

## **DETERMINACIÓN DEL TIEMPO EN LA ETAPA DE CALENTAMIENTO PARA OBTENER LA UNIÓN DE UN ALUMINIO AA 6063 SOLDADO POR FRICCIÓN**

Grisel Cordero, Rosmary Rodríguez, Luis Piña  
Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”  
Vicerrectorado Barquisimeto  
[gcordero61@gmail.com](mailto:gcordero61@gmail.com)

**RESUMEN.** La soldadura por fricción (FRW) tiene la finalidad de lograr uniones en materiales con perfiles cilíndricos que no pueden soldarse de forma convencional. El objetivo de esta investigación fue determinar el tiempo en la etapa de calentamiento para lograr unir barras de Aluminio AA 6063 soldado por FRW. Se realizaron pruebas a diferentes tiempos de calentamiento manteniendo constantes la presión y la velocidad. Se determinó que a mayor tiempo en la etapa de calentamiento se produce mayor fricción entre las barras lo que ocasiona mayor deformación plástica y aumenta el porcentaje de unión. Por otro lado, el rango de tiempo en la etapa de calentamiento donde se obtuvo mayor porcentaje de unión se encuentra entre 140 y 180s, alcanzando la unión completa de las barras a 160s, además la variación del avance del mandril en la etapa de forjado no produce un aumento significativo en el porcentaje de unión.

---

**Palabras clave:** Soldadura por fricción, Aluminio AA6063, Tiempo de calentamiento.

## **DETERMINATION OF THE TIME AT THE STAGE OF WARMING FOR FRICTION WELDING OF ALUMINUM AA 6063**

**ABSTRACT:** Friction Welding (FRW) aims to achieve joints in materials with cylindrical profiles that can't be welded conventionally. The objective of this research was to determine the time at stage of warming to achieve link bars of aluminum AA 6063 soldier by FRW. Tests were performed at different times of warming, while maintaining constant pressure and speed. It was determined that more time at the stage of warming produces greater friction between the bars which causes more plastic deformation and increase the percentage of union. On the other hand, the time range in the stage of warming earning higher percentage of union is between 140 and 180s, reaching the full union of the rods to 160s, also the variation of the mandrel's advance at the stage of forged produces a not significant increase in the percentage of union.

---

**Keywords:** Friction Welding, Aluminum AA6063, Warm-up time.

## 1. INTRODUCCIÓN

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, produciendo calor y desplazando plásticamente material de empalme, lo que produce la unión. Con este método no se requiere metal de aporte, fundente, ni gas protector, ofrece buenas propiedades mecánicas y se puede automatizar fácilmente con la utilización de máquinas y herramientas ya existentes; además es una técnica generosa con el medio ambiente por no producir gases tóxicos, radiación, ni chispa. Debido a que este tipo de soldadura es un proceso nuevo en nuestro país, se presenta la necesidad de conocer los valores de las variables involucradas que permitan uniones de calidad (específicamente para aleaciones de Aluminio AA 6063), siendo el tiempo en la etapa de calentamiento un factor determinante en la calidad de la unión.

Para ello se estableció un rango de operación mediante pruebas piloto, tanto para el tiempo en la etapa de calentamiento, como para la presión de forjado, se analizó el porcentaje de unión, calidad superficial y defectología de las uniones; así como también se realizaron ensayos de resistencia a la tracción. A continuación, se registraron los aspectos más resaltantes de esta investigación de manera detallada; comenzando por el planteamiento del problema, mostrando objetivos propuestos y haciendo la revisión bibliográfica correspondiente, para posteriormente presentar la metodología a seguir que permita la obtención de los objetivos planteados.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La soldadura por fricción (FRW) es una técnica que se encuentra en proceso de desarrollo en nuestro país. Este tipo de soldadura aprovecha el calor generado por la frotación de dos piezas (una se mantiene estacionaria y la otra en movimiento), con la finalidad de poder unir materiales que presentan dificultad de soldadura por fusión. El control de parámetros como tiempo en la etapa de calentamiento, presión de forjado, velocidad de rotación y precarga suministrada, son factores fundamentales en la calidad de las uniones que se realizan mediante este proceso y es por ello que se busca establecer los valores adecuados que permitan alcanzar una completa unión en las barras. Con la realización de esta

investigación se pretende determinar el tiempo en la etapa de calentamiento más adecuado que permita conseguir una unión completa mediante la técnica de fricción en barras de Aluminio AA 6063.

