

**República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia-Electromecánica
Departamento Mecánica**

Efecto del proceso de soldadura por fricción radial en una aleación de aluminio AA 5754

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Autor: Dargel Pérez Tamayo

**Tutores: Prof. Tit. Tomás Fernández Columbié, Dr. C.
Prof. Asist. Elis Efraín Guzmán Romero, Ing.**

Moa - 2017



Declaración de autoridad:

Yo: Dargel Pérez Tamayo

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Dargel Pérez Tamayo

Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié

Ing. Elí Efraín Guzmán Romero



DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi mamá Silvia Tamayo Regalado y mi papá Exilde Pérez Saname que siempre creyeron en mí y fueron ese impulso que me llevó a realizarme en mi vida profesional.

En especial a mi hija Daniela que ha sido mi inspiración en todos mis proyectos

Agradecimientos

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el aprendizaje como estudiante de la carrera que me ocupa.

A mis tutores Tomas Fernández Columbié y Eli Guzmán Romero

que sin su supervisión y

dedicación no se habría podido desarrollar este trabajo, gracias por su asesoría, enseñanza y conocimientos

tributados a favor de mi formación académica, a todas las personas que de una forma u otra me apoyaron en estos largos años de la carrera, a todos

Muchas Gracias

Pensamiento

La ciencia es buena porque nos ayuda a distinguir por medio de la acción lo posible de lo imposible y nos liberta de la servidumbre y la ignorancia.

Anatholy France

El camino hacia el éxito no debe ser recorrido con botas de siete leguas. Paso por paso, poco a poco, pedazo por pedazo, ese es el camino a la prosperidad, ese es el camino a la sabiduría, ese es el camino a la gloria.

Charles Buxton

El porvenir del país está ligado directamente al desarrollo de la ciencia y la técnica. Nunca podemos caminar con nuestros propios pies, mientras no tengamos una tecnología avanzada, basada en una técnica propia, en una ciencia propia. Por ello, la tarea de crear ingenieros es importante...

Ernesto Che Guevara

Resumen

En el trabajo se estableció el efecto del proceso de soldadura por fricción radial en una aleación de aluminio AA 5754 y determinar las variaciones metalúrgicas que se producen en la misma. A través de barras de esta aleación de 12 milímetros de diámetro y en un torno 16 K 20, se sometieron a condiciones de fricción con número de revoluciones de 1 200 y 1 400 rev/min y presión de forja de 0,9 y 1,9 Mpa respectivamente. La continuidad metalúrgica se evaluó con técnicas de microscopía óptica, ultrasónica y de líquidos penetrantes. Las microestructuras obtenidas presentan estructuras consistentes en precipitados de Mg_2Si y de Mg_2Al_3 y dendritas, producto de las variaciones en la temperatura de fusión que van desde 318 hasta 350 °C y la de forja desde 224 hasta 327 °C según el número de revoluciones y las presiones aplicadas en ésta zona. Los ensayos no destructivos, aunque permiten afirmar que aunque se logra continuidad metalúrgica en la unión, también se evidenció la presencia de una grieta a una longitud de 3,5 mm del borde superior y de 1 milímetro de profundidad, defecto que invalida la unión. Por último se analiza la valoración económica y el impacto medioambiental de cada uno de los procesos.

Abstract

In the work the effect of the welding process settled down for radial friction in an alloy of aluminum AA 5754 and to determine the variations metallurgical that take place in the same one. Through bars of this alloy of 12 millimeters of diameter and in a lathe 16 K 20, they underwent conditions of friction respectively with number of revolutions of 1 200 and 1 400 rev/min and pressure of forge of 0,9 and 1,9 Mpa. The continuity metalúrgica was evaluated with technical of optic, ultrasonic microscopy and of penetrating liquids. The obtained microstructure presents consistent structures in precipitate of Mg_2Si and of Mg_2Al_3 and dendritas, product of the variations in the coalition temperature that you/they go from 318 to 350 °C and that of forge from 224 up to 327 °C according to the number of revolutions and the pressures applied in this area. The non destructive rehearsals, although they allow to affirm that although continuity metalúrgica is achieved in the union, also you the presence of a crack to a longitude 3,5 mm of the superior border and of 1 millimeter deep, defect that invalidates the union. Lastly it is analyzed the economic valuation and the environmental impact of each one of the processes.

TABLA DE CONTENIDOS

SÍNTESIS	Pág
INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	
1.1. Introducción	5
1.2. Generalidades del aluminio	5
1.3. Soldadura del aluminio y sus aleaciones por métodos convencionales	6
1.4. Soldadura por fricción radial o rotativa	11
1.4.1 Principios de la soldadura por fricción radial	12
1.5. Soldadura del aluminio y sus aleaciones por fricción radial o rotativa	18
1.6 Parámetros de la soldadura por fricción	19
1.6.1 Efecto de los parámetros de proceso en la distribución de esfuerzos residuales	20
1.7. Microestructura del aluminio	23
1.7.1 Recristalización en las aleaciones de aluminio	24
1.8. Conformado superplástico	26
1.8.1 Mecanismos de la deformación superplástica	27
1.8.2 Características de las aleaciones Al-Mg	28
1.9 Conclusiones del capítulo 1	30
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción	31
2.2 Composición química de la aleación AA 5754	31
2.3 Microestructura patrón de la aleación de aluminio	32
2.4 Preparación de la unión	32
2.4.1 Variables operativas utilizadas para el proceso de unión	34
2.4.2 Relaciones entre las variables	35
2.5 Medición de la temperatura	37
2.6 Procedimiento metodológico para el proceso de soldadura	38
2.6.1 Cálculo de la fuerza de calentamiento	38
2.6.2 Cálculo del área de contacto o de soldadura	38
2.6.3 Cálculo de la fuerza de contacto	39



2.6.4 Cálculo de la distribución de la temperatura en la junta soldada	39
2.7 Elaboración mecánica de las probetas	40
2.7.1 Preparación metodológica de la probeta	40
2.7.2 Operaciones de desbaste y pulido	41
2.7.3 Ataque químico	41
2.7.4 Ensayo de dureza	41
2.7.5 Propiedades de la resina epoxi ROYAPOX-5050	42
2.7.6 Inspección de las uniones de soldadura con ultrasonido	43
2.7.7 Ensayo de líquidos penetrantes	45
2.8 Conclusiones del capítulo 2	47

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción	48
3.2 Análisis de la composición química	48
3.3 Análisis del procedimiento metodológico para el proceso de soldadura	49
3.3.1 Análisis de la temperatura en el proceso	51
3.4 Análisis microestructural de la ZTMA	52
3.4.1 Análisis microestructural para la condición de 1200 rev/min y 1,9 MPa	54
3.4.2 Análisis microestructural para la condición de 1400 rev/min y 0,9 MPa	55
3.4.3 Análisis microestructural para la condición de 1400 rev/min y 1,9 MPa	56
3.4.4 Análisis de la microdureza	57
3.5 Análisis por el método de ultrasonido y líquidos penetrantes	58
3.6 Valoración económica	62
3.7 Valoración del impacto medio ambiental	64
3.8 Peligros ambientales relacionados al ultrasonido	64
3.8.1 Peligros ambientales relacionados con los líquidos penetrantes	66
3.9 Conclusiones del capítulo 3	67

CONCLUSIONES GENERALES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍAS

ANEXOS

INTRODUCCIÓN

La industria moderna con la globalización de la economía ha entrado en un mercado altamente competitivo que la ha obligado a reevaluar todos sus procesos productivos para determinar en cuáles no es rentable y reformarlos o en caso contrario prescindir de ellos porque de otra manera estaría condenada a mediano o a largo plazo a tener que cerrar sus puertas con graves perjuicios para sus inversionistas y trabajadores. Con el fin de incrementar su productividad la industria ha tenido que implementar programas como los de reingeniería en todos sus procesos, círculos de calidad total, mantenimiento productivo total y otros tantos que han aparecido en la medida en que los que se están utilizando muestran sus debilidades y quedan obsoletos. Sea cual sea el caso, la mayoría de los programas cumplen bien o mal con el objetivo de bajar los costos de producción y mejorar la calidad de los productos; dicho en otras palabras incrementan la productividad de los procesos y por consiguiente la de las empresas.

Cada día se trata de extender la vida útil y las prestaciones de los sistemas mecánicos que se encuentran al servicio del hombre, aumentar su eficiencia y mejorar su rendimiento. En esta búsqueda por mejorar estas condiciones, tiene hoy en día mucha importancia la tecnología de los tratamientos superficiales y esto ha llevado a reconocer el valor del estudio de superficies y el entendimiento de los mecanismos que allí se generan, ya que de éstos se derivan la mayoría de las fallas que ocurren.

Cuando dos superficies nominalmente planas son colocadas en contacto, la rugosidad superficial causa muchos puntos de contacto discreto. La suma de las áreas de todos los puntos en contacto constituye el área real de contacto o simplemente el área de contacto y para la mayoría de los materiales ésta será sólo una pequeña fracción del área aparente (nominal) de contacto, la cual ocurriría si las superficies fueran perfectamente lisas. El área real de contacto es una función de la textura superficial, propiedades del material y las condiciones de carga.

El aluminio es un material que se ha incorporado progresivamente dentro de la industria gracias a su alta resistencia, bajo peso y ductilidad, entre otras propiedades. Parte de esta incorporación se debe al desarrollo de nuevas tecnologías de unión, principalmente la

soldadura por fusión y más objetivamente el proceso de soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa.

El aluminio y sus aleaciones son materiales que presentan ciertas características de baja densidad, buena resistencia a la corrosión del medio ambiente, por tal motivo son excelentes materiales en la fabricación de equipos y componentes en donde se requiere ahorro de peso y en donde se requiere una buena resistencia a la corrosión del medio ambiente, donde los aceros al carbono y baja aleación no tienen estas características, a pesar de su buen comportamiento mecánico.

El desarrollo del aluminio y sus procesos de soldadura va en aumento a consecuencia de la demanda actual de la industria del primer mundo, encontrándose una enorme variedad en sus aplicaciones dentro de las cuales podemos mencionar al automovilismo, construcciones estructurales y aeroespaciales, haciendo del aluminio y sus aleaciones un material versátil y flexible según sea su campo de acción. Sin embargo, estos avances e investigaciones no son reflejados en nuestro medio y generan cierto desconocimiento en el momento de la operación del aluminio y sus aleaciones en uniones soldadas.

Algunas de las aleaciones de aluminio, las más complejas, pueden alcanzar características mecánicas muy parecidas al de algunos aceros. La adición de elementos de aleación, la deformación en frío y el tratamiento térmico hacen que su baja resistencia mecánica mejore significativamente.

Situación problemática

La aleación de aluminio AA 5754 se considera que tiene buena soldabilidad a través de los procesos de soldadura por fusión, fundamentalmente el GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) e incluso al utilizar bajas velocidades de avance, el calor puede ser conducido mas allá del arco, lo que requiere continuos ajustes de los parámetros de soldadura. Estos procesos de soldadura producen la formación de óxidos, agrietamiento en caliente y porosidad, los cuales pueden engendrar efectos adversos sobre las propiedades mecánicas de las soldaduras. Los procesos de soldadura en estado sólido, tales como el proceso de soldadura por fricción radial o de torque que es capaz de retener la integridad de las microestructuras del material y propiedades mecánicas, además permite que puedan ser más comparables a la matriz del material base.

Problema

¿Es posible soldar aleación de aluminio AA 5754 mediante el proceso de soldadura por fricción radial o de torque donde se consideren parámetros de entrada tales como la velocidad de rotación, la velocidad de penetración y el tiempo de forja?

Como posible solución al problema se establece la siguiente **hipótesis**:

El desarrollo de un proceso de soldadura por fricción radial o de torque en la aleación de aluminio AA 5754 a través de la selección de los valores de los parámetros: velocidad de rotación, velocidad de penetración y tiempo de forja, permitirá la estimación del mapa térmico, así como el comportamiento microestructural y la dureza del material en la unión.

El presente trabajo se establece como **objetivo general**

Establecer el proceso de soldadura por fricción radial o de torque de la aleación de aluminio AA 5754 con su fundamentación en los parámetros microestructurales y la dureza en la zona fundida y la zona de influencia térmica luego de realizada la unión.

El **objeto de estudio** es unión metalúrgica en la ZF y la ZIT de la aleación de aluminio AA 5754 realizada mediante soldadura por fricción radial o de torque.

El **campo de acción** es el comportamiento microestructural y la dureza de la aleación de aluminio AA 5754 realizada mediante soldadura por fricción radial o de torque.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar la soldabilidad de las aleaciones de aluminio con el empleo de proceso de soldadura por fusión (métodos convencionales), así como su comportamiento durante el proceso de soldadura por fricción radial.
2. Establecer el procedimiento metodológico del proceso de soldadura por fricción radial o de torque en base a las variables: velocidad de rotación, velocidad de penetración y tiempo de forja en la aleación de aluminio AA 5754.
3. Caracterizar las variaciones microestructurales originadas en la zona fundida y la zona de influencia térmica, así como la dureza resultante obtenida después del proceso de soldadura por fricción o de torque en la aleación de aluminio AA 5754.

.



Para dar cumplimiento al objetivo se plantean las siguientes **tareas**:

1. Establecimiento del estado del arte relacionado con el objeto de estudio.
2. Planificación y realización de experimentos.
3. Análisis de los resultados y obtención de las microestructuras resultantes del proceso de soldadura por fricción radial o de torque en la aleación de aluminio AA 5754.
4. Fundamentación de las inestabilidades metalúrgicas que surgen en el proceso de soldadura de la aleación de aluminio AA 5754 sometida a proceso de soldadura por fricción radial o de torque.
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales de los procesos de soldadura convencionales y por fricción radial o de torque.

Capítulo 1

Marco teórico. Antecedentes investigativos

1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción

Un parámetro que ha contribuido con el éxito y crecimiento tecnológico se debe en gran parte al profundo interés que las empresas en el ámbito mundial han dado a la creación de centros y departamento de investigación. Por ende el alto nivel competitivo a nivel mundial ha encauzado la creación y mejora de procesos, así como el desarrollo de materiales con mejores propiedades físicas y mecánicas. El progreso tecnológico, es uno de los principales representante en los grandes descubrimientos de la humanidad.

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar un análisis de la bibliografía existente relacionada con las aleaciones de aluminio y sus propiedades mecánicas obtenidas durante el proceso de soldadura por fricción radial o rotativa.

1.2. Generalidades del aluminio

El aluminio es un metal que presenta múltiples propiedades muy apreciadas como son ligereza, notable dureza y resistencia, fácil mecanizado, excelente conductividad, así como un extraordinario aspecto decorativo, estas propiedades le han permitido ocupar un lugar destacado en las más modernas aplicaciones industriales.

Es un elemento metálico, de símbolo Al, número atómico 13, peso atómico 26,9815u, que pertenece al grupo IIIA del sistema periódico. El aluminio puro es blando y tiene poca resistencia mecánica, pero puede formar aleaciones con otros elementos para aumentar su resistencia y adquirir varias propiedades útiles.

Las aleaciones de aluminio son ligeras, fuertes y de fácil formación para muchos procesos de producción; son fáciles de ensamblar, fundir o maquinar y aceptan gran variedad de acabados. Por sus propiedades físicas, químicas y metalúrgicas, el aluminio se ha convertido en el metal no ferroso de mayor uso. Es un metal plateado con una densidad de $2,70 \text{ g/cm}^3$ a 20°C ($1,56 \text{ oz/in}^3$ a 68°F). El aluminio cristaliza en una estructura cúbica centrada en las caras, con lados de longitud de 4,0495 Angstroms (0,40495 nanómetros). Se conoce por su alta conductividad eléctrica y térmica, lo mismo que por su gran reflectividad (Chirino, 2015).

Con una pureza superior al 99,95 %, resiste el ataque de la mayor parte de los ácidos, pero se disuelve en agua regia. Su capa de óxido se disuelve en soluciones alcalinas y la

corrosión es rápida. El aluminio es anfótero y puede reaccionar con ácidos minerales para formar sales solubles con desprendimiento de hidrógeno. Fundido puede tener reacciones explosivas con agua.

El metal fundido no debe entrar en contacto con herramientas ni con contenedores húmedos. A temperaturas altas, reduce muchos compuestos que contienen oxígeno, sobre todo los óxidos metálicos. Estas reacciones se aprovechan en la manufactura de ciertos metales y aleaciones (Zander y Sandström, 2008).

Mecánicamente es un material blando (escala de Mohs: 2 - 3 - 4) y maleable. En estado puro tiene un límite de resistencia en tracción de 160 - 200 N/mm² (160 - 200 MPa). Todo ello le hace adecuado para la fabricación de cables eléctricos y láminas delgadas, pero no como elemento estructural. Para mejorar estas propiedades se alea con otros metales, lo que permite realizar sobre él operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material. También de esta forma se utiliza como soldadura.

En la solidificación, casi todo el hidrógeno disuelto en el líquido es rechazado por el enfriamiento del sólido; también ha sido reportado por Gruzleski *et al.* (1990) que la porosidad se debe a dos factores, por el efecto de burbujas de hidrógeno y por contracción (rechupes). Debido a la evolución de las microestructuras durante el proceso de solidificación, la microestructura no solamente determina las propiedades mecánicas, sino que también define los límites del diseño de vaciado, la colabilidad de la aleación y la susceptibilidad a la formación de defectos (Zindel *et al.*, 2001).

1.3. Soldadura del aluminio y sus aleaciones por métodos convencionales

Según el manual de soldadura para ingenieros (Ignoto, 2001) se dice que un material es soldable en un grado prefijado, si se logra la continuidad metálica de la unión a través de un procedimiento determinado y para una aplicación específica, de manera que dicha unión cumpla con las exigencias prescritas con respecto a sus propiedades locales y a su influencia en la construcción de la cual forma parte integrante.

Como lo indican Dallam y Damkroger (1993) las soldaduras pueden ser caracterizadas de acuerdo a una cantidad de criterios, entre los que están: el proceso de soldadura utilizado, altura, forma, propiedades mecánicas, composición química. Los métodos apropiados de

caracterización dependen de la función de soldadura y el grupo de propiedades particulares requeridas para la aplicación.

En algunos casos (Elangovan y Balasubramanian, 2008; Manjabacas y Abellán, 2012) exponen que el comportamiento de una soldadura puede deberse a la caracterización de su tamaño o forma, en otros, es importante caracterizar factores metalúrgicos tales como la composición del metal de soldadura y la microestructura. En general, la finalidad de la caracterización de soldaduras es lograr que la misma tenga la capacidad de cumplir con su función, documentar profusamente una soldadura y un procedimiento que han demostrado ser adecuados, o determinar por qué una unión soldada no cumplió su función.

En el caso específico del aluminio, así como sus propiedades lo hacen acreedor del primer lugar en la selección de materiales para ciertas aplicaciones, también dificultan pero no imposibilitan el proceso de soldadura. Esta dificultad, como lo indican Dickerson e Irving (1992) depende del grupo de aleación de aluminio al cual nos refiramos.

El aluminio como sus aleaciones tienen una fuerte afinidad química por el oxígeno, por lo que desarrolla rápidamente una película de óxido refractaria y tenaz cuando se exponen al aire, conocidas como alúmina (Al_2O_3). Según Dickerson (1993) esta película de óxido de aluminio funde a $2\,037\text{ }^\circ\text{C}$ y debe ser removida por medios químicos o mecánicos antes de la soldadura, ya que si esto no llegara a realizarse el resultado es una fusión incompleta.

El proceso de soldeo del aluminio siempre presenta problemas, sin tener en cuenta el tipo de equipo usado, pero la unión del aluminio con el uso de soldadura de protección de gas y electrodo consumible (MIG), puede causar alguna frustración especial, ya que presenta algunos de los siguientes problemas:

- La elevada conductividad térmica del aluminio dificulta mantener una penetración uniforme. Esta penetración al inicio de la soldadura es superficial, con respecto al final de la soldadura, debido al precalentamiento que se va originando del material base, a medida que se ejecuta el proceso.
- La ductilidad del aluminio dificulta la alimentación del electrodo en forma continua, durante la ejecución de la soldadura, por lo que se debe diseñar un sistema de alimentación adecuado, para el tipo de electrodo utilizado.

- El bajo punto de fusión del aluminio (654,9 °C) causa fusión en retroceso del electrodo, funde el tubo de contacto y causa obstrucción en la alimentación del electrodo e interrupción del cordón de soldadura.

Ambos, el electrodo y el material base, son susceptibles de oxidación (AlO), al formarse el óxido en la superficie se dificulta la disociación y puede ocurrir escurrimiento por la fusión interna del material base (Ryan, 1988).

Devicent *et al.* (1988) estudiaron las propiedades mecánicas para el soldeo de la aleación de aluminio 2519 - T 87 para blindaje y las compararon con las aleaciones 7039 - T64 y 5083 - H131, también usadas con este mismo propósito, en función de las variables de soldadura, composición del metal de aporte y tratamiento postsoldadura, por medio del proceso de unión con protección de gas y electrodo consumible (MIG), realizan a la vez la unión disímil entre las aleaciones 2024 y 5083.

La soldabilidad la basaron en el nivel de porosidad, resistencia a la fisuración en caliente, resistencia mecánica, dureza, tenacidad, microestructura y velocidad de deposición. Las principales variables de soldadura tomadas en cuenta son: el gas de protección, composición del metal de aporte, el calor aportado, espesor del material y tratamiento postsoldadura. Encontraron que el nivel de porosidad disminuye al utilizar una mezcla de 25 % de argón más 75 % de helio, en lugar de argón puro.

