura 2.18).

**Figura 2.18** Apariencia de las caras de Soldadura, a) Placa Superior, AZ31B; b) Placa Superior, A5052-O [15].

La capa de compuestos intermetálicos formada entre el charco de soldadura y la placa inferior de metal (AZ31B) está compuesta de los intermetálicos Al_3Mg_2 y $Al_{12}Mg_{17}$, después de las pruebas de tensión cortante se encontró que la falla ocurrió en la zona de los intermetálicos, los cuales degradan la resistencia de la unión. La máxima carga y resistencia obtenidas para la unión fueron 520N y 20MPa, respectivamente [15]. Debido a la fragilidad de los compuestos intermetálicos, estos deben de ser controlados [22].

Para disminuir la penetración excesiva en la placa inferior se aplico el haz con una inclinación angular de 40° con una configuración de junta a traslape en esquina, así mismo se utilizo un bloque de cobre donde, este bloque hizo contacto con la placa inferior aplicando una carga de 3Nm [15]. La Figura 2.19 muestra la configuración de la unión.

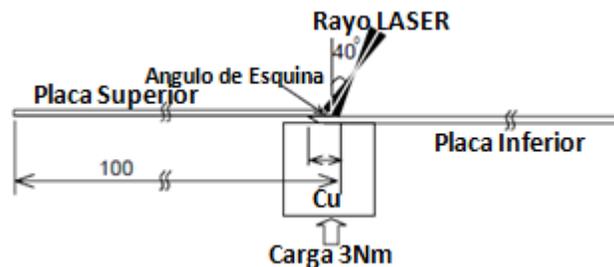


Figura 2.19 Configuración de Junta de Traslape en Esquina [15].

La capa de compuestos intermetálicos fue más delgada, la cual decreció a medida de que la velocidad de avance de la soldadura aumentaba, este parámetro se convirtió dominante en cuestión del control de falla de carga [15].

La máxima resistencia cortante fue de 48MPa, la resistencia de la unión obtenida fue más alta que la de la junta de traslape de línea central. Comparando con una unión de las aleaciones de magnesio AZ31B y de aluminio A1050 hecha por el proceso de soldadura por fricción (FSW, Friction Stir Welding) por sus siglas en inglés, se obtuvo una resistencia máxima de 90MPa [23] y otra unión de las aleaciones AZ31 y A5052 realizada mediante el proceso de soldadura por difusión (DF, Diffusion Welding) por sus siglas en

inglés se reportó una resistencia máxima de 80Mpa [24]. Basado en la diferencia del modo de carga, se asume que la fuerza cortante es igual a $1/\sqrt{3}$ de la resistencia a la tensión del mismo material. Según la ecuación anterior la resistencia máxima es igual a 83Mpa [15].

2.5 Óxidos

Todas las superficies de metal son reactivas. Por lo tanto, en condiciones ambientales, todos ellos tienen capas de óxido en la superficie. Estos varían en gran medida a la forma de metal y al espesor, forman monocapas atómicas, de angstroms, o más. La capa de óxido de oro es muy fina, por ejemplo, en comparación con el cobre o el plomo que es bastante gruesa. El oxígeno no es el único contaminante superficial, pero sí el más frecuente. Otros son el azufre y el fósforo [28].

El óxido es la combinación del oxígeno con un cuerpo, por ejemplo, óxido de carbono (CO), los óxidos pueden ser metálicos (básicos) y no metálicos (ácidos), los metálicos forman hidróxidos y los no metálicos forman oxácidos [28].

