

**Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Departamento de Mecánica**

**OBTENCIÓN DE UNA UNIÓN BIMETÁLICA ALUMINIO - COBRE
MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA DE TORQUE:
PROPIEDADES FÍSICA - METALÚRGICAS**

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Autor: René Legrá Rodríguez

Tutor: Prof. Tit. Tomás Fernández Columbié, Dr. C.

Moa /2018



Declaración de autoridad:

Yo: René Legrá Rodríguez

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.

René Legrá Rodríguez

Dr. C. Tomás Fernández Columbié



Agradecimientos

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el transcurso de mi carrera.

A mi tutor Dr. C. Tomás Hernaldo Fernández Columbié por su precioso tiempo, conocimiento y dedicación sin la cual no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

A mis familiares: Adys García Legrá y Eblis Reyes Palacios, por su constante preocupación y por haberme apoyado en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mis compañeros Arley Labañino, Yoel Ochoa y Esterlin Lamorú, por su ayuda desinteresada y por la ayuda mostrada en la realización de este trabajo.

A mis compañeros de aula, por el empuje y la constancia mostrada durante todo este período de estudio.

A la Revolución y especialmente a Fidel por darme la oportunidad de superarme.

A todos

Muchas Gracias.



Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis padres: Martha Rodríguez Correa y Ángel Legrá Leyva, por haber sido los principales promotores de mi superación.

A mi hermano: Ángel Legrá Rodríguez, por guiarme con su ejemplo y haber sido inspiración para mi futura formación profesional.

A Tomás por su incondicional apoyo y a su familia por soportarnos.

A mis amigos que siempre se preocuparon por mis estudios.

A nuestra revolución, por las posibilidades que nos ofrece.



TABLA DE CONTENIDOS

	Pág
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	
1.1 Introducción	5
1.2. Fenómeno de la corrosión atmosférica en los metales	5
1.2.1. Corrosión galvánica del aluminio y del cobre	7
1.3. Principios de la soldadura por fricción radial	9
1.3.1. Clasificación de la soldadura por fricción radial	14
1.4. Proceso de soldadura disímil por fricción radial	15
1.5. Efecto de velocidad del husillo en la calidad de la soldadura	17
1.5.1. Parámetros de la soldadura por fricción rotativa	19
1.6. Mecanismo de formación de la junta soldada en la fase sólida	20
1.6.1. Efecto de los parámetros de proceso en la distribución de esfuerzos residuales	21
1.7. Conclusiones del capítulo 1	23
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción	24
2.2. Etapas a considerar en la soldadura por fricción	24
2.3. Composición química de la aleación de aluminio	25
2.4. Preparación de la unión	26
2.4.1. Parámetros de procesamiento para la unión por fricción	28
2.4.2. Medición de temperatura	29
2.5. Metodología de cálculo para el proceso de soldadura por fricción	30
2.5.1. Cálculo de la fuerza axial necesaria para el calentamiento	30
2.5.2. Cálculo del área de contacto o de soldadura	31
2.5.3. Cálculo de la fuerza de contacto	31
2.5.4. Cálculo de la distribución de la temperatura en la junta soldada	31
2.6. Preparación metalográfica de la probeta	34
2.6.1. Operación de desbaste y pulido	35
2.6.2. Ataque químico de las muestras	35
2.6.3. Elaboración mecánica de las probetas	36
2.6.4. Encapsulado de las muestras resina epoxi ROYAPOX – 5050	36



2.6.5. Propiedades de la resina epoxi ROYAPOX – 5050	36
2.6.6. Microestructura patrón de las aleaciones	37
2.6.7. Ensayo de dureza en las diferentes zonas	38
2.7. Microscopio óptico para el análisis de imágenes	39
2.7.1. Obtención del porcentaje de microconstituyentes	40
2.8. Diseño de experimentos	40
2.8.1. Determinación de los coeficientes de regresión	42
2.8.2. Cálculo de la varianza	42
2.9. Conclusiones del capítulo 2	43

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción	44
3.2. Análisis de los elementos químicos de las aleaciones	44
3.3. Análisis de la metodología de cálculo	45
3.4. Comportamiento microestructural de la ZTMA	49
3.4.1. Comportamiento microestructural de la ZTA	50
3.5. Análisis de los parámetros de soldadura	51
3.6. Análisis de la dureza en las diferentes zonas	52
3.6.1. Procesamiento estadístico de los datos	53
3.6.2. Análisis de varianza	54
3.6.3. Análisis de las fases presentes en la microestructura	55
3.7. Análisis económico	56
3.8. Impacto ambiental	58
3.9. Conclusiones del capítulo 3	60

CONCLUSIONES GENERALES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



RESUMEN

El objetivo del trabajo es la obtención de una unión bimetálica aluminio - cobre mediante proceso de soldadura de torque, así como las propiedades física – metalúrgicas de la misma. Para el desarrollo del trabajo se sometieron a condiciones de fricción tres muestras de las aleaciones de aluminio AA 2024 y de cobre Cu-DHP, donde la unión se realizó en un torno convencional C11 MT. Los parámetros de soldadura fue de número de revoluciones de 2 400 r/min, presiones de 31 y 60 MPa y una temperatura de 1 553,32 J/s; para lograr la unión. Al realizar el análisis microestructural se determinó que en la ZTMA y la ZTA, se obtuvo la presencia de precipitados Mg_2Si y precipitados de Mg_2Al_3 del lado de la aleación de aluminio y la fase β con precipitados de cobre en la aleación de cobre, siendo los dos precipitados del aluminio elevadores de la dureza durante el proceso de fricción, la fase predominante, determinada por el software imagen es la de estructura globular, con un 46,5 %. Desde una dureza inicial de HV 84 ± 5 y de HV $89,75\pm 5$ respectivamente en las muestras patrón, se obtuvo al final del proceso una dureza de HV 157 en la ZTMA. Se realiza la valoración económica, así como la incidencia negativa al medio ambiente de la corrosión y los procesos de maquinado.



ABSTRACT

The objective of the work is the obtaining of union bimetallic aluminium – copper by means of process of torque welding, as well as the properties physics - metallurgical of the same one. For the development of the work they underwent conditions of friction three samples of the alloys of aluminium AA 2024 and of copper Cu-DHP, where the union was carried out in a conventional lathe C11 MT. The welding parameters were of number of revolutions of 2 400 r/min, pressures of 31 and 60 MPa and a temperature of 1 553.32 J/s; to achieve the union. When carrying out the analysis microestructural it was determined that in the ZTMA and the ZTA, was the presence of precipitate Mg_2Si obtained and precipitate of Mg_2Al_3 on the side of the aluminium alloy and the phase β with precipitate of copper in the copper alloy, being both precipitate of the aluminium elevators of the hardness during the process of friction, the predominant phase, determined by the software image is that of globular structure, with 46.5%. From an initial hardness of $HV\ 84\pm5$ and of $HV\ 89.75\pm5$ respectively in the samples pattern, it was obtained at the end of the process a hardness of $HV\ 157$ in the ZTMA. He is carried out the economic valuation, as well as the negative incidence to the environment of the corrosion and the processes of having schemed.

INTRODUCCIÓN

Cuando se introducen nuevas aplicaciones, nuevos requerimientos para las máquinas ya existentes o nuevos materiales, las limitaciones de la experiencia pasada y los trabajos basados en suposiciones, influyen sobre el diseño más a menudo de lo que las empresas suelen admitir. La actual competitividad entre empresas a nivel internacional hace que se demanden procesos de fabricación optimizados y que se contengan los costos. Para ser líderes en su sector, las empresas deben conocer todos los detalles tanto de sus productos como de sus procesos de fabricación de forma más intensa que en el pasado.

Los aspectos tribológicos se encuentran en lo más alto de la lista de huecos en la capacidad de conocimiento de las empresas. Es en este contexto donde se conoce a la tribología como la última frontera en el diseño mecánico. Cuando dos superficies se unen, el contacto entre ellas se da en varios puntos aislados y debido al esfuerzo normal, la presión de contacto es muy alta en esos puntos, en los cuales se producirán deformaciones plásticas en el material más blando, formándose soldaduras y quedando ambas superficies unidas por fuertes uniones. Para romper estas uniones y mantener el movimiento relativo entre los dos sólidos, es necesaria una fuerza cuya medida es la fricción.

Las transformaciones de fases, a través de su influencia en las propiedades mecánicas de los metales pueden dar lugar a un amplio cambio en la fricción. El efecto más drástico, es el debido a la fusión, cuando se acerca un metal a su punto de fusión, su resistencia cae rápidamente y la difusión térmica y el fenómeno de “creep” llega a ser muy importante como resultado hay un incremento en la adhesión y la ductilidad en los puntos de contacto, dando lugar a un pronunciado incremento en la fricción. Cuando una de las superficies en contacto se llega a fundir y por lo tanto pierde su resistencia a cortadura, los valores de fricción caen a valores muy bajos que vienen determinados por fuerzas viscosas en la capa del líquido.

En la soldadura en estado sólido, como la de fricción, corresponde a los procesos en los cuales se busca lograr la unión entre dos superficies en contacto mediante la utilización de presión como variable predominante, como también la aplicación de calor. En el caso de administrar calor para la realización del proceso de unión, la temperatura no deberá alcanzar la fusión de las superficies de trabajo. En los procesos de soldadura, donde se

aplica presión y calor conjuntamente, el tiempo también cumple un rol importante dentro de los parámetros para la realización de la unión soldada y lograr la cohesión deseada entre las superficies en contacto. En este caso, los granos superficiales participantes en el proceso experimentan una fuerza de atracción con los granos de la otra superficie sin la necesidad de fusión ni de material de aporte.

La soldadura por fricción a menudo puede ser la opción más adecuada para unir materiales con la misma composición molecular sin utilizar material de aporte, ya que al unir dos piezas mediante la aplicación de presión se logra la interacción de moléculas de las mismas, entrelazándose entre sí, consiguiendo que la unión tenga casi las mismas propiedades del material original, es por ello que este tipo de soldadura es considerado como un método ideal para la unión de materiales. Para llevar a cabo esta cohesión se debe establecer un contacto íntimo entre las superficies a unir para que las fuerzas de atracción atómica de una superficie atraiga a los átomos de la otra y viceversa.

La **situación problémica** de la investigación la constituye:

Entre los componentes eléctricos se encuentran una gran gama de piezas bimetálicas para la distribución de energía eléctrica y plantas generadoras de baja y media tensión, dentro de estos metales, de uso general, se encuentran el aluminio y el cobre, los cuales son usados por presentar buena conductividad térmica, sin embargo, los mismos tienen diferentes puntos de fusión, 660 °C para el primero y 1 083 °C, para el segundo, hace imposible su soldadura por los métodos convencionales. La Unión Nacional Eléctrica realiza las conexiones del alumbrado público, residencial y en equipos de potencia por medio del trenzado entre ellos, pero pasado un tiempo, por las inclemencias del tiempo, se genera en los mismos un par galvánico, lo cual trae consigo corto circuito, falso contacto entre los conductores y provoca calentamiento en las líneas que generan mayor consumo de energía, afectaciones a la economía y en ocasiones malestar a los habitantes.

El **problema** a investigar lo constituye: los estudios relacionados con la unión metalúrgica entre metales disímiles donde existe una diferencia entre ellos en su punto de fusión de un 60,9 %, para establecer su comportamiento microestructural y su dureza, aún es insuficiente.

Como **objeto de la investigación** se establece: aleación de aluminio AA 2024 y de cobre Cu-DHP sometido a proceso de soldadura por fricción radial o de torque.

El **campo de acción** es el comportamiento microestructural y la microdureza de los metales no ferrosos aluminio y cobre sometida a soldadura por fricción radial.

Sobre la base del problema a resolver se establece la **hipótesis** siguiente: con una velocidad de rotación en una máquina herramienta, ejerciendo presión con tiempo de calentamiento y de forja, se podrá lograr la unión entre la aleación de aluminio AA 2024 y de cobre Cu-DHP y establecer su comportamiento microestructural con condiciones metalúrgicas independientemente de su punto de fusión.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **objetivo** del trabajo: establecer el comportamiento microestructural y la dureza en la zona termomecánicamente afectada (ZTMA) y la zona afectada térmicamente (ZAT) en la unión metalúrgica de la aleación de aluminio AA 2024 y de cobre Cu-DHP obtenida mediante el proceso de soldadura por fricción rotativa o de torque.

Y se definen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Definir las particularidades del proceso de soldadura en estado sólido empleada en la unión de materiales disímiles en correspondencia con la forma de los componentes a unir.
2. Establecer el procedimiento metodológico para determinar las variaciones estructurales de la unión metalúrgica en la zona termomecánicamente afectada (ZTMA) y la zona afectada térmicamente (ZAT) de la aleación de aluminio AA 2024 y de cobre Cu-DHP obtenida mediante el proceso de soldadura por fricción rotativa o de torque.
3. Determinar a partir de los parámetros establecidos como: la velocidad de rotación, la presión, el tiempo de calentamiento y de forja, las variaciones metalúrgicas originadas en la zona termomecánicamente afectada (ZTMA) y la zona afectada térmicamente (ZAT) de la unión metalúrgica de la aleación de aluminio AA 2024 y de cobre Cu-DHP obtenida mediante el proceso de soldadura por fricción rotativa o de torque.



Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto se plantean las tareas de trabajo siguientes:

1. Establecimiento del estado del arte relacionada con el objeto de estudio.
2. Planificación y realización de experimentos.
3. Análisis de los resultados y obtención de las propiedades físico - metalúrgicas en la zona termomecánicamente afectada (ZTMA) y la zona afectada térmicamente (ZAT) de la unión entre la aleación de aluminio AA 2024 y de cobre Cu-DHP, obtenida por proceso de soldadura por fricción radial.
4. Fundamentación de los cambios físico metalúrgicos obtenidos del proceso de soldadura por fricción radial entre la aleación de aluminio AA 2024 y de cobre Cu-DHP
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales derivados de los procesos de soldadura por fricción.

Capítulo 1

Marco teórico. Antecedentes investigativos

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1 Introducción

Como resultado de la corrosión, algunos de los elementos del metal o aleación pueden cambiar de estado metálico a no metálico. Los productos de corrosión pueden ser especies disueltas o productos sólidos; en cualquier caso, la energía del sistema disminuye mientras el metal cambia a una forma de baja energía. El cambio de energía es la fuerza impulsora para el proceso de corrosión y es un tema de termodinámica. La termodinámica examina y cuantifica la tendencia para que la corrosión y sus procesos parciales ocurran, también puede predecir bajo qué condiciones es estable un metal. Una vía de contrarrestar la corrosión, entre ella la galvánica es con el empleo de bimetales.

En el presente capítulo se establece como objetivo el análisis de las bibliografías existentes relacionadas con la corrosión galvánica del aluminio y del cobre, así como de los fundamentos que rigen el proceso de soldadura por fricción radial o de torque.

1.2. Fenómeno de la corrosión atmosférica en los metales

La corrosión atmosférica de metales transcurre por un mecanismo de naturaleza electroquímica. El electrolito está constituido por una película de humedad extremadamente delgada o una película acuosa, cuando el metal aparece perceptiblemente mojado. Bajo la película de electrolito la mayoría de los metales expuestos en la atmósfera se corroen por medio del proceso catódico de reducción de oxígeno. Únicamente en el caso de un alto grado de contaminación por productos ácidos adquiere importancia la reacción de descarga de iones hidrógeno. El proceso de corrosión atmosférica es suma de los procesos parciales (individuales) de corrosión que tienen lugar cada vez que se forma la capa de electrolito sobre el metal (Feliu y Morcillo, 1982; Albrecht y Hall, 2003).