Reportaron al mismo tiempo que la fisuración en caliente se puede minimizar utilizando los electrodos 4043 y 4145 y el calor aportado, tipo de gas de protección, espesor del material y tratamiento postsoldado tienen menor influencia en la resistencia y ductilidad de la soldadura (Devicent *et al.*, 1988).

Dvornak *et al.* (1989), estudiaron la soldabilidad y el refinamiento de grano de la aleación de aluminio 2,2 % Li; 2,7 % Cu, por medio del proceso de soldadura TIG, para controlar el desgarre en caliente, por medio del control de la segunda fase interdendrítica y compararla con las aleaciones 2024 y 5083, utilizaron el ensayo de Varestraint.

Encontraron que la aleación que tiene menor grado de soldabilidad es la aleación de aluminio de 2,2 % Li; 2,7 % Cu, seguida de la aleación 2024 y 5083. Esta última presenta el mejor grado de soldabilidad. La adición del Ti y el Zr mejoran el grado de soldabilidad por medio de la precipitación de los compuestos TiAl y ZrAl, con los cuales se refina el

grano, reportan al mismo tiempo que los compuestos de Zr son más efectivos que los compuestos de Ti (Dvornak *et al.*, 1989).

Ramulu y Rubbert (1990), evaluaron las propiedades de varios materiales de aporte depositados sobre la aleación de aluminio 2019 (Al - Li - Cu), por medio del proceso de soldadura TIG. Los metales de aporte utilizados fueron 2319, 4047, 2029 y 4145.

Reportan que la aleación Al - Li - Cu, se puede soldar fácilmente por medio de los procesos de soldadura Electron Beam, LASER y Plasma. Estos procesos tienen las desventajas de ser de elevado costo, de baja movilidad y la necesidad de vacío o control de la atmosfera. El problema principal encontrado con el uso del proceso de soldadura TIG, fue la porosidad en el cordón de soldadura.

Además plantean estos autores que este defecto se puede eliminar con la creación de un vacío en la zona de la soldadura o con una mezcla de 25 % de Ar más 75 % de He, con la utilización de un sistema de limpieza entre pasada y pasada, con la remoción de un de la superficie del cordón de soldadura depositado. Reportan que los mejores resultados se obtuvieron con el metal de aporte 2319.

Murphy *et al.* (1991), analizaron el efecto del método de preparación de la unión y limpieza de la soldadura de la aleación de aluminio 5083 por medio del proceso de soldadura Electron Beam. Reportan que es de suma importancia seleccionar el método de preparación y limpieza de la unión en la soldadura de la aleación 5083 para lograr producir una unión de alta calidad, con mínima cantidad de porosidades y sin fisuras, ya que la porosidad en la soldadura de aluminio y sus aleaciones, es un constante problema, por lo cual es importante determinar cómo reducirlo y controlarlo.

Dentro de los métodos de preparación usados incluyen medios mecánicos y limpieza química, pero no recomiendan el método de limpieza por medio de cepillo con alambre de acero inoxidable porque las uniones son fácilmente dañadas, ya que la superficie dejada provee más área para la oxidación, la absorción de humedad, gases e hidrocarburos.

Ellos recomiendan la preparación y limpieza con herramientas de diamante, ya que es la forma que deja una superficie fina y de menor área expuesta a los contaminantes. El elemento fundamental que provoca la porosidad en la soldadura del aluminio y sus aleaciones es el hidrógeno y otros gases contaminantes atrapados durante la solidificación

de la soldadura. La velocidad de enfriamiento influye en la cantidad de porosidad retenida en el metal base.

Varios autores en los que se encuentran Srivantsan y Sundarshan (1991); Sunwoo y Morris, (1989); Kramer y Pickens (1992) y Balaguer *et al.* (1989), realizaron estudios sobre la soldabilidad de la aleación del aluminio - litio por medio de los procesos de soldadura GMAW, TIG, EB, PAW Y LASER, con la finalidad de demostrar que este tipo de aleación que se desarrolló con respecto a cualquier aleación de aluminio conocida hasta ahora, tiene buen grado de soldabilidad, puesto que se puede soldar con cualquiera de los procesos de soldadura antes mencionados sin presentar los problemas de fisuración en caliente, ya que los compuestos intermetálicos que se forman (AlLi), tiene un punto de fusión de 600 °C, mayor que otros compuestos intermetálicos formados en otras aleaciones, tanto en el cordón de soldadura como en la zona afectada térmicamente y al tener cuidado en la limpieza al preparar la unión se minimiza la porosidad en el cordón de soldadura,

Reportaron que las mejores propiedades de las aleaciones de aluminio - litio, se obtienen con un tratamiento de homogeneización seguido de un tratamiento de envejecimiento, para lograr una distribución homogénea de los precipitados.

Malin (1995), estudió metalúrgicamente el fenómeno de la zona afectada térmicamente (ZAT), de las uniones soldadas en la aleación de aluminio 6061 - T6, unida por medio del proceso de soldadura MIG. Encontraron que en la ZAT aparece una pequeña zona de mínima dureza que se puede conseguir con una variable de soldadura, ya que es la responsable de la fractura de las uniones soldadas al someterse a tensión. En esta zona aparece Si de forma cilíndrica y ordenada, extendiéndose esta zona al prolongarse la permanencia de la ZAT en el rango de temperatura de 240 - 380 °C, al elevarse la temperatura de los precipitados se disuelven y el Mg difunde al cordón de soldadura.

Hov *et al.* (1996), estudiaron la eficiencia de la soldadura por plasma con polaridad variable, en función del gas de protección y la transferencia de calor en las soldaduras de aleaciones de aluminio, encontrando que la velocidad de flujo del gas de protección tiene un apreciable efecto sobre el tamaño del cordón de soldadura y de la zona afectada térmicamente (ZAT).

Reportaron que tanto el cordón como la ZAT disminuyen al incrementar la velocidad del flujo del gas de protección, debido a la pérdida de calor por convección, presentándose socavado en la soldadura al mismo tiempo, así como también cuando se incrementa la contaminación del gas de protección, que causa un gradiente asimétrico en la tensión superficial en la pileta líquida.

Últimamente Tuttle (1991), ha estudiado el mejoramiento de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio en la ZAT, durante la soldadura utiliza previamente un tratamiento térmico de envejecimiento parcial de la aleación 6061 - T6 y posteriormente se realizó la soldadura, reporta que para un tiempo de envejecimiento parcial de 24 horas a 120 °C, la resistencia mecánica se incrementa en 37 % (220 MPa) comparado con 160 MPa, considerados por el código ASME, como aceptable.

En la búsqueda bibliográfica se pudo establecer que, las aleaciones de aluminio, independientemente del método de soldadura convencional que se emplee, siempre existe la posibilidad de obtener una unión soldada con defectos, ya puede ser por la presencia de hidrógeno, por formación de compuestos intermetálicos, por la formación de una película de óxido refractaria conocida como alúmina (Al_2O_3) con una temperatura de fusión de 2 037 °C y debe ser removida por medios químicos o mecánicos y otro defecto incluido es problemas de fisuración en caliente.

Se hace necesario a partir de lo antes planteado, exponer otro método de soldadura para las aleaciones de aluminio que, durante el desarrollo de la misma, estos defectos sean minimizados y lograr una unión metalúrgica con propiedades que garanticen que se produzcan soldaduras de excelente calidad con mínimas distorsiones, por lo que se considera la soldadura por fricción radial o por torque como una de estas alternativas.

1.4. Soldadura por fricción radial o rotativa

La soldadura por fricción tiene la finalidad de lograr uniones en materiales con perfiles cilíndricos que no pueden soldarse de forma convencional. Conocido como el proceso de unión de dos piezas en un estado sólido, la soldadura por fricción rotativa (Rotary Friction Welding, RFW), por sus siglas en inglés *Friction Stir Welding* o *Friction Rotatory Welding* es un proceso utilizado en muchas áreas de la industria manufacturera, por ejemplo, la industria naval, marina, aeroespacial y el transporte terrestre y en menor escala; la industria

de motorización eléctrica, en electrodomésticos, tanques de gas y en la industria química y agrícola (Cabot, 2003 y Shafer, 2014).

Quintana (2012), Vucetich (2013) y Tufaro y Svoboda (2014) plantean que la soldadura por fricción (FRW), es un proceso de soldadura de estado sólido, donde se mezclan los materiales sin llegar a fundirlos debido al rozamiento de una de las piezas con respecto a la otra, con la producción de calor que desplaza plásticamente material de empalme y se produce la unión. Con este método no se requiere metal de aporte, fundente, ni gas protector, ofrece buenas propiedades mecánicas y se puede automatizar fácilmente con la utilización de máquinas y herramientas ya existentes; además es una técnica generosa con el medio ambiente por no producir gases tóxicos, radiación, ni chispa. Debido a que este tipo de soldadura es un proceso nuevo, se presenta la necesidad de conocer los valores de las variables involucradas que permitan uniones de calidad, donde el tiempo en la etapa de calentamiento es un factor determinante en la calidad de la unión.

Consideran otros autores en los que se encuentran Burgos (2010); Longhurst (2010) y Weglowski (2011) que la soldadura por fricción es un novedoso proceso de estado sólido que supera los procesos convencionales de soldadura por arco eléctrico debido a que permite obtener soldaduras sanas sin producir la fusión del material base, a temperaturas mucho menores que las producidas en los procesos convencionales. Se espera que las propiedades mecánicas de la junta mejoren con respecto a los procesos convencionales, ya que al soportar un ciclo térmico menos severo se reduce el deterioro de las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor de dichas aleaciones.

1.4.1. Principios de la soldadura por fricción radial

Este método es conveniente para unir varios materiales que son sumamente difíciles ser soldado por las técnicas de fusión convencionales, la junta puede obtenerse debajo de la temperatura de fundición (Gene, 2002 y Sakaguchi *et al.*, 2008). Además de soldar, el movimiento del proceso de fricción se ha desarrollado como una técnica de la metalurgia potencial para los componentes metálicos como la modificación de la microestructura localizada, atribución de la microestructuras en las capas cerca de la superficie (Ma, 2008 y Morisada *et al.*, 2009).

El concepto básico de FSW es notablemente simple, la pieza gira y una onda de calor plastifica el metal circundante y realiza una unión transistorizada. La unión se realiza mediante tres funciones primarias (1) calentamiento de la pieza (2) el movimiento de material para producir la unión y (3) la contención del metal caliente bajo la fricción (Mishra, 2007). La calefacción se genera por la fricción en rotación y por la deformación plástica entre las piezas. El calentamiento localizado ablanda el material y la traducción lleva al movimiento del frente a la parte de atrás de la sonda para realizar el cordón en la medida que el proceso avanza.

Durante el proceso, los parámetros de la soldadura combinados ejercen un efecto significativo en el modelo de flujo material y distribución de temperatura, mientras influye en la evolución de la microestructura del material, la formación y las propiedades mecánicas de la junta (Gene, 2002 y Oosterkamp *et al.*, 2004).

Criterios de Arenas (2009) y Elangovan *et al.* (2009), que aunque se considera un procedimiento de soldadura de estado sólido, en algunas circunstancias puede producirse una película fundida en la cara interna, pese a ello, la soldadura final nunca presenta indicios de un estado fundido a causa del extenso trabajo en caliente que tiene lugar durante la etapa final del proceso.

Falla *et al.* (2012) plantea que con este método no se requiere metal de aporte, fundente ni gas protector. Los pasos básicos de la soldadura por fricción se muestran en la figura 1.1; primero, una pieza de trabajo se gira y la otra se mantiene estacionaria, como se indica en la figura 1(A), al alcanzar la velocidad angular apropiada, las dos piezas de trabajo se juntan y se aplica una fuerza axial, como se observa en la figura 1(B). La frotación en la cara interna calienta la pieza de trabajo localmente y comienza el vuelco (figura 1 (C) y por último, se detiene la rotación de una de las piezas y se completa eliminando la rebaba producida, tal como se observa en la figura 1 (D).

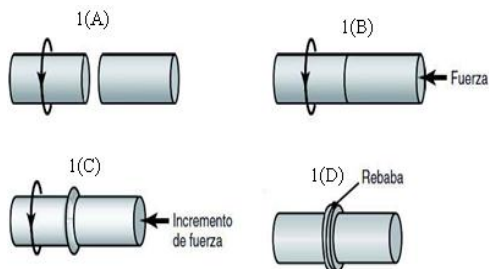


Figura 1.1. Principios de la soldadura por fricción. Fuente: Mishra (2007).

La velocidad de rotación y la presión axial que se aplica, determinan la forma de la unión soldada según la figura 1.1, por lo que es necesario controlar estos factores para obtener una unión fuerte y uniforme. El movimiento radial hacia fuera del material caliente en la interfaz ayuda a eliminar los óxidos y otros contaminantes fuera de ésta.

La soldadura por fricción se puede utilizar para unir una amplia variedad de materiales, siempre y cuando uno de los componentes tenga alguna simetría rotacional. Mediante este método es posible unir las partes sólidas o tubulares con una buena resistencia en la unión. Así se han unido con éxito barras sólidas de acero de hasta 100 mm (4 pulgadas) de diámetro y tubos de hasta 250 mm (10 pulgadas) de diámetro exterior (Velandia, 2009).

Según Schneider y Nunes (2004) y Cabibbo *et al.* (2007), la velocidad del miembro rotatorio puede ser hasta de unos 15 m/s. Debido al calor y la presión combinados, la interfaz en la FRW desarrolla una rebaba mediante deformación plástica de la zona calentada. Esta rebaba, de ser necesario, se puede retirar con facilidad por medio de maquinado o rectificado. Las máquinas para soldadura por fricción son totalmente automáticas y la habilidad requerida del operador es mínima, una vez que se han ajustado en forma apropiada los ciclos individuales de tiempo para la operación completa.

La soldadura que se produce se caracteriza por una zona afectada por el calor (ZAC) angosta, la presencia de material deformado plásticamente alrededor de la soldadura (material de vuelco) y la ausencia de una zona de fusión. El ciclo de soldadura puede dividirse en dos etapas: la etapa de fricción o frotamiento y la etapa de vuelco o forjado.

La etapa de fricción es cuando las piezas hacen contacto, hay frotamiento entre las superficies de empalme y una fuerte adhesión en diversos puntos de contacto, existe cizallamiento y se transfiere metal de una superficie a otra. Al continuar la frotación, aumentan tanto el par de torsión como la temperatura de la interfaz. El tamaño de los fragmentos transferidos crece hasta que éstos se convierten en una capa continua de metal plastificado. Se puede formar una película líquida en ese punto (Seshagirao *et al.*, 2015).

La etapa de forjado es cuando se aplica una presión después del calentamiento para que la pieza de trabajo experimente un acortamiento axial. Este vuelco produce material forjado o deformado. A continuación, el par de torsión que se produce disminuye y la velocidad rotacional baja hasta cero (Ren *et al.*, 2007).

1.4.2. Desarrollo de la soldadura por fricción radial

La temperatura de fricción se obtiene rotando un componente axialmente simétrico contra otro estático y bien sujeto (figura 1.2), con la aplicación de una fuerza. Después de unos instantes (segundos), el punto de unión alcanza la temperatura óptima y cesa la rotación y con la aplicación de una fuerza que forja y consolida la unión. Durante el proceso se combinan los parámetros velocidad de rotación, desplazamiento, tiempo, temperatura y fuerza para obtener la soldadura de los diversos materiales (Mishra *et al.*, 2014).

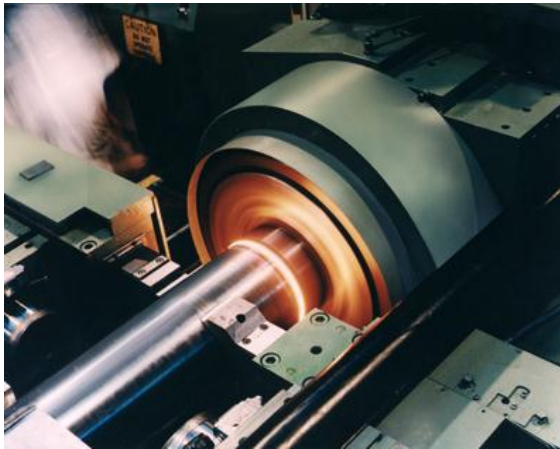


Figura 1.2. Ejecución de la soldadura por fricción radial.

Según Zimmer *et al.* (2010) la soldadura por fricción rotativa es mucho más eficiente en términos de energía en comparación a los procesos de soldadura más competitivos. No se requiere de consumibles como el hilo de relleno, flux o gases para el escudo de protección, incluso para los materiales medioambientalmente tan sensibles como el titanio. La soldadura por fricción rotativa se divide en dos variantes: Direct Drive (Control Directo) e inercia.

En el caso Direct Drive, el componente en rotación está constantemente controlado por un motor eléctrico o hidráulico, que se frena cuando se va a aplicar la fuerza de forja. Este proceso es ideal para soldar aceros, logrando una total precisión de posicionado (en giro y concéntrico), así como en el largo total de la pieza. Se aplica de manera masiva en el sector de las prospecciones petrolíferas y gasísticas y en la fabricación de múltiples componentes en la automoción (ejes, pistones, varillas, airbags).

La alternativa es la soldadura por inercia, donde el componente en rotación está anclado a un volante de inercia. Se acelera este volante hasta alcanzar la velocidad deseada,

consumiendo después en la fricción toda la energía cinética acumulada para calentar el punto de unión. Este proceso es menos preciso en el posicionado que el Direct Drive y consume más energía, pero es el proceso ideal para unir elementos de mayor dureza, como aceros al manganeso o el titanio y para grandes piezas en las que se requiere más superficie de soldadura. Las uniones resultantes poseen una dureza al impacto y una resistencia tensil comparable a los materiales procesados. Exhiben, por tanto, una combinación de dureza y resistencia muy superior al de los procesos de soldadura por fusión.

La soldadura por fricción, como proceso de fase total de penetración sólida que tiene como principio de trabajo la conversión de la energía mecánica en térmica mediante la fricción de elementos externos sobre las piezas a unir o la fricción entre dichas piezas bajo la acción de una fuerza exterior de compresión, es clasificado como una unión en estado sólido ya que la temperatura no alcanza a fundir el metal y además al analizar microscópicamente dicha zona no se observa dilución entre los materiales lo que se puede apreciar en la figura 1.3 (UTN, 2014).

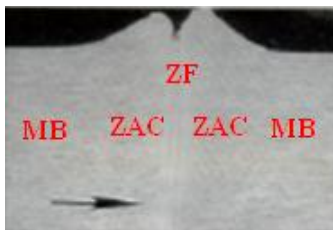


Figura 1.3. Metalografía de unión soldada a tope por fricción. Fuente: UTN (2014).

Como se observa en la figura 1.3, durante el proceso se producen tres zonas bien definidas, observables mediante macro ataque. Una zona central o pepita que corresponde al material que es sometido a plastificación y agitación, a continuación otra más clara asociada al material que es afectado térmica y mecánicamente y por último una zona que corresponde a material afectado térmicamente (Lippold y Livingston, 2013).

Durante el proceso, al ser la energía utilizada menor, consecuentemente, la zona térmicamente afectada ZTA y los esfuerzos residuales asociados con la soldadura son relativamente pequeños, con microestructura fina en la zona de la unión y la ausencia de fisuras y porosidad.

De forma general el proceso se desarrolla en dos etapas (Zhou *et al.*, 2010). Una llamada de calentamiento (figura 1.4) en la que se eleva la temperatura en la zona de interfase entre las

piezas a unir, como resultado de la intensa fricción a que son sometidas por el movimiento relativo entre las superficies en contacto bajo la acción de una fuerza exterior que las oprime. Esta etapa se mantiene hasta que el material alcanza un estado plastizado a una temperatura algo menor que la temperatura de fusión. La fuerza aplicada sobre las superficies a unir en esta etapa se le denomina fuerza de calentamiento.

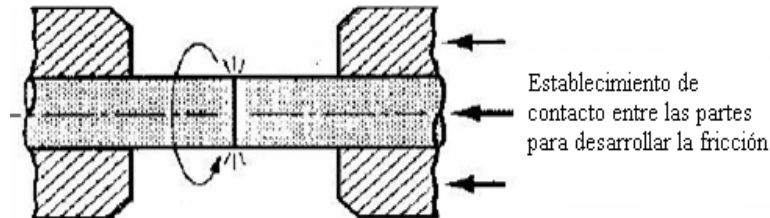


Figura 1.4. Etapa de calentamiento. Fuente: Moreno (2008).

El final de la etapa de calentamiento en máquinas experimentales se determina por la coloración de la interfase mientras que en máquinas de producción ya está establecido el tiempo que debe durar esta etapa, de acuerdo a las características particulares de la unión que se desea lograr. Una vez terminada esta etapa se suspende el suministro de energía a la pieza en rotación (en algunas máquinas esta es frenada y en otras no).

En estos momentos comienza la segunda etapa donde se incrementa la fuerza axial de compresión hasta un valor llamado fuerza de forja como se muestra en la figura 1.5.