2.5.1 Óxidos Metálicos

Son compuestos con un elevado punto de fusión que se forman como consecuencia de la reacción de un metal con el oxígeno, esta reacción es la que produce la corrosión de los metales al estar expuesto al aire libre. Un ejemplo de la formación de un óxido metálico es la reacción del magnesio con el oxígeno, la cual ocurre con mayor rapidez cuando se quema una capa de magnesio. La capa de magnesio de color grisáceo se torna en un polvo blanco que es el óxido de magnesio [29], ecuación 2.2:



2.5.2 Efecto de Recubrimiento de Zinc en la reducción de Óxidos Metálicos de la Unión Magnesio-Acero mediante el Proceso de Soldadura RSW

Los materiales empleados por Liu et al. [16] en este trabajo fueron hojas de la aleación de magnesio AZ31B y un acero DP600 con un recubrimiento de zinc, ambos con un espesor de 1.5 y 1.2mm, respectivamente. Las uniones fueron hechas con una configuración de unión a traslape, los cupones fueron cortados con un ancho de 25mm y una longitud de 100mm además fueron limpiados ultrasónicamente por 5 minutos con acetona. Antes de soldar, las hojas de magnesio fueron limpiadas con una solución al 2.5% de ácido crómico para minimizar los óxidos de la superficie que causan efectos negativos en la resistencia de la soldadura y en la vida del electrodo. La microestructura de la aleación AZ31B se muestra en la Figura 2.20a, se pueden observar granos equiaxiales con un tamaño de grano promedio de $7.5\mu\text{m}$, medido de acuerdo con ASTM E112-96, mientras que en la Figura 2.20b se muestra la microestructura típica de un acero doble fase consistente en islas de martensita dentro de la matriz de ferrita equiaxial. Así como la Figura 2.20c muestra el espesor del recubrimiento de zinc en el acero doble fase.

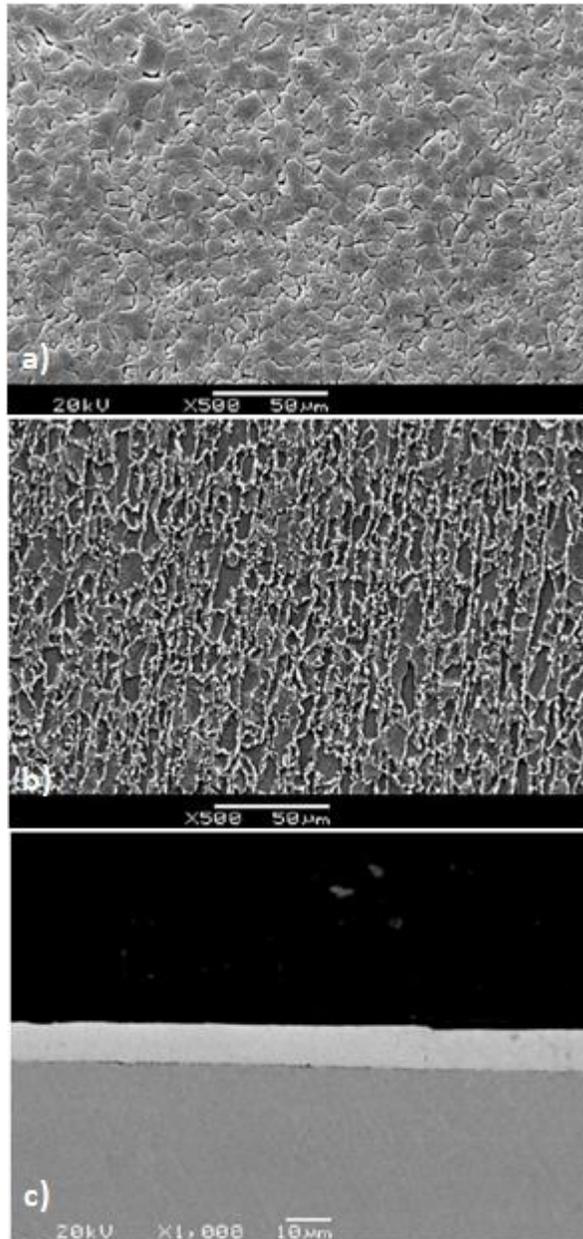


Figura 2.20 Microestructura de las Aleaciones, a) AZ31B, b) DP600, y c) Espesor del recubrimiento de Zinc en el Acero DP600 [16].

Los especímenes fueron soldados utilizando una máquina de corriente directa (DC) de mediana frecuencia, en el modo de corriente constante. En la Figura 2.21 se muestra un diagrama esquemático de las piezas de trabajo y los electrodos en la configuración de unión a traslape.