Almeida y Santos (2006) especifican que las precipitaciones acuosas (lluvia, nieve o niebla) y la condensación de humedad por cambios de temperatura son, sin duda, los principales promotores de la corrosión en la atmósfera. Se ha demostrado que la humedad relativa (HR) ejerce un papel decisivo en la corrosión atmosférica. Por debajo de un determinado nivel de HR no es probable la corrosión, pues no existe película apreciable de electrolito sobre el metal. Generalmente la corrosión de hierro y otros

metales es insignificante a humedades relativas por debajo del 60 - 80 %. Aún cuando la HR exceda de este nivel, para que la velocidad de corrosión sea realmente importante, la atmósfera debe estar, además contaminada.

Morcillo (2002) le confiere importancia a las reacciones electroquímicas, ya que considera que las mismas ocurren uniformemente y no uniformemente en la superficie del metal, la cual se llama electrodo. El líquido conductor iónico se llama electrolito. Como resultado de la reacción, la interfaz electrodo/electrolito adquiere una estructura especial; en la cual factores como la separación de cargas entre los electrones en el metal y los iones en la solución, interacción de los iones con las moléculas de agua, adsorción de los iones en el electrodo y difusión de las especies juegan un papel importante.

Por otro lado Salazar-Jiménez (2015) expone que la velocidad de corrosión es controlada por el proceso de transferencia de carga anódica-catódica. Sin embargo, si el agente catódico en el sitio de la corrosión es proveído en poca cantidad, puede ser el controlante de la velocidad de corrosión. Bajo estas condiciones, el proceso de transferencia de carga catódica es lo suficientemente rápido para reducir la concentración del agente catódico en el sitio de corrosión a un valor menor.

Continúa exponiendo Salazar-Jiménez (2015) que debido a que la velocidad de la reacción catódica es proporcional a la concentración del agente en la superficie, la velocidad de la reacción será limitada por esta caída en la concentración. Para una transferencia de carga suficientemente rápida, la concentración en la superficie bajará a cero y el proceso de corrosión será totalmente controlado por la transferencia de masa.

En el trabajo de Schweitzer (2010) se pudo contactar que este autor refiere que la energía de oxidación o potencial se relaciona con la capacidad de agregar o quitar electrones del metal para oxidar o reducir la superficie. Esta variable es separada de las discusiones sobre la química de la solución debido a que tal potencial puede ser aplicado por una fuente de voltaje externo, acople galvánico de diferentes metales o constituyentes de la solución. Las aplicaciones prácticas incluyen incremento de la pasividad alterando el óxido superficial (protección anódica) o previniendo la corrosión proveyendo de electrones al metal que normalmente sería corroído (protección catódica). La velocidad de la reacción anódica o la velocidad de corrosión es cambiada en la protección del metal.

1.2.1. Corrosión galvánica del aluminio y del cobre

Los diferentes valores de los potenciales de corrosión entre los otros metales y el aluminio, sirve para formar una relación galvánica. Bajo la mayoría de las condiciones de servicio, el aluminio y sus aleaciones son generalmente los ánodos en la celda galvánica con otros metales, protegiéndolos y corroyéndose él de manera sacrificada. Sólo el magnesio y el zinc son más anódicos que el aluminio (Revie y Uhlig, 2008).

Valcarce *et al.* (2004) plantea que para minimizar la corrosión del aluminio en contacto con cualquier metal más catódico, aunque no puede ser evitado, la relación del área expuesta del aluminio a aquella del metal más catódico debe ser lo más alta posible, para minimizar la densidad de corriente en el aluminio y por lo tanto la velocidad de corrosión. La relación entre áreas puede ser aumentada si se pinta el metal más catódico o ambos metales, pero pintar solamente al aluminio no es efectivo e incluso podría acelerar la corrosión. De ser posible, debe aislarse el contacto eléctrico entre metales disímiles para evitar la formación del par galvánico.

En cuanto a la corrosión de cobre como se observa en la figura 1.1, plantea Roberge (2008) que el mismo se utiliza extensamente en muchos ambientes y tiene muchos usos debido a su excelente resistencia a la corrosión, que se une a otras características deseables, tales como su superior conductividad eléctrica y térmica, facilidad de fabricación y de ensamblaje, este se corroe a velocidades muy insignificantes en aire no contaminado, agua y ácidos no oxidantes desaireados.



Figura 1.1. Corrosión del cobre en conductores eléctricos. Fuente: Morcillo (2002).

El cobre y sus aleaciones son únicos entre los metales resistentes a la corrosión, en el hecho de que no forman verdaderamente una película pasiva. En ambientes acuosos, a

temperatura ambiente, el producto de corrosión predominante responsable de la protección es el óxido de cobre Cu_2O . Esta película de Cu_2O es adherente y sigue una cinética de crecimiento parabólico.

Los autores Mishra *et al.* (2005) han establecido que dentro de los procesos corrosivos, el cobre casi siempre es catódico con respecto a otros metales comunes como el acero y el aluminio. Cuando el cobre se pone en contacto con el acero o el aluminio, la velocidad de corrosión de estos últimos se incrementa, mientras que la del cobre disminuye. El potencial de corrosión del cobre generalmente se encuentra entre - 0,2 y - 0,4 V, dependiendo del medio y la presencia de oxígeno. Mientras mayor sea la diferencia de potencial galvánico entre metales, mayor será la velocidad de corrosión del metal anódico. El daño acelerado debido a corrosión galvánica es mayor en la zona de unión de los metales, donde la densidad de corriente electroquímica es mayor.

Liang *et al.* (1997) han establecido que otro factor importante que afecta la velocidad de la corrosión galvánica, es la relación de áreas. Un área catódica grande y un área anódica pequeña, puede incrementar cientos de veces la velocidad de corrosión del metal anódico que si la relación de áreas fuese igual. Inversamente, si se acopla un área anódica grande con un área catódica pequeña, la densidad de corriente y el daño por corrosión galvánica es mucho menor.

En Furukawa *et al.* (2006) se ha establecido que en muchas ocasiones no es posible eliminar la presencia de productos corrosivos, los recubrimientos son una buena manera de detener la corrosión en una parte o pieza de un equipo que es propenso a la corrosión. La mayoría de los recubrimientos proporcionan protección contra la escala entera del pH de la corrosión y se debe buscar que no se desprendan ni se agrieten.

La unión entre el aluminio y el cobre, cuando no se realiza una unión duradera entre ellos tienden a formar corrosión galvánica, los mismos presentan diferentes potenciales electrónicos, sin embargo por sus características son muy empleados en las industrias eléctricas.

Wanjara *et al.* (2011), plantean que en cuanto al uso del aluminio y el cobre como materiales empleados en sistema de transmisión hay que tener en cuenta que la proporción de conductibilidad, la densidad es aproximadamente dos veces mayor para el

aluminio con respecto al cobre y por consiguiente, el aluminio es una opción atractiva en cuanto al peso (en el diseño, arriba las líneas de poder). Sin embargo, cuando el peso no es una consideración importante, el cobre presenta una mayor conductibilidad que el aluminio. Por consiguiente, un método para la unión del aluminio y el cobre debe permitir una solución más perfeccionada para los mismos ser empleados en los sistemas de transmisión. El bajo costo del aluminio con respecto al cobre, permite reemplazar ciertas partes en estos sistemas de transmisión de poder dónde sea apropiado.

Con la soldadura del aluminio - cobre para sistema de transmisión de poder, se debe lograr que la aplicación sea funcional en lugar de estructural, la parte eléctrica, en lugar de las propiedades mecánicas son de mayor importancia. La parte microestructural afecta las propiedades eléctricas, más pequeño los tamaños de grano (aumenta el fragmento de volumen de límites de grano), aumenta las concentraciones del soluto y aumento de las dislocaciones, la resistividad (Gulenc, 2008).

En Bhamji *et al.* (2010) citando a varios autores establece que en cuanto a la unión metalúrgica del aluminio y el cobre, expone que la soldadura por fricción rotatoria es una tecnología que compete para la soldadura del aluminio y el cobre ya que ambos pueden unirse producto de la fuerte fuerza que produce este proceso (Workman y Nicholas, 1986). Sin embargo, con este proceso solo es posible la soldadura de partes asimétricas, también se puede unir mediante soldadura por fricción lineal y mediante la soldadura por explosión (Gulenc, 2008).

1.3. Principios de la soldadura por fricción radial

Este método es conveniente para unir varios materiales que son sumamente difíciles de ser soldado por las técnicas de fusión convencionales, la junta puede obtenerse debajo de la temperatura de fundición (Longhurst, 2010 y Bhamji *et al.* 2012) referenciado en Guzmán (2017). 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 los microconstituyentes en las capas cerca de la superficie (Rai *et al.*, 2011 y Serkan *et al.*, 2016).

El concepto básico de FRW 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 y Mahoney, 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.

Criterios de Aguilar (2014) y Schmicker *et al.* (2014), 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.

En el trabajo de Ptak (2010); Quintana (2012); Tufaro y Svoboda (2014) se pudo establecer que los mismos refieren 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 roce de una de las piezas con respecto de 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.

La soldadura por fricción tiene la finalidad de lograr uniones en materiales con perfiles cilíndricos (figura 1.2) 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), 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).

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).

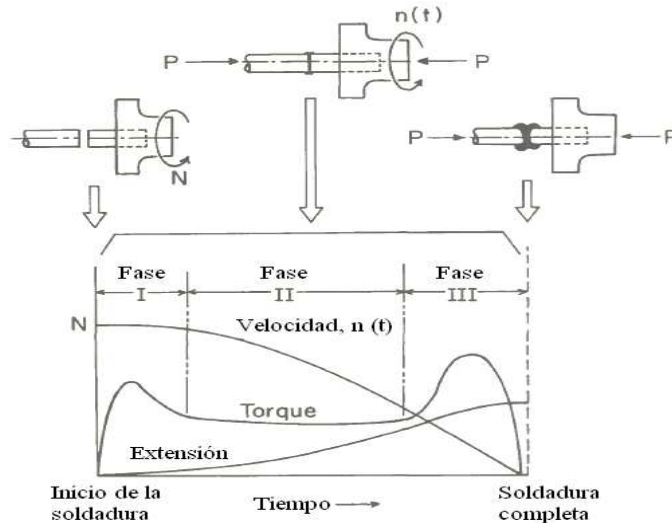


Figura 1.2. Soldadura por fricción rotativa. Fuente: Oberle *et al.* (1967).

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.

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, la temperatura que se alcanza o se genera durante la fricción deforma plásticamente el material, hasta el estado de forja, donde al analizar microscópicamente dicha zona, no se observa dilución entre los materiales, como se puede apreciar en la figura 1.3 (UTN, 2014).

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 1.3; primero, una pieza de trabajo se gira y la otra se mantiene estacionaria, al alcanzar

la velocidad angular apropiada, las dos piezas de trabajo se juntan y se aplica una fuerza axial. La frotación en la cara interna calienta la pieza de trabajo localmente y comienza el vuelco y por último, se detiene la rotación de una de las piezas y se completa eliminando la rebaba producida.

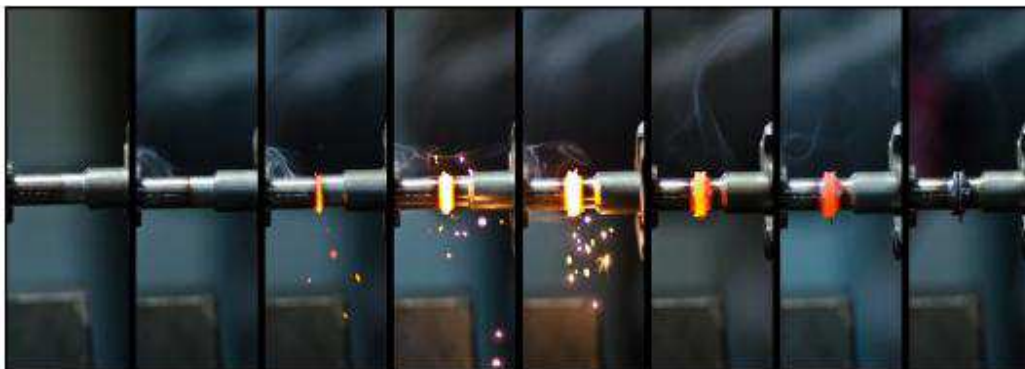


Figura 1.3. Principios de la soldadura por fricción. Fuente: Ptak (2010).

La velocidad de rotación y la presión axial que se aplica, determinan la forma de la unión soldada, 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.

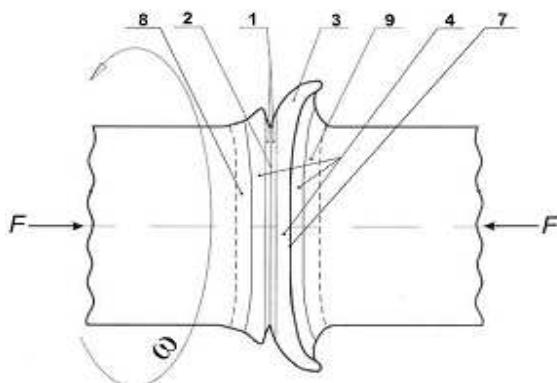
La soldadura por fricción se puede utilizar para unir variedad de materiales, siempre y cuando uno de los componentes tenga alguna simetría rotacional. Mediante este método es posible unir las partes sólidas o tubulares con una buena resistencia en la unión. Así se han unido con éxito barras sólidas 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. La 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.

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.

Durante el proceso, los parámetros de la soldadura combinados ejercen un efecto significativo en el modelo de flujo material y distribución de temperatura (figura 1.4), mientras influye en la evolución de la microestructura del material, la formación y las propiedades mecánicas de la junta (Paduan *et al.*, 2012 y Oosterkamp *et al.*, 2004).



1- capa viscosa; 2- Interfase; 3- capa del metal; 4- capa viscoplástica; 7- Línea de unión; 8- HAZ acero 1 en metal 2; 9- HAZ acero 2 en metal 1.

Figure 1.4. Modelo de una junta soldada con las zonas características.

Fuente: Biljana *et al.* (2008).

Durante la unión, al ser la energía utilizada menor, consecuentemente, la zona térmicamente afectada (ZTA) y los esfuerzos residuales asociados con la soldadura es relativamente pequeña, 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 plastificado a una temperatura menor que la de fusión. La fuerza aplicada sobre las superficies a unir en esta etapa se le denomina fuerza de calentamiento.

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, hay 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 forma 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).

1.3.1. Clasificación de la soldadura por fricción radial

La soldadura por fricción rotativa (figura 1.4), es la forma más común de soldadura por fricción y representa la mayor parte de las máquinas hoy en día (Nicholas, 2003 y Lamorú, 2016). La temperatura de fricción se obtiene rotando un componente axialmente contra otro estático y sujeto, aplicando una cierta cantidad de fuerza. Después de unos segundos, el punto de unión alcanza la temperatura óptima cesando la rotación y aplicando una mayor cantidad de fuerza que forja y consolida la unión.