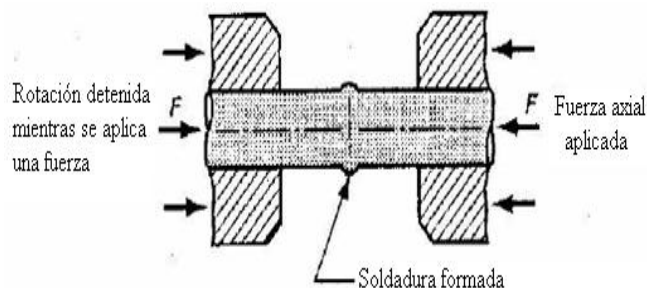


Figura 1.5. Etapa de forja. Fuente: Moreno (2008).

Durante la etapa de forja las piezas están sometidas a la carga axial producida por la fuerza de forja, que puede ser hasta el doble de la de calentamiento y actúa como carga estática, en esta etapa todo el material en estado plástico es expulsado de la zona de interfase que provoca una rebaba y se consolida la unión entre las piezas. Se considera que este mecanismo de flujo consolida la unión de los materiales mediante la extrusión y la forja del material a altas velocidades de deformación y se produce un lazo metalúrgico totalmente consolidado (Arbegast, 2003).

1.5. Soldadura del aluminio y sus aleaciones por fricción radial o rotativa

Debido a la amplia variedad de aplicaciones estructurales que han alcanzado las aleaciones de aluminio y las dificultades que se presentan al unir las diferentes piezas mediante los procesos convencionales de soldadura por arco eléctrico, la industria moderna se ve animada a buscar nuevas alternativas para realizar las uniones de las diferentes partes que conforman una estructura dada (Thomas 1991).

Son ampliamente usadas en el campo estructural, en la fabricación de tanques de almacenamiento y aplicaciones aeronáuticas. No obstante sufren de ablandamiento severo en la zona afectada por el calor, debido al fenómeno propio de los procesos a elevadas temperaturas de disolución de precipitados durante el ciclo térmico (Dawes, 1995).

En varias aleaciones de aluminio con este proceso se han logrado juntas libres de defectos con buenas propiedades mecánicas, incluso en aquellas consideradas de baja soldabilidad (Zeng *et al.*, 2006). Cuando se realizan juntas por fricción radial, las transformaciones de fase se producen durante el ciclo de enfriamiento y debido a la ausencia de metal fundido se puede observar que el proceso ofrece varias ventajas frente a los procesos convencionales de arco eléctrico (Valerio, 1998).

Según Balasubramanian (2008) y Padmanaban (2009) el paso de las piezas en fricción entre ambos materiales de la junta, produce varias zonas microestructurales, el metal base (MB) que no sufre cambios, la Zona Afectada por el Calor (ZAC) donde la microestructura cambia únicamente debido al ciclo térmico ocurrido en el proceso, la zona termomecánicamente afectada (ZTMA) donde la microestructura del material cambia debido al ciclo térmico y la deformación plástica y la zona agitada (ZA) donde el material sufre deformaciones plásticas severas a elevadas temperaturas que promueven la recristalización dinámica en esta zona.

Kawai *et al.* (1997) soldaron por fricción dos materiales con propiedades físicas y térmicas diferentes y definieron la influencia que tiene la condición de la soldadura en el mecanismo de formación de la fuerza interior y exterior de las rebabas y articulaciones, así como también en la resistencia a la tracción de la tubería. Los resultados indican que la zona unida y deformada crece al transcurrir el tiempo de soldadura y la resistencia a la tracción de la tubería unida aumenta en proporción a la presión de soldadura.

Así mismo Méndez (2011) efectuó la investigación sobre el efecto de la velocidad de rotación en la calidad de la unión de la soldadura por fricción en una aleación de Aluminio AA 6063 encontrando que las uniones realizadas a 2 000 rev/min presentaron mayor material deformado y mayor número de granos de pequeño tamaño en la zona de la unión debido a la posible recrystalización, mientras que la zona termomecánicamente afectada (ZATM), presentó una ligera tendencia a aumentar el tamaño y la cantidad de precipitados en comparación a las demás uniones realizadas a velocidades de 1 400 y 1 000 rev/min.

En el trabajo de Blanco (2009) y Valdivé y Blanco (2012) se realizaron una serie de ensayos de soldadura con el aluminio AA 1100 - 0 obtuvo óptimos resultados al trabajar con velocidades de rotación de 92 mm/min y 1 700 rev/min respectivamente. Como parte del estudio, realizaron termografías del proceso. Esto les permitió observar que la temperatura de fusión del material no es alcanzada en ningún momento y las temperaturas máximas reflejadas en estas termografías no sobrepasan los 300 °C.

Cabe destacar que adicional a lo anterior, en el trabajo de Blanco (2009), se realizaron estudios metalográficos y mediciones del perfil de dureza en el área soldada. Blanco indica que para lograr las uniones de buena calidad se deben respetar las condiciones anteriormente señaladas, obteniendo con ello un completo total del cordón de soldadura del aluminio.

1.6. Parámetros en la soldadura por fricción

Plantean Mishra y Ma (2005) que la selección adecuada de los parámetros del proceso es fundamental para la obtención de juntas garantizadas mediante el proceso de soldadura por fricción radial. Las variables esenciales empleadas en la elaboración de una soldadura son las velocidades de rotación y de avance y la fuerza axial sobre la junta. Por otro lado, algunos parámetros secundarios o variables dependientes de las variables esenciales son: la tasa de generación de calor, la distribución de temperaturas, la tasa de enfriamiento, la fuerza en la dirección de avance y el torque.

Debido a la importancia que tiene la distribución de la temperatura en la junta soldada, autores como Lombard *et al.* (2009) citando a Peel *et al.* (2006(a) y (2006(b) estimaron la entrada de calor a la junta (J/mm) con el uso de un modelo de energía basado en algunas de

las variables esenciales del proceso, tales como velocidades de avance y de rotación y torque medido en el husillo de la máquina.

La máxima temperatura, usualmente presentado en la región cercana en el límite de la unión, incrementa con el aumento de la velocidad de rotación y disminuye con la velocidad de avance, siendo más significativo el efecto de la primera. Así mismo, el incremento de la fuerza axial sobre la junta también ejerce un ligero efecto en el pico de temperatura (Nandan *et al.*, 2008).

Por otro lado, el torque en el husillo depende de múltiples factores tales como la fuerza horizontal sobre la junta, el coeficiente de fricción y el grado de deslizamiento entre las piezas. El incremento en la velocidad de rotación de la máquina genera una disminución en el torque debido al incremento de la tasa de generación de calor en la junta y al incremento en la temperatura de ésta, lo que permite que el material se deforme con mayor facilidad a alta temperatura y a alta tasa de deformación. El torque no es afectado significativamente por la velocidad de avance de la herramienta, debido a que la tasa de generación de calor no es afectada considerablemente por éste parámetro.

Colligan y Mishra (2008) establecieron relaciones entre algunos parámetros principales y algunos parámetros secundarios del proceso, entre estos relacionaron el grado de deslizamiento entre las piezas de trabajo, así como la fuerza de fricción, con la historia térmica y con la cantidad y tasa de deformación sufrida por las piezas a unir. Por otro lado, coincidieron con otros autores Steuwer *et al.* (2006) Lombard *et al.* (2009) al determinar el torque a partir de las velocidades y emplearlo para el cálculo de la potencia (energía/unidad de tiempo) y de la energía específica (energía/unidad de longitud). Con estas relaciones posteriormente se explicaron los resultados de variación de temperaturas y se relacionaron con los esfuerzos residuales.

1.6.1. Efecto de los parámetros de proceso en la distribución de esfuerzos residuales

La formación de tensiones residuales en uniones soldadas se debe a la presencia de campos no-uniformes de deformaciones no-elásticas, como las deformaciones plásticas y térmicas, mientras se efectúa la soldadura. Debido a que la soldadura por fricción es un proceso en estado sólido, las temperaturas alcanzadas son menores a la temperatura de fusión. Por este motivo, generalmente se espera que las tensiones residuales sean menores a las generadas

en soldaduras por fusión. Sin embargo, es necesaria una sujeción más rígida de las piezas a unir, que restringe la contracción durante el enfriamiento, generando un aumento en las tensiones residuales por esta causa (Mishra y Ma, 2005).

Diferentes autores han estudiado el efecto que tienen algunos parámetros de proceso en la distribución de esfuerzos residuales de las juntas unidas mediante el proceso soldadura por fricción. Gran parte de estas investigaciones ha concluido que son mayores los esfuerzos residuales alcanzados en la dirección radial, en la dirección de la soldadura, en comparación con los que se presentan en la dirección transversal, es decir perpendicular a la línea de junta (Withers y Bhadeshia, 2001; Sutton *et al.*, 2002; Peel *et al.*, 2003).

La distribución de esfuerzos residuales en la dirección radial presenta un perfil en forma de "M", donde los esfuerzos a tracción más elevados se alcanzan a una distancia similar a la cual finaliza el cordón de soldadura, entre la zona afectada termomecánicamente y la zona afectada térmicamente; mientras que en la zona de mezcla los esfuerzos siguen siendo a tracción pero presentan magnitudes menores comparados con los alcanzados en la región termomecánicamente afectada (Peel *et al.*, 2003; Buffa *et al.*, 2008).

Por otro lado, son varios los trabajos donde la distribución de temperaturas y el flujo de calor en la junta son relacionados con la generación de esfuerzos residuales. Entre las principales investigaciones se encuentra la de Sutton *et al.* (2002), en donde los esfuerzos residuales estuvieron relacionados con los cambios microestructurales y la distribución de calor en la junta. Peel *et al.* (2003) y Steuwer *et al.* (2006), relacionaron la distribución de esfuerzos residuales en la dirección longitudinal de la junta con la entrada de calor al sistema, dominada principalmente por las velocidades de avance y de rotación de la herramienta.

En un primer trabajo Peel *et al.* (2003) demostró que el incremento de la velocidad de avance generó mayores esfuerzos, sin embargo en posteriores investigaciones Steuwer *et al.* (2006), incluidos junta disímiles aluminio - aluminio, la variación de la velocidad de rotación generó cambios más significativos en el perfil de esfuerzos residuales, donde fue ésta la variable de mayor efecto por su relación directa con la distribución de temperaturas dentro de la junta. Lombard *et al.* (2009) relacionaron la entrada de calor a la junta con los esfuerzos residuales, éstos son más altos a medida que se incrementa la velocidad de avance.

Sutton *et al.* (2002) realizaron mediciones de esfuerzos residuales en dirección longitudinal, a través del espesor, en juntas de AA 2024 - T3, con el empleo de la técnica de difracción de neutrones. Los resultados de esta investigación mostraron que los mayores esfuerzos estuvieron en esta dirección, cerca de la parte superior de la junta, con un valor de 105 MPa; mientras que en la dirección transversal los máximos fueron del orden de 70 % de los esfuerzos longitudinales y estuvieron localizados en la mitad del espesor de la unión. Se encontró también que las magnitudes de los esfuerzos fueron asimétricas respecto a la línea de unión, siendo mayores los esfuerzos longitudinales sobre el lado de avance y adicionalmente, son más coherentes con las variaciones más significativas en el tamaño de grano.

Peel *et al.* (2003) realizaron mediciones de esfuerzos residuales mediante la técnica de difracción de rayos X sincrotrón, en juntas de AA 5083, realizadas bajo condiciones diferentes de velocidad de avance. Al igual que en las anteriores investigaciones, en esta se encontró que el material base está sometido a esfuerzos muy bajos, cercanos a cero o incluso ligeramente a compresión, mientras que la región soldada se encuentra bajo esfuerzos de tracción, los cuales se incrementan levemente desde el centro hasta alcanzar un valor máximo a ± 10 mm de la línea de la junta. En estos perfiles el incremento en los valores máximos de esfuerzos y su aparición más cerca de la línea de junta estuvieron relacionados con el incremento en la velocidad de avance.

Posteriormente, Peel *et al.* (2003) y Steuwer *et al.* (2006), evaluaron el efecto de las velocidades de avance y de rotación de la pieza en los esfuerzos residuales de juntas disímiles AA 5083 y AA 6082, mediante las técnicas de difracción de rayos X y difracción de neutrones. Los mayores esfuerzos residuales reportados en este trabajo se presentaron en sentido longitudinal, en la zona que coincide con el ancho de la zona de esfuerzos a tracción fue proporcional a la velocidad de rotación empleada, es decir, zonas más amplias de esfuerzos a tracción se presentaron al emplear mayores velocidades de rotación; por lo anterior se consideró ésta como la variable dominante del proceso y la que se recomienda modificar para alterar el estado de esfuerzos en una junta unida mediante soldadura por fricción.

1.7. Microestructura del aluminio

Una de las primeras oportunidades según Nandan *et al.* (2008) que se tiene para controlar la estructura y las propiedades de un metal, se presenta durante la solidificación del líquido fundido. En dependencia del metal, se puede controlar el tamaño y forma de los granos, así como la separación de los brazos dendríticos primarios y secundarios o el espaciamiento interlaminar en las aleaciones eutécticas, manteniendo una adecuada nucleación y crecimiento, mediante la inoculación o la refinación de grano, tasas adecuadas de solidificación, temperatura correcta del metal y apropiado proceso de fundición, se puede lograr el adecuado endurecimiento de la aleación, un buen control en la generación de defectos como segregación y porosidad, así como la obtención de una aleación que responda satisfactoriamente al tratamiento térmico.

De acuerdo a los criterios que exponen Cordero y Rodríguez (2012), la transformación de fase líquido - sólido es quizá la más importante de las transformaciones de fase que se estudian, ya que casi todos los metales deben sufrir esta transformación antes de convertirse en objetos útiles. En el punto de congelación de un metal puro en el que ambos estados, líquido y sólido, se encuentran a la misma temperatura, la energía cinética de los átomos en el líquido y en el sólido debe ser la misma, pero hay una diferencia significativa en energía potencial. Los átomos en el sólido están mucho más próximos, de modo que la solidificación propicia una liberación de energía. Esta diferencia en energía potencial entre los estados líquido y sólido se conoce como calor latente de fusión sin embargo, se requiere energía para establecer una superficie entre el sólido y el líquido.

Según Ruiz-Navas *et al.* (2006), en los procesos de conformado por deformación plástica, tanto la deformación interna del material como el rozamiento entre pieza y herramienta contribuyen a una generación de calor que se traduce en un aumento de la temperatura del proceso. Plantea Birkholz (2006) que cuando en las aleaciones se les aplica fuerza externa, como es el proceso de deformación, provoca alta densidad de dislocaciones, lo cual favorece el aumento del límite elástico, además las dislocaciones lograrán endurecerlo y aumentar su resistencia a la deformación plástica.

Montheillet (1999) en su modelo de apilamiento de granos se basa en el aumento del área libre de dislocación a la hora de la migración de un borde de grano, plantea que el crecimiento de grano puede conducir a un marcado cambio en la textura. Finalmente, Nes

(1998), propone un modelo general con múltiples parámetros, que tiene en cuenta la influencia del tamaño de subgranos, la densidad de dislocaciones dentro del subgrano y la densidad de dislocaciones en los bordes de subgranos.

Lee y Wang (2006) radican la importancia del tamaño de grano en la fractura de las aleaciones superplásticas comerciales de titanio Ti - 6Al - 4V y aluminio 7475. Ellos estudiaron el crecimiento de cavidades durante la deformación superplástica y concluyeron que la elongación total es aproximadamente una función lineal de la inversa del tamaño de grano de los materiales superplásticos. El modelo entregado en ese estudio se basó en una teoría el deslizamiento de los bordes de grano y una teoría de crecimiento de cavidades.

Linares (2011) elaboró un trabajo sobre el efecto de la presión sobre la calidad de las uniones de soldadura por fricción en aleaciones de aluminio AA 6063 y obtuvo como resultado que la microestructura muestra la presencia de precipitados posiblemente de Al - MgSi y Al - MgSiFe, los cuales aumentan de tamaño luego de realizada la soldadura, también encontró que la zona de la unión posee tamaño de granos más pequeños en comparación a la zona termomecánicamente afectada, producto de una recrystalización; además, que la dureza es mayor en la zona de la unión y varía al alejarse de la unión, pero sin sobrepasar el máximo de dureza en la unión.

Los estudios sobre la microestructura resultante de la deformación, de Gourdet y Montheillet (2000) sobre aluminio, han mostrado que se trata de formación de nuevos granos, con mecanismos diferentes de deformación dinámica continua.

1.7.1. Recrystalización en las aleaciones de aluminio

El aluminio debido a sus composiciones y la forma del producto posee una variedad en el tamaño de grano y en su forma. En el proceso de unión por fricción la estructura se recrystaliza completamente, esto es debido a que en los materiales de aluminio el deslizamiento rotacional se facilita. Los granos se crean por la deformación gradual provocada por la rotación del material; existe la recrystalización dinámica que produce pequeños granos equiaxiales, mientras que en la recrystalización estática se forman nuevos granos después de detener la deformación (Fanelli *et al.*, 2011).

La temperatura máxima alcanzada en el proceso y la velocidad de enfriamiento es importante ya que dependiendo que tan mayor sea el pico de temperatura, mayor será el

tamaño de grano, de esta manera se observa que la temperatura es la que tiene mayor influencia. Es importante aclarar que la recrystalización dependerá íntimamente de la aleación a utilizar (Rajiv *et al.*, 2007).

En el estudio realizado por Kim *et al.* (2010) en las aleaciones de aluminio AA 5083 - H18, determinó que el control de algunos parámetros como los campos de temperatura y las historias de deformación proporciona información útil para el crecimiento de grano anormal, este fenómeno produce menor resistencia y ductilidad durante el tratamiento térmico después de la soldadura específicamente en esta zona.

Además Buffa *et al.* (2007) experimentó sobre el proceso aplicado a una aleación AA 7075 - T6 determinó que desde un tamaño de grano promedio del material original aproximadamente de 80 μm , en la zona afectada por el calor se obtiene un grano promedio ligeramente agrandado, la zona afectada termomecánicamente con un grano alargado en dirección del proceso de deformación plástica y finalmente la pepita de soldadura donde se observó el área recrystalizada con granos finos.

La evolución de la microestructura se estudió por Grujicic *et al.* (2009) donde agrupó las características microestructurales como son el tamaño de grano, la densidad de dislocaciones, la densidad numérica de dispersión; en un solo parámetro mencionado como la deformación plástica efectiva equivalente, las variaciones del tamaño de grano respecto a la distancia desde de la línea de soldadura, donde mostró una microestructura de tamaño firme en la zona de agitación y una microestructura de grano más grande en la zona afectada por el calor.

En un estudio realizado por Rajamanickam y Balusamy (2007) se determinó que el comprender la transferencia de calor, aunque es un tema complicado, ayudará a predecir la calidad de la soldadura obtenida, este estudio indicó que la temperatura alcanzada durante el proceso es de un 80 al 90 % de la temperatura del punto de fusión, teniendo en cuenta solo la entrada de calor y se consideró como constante el calor generado por la fricción entre ambos materiales, este modelo se elaboró con la intención de predecir los ciclos térmicos durante la soldadura.

1.8. Conformado superplástico

Las principales aplicaciones de la superplasticidad son el conformado superplástico y la soldadura por difusión (soldadura en estado sólido) (Chica *et al.*, 2009). El interés del conformado superplástico ha crecido en los últimos años como consecuencia de varios hallazgos científicos recientes: el descubrimiento de la superplasticidad en materiales difíciles de conformar (materiales nanocristalinos (Valiev *et al.*, 1993) y cerámicas (Wakai *et al.*, 1986), en materiales compuestos de matriz metálica (Yu *et al.*, 1984) y en intermetálicos (Sikka *et al.*, 1987) y la observación de superplasticidad a muy alta velocidad de deformación (Nieh *et al.*, 1984).

La soldadura por difusión es un proceso en estado sólido que se utiliza para unir materiales de naturaleza similar o distinta. Las superficies que se van a unir se limpian y se calientan a una temperatura elevada, se aplica una presión moderada que da lugar al desplazamiento de los puntos de contacto entre ellas, por lo que se forma un conjunto de cavidades. Mediante procesos de difusión y deformación plástica estas cavidades van desapareciendo hasta que ambos materiales quedan perfectamente unidos (Ridley *et al.*, 1997).

Los materiales de grano fino son proclives a unirse por difusión debido a que poseen muchas fronteras de grano, con facilidad para migrar y que sirven de "camino" para la difusión. Los materiales superplásticos más aptos para ser unidos por difusión son las aleaciones de titanio (Weisert y Stacher, 1982), los aceros (Ridley *et al.*, 1992), no tanto el aluminio (Pilling y Ridley, 1987) y las cerámicas (Ye y Domínguez-Rodríguez, 1995).

El modelo más conocido de deslizamiento de fronteras de grano acomodado por difusión es el de Ashby-Verral (1973). Entre los modelos que incluyen acomodación por dislocaciones se puede destacar la teoría del "núcleo y manto" (core and mantle) de Gifkins (1976), que afirma que todo el proceso de acomodación tiene lugar en una capa externa de los granos (manto), mientras que el interior (núcleo) permanece libre de dislocaciones. Los modelos de Ball-Hutchinson (1969), Mukherjee (1971) y Arieli y Mukherjee (1980) consideran que el proceso de acomodación consiste en el movimiento de dislocaciones a través de la red cristalina (combinación secuencial de deslizamiento y trepado).

El proceso de trepado, que tiene lugar por difusión, es más lento y controla la velocidad de deformación. Langdon (1991) propone que la acomodación consiste en un proceso de

emergencia de granos de capas interiores, que explica el deslizamiento y trepado de dislocaciones a lo largo de las fronteras de grano.

