

SOLDADURA POR FRICCIÓN

ESTEBAN MORENO SIEGERT

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2008

# SOLDADURA POR FRICCIÓN

ESTEBAN MORENO SIEGERT

Trabajo de grado presentado para optar al  
título de Ingeniero Mecánico

Asesor:  
Gabriel Jaime Páramo Bermúdez  
Profesor de tiempo completo Universidad Eafit

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2008

A mis padres que con tanto amor, esfuerzo y empeño han apoyado todas mis decisiones, sueños, ideas y proyectos para que se volvieran realidad.

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

Gabriel Jaime Páramo Bermúdez, ingeniero mecánico, asesor del proyecto de grado por su inalcanzable labor de enseñanza.

A todas las personas que colaboraron y siguieron de cerca este proyecto de grado.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. PRESENTACIÓN	13
2. ANTECEDENTES	15
3. JUSTIFICACIÓN	16
4. ALCANCE	18
5. OBJETO DE ESTUDIO	19
6. OBJETIVOS	20
6.1 GENERAL	20
6.2 ESPECÍFICOS	20
7. ESTADO DEL ARTE	22
7.1 FUNCIONAMIENTO	22
7.2 TIPOS DE SOLDADURA	23
7.3 PRINCIPIO FÍSICO	24
7.4 MÁQUINAS ADAPTADAS AL PROCESO	25
7.5 DISEÑO DE LA HERRAMIENTA	26
7.6 MODELADO NUMÉRICO	30
7.7 TRANSFERENCIA DE CALOR	31
7.8 MODELO GEOMÉTRICO	31
7.9 CAMPO DE TEMPERATURAS	31
8. ASIGNATURAS QUE SE INVOLUCRAN EN EL PROYECTO	33
8.1 TRANSFERENCIA DE CALOR	33
8.2 MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS	33
8.3 MATERIALES	33

8.4 PROCESOS DE MANUFACTURA	33
9. PRUEBAS Y ENSAYOS	35
9.1 ENSAYOS CON PLACAS DE ALUMINIO	35
9.2 ENSAYOS CON PERFILERÍA DE ALUMINIO EN ANGULO	39
9.3. RESULTADOS DE PRUEBAS DE TENSIÓN	57
10. PROBLEMAS RESULTANTES DE SOLDADURA POR FRICCIÓN	59
11. RECOMENDACIONES	60
12. CONCLUSIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	64

## LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Cordón de soldadura, soporte de fijación y husillo porta herramienta	11
Imagen 2. Cuadro de objetivos.	21
Imagen 3. Explicación grafica del proceso de soldadura por fricción.	23
Imagen 4. Comportamiento explorado con métodos de elementos finitos	25
Imagen 5. Dimensiones de la herramienta para ensayos con placas	27
Imagen 6. Vista isométrica y superior de la herramienta.	27
Imagen 7. Herramienta de tungsteno en operación sobre perfilería.	28
Imagen 8. Fotografía de un extremo de la herramienta de tungsteno.	29
Imagen 9. Dimensiones en mm de la herramienta para ensayos con perfiles de bajo espesor.	29
Imagen 10. Ensayo en proceso utilizando placas.	35
Imagen 11. Sistema de sujeción de las placas	39
Imagen 12. Soldadura por fricción en ángulos.	40
Imagen 13. Sección transversal de los perfiles utilizados en este ensayo.	40
Imagen 14. Sección transversal resultante de los perfiles utilizados en este ensayo después de su unión.	41
Imagen 15. Sección transversal de los perfiles utilizados en este ensayo.	44
Imagen 16. Sección transversal resultante de los perfiles utilizados en este ensayo después de su unión.	45
Imagen 17. Sección transversal de los perfiles utilizados en este ensayo.	49

Imagen 18. Sección transversal resultante de los perfiles utilizados en este ensayo después de su unión.	50
Imagen 19. Montaje requerido para las juntas en ángulo de 2mm.	55
Imagen 20. Montaje requerido para las juntas en ángulo de 5mm de espesor.	56
Imagen 21. Montaje requerido para las juntas de perfilaría comercial de 2mm de espesor.	56

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resumen de los parámetros utilizados para los ensayos con placas de 3mm.	36
Tabla 2. Resumen de los parámetros utilizados para los ensayos con perfiles en ángulo de 2mm.	41
Tabla 3. Resumen de los parámetros utilizados para los ensayos con perfiles comerciales de 2mm.	45
Tabla 4. Resumen de los parámetros utilizados para los ensayos con perfiles en ángulo de 5mm	51
Tabla 5. Resumen de los resultados arrojados en las pruebas de tensión	57

## LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A. Propiedades mecánicas del tungsteno
- ANEXO B. Propiedades mecánicas del aluminio
- ANEXO C. Propiedades mecánicas del acero 4340
- ANEXO D. Plano de la herramienta de tungsteno
- ANEXO E. Plano opción 1 de la herramienta de hombro
- ANEXO F. Plano opción 2 de la herramienta de hombro
- ANEXO G. Plano opción 3 de la herramienta de hombro
- ANEXO H. Plano opción 4 de la herramienta de hombro
- ANEXO I. Plano opción 5 de la herramienta de hombro
- ANEXO J. Gráficas arrojadas en el ensayo de tensión
- ANEXO K. Gráficas arrojadas en el ensayo de tensión

## INTRODUCCIÓN

La soldadura de mezclado por fricción es una técnica para unir dos láminas o placas por medios mecánicos. Este proceso tiene grandes ventajas en la soldadura de aleaciones de aluminio que son difíciles de soldar por los procesos que involucran la fusión del material base. Mediante este proceso se pueden soldar secciones gruesas en una sola pasada, obteniéndose uniones con excelentes propiedades mecánicas.