### 3. DESARROLLO

#### *a. Antecedentes*

Dentro de los antecedentes se tienen a Kawai y otros [1] 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 igual forma Sathiya y otros [2] elaboraron un trabajo con el que se logra la obtención de una soldadura por fricción del acero austenítico AISI 304 y la optimización de los parámetros de soldadura por fricción. Esta investigación mostró que las juntas de fricción procesadas exhibían una fuerza comparable con el material base y la fuerza conjunta disminuía al aumentar el tiempo de la fricción, además del aumento de la microdureza Vickers con el tiempo de fricción creciente.

De la misma manera Paduan, Piorino y Ying [3] ejecutaron un trabajo con el propósito de evaluar el desarrollo de articulaciones de estado sólido de estos materiales, realizando pruebas con diferentes parámetros de proceso de soldadura y se analizaron por medio de ensayos de tracción, microdureza Vickers, pruebas metalográficas y SEM-EDX, dando como resultado que la fuerza de las articulaciones varía con el tiempo de soldadura y el uso de presiones diferentes, aumentado la fricción; además de presentar propiedades mecánicas superiores a la del Aluminio AA1050 con fracturas que ocurren en el mismo, fuera de la interfaz de la unión. El análisis por EDX en la interfaz de la unión demostró interdifusión que se produce entre los principales componentes químicos de los materiales involucrados.

Así mismo Méndez [4] efectuó la investigación sobre el efecto de la velocidad de rotación en la calidad de la unión de la soldadura por fricción en una aleación de Aluminio AA 6063 encontrando que las uniones realizadas a 2000RPM presentaron mayor material deformado y mayor número de granos de

pequeño tamaño en la zona de la unión debido a la posible recristalización, mientras que la zona termomecánicamente afectada (ZATM), presentó una ligera tendencia a aumentar el tamaño y la cantidad de precipitados en comparación a las demás uniones realizadas a velocidades de 1400 y 1000RPM.

Por otra parte Linares [5] elaboró un trabajo sobre “*Efecto de la presión sobre la calidad de las uniones de soldadura por fricción de un Aluminio AA-6063*” y obtuvo como resultado que la microestructura muestra la presencia de precipitados posiblemente de AlMgSi y/o AlMgSiFe, los cuales aumentan de tamaño luego de realizada la soldadura, también encontró que la zona de la unión posee tamaño de granos más pequeños en comparación a la zona termomecánicamente afectada, producto de una recristalización; además, que la dureza es mayor en la zona de la unión y varía al alejarse de la unión, pero sin sobrepasar el máximo de dureza en la unión.

### ***b. Bases Teóricas***

La soldadura por fricción (FRW) es un proceso de soldadura de estado sólido que produce una unión soldada bajo la fuerza compresiva de contacto de dos piezas de trabajo que giran o se mueven una con respecto a otra produciendo calor y desplazando plásticamente material de empalme. 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. 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. Primero, una pieza de trabajo se gira y la otra se mantiene estacionaria, como se indica en la Figura 1(A). Cuando se alcanza la velocidad angular apropiada, las dos piezas de trabajo se juntan y se aplica una fuerza axial, como se muestra en la Figura 1(B). La frotación en la cara interna calienta la pieza de trabajo localmente y comienza el vuelco como en la Figura 1 (C) y por último, se detiene la rotación de una de las piezas y se completa eliminando la rebaba producida, tal como se observa en la Figura 1 (D).

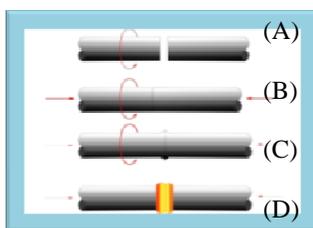


FIGURA 1. Pasos básicos de la soldadura por fricción [6].