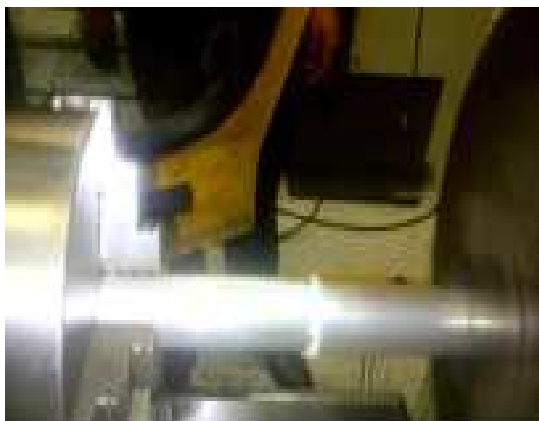


Figura 1.5. Soldadura por fricción rotativa. Fuente: Lamorú, 2016).

Mishra *et al.* (2014) expone que durante el proceso se combinan los parámetros de velocidad de rotación desplazamiento, tiempo, temperatura y fuerza para obtener la soldadura por diversos materiales. El proceso es, además de flexible y robusto, muy tolerante a las diferentes calidades de los materiales.

La soldadura por fricción rotativa se divide en dos variantes: direct drive (control directo) e inercia. Para el proceso de control directo, una parte se mantiene estacionaria mientras que la otra rota a una velocidad constante controlado por un motor eléctrico o hidráulico, que se frena cuando se va a aplicar la fuerza de forja.

Según Zimmer *et al.* (2010) la soldadura por fricción rotativa es 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.

La fuerza (axial) se mantiene o incrementa al mismo tiempo hasta que la soldadura se enfría. De esta manera las variables principales del proceso son la rotación, el tiempo de frenado y el tiempo de soldadura. Estos parámetros determinan la tasa de generación de calor en la interfaz de soldadura y la cantidad de energía de entrada (Maalekian, 2007 y Uzku *et al.*, 2010).

De acuerdo con Maalekian (2007) y Uzku *et al.* (2010) son varios los parámetros que se pueden controlar en la soldadura por fricción rotativa. Estos parámetros 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 parámetros 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 parámetros necesarios para tener en cuenta al optimizar el proceso de soldadura. Un proceso de soldadura exitoso se puede producir si los parámetros se optimizan.

Refieren además Maalekian (2007) y Uzku *et al.* (2010), que las rev/min inferiores de las partes giratorias causan momentos torsores y resultados de calor no uniformes. Por otra parte, la disminución de valores de rev/min puede minimizar la formación de compuestos intermetálicos. Altas velocidades de rotación tienden a incrementar el ancho de la zona afectada por el calor así como el tamaño de grano. Para evitar el sobrecalentamiento en la zona de soldadura, la presión y el tiempo de fricción tienen que ser cuidadosamente controlados.

1.4. Proceso de soldadura disímil por fricción radial

Las combinaciones de uniones de metal disímil son empleados en aplicaciones diferentes que requieren una cierta combinación especial de propiedades, así como para ahorrar los costos impuesto hacia los materiales costosos y escasos (Ozdemir, 2005).

La fusión convencional para soldar diferentes combinaciones de metal disímil es un proceso factible para evitar la formación de estructuras intermetálicas, fundición quebradiza, debido a la baja incompatibilidad metalúrgica y por presentar diferencias en el punto de fusión y desigualdad térmica. La soldadura por fricción es un proceso de soldadura transitorio empleado en diferentes situaciones (Yoon *et al.*, 2006).

Dentro de los antecedentes se tienen a Kawai *et al.* (1997) quienes 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.

De la revisión de la literatura y de acuerdo con Murti y Sunderesan (1986) y Ananthapadmanaban (2009), exponen que las mayorías de las informaciones publicadas en la soldadura por fricción de materiales disímiles están enfocadas en las características de la microestructura, las variaciones de la microdureza, formación de escalones y la evaluación de las propiedades de las tensiones. Todos lo expuesto en estas investigaciones se llevó a cabo en base a ensayos para lograr las condiciones de soldadura óptimas. En estudio sistemático se ha informado para perfeccionar hasta ahora la soldadura por fricción que los parámetros para lograr la unión disímil entre el aluminio y el acero inoxidable es la máxima fuerza de tensión.

Kiran *et al.* (2010) expuso que en la soldadura por fricción radial de metales no ferrosos existe la formación de fase intermetálica, que es muy dura. El método de fricción continuo puede adoptarse adecuadamente para soldar diferentes materiales ferrosos y no ferrosos. Fuji *et al.* (1997) investigó que el proceso de soldadura por fricción era muy eficaz en la soldadura de materiales disímil como aluminio y el acero inoxidable. Demostró por los resultados de las pruebas mecánicas de tensión que las propiedades mecánicas que presentaron no son posibles lograrlas por medio de los procesos de soldadura por fusión.

Peel *et al.* (2003) evaluaron el efecto de las velocidades de avance y de rotación 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, mientras que 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.

Muralimohan *et al.* (2014) estudiaron la soldabilidad de la aleación de aluminio AA 6082 con barras de cobre puro, establecieron el comportamiento mecánico y microestructural. Emplearon barras de 20 mm y de diámetro y 120 mm de longitud. Demostraron la posibilidad de realizar la soldadura con parámetros del proceso, con presiones de forja de 160 MPa y tiempo de fricción de 4 sec. Se obtuvo la tensión residual con una buena unión soldada con fuerza superior de 3,8 % respecto al material base. A través del análisis por XRD se demuestra que la unión falla en la unión por fase intermetálicas AlCu y de AlCu₂ y baja tensiones.

Bakir *et al.* (1995) estudiaron la soldadura por fricción en juntas de acero y aluminio y del aluminio y el cobre. Los resultados muestran que el acabado superficial afecte las propiedades mecánicas y que la fuerza juega un papel que define la aparición de fase intermetálicas. Por otro lado Vairamani *et al.* (2013) emplearon una metodología de superficie de respuesta y un diseño de experimentos para evaluar la fuerza máxima de tensión interfásial en la unión del acero austenítico y la aleación de cobre. Usaron el Anova para determinar el porcentaje de contribución de cada parámetro, se usó el análisis de la regresión para establecer el modelo matemático. Los resultados revelan que la velocidad de rotación tiene el efecto significativo en el reforzamiento de la fuerza de tensión de la unión. Se obtuvo la máxima fuerza de tensión en la unión a 16 r/min y presión de fricción con proporción de tiempo de fricción de 10 s.

1.5. Efecto de velocidad del husillo en la calidad de la soldadura

Existen diferentes parámetros para cualquier proceso de fabricación que decidirá la calidad de rendimiento del mismo, algunos pueden estar dentro o pueden estar fuera del sistema. En la soldadura por estado sólido hay generalmente velocidad del husillo, la presión de fricción, tiempo de fricción o longitud de soldadura, la presión de forja, el

tiempo de forja que son los parámetros del proceso activos que decidirán la calidad de la unión soldada.

Uday *et al.* (2011) estudiaron el efecto de velocidad considerando las propiedades mecánicas de aleación aluminio. Las altas velocidades de rotación promueven la generación de la deformación plástica y garantiza la buena unión en la juntas. Khalid *et al.* (2010) concluyen que la alta velocidad de rotación permite buena unión para las aleaciones de aluminio. Duffin *et al.* (1973) estudiaron el efecto de la velocidad en las propiedades mecánicas de acero aleado de los componentes tubulares y muestra que la velocidad es un factor determinante para la calidad de la junta. Vairamani *et al.* (2013) reveló que la velocidad de rotación no tiene ese efecto en el esfuerzo de tensiones en la junta en caso del acero y el cobre. Uday *et al.* (2015) refirió que la velocidad de rotación y la longitud de soldadura juega un papel importante por aumentar al máximo la fuerza de la junta en compuestos de aluminio.

El calor es la fuente por suavizar el material. La combinación de velocidad del husillo, fuerza de fricción y tiempo de fricción, provoca la cantidad de generación de calor durante la acción frotante. La entrada de calor juega un papel para determinar las características de un material unido. Mohammed *et al.* (2015) estudiaron el impacto de entrada de calor en las propiedades mecánicas de tubos de acero inoxidable dúplex, exponen que con el aumento de la entrada de calor, aumenta la fuerza de tensión y las disminuciones de fuerza de impacto al mismo tiempo, la dureza en la junta aumenta en la medida que se incrementa la entrada de calor.

Cuando la presión de fricción causa largo tiempo para generar el calor en la superficie, el proceso de forja no puede realizarse. Mohammed *et al.* (2015) estudiaron considerando que la presión de fricción es el doble de la presión de forja para llevar a cabo los experimentos. Paventhan *et al.* (2011) refirieron que la presión de forja juega el papel predominante por aumentar al máximo la fuerza de tensión de la junta durante el proceso de soldadura.

Paduan *et al.* (2010) revelaron que el espacio de fricción y el tiempo de forja, causa la formación de fases intermetálicas en la interfase de la junta del acero y el aluminio. Sin embargo se plantea en la literatura que los contaminantes se eliminan automáticamente

en la interfase durante la soldadura y no hay efecto predominante en las propiedades mecánicas metalúrgicas de la junta soldada, debido al acabado de la superficie.

1.5.1. Parámetros de la soldadura por fricción rotativa

Varios parámetros se pueden controlar en la soldadura por fricción rotativa. Estos parámetros 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 parámetros 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 parámetros necesarios para tener en cuenta al optimizar el proceso de soldadura. Un proceso de soldadura exitoso se puede producir si los parámetros se optimizan (Maalekian, 2007 y Uzku $t et al.$, 2010).

Según Maalekian (2007) y Uzku $t et al.$ (2010), las r/min inferiores de las partes giratorias causan momentos torsores y resultados de calor no uniformes. Por otra parte, la disminución de valores de r/min puede minimizar la formación de compuestos intermetálicos. Altas velocidades de rotación tienden a incrementar el ancho de la zona afectada por el calor así como el tamaño de grano. Para evitar el sobrecalentamiento en la zona de soldadura, la presión y el tiempo de fricción tienen que ser cuidadosamente controlados

Según Zhou *et al.* (2010) las aleaciones de titanio responden muy bien a este tipo 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. Uno de los máximos potenciales de este proceso es la fabricación de composites intermetálicos de titanio y aluminio.

Abdel *et al.* (1983) consideró que los biseles en ángulo también es un parámetro del proceso y concluye que la fuerza axial varía al aumentar el bisel del ángulo. Escogieron biseles con ángulos de 150, 300, 450 y 600 y demostraron que la calidad de la unión se afecta al variar estos biseles en ángulos.

Bakir *et al.* (1995) concluye que la geometría de la superficie no tiene efecto significativo en la fuerza de la junta y también la interferencia por presencia de contaminantes se

elimina automáticamente de las superficies durante la fase de fricción. Mohammed *et al.* (2015) consideraron el impacto del calor a la entrada como el parámetro para determinar las propiedades de la unión en acero inoxidable dúplex. Paventhan *et al.* (2011); Vinoth y Balasubramanian (2014) estudiaron la presión de fricción, tiempo de fricción, tiempo de la forja, la presión de la forja como los parámetros del proceso para identificar las propiedades mecánicas de la unión.

1.6. Mecanismo de formación de la junta soldada en la fase sólida

A pesar de la simplicidad clara del proceso, el mecanismo de formación de juntas soldadas en fase sólida (deformación plástica) se considera realmente complicada. Durante muchos años la naturaleza en la formación de uniones fuertes entre dos superficies separadas era causa de estudio entre el intento teórico y experimental, en la actualidad, no hay ninguna respuesta clara (Vill, 1972).

Comenta este autor que fueron expuestas unas series de hipótesis, que con diferentes grados de fiabilidad describen el proceso y el mecanismo de formaciones de juntas en fase sólida. Por ejemplo:

- ✚ Hipótesis de superficies: los autores de esta hipótesis asumen que para crear las fuerzas de la interacción entre las superficies de dos cuerpos es necesario limpiar las mismas del óxido, la grasa absorbida y películas de gas y que la unión se realice limpio como resultado del flujo de subsuperficial de las capas metal con la deformación plástica (Burca *et al.* 2010).
- ✚ Hipótesis del recristalización: esta hipótesis se basa en entender el factor recristalización como el elemento esencial que determina la formación de la junta en la fase sólida. Según esta hipótesis, la deformación y acompañado por el endurecimiento en frío del metal, con la acción simultánea de las relativamente altas temperaturas, lleva a reestructurar de átomos la formación de nuevos cristales en los cuerpos de la unión (Kaibyshev *et al.*, 2005)
- ✚ Hipótesis de difusión: según esta hipótesis, la base para la formación de la unión entre las superficies en el contacto se realiza a través de un proceso de traslado de difusión mutuo de átomos profundo en los cuerpos de la unión (Oberle *et al.*, 1967).

- ✚ Hipótesis de energía: la base de esta hipótesis es por la necesidad de activización de átomos en la superficie del metal adicional a las capas para unir los cuerpos fuera de la energía (calor mecánico). La magnitud de esta energía debe ser más alta que el nivel crítico que es completamente determinado por metal

La mayoría de investigadores insiste que la unión de los metales en la fase sólida, es debido a la apariencia entre el contacto de la superficies de la unión, es decir, la interacción de las mismas fuerzas entre los átomos (iones) de dos cuerpos vecinos en contacto y tiene lugar dentro de una pieza de metal y determina su continuidad.

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 que la 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.

1.7. Conclusiones del capítulo 1

- Se pudo determinar que la unión bimetálica cobre – aluminio es empleadas en las empresas eléctricas, con el objetivo de disminuir el efecto de la corrosión galvánica por efecto de la corrosión galvánica.
- La soldadura por fricción radial es un método de soldadura en estado sólido donde se logran uniones con bajo costo y alta calidad sin necesidad de material de aporte y con buenas características metalúrgicas, tanto en materiales similares como disímiles, caracterizada por sus particularidades en la interfase de la unión.
- En las literaturas se pudo determinar que el mecanismo de formación de la junta soldada en la fase sólida, está regida por diferentes hipótesis como la de superficie, la de recristalización, la difusión, la de energía, aunque no existe un criterio unificado al respecto.

Capítulo 2

Materiales y métodos

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

El proceso de friction rotatory welding (FRW) es empleado para unir piezas consideradas no soldables con otros procesos tradicionales. Durante la soldadura con los métodos convencionales, por la aplicación del ciclo térmico, surgen defectos que en muchas ocasiones invalidan el conjunto soldado. Un proceso de soldadura que minimiza los defectos anteriores es el proceso FRW una de las más recientes tecnologías de unión, este proceso de estado sólido es capaz de soldar los materiales considerados difíciles de soldar. Es conveniente conocer los diferentes parámetros de operación que afectan las uniones soldadas.

El objetivo del capítulo es establecer los métodos y procedimientos para la realización de la unión disímil de una aleación de aluminio y otra de cobre mediante el proceso de soldadura por fricción radial con el empleo de un torno convencional.

2.2. Etapas a considerar en la soldadura por fricción

La soldadura por fricción rotativa se realiza con el establecimiento de tres parámetros, velocidad, presión y acortamiento. En la figura 2.1 se muestra el modelo para realizar el proceso de soldadura por fricción radial entre el acero AISI 1045 y el acero AISI 316 L.

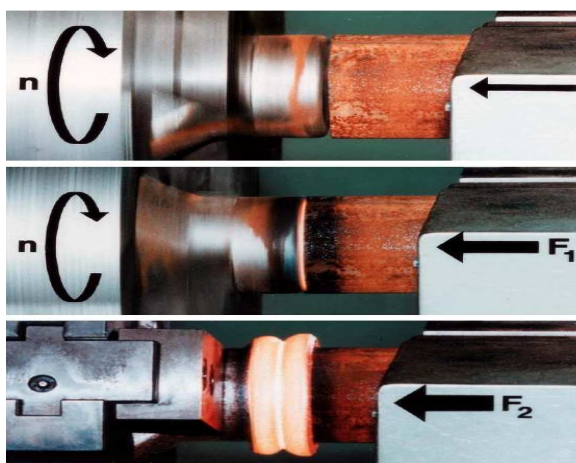


Figura 2.1. Procedimiento para la unión Al - Cu. Fuente: Romero (2016).