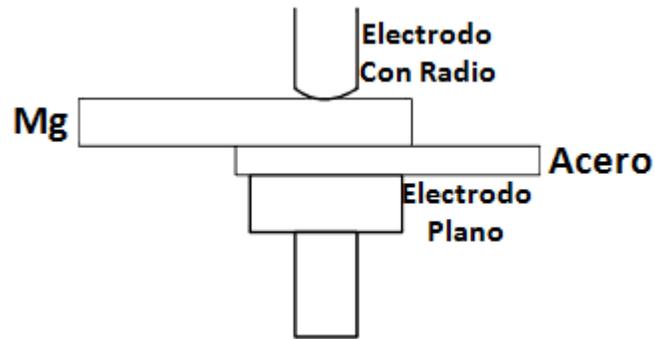


Figura 2.21 Diagrama esquemático de las piezas de trabajo y electrodos [16].

La razón de utilizar electrodos diferentes es que si las puntas fueran simétricas, la generación de calor y el pico de temperatura del lado del acero pueden ser más altos que del lado del magnesio, esto podría inducir a la fusión del acero y a la evaporación de magnesio; provocando grietas, poros y segregación en la zona de fusión (pepita) [16].

Por otra parte las variables utilizadas en este trabajo fueron:

- Presión= 4kN
- Corriente= 20kA
- Tiempo de Soldadura= 16 ciclos(max) (60 ciclos/segundo)

Para evaluar las propiedades mecánicas de la unión se realizaron ensayos de tensión cortante. La Figura 2.22a muestra la sección transversal de la unión donde la zona de fundido del magnesio se revela y su diámetro se máximo se define como D1, el diámetro de la superficie de fractura se definió como D2 (Ver Figura 2.22b). El diámetro de zinc fundido en la interfaz del acero se definió como D3 [16]. (Ver Figura 2.22c)

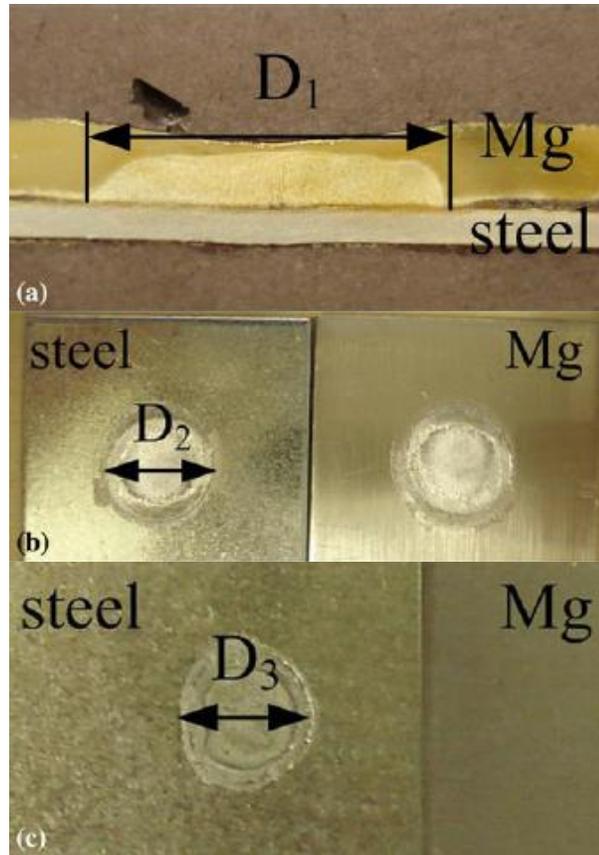


Figura 2.22 Medidas de las dimensiones de soldadura con los siguientes métodos: a) Sección transversal de la soldadura, b) Fractura de superficie, y c) Zinc fundido en la interfaz del Acero [16].

El incremento de todos los diámetros aumenta con el tiempo de soldadura (Ver Figura 2.23), sin embargo D_2 y D_3 llegan a un nivel estable después de 8 ciclos, no obstante D_1 siguió aumentando con el incremento del tiempo de soldadura, también se observó que el orden de los tres diámetros fue $D_3 > D_2 > D_1$ [16].