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

La etapa de fricción es cuando las piezas hacen contacto, hay frotamiento entre las superficies de empalme y hay 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 puede formar una película líquida en ese punto. Y 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.

### **Relaciones entre las variables.**

**Velocidad:** 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. [6]

**Presión:** La presión controla el gradiente de temperatura en la zona de la soldadura, la potencia de impulso requerida y el acortamiento axial. La presión específica depende de los metales que se van a unir y de la geometría de la unión. La presión de calentamiento debe ser suficiente para mantener la superficie de empalme en contacto íntimo y evitar la oxidación.[6]

**Tiempo de calentamiento:** Para una aplicación en particular, el calentamiento se determina durante la preparación o con base en la experiencia previa. Un tiempo de calentamiento excesivo limita la

productividad y desperdicia material; un tiempo de calentamiento insuficiente puede producir calentamiento disparado, así como el atrapamiento de óxidos en áreas no adheridas en la interfaz. [6]

### ***Ventajas.***

En este proceso de soldadura no se requiere metal de aporte, no hace falta fundente ni gas protector. Además es un proceso limpio desde el punto de vista ambiental; no hay arcos, chispas, humo, ni vapores generados cuando las piezas están limpias. La limpieza superficial no es tan crítica. Las zonas térmicamente afectadas son angostas. Se pueden soldar la mayor parte de los materiales de ingeniería. En la mayoría de los casos, la resistencia mecánica de la soldadura es equivalente o superior a la del más débil de los materiales que se unen. No es necesario que los operadores tengan habilidades de soldadura manual. El proceso es fácil de automatizar para la producción en masa. [6]

### ***Limitaciones.***

Una de las piezas de trabajo debe tener un eje de simetría y poder girar alrededor de ese eje. La preparación y la alineación de las piezas de trabajo pueden ser cruciales para que el frotamiento y calentamiento sean uniformes, sobre todo cuando los diámetros exceden de los 50mm. Los costos por equipo y herramental son elevados. No es posible soldar materiales de lubricación seca ni no forjables. Si las piezas tienen más de un metro de longitud, se requieren máquinas especiales. Las aleaciones de maquinado libre son difíciles de soldar. [6]

### ***Aplicaciones de la soldadura por fricción***

En la industrias aeroespacial, agrícola, automotriz, de defensa, marina y petrolera. Se sueldan en producción de todo tipo de objetos, desde asas para tenazas en lingotes para forjado hasta componentes críticos de motores de aeronaves, pasando por componentes de vehículos como engranajes, amortiguadores y válvulas de motor. Se utiliza además en la industria eléctrica y hasta en los trenes de alta velocidad realizados con coladas de Aluminio, entre otros. [6]

## 4. METODOLOGÍA

### a. Actividades

Luego de adquirir las barras de Aluminio AA-6063 con un diámetro de ½ pulgada (12,7 mm), se realizaron cortes a una longitud de 50 mm. Para determinar un rango de trabajo de tiempo de calentamiento y los valores adecuados para presión y velocidad, se realizaron pruebas piloto. Posteriormente se efectuaron las uniones mediante la soldadura por fricción variando el tiempo en la etapa de calentamiento. A continuación se prepararon las probetas para el análisis metalográfico, la medición de la longitud de la unión, el acortamiento axial, ensayos de tracción y los perfiles de dureza. Para finalmente hacer el análisis respectivo de los resultados.

### b. Métodos

#### ➤ Preparación de probetas de Aluminio AA 6063

Se cortaron las barras a 50mm de longitud aproximadamente. Luego se procedió a efectuar un refrentado en el torno, con la finalidad de eliminar el exceso o rebaba y garantizar contacto completo entre las piezas a soldar.