En la figura se puede observar las tres etapas de la soldadura por fricción:

- **Etapas de prefricción:** etapa que se realizará en un tiempo de hasta dos segundos, de giro relativo y de muy baja presión.

- **Etapas de fricción:** la más larga en el tiempo, de unos quince segundos. Con respecto a la etapa anterior se aumenta considerablemente la presión ejercida manteniendo el giro.
- **Etapas de recalcado:** donde se frena en "seco" y se aplica una presión entre dos y tres veces a la de la etapa anterior. La duración puede ser de unos tres segundos.

2.3. Composición química de la aleación de aluminio

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 de la aleación de aluminio y del cobre, en %

Aluminum Association	UNS No.	Si	Fe	Cu	Mn
AA 2024	A9 AA 2024	0,5 máx	0,5 máx	3,8-4,0	0,3-0,9
		Mg	Cr	Zn	
		0,9-1,0	0,10 máx	0,25 máx	

Las propiedades físicas y mecánicas dependen de la composición química y características microestructurales desarrolladas durante la solidificación, tratamientos térmicos y proceso de deformación. La concentración de aleaciones e impurezas permiten mejorar las propiedades del aluminio. Los principales elementos de aleación son el cobre, silicio, magnesio y zinc, y manganeso, hierro, cromo y titanio se presentan como impurezas.

La serie AA 2XXX tiene al cobre como metal de principal aleación cuyo contenido está entre 2 y 10 % de este elemento en el aluminio; permitiendo una adecuada solubilidad a partir de 5,65 % de cobre. Son tratables térmicamente las aleaciones cuyo porcentaje de cobre este entre 2,5 y 5 %, endureciéndose por envejecido, en donde presenta su máxima solubilidad y aumenta su dureza mediante un proceso posterior de envejecimiento.

Respecto a su soldabilidad, es relativamente pobre para la mayoría de estas aleaciones en procesos de soldadura por arco, los cordones tienden a ser frágiles y extensas zonas de eutéctico de bajo punto de fusión debilitan la unión.

Los fenómenos de restauración y recristalización se presentan en el cobre con características similares a otros metales. La temperatura de recristalización está ligada a la pureza del cobre y a la importancia de la deformación previa. En la tabla 2.2 se muestra la composición química estándar del cobre según la norma chilena NCh 1339 Of 77.

Tabla 2.2. Composición química del cobre, en %

Cobre	ASTM	Cu + Ag	Bi	Pb	P
Cu-DHP	B224	99,90	2,5 máx	0,23 máx	0,015 a 0,040

La clasificación del cobre por esta norma, es del tipo Cu-DHP, cobre de la más alta conductividad, dentro de sus elementos, el fósforo, afecta la conductividad eléctrica. Material de alta conductibilidad eléctrica (58 ó 57 m/mm² en estado recocido), con un contenido de oxígeno: 0,005-0,040 % poco adecuado para soldar (sin aportación) y soldadura fuerte, debido al peligro de rajarse (malo al hidrógeno) se utiliza en todas las aplicaciones, donde es necesario alta conductibilidad eléctrica, como la electrotécnica y la electrónica.

Las características de ductilidad y maleabilidad del cobre permiten que este metal sea capaz de experimentar profundas transformaciones plásticas, pero ante todo, sus características tecnológicas más importantes son su aptitud para la elaboración secundaria por extrusión, laminación, trefilación y fabricación de curvas y embocinados, su solubilidad en fase sólida que le permite unirse a otros metales para formar aleaciones y su facilidad para unirse con otras piezas de cobre o con otros metales por medio de soldadura.

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 probetas son barras de una aleación de aluminio y otra de cobre de 14 milímetros de diámetro.

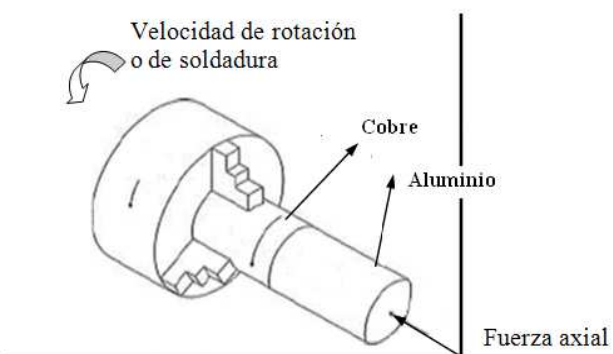


Figura 2.2. Modelo empleado para la soldadura por fricción radial o rotativa.

La máquina herramienta empleada fue el torno C 11 MT, ubicado en el taller de máquinas herramienta del ISMMM; 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.

Se utilizó por ser una máquina usada en el proceso de fabricación de piezas de revolución, que 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 2.4 se muestra el proceso de instalación de las barras para ser soldados.

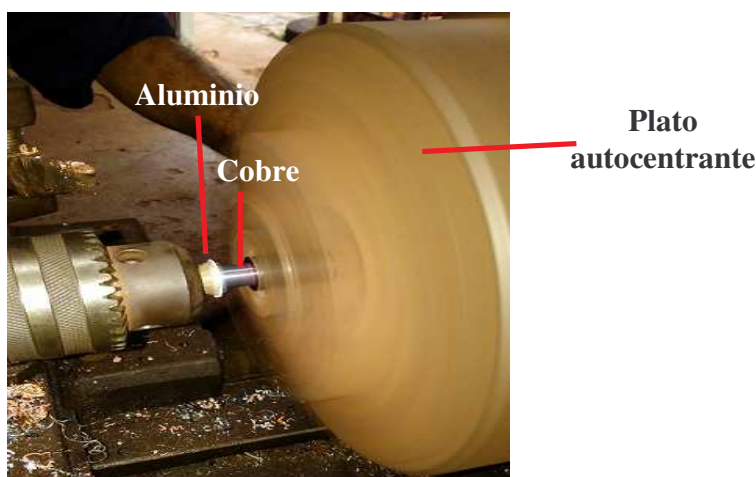


Figura 2.4. Instalación del proceso de soldadura por fricción.

Para la ejecución del proceso de soldadura por fricción radial o de torque, la pieza fija se instaló en un dispositivo ubicado en el carro móvil y la pieza 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. Parámetros de procesamiento para la unión por fricción

Son varios los parámetros que 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 la tabla 2.3 se muestran los parámetros para la soldadura.

Tabla 2.3. Parámetros para el proceso de soldadura

Muestra	Área fricc mm ²	Veloc. rotación r/min	Tiempo fricción (s)	Temper fricc (°C)	Temper forja (°C)
1	153,8	2 400	150	T _{fric1}	T _{forja1}
2	153,8	2 400	155	T _{fric2}	T _{forja2}
3	153,8	2 400	160	T _{fric3}	T _{forja2}

Para el proceso de soldadura fueron preparadas seis muestras de las aleaciones, tres de aluminio y tres de cobre, las cuales se sometieron a soldadura por fricción. 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; esta se puede variar dentro de una banda de tolerancia bastante ancha y aun así producir soldaduras firmes. La velocidad de rotación empleada fue de 2 400 r/min.

El tiempo de calentamiento más largo precalienta el metal y así controla la rapidez de enfriamiento y evita el agrietamiento por templado. Por otro lado, en el caso de ciertas combinaciones de metales disímiles las velocidades bajas (con sus tiempos de calentamiento más cortos) pueden minimizar la formación de compuestos intermetálicos quebradizos. No obstante, en la práctica el tiempo de calentamiento (para un determinado vuelco) se controla variando la presión de la soldadura por fricción. El tiempo de fricción fue desde 150 hasta 160 s.

La presión de calentamiento debe ser suficiente para mantener las superficies de empalme en contacto íntimo y evitar la oxidación. Para una velocidad de eje determinada, una baja

presión limita el calentamiento con poco o ningún acortamiento axial. Una presión elevada causa calentamiento local hasta una temperatura muy alta y un acortamiento axial rápido.

Las ventajas del proceso de FRW sobre los procesos convencionales, en la unión de las aleaciones de aluminio son: una zona estrecha afectada por el calor, microestructura de grano forjado, no existe porosidad y no se utiliza material de aporte. Si el proceso se realiza correctamente la microestructura resultante permitirá que la zona de soldadura tenga alta resistencia a la fatiga y a la tensión y será dúctil, por los parámetros del proceso existen condiciones que se deben controlar.

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.

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. 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 de las aleaciones. 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.

El pirómetro 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 r/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 de la aleación de aluminio y de cobre, sin exceder ese valor.

2.5. Metodología de cálculo para el proceso de soldadura por fricción

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.

2.5.1. Cálculo de la fuerza axial necesaria para el 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 expulsa formando un "flash" plástico. Por la ecuación 2.1 se determinó la fuerza de calentamiento según Mishra y Mahoney (2007) como:

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

Donde:

F - fuerza axial necesaria; N

P - presión de calentamiento; MPa

A - área de contacto de la probeta; mm²

2.5.2. 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 lo que se consideró como un círculo y según Casillas (1989) se determina como:

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

Donde:

d - diámetro de la barra; mm

2.5.3. 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 – 100 Hz). 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.

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

Siendo:

F_c - fuerza de contacto; N

μ - coeficiente de rozamiento dinámico.

Para el caso del rozamiento aluminio - cobre, $\mu = 0,5$.

2.5.4. 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.

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

Con:

Q - calor por unidad de longitud; J/mm

η - factor de eficiencia, (0,9)

ω - velocidad de rotación; rev/min

T - torque; N.m

s - avance; mm/min

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

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

Donde:

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.

Los factores para la distribución de temperatura durante la soldadura por fricción han sido estudiados por varios investigadores (Cheng 1963, Rich y Roberts, 1971; Sluzalec, 1993, Midling y Grong 1994). El modelo de la figura 2.5, originalmente propuesto por Rikalin considera una fuente de calor plana continua en una barra (Midling y Grong 1994).

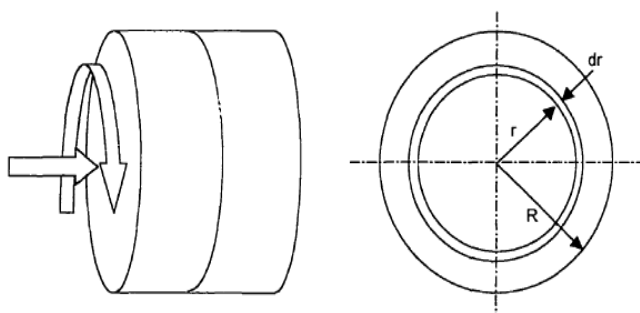


Figura 2.5. Modelo para la distribución de temperaturas. Fuente: Grong (1994).

En este modelo la temperatura de la sección del contacto al final del período calorífico es T_h . La distribución de la temperatura se determina como:

$$T - T_o = (T_h - T_o) \sqrt{\frac{t}{t_h}} \left(\exp \left[-\frac{x^2}{4at} \right] - \left[\frac{\sqrt{\pi x}}{4at} \right] \operatorname{erf} \left[\frac{x}{\sqrt{4at}} \right] \right) \quad (2.6)$$

Siendo:

T_h - temperatura al final del período calorífico, °C

T - temperatura ambiente, °C

t - tiempo, s

t_h - duración del período de calor, s

x - distancia a la superficie de contacto, mm

a - difusividad térmica, $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$

La ecuación describe la temperatura a diferentes distancias para la superficie de contacto durante el período de calentamiento.

Cuando los desplazamientos de la superficie no son uniformes, las tensiones no son uniformes en la superficie y en la región cerca de la interfase de contacto. Como resultado, el fenómeno de las tensiones es dependiente, tal como la generación de calor y la fractura de la partícula durante la soldadura por fricción del material.

En superficie, $z = 0$, el desplazamiento radial u_r , se calcula como:

$$u_r = -\frac{3p_o a^2}{2r(\lambda + G)} \left\{ 1 - \frac{r^2}{a^2} \right\}^{\frac{3}{2}} \quad (2.7)$$

Donde:

$$p_o = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (2.8)$$

$$\lambda = \frac{Ev}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.9)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.10)$$

Siendo:

p_o - presión Hertziana en la distribución hemisférica, Pa

P - carga normal aplicada, N

λ - constante de Lamé's, Pa

ν - coeficiente de Poisson,

G - módulo de elasticidad del material, Pa

E - módulo de Young's, Pa

a - radio de empalme, m.

Cuando el coeficiente de Poisson es igual a 0,5; el material está en condición plástica y la constante de Lamé's $\lambda = \infty$, en este caso el desplazamiento radial $u = 0$, este resultado sugiere que en esta condición plástica, es difícil expeler las impurezas. Aunque, este resultado representa que en el material aparezca la condición plástica, en cualquier caso, la soldadura por fricción puede ser la misma. El resultado confirma la importancia de tener una superficie limpia al principio de la soldadura por fricción.

2.6. 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). En la figura 2.6 se muestra la unión luego de haber realizado la soldadura y de donde se obtendrán las muestras para la preparación metalográfica.



Figura 2.5. Muestras para el proceso de soldadura.

Se realizaron tres corridas de soldadura según el diseño de experimentos considerado. La proporción de carga soportada por regiones deformadas plásticamente, así como la relación

entre la dureza y el modulo elástico, son parámetros importantes para considerar el modelo de deformación plástica. Para un contacto completamente plástico y una inclinación de aspereza de 45° , el coeficiente de fricción es 1,0. En caso de que la inclinación de aspereza se aproxime a cero, el valor se reduce a 0,55. En nuestro caso se consideró 0,55. Además se tuvo en cuenta el punto de fusión de cada material 660°C , el aluminio, 1083°C , el cobre.

2.6.1. Operación 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 colocadas 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.

2.6.2. Ataque químico de las muestras

Antes de realizar el ataque químico a las probetas, se le realizó un desengrasado. Para atacar la aleación de aluminio se empleó una solución de 15 ml de HCl concentrado más 10 ml de HF al 48 % diluido en 85 ml de agua desmineralizada, en el ataque químico del cobre se empleó medio crisol de dicromato potásico con una gota de ácido clorhídrico.

Preparado el reactivo, se vertió una porción en una cápsula en la que se introduce la probeta unos instantes, hasta mojar la superficie pulida. Se detuvo el ataque con agua y se observó la superficie. La operación se repitió hasta que la superficie a examinar estuvo bien atacada. El tiempo de ataque es muy variable y sólo la práctica o la observación repetida de la probeta al microscopio dirán cuándo debe darse por terminado. En este caso se realizó el ataque por separado ya que la unión soldada es de acero disímil.

Después del ataque se lavó la probeta de nuevo con abundante agua corriente, se secó con alcohol (absoluto) y secada al aire.

2.6.3. Elaboración mecánica de las probetas

La operación de corte como se observa en la figura 2.6, se realizó según norma ASTM E 3 – 95. Se tronzó en el torno, ambas barras, a una longitud total de 15 milímetros, como se observa en la figura 2.6, luego 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 2.6. Superficie de la muestra con corte transversal de ambas aleaciones.

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 14 milímetros de diámetro.

2.6.4. Encapsulado de las muestras resina epoxi ROYAPOX – 5050

Las muestras se encapsularon, como se observa en la figura 2.7 para poder realizar las operaciones de desbaste y pulido y garantizar el fácil manejo de las mismas.