El *Technological Welding Institute* de Inglaterra da a conocer en la última década un nuevo método de soldadura en fase sólida para la soldadura del aluminio y sus aleaciones, que denominó *Friction Stir Welding*, en español Soldadura por Fricción. Esta nueva variante de la soldadura por fricción permite la soldadura de piezas planas de gran extensión, y en ese sentido introduce un avance muy importante de la soldadura por fricción que estaba limitada solo a uniones de partes con simetría de revolución (CIMEC@,2005).

Imagen 1. Cordón de soldadura, soporte de fijación y husillo porta herramienta



Las propiedades mecánicas y sanidad de las uniones producidas resultan en general superiores a las obtenidas por procesos de arco convencionales. Las restricciones fundamentales son: reducida versatilidad propia de un proceso automático, necesidad de firme sujeción de las piezas, aplicación limitada a piezas planas o de gran radio de curvatura, producción de hueco residual al final de la soldadura en el lugar de extracción de la herramienta (WEB@,2005).

Al interior de la Universidad y específicamente en el Departamento de Ingeniería de Producción, área de manufactura, el Profesor Gabriel Jaime Páramo B. ha adelantado exploraciones para establecer parámetros del proceso evaluación por medio de ensayos.

## 1. PRESENTACIÓN

La soldadura es uno de los procesos más utilizados en la industria metalmeccánica para la unión del aluminio, la demanda de dicho proceso amerita buscar alternativas que ayuden a disminuir los costos y a mejorar resultados.

El proceso de soldadura por fricción no es muy utilizado en el medio y es por ello que surge la idea de realizar un estudio previo que arroje la viabilidad del proyecto, con el objetivo de implementar la soldadura por fricción en la industria metalmeccánica nacional (EBSCO1@,2005).

Las ventajas fundamentales del método son entre otras: capacidad de unión de aleaciones de difícil soldabilidad, soldadura de 15mm de espesor en una pasada y 30mm en dos sin necesidad de biseles, ausencia de metal de aporte y gas de protección, ausencia de distorsión, no generación de humos tóxicos

El proceso de transferencia de calor es uno de los aspectos más importantes en el estudio de este proceso; una buena comprensión del proceso de transferencia de calor en la pieza de trabajo puede ser provechosa en la predicción de los ciclos termales en la soldadura y la dureza en la zona a soldar de la pieza, posteriormente, puede ser provechosa en la evaluación de la calidad de la soldadura (SAE@,2005).

La herramienta consiste en un hombro y una punta de prueba que puedan ser integrales posiblemente de un diverso material. El diseño del hombro y de la punta de prueba es muy importante para la calidad de la soldadura. La punta de prueba de la herramienta genera el calor y revuelve el material que es soldado, pero el hombro también hace una parte importante proporcionando el tratamiento de fricción adicional así como evitar que el material plastificado se escape de la

región de la soldadura. El material plastificado se produce de conducir el lado que se arrastra de la herramienta, pero es atrapado por el hombro que se mueve a lo largo de la soldadura para producir finalmente una superficie lisa.

Los diversos materiales y espesores requieren diferentes perfiles de las puntas de prueba; este proceso de soldadura se puede producir en apenas un lado de la pieza o también soldando mitad del espesor para luego voltear para terminar el otro lado. Existen varios tipos de puntas de prueba que se muestran en la figura 3 cuál se puede diseñar para soldar placas hasta de 60mm a velocidades más altas que las puntas de prueba convencionales (EBSCO2@,2005).

## 2. ANTECEDENTES

La soldadura por fricción no se ha estudiado y mucho menos implementado, el tema carece de interés, tanto por parte de los empresarios metal mecánicos colombianos, como por parte de los proveedores internacionales de soldadura para que conozcamos este proceso (NRC@,2006).

El Proceso de soldadura por fricción es relativamente nuevo, se desarrolló por el *The Welding Institute* de Inglaterra en 1991.

La unión de metales ha sido practicada desde que la humanidad aprendió a trabajar los metales. Originalmente, los metales eran soldados a fuerza de golpes, y los soldadores eran respetados artesanos. La soldadura eléctrica se invento a principios de 1800, en plena revolución industrial, considerado un proceso crudo, sucio y primitivo, en el que el único requisito era derretir un poco de metal entre dos piezas de manera que estas se unieran.

Este proceso demostró ser tan económico y eficiente que su uso se fue propagando a aplicaciones responsabilidad creciente (CAMBRIDGE@,2003).

### 3. JUSTIFICACIÓN

El proceso es un método totalmente desconocido en la industria metalmecánica local, debido a que el método es relativamente nuevo y por ende no ha llevado un estudio detallado de diferentes parámetros y características que se deben utilizar en este proceso, para su desarrollo y comercialización (TWI@,2006).