#### ➤ Cálculo de Precarga

Para realizar el cálculo de la precarga se tomaron las ecuaciones presentadas en los trabajos de Linares [6] y Méndez [5], quienes lograron establecer dichas ecuaciones para realizar el cálculo de la precarga y fuerza de empuje cuando se está trabajando en la zona elástica en un proceso FRW de Aluminio. Pudiéndose utilizar en este trabajo debido a que la etapa de calentamiento ocurre mientras el material se encuentra en la zona elástica.

$$P = F/A \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde

P: Precarga (kgF/mm<sup>2</sup>), F: fuerza de empuje (kg), A: área transversal de la barra (mm<sup>2</sup>)

La fuerza de empuje se calculó mediante la ecuación (2).

$$Y = 236X - 44 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde

Y: Fuerza de empuje (kg), X: Avance del mandril del torno (mm)

### ➤ **Pruebas Piloto**

Las uniones de soldadura por fricción en las barras de Aluminio se efectuaron variando el tiempo en la etapa de calentamiento y el avance del mandril del torno en la etapa de forjado, manteniendo la velocidad de rotación y la precarga con valores fijos establecidos en investigaciones anteriores y descritas en las referencias [4] y [5] respectivamente. Se encontró que bajo las condiciones descritas se obtenía un porcentaje de unión alto pero no del 100%, y por esta razón se emplearon otros tiempos en la etapa de calentamiento. Una vez que se obtuvo el avance del mandril más adecuado, se procedió de igual forma a realizar pruebas piloto variando únicamente el tiempo en la etapa de calentamiento, lo que permitió lograr mayores porcentajes de unión. Por último, se elaboraron más pruebas manteniendo fijo el tiempo final de soldadura, con lo que se logró establecer todos los parámetros necesarios para obtener soldaduras sanas.

### ➤ **Soldadura de las barras de Aluminio**

En primer lugar, se colocó en el torno una de las barras de forma fija y la otra en el plato giratorio para luego hacer el cero de la pieza; graduando el nonio en cero en el momento que las barras se encuentran en contacto. Seguidamente, fueron separadas las barras, se ajustaron los valores de velocidad del torno y se procedió a encender el mismo, poniendo nuevamente las barras en contacto con el nonio en cero, iniciándose soldadura por fricción. Se hizo lo mismo para cada tiempo dentro del rango establecido, aplicando una precarga fija. Se efectuó el avance en el mandril del torno en la etapa de forjado hasta completar el tiempo final de soldadura, deteniendo bruscamente el giro y esperando un tiempo de enfriamiento para retirarla del torno.

### ➤ **Medición de temperatura**

Para las mediciones de temperatura se utilizó una cámara termográfica. Éstas se tomaron al final de la etapa de calentamiento y al final de la etapa de forjado para las distintas precargas establecidas en el trabajo.

### ➤ *Análisis Metalográfico*

Se procedió a preparar las probetas, a las cuales se les realizó un corte transversal en la unión (ver Figura 2), luego se les efectuó la preparación metalográfica (desbaste, pulido, ataque y observación). Posteriormente se atacó la probeta con el reactivo Poulton y se observó su macroestructura con una lupa estereoscópica. Finalmente se pulió con Alúmina de 1 Micra y 0,3 Micra, se atacó con ácido fluorhídrico al 2% durante un minuto con cuarenta segundos (1'40'') observándose la microestructura.

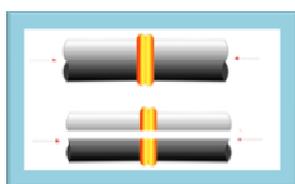


FIGURA. 2. Corte transversal de la unión soldada por FRW

### ➤ *Medición del perfil de dureza*

Se realizaron mediciones de dureza a las secciones transversales de las probetas ensayadas, como se muestra en la Figura. 3, a distancias de 1mm atravesando la unión soldada. Se utilizó la escala Vickers; para luego graficar los valores obtenidos de dureza (Hv) y distancia (mm).

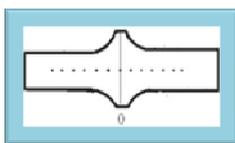


FIGURA. 3. Sección transversal de una probeta

### ➤ *Medición de la longitud de la unión*

Observando la macroestructura de las probetas con lupa se realizaron las mediciones de longitud en la zona de la unión con un vernier, calculándose el porcentaje de unión empleando la siguiente ecuación (3).

$$\% \text{ Unión} = \frac{\text{longitud de la unión}}{\text{diámetro de la barra}} \times 100$$

(Ec. 3)

### ➤ *Medición del acortamiento axial*

Se procedió a medir la longitud inicial a cada una de las barras antes de ser soldadas ( $L_0$ ) y luego la longitud final una vez soldada ( $L_f$ ) de la Figura. 4, posteriormente se calculó la diferencia de longitudes para cada precarga prefijada resultando lo que se conoce como acortamiento axial.