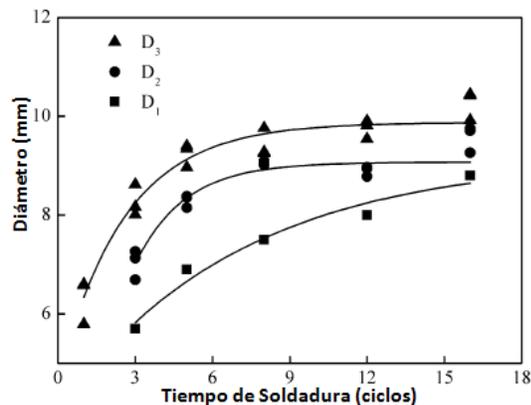


Figura 2.23 Crecimiento de la soldadura (sección transversal), tamaño de pepita (D_1), diámetro de superficie de fractura (D_2) y diámetro de Zinc fundido en la interfaz del Acero/electrodo [16].

La resistencia de las uniones también aumenta a medida de que se incrementa el tiempo de soldadura, al igual que el aumento en el diámetro se llega a un nivel estable después de 8 ciclos (Ver Figura 2.24). La resistencia mínima de las soldaduras para cumplir con el código AWS D17.2 es cuando el tiempo de soldadura es mayor a 3 ciclos [16].

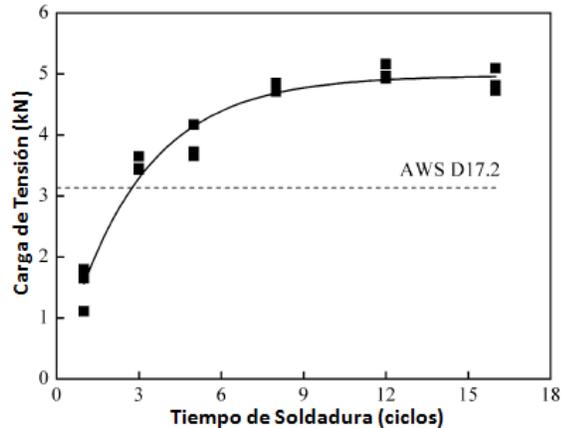


Figura 2.24 Resistencia a la Tensión Cortante de la unión Mg/Acero vs el Tiempo de Soldadura [16].

La Figura 2.25 muestra la distribución de microdureza a lo largo del centro de una soldadura hecha en 16 ciclos. En el lado del magnesio, la dureza fue mayor en la interfaz y la disminuye a lo largo de la dirección del espesor. Sin embargo, en la parte del acero, el área de mayor dureza encontrada fue entre la interfaz y el centro de la hoja. Se cree que la dureza alcanzada del lado del Mg fue debido al fortalecimiento de la aleación, y él en área cerca de la interfaz había más elementos de aleación. Debido a que la conductividad eléctrica del acero es mucho menor que la del magnesio, la generación de calor en la parte del acero sería más alta que en el lado del magnesio. El acero podría servir como un yunque caliente para calentar al magnesio. Debido a las pérdidas de calor tanto de magnesio y el electrodo/acero, la temperatura más alta se produjo en el centro del espesor del acero, lo que podría promover transformaciones de martensita, y por lo tanto aumentar el contenido de martensita, y por consiguiente, obtener una mayor dureza local [16].

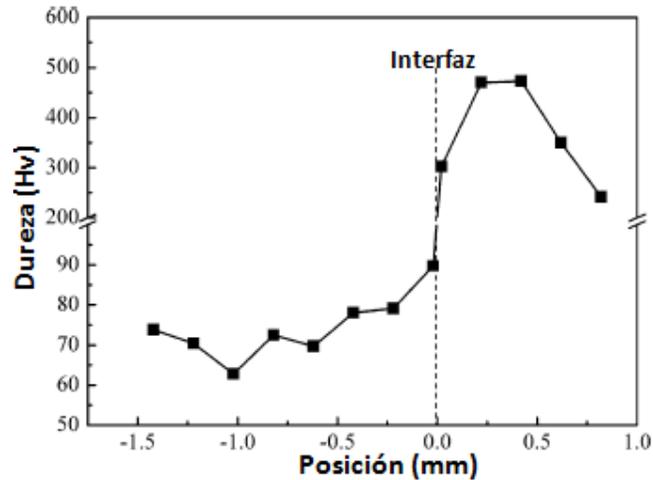


Figura 2.25 Distribución de Dureza a lo largo del centro de soldadura hecha a 16 ciclos [16].