1.8.1. Mecanismos de la deformación superplástica

En la actualidad existen diversos criterios acerca de cuáles son los mecanismos de deformación predominantes durante la deformación superplástica. Fundamentalmente se pueden resumir en cuatro:

- a) el principal mecanismo de deformación es el deslizamiento de fronteras de grano y el deslizamiento cristalográfico es sólo un mecanismo de acomodación (Valiev, 1993; Sherby y Wadsworth, 1989; Edington *et al.*, 1976),
- b) el deslizamiento de fronteras de grano y el deslizamiento cristalográfico contribuyen a la deformación superplástica simultáneamente en todos los estadios de la deformación (Cutler *et al.*, 1974 y Melton *et al.*, 1974),
- c) el deslizamiento cristalográfico es el mecanismo predominante en los primeros estadios de la deformación y posteriormente predomina el deslizamiento de fronteras de grano (Bowen, 1990; Tsuzaki *et al.*, 1990 y Liu y Chakrabarti, 1996),
- d) el deslizamiento cristalográfico es el mecanismo predominante durante todos los estadios de la deformación (Blackwell y Bate, 1993; McDarmid *et al.*, 1984).

Algunos autores afirman que la deformación superplástica se debe a la actuación simultánea de los mecanismos de deslizamiento de fronteras de grano y deslizamiento cristalográfico durante todos los estadios de la deformación. Edington *et al.* (1976) y Melton *et al.* (1974), fueron pioneros en el estudio la deformación superplástica de las aleaciones Al - 6 % Cu - 0,3 % Zr, Al - 33 % Cu y Zn - 40 % Al, mediante análisis de texturas.

Concluyeron que la contribución de cada mecanismo depende de la velocidad de deformación: el deslizamiento de fronteras de grano predomina a velocidades bajas, ambos mecanismos coexisten a velocidades intermedias y el deslizamiento cristalográfico predomina a velocidades elevadas. El número de sistemas de deslizamiento operativos depende también de la velocidad de deformación. El deslizamiento es simple a velocidades intermedias y múltiples a velocidades elevadas.

Las investigaciones anteriores a 1986 en las que se observó la actuación simultánea de deslizamiento de fronteras de grano y deslizamiento cristalográfico fueron recopiladas por Padmanabhan y Lücke (1986), estos autores publicaron unos años más tarde un estudio sobre la aleación superplástica Al - 6 % Cu - 0,3% Zr de tamaño de grano $d > 20 \mu\text{m}$, donde afirman que la contribución del deslizamiento cristalográfico puede llegar a ser como mucho de un 20 % a velocidades de deformación elevadas (Padmanabhan *et al.*, 1991).

Muy recientemente también se han publicado estudios en los que la deformación superplástica se atribuye a la coexistencia del deslizamiento de fronteras de grano y el deslizamiento cristalográfico, como ejemplo, los trabajos de Jin *et al.* (1998) sobre la deformación superplástica a muy alta velocidad de deformación (high strain rate superplasticity, HSRS) de la aleación IN 90211 obtenida por aleado mecánico o el estudio sobre la aleación 8090 realizado por Fan *et al.* (1997).

Otros autores como Bowen (1990); Tsuzaki *et al.*, 1990 y Liu y Chakrabarti (1996), proponen que el deslizamiento cristalográfico es el mecanismo predominante en los primeros estadios de la deformación ($\epsilon < 0,7$) en materiales cuya microestructura inicial no es adecuada para que tenga lugar el deslizamiento de fronteras de grano. En materiales cuya microestructura inicial está formada por granos alargados o con forma de pancake, el movimiento de dislocaciones daría lugar a la formación de granos equiaxiales, aptos para deslizar.

1.8.2. Características de las aleaciones del sistema Al – Mg

Plantea Caicedo (2003) que, por su buena soldabilidad operativa, las aleaciones de Al - Mg, se usan para uniones soldadas y como material de aporte; debido a la cantidad de eutéctica presente en la aleación; con lo cual se obtiene una resistencia relativamente alta en la condición recocida. Con un 2 % de Mg aproximadamente, se genera la tendencia a fisurarse en caliente durante el soldeo por fusión, ya sea del material base o aporte; sin embargo, con el incremento del contenido de Mg ($> 5 \%$), el cobre y el silicio mejoran la soldabilidad de la aleación Al - Mg, con la reducción de la fisuración en caliente.

Plantean Youseffi y Showaiter (2006), que el silicio y el magnesio se combinan entre sí para formar el compuesto denominado siliciuro magnésico (Mg_2Si), el cual a su vez forma un sistema eutéctico simple con el aluminio. Las aleaciones de la serie AA 5XXX, contiene

Silicio y Magnesio que la hacen susceptibles al tratamiento térmico, tienen resistencia media, la cual es aprovechada para la formación de piezas mediante extrusión y presentan una buena resistencia a la corrosión. Por otro lado, la facilidad para el soldeo es variable, aunque por lo general es buena.

Autores como Schaffer *et al.* (2006) y Tra *et al.* (2010) exponen que una de las principales aplicaciones de esta aleación, gracias a su elevada resistencia a la tracción, a su excelente maquinabilidad y apariencia, las aplicaciones de las aleaciones AA 5XXX son amplias; como en construcciones tanques criogénicos (AA 5083), puentes, construcciones de embarcaciones marinas. Así mismo, planchas de la serie AA 5052 es muy requerida en la industria para la producción de estructuras de camiones, ómnibus, aviones y también en aplicaciones marinas.

Según Schatzberg (2003), Las aleaciones de la serie 5xxx son usadas en aplicaciones en las cuales aún se requieren altas resistencias, las cuales se logran a partir de grandes cantidades de magnesio en solución sólida. Es de relevancia señalar que el magnesio promueve el endurecimiento por trabajo en frío reduciendo la energía de falla concentrada y de esta manera, la tendencia a recuperación dinámica.

Estas aleaciones presentan normalmente una buena resistencia a la corrosión, pero debe tenerse cuidado durante el procesamiento para evitar la formación continua de precipitados $\beta\text{-Mg}_3\text{Al}_2$ en los límites de grano, los cuales pueden promover la corrosión intergranular, puede ocurrir en aleaciones intensamente trabajadas en frío con alto contenido de magnesio al exponerse a temperaturas entre los 120 y 200 °C (250 a 390°F).

1.9. Conclusiones del capítulo 1

- ✓ Se determinó que las aleaciones de aluminio presentan limitación durante el proceso de soldadura, representado por una capa protectora de alúmina (Al_2O_3), la cual tiene una temperatura de fusión de 2 037 °C.
- ✓ En la búsqueda bibliográfica se pudo establecer que el proceso de soldadura por fricción permite la unión en estado sólido de aleaciones de aluminio, donde la formación de defectos durante este proceso puede estar limitado por la formación de estructuras frágiles.
- ✓ La soldadura por fricción rotativa o de torque es un proceso de soldadura donde se combinan los parámetros velocidad de rotación, desplazamiento, tiempo, temperatura y fuerza para obtener la soldadura de las diversas aleaciones sin el empleo de materiales de aporte.

Capítulo 2

Materiales y métodos

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La obtención o fabricación de materiales para soldadura es un proceso fisicoquímico complejo. En la formación de las propiedades del material influyen diversos factores y parámetros tales como: composición química, concentraciones, temperatura, velocidad de enfriamiento. El estudio de la metalurgia del metal de soldadura generalmente se restringe a la zona totalmente fundida, sin distinguir entre las regiones mezcladas y no mezcladas y excluyendo a la zona parcialmente fundida.

En el capítulo se plantea como objetivo establecer el procedimiento de soldadura para realizar la unión soldada por fricción radial o rotativa de la aleación de aluminio AA 5754 del tipo Al - Mg.

2.2. Composición química de la aleación AA 5754

La composición química estándar de esta aleación según Alloy Casting Institute (ACI), muestra la designación adoptada por la ASTM, de la American Society for testing Materials – ASTM y la SAE, se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química estándar de la aleación de aluminio AA 5754

Nomenclatura	Si	Fe	Cu	Mn	Cr
AA 5754	0,40	0,40	0,10	0,40-4,90	0,30
	Mg	Ti	Zn	Al	
	2,6-3,6	0,15	0,25	Resto	

Las aleaciones Al - Mg (AA 5754) con alto contenido de magnesio están clasificadas en el grupo cinco de las no tratables térmicamente, son suministradas en forma recocida y endurecida en frío. El elemento magnesio promueve el endurecimiento por trabajo en frío, reduciendo la energía de falla concentrada. Presentan normalmente una buena resistencia a la corrosión, pero debe tenerse cuidado durante el procesamiento para evitar la formación continua de precipitados β - Mg_2Al_3 en los límites de grano, los cuales pueden promover la corrosión intergranular, criterio que ha sido reportado por Engler (2014).

Los elementos que se adicionan a las aleaciones de aluminio en pequeños porcentajes son el B, Cr, Ti, V y Zr, los cuales tienen un efecto sobre el refinamiento de grano, por las características de formar compuestos intermetálicos de elevado punto de fusión.

La composición química es el factor fundamental en la figuración en caliente, puesto que dependiendo de esta, así serán los compuestos intermetálicos formados y las temperaturas de fusión correspondientes, de ella dependerá la formación de compuestos eutécticos.

2.3. Microestructura patrón de la aleación de aluminio

Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM – 100, ubicado en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, que está dotado de una cámara instalada, el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe (2006), que refleja la micrografía en el computador. La muestra de la figura 2.1, se corresponde con la estructura metalográfica de la muestra patrón de la aleación de aluminio AA 5754.

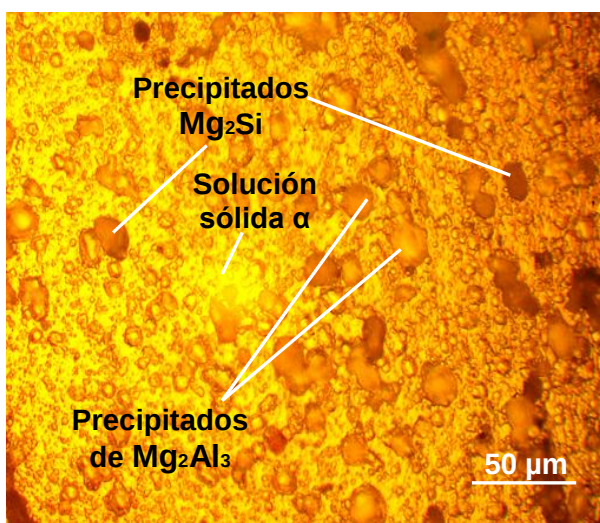


Figura 2.1. Microestructura de la aleación de aluminio AA 5754.

La microestructura presenta granos pequeños y una red continua de partículas finas del compuesto intermetálico Mg_2Al_3 llamada fase β en los límites de grano. Se observan granos equiaxiales de aluminio, predominantemente. Ocurre la precipitación en el interior de los granos. En los límites de granos se llegan a formar largos precipitados de Mg_2Al_3 .

2.4. Preparación de la unión

En la soldadura por fricción se deben tener en cuenta las funciones principales del proceso como son: unión, compresión, desacople de las partes, rotación y fricción bajo presión de las partes, frenado y ajustes minuciosos de los tiempos de procesamiento requeridos, así como, otras fuerzas radiales y axiales. En la figura 2.2 se muestra el modelo considerado para la fusión, las barras son de la aleación de aluminio AA 5754 del tipo Al - Mg de 12 milímetro de diámetro. La máquina herramienta empleada fue el torno 16 K 20, se tuvo en

cuenta la rigidez de la misma, que fuera capaz de resistir momentos de gran magnitud; eliminar las vibraciones y fugas, especialmente, aquellas durante el proceso de soldadura.

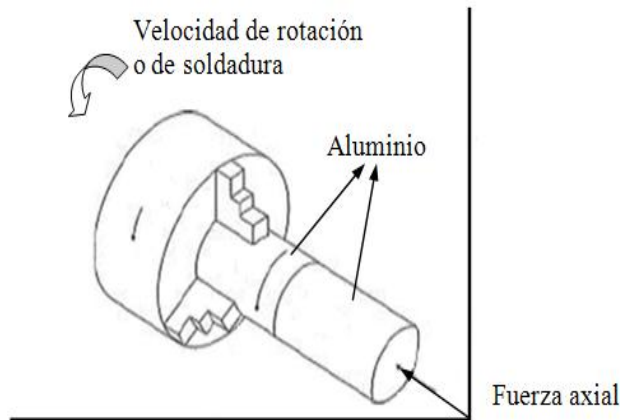


Figura 2.2. Modelo empleado para la soldadura por fricción radial o rotativa.

Se utilizó este tipo de torno por ser una máquina usada en el proceso de fabricación de piezas de revolución. Permite pequeñas tolerancias y acabados superficiales, el mismo está estructurado por una combinación de cajas angulares y componentes internos, que da como resultado una amplia gama de aplicaciones. Equipado con husillos de movimiento de avance, retroceso y control de frenado hidráulico. El frenado manual es un elemento de uso conveniente para el operador, pues el freno es sensible, seguro y confiable. Se caracteriza por su rigidez, en términos tanto de estructura como de potencia de transmisión. En la figura 2.3 se muestra el proceso de instalación de las barras para ser soldadas.

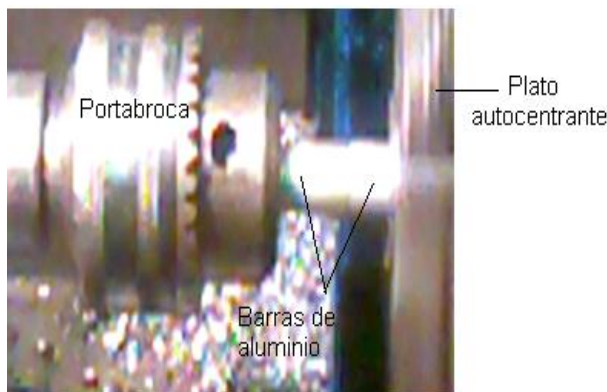


Figura 2.3. Instalación del proceso de soldadura a tope de la aleación de aluminio.

Para la ejecución del proceso de soldadura por fricción radial o de torque, la pieza fija se instaló en un portabroca y la que rota en un plato autocentrante de tres muelas. Se seleccionó esta máquina porque posee precisión estable y se encuentra en la capacidad de realizar cortes difíciles de piezas a altas revoluciones. Debido a que cumple con las características

necesarias para usarse como máquina de soldadura por fricción rotativa así como a los altos precios de las máquinas específicas hechas para esta soldadura, es que se adapta para la aplicación de este tipo de soldadura, particularmente para fines de investigación.

2.4.1. Variables operativas utilizadas para el proceso de unión

Varios parámetros se pueden controlar en la soldadura por fricción rotativa. Estos incluyen el diámetro de la pieza a soldar, la velocidad de rotación, tiempo de fricción, tiempo de forja, presión de fricción y presión de forja, así como otros tales como la geometría de las piezas y las propiedades del material. La velocidad de rotación, tiempo de fricción, presión de fricción, presión de forja y el tiempo de forja son los necesarios para tener en cuenta al optimizar el proceso de soldadura. Un proceso de soldadura exitoso se puede producir si dichos parámetros se optimizan. En las tablas 2.2 y 2.3 se muestran los parámetros del proceso de soldadura para la aleación AA 5754.

Tabla 2.2. Parámetros de soldadura empleados en función de la temperatura de fricción

Niveles	Variables		Salida
	Número rev (rev/min)	Presión (MPa)	Temperatura de fricción (°C)
(-1)	1 200	0,9	
(+1)	1 400	1,9	
Ensayo			
1	1 200	0,9	Tf ₁
2	1 400	0,9	Tf ₂
3	1 200	1,9	Tf ₃
4	1 400	1,9	Tf ₄

Se tuvo en cuenta los parámetros considerados en función de la temperatura de forja. En la tabla 2.3 se muestran los mismos.

Niveles	Variables		Salida
	Número rev (rev/min)	Presión (MPa)	Temperatura de forja (°C)
(-1)	1 200	0,9	
(+1)	1 400	1,9	
Ensayo			
1	1 200	0,9	Tw ₁
2	1 400	0,9	Tw ₂
3	1 200	1,9	Tw ₃
4	1 400	1,9	Tw ₄

Las probetas se someten a la acción de soldadura por fricción en diferentes condiciones, para evaluar la influencia de la temperatura de fricción y la temperatura de forja. A partir de estos parámetros, se realizará el tratamiento matemático de las variables involucradas en la soldadura por fricción, que está relacionado con el fenómeno de la fricción para producir la unión metalúrgica a la deformación y el flujo plástico, además está condicionado por los cambios metalúrgicos internos que ocurren en la aleación.

El número de experimento cuando intervienen F factores con dos niveles (-1 y $+1$), se determina con un arreglo de la función exponencial: $n = 2^F$

Siendo n el número de experimentos y F el número de factores.

Se analizará la influencia de dos factores, de aquí que $F = 2$, luego el número de experimentos sería: $n = 2^2 = 4$ experimentos.

Se cortaron 16 muestras de un perfil circular de aluminio AA 5754. Se instaló una muestra en el torno para que la superficie de contacto recibiera la operación de refrentado (se obtuvo una superficie plana), lo cual se logró con ayuda de una cuchilla de 45° con una plaquita CNMG 150 608 GC 4025 y soporte PSSNR 2525 P15, una vez realizada esta operación, se hizo girar el plato autocentrante de tres muelas según las rev/min seleccionadas y se comenzó la soldadura donde se tuvo en cuenta los parámetros establecidos en la matriz de planificación de experimentos.

2.4.2. Relaciones entre las variables

Velocidad de soldadura: la función de la rotación es producir una velocidad relativa en las superficies de empalme. Desde el punto de vista de la calidad de la soldadura, la velocidad casi nunca es una variable crítica. Para probetas de hasta 12 milímetros de diámetros, la velocidad tangencial que se debe utilizar está en un rango desde 1,27 hasta 1,78 m/s (O'Brien, 1996). En nuestro trabajo fueron empleadas como velocidades de soldadura 1 200 y 1 400 rev/min.

Presión de soldadura: la presión controla el gradiente de temperatura en la zona de la soldadura, la potencia de impulso requerida y el acortamiento axial. La presión específica depende de los metales que se van a unir y de la geometría de la unión. La presión de calentamiento debe ser suficiente para mantener la superficie de empalme en contacto íntimo y evitar la oxidación. Para probetas de hasta 12 milímetros, la presión de

calentamiento se encuentra entre 0,9 y 1,9 MPa para el aluminio y la presión de forja que se requiere es desde 76 hasta 152 MPa. Los valores de uso más común son de 55 y 138 MPa (O' Brien, 1996). En nuestro trabajo se emplearán presión de 0,9 y 1,9 MPa.

Tiempo de calentamiento: para una aplicación en particular, el calentamiento se determina durante la preparación o con base en la experiencia previa. Un tiempo de calentamiento excesivo limita la productividad y desperdicia material; un tiempo de calentamiento insuficiente puede producir calentamiento disparejo, así como el atrapamiento de óxidos en áreas no adheridas en la interfaz. Este parámetro depende de las velocidades y presión que se aplique al material a soldar, la misma está entre 10 y 14 segundos (O' Brien, 1996).

2.4.3. Características entre las variables del proceso

En la figura 2.4 se muestra las relaciones entre las características de las variables del proceso de la soldadura por fricción de torque continuo.

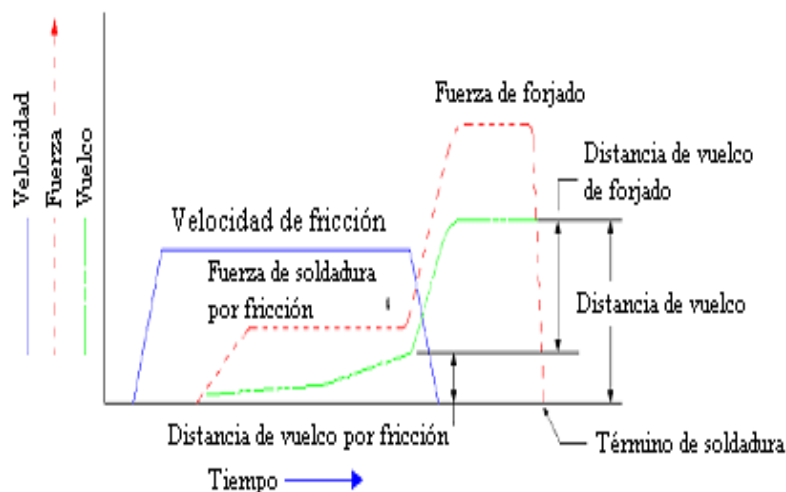


Figura 2.4. Características de los parámetros de la soldadura por fricción rotativa.

Como se observa en la figura 2.4 para la soldadura por fricción radial de la aleación de aluminio AA 5754 del tipo Al – Mg, las curvas describen el procedimiento para la ejecución del proceso, la velocidad de la pieza móvil se incrementa hasta la velocidad de soldadura, da inicio la etapa de calentamiento, se comienza a incrementar la fuerza axial hasta que alcance el valor de la fuerza de calentamiento, la velocidad permanece constante a cuenta del incremento de la potencia que el motor entrega a medida que se incrementa la fuerza axial. En la etapa de calentamiento ya la interfase se encuentra en estado plástico y las piezas comienzan a acortarse.