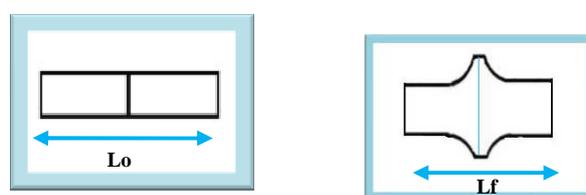


FIGURA. 4. Longitud inicial y longitud final de la probeta.

### ➤ *Ensayo de tracción*

Se realizaron probetas de una longitud de 50cm acorde a las medidas establecidas por la empresa Alfajol-Alambres de Yaracuy, donde se realizaron los ensayos, usando los parámetros definidos en las pruebas piloto, para luego ser sometidas al ensayo de tracción.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### ➤ *Cálculo de precarga*

La siguiente tabla muestra los valores requeridos para realizar el cálculo de la precarga utilizada basada en experiencias anteriores descritas en las referencias [4] y [5].

TABLA 1. Valores obtenidos en el cálculo de la precarga.

Avance del mandril del torno en la etapa de calentamiento (mm)	Fuerza de Empuje (KgF)	Diámetro de la barra (mm)	Área de la barra (mm <sup>2</sup> )	Precarga (KgF/mm <sup>2</sup> )
0,5	74	12,7	126,68	0,58

### ➤ Pruebas piloto

Al realizar las primeras pruebas se notó que no se alcanzaba la unión completa de las barras por lo que se procedió a realizar nuevos ensayos, variando el tiempo en la etapa de calentamiento y manteniendo constante el avance para la presión de forja en 10mm. Se observó que para un tiempo de calentamiento de 160s se consigue una mayor longitud de unión. Se procede a realizar pruebas definitivas manteniendo el tiempo final (Calentamiento + forjado) de soldadura constante (190s) con el que se pudo lograr la unión completa de las barras. A continuación se presenta en la Tabla 2 los valores utilizados finalmente para la realización de las soldaduras. La Figura 5 muestra una de las soldaduras obtenidas.

**TABLA 2.** Resultados de las Pruebas Piloto

Precarga (KgF/mm <sup>2</sup> )	Tiempo en la etapa de calentamiento (s)	Avance del mandril en la etapa de Forja (mm)	Tiempo final de soldadura (s)	Velocidad de Rotación (RPM)
0,58	160	10	190	2000



**FIGURA. 5.** Barra Soldada por FRW

### ➤ Análisis macroestructural

A continuación se muestran las macrografías obtenidas a diferentes tiempos en la etapa de calentamiento en la soldadura por fricción en barras de Aluminio AA 6063. Todas las muestras fueron atacadas con reactivo Poulton y observadas con lupa estereoscópica (10X). En ellas se observan las zonas en las cuales se lograron las uniones, mostrando que la longitud de unión aumenta a medida que se incrementa el tiempo de precarga, llegando a un punto máximo de unión y decreciendo al sobrepasar éste valor.



FIGURA. 6. Macrografía tomada en la unión por FRW de un Aluminio AA 6063 a diferentes tiempos de calentamiento. A) 100s. B) 120s. C) 140s D) 160s E) 180s.

### ➤ Porcentaje de unión

Luego de observar las macrográficas de las probetas realizadas para cada tiempo de calentamiento utilizado, se procedió a la medición de la longitud de unión para calcular el porcentaje de unión, arrojando como resultado lo siguiente



FIGURA 7. Porcentaje de unión obtenido en cada tiempo de calentamiento

En la gráfica se observa que el porcentaje de unión aumenta a medida que se incrementa el tiempo en la etapa de calentamiento; además, se obtiene una unión completa con un tiempo de 160s presentando un leve decaimiento al aumentar el tiempo a 180s. Esto se puede generar a consecuencia de que a medida que se incrementa el tiempo en la etapa de calentamiento se genera mayor fricción entre las barras y esto provoca un aumento en la temperatura y a su vez hay mayor deformación por lo que aumenta la longitud de unión y por ende el porcentaje de unión; pero al usar un tiempo muy alto, la temperatura es tal que se funde el material y por efecto del movimiento se desprende en forma de rebabas, en lugar de mezclarse con su contraparte.