Figura 2.7. Encapsulado de las muestras.

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.

2.6.5. 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 o relleno de pequeños componentes electrónicos, que requieran una protección contra la humedad y los cambios de temperatura.

2.6.6. Microestructura patrón de las aleaciones

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 con el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe (2006), que refleja la micrografía en el computador. Las muestras de las figuras 2.8(a) y 2.8(b), se corresponden con la estructura metalográfica de la muestra patrón de las aleaciones de aluminio y del cobre.

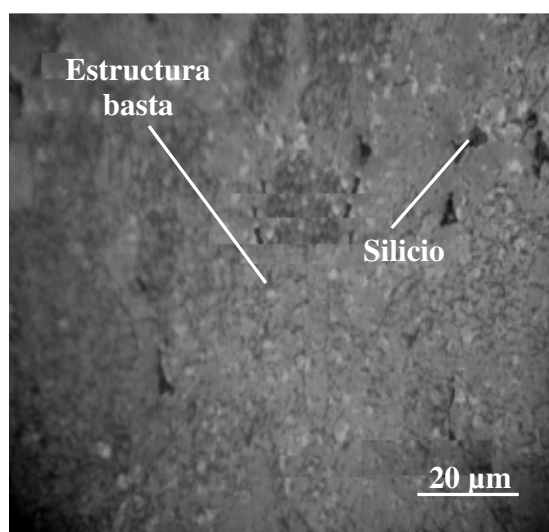


Figura 2.8(a). Microestructura del aluminio.

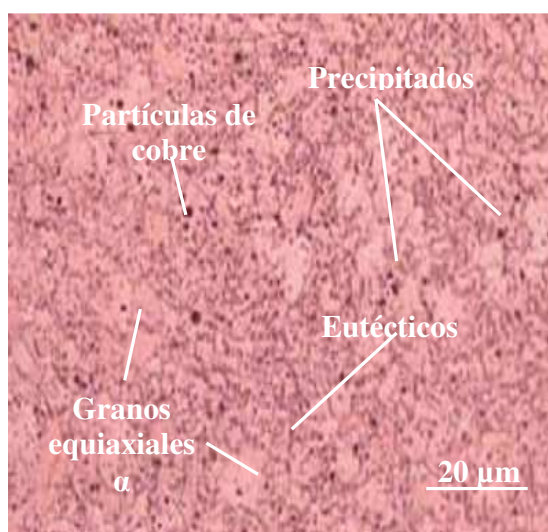


Figura 2.8(b). Microestructura del cobre.

La muestra de la figura 2.2(a) se corresponde con la de la aleación de aluminio, en estado de entrega laminado, sin aplicación de tratamiento térmico, donde se observa una microestructura de granos mixto, con granos grandes rodeados de granos finos, producto de una transformación parcial, con la presencia de silicio en la matriz de la aleación.

La microestructura de la figura 2.2 (b), se corresponde con la aleación de cobre, se caracteriza por su heterogeneidad microestructural, con granos equiaxiales de diferentes tamaños orientados al azar, de bordes rectos y curvados, con algunas partículas pequeñas de segunda fase dispersas dentro de ellos y maclas térmicas. Se observa también una microestructura de granos basto y grueso

El objetivo de este análisis fue obtener una muestra sin afectación en su estructura cristalina que nos permitiera determinar luego de la soldadura por fricción radial, posibles cambios ocurridos en la zona afectada térmicamente (ZAT), en la zona termomecánicamente afectada (ZTMA) y el metal base (MB).

2.6.7. Ensayo de dureza en las diferentes zonas

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.

Las superficies de las probetas se prepararon de la misma manera que para el análisis microestructural, el desbaste y el pulido, se efectuaron ocho 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.



Figura 2.5. Medición de durezas en las diferentes zonas.

Como en el proceso de soldadura por fricción radial, las zonas que se obtienen son de un margen de pequeños milímetros, se precisó la limitación de cada una de ellas, se midió dureza en el material base (MB), en la zona afectada térmicamente (ZAT), en la zona termomecánicamente afectada (ZTMA). Se realizó el mismo procedimiento en las zonas de ambas aleaciones.

2.7. Microscopio óptico para el análisis de imágenes

Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular reflexivo marca echoLAB como se muestra en la figura 2.6. El microscopio óptico está ubicado en el laboratorio de Materiales de la empresa "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche", de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware que refleja la fotografía en el computador.



Figura 2.6. Microscopio óptico reflexivo.

Realiza la reflexión de la luz de una probeta ya pulida con el objetivo de evaluar los microconstuyentes con una cámara digital acoplada, la cual va desde el microscopio hacia una laptop marca LENOVO en la cual se encuentra un programa analizador de imágenes tomadas desde la cámara donde se evalúan las fases, tamaño del grano, inclusiones, afectaciones en los granos, en la misma se elabora un reporte técnico con estas características.

En este microscopio se determinó el comportamiento microestructural de las muestras de aluminio y de cobre, así como el conteo del porcentaje de los microconstituyentes presentes. Para colocar las probetas en el microscopio y evitar una observación distorsionada de las imágenes, se montaron en un dispositivo con plastilina que permitió la nivelación adecuada de las muestras.

2.7.1. Obtención del por ciento de microconstituyentes

El por ciento de microconstituyentes fue determinado en el microscopio reflexivo. Este tipo de microscopio funciona básicamente por medio de la combinación entre el sistema óptico y la iluminación. En este ensayo los granos van a presentar colores diferentes, lo que indica que poseen una microestructura diferente. Adicionalmente los átomos en los límites de grano son más reactivos durante el ataque químico y se disuelven en mayor cantidad que el grano mismo, por ello la reflexividad cambia y se acrecienta su visibilidad. En la tabla 2.4 se muestra el procedimiento para el análisis de los microconstituyentes según la norma ASTM A 247.

Tabla 2.4. Procedimiento para el análisis de los microconstituyentes.

Datos de la fase		
Microconstituyentes	Área	Área %
1	Área 1	Área 1 %
2	Área 2	Área 2 %
3	Área 3	Área 3 %
4	Área 4	Área 4 %

El análisis de imagen fue necesario para caracterizar el tipo de fase, como para estimar los porcentajes de los microconstituyentes presentes en las aleaciones y poder estimar el porcentaje de cada uno de ellos presentes en las aleaciones. Para el análisis de imagen se tomaron en cuenta los diferentes tipos de granos con el fin de evitar excesivas partículas muy pequeñas que se encuentran segregadas a lo largo de la matriz, afectando significativamente en el tamaño promedio de los mismos.

2.8. Diseño de experimentos

El diseño de experimentos se puede definir como un conjunto de métodos que se utilizan para manipular un proceso con el fin de obtener información de cómo mejorarlo (Sánchez, 2009). El diseño de experimentos permitió analizar los datos mediante modelos estadísticos y observar la interacción entre las variables independientes y como afectan a la variable dependiente. El diseño de experimentos que se consideró fue realizado con la ayuda del paquete office de Excel y el software STATGRAPHICS en su versión 1.5 en español. En la tabla 2.5 se muestra este diseño de experimentos.

Tabla 2.5. Diseño de experimentos.

Tiempo fricción t (s)	Dimensión inicial		Valores medidos después de la soldadura							
	L (mm)		L _{últ} (mm)	L ₁ (mm)		ΔL_1 (mm)		$\Delta L_{últ}$	HV	
	Al	Cu		Al	Cu	Al	Cu		Al	Cu
4	100	100,2	L _{últAlCu}	Al ₁	Cu ₁	ΔAl_1	ΔCu_1	L _{últAlCu}	HV Al ₁	HV Cu ₁
5	99	100	-	Al ₂	Cu ₂	ΔAl_2	ΔCu_2	-	HV Al ₂	HV Cu ₂
6	99,5	100,1	-	Al ₃	Cu ₃	ΔAl_3	ΔCu_3	-	HV Al ₃	HV Cu ₃
7	99,5	100	-	Al ₄	Cu ₄	ΔAl_4	ΔCu_4	-	HV Al ₄	HV Cu ₄
8	100	99,5	-	Al ₅	Cu ₅	ΔAl_5	ΔCu_5	-	HV Al ₅	HV Cu ₅
9	98	99	-	Al ₆	Cu ₆	ΔAl_6	ΔCu_6	-	HV Al ₆	HV Cu ₆
10	99,5	98	-	Al ₇	Cu ₇	ΔAl_7	ΔCu_7	-	HV Al ₇	HV Cu ₇
11	100	99,5	-	Al ₈	Cu ₈	ΔAl_8	ΔCu_8	-	HV Al ₈	HV Cu ₈
12	100	99,5	-	Al ₉	Cu ₉	ΔAl_9	ΔCu_9	-	HV Al ₉	HV Cu ₉

Las probetas se sometieron a la acción de rodadura en diferentes condiciones, a fin de evaluar la influencia de aquellos factores que pudieran tener un efecto significativo. Teniendo en cuenta que no se dispone de elementos, que permitan fijar de antemano los parámetros de aquellas variables que definan la calidad del proceso, se propone realizar el tratamiento matemático de las variables involucradas en la soldadura por fricción, el cual está relacionado con la temperatura de fricción y la de forja para determinar los cambios metalúrgicos internos que ocurren en la aleación.

El tiempo de duración del proceso está influenciado por las propiedades térmicas de las aleaciones objeto de estudio, en este caso, el aluminio posee un puntos de fusión de 660 °C y en el cobre es de 1 083 °C. Se consideró tiempo del proceso desde 4 hasta 12 segundos.

La longitud de las probetas se seleccionó a partir del desgaste en la distancia a la superficie de contacto entre ambas probetas friccionando, se tuvo en cuenta la longitud inicial de ambas aleaciones (L), la longitud última al terminar el proceso (L_{últAlCu}), longitud que quedó en cada probeta luego de soldada (L₁), la variación en la longitud después de la soldadura (ΔL_1) y la variación final de la longitud última (L_{últAlCu}). La longitud de las muestras fue desde 98 hasta 101 mm aproximadamente.

La dureza es uno de los parámetros más importantes de los materiales, se admite también que es el más relevante en cuanto a la influencia en la resistencia al desgaste abrasivo, adhesivo y a la fatiga por contacto superficial (Rodríguez, 2009). Esta variable define el comportamiento del proceso, se medirá al concluir el proceso de soldadura por fricción.

2.8.1. Determinación de los coeficientes de regresión

En los modelos de regresión la variable dependiente Y , es siempre una variable aleatoria, mientras que los factores o variables independientes son considerados como variables no aleatorias. Se argumenta en el hecho de que en las aplicaciones prácticas los valores de las X_i suelen ser controladas o elegidas de antemano por el investigador, a los factores también se les denomina variables explicativas, ya que ellos en definitiva son los que explican el comportamiento de la variable dependiente (Box y Hunter, 1989).

La regresión del diseño de experimento se determina como:

$$Y_1 = b_0 + b_{1X1} + b_{2X2} + b_{12X12} \quad (2.11)$$

Donde Y_1 es la dureza obtenida del ensayo en N; X_1 es el tiempo de duración de la soldadura, en s y L es la longitudes que se obtiene en cada probeta después de concluida la unión por soldadura, en mm.

2.8.2. Cálculo de la varianza

Ostle (1975) y Sarache (2004), consideran que el ANOVA, como técnica estadística, permite el estudio de las características medidas u observadas, cuyos valores dependen de varias clases de efectos que operan simultáneamente, esta técnica se basa en la división de la variabilidad total de una característica medible en la variabilidad causada por diferentes factores que intervienen en el problema. Después de calcular los coeficientes de regresión se realiza el procesamiento estadístico de los datos, determinando la varianza como:

$$J_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} J_{yi}^2}{N_o} \quad (2.12)$$

La significación de los coeficientes de regresión se comprueba por el criterio de t de student para una probabilidad de un 95 % o un intervalo de confianza de 0,05 y 15 grado de libertad ($N_o - 1$).

Posteriormente se calcula la varianza por la ecuación siguiente:

$$J_{aj}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} (y - y^{\text{modf}})^2}{N_o - K_o - 1} \quad (2.13)$$

Donde $N_o = j$ y K_o , son el número de coeficientes significativos.

Por la ecuación 2.14 se calcula el coeficiente de fisher (F_{cal}) y se compara con el fisher tabulado (F_{tab}) según los grados de libertad del numerador y del denominador:

$$F_{cal} = \frac{J_{aj}^2}{J_y^2} \quad (2.14)$$

Si el $F_{cal} > F_{tab}$, entonces la ecuación describe adecuadamente el campo de la experimentación.

2.9. 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.
- ❖ Los parámetros seleccionados para la soldadura por fricción radial o de torque de la unión disímil entre la aleación de aluminio y el cobre permiten establecer las temperaturas de fricción, así como la de forja necesaria para lograr las zonas metalúrgicas que se originan en este proceso.
- ❖ Se estableció la metodología de cálculo en función de la fuerza de calentamiento, del área de contacto o de soldadura, de la fuerza de contacto, de la distribución de la temperatura, parámetros establecidos para el proceso de soldadura por fricción radial o rotativa.

Capítulo 3

Análisis de los resultados

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

Según las empresas líderes en el mercado en el diseño y manufactura de soldadoras por fricción, *Thompson* y *ManufacturingTechnology*, se refieren a la soldadura por fricción rotacional o RFW (Rotational Friction Welding), como un proceso de unión en estado sólido que produce coalescencia en metales elevando la temperatura entre las dos superficies inducida por medio de una combinación mecánica – movimiento giratorio de frotación y cargas aplicadas, bajo condiciones idóneas, las superficies no deben fundirse. Para llevar a cabo el proceso de soldadura por fricción rotativa, es necesario utilizar diversos herramientas; considerando las bases del proceso de RFW y la maquinaria para la unión de las piezas.

En el presente capítulo se establece como objetivo establecer el comportamiento microestructural y la dureza que se origina en la ZTMA de la unión disímil aluminio - cobre por efecto de la temperatura de fricción y de forja durante la soldadura por fricción radial.

3.2. Análisis de los elementos químicos de las aleaciones

Los elementos químicos en las aleaciones garantizan la continuidad metalúrgica en la unión soldada, independientemente que en la soldadura por fricción radial o rotativa una de las ventajas que ofrece el método es que no hay pérdida de los elementos aleantes, así se consideran los mismos por las características que se desea obtener en la microestructura resultante final.

La aleación AA 2024 está clasificada entre las aleaciones de aluminio clasificada como aleación para forja, el cobre es el principal elemento aleante en estos materiales, junto con magnesio como aleante secundario en muchos de los casos. 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 fisuración 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, de acuerdo con lo reportado por Pantelakis y Alexopoulos (2008).

La aleación de cobre Cu-DHP, por su gran atractivo industrial como conductor eléctrico, uno de los aspectos importantes de estudio tiene que ver con la formabilidad en frío del material como producto intermedio, con lo cual se debe hacer referencia a los procesos de conformado y las condiciones de trabajo que le dieron origen, para favorecer y facilitar su deformación a temperatura ambiente.

Dentro de los elementos químicos, el oxígeno en exceso no disuelto forma partículas de Cu_2O en la matriz de cobre, reduciendo su ductilidad. La solubilidad de oxígeno en cobre por encima de los $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ parece ser la responsable del cambio de mecanismo controlador a esta temperatura. Este cambio de mecanismo es favorecido en los metales de baja EFA donde la energía de activación para la difusión a través de dislocaciones es cercana a aquella para la difusión a través del cristal (0,8 veces). A temperatura ambiente, el oxígeno tiene una limitada solubilidad en cobre ($< 40\text{ ppm}$), favoreciendo que el exceso de oxígeno no disuelto precipite formando partículas de óxido de cobre, criterio reportado por Prasad *et al.* (2004); Torres y Cabello (2009).