Se realizó análisis de difracción por rayos X; dicho análisis se efectuó en cuatro regiones. La mayoría de las fases en las regiones I y II fueron Mg, Zn y $MgZn_2$. La cantidad de Zn en región II fue mayor que la región I, y unas pocas partículas de fases $Al_5Mg_{11}Zn_4$ se encontraron. Las regiones III y IV fueron casi de la misma composición que la aleación de magnesio a excepción de una fase de $Al_5Mg_{11}Zn_4$, que no existe en el material base AZ31B. Se cree que la aparición de la fase $Al_5Mg_{11}Zn_4$ es resultado de la disolución de Zn adicional en el charco de soldadura del Mg. No hay gran cantidad de fases frágiles Mg-Zn formadas en la pepita ya que la mayoría de la capa de zinc fue expulsada de la región central y depositada en las regiones I y II de la pepita [16]. La Figura 2.26 muestra las regiones analizadas mediante difracción por rayos .

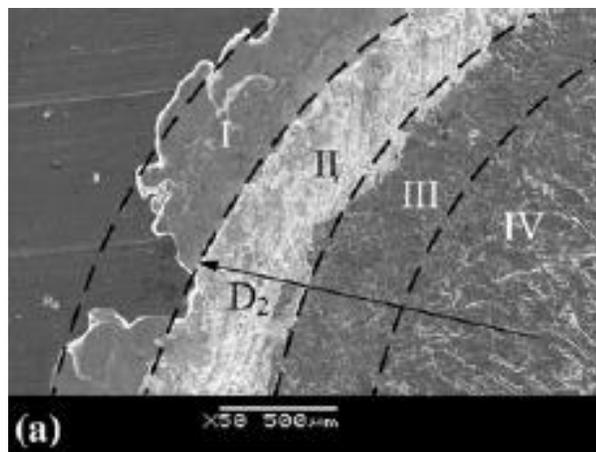


Figura 2.26 Regiones analizadas mediante Difracción por Rayos X [16].

Por otra parte, la interfaz de acero y Mg fueron selladas mecánicamente por el zinc durante la soldadura; por lo tanto, no podrían formar óxidos metálicos. Este elemento en particular crea una condición similar a la soldadura por difusión en una cámara de vacío. El revestimiento de zinc no tiene influencia en la resistencia de las soldaduras de fusión como el caso de una unión acero-acero [27], pero produce grandes efectos en la unión ya que dicho elemento actúa como aporte Brazing en el caso de esta unión disímil Mg-Acero [16].

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

3.1 Adición de Aportes Brazing en la Unión Aluminio/Magnesio mediante el Proceso de Soldadura RSW

La adición de aportes Brazing en la unión disímil Aluminio/Magnesio tiene efectos significativos en la reducción de la corrosión, esto es debido a que se regula el proceso de cristalización, resultando una dispersión de granos. Como es bien sabido la corrosión se produce debido a la diferencia de potenciales entre los metales.

De acuerdo con la bibliografía, la formación del anillo de soldadura protege a la unión del medio circulante por lo cual se obtiene un aumento en la resistencia a la corrosión, cabe señalar que los elementos aleantes del aporte Brazing que causan mayor efecto en la unión son el silicio y el itrio.

El silicio es un elemento aleante de importancia debido a que este propicia que el aluminio (aporte Brazing) baje su punto de fusión, de esta manera, los metales base (magnesio y aluminio) no llegan a su punto de fusión, se logra la junta y se reduce la formación de compuestos intermetálicos. Por su parte, la incorporación del itrio tiene efectos positivos en la junta debido a que aumenta la resistencia a la oxidación y a la corrosión a altas temperaturas.