➤ **Acortamiento axial**

En la siguiente tabla se muestran los promedios del acortamiento axial obtenidos en cada tiempo utilizado en la etapa de calentamiento.

**TABLA 3.** Acortamiento axial promedio para cada tiempo utilizado en la etapa de calentamiento

<b>Tiempo (s)</b>	<b>Acortamiento axial promedio (mm)</b>
100	11,2
120	7
140	10,6
160	8
180	8,5

En la Tabla 3 se evidencia una variación en el acortamiento axial de las probetas realizadas a diferentes tiempos, presentándose un valor mayor para la probeta hecha a 100s, seguida de la probeta efectuada a 140s. Consecutivamente se tienen las probetas de 180s y 160s mientras que la probeta que se hizo a 120s presenta el menor acortamiento. Para las uniones que presentan mayor acortamiento axial se logra una mayor área de material pastoso y al aplicar la presión de forjado el material se deforma plásticamente y por ello se produce mayor acortamiento. Se presume que esta diferencia en el acortamiento axial se debe a la variación de la aplicación de la carga en el momento de forjado por parte del operador, puesto que no se tiene un control en la aplicación de la fuerza en esta etapa, ya que se hace de forma manual.

➤ **Medición de temperatura**

A continuación se muestran los datos obtenidos mediante la termografía realizada en la ejecución de las uniones por fricción a diferentes tiempos de calentamiento

**TABLA 4.** Valores obtenidos en la termografía para la unión de barras de Aluminio AA 6063 a diferentes tiempos en la etapa de calentamiento.

<b>Tiempo de calentamiento (s)</b>	<b>Temperatura alcanzada en la etapa de forjado (°C)</b>
100	500
120	500
140	589
160	592
180	596

La Tabla 4 muestra la diferencia de temperaturas alcanzadas durante el proceso FRW a diferentes tiempos en la etapa de calentamiento, donde se evidencia que a medida que se va aumentando el tiempo de calentamiento la temperatura también aumenta, esto se debe a que se produce mayor fricción entre las superficies de contacto de las barras generándose más energía y por ende el incremento de la temperatura.

#### ➤ *Ensayo de Tracción*

Un Aluminio en estado puro presenta un rango de resistencia en tracción de 160-200 MPa mientras que en estado aleado el rango es de 1.400-6.000 MPa. La unión de barras de Aluminio AA 6063 soldadas por FRW con un tiempo de calentamiento de 160s presentó una resistencia promedio de 85,23 Pa (N/m<sup>2</sup>). La poca resistencia presente en esta soldadura puede estar influenciada por la longitud necesaria de las probetas para la realización del ensayo de tracción, ya que por poseer una longitud muy superior a las probetas utilizadas para obtener los parámetros de soldadura, no se logra concentrar el calor en la zona de unión de las barras y no permite que se logre la plasticidad del material por completo, uniéndose así solo un pequeño porcentaje en el centro de la probeta. Por lo que se deduce que para barras de gran longitud es necesario realizar nuevos estudios que permitan lograr la unión completa de las mismas.

## CONCLUSIONES

El tiempo en la etapa de calentamiento demostró tener una gran influencia en el porcentaje de unión y calidad de la unión obteniéndose que a mayor tiempo en la etapa de calentamiento se produce mayor fricción entre las barras lo que ocasiona que se produzca mayor deformación plástica y aumente el porcentaje de unión.

La variación del avance del mandril en la etapa de forjado no produce un aumento significativo en el porcentaje de unión pero se consigue una unión completa con un avance de 10mm.