3.3. Análisis de la metodología de cálculo

Según el modelo expuesto en la figura 2.2 del epígrafe 2.4 del capítulo 2 se determina la metodología de cálculo del proceso de soldadura. Para la unión de la aleación de aluminio AA 2024 y la del cobre Cu-DHP en una junta a tope, las piezas que se van a soldar se unen y se aplica una fuerza axial. Por la ecuación 2.1 se calculó la fuerza de calentamiento, se tuvo en cuenta las dos variantes de presión, 31 y 60 MPa. El área calculada por la ecuación 2.2 que es de $200,9\text{ mm}^2$ se mantiene constante para ambos valores de presión. Se tiene que para una presión de 31 MPa la fuerza axial de calentamiento sea de 180,956 N.m y para la presión de 60 MPa, la fuerza de calentamiento sea de 382,018 N.m.

Al unir los metales disímiles como el cobre y el aluminio, los problemas como los compuestos inter metálicos quebradizos y la alta conductibilidad térmica, pueden incrementarse. Como tal, los parámetros de la soldadura por fricción y sus condiciones deben seleccionarse de forma tal que se logre una unión fuerte y minimizar los desechos

cuidadosamente. Una liberación no uniforme de calor en las superficies de fricción puede causar la variación de temperatura en la superficie de fricción. La velocidad de movimiento relativo y la fuerza axial, determina la intensidad de liberación de calor.

Operando bajo condición no óptima del proceso pueden producir un rendimiento indeseable como; (a) la destrucción parcial y levantamiento de películas oxidadas, (b) calentamiento no uniforme en la sección de los especímenes soldados, (c) un aumento del calentamiento del metal y (d) el crecimiento de grano en la junta y en el calor en la zona afectada. Así, la fuerza de la junta soldada puede disminuir. La aplicación de ciclo de presión tiene las ventajas como el aumento en la juntura soldada y permite dirigir el proceso calorífico a más baja presión, criterio expuesto por Liu *et al.* (2011).

En el proceso de soldadura por fricción de torque continuo la fuente de calor 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 - cobre ($\mu = 0,33$) y fuerza axial necesaria de 180,956 y de 382,018 N/m², la fuerza de contacto es de 90,478 y 191,00 N/m² respectivamente.

Uno de los factores importantes en este proceso es la forma de las superficies de contacto que se unirán así como su acabado, ya que entre mayor sea el área de contacto, mayor será la resistencia de la unión. Con el fin de obtener la unión de soldadura entre las piezas, las superficies no tratadas necesitan ponerse en contacto entre sí; este contacto es eficiente porque la fricción corrige los problemas de contacto. El proceso de fusión normalmente no ocurre en las superficies en contacto, a pesar de que una pequeña cantidad de fusión puede producirse, la acumulación causada por el proceso de post-soldadura hace que sea imperceptible, según Paduan *et al.* (2012).

La proporción de carga soportada por regiones deformadas plásticamente, así como la relación entre la dureza y el modulo elástico, son parámetros importantes para este modelo, ya que durante la soldadura, la unión se forma bajo la fuerza compresiva de contacto de las dos piezas para producir calor por fricción y desplazar plásticamente el material de las superficies de empalme produciendo una película fundida en la cara interna, esto a la vez genera un estado plástico en 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, lo que se suele llamar "flash" de material expulsado, según consideraciones de Schmicker *et al.* (2014).

La distribución de la temperatura en la junta soldada se determinó por la ecuación 2.4, para un factor de eficiencia de 0,9; la velocidad de rotación de 2 400 r/min, el torque que se genera durante el proceso de 45,7 y 96,6 MPa respectivamente; un avance de 0,2 mm/rev constante en todo el proceso y potencia de 1,9 kW; calculada por la ecuación 2.5, se tiene que la temperatura es de 1 553,32 J/s.

Para 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. Un proceso eficiente requiere menos calor de entrada para el mismo empalme, dando por resultado una soldadura más fuerte. Una fuente de calor más pequeña que se mueve a una velocidad más rápida también implica un rato de detención mucho más reducido en cualquier punto particular. Si el tiempo de detención es demasiado corto, el proceso no se puede controlar manualmente. Las fuentes de calor más intensas que la de los arcos tienen tiempos de detención más cortos: por lo tanto, deben ser automatizadas, reportado por Lamorú (2017).

Las estructuras metalúrgicas producidas en la soldadura por fricción generalmente son las que resultan de la deformación a altas temperaturas. El tiempo a esas temperaturas es corto y los niveles que se alcanzan generalmente están por debajo del punto de fusión, según el criterio de Maalekian y Cerjak (2015).

Como el calor requerido puede generarse por los dos metales al frotarse uno con el otro y puede elevarse la temperatura al nivel dónde puedan soldarse las probetas sujetas a la fricción, en correspondencia con la ecuación 2.6 se determinó la distribución de temperatura en la zona de soldadura, para una temperatura al final del período calorífico de 350 °C, una temperatura ambiente de 32 °C, un tiempo de soldadura de 12 s, con una duración del período de calor de 2 s a una distancia de 2 mm de la superficie y teniendo en cuenta la difusividad térmica del aluminio de $1,14 \times 10^{-12} \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, se tiene que la temperatura que se genera en el contacto del aluminio – cobre es de 317,97 °C.

Por su alta conductividad térmica el aluminio puede transferir el calor rápidamente sobre el metal en donde se está realizando la soldadura, por lo tanto se debe aplicar el calor rápidamente para conducir el aluminio a la temperatura de soldadura, ya que a temperaturas de 2 038 °C, existencia la presencia del óxido de alúmina. Cuando la soldadura se solidifica se puede encoger hasta un 6 % creando deformaciones excesivas como grietas, la forma de soldadura, la cantidad de cordones afectan la cantidad de deformación en la soldadura, según Uday *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. Conforme la temperatura del material de soldadura aumenta, éste se ablanda, reduciendo el par y produciendo menos calor al material por trabajo mecánico, expuesto por Schmicker *et al.* (2014).

El desplazamiento radial se calculó por la ecuación 2.7, para una presión Hertziana en la distribución hemisférica de 1,42 calculada por la ecuación 2.8; con carga de 382,018 N.m, la constante de Lamé's de 1,44 MPa, calculada por la ecuación 2.9, el coeficiente de Poisson de 0,33 y un módulo de elasticidad del material más dúctil de 73,1 GPa y un radio de empalme de 0,008 m; en la unión aluminio - cobre este desplazamiento es de $3,022 \cdot 10^{-8}$ m.

En la fase final del proceso la distribución de temperatura en la superficie del contacto es casi uniforme, sin embargo, la temperatura en las áreas externas de las piezas es baja durante el tiempo entero de calentamiento del proceso. El valor máximo de temperatura se localiza por la mitad del radio de las piezas.

Inicialmente, la temperatura máxima es sensible en el punto exterior de la superficie calentada, mientras la temperatura mínima es sensible en el centro de rotación, la distribución de temperatura es directamente proporcional al desplazamiento radial. Cuando la fricción continúa, la distribución de temperatura se opone gradualmente hasta el estado inicial, en el futuro, la temperatura máxima se sensibiliza en el centro de rotación y la temperatura mínima se sensibiliza en el punto exterior de la superficie

calentada, la distribución de temperatura es inversamente proporcional al desplazamiento radial, criterio expuesto por Amit y Vikas (2014).

3.4. Comportamiento microestructural de la ZTMA

Para realizar el análisis microestructural de las muestras, se tuvo en cuenta las diferentes condiciones de soldadura a las que fueron sometidas. Todas las muestras fueron observadas a 50 μm . Las microestructuras analizadas en las figuras 3.1(a) y 3.1(b) se muestra la zona termomecánicamente afectada.

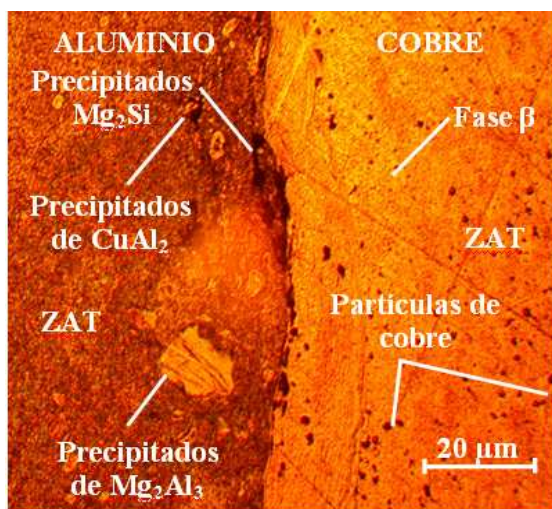


Figura 3.1(a). ZTMA (lado izquierdo).

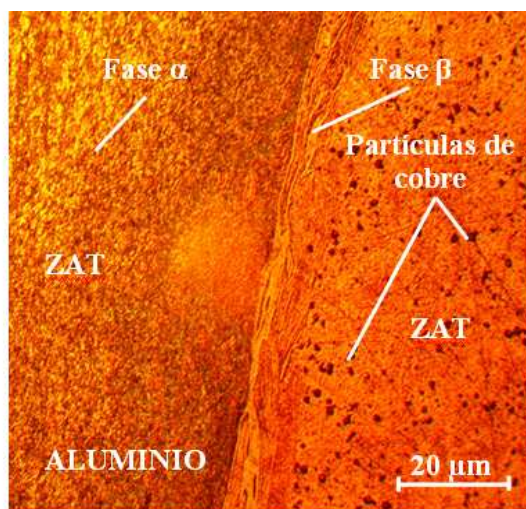


Figura 3.1(b). ZTMA (lado derecho).

En la estructura soldada y formada en la ZTMA, se observa un crecimiento de los granos y existe una marcada diferencia entre las estructuras de las dos muestras soldadas como se muestra en la figura 3.1(a) y 3.1(b), la microestructura en la unión de la ZTMA mantiene una continuidad metalúrgica. Con una soldadura similar, velocidad de la rotación a 1850 rpm, los tamaños de la partícula son pequeños y dispersaron a lo largo de la zona de metal de soldadura. En ambos materiales se observa la formación de una estructura globular, con pequeño redondeo de las dendritas, que tiende a formar esferoides, apreciable incluso a pocos aumentos, así como un pequeño incremento en el tamaño de las partículas de silicio acicular y fragmentación parcial de las mismas, justificado por el calentamiento de la muestra.

En ambas microestructura se puede observar que, de forma general el silicio se desplaza hacia la periferia, con el microconstituyente eutéctico líquido que ha fundido a menor

temperatura, esto hace que en las zonas centrales queden zonas sin apenas silicio eutéctico y que prácticamente se observen zonas que en su totalidad son fase alfa.

Los límites entre las diferentes zonas están indicados por la línea que se obtiene a todo lo largo de la costura soldada. Un refinamiento de grano α se observa en la región causado por el esfuerzo mecánico en la dirección de la fricción aplicada y en la zona ZATM los granos son alargados en dirección paralela a la frontera, que indica la deformación por efecto de la fricción y temperatura durante el proceso, lo que coincide con Schmicker *et al.* (2014).

3.4.1. Comportamiento microestructural de la ZTA

El comportamiento microestructural relacionado con las figuras 3.2(a) y 3.2(b) se corresponden con la ZTA.

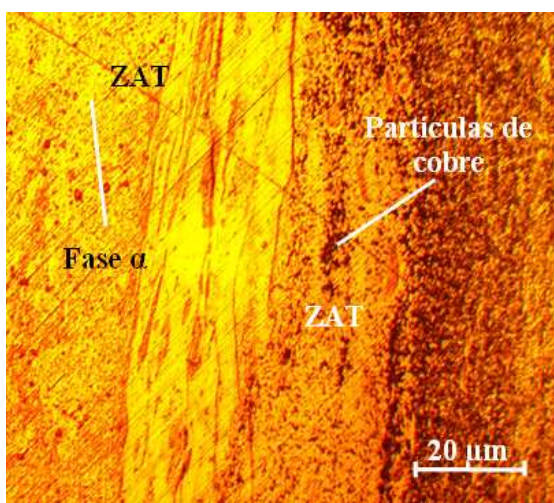


Figura 3.2(a). ZTA (lado izquierdo).

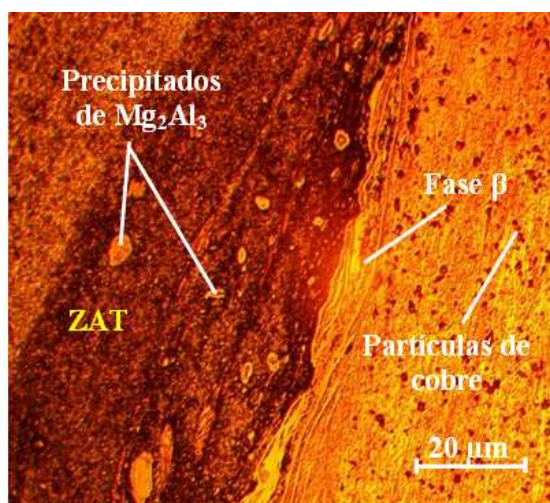


Figura 3.2 (b). ZAT (lado derecho).

La microestructura en la ZAT es similar a la del metal base, aunque con un refinamiento del grano, esto significa que la temperatura en la ZTA es inferior a la temperatura que se genera en la ZTMA, independientemente de esta condición, el material en la zona afectada por el calor no experimenta deformación plástica detectable durante el proceso, por lo tanto, cualquier evolución microestructural en esta región resulta del aumento de la temperatura, criterio que coincide con lo reportado por Elmer *et al.* (2004).

Puede observarse un refinamiento de grano en la unión de soldadura donde se encuentra la ZATM con el alargamiento de grano mostrando la evidencia de flujo de material durante el proceso de soldadura por fricción, la deformación plástica ocurre en la fase α ,

principalmente mediante deslizamiento de dislocaciones. En la ZAT, los cambios del tamaño de la partícula son causados por rompimiento y comportamiento de la deformación en el desprendimiento de la fase Mg_2Si y por los precipitados de $CuAl_2$. La distribución de pequeñas partículas de fase Mg_2Si y $CuAl_2$ tienen su incidencia en las propiedades de la dureza al aumentar la misma, la distribución de tales partículas por el metal de la soldadura provoca el incremento de la fuerza de compresión.

Las microestructuras observadas en las figuras 3.2(a) y (b), presentan una estructura de mayor tamaño en el crecimiento de grano. La fuerza impulsora del proceso del crecimiento de grano resulta de la disminución de la energía libre, como consecuencia de la reducción del área de la frontera de grano. El crecimiento de grano se produce por difusión cuando la temperatura es suficientemente elevada y el tiempo de tratamiento térmico suficientemente largo, lo que fue reportado por Fukui *et al.* (2004). De esta manera, al disminuir el número de granos por unidad de volumen, el tamaño de los mismos aumentan y existe una reducción del área de la frontera de grano y disminución de la energía almacenada por unidad de volumen, que lleva a que el material alcance un estado de elevada estabilidad termodinámica, reportado por Mangonon (2001).

3.5. Análisis de los parámetros de soldadura

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.