3.2 Formación de Fases Intermetálicas

La formación de compuestos intermetálicos tanto en las uniones Aluminio/Magnesio como en las Magnesio/Acero promueve la formación de fases frágiles y duras en la región de soldadura, por lo que cuando se realizan ensayos de tensión, la ruptura ocurre en la zona de intermetálicos.

Una variable esencial a controlar es el calor de entrada, para el proceso RSW la principal variable es la corriente, mientras que para el proceso LBW es la potencia; en los estudios realizados se determinó que existe una relación entre el calor de entrada y la anchura de los intermetálicos, esto es debido a que al existir un aumento en la cantidad de calor de entrada, mayor cantidad de los metales base entran en fusión por lo tanto el área de compuestos intermetálicos es más ancha.

3.3 Alternativa para la reducción de formación de Óxidos Metálicos en la Unión Magnesio/Acero mediante el Proceso de Soldadura RSW.

La formación de óxidos metálicos en la zona de soldadura decrementa la resistencia en las uniones, para tal efecto en la literatura consultada se empleó una hoja de acero con recubrimiento de zinc (acero galvanizado).

El propósito del recubrimiento de zinc es brindar protección contra la corrosión, pero en el caso de la unión con una aleación de magnesio hecha mediante el proceso RSW, este elemento formó una interfaz en el punto de soldadura que actuó como un sello mecánico que protege a la zona de soldadura de la formación de óxidos metálicos, es decir esta dona o anillo protege a la unión del medio externo a esta.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la recopilación y análisis de la información se concluye que es factible unir materiales disímiles, tanto juntas Magnesio/Aluminio como Magnesio/Acero, teniendo en consideración el diseño de unión así como el proceso de soldadura a emplear.

Con respecto a las propiedades mecánicas obtenidas cada unión presenta buenos resultados en cuanto a su evaluación, es decir, se obtienen buenos valores en lo referente a pruebas de tensión, no obstante se presentan defectos metalúrgicos (poros, mezcla de fases frágiles, fases intermetálicas).

Uno de los principales mecanismos degenerativos de este tipo de uniones (disímiles) es la corrosión, esto es debido a la diferencia de potenciales eléctricos, por lo cual la principal alternativa para la reducir la susceptibilidad a la corrosión es el empleo de recubrimientos o aportes brazing.

La implementación del proceso de Soldadura de Puntos por Resistencia y Láser, tienen la facilidad de combinarse con algún otro proceso de soldadura (Proceso de Soldadura Híbrido), esta combinación es una alternativa para la pronta implementación uniones disímiles tanto en la industria automotriz, como en la industria aeroespacial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Lang B, Sun DQ, Li GZ, Zhu BQ. 2009. Electrode Degradation in Resistance Spot Welding of Magnesium Alloy. *ISIJ International* 49(11):1744-1748.
2. Men'shilov GA, Antonov VG. 2009. Using brazing alloys in resistance spot welding of joints in aluminium-magnesium alloys. *Welding International* 23(4):291-294.
3. Meschut, G. (2006). *Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications*. Joining. Stuttgart: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 335.
4. Althouse AD, Turnquist CH, Bowditch WA, Bowditch KE, Bowditch MA. 2004. *Modern Welding*. The Goodheart-Willcox Company Cap. 19:467-482.
5. AWS Handbook. 2001. *Welding Processes* AWS International. 4(2). 8th Edition.
6. Bastida R. 2008. Propiedades de los Metales II. *IPN* (7):92-93.
7. Nieh TG, Wadsworth J. 1987. Magnesium Alloy AZ32 Foil Prepared by Sputter Deposition at 200°C. *Journal of Material Science Letters*. (6): 1150-1152.
8. Campbell FC. 2008. *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. ASM International.
9. Kainer KU. 2003. *Magnesium Alloys and Technologies*. Geesthacht: Willey-VCH.
10. Molera S. 2009. *Metales Resistentes a la Corrosión*. Barcelona: Marcombo.
11. Baron J, Shaw J. 2006. *Formado de Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS)*. Metalforming.
12. Avramovic-Cingara G, Saleh CA. 2009. Void Nucleation and Growth in Dual-Phase 600 During Uniaxial Tensile Testing. *Metallurgical and Materials Transactions* (40):3117-3127.