La soldadura por fricción tiene como ventaja, que es un proceso limpio que no genera gases tóxicos ni residuos que pueden llegar a ser perjudiciales para la salud humana, y para el medio ambiente, convirtiéndose en una gran alternativa que conlleva a cuidar el calentamiento global y los gases invernaderos; temas que son indispensables y están de moda en nuestro planeta.

El método pretende ser una alternativa hacia el mercado de soldadura de aluminio, teniendo como ventajas una diversidad de opciones como ausencia de materiales de aporte, atmósferas controladas y equipos muy especializados. Este proceso se puede realizar con máquinas convencionales que se encuentran muy comúnmente en nuestra industria como las fresadoras y taladros de banco, sin que esto tenga consecuencias en la calidad de la soldadura y por tanto en el proceso como tal (PROQUEST1@,2007).

La demanda del mercado actual de los productos de aluminio amerita un estudio que permita conocer de primera mano las características de este mercado como lo son la demanda con respecto a la oferta, para así tener una certeza del beneficio económico de la implementación del método de soldadura por fricción; además ayudando a la industria local a ser más competitiva, más diversa y con mejores resultados.

Las ventajas fundamentales del método entre otras son: capacidad de unión de aleaciones de difícil soldabilidad, soldadura de 15mm de espesor en una pasada y 30mm en dos sin necesidad de biseles (EBSCO3@,2007).

#### 4. ALCANCE

El alcance de este proyecto pretende llegar a la industria metalmeccánica local, con el propósito de ofrecer más alternativas de soldadura en aluminio y mejorar los resultados de esta. Además recaudar la mayor cantidad de información posible para así tener una base de datos donde se pueda remitir y apoyar en el futuro.

El proyecto entrega un estado del arte, planos de dispositivos, pruebas de tensión, juntas y herramientas empleadas.

El proyecto se desarrolla en el área metropolitana de Medellín y específicamente en los talleres metal mecánicos locales desde la Universidad.

## 5. OBJETO DE ESTUDIO

El objeto de estudio es la implementación del proceso de soldadura por fricción, debido a que es un proceso limpio, económico y tiene resultados superiores a otros procesos actuales. Además genera a futuro beneficios económicos para la industria que lo implemente de manera adecuada y desarrollo académico y profesional del estudiante a cargo de este proyecto.

## 6. OBJETIVOS

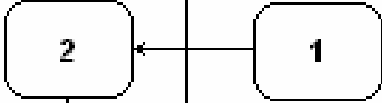
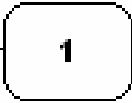


### 6.1 GENERAL

Aplicar la soldadura por fricción a nivel industrial, en procesos de unión e geometrías planas y validar su comportamiento a partir de ensayos

### 6.2 ESPECÍFICOS

- Registrar el estado del arte del tema soldadura por fricción y su comparación con otras opciones. - Nivel 1 - Conocer.
- Identificar características relevantes del proceso de soldadura por fricción, con el fin de implementarla. - Nivel 1 - Conocer.
- Describir los equipos requeridos para el proceso con el fin de optimizar sus resultados. - Nivel 2 - Comprender.
- Practicar la soldadura por fricción en taller, con diferentes variables con el fin de visualizar su factible aplicación industrial, mediante ensayos de propiedades mecánicas. - Nivel 3 - Aplicar.
- Concluir los principales resultados obtenidos.

Imagen 2. Cuadro de objetivos.

OBJETIVO	OBJETIVO	NIVEL
		CONOCIMIENTO
		COMPRENDER
		APLICAR

## 7. ESTADO DEL ARTE

El proceso de soldadura por fricción consta de principios básicos como el punto de fusión de el material base en el cual se va a soldar, este proceso es muy utilizado en la industria naviera y en transbordadores espaciales con el fin de maximizar las propiedades mecánicas del material y por ende minimizar los esfuerzos que se generan en el interior del material.

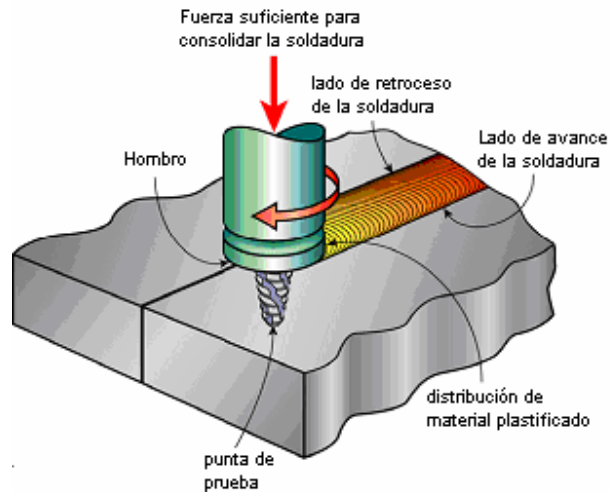
### 7.1 FUNCIONAMIENTO

La forma para lograr este proceso basta con una fresadora vertical la cual se pueda modificar las velocidades de corte, es decir poder controlar las rpm de la maquina y el avance de la misma; y no sin dejar atrás un buen montaje de las juntas donde van muy bien acomodadas con un sistema de sujeción con bridas o de una prensa mecánica dependiendo de la geometría, de lo que se vaya a soldar.

La herramienta adecuada es la encargada de realizar todo el trabajo que implícitamente se ejecuta, es decir que con una buena geometría, material, y sin descartar un buen montaje o amarre de las juntas, se garantiza de tener buenos resultados a la hora del proceso.