Inicia la etapa de transición, se desconecta el motor y se aplica el mecanismo de freno, la velocidad desciende bruscamente a la vez que la fuerza axial se incrementa hasta el valor de forja, el acortamiento de las piezas se incrementa igualmente. La etapa de forja comienza al detener la pieza móvil y la fuerza axial alcanza el valor de forja, el acortamiento de las piezas se incrementa expulsando el material en estado plástico de la zona de interfase. Una vez que termina el acortamiento se produce la unión soldada.

2.5. Medición de temperatura

El instrumento de medición utilizado fue un pirómetro digital Minolta/ Land/Ciclops, para obtener los valores de temperatura en los procesos de fricción y forja, en cada una de las probetas, sin rebasar o llegar al punto de fusión del aluminio. El mismo tiene las características siguientes:

El pirómetro para altas temperaturas ha sido desarrollado para realizar mediciones en el sector del metal / acero, (especialmente para fundición) aunque también realiza mediciones en múltiples sectores que emplean altas temperaturas. El equipo puede determinar de manera rápida y precisa una temperatura de hasta + 1 800 °C, además posee un rango de 0,001 mm de precisión. Posee un rendimiento eléctrico que puede grabarse por un registrador del mapa portátil o fijo, su tiempo de contestación es de 0,08 segundos. La metodología a seguir para la unión de la aleación de aluminio es la siguiente:

1. Medición de la temperatura ambiente del lugar donde se realizó el proceso de soldadura por fricción.
2. Toma de la temperatura inicial de la probeta antes de ser sometida al proceso de soldadura por fricción.
3. Toma de temperatura en el punto de contacto con valores de presión y rev/min de la etapa de fricción correspondiente a cada prueba.
4. Medición de temperatura en el punto de unión con los valores de presión correspondientes a la etapa de forja de cada una de las pruebas.
5. Revisión de los valores de temperatura obtenidos con respecto a la temperatura de fusión del aluminio AA 5754, sin exceder ese valor.

2.6. Procedimiento metodológico para el proceso de soldadura

En la soldadura por fusión de uniones de aleaciones metálicas distintas, las consideraciones más importantes son la composición química del metal soldado y las propiedades mecánicas. La composición del metal soldado depende de la composición de los metales base, del metal de aporte y la dilución relativa de estos materiales. Actualmente la mayoría de los procesos de soldadura se llevan a cabo mediante la aplicación de calor a las piezas a unir. El calor a menudo es de suficiente intensidad y cantidad como para producir la fusión de los materiales a unir.

2.6.1. Cálculo de la fuerza de calentamiento

En la soldadura por fricción, el movimiento asociado con la fuerza aplicada debe ser capaz para generar un calor suficientemente alto para reblandecer el metal, que la interfaz se encuentra bajo un estado de deformación plástica y en consecuencia, la superficie inicial del material se expulse formando un "flash" plástico. Por la ecuación 2.1 se determinó la fuerza de calentamiento.

$$F = P \cdot A \quad (2.1)$$

Donde:

F - fuerza axial necesaria; N

P - presión de calentamiento; MPa

A - área de contacto de la probeta; mm²

2.6.2. Cálculo del área de contacto o de soldadura

El área de la sección transversal se relaciona con las uniones estándar y se puede modificar para distintos metales basándose en su densidad. Cada soldadura tiene una superficie de sección transversal que se puede determinar directamente por cálculos geométricos. Por la ecuación 2.2 se determinó el área de contacto o de soldadura, para el cálculo del área se consideró como un círculo.

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2.2)$$

Dónde:

d - diámetro de la barra; mm

2.6.3. Cálculo de la fuerza de contacto

El movimiento durante el proceso se produce normalmente utilizando pequeñas distancias de recorrido del orden de 1 - 3 mm y a alta frecuencia (25 - 100Hz). Ello genera un calor por fricción en el plano de contacto y por consiguiente se reblandece un cierto volumen de material. Durante el proceso, una parte del material viscoelástico que se formó se desplaza hasta la periferia de la interfaz de contacto. Esta fuerza de contacto se calculó por la ecuación 2.3.

$$F_c = \mu \cdot F \quad (2.3)$$

Dónde:

F_c - fuerza de contacto; MPa

μ - coeficiente de rozamiento dinámico.

Para el caso del rozamiento aluminio-aluminio, $\mu = 0,15$.

2.6.4. Cálculo de la distribución de la temperatura en la junta soldada

Debido a la importancia que tiene la distribución de la temperatura en la junta soldada, autores como Lombard *et al.* (2009) citando a Peel *et al.* (2006), estimaron la entrada de calor a la junta por la ecuación 2.4

$$Q = \eta \frac{2\pi\omega T}{s} \quad (2.4)$$

Donde:

Q - calor por unidad de longitud; J/mm

η - factor de eficiencia, (0,9)

ω - velocidad de rotación; rev/min

T - torque; N.mm

s - avance; mm/min

Por la ecuación 2.5 se calculó la potencia a emplear en este proceso.

$$P = \frac{(2\pi)\omega T}{60} \quad (2.5)$$

Dónde:

P - potencia ejercida; kW

Al aplicar fuerza un material es conformado, deformado plásticamente, se reduce más la tensión que la fluidez, el fenómeno es conocido como deformación plástica. El cambio de dimensiones de una pieza debido a la transformación plástica ocurre en combinación con el cambio de dimensiones debido a la deformación inducida por cambio de volumen.

2.7. Elaboración mecánica de las probetas

La operación de corte como se observa en la figura 2.5, se realizó según norma ASTM E 3 - 95, para ello se empleó una segueta manual con constante régimen de enfriamiento y evitar que el calentamiento producido por la fricción durante el proceso pudiera provocar transformaciones en la estructura por cambios de fase.



Figura 2.5. Superficie de la muestra con corte transversal.

Las muestras fueron colocadas en un tornillo de banco, se realizó un corte transversal a las mismas, se tuvo en cuenta durante esta operación el manejo de la segueta de forma tal que no generara microfisuras internas en el material base. Las muestras cortadas son de 12 milímetros de diámetro y 6 milímetros de espesor.

2.7.1. Preparación metalográfica de la probeta

La muestra debe seleccionarse de la zona de la pieza que necesita eximirse y en la orientación apropiada. Es decir, si el flujo de grano o la distorsión es importante, puede ser que una sección transversal de la parte no muestre granos alargados; únicamente una tajada paralela a la dirección de laminado revelaría adecuadamente los granos alargados debido al laminado. Algunas veces se requiere más de una muestra. Usualmente, una soldadura se examina por medio de una sección transversal.

En la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son: desbaste, pulido, desengrasado y lavado (ASTM E 3 – 95 y Norma NC 10 – 56: 86).

2.7.2. Operaciones de desbaste y pulido

Se realizó con la variación de la granulometría de los papeles abrasivos al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina, del tipo No 180, 400 y 600 (ASTM E 3 - 95). Las lijas fueron colocada sobre una placa de vidrio, se cambió el sentido del lijado a 90° al pasar de un pliegue a otro, para eliminar la capa de material distorsionado y deslizado dejado por el anterior, esto permite obtener una superficie lisa y pulida, libre de impurezas o ralladuras, por último las muestras se pulieron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL.

Para el acabado se utilizó un paño de fieltro grueso, se usó como sustancia abrasiva el óxido de cromo. Una vez pulida las muestras se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro, se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono (Cl_4C) para evitar cualquier vestigio de grasa y pasta de pulir.

2.7.3. Ataque químico

Antes de atacar, a la probeta se le realizó un desengrasado. Para atacar el material se empleó una solución de 15 ml de HCl concentrado más 10 ml de HF al 48 % diluido en 85 ml de agua desmineralizada, para revelar los perfiles de las microestructuras.

Preparado el reactivo, se vertió en una cápsula en la que se introduce la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detiene el ataque con agua y se observa la superficie. La operación se repite hasta que la superficie a examinar esté bien atacada. Después del ataque se lavó la probeta de nuevo con abundante agua corriente y se secó con alcohol (absoluto) y secada al aire. Se emplearon las técnicas de ataque manual por inmersión en el reactivo químico. Se aplicó el ataque por inmersión de las muestras durante cinco segundos durante 11 s (ASTM E - 262 Practice A).

2.7.4. Ensayo de dureza

En la medición de la microdureza se siguieron los procedimientos de la norma NC 10 - 56: 86, se utilizó un microdurómetro modelo PMT – 3 No 168, que tiene acoplado un objetivo acromático con compensación libre trinocular de tubo inclinado a 30°. La figura 2.6 muestra las zonas donde se realizó el análisis de dureza.

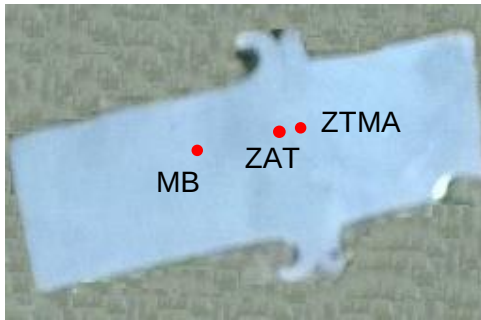


Figura 2.5. Medición de durezas en las diferentes zonas.

Las superficies de las probetas se prepararon de la misma manera que para el análisis microestructural, el desbaste y el pulido, se efectuaron tres mediciones a las muestras en diferentes lugares, las que se promediaron, la carga aplicada fue de 0,49 N, en un tiempo de 15 s. El indentador empleado fue el de pirámide de diamante, con un ángulo de 136° según la ASTM E 92 - 82.

Las muestras se encapsularon para poder realizar las operaciones de desbaste y pulido y garantizar el fácil manejo de las mismas. Cuando se va a realizar análisis microestructural en bordes de muestras deformadas, es importante conservar un ángulo de 90° en toda el área a observar, aspecto que no es posible, de no realizarse esta operación, ya que durante las operaciones de desbaste y pulido, los bordes se distorsionan redondeándose, obteniéndose una falsa observación de la imagen. El encapsulado se realizó con resina epoxi ROYAPOX – 5050.

2.7.5. Propiedades de la resina epoxi ROYAPOX – 5050

La resina epoxi ROYAPOX 5050 está compuesta por dos componentes y una vez polimerizada a temperatura ambiente, forma una masa incolora, dura y algo flexible. Presenta buenas cualidades de resistencia a la humedad y buenas propiedades mecánicas y dieléctricas que conserva sus propiedades a temperaturas comprendidas entre -30 y 125°C . Se suministra en dos componentes separados y predosificados: ROYAPOX 5050 y endurecedor 5050.

La relación de mezcla en peso (resina/endurecedor) es de 100/40 y puede utilizarse en la impregnación ó relleno de pequeños componentes electrónicos, que requieran una protección contra la humedad y los cambios de temperatura.

2.7.6. Inspección de las uniones de soldadura con ultrasonido

Las uniones soldadas pueden ser inspeccionadas ultrasónicamente con el empleo del haz direccionado o la técnica de ángulo de haz. Para determinar posibles defectos en la unión, luego de realizado la soldadura por fricción, a través del método de medida de velocidad ultrasónica, se empleo un equipo de ultrasonido marca KrautKramer, modelo USN 52L. La técnica de ángulo de haz es empleada muy a menudo, una razón es que el transductor no tiene que ir en el lugar de superficie de la soldadura, pero es colocado típicamente en la superficie lisa a lado de la soldadura. Con la inspección de ángulo de haz, el ángulo es por lo general seleccionado para producir la esquila de ondas en la parte a inspeccionar en un grado óptimo para encontrar los defectos. En la figura 2.6 se muestra el equipo de ultrasonido empleado, el cual se encuentra ubicado en el laboratorio de ensayos metalográficos de la empresa "Comandante Gustavo Machin Hoed de beche".

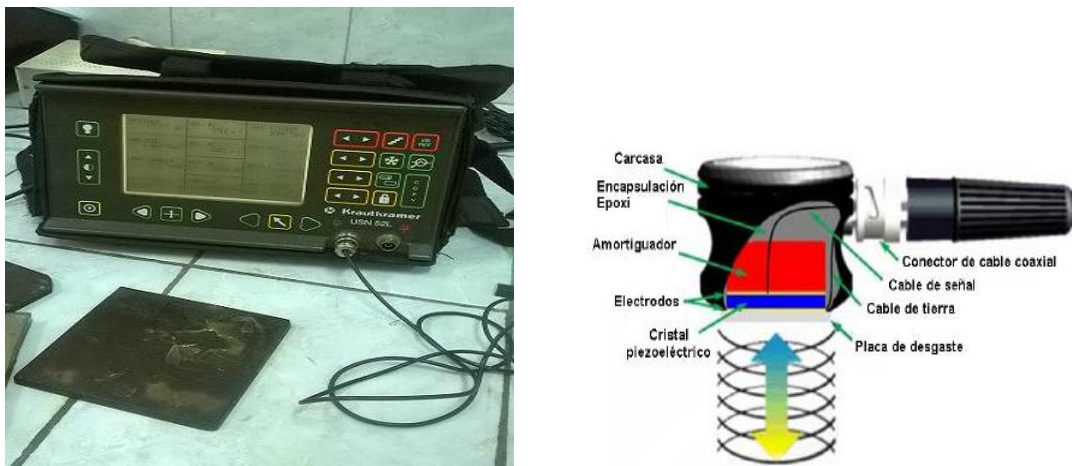


Figura 2.6. Equipo de ultrasonido y esquema del palpador ultrasónico empleados.

Los tipos de defectos usualmente encontrados son poros, escoria atrapada, penetración incompleta, fusión incompleta y fracturas, serios defectos, como las fracturas y fisión incompleta, usualmente se extienden longitudinalmente a lo largo de la soldadura y dan señal de limpieza especial cuando el haz de sonido golpea sus ángulos. Una porosidad esférica produciría una pequeña amplitud de eco, siempre y cuando el haz de sonido golpe en el ángulo de la unión. Inclusiones de escoria pueden producir pasos de indicaciones, que son el ángulo máximo derecho a la orientación de la escoria. Una inclusión grande puede producir señales múltiples.

En la tabla 2.4 se muestran las características del equipo de ultrasonido empleado.

Tabla 2.4. Características principales del equipo KrautKramer

Título	Parámetros	Título	Parámetros
Rango de medición (mm)	2,5 > 10 000	Modo de medición	Sencillo y doble
Error de linealidad vertical	$\leq 3 \%$	Rechazar (%)	0 ~ 80
Sensibilidad de salida (dB)	57	Pulso desplazamiento	-20 -+ 3 400 m/s
Pulso de desplazamiento (dB)	32	Cero (m/s)	0,0 ~ 99,99
Poder de resolución	≥ 40	Tipo de puerto	BNC
Rango de frecuencia (MHz)	5	Temp de funcionamiento	- 20 ~ 50
Ganancia (dB)	0 ~ 110	L x H x A (mm)	240 x 180 x 50
Velocidad del material (m/s)	16 250 - 2 3 100	Peso (kg)	1,8

Para la determinación de la velocidad de onda longitudinal en la unión soldada, con un espesor de 5,6 mm, se empleo un cabezal angular de contacto directo a 45°, que utiliza una interfase en forma de cuña la cual genera un ángulo entre el haz emitido y la normal a la superficie analizada. Esto introduce ondas refractadas de corte en el material al mismo tiempo que dichas ondas son reflejadas en las paredes de la pieza mejorando la detección de imperfecciones en cordones de soldaduras. También son utilizados para generar ondas de superficie para detectar defectos superficiales. La frecuencia empleada fue de 0,5 a 2,25 MHz ya que las frecuencias bajas proveen mayores energías y penetración en el material.

El procedimiento empleado en el ensayo de ultrasonido fue el de pulso-eco, designado también como procedimiento de pulsos reflejados ya que utiliza la porción reflejada del sonido para la evaluación de defectos. El oscilador piezoeléctrico funciona a la vez como emisor y como receptor. Como la energía recibida es mucho más débil que la emitida, aquí no puede operarse sobre la base sonido continuo, empleándose exclusivamente impulsos de sonido.

La aceptación o rechazo de las discontinuidades está dada según su clasificación. En la tabla 2.7 se muestra la forma de evaluar las discontinuidades durante el ensayo ultrasónico.

Tabla 2.7. Criterio de aceptación o rechazo de discontinuidades. Fuente: AWS D1.1

Clase A (discontinuidades grandes)	Se rechaza sin importar su longitud
Clase B (discontinuidades medias)	Se rechaza si su longitud es mayor a 20 mm
Clase C (discontinuidades pequeñas)	Se rechaza si su longitud es mayor a 50 mm
Clase D (discontinuidades menores)	Se acepta sin importar su longitu

En el anexo 1 se recogen las recomendaciones en cuanto a la evaluación de las discontinuidades.

2.7.7. Ensayo de líquidos penetrantes

El método de líquidos penetrantes establece requisitos necesarios para la detección de defectos superficiales por este método a uniones soldadas por fusión y piezas fundidas. La ejecución del ensayo se realizó durante un ciclo de etapas para su mayor coordinación.

El limpiador, el penetrante y el revelador, fundamentalmente se especifica que estos tienen que proceder de un mismo fabricante y tienen que cumplir con diversas propiedades físicas y químicas. Los productos utilizados son de la marca Ardrox. En la figura 2.7 se muestra el kit de líquidos penetrantes empleado.



Figura 2.7. Limpiador, penetrante y revelador.

La superficie a ensayar se limpió a 25 mm en la zona adyacente, se eliminó todo tipo de contaminantes como óxidos, aceites, grasas y pinturas, que interfieren negativamente en el ensayo. La limpieza se realizó con el spray limpiador solvente, cepillo de alambre de cerdas inoxidables y unos trapos limpios exentos de pelusillas, se esperó un tiempo no mayor de 10 minutos.

Se aplicó el líquido penetrante sobre la superficie a ensayar, mediante los métodos de rociado. Se tuvo en cuenta que las condiciones de ventilación fueran las apropiadas y la distancia del mismo a la superficie para lograr una aplicación uniforme mediante el método de rociado. Para que el líquido penetrara en los defectos (acción capilar) se verificó el tiempo en correspondencia con el espesor de la pieza a ensayar (10 mm), el tiempo de penetración fue de 7 min. Con ayuda de paños se removió y secó la superficie de la pieza de manera que en la observación final haya suficiente contraste de las posibles indicaciones sobre el fondo limpio.

Se empleo el relevador a una distancia de 30 mm y con un ángulo aproximado de 45^0 después de eliminar el exceso de penetrante y de evaporarse el limpiador. Antes de aplicarse se agitó y se aplicó como un disolvente no acuoso, el cual se evaporó sobre la superficie de la pieza, donde quedó una capa uniforme en una zona no menor de 10 mm adyacentes a la superficie ensayada.

El revelador se aplicó mediante aerosol, se tuvo en cuenta la ventilación del local y la misma marca del líquido penetrante. Según norma EN 571-1: 1997, el tiempo de revelado para los penetrantes coloreados, bajo luz natural o artificial con una iluminación mínima de 500 lx, será de 10 a 30 minutos para obtener las posibles discontinuidades producidas.

Se realizó una limpieza final sobre los residuos de los productos del ensayo, para que no existiera interferencia con los procesos posteriores.

Se realizó además un ensayo de inspección visual, este método se basó principalmente en el dimensionamiento de los cordones de soldadura y la medición de algunas indicaciones como las escorias residuales después de efectuarse la soldadura donde se utilizó la lupa. En el ensayo visual de detecto la presencia de defectos en la soldadura como: salpicaduras y socavaduras en el final del cordón.

2.8. Conclusiones del capítulo 2

- Se establecieron las técnicas experimentales, a través de las cuales se le dará cumplimiento al desarrollo del trabajo, así como la caracterización de cada uno de los equipos y máquinas para validar los resultados a obtener.
- Se fundamentaron las propiedades a investigar, se definen los principales parámetros del proceso de soldadura y las variables para la unión a tope por fricción de la aleación de aluminio.
- Se establecen los regímenes de soldadura a emplear durante el proceso de soldadura, así como las mediciones de dureza a las diferentes muestras según las condiciones de ejecución del proceso.

Capítulo 3

Análisis de los resultados

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

La soldadura por fricción se caracteriza por la combinación de movimiento y presión. El movimiento se puede variar y aplicar para determinadas circunstancias según las necesidades que exige el producto. Se caracteriza generalmente en tres tipos de movimientos: lineal, rotacional y orbital. Al ser un proceso aparentemente simple y no presentar grandes deformaciones en las piezas soldadas, se debe tener en cuenta el comportamiento del flujo mecánico de los distintos materiales utilizados. La temperatura alcanzada por la fricción durante el proceso es más uniforme que los demás métodos, debido a la órbita generada y sus parámetros utilizados.

El objetivo del capítulo es determinar el comportamiento microestructural de la zona termomecánicamente afectada (ZTMA) y la zona afectada térmicamente (ZAT) de la aleación de aluminio del tipo AA 5754 sometida a proceso de soldadura por fricción radial y a ensayos no destructivos.

3.2. Análisis de la composición química

La soldabilidad de las aleaciones de aluminio varía significativamente dependiendo de la composición química de la aleación usada. El aluminio y el constituyente binario Mg_2Si forman un sistema cuasibinario que divide al sistema ternario en dos partes. En el sistema cuasibinario los dos componentes forman un eutéctico a 595 °C que contiene el 8,15 % de Si y existe una solubilidad del sólido considerable en el extremo del aluminio que alcanza un 0,85 % de Mg y 1,10 % de Si a la temperatura eutéctica; ambos sistemas ternarios parciales son eutécticos.