El decaimiento presentado en el porcentaje de unión para las probetas realizadas a 180s en la etapa de calentamiento requiere de un estudio posterior a dicho tiempo que permita determinar el comportamiento del mismo.

La diferencia presente en el acortamiento axial se debe a la variación de la aplicación de la carga en el momento de forjado por parte del operador.

La longitud de las probetas utilizadas para el ensayo de tracción no permitió obtener un resultado satisfactorio sobre la resistencia a la tracción.

## AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Técnica Industrial Robinsoniana Pedro León Torres (ETIR), en las personas de Prof. Luis Piña y el Prof. Omar Martos, por su valiosa colaboración en la ejecución de las uniones soldadas. Al Ing. Santiago Durán, por haber facilitado la cámara termográfica y al Ing. Humberto Méndez por su colaboración en la medición de la temperatura. A la empresa Alfajol-Alambres del Yaracuy por prestar sus instalaciones y equipos para la realización del ensayo de tracción, así como también a la Ing. Bárbara Palacios por toda su colaboración.

## REFERENCIAS

- [1]. Kawai, G., Ogawa, K. y Tokisue, H. Friction Welding of 6061 Aluminum Alloy Pipe to S25C Carbon Steel Pip. 1997. Documento en línea disponible en: <http://www.iso.org/publications/journals/ijope-8-2/abst-8-2-p144-JC-208-Kawai.pdf>

- [2]. Sathiya, P., Aravindan, S., Noorul, A. Mechanical and metallurgical properties of friction welded AISI 304 austenitic stainless steel. 2004. Documento en línea disponible en: <http://www.springerlink.com/content/btwbr69ymd7gm1kc/>.
- [3]. Paduan, E., Fiorino, F., Ying, C. "Welding of AA1050 Aluminum with AISI 304 stainless steel by rotary friction welding process". 2010. Documento en línea disponible en: [http://www.jatm.com.br/papers/vol2\\_n3/jatmv2n3\\_p301-306\\_Welding\\_of\\_AA1050\\_Aluminum\\_with\\_AISI\\_304\\_stainless\\_steel\\_by\\_rotary\\_friction\\_welding\\_process.pdf](http://www.jatm.com.br/papers/vol2_n3/jatmv2n3_p301-306_Welding_of_AA1050_Aluminum_with_AISI_304_stainless_steel_by_rotary_friction_welding_process.pdf).
- [4]. Méndez. M. Efecto de la velocidad de rotación en la cantidad de la unión de la soldadura por fricción en una aleación de Aluminio AA 6063. Trabajo de grado para Ingeniería Metalúrgica. Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre". 2011. Barquisimeto, Venezuela.
- [5]. Linares C. Efecto de la presión sobre la calidad de las uniones de soldadura por fricción de un Aluminio AA-6063. Trabajo de grado para Ingeniería Metalúrgica. Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre". 2011. Barquisimeto, Venezuela.
- [6]. O' Brien, R. L. "Manual de Soldadura" Tomo III. American Welding Society/. 8ª Edición. 1996, Naucalpan de Juárez: México.
- [7]. Manual del Aluminio y sus aleaciones. 2009. Documento en línea disponible en: <http://ingenieríademateriales.wordpress.com/2009/4/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones>.
- [8]. Aleaciones de Aluminio. [Consulta: 2011, enero 27]. Documento en línea disponible en: [http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium\\_alloyAluminio\\_AA\\_6063](http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_alloyAluminio_AA_6063).
- [9]. ASM Metal Handbook, Metallography and microestructure. Vol 9. Ninth edition. 2004. USA.
- [10]. Avner H. S. "Introducción a la metalurgia física". 2ª Edición. McGraw-Hill. 1988. México.
- [11]. Composición química de Aluminio AA 6063. [Consulta: 2011, enero 27]. Documento en línea disponible en: <http://www.sumiteccr.com>
- [12]. Propiedades del Aluminio. Documento en línea disponible en: <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/pdfmostra/QU00901M.pdf>. [Consulta: 2011, enero 17].
- [13]. Soldabilidad de las aleaciones de Aluminio. Documento en línea disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura>. [Consulta: 2011, enero 17].