La imagen 3, describe gráficamente como funciona el proceso, mencionando las partes fundamentales de la herramienta y su menara de interactuar en el momento de la soldadura, detallando que la parte trasera del hombro es la que hace la distribución del material plastificado; la punta de prueba hace que este material plastificado cree una turbulencia y tienda a ascender; debe también haber una fuerza axial para que la herramienta proporcione la fricción suficiente sin desplazarse la herramienta.

Imagen 3. Explicación grafica del proceso de soldadura por fricción.



## 7.2 TIPOS DE SOLDADURA

El método más comúnmente utilizado para unir metales, es la soldadura y esta tiene una gran diversidad de métodos, las siguientes son las más comunes: soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*), soldadura MAG (*Metal Active Gas*), soldadura MIG (*Metal Inert Gas*), soldadura por arco, soldadura en frío, soldadura explosiva, soldadura por fricción, soldadura por fusión, soldadura a gas, soldadura por plasma, soldadura con rayo de electrones, soldadura ultrasónica, soldadura GMAW (*Gas metal arc welding*) (COLLOID@2001).

La soldadura por fricción posee dos métodos de aplicación dependiendo del tipo de juntas que se requiere unir, se puede lograr con una fresadora convencional para juntas planas o laminas de gran extensión, o con un torno convencional para juntas con una sección transversal redonda como tuberías (EBSCO1@,2005).

El proceso de soldadura por fricción es relativamente nuevo, creado alrededor del año 1991, se quiere implementar este proceso en la industria, debido a que es un proceso muy económico que no requiere de materiales de aporte ni de equipos muy especializados, teniendo en cuenta que es un proceso muy limpio y no produce gases tóxicos que se emiten al ambiente y serian perjudiciales para la salud del usuario u operario.

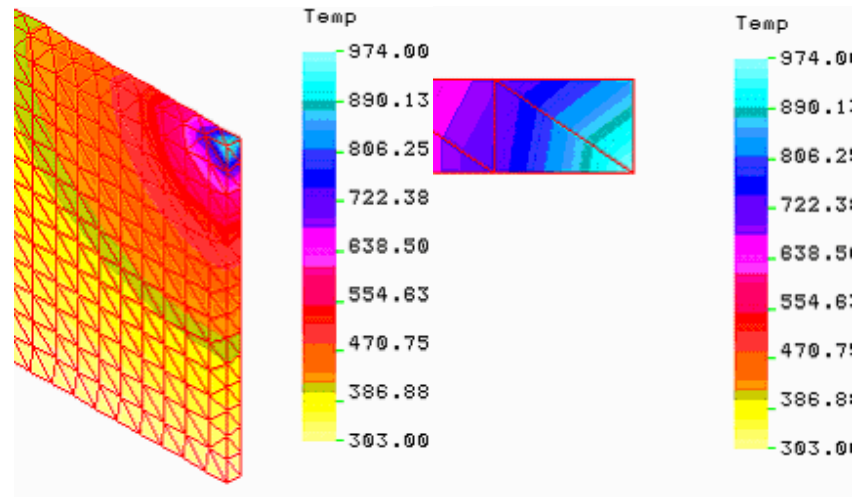
### 7.3 PRINCIPIO FÍSICO

El funcionamiento físico del proceso consiste en calentar el material por medio de una fricción generada por la herramienta, donde esta tiene mayor dureza y propiedades de fatiga que el material base. Al calentarse hace que el material alcance el punto de fusión y se mezcla por medio de la turbulencia que genera la geometría de la herramienta ya que esta posee una especie de anillos en su extremo inferior, el cual es el que esta en contacto con el material base (PROQUEST1@,2007).

El comportamiento de este proceso se pronostica utilizando un software de elementos finitos modelando las placas y creando una fuente térmica ya sea puntual para determinar el espesor del material base o una fuente de línea en una arista para poder determinar el diámetro necesario de la herramienta.

En la imagen 4, se observa un comportamiento de la temperatura a través de las placas de aluminio; de esta grafica se observa que el campo de calor generado en una arista de la placa, se comporta radialmente y dando un acercamiento a la dimensión del hombro de la herramienta.

Imagen 4. Comportamiento explorado con métodos de elementos finitos



#### 7.4 MÁQUINAS ADAPTADAS AL PROCESO

Los primeros ensayos del nuevo proceso se llevan a cabo en fresadoras convencionales. Así, se comprueba que este tipo de maquinaria podía realizar correctamente uniones con geometrías sencillas, como soldaduras a tope planas y de longitud y espesor muy limitado.

Cuando las uniones son geoméricamente más complejas o de mayor espesor surgen problemas relacionados con daños a los rodamientos del cabezal y a las guías, causados por sobrecargas de proceso inesperadas. Desde un primer momento resulta evidente la necesidad de crear máquinas, que siendo muy cercanas estructuralmente a las máquinas fresadoras, ofrecieran prestaciones específicas que las adaptaran al nuevo proceso.

Las soluciones pasan por medir directamente la posición de la herramienta mediante sensores láser o mediante sensores de contacto, en lugar de medir indirectamente la posición de la herramienta mediante reglas o encoders que

desestiman el efecto de las deformaciones de la máquina en la posición real de la herramienta (PROFIN@,2004).