El aluminio, silicio y Mg_2Si forman un eutéctico ternario que contiene 4,97 % de magnesio, 12,95% de silicio que solidifica 555 °C mientras que el aluminio, el Mg_2Si y el Mg_2Al_3 forman otro a 33,2 % de magnesio y 0,37 % de silicio, que solidifica a 451 °C. El campo de una sola fase, sobre el cual el aluminio es el único constituyente que se solidifica, termina a 15,3 % de magnesio y 0,1 % de silicio a 415 °C.

El efecto de la soldadura causa una caída en la resistencia del material debido al incremento en las temperaturas pico. Esto causa incoherencia en los precipitados cuando la temperatura

es suficientemente alta, además puede ocurrir alguna reprecipitación durante el enfriamiento, causa valores de dureza bajos en relación con el metal base. El aumento de la velocidad de rotación, que genera una mejor capacidad de flujo plástico por efecto de la rotación y el aumento de la velocidad de soldadura, que produce un menor aporte de calor por unidad de longitud tienen una relación directamente proporcional con los elementos químicos de la aleación, reportado por McNelley *et al.* (2008) y Padmanaban *et al.* (2009).

3.3. Análisis del procedimiento metodológico para el proceso de soldadura

Durante el proceso de soldadura por fricción de torque continuo las piezas que se van a soldar se unen y se aplica una fuerza axial de soldadura. Al frotarse una superficie de empalme contra la otra (cara interna de soldadura), se produce calor. Para unir el acero la aleación de aluminio AA 5754, se requiere que la de una fuerza axial, la misma se calculo por la ecuación 2.1. Se consideró las dos variantes de presión, 0,9 y 1,9 MPa. El área calculada por la ecuación 2.2 que es de 113,04 mm² se mantiene constante para ambos valores de presión.

En correspondencia con este resultado se establece que, para una presión de 0,9 MPa la fuerza axial de calentamiento sea de 101,736 N y para la presión de 1,9 MPa, la fuerza de calentamiento sea de 214,776 N.

Para el proceso de soldadura por fricción rotacional, la velocidad de rotación, la velocidad de soldadura y la presión sobre el material de la junta, ejercen un efecto significativo sobre el aumento de la velocidad de generación de calor, las temperaturas pico, la velocidad de enfriamiento, la presión horizontal y el flujo del material durante la soldadura. Este efecto se refleja en la microestructura de la junta y en últimas sobre sus propiedades mecánicas. Las temperaturas pico se incrementan con el aumento de la velocidad de rotación y el aumento en la fuerza axial, y decrecen un poco con el aumento en la velocidad de soldadura, según criterios de Vilaça *et al.* (2012 y Paduan *et al.* (2012).

Para una velocidad de rotación de 1 200 rev/min, una baja presión limita el calentamiento con poco acortamiento axial. Una presión elevada causa calentamiento local hasta una temperatura muy alta y un acortamiento axial rápido. En el caso del aluminio, la tasa de acortamiento axial es aproximadamente proporcional a la presión de calentamiento, donde para una presión dada durante la fase de calentamiento, el acortamiento axial es mayor a

baja velocidad que a alta velocidad. En muchos metales, incluidos los aceros, la calidad de la unión mejora cuando se aplica una mayor fuerza de forjado al final del período de calentamiento, aspectos estos que han sido planteados por DebRoy y Bhadeshia (2010); Woo *et al.* (2011).

Durante la soldadura por fricción rotativa, la fuente de calor, ya sea por convección, radiación o conducción, es el rozamiento desarrollado entre las superficies de contacto, este calor es dependiente de la geometría de las superficies de las piezas. Para establecer este parámetro se tuvo en cuenta la ecuación 2.3, donde para un coeficiente de rozamiento dinámico aluminio - aluminio ($\mu = 0,15$) y fuerza axial necesaria de 101,736 N y de 214,776 N, la fuerza de contacto sea de 15,2604 N y 32,2164 N respectivamente.

Como el proceso de soldadura es un proceso termomecánico de ambos materiales base, que incluye el calentamiento adicional producido por las deformaciones viscoplásticas en la zona de soldadura y el funcionamiento físico del proceso, consiste en calentar el material por medio de una fricción generada entre ambas superficies, la fuerza de contacto garantiza que al calentarse, por efecto de la fatiga térmica, el material alcance el punto de fusión y se mezcle por medio de la turbulencia que genera la fricción, criterio que ha sido expuesto por Chen y Kovacevic (2003) y Maalekian (2007).

La distribución de la temperatura en la junta soldada se determinó por la ecuación 2.4, para un factor de eficiencia de 0,9; velocidades de rotación de 1 200 y 1 400 rev/min, un torque que se genera durante el proceso de 45,7812 Nmm un avance de 0,2 mm/rev se tiene que para la primera velocidad de rotación la temperatura sea de 25875,53 J/mm y para la segunda la temperatura sea de 30183,81 J/mm, y para un torque de 96,6492 Nmm y teniendo en cuenta los mismos datos anteriores la temperatura es de 54626,13 J/mm para 1200 rev/min, y de 63721,38 J/mm para 1400 rev/min

El incremento en la velocidad de rotación de la máquina genera una disminución en el torque debido al incremento de la tasa de generación de calor en la junta y al incremento en la temperatura de ésta, lo que permite que las piezas se deformen con mayor facilidad a alta temperatura y a alta tasa de deformación, la variación de temperaturas se relacionaron también con los esfuerzos residuales.

Se obtiene mayor entrada de calor cuando se emplean menores avances y bajo estas mismas condiciones los esfuerzos residuales tienden a disminuir. Para un mismo paso, variaciones en el avance causan mayores cambios en los valores de entrada de calor y esfuerzos residuales en comparación con la velocidad de rotación, donde las magnitudes de estos esfuerzos pueden alcanzar valores cercanos al límite elástico del material soldado y su presencia puede afectar de forma negativa el desempeño mecánico de la junta. El efecto de la variación en las velocidades de rotación y de avance en los esfuerzos residuales, son parámetros que se relacionan directamente con el aporte térmico en la soldadura, lo que ha sido reportado por Singh-Sidhu y Singh-Chatha (2012).

En correspondencia con las velocidades de rotación empleadas (1 200 y 1 400 rev/min) se determinó por la ecuación 2.5 la potencia consumida, donde para un torque de 45,7812 Nmm para ambas revoluciones, se tiene que la potencia sea de 0,602 kW y 0,702 kW respectivamente, para un torque de 96,6492 Nmm la potencia consumida es de 1,271 kW y 1,483 kW. Con las potencias calculadas en el motor del husillo, son necesarias para realizar el proceso si se considera las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AA 5754, las cuales se ajustan a las desarrolladas durante el proceso. La potencia se vuelve notable sobre el cordón, de manera que conforme se aumente la duración, incrementará el charco con lo que se genera una zona afectada por el calor (ZAC) mayor. Los requerimientos de potencia también incrementan con el aumento de la presión axial e influyen en la de variación de temperaturas y se relacionaron con los esfuerzos residuales, expuesto por Duman (2011).

3.3.1. Análisis de las temperaturas del proceso

Los resultados obtenidos de las temperaturas según los parámetros empleados en el proceso de soldadura por fricción radial o rotativa se muestran en la tabla 3.1. Se considera la temperatura de fricción y de forja.

Tabla 3.1. Resultados de los parámetros de soldadura

Niveles	Variables		Salida	Salida
	Número rev (rev/min)	Presión (MPa)	Temperatura de fricción (°C)	Temperatura de forja (°C)
(-1)	1 200	0,9		
(+1)	1 400	1,9		
Ensayo				
1	1 200	0,9	350	327
2	1 400	0,9	338	224
3	1 200	1,9	348	324
4	1 400	1,9	318	230

Los resultados obtenidos en las diferentes temperaturas, en dependencia de cada variación de los parámetros de soldadura, para la temperatura de fricción está entre un 51 y un 53 % de la temperatura de fusión de la aleación de aluminio y entre un 34 y 35 % para la de forja. Esta máxima temperatura se obtiene al disminuir la velocidad de rotación, así mismo, la menor fuerza axial sobre la junta también ejerce un ligero efecto en el pico de temperatura.

Las temperaturas, tanto de forja como de fricción, se caracterizan por ser el momento en el que la temperatura máxima es alcanzada sin llegar a la fusión, pero si al punto de plasticidad, así como la pieza móvil retoma la posición final deteniendo el movimiento de fricción, durante este proceso de unión en estado sólido, el comportamiento mecánico de los materiales soldados cuya estructura y propiedades se degrada conforme la temperatura aumenta, la determinación de la distorsión (la cuál es mínima en este proceso), bajos los niveles de estrés residual obtenidos.

Ambas temperaturas (fricción y de forja) independientemente que logren fusionar los dos elementos entre sí, además sirve para depurar en la zona de unión las imperfecciones encontradas en el material y de esta manera lograr una integración microestructural de mayor calidad.

Al aumentar la temperatura, debido al movimiento giratorio de fricción y cargas aplicadas y sobrepasa la de precipitación, ocurre un sobre envejecimiento que causa una coalescencia de los precipitados finos en la estructura de la aleación y reduce la dureza en esta zona. La resistencia aumenta con el aumento de velocidad, lo cual está correspondencia con un menor calor aportado y un ciclo térmico menos prolongado. Esto puede coincidir con una

mayor dureza de la zona térmicamente afectada y posiblemente con una menor alteración metalúrgica, según DebRoy y Bhadeshia (2010).

3.4. Análisis microestructural de la ZTMA

La evolución de la microestructura durante el proceso de soldadura depende de diferentes parámetros, la composición química y tratamientos térmicos del o los materiales a unir. Estos parámetros también definen la entrada de calor y el tamaño de las zonas afectadas en la junta, los tratamientos térmicos definen la microestructura inicial del material mientras que la composición química y la microestructura permiten definir los mecanismos de endurecimiento y crecimiento o disolución de precipitados.

En la figura 3.1 se muestra la zona térmicamente afectada (ZTMA) y la zona afectada térmicamente (ZAT) para la condición de 1 200 rev/min y presión de 0,9 MPa.

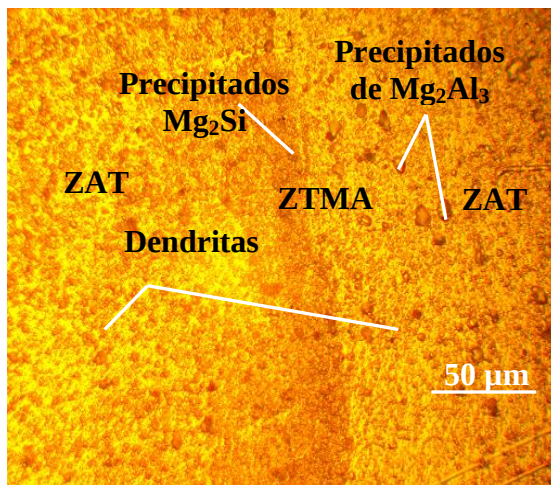


Figura 3.1. Microestructura para 1 200 rev/min y presión de 0,9 MPa.

La microestructura de la zona central (ZTMA) muestra granos muy finos, lo cual puede ser producto de una recrystalización dinámica, se observa una reorientación de los granos originales y cierto grado de recrystalización. En la otra zona (ZAT) el efecto térmico produjo una disminución en el tamaño de los granos, pero no con una disminución como en la ZTMA, la microestructura ha permitido definir los mecanismos de endurecimiento y crecimiento y la disolución de precipitados.

En la zona mezclada se ha generado una microestructura recrystalizada con un tamaño de grano fino, compuesta por precipitados de Mg_2Si y de Mg_2Al_3 , así como por segregaciones dendríticas en ambas ZAT de la unión. Lo anterior se debe principalmente a las variaciones

en la temperatura dentro de ésta zona, se ha obtenido una microestructura refinada comparada con la del metal base original.

En el caso de la aleación de aluminio, su conductividad eléctrica es aproximadamente tres veces y media la del acero, mientras que su conductividad calorífica es de tres a cinco veces la del acero. Esta última propiedad obliga a utilizar grandes intensidades de soldadura, así como precalentamiento en el caso de utilización de piezas gruesas, pero que debido al calor generado durante el proceso, sufren cambios microestructurales y en sus propiedades mecánicas y mediante la formación de finos precipitados y la dispersión de éstos en la microestructura, lo que genera campos de deformaciones alrededor de dichas partículas que obstruye y dificulta el movimiento de las dislocaciones, expuesto por Xu *et al.* (2011).

3.4.1. Análisis microestructural para la condición de 1 200 rev/min y 1,9 MPa

Se analiza el perfil microestructural del proceso para esta condición. La figura 3.2 se corresponde con el análisis de la ZTMA y la ZAT.

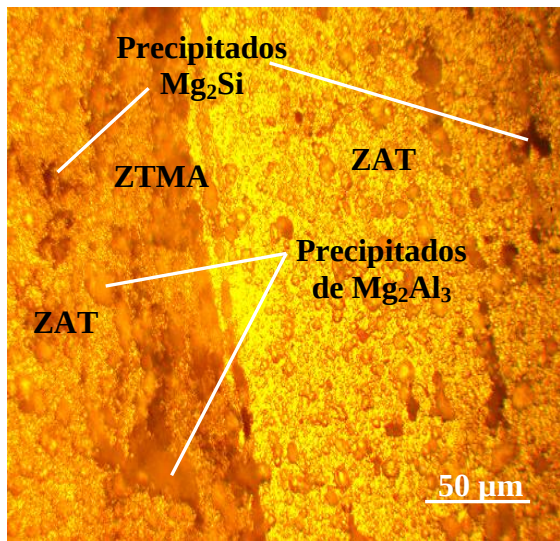


Figura 3.2. Microestructura para 1 200 rev/min y 1,9 MPa.

En la figura 3.2 se observa una la matriz texturada del material base y los granos recrystalizados en la zona afectada térmicamente (ZAT), en la ZTMA se aprecia a partir del límite o interfase con los granos que conforman el cordón de la unión. Se puede apreciar el crecimiento de los precipitados de Mg_2Al_3 , cuyos granos se distinguen de las formas típicas encontradas en el material base. La primera zona está conformada por el grupo de granos ubicados en ambos extremos del ancho de cordón.

El comportamiento obtenido se debe a la ubicación de esta zona, que es la primera en solidificar, por encontrarse más cerca al medio ambiente y segundo porque parte del calor contenido por el metal fundido se disipa a través del material base que se encuentra a mucho menor temperatura que el charco de soldadura, criterio que coincide con lo planteado por Tokaji y Uematsu (2009).

La solubilidad del compuesto Mg_2Si en aluminio varía de una manera muy importante, en función de la temperatura, por un lado y del exceso de magnesio, por otro, al encontrarse en la matriz de aluminio y al interactuar con las dislocaciones en movimiento, frenan su deslizamiento localizado y evitan la destrucción sucesiva de otros tipos de agentes de endurecimiento menos importantes, consistente con Chen *et al.* (2009).

La capa de alúmina, del punto de vista de la protección es una gran ventaja, se convierte en inconveniente cuando se trata del tema de la soldadura, ya que si bien el aluminio funde a los 600 °C, la capa de alúmina lo hace a los 2050 °C, lo cual genera reducción en la resistencia mecánica de la junta y de la zona afectada térmicamente, así como de la resistencia a la corrosión.

3.4.2. Análisis microestructural para la condición de 1 400 rev/min y 0,9 MPa

En la figura 3.3 se muestra el comportamiento microestructural obtenido para la condición de 1 400 rev/min y 0,9 MPa.

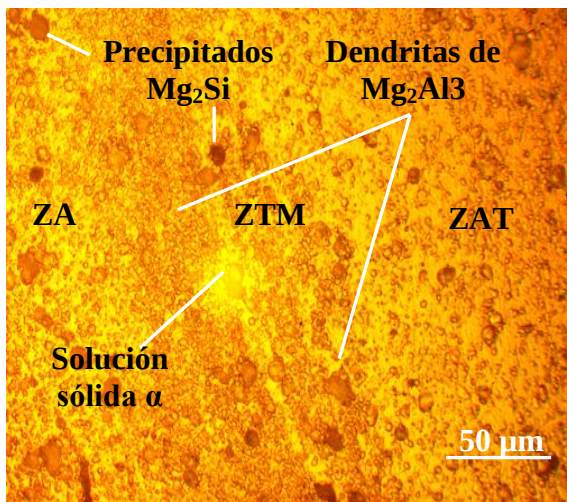


Figura 3.3. Microestructura para 1 400 rev/min y 0,9 MPa.

En la 3.3 se muestra las regiones de transición de la zona afectada térmicamente (ZAT) a la zona termomecánicamente afectada (ZTMA). Se aprecian variaciones abruptas en la

microestructura ya que se observa el paso de una región con distribución y tamaño de los granos similar al del material base, a una región con tamaño de grano fino, comparable con el que se presenta en la zona de mezcla. La estructura de la zona de fusión en la zona soldada está constituida por una matriz de solución sólida α con segregaciones dendríticas de $MgAl$, con dispersiones de precipitados de Mg_2Al_3 producto de la solidificación y por acción del calor transmitido por las sucesivas capas de metal fundido.

La primera subzona está conformada por el grupo de granos ubicados en ambos extremos del ancho de la franja soldada, ésta área fue la primera parte del depósito en solidificar, en primer lugar porque se encuentra más cercana al medio ambiente y segundo porque parte del calor contenido por el metal fundido se disipa a través del material base que se encuentra a mucho menor temperatura que el charco de soldadura, producto de ésta solidificación se generó una estructura dendrítica que más tarde fue disuelta por acción del calor transmitido por las sucesivas capas de metal fundido.

3.4.3. Análisis microestructural para la condición de 1 400 rev/min y 1,9 MPa

Se analiza la microestructura de la sección transversal de la región soldada para la condición de 1 400 rev/min y 1,9 MPa, donde se observa la ZTMA y la ZAT. La figura 3.4 muestra este comportamiento.

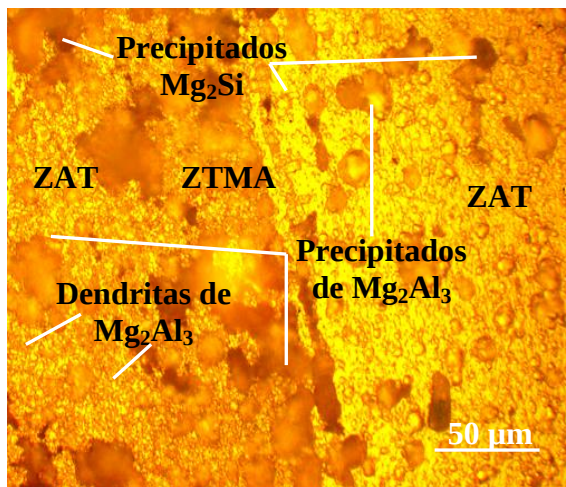


Figura 3.4. Microestructura para 1 400 rev/min y 1,9 MPa.

Se observa en la figura 3.4 la zona de transición o zona afectada térmicamente (ZAT), donde se ha formado una segregaciones dendríticas, además ha sido afectada por el cambio térmico y una deformación plástica con menos intensidad que en la zona

termomecánicamente afectada (ZTMA). La ZTMA se observa diferenciada por el reducido tamaño de grano, donde existe la presencia de precipitados de Mg_2Al_3 de mayor tamaño que los observados en las otras condiciones de soldadura.

La causa del tamaño del grano de esta zona se podría considerar como consecuencia de dos eventos simultáneos que se presentan en esta zona de la soldadura, el primero se asocia a la elevada deformación plástica que se genera en el material por el flujo plástico a que es sometido, situación ésta que promueve una alta velocidad de nucleación de los granos recrystalizados. La segunda, se relaciona con que la temperatura alcanzada en dicha zona resulta relativamente baja con lo cual la velocidad de crecimiento de los núcleos resulta baja. Esta combinación de efectos resulta en el pequeño tamaño de grano resultante en tal zona de la soldadura.

Seshagirirao *et al.* (2015) expuso que la formación de diversas estructuras durante el proceso de fricción se debe al efecto de la presión sobre la calidad de las uniones de soldadura, además expuso que en la microestructura se puede encontrar la presencia de precipitados posiblemente de $AlMgSi$ y $AlMgSiFe$, los cuales aumentan de tamaño luego de realizada la soldadura, también encontró que la zona de la unión posee tamaño de granos más pequeños en comparación a la zona afectada térmicamente producto de una recrystalización y que la dureza es mayor en la zona de la unión y varía al alejarse de la misma, pero sin sobrepasar el máximo de dureza en la unión.

Se ha encontrado que la mayoría de las aleaciones aluminio-magnesio no son endurecibles por precipitación, pero en el caso de la aleación AA 5754 se presenta un endurecimiento por precipitación por la presencia del silicio.

3.4.4. Análisis de la microdureza

En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de dureza realizado en las diferentes zonas luego del proceso de soldadura por fricción rotativa de la aleación AA 5754. Los perfiles de dureza fueron realizados en las diferentes zonas para las diferentes condiciones de soldadura.

Tabla 3.2. Dureza de las uniones realizadas

Probeta	Número rev (rev/min)	Presión (MPa)	Dureza MB (HV)	Dureza ZAT (HV)	Dureza ZTMA (HV)
1	1 200	0,9	84	143	147
2	1 400	0,9	84	135	140
3	1 200	1,9	84	140	145
4	1 400	1,9	84	132	138

En la tabla 3.2 se observa la variación de la dureza que experimentan las uniones soldadas de las probetas con diferentes velocidades de rotación y diferentes presión. Partiendo desde el metal base, la dureza se reduce más en la ZAT con respecto a la ZTMA donde presenta un ligero incremento cerca de la periferia. Para la 4ta condición de soldadura se indica una ligera tendencia a la disminución de la microdureza por el incremento en la velocidad de rotación.