13. COMIMSA. 2010. Tecnologías de la Soldadura aplicadas a la Industria de Equipo Ligero: Analisis de Tendencias 2010 - 2020. Corporacion Mexicana de Investigacion en Materiales.
14. ASM Handbook. 1996. Corrosion. ASM International. Vol (13) 5ta. Ed.
15. Borrisutthekul R, Miyashita Y, Mutoh Y. 2005. Dissimilar Material Laser Welding between Magnesium alloy AZ31B and Aluminium alloy A5052-O. IOPscience.199-204.
16. Liu L, Xiao L, Feng JC, Tian YH, Zhou SQ, Zhou Y. 2010. The Mechanisms of Resistance Spot Welding of Magnesium to Steel. Metallurgical and Materials Transactions (41):2651-2660.
17. Hayat F. 2010. The Effects of the Welding Current on Heat Input, Nugget Geometry, and the Mechanical and Fractural Properties of Resistance Spot Welding on Mg/Al Dissimilar Materials. Materials and Design.
18. Liu P, Li P, Geng H, Wang J. 2007. Microstructure characteristics in TIG welded joint of Al/Mg dissimilar materials. Matter Lett (61):1288-1291.
19. Kahraman N. 2007. The influence of welding parameters on the joint strength of resistance spot-welded titanium sheets. Mater Des (28):420-427.
20. Liu LM, Wang HY, Zhang TD. 2007. The analysis of laser weld bonding of Al alloy to Mg alloy. Scripta Mater (56):273-276.
21. Chacalev AA, Men'shikov GA. 1981. Resistance spot welding of components of different thicknesses: New developments in the technology of resistance welding. Moscow: Mashinostroenie.
22. Rathod MJ, Kutsuna M. 2004. Joining of aluminium alloys 5052 and low carbon steel by laser roll welding. Weld J. (83):16-26.
23. Kazuyoshi K, Katsutoshi A, Hikaru T. 1995. Mechanical properties of friction welding between AZ31B magnesium alloy and aluminium. J Jpn Institute Light Met. (45):255-269
24. Fujimaki M, Miyashita Y, Mutoh Y. 2004. Reaction at the interface and the strength of AZ31/A5052 diffusion bonding joint. Proceedings 41th Jpn Soc Mech Eng. 29-30.

25. Unidad de Cultura Científica de la Universidad Autónoma de Madrid. 2010. Los compuestos intermetálicos como acumuladores de Hidrógeno. Universidad Autónoma de Madrid.
26. Carrier C. 1995. Handbook for Brazing. Carrier Corporation.
27. Gedeon SA, Eagar TW. 1986. Metallurgical Transactions. (17):887-901.
28. Gilman JJ. 2009. Chemistry and Physics of Mechanical Hardness. John Wiley & Sons Inc.
29. Beyer L, Fernández, V. 2004. Química Inorgánica. España: Ariel.
30. RWMA. 2003. Resistance Welding Manual. Resistance Welder Manufacturers' Association. 4th Edition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Criterios de selección del proceso de unión en el diseño de estructuras [3].	2
Figura 2.1 Ejemplos de los cuatro principales proceso de unión utilizados en la “Industria Ligera”: A) Fijación Mecánica; B) Adhesivos; C) Soldadura por Fusión; D) Soldadura mediante Capilaridad [13].	7
Figura 2.2 Clasificación de las Tecnologías de la Soldadura consideradas en este documento [13].	8
Figura 2.3 Diagrama típico de un circuito de Soldadura por Puntos monofásico [5].	10
Figura 2.4 Diseño de cara para electrodos comúnmente usados en el proceso RSW [4].	12
Figura 2.5 Representación esquemática de un Láser de Estado Sólido [5].	14
Figura 2.6 Salida de un Láser de Estado Sólido a pulsos típico, comparada con el aporte de luz de excitación a la varilla en función del tiempo [5].	15
Figura 2.7 Acción de la Capilaridad en la Soldadura de Tubería [26].	16
Figura 2.8 Microestructura de un acero DP600 atacado con (a) y (d) nital al 2%, (b) picral al 4%, y (c) picral al 4% seguido por solución SMB. (a) F-granos de ferrita, (b) B-bainita, (c) M-martensita, y (d) distribución de bandas de martensita. Micrografías obtenidas en plano tridimensional. ND-dirección normal, RD-dirección de rolado, y TD-dirección transversal [12].	25
Figura 2.9 Corrosión en Metales [10].	26
Figura 2.10 Diagrama de los Valores de Resistencia Eléctrica Re, los Puntos Soldados AMg6+RM+AMg6: 1) Sin RM, 2) Con RM de la Aleación VPr27, 3) y 4) Con las Aleaciones del Sistema Al-Ge-Si y Al-Y-Si, respectivamente [2].	29
Figura 2.11 Radiografía a 20x de la Sección de un Punto de Soldadura de	29