Las alternativas más desarrolladas e implantadas es el del control indirecto de la posición de la herramienta mediante la fuerza axial. Este parámetro está directamente relacionado con la posición de la herramienta en sentido axial. Este tipo de control permite soldar, asegurando una fuerza en el sentido axial de la herramienta constante, parámetro directamente relacionado con la calidad de la unión (WEB@,2005).

## 7.5 DISEÑO DE LA HERRAMIENTA

La herramienta consiste en un hombro y una punta de prueba que puedan ser integrales posiblemente de un diverso material. El diseño del hombro y de la punta de prueba es muy importante para la calidad de la soldadura. La punta de prueba de la herramienta genera el calor y revuelve el material que es soldado, pero el hombro también hace una parte importante proporcionando el tratamiento de fricción adicional así como evitar que el material plastificado se escape de la región de la soldadura.

El material plastificado se produce de conducir el lado que se arrastra de la herramienta, pero es atrapado por el hombro que se mueve a lo largo la soldadura para producir finalmente una superficie lisa (EBSCO5@2007).

Para lograr la geometría de la herramienta se buscó tanto en bases de datos como en libros de la biblioteca, se dio con varias posibilidades de geometría y escoger una era cuestión de facilidad con las máquinas disponibles de la universidad y facilidad de maquinado (torneada).

Se optó por la geometría que se muestra en la imagen 5, para el caso del ensayo con placas de 3mm de espesor y también para el ensayo con ángulos de 5mm de espesor.

Imagen 5. Dimensiones de la herramienta para ensayos con placas

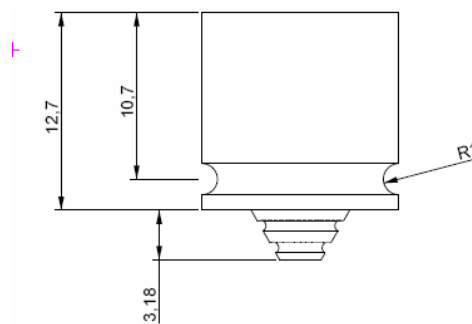
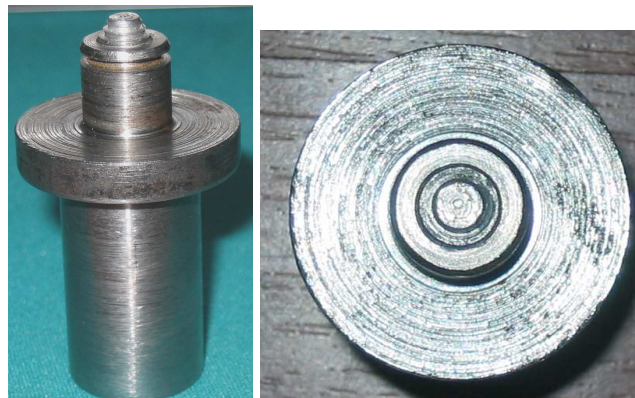


Imagen 6. Vista isométrica y superior de la herramienta.



Para los ensayos con perfilería, se recurre a maquinar una herramienta diferente, debido a que su poco espesor, hace que se descarte la primera herramienta ya que por su geometría y dimensiones, es ideal para espesores más grandes.

Para esta se consigue una barra de tungsteno y 10% de cobalto, y realizarle un maquinado en las dos puntas de la barra, con una geometría diferente; debido a que este material posee tanta dureza, se recurre al laboratorio de herramientas de la universidad y poder disponer de un disco de diamante o piedra abrasiva y así poder dar con el mecanizado deseado.

La imagen 7 muestra uno de los extremos de la herramienta al momento de operación.

Imagen 7. Herramienta de tungsteno en operación sobre perfilera.



El material de esta herramienta, posee, mejores propiedades mecánicas, esto tiene como ventaja que esta no se desgaste, ni pierda su geometría y afecte la calidad de la soldadura.

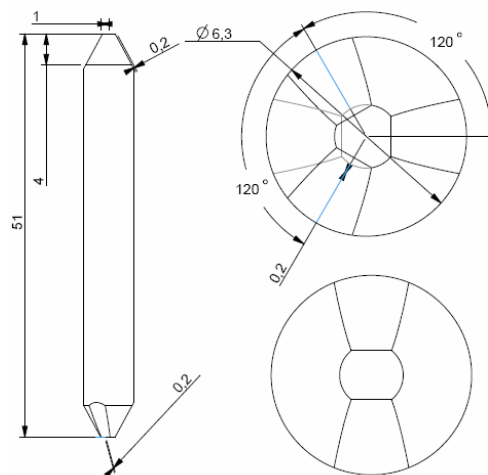
En la imagen 8 se aprecia uno de los extremos de la herramienta de dos caras donde previamente mecanizada, se llegó a una geometría que tuviera una cierta similitud con un ovalo en su punta, desbastando dos de sus lados.

Imagen 8. Fotografía de un extremo de la herramienta de tungsteno.



La geometría y dimensiones de la herramienta, se basan en el espesor que viene comercialmente la perfilera en aluminio. Se aprovechan los dos extremos de la barra de tungsteno y poder sacar dos geometrías diferentes.

Imagen 9. Dimensiones en mm de la herramienta para ensayos con perfiles de bajo espesor.