Los perfiles de microdureza de las zonas soldadas (ZTMA), en todos los casos mostraron una dureza mayor como resultado del endurecimiento por precipitación que se produce en la aleación debido a la presencia del silicio. Esta zona presenta una estructura de grano más fina motivado al rápido enfriamiento del pozo de soldadura. En estas aleaciones (grupo 5XXX, el Mg es un elemento que endurece más el aluminio que el Mn (un 0,8 de Mg produce el mismo efecto que un 1,25 de Mn), además el proceso de laminación le otorga al material acritud, lo que ha sido expuesto por Sathiya *et al.* (2005).

3.5. Análisis por el método de ultrasonido y líquidos penetrantes

El propósito fundamental de la detección de los defectos en la soldadura es el de determinar si los ensambles soldados satisfacen criterios de aceptación de un código o norma específicos. Determinar cuáles son los defectos presentes en uniones soldadas, es de gran ayuda ya que se puede determinar en qué condiciones que se presentan en el proceso de soldadura, para que existan los diferentes defectos como: porosidad, escoria, falta de penetración, falta de fusión, socavado, grietas, desalineamiento, entre otras. La figura 3.5 muestra los resultados obtenidos del ensayo de ultrasonido en correspondencia con el defecto determinado con líquidos penetrantes.

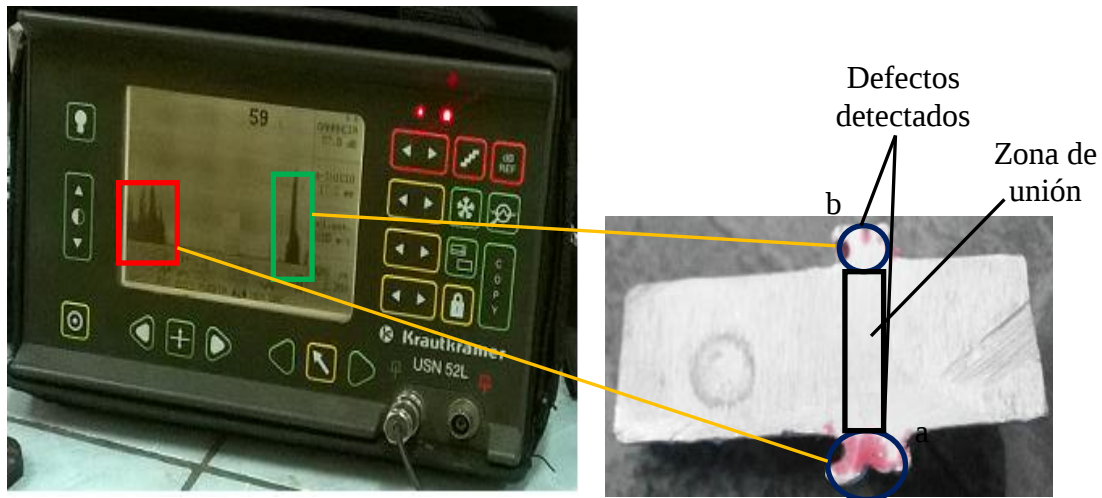


Figura 3.6. Resultados de los ensayos para la muestra 1.

En el C-Scan se observa que al realizar el recorrido con el palpador desde el punto (a) en la pantalla existe una señal, la cual hace referencia a tres picos (cuadro rojo) y se mantienen a la misma altura y llegan hasta un 30 % del nivel de reflexión, picos relevantes donde señala que ese porcentaje de la energía del haz enviado fue reflejado por el defecto y el otro 70 % restante no, esto indica que a una distancia de 1 mm de profundidad se ha detectado un defecto consistente en una grieta, caracterizado también por el ensayo de líquidos penetrantes, luego el haz angular al ser desplazado por la superficie de la soldadura y llegar al punto (b) muestra en la pantalla otro pico (cuadro verde) que revela otra discontinuidad (grieta).

En la pantalla y entre (a) y (b) que se caracteriza por ser la zona de la unión soldada, no se muestran picos, ni se revela a través del ensayo por líquidos penetrantes otra anomalía, lo que significa que existe fusión entre las dos barras de aluminio del tipo AA 5754.

Las imperfecciones detectadas se encuentran en el material desplazado por la fricción y la fuerza que se ejerce para lograr la fusión es denominada pepita y es el defecto tipo M, característico en el proceso de soldadura rotacional.

Los siguientes picos que se encuentran debajo del 20 % son reflexiones que no están perpendicularmente a la superficie, es decir, los haces no llegan directamente a un ángulo de 90° al área que se analiza y por ende los picos generados llegan con poca amplitud.

Se realizaron los ensayos de ultrasonido y de líquidos penetrantes a la muestra dos. En la figura 3.7 se muestran los resultados.

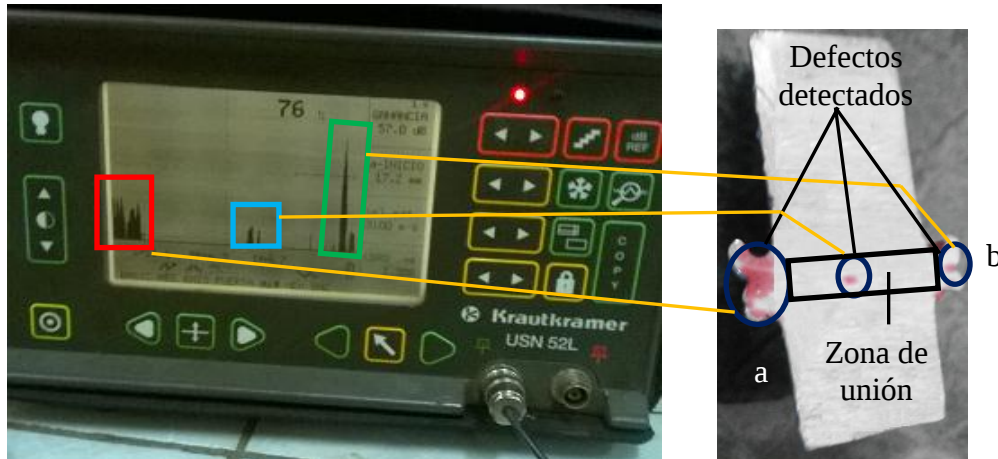


Figura 3.7. Resultados de los ensayos para la muestra 2.

En el C-Scan se observan defectos detectados sobre la superficie de la pieza al desplazar el palpador sobre ella, desde el punto (a) hasta el punto (b), en la pantalla del equipo de ultrasonido se visualiza la siguiente lectura, existencia de picos relevantes de gran amplitud (cuadro rojo) que denotan la existencia de grietas, seguido de un pico más pequeño, que refleja a una distancia de 4,7 mm (cuadro azul) la presencia de una posible imperfección, lo que demuestra que la respuesta del defecto detectado llegó al Scan con poca amplitud, por último un pico más elevado (cuadro verde) que destaca la presencia de otra grieta.

En los picos de los extremos (cuadro rojo y verde), los primeros no sobrepasan el nivel de reflexión, el segundo llega hasta esta línea. Los defectos detectados en el ensayo de ultrasonido son consistentes con los del ensayo de líquidos penetrantes. Al ser el defecto central una respuesta emitida por el Scan con poca amplitud, pero estar señalado con el líquido penetrante como una imperfección, con tonalidad tenue (0,5 mm de profundidad), presumiblemente esté asociado a una limpieza incorrecta antes de realizar la preparación de la superficie, la desventaja de este método, es que solamente revela discontinuidades existentes en la superficie de la pieza, de acuerdo con Ospina *et al.* (2011).

El fenómeno de atenuación en esta aleación puede darse por efectos de la dispersión del haz debido al tipo de microestructura presente en el mismo. En las aleaciones de aluminio, el óxido de alúmina y los precipitados de Mg_2Al_3 y de Mg_2Si se combinan con otros elementos y trae como consecuencia una dispersión de la onda acústica debido a la

anisotropía del material. Este fenómeno se podría fundamentar en el hecho de la que la dispersión es altamente dependiente entre el tamaño de grano y la longitud de onda del haz ultrasónico, elementos expuestos por Thornton *et al.* (2012) y Martín (2014).

Se realizó el análisis para la muestra 3. La figura 3.8 muestra los resultados obtenidos del ensayo de ultrasonido y de líquidos penetrantes.

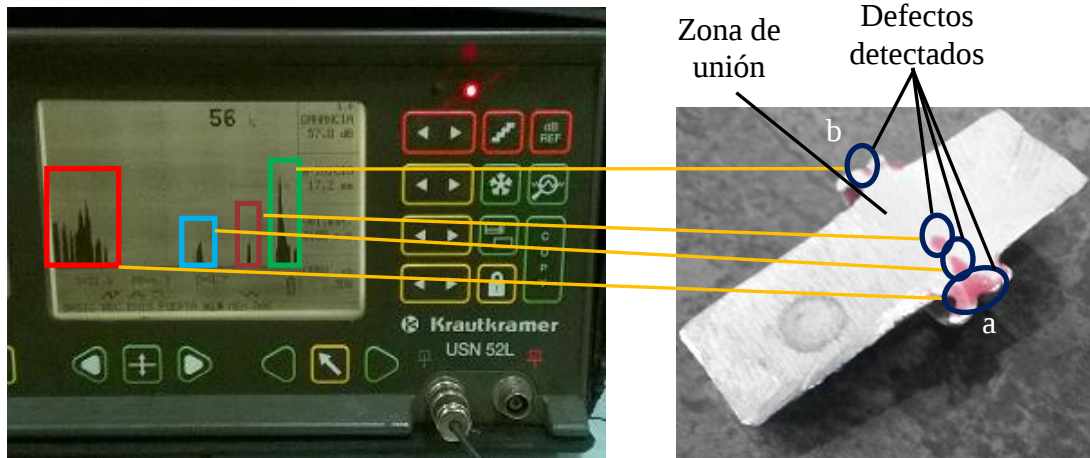


Figura 3.8. Resultados de los ensayos para la muestra 3.

El ultrasonido muestra los defectos detectados por el ensayo de líquidos penetrantes (cambio de tonalidad), consistente en grietas, (círculos azules en la figura de la derecha), encontrándose la segunda grieta (cuadro azul) a 3,5 mm de longitud del punto (a), profundidad de 1 mm, el otro defecto se encuentra a una longitud de 4,7 mm del punto (a) con una profundidad de 0,5 mm desde donde se ubicó el palpador, lo que indica que está en la superficie.

Los defectos presentes y se visualizan en los extremos de la pantalla (cuadro rojo y verde) son por efecto del material desplazado, sin embargo hay que precisar que en esta muestra se destaca la presencia de una imperfección que daña la unión soldada, la misma es consistente en falta de fusión entre las dos barras de aluminio, ese defecto está en el centro del conjunto soldado, ya que el análisis se realizó seccionando la barra por el centro de forma transversal.

Para una velocidad del material de 5 100 m/s, para el aluminio, el ultrasonido reportó que durante el ensayo, la velocidad del material se comportó a 3 100 m/s, presumiblemente esta distorsión se deba a los cambios metalúrgicos ocurridos en la unión soldada.

Dentro de los defectos encontrados en las uniones soldadas, las grietas (figura 3.9) son las más perjudiciales, ya que las mismas pueden ocurrir durante la soldadura (en caliente) o en frío (horas o días de haber realizado la unión).

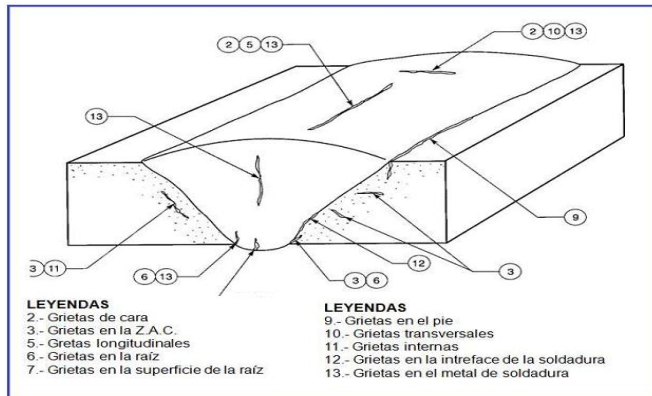


Figura 3.7. Tipos de grietas en las uniones soldadas.

Según se observa en la figura 3.7, el fenómeno del agrietamiento incluye en la unión soldada diferentes zonas como: el material base (MB), la zona afectada térmicamente y la zona termomecánicamente afectada, en cualquier lugar de estas zonas que se origine, puede invalidar el conjunto soldado. Independientemente de haber realizado un C-Scan, en la metalurgia de la soldadura, ninguna grieta es pequeña, según criterio de Asta *et al.* (2007).

3.6. Valoración económica

En la evaluación de los distintos materiales aplicables en un proyecto, se debe tener en cuenta no solo el costo de adquisición, sino también el de mantenimiento, reparación eventualmente, el de recambio. El aluminio y el equipamiento que lo utilizan implica una mayor inversión inicial, sin embargo cuando se analiza el costo considerando todo el ciclo de vida útil del mismo, el aluminio resulta extremadamente económico. La tabla 3.3 muestra los recoge la valoración económica del proceso.

Tabla 3.3. Costo de fabricación de la soldadura

No	Operación	Equipo	Tiempo en horas	Tarifa horaria CUP	Importe CUP
1	Torneado	C 11 MT	1,5	2,70	4,05
2	Corte	Segueta	0,25	2,70	0,675
3	Encapsulado	Resina epoxi	0,50	2,70	1,35
4	Pulido	Lijas	1	1,67	1,67
5	Observación	Microscopio	1	1,67	1,67
Sub total					9,41

Los costos operacionales u operativos serán la repercusión que tenga la inversión sobre los costos totales de la empresa, es decir, incremento de materias primas, de gastos de mano de obra o de gastos generales. Estos costos figuran en la cuenta de resultados del período y tienen un tratamiento financiero diferente al costo de adquisición de la inversión. En la tabla 3.4 se muestran los costos de mano de obra directa.

Tabla 3.4. Costos totales de la mano de obra directa

Mano de obra directa	CUP
Salario mano obra	9,41
Vacaciones (9,09 %)	0,85
Salario complementario	10,26
Aporte a la seguridad social 12 %	1,23
Impuesto sobre la fuerza 5 %	0,51
Sub total	12,00

Los costos estimados en la tabla 3.4 se relacionan con los costos directos, que incluyen la cantidad pagada por diseños, materiales, equipos, salarios directos, es preciso identificar todas las alternativas técnicas posibles, en función de las circunstancias materiales y de las tecnologías disponibles.

Para obtener un costo total de una soldadura en particular se deben incluir otros renglones. Estos materiales van a incrementar los costos de soldadura y serán considerados dentro del costo total de soldadura y se consideran como costos adicionales. La tabla 3.5 muestra el costo por concepto de materiales directos.

Tabla 3.5. Costos de los materiales directos, en CUP

No	Materiales	Cantidad	Precio material	Importe material
1	Barra aluminio 12 mm	0,01	0,05	0,05
2	Lija de 180	0,50	0,44	0,22
3	Lija de 400	0,50	0,457	0,23
4	Lija de 600	0,50	0,27	0,13
5	Segueta	1	0,73	0,73
Sub total				1,36

Para determinar el costo de la energía eléctrica se tuvo en cuenta la tarifa de pago del MINEM a la UNE, tarifa A1, que es el pago en CUC, con una demanda contratada de 1 500 kW, en los diferentes horarios (pico, normal y madrugada). La tarifa de pago de 0,04 CUC

es la tarifa eléctrica establecida en horario normal. En la tabla 3.6 se muestran los costos por consumo de energía eléctrica.

Tabla 3.6. Costos del consumo de la energía eléctrica

Nro	Equipo	Horas consumo eléctrico	Precio kW.h (CUP)	Importe kW.h (CUP)
1	Torno	0,09	1,32	0,12
2	Microscopio	1	0,65	0,66
Sub total				0,78

El costo total de la fabricación de la soldadura se muestra en la tabla 3.8, ello incluye todos los costos que intervienen en el proceso.

Tabla 3.7. Costos totales del proceso de soldadura

Costos totales	CUP
Mano de obra directa	12,00
Materiales directos	1,32
Energía eléctrica	0,78
Sub total	13,65

El costo total del proceso es de 13,65 CUP, sin considerar los ensayos de ultrasonido y el de líquidos penetrantes.

En relación con las técnicas de inspección a utilizar, los métodos no convencionales de evaluación de defectos por ultrasonido son estudiados día a día, proponiéndose mejoras en su aplicación así como la reducción de costos. Aunque la prevención de las roturas puede depender de la selección de los materiales, no deben perderse de vista los factores del tipo económico. En la selección de los materiales más adecuados, deberá tomarse en consideración el material que represente mayor economía y que satisfaga los requisitos de las condiciones de servicio y las especificaciones de los códigos y reglamentos. Los costos asociados a los ensayos no destructivos se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Cálculo de los costos por ensayos no destructivos, en CUP

Descripción	Cantidad	Precio	Costo total
Equipo KrautKramer	1	50,00	50,00
Cámara fotográfica	1	10,00	10,00
Lentes	2	6,00	12,00
Iluminadores backlight	2	15,00	30,00
PC + monitor	1	25,00	25,00
Cableado	2	1,20	2,40
Fotocélula	1	3,50	3,50
Alcohol	1 l	0,10	0,10
Instalación y montaje		50,00	50,00
Sub total (1)			183,00
Limpiador	0,30 g	6,50	1,95
Penetrante	0,30 g	6,50	1,95
Revelador	0,75 g	9,00	6,75
Sub total (2)			10,65
Costo total (1+2)			193,65
Costo sobre el impuesto (12 %)			6,1
Costo total			199,75

Para un costo de 13,65 CUP empleado en el proceso de soldadura por fricción rotativa y un costo de 199,75 CUP en los ensayos no destructivos, se incurre en un costo total de 213,40 CUP para realizar la unión de la aleación AA 5754 por fricción rotativa.

3.7. Valoración del impacto medio ambiental

La base de la existencia de cualquier organización es el producto o servicio que ofrece a la sociedad. Las compañías que cumplen las necesidades de los clientes con productos o servicios atractivos, útiles y de alta calidad encuentran clientes, aquellos que no lo hacen no sobreviven. Así una decisión crítica para los ingenieros es la selección, definición y diseño de los productos. El objetivo de una decisión de producto es la de cumplir las demandas del mercado con una ventaja competitiva.

Actualmente son cada vez más los productos que se diseñan teniendo en cuenta los aspectos medioambientales a lo largo de su ciclo de vida completo. La protección medioambiental integrada se lleva a la práctica como idea global, desde el producto ecológico, pasando por el proceso de producción que protege el medio ambiente, hasta llegar a la reutilización y la eliminación de residuos ecológicos. Todas las áreas quedan incluidas, desde la investigación y el desarrollo, hasta la distribución.

El impacto medioambiental que un producto pueda tener en el medio, está determinado en gran medida por su etapa de diseño. El objetivo actual de las empresas en el mundo, es crear productos que sean medioambientalmente adecuados a lo largo de su ciclo de vida, para lo cual se invierten muchos recursos en mejorar el diseño de los productos, con el objetivo de minimizar la huella que los productos generan en el medio ambiente.

3.8 Peligros ambientales relacionados con el ultrasonido

Existen criterios de salud que establecen las dosis máximas acumuladas, las cuales se incrementan con la edad. En general, antes de los 18 años, la exposición a la radiación debe ser nula. Después de esa edad, es posible acumular 5 rem por año (0,05 Sv, por año), pero sin exceder la dosis de 12 rem en un año. El principal objetivo de la protección radiológica es mantener al mínimo las dosis de radiación que reciben los operadores, lo cual se logra limitando la intensidad de la radiación y los tiempos de exposición. Como la intensidad de la radiación decrece inversamente proporcional a la distancia de la fuente, es importante definir un área de exclusión o de acceso restringido donde se encuentran las fuentes de radiación.

El monitoreo de la radiación en las instalaciones y del personal que ahí labore es un requisito fundamental en los programas de seguridad radiológica. El riesgo de fugas radiactivas en una instalación requiere evaluaciones periódicas para monitorear cada fuente radiactiva en condiciones de máxima intensidad. Adicionalmente, todo el personal asignado a las áreas restringidas está obligado a portar placas de medición, o dosímetros para registrar las dosis recibidas diariamente. De igual manera, deben existir registros históricos de las dosis acumuladas de todos y cada uno de este personal.

3.8.1. Peligros ambientales relacionados con los líquidos penetrantes

Cuando se utilizan técnicas por líquidos penetrantes, existen varios aspectos de seguridad que hay que tomar en cuenta para garantizar la integridad de los inspectores. En primer lugar, es importante que el área de trabajo tenga una ventilación adecuada para evitar riesgo de intoxicación o incendio, especialmente cuando se emplean solventes. Por lo general, los líquidos y sustancias que se aplican son irritantes a la piel, por lo que se deben utilizar guantes y gafas.



Cuando se aplican polvos reveladores, el uso de máscaras es indispensable para evitar sean inhalados por el inspector y se exponga a daños en las vías respiratorias. En los métodos tipo I, el manejo de la luz ultravioleta debe hacerse con cuidado a fin de evitar sobrexposición de la piel, o de los ojos. Finalmente, otro aspecto fundamental es cuidar la compatibilidad química de las sustancias con el material que se va a inspeccionar y las sustancias que éste puede contener.