Tabla 3.1. Resultados de los parámetros de soldadura

Muestra	Área fricc mm ²	Veloc. rotación r/min	Tiempo fricción (s)	Temper fricc (°C)	Temper forja (°C)
1	153,8	2 400	150	350	327
2	153,8	2 400	155	348	325
3	153,8	2 400	160	350	325

Se observa en la tabla que la temperatura de fricción varía en correspondencia de los parámetros de soldadura, la 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, donde para un número de revoluciones de 2 400 r/min y presiones de 31 y 60 MPa y fuerza axial necesaria de 180,956 y de 382,018 N/m², la temperatura de fricción y la temperatura de forja son inversamente proporcional.

Cuando la temperatura aumenta, debido a la fricción y sobrepasa la temperatura de precipitación, esto provoca un sobre envejecimiento, el cual causa una coalescencia de los precipitados finos en la estructura de la aleación, esto 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, planteado además por Guzmán-Romero *et al.* (2017).

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, según Guzmán Romero (2017).

La tasa de generación de calor y la disipación de calor se equilibran entre sí en un valor constante que depende de la configuración del proceso, particularmente la velocidad de rotación. Este factor importante en la soldadura de metales diferentes, donde es posible formarse compuestos intermetálicos. El mejor procedimiento para bajar la temperatura pico sería adoptar velocidades más bajas de rotación, lo que ha sido reportado por Singh-Sidhu y Singh-Chatha (2012).

3.6. Análisis de la dureza en las diferentes zonas

La dureza Vickers (HV) ha de considerarse como una dureza plástica ya que se ha determinado a partir de la huella permanente o residual, es decir sobre la deformación plástica, obtenida en la superficie del material después de la penetración. En la tabla 3.2 se reportan los resultados de dureza obtenidos para el material de acuerdo a cada condición de selección de las muestras.

Tabla 3.2. Dureza en las uniones realizadas

Probeta	Dureza MB Al (HV)	Dureza MB Cu (HV)	Dureza ZAT Al (HV)	Dureza ZAT Cu (HV)	Dureza ZTMA (HV)
1	84±5	89,75±5	143	110	156
2	84±5	89,75±5	145	112	157
3	84±5	89,75±5	145	111	157

En la tabla se observa la variación de la dureza que experimentan las uniones soldadas en las diferentes zonas que se forman en la soldadura luego del tiempo de calentamiento y forja y la aplicación de la 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.

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 de la fase Mg_2Si y de $CuAl_2$ vanadio. Esta zona presenta una estructura de grano más fina motivado al rápido enfriamiento del pozo de soldadura.

Al determinar las variaciones asociadas a la geometría deformada, se observó que no se alcanza la misma deformación en todos los puntos de las muestras. En general solo se presentó una pequeña variación en los valores de dureza de las zonas seleccionadas, perteneciendo ambas a una misma región del volumen.

3.6.1. Procesamiento estadístico de los datos

A partir de los datos expuestos en el capítulo 2 para el diseño de experimentos, se determinó la variación de la longitud de las probetas durante el proceso de soldadura por fricción. En la tabla 3.3 se muestra el resultado obtenido.

Tabla 3.3. Resultados de las variaciones de la longitud.

Tiempo fricción t (s)	Dimensión inicial		Valores medidos después de la soldadura						
	L (mm)		L _{últ} (mm)	L ₁ (mm)		ΔL_1 (mm)		$\Delta L_{últ}$	HV ZTMA
	Al	Cu		Al	Cu	Al	Cu		
4	100	100,2	192	94	98	8	2,2	10,2	140
5	99	100	190	92	98	7	2	9,0	142
6	99,5	100,1	191	92	99	8,5	1,1	9,6	145
7	99,5	100	191	93	98	6,5	2	8,5	148
8	100	99,5	190	92	98	8	1,5	9,5	150
9	98	99	188	91	97	7	1	8,0	153
10	99,5	98	187	91	96	8,5	2	10,5	156
11	100	99,5	192	95	97	5	1,5	6,5	157
12	100	99,5	192	95	97	5	2,5	7,5	157

Al establecer las variaciones de las longitudes que se obtienen durante el proceso de soldadura por fricción para lograr la unión metalúrgica entre la aleación de aluminio AA 2024 y la aleación de cobre Cu-DHP, se puede observar que por efecto de la fricción, que genera alta temperatura y la fuerza axial, la aleación de aluminio tiene la tendencia de acortarse más que el cobre antes de lograrse la soldadura, esto se atribuye a que el primero presenta una temperatura de fusión de 660 °C, que representa el 60 % con respecto a la del segundo.

3.6.2. Análisis de varianza

Se modeló estadísticamente a través del análisis de regresión, la influencia del tiempo del proceso y la variación de la longitud en el comportamiento de la dureza que se obtiene en la ZTMA de las aleaciones. Se realizó el análisis de varianza, según el método de Fisher, para evaluar el nivel de significación de las variaciones provocadas por los diferentes experimentos. En la tabla 3.4 se muestran los resultados del análisis de regresión realizado.

Tabla 3.4. Resultados del análisis de regresión.

Análisis de Regresión Múltiple					
Variable dependiente: Dureza					
Error estadístico					
Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
Constante	714,238	260,543	2,74134	0,0518	
L Al	2,36366	3,03245	0,779456	0,4793	
L Cu	-8,15447	3,59764	-2,26661	0,0860	
L _{últ}	0,203813	2,05325	0,0992638	0,9257	
$\Delta L_{últ}$	-3,04114	1,15726	-2,62789	0,0583	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	317,019	4	79,2548	17,10	0,0088
Residuo	18,5365	4	4,63413		
Total (Corr.)	335,556	8			
R-cuadrado = 94,4759 porcentaje					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 88,9517 porcentaje					
Error estándar de est. = 2,1527					
Error absoluto medio = 1,30058					
Estadístico de Durbin-Watson = 1,68819 (P=0,1318)					
Autocorrelación residual en Lag 1 = 0,027372					

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la dureza y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Dureza} = 714,238 + 2,363 \cdot L_{Al} - 8,154 \cdot L_{Cu} + 0,203 \cdot L_{\text{últ}} - 3,041 \cdot \Delta L_{\text{últ}}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,01; existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99 %. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 94,4759 % de la variabilidad en la dureza. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 88,9517 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 2,1527. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones relacionado con la dureza. El error absoluto medio (MAE) de 1,30058 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es superior a 0,05; no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

3.6.3. Análisis de las fases presentes en la microestructura

Se realizó el análisis de los microconstituyentes presentes en la microestructura obtenida luego del proceso de soldadura. En la figura 3.3 se corresponde con la misma.

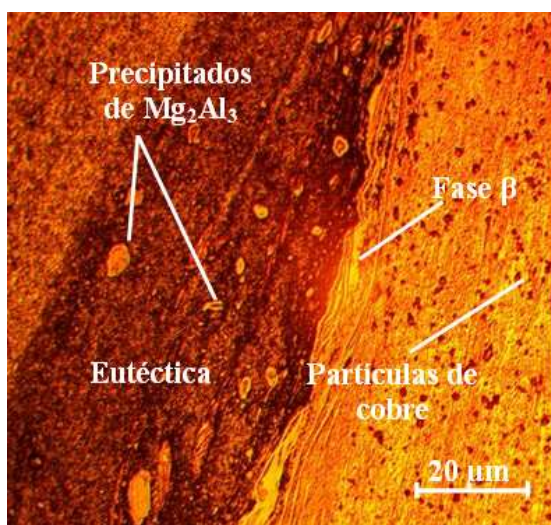


Figura 3.3. ZTA

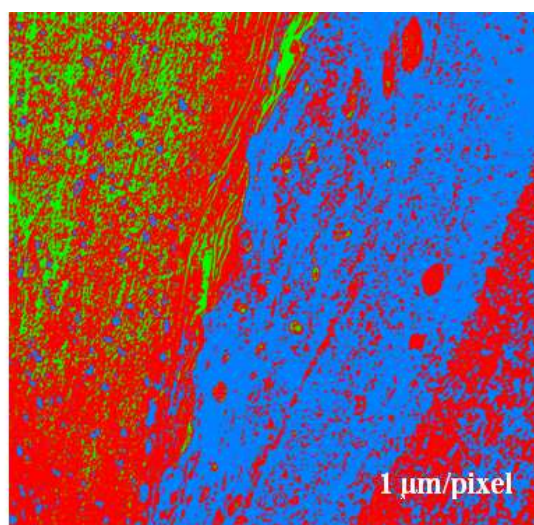
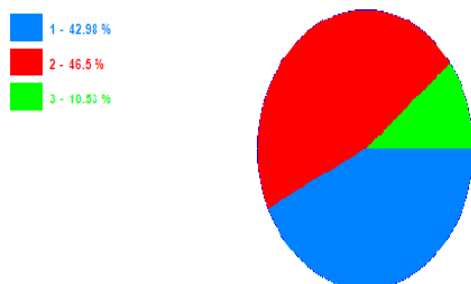


Figura 3.3. Fases presentes.

Distribución de las fases:



En la tabla 3.5 se muestran los microconstituyentes con el área que ocupan en la microestructura.

Tabla 3.5. Datos de las fases de los microconstituyentes para la muestra

Datos de la fase		
Microconstituyentes	Área μm^2	Área %
Eutéctica	361 744	42,98
Estructura basta	391 390	46,5
Fase β	88 594	10,53

En la figura se muestra el porciento de microconstituyentes presentes en la microestructura luego del proceso de unión. Compuesta por un 42,98 % de eutéctica, un 46,5 de una estructura basta y en menor porciento de 10,53; la fase β .

3.7. Análisis económico

Los costos se definen como aquellos recursos que aplicamos en la fabricación de los bienes o servicios que la empresa ofrece, por el contrario los gastos serían aquellos recursos, aplicados en el período contable, en los que se incurrió para conseguir los ingresos de un determinado período o que fueron necesarios para que la empresa pudiera existir durante el mismo. En la tabla 3.6 se muestran los costos por concepto de fabricación por soldadura de fricción.

Tabla 3.6. Costo de fabricación de la soldadura por fricción

No	Operación	Equipo (Torno)	Tiempo en horas	Tarifa horaria (CUP)	Importe (CUP)
1	Torneado	16 K 20	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	Pulir	Lijas	1	1,67	1,67
5	Observación	Microscopio	1	1,67	1,67
Total					9,41

Los elementos de costo de un producto o sus componentes son los materiales directos, la mano de obra directa y los costos indirectos de fabricación, esta clasificación suministra la información necesaria para la medición del ingreso y la fijación del precio del producto. La tabla 3.7 muestra los cálculos de la mano de obra directa.

Tabla 3.7. Costos de la mano de obra directa

Costos	Importe (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
Total	12,00

Los materiales directos son aquellos que se consideran necesariamente cada vez que se produce una unidad de producto. Los costos relacionados a esta actividad se refieren fundamentalmente a materias primas, mano de obra directa y empleo del equipo productivo. En la tabla 3.8 se muestran los costos por este concepto.

Tabla 3.8. Costos de los materiales directos

Nro	Materiales	Cantidad (kg)	Precio material (CUP)	Importe material (CUP)
1	Barra de aluminio	0,03	\$ 0,054	\$ 0,00162
2	Barra de cobre	0,03	\$ 0,053	\$ 0,00159
3	Lija No 180	0,50	0,44	0,22
4	Lija No 400	0,50	0,457	0,237
5	Lija No 600	0,50	0,27	0,135
6	Hoja segueta	1	0,73	0,73
Total				1,32

En la tabla 3.9 se muestra el costo total del consumo de la energía eléctrica, donde se consideraron los equipos que intervienen durante el proceso de soldadura por fricción.

Tabla 3.9. Consumo de energía eléctrica

No	Equipo	Horas por consumo eléctrico	Precio kWh horas (CUP)	Importe kWh (CUP)
1	Torno	0,017	0,025	0,00017
2	Microscopio	1	0,32	0,32
Total				0,32

En la tabla 3.10 se muestra el costo total del proceso de fabricación por soldadura

Costos totales	CUP
Mano de obra directa	12,00
Materiales directos	1,32
Energía eléctrica	0,33
Total	13,65

El costo total en los que se incurre es de 13,65 CUP.

3.8. Impacto ambiental

El impacto que producen al medio ambiente los procesos tecnológicos de fabricación que se ejecutan en las grandes y pequeñas industrias, así como, en talleres estatales y particulares, en muchos casos no es perceptible para el hombre común y a veces no lo es ni para aquel que trabaja en los mismos, a pesar del trabajo de divulgación que se hace de los problemas medioambientales que éstos generan y las causas que los ocasionan.

Algunos de los procesos tecnológicos de producción que se deben estudiar y valorar cuidadosamente son los de elaboración de los metales por corte, mediante el torneado, fresado, taladrado, rectificado y acepillado. Operaciones que se ejecutan en casi todas las fábricas y talleres del país, y cuya influencia sobre el consumo energético y gasto de materiales es elevado. En estas operaciones la productividad y calidad de las piezas que se elaboran, dependen, entre otros parámetros, del correcto cálculo y establecimiento de los elementos del régimen de corte.

Incluidas en las actividades anteriores se obtienen polvos y líquidos producidos de los procesos de corte y maquinado que también reciben su tratamiento de residuales, pero que a diferencia de los anteriores no se toman en consideración. Se adicionan ruidos y vibraciones en correspondencia con los procesos que se realicen. La soldadura adiciona la emanación de pequeños volúmenes de gases a este conjunto de residuales.

La corrosión galvánica se presenta, cuando dos metales diferentes en contacto o conectados por medio de un conductor eléctrico, son expuestos a una solución conductora, la misma es generadora de afectaciones al medio ambiente. Fallas violentas pueden producir incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos, contaminaciones debido a productos del equipo corroído o bien un producto de la corrosión misma, agotamiento de los recursos naturales, tanto en metales como en combustibles usados para su manufactura.

3.9. Conclusiones del capítulo 3

- Los parámetros de soldadura calculados permiten establecer que es posible realizar la unión de la aleación AA 2024 y de la aleación de cobre Cu-DHP bajo estas condiciones, con un acortamiento más gradual en el aluminio.
- Quedaron establecidas las características metalúrgicas de las aleaciones soldadas, donde se determinó que los granos tienden a mantener diferentes comportamientos en correspondencia con las zonas analizadas, la zona termomecánicamente afectada y la zona afectada térmicamente.
- Los cambios en las microestructuras y la morfología están asociados a la acción de los parámetros de soldadura empleados, donde la velocidad de soldadura, la temperatura de forja y de fricción provocan la interacción entre los materiales y provocan la unión.



CONCLUSIONES GENERALES

- ✚ Con número de revoluciones de 2 400 r/min, presiones de 31 y 60 MPa y una temperatura de 1 553,32 J/s; se logró la unión bimetálica entre la aleación AA 2024 y la del cobre Cu-DHP, mediante la soldadura por fricción radial o de torque.
- ✚ En las microestructuras formadas en la unión metalúrgica entre el aluminio y el cobre, en la ZTMA y la ZTA, se obtuvo la presencia de precipitados Mg_2Si y precipitados de Mg_2Al_3 del lado de la aleación de aluminio y la fase β con precipitados de cobre en la aleación de cobre, siendo los dos precipitados del aluminio elevadores de la dureza durante el proceso de fricción.
- ✚ Se determinó que durante el proceso de soldadura por fricción entre el aluminio y el cobre, el primero por efecto de la fricción, disminuye un 6 % más que el segundo antes de lograr la unión metalúrgica, pero en la ZTMA, ambos incrementan la dureza hasta HV 157, luego de una reducción de un 4 %.
- ✚ El efecto de la corrosión galvánica en la empresa eléctrica genera pérdidas a la economía y al medio ambiente, ya que puede provocar fallas violentas y producir incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos.
- ✚ Al realizar la valoración económica para estimar los costos en los que incurre el proceso de soldadura por fricción radial de ambas aleaciones, donde se consideró las operaciones por donde transita este proceso, el costo total es de 13,65 CUP.