## 7.6 MODELADO NUMÉRICO

El modelo se hace con una placa base con una malla de elementos finitos tetraédricos del tipo Taylor-Hood (Zienkiewicz y Taylor, 1991), es decir, tetraedros P2-P1, con interpolaciones cuadráticas para las velocidades y lineales para las presiones, en orden a lograr estabilidad de las interpolaciones de presión por la condición de divergencia nula conjuntamente con una adecuada captura de los gradientes de tensión en las capas límites.

La malla implementada tiene aproximadamente 5100 elementos con 700 nodos de velocidad (WEB@,2005).

El algoritmo de resolución consiste en dos sub pasos: en el primero de ellos se obtiene el campo de velocidades asumiendo fijo el campo de temperaturas. Se itera por reemplazos sucesivos para adaptar no-linealmente los valores de viscosidad de acuerdo a las velocidades de deformación obtenidas en la iteración anterior.

Las ecuaciones discretas son obtenidas a partir de la formulación clásica del problema de Stokes para flujos totalmente viscosos incompresibles y de acuerdo a las interpolaciones antes mencionadas, con el agregado de pseudo-compresibilidad artificial del tipo de Chorin (Chorin,1968).

El sistema de ecuaciones lineales para cada iteración es resuelto por el método de gradientes conjugados cuadrados con un preconditionador de factorización incompleta de tipo LU de acuerdo al esquema propuesto por Saad en SparseKit (Saad, 1994). En el segundo sub paso se resuelve el campo de temperaturas con interpolación cuadrática como un problema de convección difusión, asumiendo el campo de velocidades resultante en el primer sub paso.

El método de resolución numérica es el mismo que en el primero. Aunque se requiere la solución estacionaria, se implementa un esquema de avance en el tiempo totalmente implícito, usado fundamentalmente como preconditionador del sistema de ecuaciones (SAE@,2005).

## 7.7 TRANSFERENCIA DE CALOR

El proceso de transferencia de calor es uno de los aspectos más importantes en el estudio de FSW (*Friction stir welding*). Una buena comprensión del proceso de transferencia de calor en la pieza de trabajo puede ser provechosa en la predicción de los ciclos termales en la soldadura y la dureza en la zona a soldar de la pieza, posteriormente, puede ser provechosa en la evaluación de la calidad de la soldadura.

## 7.8 MODELO GEOMÉTRICO

El presente estudio asume un marco de referencia fijado a la herramienta de soldado, de tal manera que la placa se mueve hacia ella con una velocidad ( $V_w=2.0\text{mm/seg}$ ) y temperaturas ( $25^\circ\text{C}$ ) impuestas en la superficie de entrada a la zona de estudio. La superficie del perno de la herramienta está mecanizada en forma de espiral. El efecto de flujo ascendente producido por dicho espiral se simula imponiendo una componente de velocidad ascendente en la superficie del perno.

## 7.9 CAMPO DE TEMPERATURAS

Los valores de temperaturas conseguidos en el modelado se contrastaron con datos experimentales obtenidos por termografía, donde se indican los valores de temperaturas obtenidos experimentalmente en diferentes puntos de la superficie de las placas (DRWELD@,2006).

Los puntos mas alejados a la herramienta, poseen valores de temperaturas obtenidos en el modelado son notablemente inferiores a los observados experimentalmente. Esto se puede deber a que en la confección de las soldaduras, se utiliza un tiempo de precalentamiento en el cual la herramienta está en contacto con las placas sin velocidad de avance. Esto produce un incremento general de la temperatura de las placas.

## 8. ASIGNATURAS QUE SE INVOLUCRAN EN EL PROYECTO

En este proyecto se involucran materias que durante la carrera, se adquiere el conocimiento apropiado para llevar a cabo este proyecto; a continuación se menciona dichas materias involucradas y su respectiva explicación de su relación con el proyecto.

### 8.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

En el proceso de soldadura por fricción se maneja un principio básico que es el comportamiento del calor en cierto material, conociendo conceptos como, convección y conducción del calor a través del material.

### 8.2 MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS

Para este proyecto se realiza un análisis de elementos finitos en el software COSMOS M para poder explorar el comportamiento del calor.

### 8.3 MATERIALES

Se necesita saber conceptos básicos de materiales para poder saber que tipo de materiales se debe utilizar, teniendo en cuenta la dureza y su punto de fusión tanto para la herramienta como para las placas.

### 8.4 PROCESOS DE MANUFACTURA

Se debe conocer como es el funcionamiento de las máquinas a utilizar y tener en cuenta conceptos como avance, rpm de la maquina, velocidad de corte, inclinación del cabezal, etc.

Los conceptos de mecanizado utilizados en los equipos como fresadora y torno se deben tener en cuenta a la hora de realizar el proceso de soldadura por fricción, ya que involucra parámetros que son comúnmente utilizados en el momento de un mecanizado.

El proceso de soldadura convencional se debe tener en cuenta, para poder compararlo con el proceso de soldadura por fricción y poder evaluar sus resistencias y dependiendo el tipo de juntas que se vayan a utilizar.

## 9. PRUEBAS Y ENSAYOS

### 9.1 ENSAYOS CON PLACAS DE ALUMINIO

Para poder analizar correctamente los ensayos, evaluando su resistencia, se debe tomar ciertos datos de interés que permitirán establecer y fijar parámetros después de varios ensayos.