la Aleación AMg6 con un espesor de 1.8+1.8mm con RM del Sistema Al-Y-Si [2].	
Figura 2.12 Variación en la Corriente de Soldado y Calor de Entrada [17].	32
Figura 2.13 Análisis de las Muestras en las Zonas Soldadas (Mediante SEM): a) 22kA a 100x, b) 22kA a 500x, c) 33kA a 100x y d) 33kA a 500x [17].	32
Figura 2.14 Perfiles de Microdureza con Diferentes Parámetros después de Soldado [17].	33
Figura 2.15 Efectos de la Corriente de Soldadura en la Capacidad de Carga de Esfuerzo Constante del Punto de Soldadura [17].	34
Figura 2.16 Modos de Falla del Proceso de Puntos por Resistencia [17].	36
Figura 2.17 Unión a Traslape (Línea Central) [15].	37
Figura 2.18 Apariencia de las caras de Soldadura, a) Placa Superior, AZ31B; b) Placa Superior, A5052-O [15].	37
Figura 2.19 Configuración de Junta de Traslape en Esquina [15].	38
Figura 2.20 Microestructura de las Aleaciones, a) AZ31B, b) DP600, y c) Espesor del recubrimiento de Zinc en el Acero DP600 [16].	41
Figura 2.21 Diagrama esquemático de las piezas de trabajo y electrodos [16].	42
Figura 2.22 Medidas de las dimensiones de soldadura con los siguientes métodos: a) Sección transversal de la soldadura, b) Fractura de superficie, y c) Zinc fundido en la interfaz del Acero [16].	43
Figura 2.23 Crecimiento de la soldadura (sección transversal), tamaño de pepita (D1), diámetro de superficie de fractura (D2) y diámetro de Zinc fundido en la interfaz del Acero/electrodo [16].	43
Figura 2.24 Resistencia a la Tensión Cortante de la unión Mg/Acero vs el Tiempo de Soldadura [16].	44
Figura 2.25 Distribución de Dureza a lo largo del centro de soldadura hecha a 16 ciclos [16].	45
Figura 2.26 Regiones al analizadas mediante Difracción por Rayos X [16].	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Composiciones nominales de las aleaciones de Magnesio forjado [8].	20
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas mínimas para aleaciones base Magnesio forjado [8].	21
Tabla 2.3 Designaciones (AA) aleaciones de Aluminio forjado [8].	23
Tabla 2.4 Composición nominal de Aleaciones de Aluminio forjado de la serie 5xxx [8].	23
Tabla 2.5 Composición Química del Acero DP600 (% en peso) [12].	24
Tabla 2.6 Materiales de Aporte de Referencia [2].	28
Tabla 2.7 Composición Química (% en peso) y Propiedades Termo-Físicas de las Aleaciones AZ31 Y A1350 [17].	31
Tabla 2.8 Composición Química de las Aleaciones AZ31B Y A5052-O (% en peso) [15].	36
Tabla 2.9 Propiedades Mecánicas de las Aleaciones AZ31B y A5052B [15].	37