RECOMENDACIONES

- ✚ Realizar en próxima investigación la unión metalúrgica del aluminio y el cobre con el empleo de la soldadura por explosión teniendo en cuenta que ambas aleaciones presentan diferentes puntos de fusión.
- ✚ Analizar en una próxima investigación la posibilidad de determinar por el método de los elementos finitos (MEF) las tensiones que se originan durante la soldadura por fricción radial o de torque de las aleaciones de aluminio y del cobre, según los parámetros establecidos en el presente trabajo.
- ✚ Someter a otros ensayos mecánicos como el de tracción, las muestras de aluminio y cobre soldadas mediante soldadura por fricción, para determinar su resistencia mecánica.

Referencias bibliográficas



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdel-Moneim, M.; Serag, S.; Nasser, A.; Moustafa, A. Axial force measurements for the friction welding of aluminium tubes,” Wear vol. 85, pp. 339-346, and 1983.
2. Aguilar, 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
3. Albrecht, P.; Hall, T. Atmospheric corrosion resistance of structural steels. Materials in Civil Engineering 15(1): 2-24, 2003.
4. Almeida, E.; Santos, D. Anticorrosive painting for a wide spectrum of marine atmospheres: Environmental-friendly versus traditional paint systems. Progress in Organic Coatings 57 (5): 11-22, 2006.
5. Amit, H.; Vikas, C. An Investigation on the effect of axial pressures on the mechanical properties of friction welded dissimilar steels. Advances in Mechanical Engineering, 2014.
6. Ananthapadmanaban, D. A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints [J]. Materials and Design, 2009, 30: 2642–2646.
7. Biljana, S.; Svetislav, M.; Ćirić, R. Physical model of the friction welded joint of different types of steel. FME Transactions 36 (3): 93-97, 2008.
8. Buffa, G.; Fratini, L.; Pasta, S.; Shivpuri, R. On the thermo-mechanical loads and the resultant residual stresses in friction stir processing operations, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57 (1): 287-290, 2008.
9. Burca, M.; Glita, S.; Lucaciu, I.; Tunea, D. Magda, A. Research regarding the friction welding of heterogenous materials. Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume IX (XIX): 128-132, 2010.
10. Burgos, A. Soldadura por fricción 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>.
11. Bhamji, I.; Moat, R.; Preuss, M.; Threadgill, P.; Addison, A.; Peel, M. Linear friction welding of aluminium to copper. Science and Technology of Welding and Joining, 7 (4): 314-320, 2012.
12. 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.
13. Cabot, P. Soldadura por fricción agitación (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>
14. Casillas, A. Máquinas. Cálculo de taller. Ediciones Máquinas. Editorial Científico Técnicas. 1989. P 133.
15. Cheng, C. Welding Journal: 233s-240s, 1963.
16. Duffin, F.; Bahrani, A. Frictional behaviour of mild steel in friction welding, 26 (4): 53-74, 1973.
17. Elmer, J.; Palmer, T.; Babu, S.; Zhang, W. Phase transformation dynamics during welding of Ti-6Al-4V. Journal of Applied Physics. 95 (12):8327-8339, 2004. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1737476>.
18. 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.
19. Feliu, S. Morcillo, M. Corrosión y protección de los metales en la atmósfera, Ed. Bellaterra, Barcelona, 1982.
20. Fuji, A.; Kimura, M.; North, T.; Ameyama, K.; Aki, M. Mechanical Properties of Titanium 5083 Aluminum Alloy Friction joints”, Material. Science. Technology. 13 (3): 673-678. 1997.
21. Furukawa, Minoru; Fukuda, Yukihide; Oh-ishi, Keiichiro; Horita, Zenji; Langdon, Terence G. An investigation of deformation in copper single crystals using equal-channel angular pressing. Materials Science Forum. 503-504(Nanomaterials by Severe Plastic Deformation), 113-118, 2006.
22. Gulenc, B. Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method, Mater. Des. 29 (1), 275-278, 2008.
23. Guzmán-Romero, E. Efecto del proceso de soldadura por fricción radial en una aleación de aluminio AA 5754. Tesis en opción al título de máster en electromecánica. ISMMM, 2017.
24. Guzmán-Romero, E.; Fernández-Columbié, T.; Alcántara-Borges, D.; Rodríguez-González, I. Efecto de la velocidad angular y la presión en el proceso de soldadura



- por fricción radial en una aleación de aluminio AA 5754. *Minería y Geología*, 33 (3): 312-325, 2017.
25. Grong, O. *Metallurgical Modeling of Welding*. London (UK). The Institute of Materials, 1994.
26. Kaibyshev, R.; Shipilova, K.; Musin, F.; Motohashi, Y. Continuous dynamic recrystallization in an Al–Li–Mg–Sc alloy during equal-channel angular extrusion. *Mater. Sci. Eng. A* 396, 341-351, 2005.
27. Kawai, G.; Ogawa, K.; Tokisue, H. Friction Welding of 6061 Aluminum Alloy Pipe to S25C Carbon Steel Pipe. 1997. Documento en línea disponible en: <http://www.isopec.org/publications/journals/ijope-8-2/abst-8-2-p144-JC-208Kawai.pdf>.
28. 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.
29. Khalid, H.; Janaki Ram, G.; Phanikumar, G.; Prasad, K. Microstructure and tensile properties of friction welded aluminum alloy AA7075-T6” *Materials and Design*, 31 (6): 2375-2380, 2010.
30. Lamorú, I. Deformación superplástica de la aleación de titanio TI - 6 AL - 4 V mediante soldadura por fricción rotativa, Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico. ISMMM, 2017.
31. Liang, Chen, Ghao, Yu Hongmei. Crevice corrosion of Cu-based shape memory alloy in saline solution. *Journal of Dalian University of Technology*. 37 (3): p 265, 1997.
32. Liu, H.; Shen, J.; Zhou, L.; Zhao, Y.; Liu, C.; Kuang, L. Microstructural characterisation and mechanical properties of friction stir welded joints of aluminium alloy to copper, *Science and Technology of Welding and Joining*, 16 (1): 92-98, 2011.
33. 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*. 501 (1–2): 119 - 124, 2009.
34. Longhurst, A. Torque control of friction stir welding for manufacturing and automation.



- Int J Adv Manuf Technol , 905 - 913. 2010.
35. Maalekian, M. Friction welding - critical assessment of literature. Science and Technology of Welding and Joining. 12 (3): 738 - 759, 2007.
36. Maalekian, M.; Cerjak, H. Modelling the orbital friction welding of pearlitic steel bars, Trends in Welding Research, Proceedings of the 8th conference, pp. 736 - 741, 2015.
37. Mangonon, P. Ciencia de materiales: Selección y diseño. Pearson Educación. México. 2001, p. 563 - 580.
38. Midling, O.; Grong, O. Acta Metallurgica Materialia, 42 (5): 161 1-1 622, 1994.
39. Mishra, R.; Ma, Z. Friction stir welding and processing, Mater. Sci. Eng. R, 50 (1-2): 1-78, 2005.
40. Mishra, A.; Richard, V.; Gregori, F.; Asaro, R.; Meyers, M. Microstructural evolution in copper processed by severe plastic deformation. Materials: Properties, Microstructure and Processing. A 410-A411 290-298, 2005.
41. Mishra, R.; De, P.; Kumar, N. Friction stir processing. In Friction Stir Welding and Processing (pp. 259-296). Springer International Publishing. 2014.
42. Mishra, R.; Mahoney M. Friction stir welding and processing, ASM International, 2007.
43. Mohammed, A.; Kulkarni, A.; Sathiya, P.; Sunkulp, G. The impact of heat input on the strength, toughness, microhardness, microstructure and corrosion aspects of friction welded duplexstainless steel joints, “ Journal of Manufacturing Processes, 18 (6): 92-106, 2015.
44. Morcillo, M. Fundamentos sobre protección anticorrosiva de metales en la atmósfera. Corrosión y protección de metales en las atmósferas de Iberoamérica. Parte II Protección anticorrosiva de metales en las atmósferas de Iberoamérica (Red Temática Pátina, XV.D/CYTED). Madrid, 2002.
45. Muralimohan, C.; Haribabu, S.; Hariprasad-Reddy, Y.; Muthupandi, V.; Sivaprasad, K. Evolution of microstructures and mechanical properties of dissimilar materials by friction welding, Procedia materials Science, 5 (2): 1107-1113, 2014.
46. 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.
47. Nicholas, E. Friction Processing Technologies. Welding in the World, Vol. 47 (11-12): 2 - 9, 2003.



48. Oberle, T.; Loyd, C.; Calton, M. Caterpillar's Inertia Welding Process, SAE Trans., 3 (75): 28-35, 1967.
49. Oosterkamp, A.; Oosterkamp, L.; Nordeide, A. Kissing bond' phenomena in solid-state welds of aluminum alloys, Welding Journal (Miami Fda), 83 (8): 225-S, 2004.
50. 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.
51. Paduan, E.; Piorino, F.; Chen, Y. Welding of AA 1050 aluminium with AISI 304 stainless steel by rotary friction welding process”, Journal of aerospace technology management, 3 (1): 301-306, 2010.
52. Paduan, E.; Piorino, F.; Ying, C.; Castorino, E. Experimental determination of temperatura during rotary friction welding of AA 1050 aluminium with AISI 304 Stainless Steel, J. Aerosp. Technology Management, Sao José dos Campos, 4 (1): 61-67, 2012.
53. Pantelakis, S.; Alexopoulos, N. Assessment of the ability of conventional and advanced wrought aluminum alloys for mechanical performance in light-weight applications, Materials & Design, 29 (1): 80-91, 2008.
54. Paventhan, R.; Lakshminarayanan, P.; Balasubramanian, V. Prediction and optimization of friction welding parameters for joining aluminium alloy and stainless steel,” Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 21 (9): 1480-1485, 2011.
55. 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. 51 (16): 4791–4801, 2003.
56. Ptak, W. The effect of friction welding self-regulation process on weld structure and hardness. Archives of Foundry Engineering. 10 (3): 115-118, 2010.
57. Prasad, Y.; Rao, K. Mechanisms of high temperature deformation in electrolytic copper in extended ranges of temperature and strain rate. Materials Science and Engineering A. 2004; pp. 374335–341.
58. 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](#).

59. Rahmi, M.; Abbasi, M. Friction stir vibration welding process: Modified version of friction stir welding process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 90 (11) 1-11, 2016.
60. Rai, R.; De, A.; Bhadeshia, H.; DebRoy, T. Review: friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding Joining*. 16 (4): 325-342, 2011.
61. 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.
62. Revie, R.; Uhlig, H. *Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. Wiley & Sons, Inc: USA. 2008.
63. Rich, T.; Roberts, T. *Metal Construction and British Welding Journal* 50 (3): 93-98, 1971.
64. Roberge, P. *Corrosion engineering principles and practice, Seawater*. New York, NY: McGraw-Hill; 276-277, 2008.
65. Romero, A. Comportamiento microestructural de una unión disímil realizada por proceso de soldadura de rotación continua. Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico. ISMMM, 2017.
66. Salazar-Jiménez, J. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Tecnología en Marcha*. 28 (3): 127-136, 2015.
67. Serkan, B.; Musa, K.; İhsan, K. Friction welding of dissimilar AISI 304 and AISI 8640 steels. *European Journal of Technic*. 6 (2): 79-86, 2016.
68. 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.
69. Singh-Sidhu, M.; Singh-Chatha, S. Friction Stir Welding – Process and its Variables: A Review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2 (12): p.275, 2012.
70. Sutton, M.; Reynolds, P.; Wang, D.; Hubbard, C. A Study of Residual Stresses and Microstructure in 2024-T3 Aluminum Friction Stir Butt Welds, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 124 (2): p. 215, 2002.
71. Schmicker, D.; Persson, P.; Strackeljand, J. Implicit geometry meshing for the simulation



- of rotary friction welding, journal of computational physics 270, pp. 478 -489, 2014.
72. Schneider, J.; Nunes, A. Jr. Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld, Metall. Mater. Trans. B. 35 (14): 777 - 783, 2004.
73. Schmicker, D.; Persson, P.; Strackeljan, J. Implicit Geometry Meshing for the simulation of Rotary Friction Welding, Journal of Computational Physics, 270 (123): 478-489, 2014.
74. Schweitzer, P. Fundamentals of Corrosion – Mechanisms, Causes and Preventive Methods. Taylor & Francis Group, LLC: USA. 2010.
75. 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.
76. Sluzalec, A.; Sluzalec, A. International Journal of Heat and mass Transfer 36 (6): 1 583-1 587, 1993.
77. Torres, M.; Cabello, S. Correlación esfuerzo de fluencia-microestructura a temperatura ambiente de un cobre puro proveniente de laminación en caliente. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, S1 (1): 193-203, 2009.
78. Steuwer, M.; Peel, J.; Withers, P. Dissimilar friction stir welds in AA5083–AA6082: The effect of process parameters on residual stress, Materials Science and Engineering: A, 441 (1-2): 187-196, 2006.
79. 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 e la World Wide Web en: <http://www.inti.gob.ar/tecnointi/CD/info/pdf/530.pdf>.
80. Uday, M.; Ahmad-Fauzi, M.; Zuhailawati, H.; Ismail, A. Effect of welding speed on mechanical strength of friction welded joint of YSZ-alumina composite and 6061 aluminium alloy, Materials Science and Engineering A, 528 (134): 4753-4760, 2011.
81. Uday, M.; Ahmad-Fauzi, M.; Mohd, N.; Srithar, R. An insight into microstructural evolution during plastic deformation in AA6061 alloy after friction welding with alumina-YSZ composite, Mechanics of Materials, 91 (13): 50-63, 2015.
82. 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.
83. Vairamani, G.; Senthil-Kumar, T.; Malarvizhi, S.; Balasubramanian, V. Application of response surface methodology to maximize tensile strength and minimize interface hardness of friction welded dissimilar joints of austenitic stainless steel and copper alloy,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 23 (11): 2250–2259, 2013.
84. Valcarce, M.; Vázquez, M.; de Sánchez, S. Determinación de la velocidad de corrosión de latón al aluminio en agua potable. CONGRESO CONAMET/SAM-2004.
85. 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.
86. Vill, V. Welding metals by friction. Foreign Technology Division Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1972.
87. Vinoth Kumar, M.; Balasubramanian, V. Microstructure and tensile properties of friction welded SUS 304HCu austenitic stainless steel tubes,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 113 (32): 25-31, 2014.
88. Wanjara, P.; Dalgaard, E.; Trigo, G.; Mandache, C.; Comeau, G.; Jonas J. Linear friction welding of Al–Cu: Part 1 – process evaluation’, *Can. Metall. Q.* 50 (4), 350-359, 2011.
89. Weglowski, A. Friction stir processing - analysis of the process. *Archives of metallurgy and materials*. 56 (12): 779 - 788, 2011.
90. Workman, G.; Nicholas, E. Friction welding aluminium and its alloys to various materials’, *Met. Mater.*, 2 (3): 138-140, 1986.
91. Withers, P.; Bhadeshia, H. Residual stress. Part 1–measurement techniques, *Materials Science and Technology*, 17 (4): 355–365, 2001.
92. Zhou L, Liu HJ, Liu QW. Effect of process parameters on stir zone microstructure in Ti - 6Al -4V friction stir welds. *Journal of Materials Science*. 45 (1): 39 - 45, 2010.