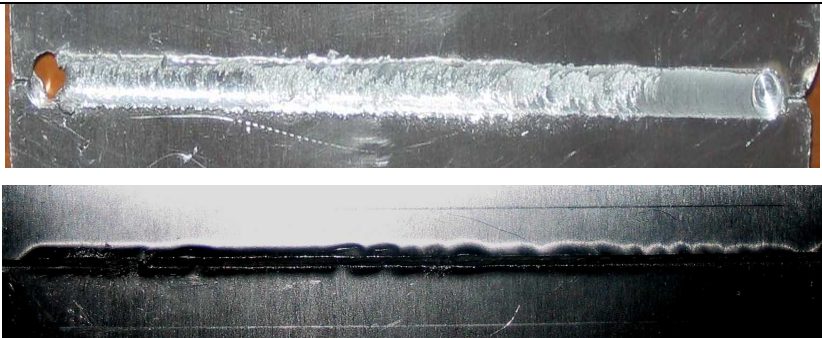
La imagen 10 muestra el proceso en medio de operación, trabajando con placas de aluminio de 10 x 20cm, y 3mm de espesor.

Imagen 10 Ensayo en proceso utilizando placas.

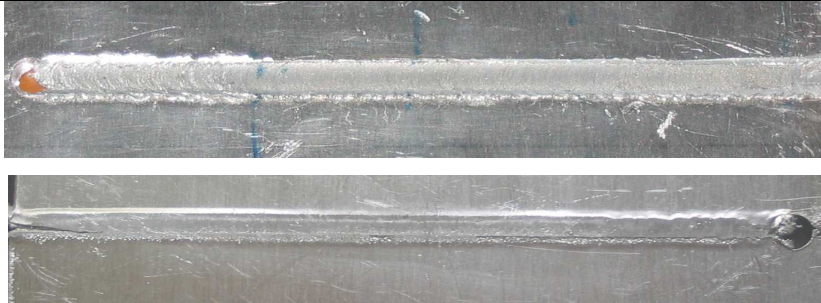


En la siguiente tabla se muestra de una forma resumida, los parámetros y la respectiva fotografía de la junta.

Tabla 1. Resumen de los parámetros utilizados para los ensayos con placas de 3mm.

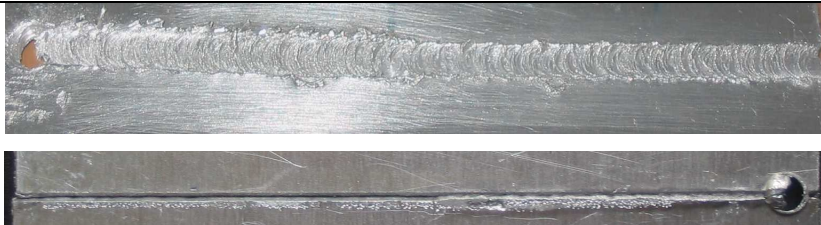
ENSAYO 1	
	
rpm	1300
profundidad	3
tiempo	00:10:05
desplazamiento	200
avance [mm/min]	19.83
ángulo	7.5
herramienta	hombro

### ENSAYO 2



rpm	1300
profundidad	3
tiempo	00:12:20
desplazamiento	200
avance [mm/min]	16.21
ángulo	7.5
herramienta	hombro

### ENSAYO 3



rpm	1300
profundidad	3
tiempo	00:12:05
desplazamiento	200
avance [mm/min]	16.54
ángulo	7.5
herramienta	hombro

Para apoyar las placas en el ensayo 1 se utilizó el riel de la bancada de la fresadora utilizada para el proceso, la cual no fue buena idea debido a que las placas sufren un pequeño dobléz en el momento de pasar la herramienta y esto hace que el material no se funda para todo el espesor de las placas.

Para apoyar las placas en el ensayo 2 se utilizó una placa de acero aproximadamente de 2cm de espesor conseguida en el laboratorio de soldadura, con esta se logró una mayor fusión del material debido a que las placas no sufrieron un dobléz como el que ocurrió en el ensayo 1. Este fue el ensayo con mayor resistencia observando cualitativamente; debido a la uniformidad de los parámetros utilizados para el proceso.

Para apoyar las placas en el ensayo 3, se utilizó la misma placa que se utilizó en el ensayo 2. En este caso el material se fundió en mayor proporción en la parte de 2mm de profundidad, pero se quita más material lo que daría más posibilidad de falla en este punto debido a que hay menos material; se puede observar también que para 1 mm de profundidad de la herramienta no se fundió completamente el material.

El montaje para llevar a cabo el ensayo de soldadura por fricción utilizando placas de aluminio cuyas dimensiones son de 100 x 200 mm y 3mm de espesor, se utiliza un sistema de bridas que van sujetando las placas a la mesa de la fresadora, y así garantizar que no se deslicen o se suelten a la hora de realizar el ensayo.

La imagen a continuación describe el sistema de sujeción de las placas con un sistema de bridas presionando contra el riel de la mesa de la fresadora.

Imagen 11. Sistema de sujeción de las placas



## 9.2 ENSAYOS CON PERFILERÍA DE ALUMINIO EN ANGULO

En esta etapa del proyecto, se realizan ensayos utilizando perfilería de aluminio de 2mm de espesor, en trozos de 10cm de longitud, con una sección transversal en ángulo y un buen montaje.