3.9. Conclusiones del capítulo 3

- Durante la soldadura por fricción de la aleación de aluminio AA 5754 se determinó que en la medida que se incrementa la velocidad de soldadura existe menor calor de aporte y un ciclo térmico menos prolongado, pero disminución en el tamaño del grano.
- Se determinó en el análisis microestructural que, independientemente de los parámetros de soldadura empleados en el proceso y por la temperatura de fricción obtenida, existe la presencia de precipitados como el Mg_2Si que incrementa la dureza, al pasar de una zona a otra debido a la deformación plástica que se genera en el material por el flujo plástico y por las variaciones metalúrgicas.
- Se pudo determinar a través de los ensayos no destructivos (END) como el ultrasónico y el de líquidos penetrantes que es posible lograr una unión metalúrgica en la aleación AA 5754 mediante la soldadura rotativa y aunque se detectaron defectos, los mismos son del tipo tecnológico y pueden ser controlados.

CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ Al someter a proceso de soldadura por fricción radial a la aleación de aluminio AA 5754 con una frecuencia de rotación de 1 200 y 1 400 rev/min y presión de 0,9 y 1,9 Mpa se logró la unión metalúrgica en barras de 12 milímetros de diámetro.
- ❖ Las microestructuras obtenidas presentan estructuras consistentes en precipitados de Mg_2Si y de Mg_2Al_3 y dendritas, producto de las variaciones en la temperatura de fusión que van desde 318 hasta 350 °C y la de forja desde 224 hasta 327 °C según el número de revoluciones y las presiones aplicadas en ésta zona.
- ❖ Según los ensayos no destructivos realizados, el de ultrasonido y el de líquidos penetrantes, se pudo determinar que aunque se logra continuidad metalúrgica en la unión en dos muestras analizadas de la aleación de aluminio AA 5754, también se evidenció en una de ellas, la presencia de una grieta a una longitud de 3,5 mm del borde superior y de 1 milímetro de profundidad, defecto que invalida la unión.
- ❖ Al realizar la valoración económica donde se consideró: costo de fabricación de la soldadura, costos del consumo de la energía eléctrica, costos de los materiales directos, costos totales de la mano de obra directa en el proceso de soldadura se tiene una inversión de 13,65 CUP y los ensayos no destructivos un importe de 199,75 CUP y se incurre en un costo total de 213,40 CUP.

Recomendaciones

- ❖ Realizar una limpieza en las extremos de las piezas a unir, según las exigencias del proceso, para eliminar todo vestigio de grasas y suciedades que puedan quedar atrapadas en la superficies y de esta forma no se logre una fusión en el proceso y fundamentalmente en aleaciones de aluminio, donde el óxido de alúmina (Al_2O_3) presenta una temperatura de fusión de 2 037 °C.
- ❖ Determinar a través de otros tipos de ensayos mecánicos como: flexión, tracción y torsión, las condiciones de soldabilidad de la aleación AA 5754, luego de ser unida mediante el proceso de soldadura por fricción radial.
- ❖ Considerar en futura investigación y bajo las condiciones de este trabajo, la influencia de los cambios metalúrgicos en la velocidad del sonido del material, donde para el aluminio es de 5 100 m/s y en los ensayos de ultrasonido, este parámetro se comportó a 3 100 m/s en cada uno de los análisis.

Referencias bibliográficas



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alcántara-Borges, D.; Fernández-Columbié, T.; Rodríguez-González, I. Fricción y desgaste en elementos circulares empleados en pasadores. Ingeniería Mecánica. Vol. 12. No.2, mayo-agosto de 2009, pág. 49-58.
2. Alves do Carmo, D.; Rocha de Faria. 2D finite element with through the thickness parabolic temperature distribution for heat transfer simulations including welding, » Finite elements in analysis and desing, 2015.
3. Ananthapadmanaban, D. A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints [J]. Materials and Design, 2009, 30: 2642–2646.
4. Andersson, R. Deformation Characteristics of Stainless Steels, 2005.
5. AWS. The metallurgy, welding and qualification of microalloyed (HSLA) steel weldments, AWS international conference, Houston, Texas, Nov 6 – 8, 1990.
6. Badeshia, H.; Honeycombe, R. Steels, Third edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK. 2006.
7. Briones, R.; Ruíz, A. Rubio, C.; Carreon, H. Caracterización microestructural y mecánica de una soldadura disímil de aceros inoxidables 316L/AL–6XN. *Rev. LatinAm. Metal. Mat.* 2014; 34 (2): 306-315.
8. Burgos, A. Soldadura Por Friccion Agitación (FSW) De Aluminio". [Online] II CAIM Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. 2010, <http://www.ingenieria.unlz.edu.ar/proyecto/archivos-cms/papers/34.pdf>.
9. Cabibbo, M.; McQueen, H.; Evangelista, E.; Spigarelli, S.; Di Paola M.; Falchero A. Microstructure and mechanical property studies of AA6056 friction stir welded plate. Materials Science and Engineering A.; 460 - 461 86 - 94, 2007.
10. Cabot, P. Soldadura por friccion agitacion (FSW) De AA 6061 T6. Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. Libertador 8250, Buenos Aires-Argentina. *Matéria*. 8 (2): 187 - 195, 2003. Disponible en la World Wide Web en <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10147>.
11. Capdevila, C. Modeling of Diffusional Phase Transformation during the Isothermal Decomposition of Austenite in A Carbon Manganese (0.37C-1.5Mn) Microalloyed with Vanadium and Titanium, 2008.



12. Celik, A., Alsaran A. Mechanical and structural properties of similar and dissimilar steel joints, *Materials Characterization*, V. 43, p. 311-318. 1999.
13. Chen, C.; Kovacevic, R. Finite element modeling of friction stir welding – thermal and thermomechanical analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 1319-1326 (2003).
14. Cordero, G.; Rodríguez, R. Determinación del tiempo en la etapa de calentamiento para obtener la unión de un aluminio AA 6063 soldado por fricción. *Revista Digital de Investigación y Postgrado de la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre"*, Vicerrectorado Barquisimeto. Venezuela. Vol. 2 No. 5. Octubre 2012. Pp. 347-362.
15. Coy, A. Evaluación de la modificación de Elementos (Mo, Mn, Ti) En El Comportamiento Frente a la Corrosión de Aceros Inoxidables Austeníticos. 2006.
16. DebRoy, T.; Bhadeshia, H. Friction stir welding of dissimilar alloys – a perspective," *Science and Technology of Welding & Joining*, vol. 15, no. 4, pp. 266–270, May 2010.
17. Dobrovodov, A. Selection of optimum conditions for the friction welding of high speed steel 45 [J]. *Weld Prod*, 1975, 22(3): 22–26.
18. Doyle, L. *Procesos y Materiales de Manufactura para Ingenieros*, Tercera edición, 1042 páginas, Prentice Hall, México, 1988.
19. Duffin, F.; Crossland, B. Friction welding with sudden release of the fixed component, *Advances in welding processes, Solid phase joining processes, proceeding of the conference*, The welding Institute, Abington Hall, Cambridge, (1971), 25-33.
20. Elmer, J.; Palmer, T.; Spercht, E. Direct Observations of Sigma Phase Formation in Duplex Stainless Steels Using In-Situ Synchrotron X-Ray Diffraction, *Metallurgical and Materials Transactions*, V.38A, N.3, p.464-475, 2007.
21. Falla, R.; Quintana, K.; Franco, F.; de Sánchez, N. Propiedades mecánicas de soldadura por fricción agitación de punto en aleación de aluminio AA6063 - T5. *Prospect*. 10 (1): 79 - 84, 2012.
22. Fernández-Columbié, T.; Rodríguez González, I.; Correa Suárez, R.; Alcántara Borges, D. Junta de soldadura disímil de la aleación HK – 40 y del hierro fundido 24. *Ingeniería Mecánica*. Vol. 17. No. 2, 2014, p. 98-107.



23. Fuji, A.; Kimura, M.; North, T.; Ameyama, K.; Aki, M. Mechanical Properties of Titanium 5083 Aluminum Alloy Friction joints", Material. Science. Technology. Vol. 13, pp. 673-678. 1997.
24. García-Castillo, F.; García-Vázquez, F.; Reyes-Valdés, F.; Zambrano-Robledo, P.; Hernández-Muñoz, Rodríguez-Ramos, G. Evolución Microestructural en Uniones de la Aleación Ti-6Al-4V Mediante el Proceso de Soldadura de Punto por Fricción-agitación. Soldagem & Inspeção. 21(2):185-196, 2016
25. Gretoft, B.; Karlsson L. Laboratorio Metalográfico del Grupo ESAB), Fisuración en Caliente durante la Soldadura de Aceros Inoxidables Austeníticos. Soldadura y Tecnologías de Unión, No. 6, 1990, pp 68-73.
26. Guliaev, A. Metalografía. Moscú. Editorial Mir, 1983. t. 1.
27. Hakan, A, Mehmet, T, Adem, K. Effect of friction pressure on the properties of friction welded MA956 iron based super alloy [J]. Materials and Design, 2007, 28: 948–953.
28. Hart, P.; Twi, M. Hydrogen cracking-its causes, costs and future occurrence. London 2000.
29. Higgins, R. Engineering metallurgy part I, 6th edition, Hodder Headline Group, London, UK. 1993.
30. Higgins, R. Engineering metallurgy part I, 6th edition, Hodder Headline Group, London, UK. 1993.
31. Hull, F. The effect of ferrite on the hot cracking of stainless steel. Welding Journal, 1967, 46, 399s–409s.
32. Jessop, T.; Dinsdale, W. Mechanical Testing of Dissimilar Metal friction Welds", Welding Res. Int., Vol. 6, pp. 1-22. 1976.
33. Joseph, A.; Sanjai, K.; Jayakumar, T.; Murugan, N. International journal of pressure vessel and piping, V.82, p.700-705, 2005.
34. Kawai, G.; Ogawa, K.; Tokisue, H. Friction Welding of 6061 Aluminum Alloy Pipe to S25C Carbon Steel Pip. 1997. Documento en línea disponible en: <http://www.isopec.org/publications/journals/ijope-8-2/abst-8-2-p144-JC-208Kawai.pdf>
35. Kiran Kumar, G.; Kishore, K.; GopalKrishna, P. Investigating the Capabilities of Medium Duty Lathe for Friction Welding. Department of Mechanical

- Engineering, Vasavi College of Engineering., Hyderabad, India, Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS) 1 (1): 36-39 © Scholarlink Research Institute Journals, 2010
36. Klueh, R.; King, J.; Griffith, J. A simple test for dissimilar-metal welds, *Welding Journal*, V.62, N.6, p.154s-159s, 1983.
 37. Kocks, U.; Eng, J. *Mater. Technol.*, Vol. 98, 1976, 76-85.
 38. Kou, S. *Welding metallurgy*, Second edition, 2003.
 39. Kurt, B. *Journal of Materials Processing Technology* 190 2007 138–141.
 40. Kuziak, R.; Bold, T.; Yi-Wen Cheng. Microstructure control of ferrite-pearlite high strength low alloy steels utilizing microalloying additions, *Journal of Materials Processing Technology*, V. 53, p. 255-262, 1995.
 41. Lajtín, Y.; Arzamásov, B. *Tratamiento termoquímicos de los metales*, Editorial MIR, Moscú. 1985.
 42. Laufgang, S. *Aceros inoxidable, termo soldex S.A tratamiento térmico de soldadura – prueba hidráulica de gasoductos*. 2003.
 43. Lippold, J.; Kotecki, D. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*, 1st edition. Jhon Wiley & Sons, New Jersey, USA. 2005.
 44. Lippold, J.; Kotecki, D. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. 1ra ed: John Wiley & Sons, Inc. 2005; p. 20, 21, 147, 154, 165.
 45. Llewellyn, D.; Hudd, R. *Steels: Metallurgy and Applications*, 3rd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford. 1998
 46. Lombard, H.; Hattingh, D.; Steuwer, A.; James, M. Effect of process parameters on the residual stresses in AA5083-H321 friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 501, no. 1–2, pp. 119–124, Feb. 2009.
 47. Longhurst, A. Torque control of friction stir welding for manufacturing and automation. *Int J Adv Manuf Technol*, 905 - 913. 2010.
 48. López, M.; Zerguera, M.; Martínez, A. Cantu, V. *Metodología de diseño de fuentes de soldadura por arco eléctrico.*, 2000.
 49. Lozano, J.; Moreda, P.; Llorente, C.; Bilmes, P. Características de Fusión de Soldaduras GMAW de Aceros Inoxidables Austeníticos. *Jornadas SAM 2000 – IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*, agosto de 2000, 171 – 178.



50. Lundin, D. Dissimilar metal welds transition joints literature review, *Welding Journal*, V.61, N.2, p. 58s-63s, 1982.
51. Maalekian, G. Friction welding - critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 12, (2007), 738 –759.
52. Madhusudan, G.; Srinivasa, R. Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless steel electron beam and friction welds, *International Journal of advance manufacturing technology*, V.45, p. 875-888, 2009.
53. Méndez, M. Efecto de la velocidad de rotación en la cantidad de la unión de la soldadura por fricción en una aleación de Aluminio AA 6063. Trabajo de grado para Ingeniería Metalúrgica. Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre". 2011. Barquisimeto, Venezuela.
54. Mishra, R.; De, P.; Kumar, N. Friction stir processing. In *Friction Stir Welding and Processing* (pp. 259-296). Springer International Publishing. 2014.
55. Mishra, R.; Mahoney M. *Friction stir welding and processing*, ASM International, 2007.
56. Moreno, S. Soldadura por fricción. Universidad EAFIT. Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica. Medellín. 2008. 68p.
57. Mumim, S. Evaluation of the joint interface properties of austenitic stainless steel joined by friction welding [J]. *Materials and Design*, 2007, 28: 2244–2250.
58. Murti, K.; Sunderesan, S. Structure and properties of friction welds between high-speed steel and medium carbon steel for bimetal tools [J]. *Mater Sci Technol*, 1986, 2: 865–870.
59. Nelson, D.; Baeslack, W.; Lippold, J. Characterization of the weld structure in a duplex stainless steel using color metallography, *Metallography*, V.18, p. 215-225, 1985.
60. Nicholas, E. Friction Processing Technologies. *Welding in the World*, Vol. 47, No. 11-12, (2003), 2-9.
61. O' Brien, R. Manual de Soldadura. Tomo III. American Welding Society/. 8ª Edición. 1996, Naucalpan de Juárez: México.
62. Oystein, G. *Metallurgical Modelling of Welding*, 2nd edition, London: The Institute of Materials, UK. 1994.



63. Ozdemir, N. Investigation of mechanical properties of friction welded joints between AISI 304 L and AISI 4340 steel as a function of rotational speed [J]. Materials Letters, 2005, 59: 2504–2509.
64. Peel, M.; Steuwer, A.; Preuss, M.; Withers, P. Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds," Acta Materialia, vol. 51, no. 16, pp. 4791–4801, Sep. 2003.
65. Peel, M.; Steuwer, A.; Withers, P. Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082. Part I: process parameter effects on thermal history and weld properties," Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 37, no. JULY, pp. 2183–2193, 2006.
66. Puchi-Cabrera, E. Mater. Sci. Technol., Vol. 17, 2001, 155-161.
67. Quintana, K. Evaluación de la soldadura por fricción - agitación de punto de la aleación de aluminio AA 6063 - T5. El hombre y la máquina No. 39. Mayo - Agosto de 2012. Disponible en la World Wide Web en: [http://ingenieria.uao.edu.co/hombreymaquina/revistas/39%252020122/Evaluacion soldadura.pdf](http://ingenieria.uao.edu.co/hombreymaquina/revistas/39%252020122/Evaluacion%20soldadura.pdf).
68. Rabensteiner, G. Influencia del contenido de Cr y Ni en los Aceros Inoxidables Austeníticos. Periodical "Technia", No. 15/16-88, 1995.
69. Rai, R, De A, Bhadeshia, H.; DebRoy, T. Review: friction stir welding tools. Science and Technology of Welding Joing. 2011; 16 (4): 325-342.
70. Reddy, G.; Rao, K.; Sekhar, T. Microstructure and pitting corrosion of similar and dissimilar stainless steel welds, Science and technology of welding and joining, V.13, N.4, p.363-377, 2008.
71. Ren, S.; Ma, Z.; Chen, L. Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al–Mg–Si alloy. Scripta Materialia 56: 69 - 72, 2007.
72. Rodríguez, E.; Amorero, L.; Fraudita, F.; Bueno, A.; Suárez, K. Análisis espectral en el estudio de las señales ultrasónicas de un acero AISI 4340", Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V, Vol. 19, N° 2 pp.89-98. 2004.
73. Sah, J.; Richardson, G.; Sellars, C.; Aust, J. Inst. Metals, Vol. 14, 1969, 292-297.



74. Samal, M.; Balani, K., Seidenfuss, M.; Ross, E. An experimental and numerical investigation of fracture resistance behaviour of a dissimilar metal welded joint, *Journal of Mechanical Engineering Science*, V.223, p. 1502-1523, 2009.
75. Sathiya, P.; Aravindan, S.; Noorul Hag, A. Mechanical and metallurgical properties of friction welded AISI 304 austenitic stainless steel [J]. *Int J Adv Manufact Technol*, 2005, 26: 505–511.
76. Sawhill, J. Welding HSLA line pipe steels, *Metallovedenie*, N.7, p. 56-60, 1977.
77. Schneider, J.; Núñez, A. Jr. Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld, *Metall. Mater. Trans. B*. 35 (14): 777 - 783, 2004.
78. Séferian, D.: *Metalurgia de la soldadura*, Madrid: TECNOS, S.A., 1957
79. Seshagirirao, B.; Sivaramakrishna, V.; Saikrishnaprasad, G. Experimental investigation of rotary friction welding parameters of aluminum (H-30) and mild steel (AISI-1040). *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 4 (5): 2920 - 2925, 2015.
80. Shafer, J. Soldadura por fricción (Friction Stir Welding). 2014. 24 p. Disponible en la World Wide Web en http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/19.pdf
81. Shankar, V.; Gill, T. Solidification cracking in austenitic stainless steel”, *Sadhana*, Vol 28, June/ August 2003, pp 359-382. www.ias.ac.in/sadhana/Pdf2003JunAug/Pe1119.pdf.
82. Singh-Sidhu, M.; Singh-Chatha, S. Friction Stir Welding – Process and its Variables: A Review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, V. 2, 12, p.275, 2012.
83. Sun, Z.; Karppi, R. *Journal of Materials Processing Technology*, 59, 1996 257 - 267.
84. Sunghak Lee, Byung Chun Kim, Gongil Kwon Correlation of microstructure and fracture properties in weld heat affected zones of thermomechanically controlled processed steels, *Metallurgical Transactions A*, V.23A, N.12, p. 2803-2816. (1992).
85. Tither, G.; Lauprecht, W. Pearlite-reduced HSLA steels for line pipe, *Metallovedenie*, No. 7, p. 37-40, 1977.
86. Tufaro, L.; Svoboda, H. Efecto del procedimiento de soldadura por fricción-agitación sobre las propiedades mecánicas en uniones de aleación de aluminio termoenviejable. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de

- Investigación y Desarrollo en Mecánica, San Martín, Buenos Aires, Argentina. 2014. Disponible en la World Wide Web en: <http://www.inti.gob.ar/tecnointi/CD/info/pdf/530.pdf>.
87. Uzkut, M.; Ünlü, B.; Yilmaz, S.; Akdağ, M. "Friction Welding and Its Applications in Today's World", In: 2nd International Symposium on Sustainable Development, June 8-9 (2010), Sarajevo.
88. Velandia, J. Determinación del efecto de la fuerza axial en la resistencia mecánica de soldaduras por fricción agitación (SFA); Tesis de Grado; Universidad del Valle; 2009.
89. Venugopal, S.; Mannan, L.; Prasad, Y. Metall. Mater. Trans., Vol. 27A, 1996, 119-12.
90. Vucetich, D. Soldadura por fricción y agitación de placas de aluminio 5086. Laboratorio de Investigaciones de Metalurgias Físicas (LIMF), Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Segundas Jornadas de Investigación y Transferencia. 2013. Disponible en la World Wide Web en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/38232>.
91. Węglowski, A. Friction stir processing - analysis of the process. Archives of metallurgy and materials. 56 (12): 779 - 788, 2011.
92. Woo, W.; Feng, Z.; Wang, X.; David, S. "Neutron diffraction measurements of residual stresses in friction stir welding: a review," Science and Technology of Welding and Joining, vol. 16, no. 1, pp. 23-32, Jan. 2011.
93. Yoon, H.; Kong, Y.; Kim, S.; Kohyama, A. Mechanical properties of friction welds of RAFs (JLF-1) to SUS 304 steels as measured by the acoustic emission technique [J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81: 945-950.
94. Zhang, W., Elmer, J.; DebRoy T. Integrated modelling of thermal cycles, austenite formation, grain growth and decomposition in the heat affected zone of carbon steel, Science and Technology of Welding and Joining, V.10, N.5, p.574-582. 2005.
95. Zimmer, S.; Langlois, L.; Laye, J.; Bigot, R. Experimental investigation of the influence of the FSW plunge processing parameters on the maximum generated force and torque. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010;47(1-4):201-215. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-009-2188-3>.