El propósito final de unir perfilería es obtener formas o secciones transversales que no se obtienen fácilmente en el mercado.

En la imagen 12 se muestra el proceso al momento de soldar los perfiles en ángulo de espesor delgado y utilizando las herramientas de dos y tres caras.

Imagen 12. Soldadura por fricción en ángulos.



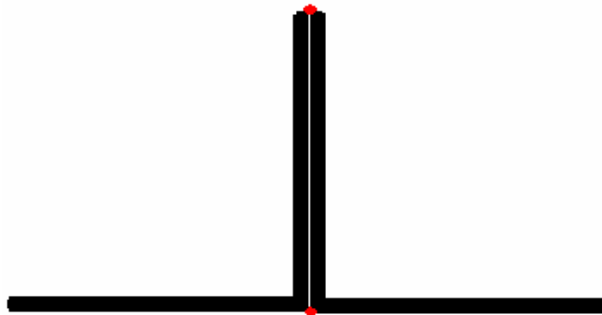
El ensayo con perfilera en ángulo y cuya sección transversal se muestra en la imagen 13, y se llevó a cabo el día 22 de Septiembre de 2008 y se realizaron cinco pruebas variando los parámetros de funcionamiento, para cada una de ellas.

Imagen 13. Sección transversal de los perfiles utilizados en este ensayo.




En la imagen 14 se aprecia la sección transversal de los perfiles, después de una correcta unión por medio de soldadura por fricción.

Imagen 14. Sección transversal resultante de los perfiles utilizados en este ensayo después de su unión.






En la siguiente tabla se muestra de una forma resumida, los parámetros y la respectiva fotografía de la junta.

Tabla 2. Resumen de los parámetros utilizados para los ensayos con perfiles en ángulo de 2mm.

ENSAYO 1	
	

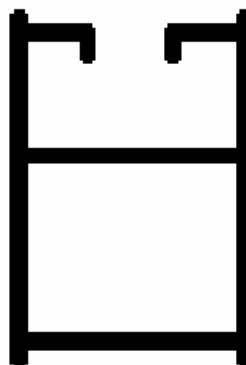
rpm	1000
profundidad	0.3 mm
tiempo	00:05:25
desplazamiento	96mm
avance [mm/min]	17.72
ángulo	10°
herramienta	3 caras
ENSAYO 2	
	
rpm	1000
profundidad	0.3 mm
tiempo	00:05:25
desplazamiento	96mm
avance [mm/min]	18.18
ángulo	10°
herramienta	3 caras
ENSAYO 2 (invertido)	
	
rpm	1000
profundidad	0.5 mm
tiempo	00:04:10
desplazamiento	96mm
avance [mm/min]	23.04

ángulo herramienta	10° 3 caras
ENSAYO 3	
	
rpm profundidad tiempo desplazamiento avance [mm/min] ángulo herramienta	1000 1mm 00:05:25 96mm 12.52 10° 2 caras
ENSAYO 4	
	
rpm profundidad tiempo desplazamiento avance [mm/min] ángulo herramienta	1000 1mm 00:05:25 96mm 89.06 20° 2 caras

ENSAYO 5	
	
rpm	2000
profundidad	1mm
tiempo	00:05:25
desplazamiento	96mm
avance [mm/min]	9.14
ángulo	20°
herramienta	2 caras

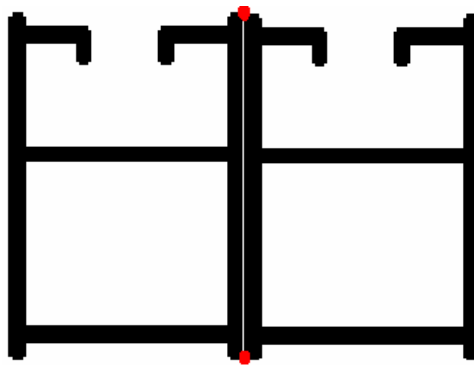
El ensayo con perfilera comercial cuya sección transversal se aprecia en la imagen 15, y este se llevó a cabo el día 2 de Octubre de 2008 y se realizaron cinco pruebas con de a 2 cordones por ensayo, variando los parámetros de funcionamiento, para cada una de ellas.

Imagen 15. Sección transversal de los perfiles utilizados en este ensayo.



En la imagen 16 se muestra como quedan los perfiles unidos después del proceso.



Imagen 16. Sección transversal resultante de los perfiles utilizados en este ensayo después de su unión.









En la siguiente tabla se muestra de una forma resumida, los parámetros y la respectiva fotografía de la junta.


Tabla 3. Resumen de los parámetros utilizados para los ensayos con perfiles comerciales de 2mm.

ENSAYO 1


rpm	1000
profundidad	2
tiempo	00:02:10
desplazamiento	96
avance [mm/min]	44,30
ángulo	10
herramienta	3 caras
ENSAYO 1 (invertido)	
	
rpm	1000
profundidad	2
tiempo	00:05:30
desplazamiento	96
avance [mm/min]	17,45
ángulo	10
herramienta	3 caras
ENSAYO 2	
	
rpm	800
profundidad	2
tiempo	00:03:50
desplazamiento	97
avance [mm/min]	25,30
ángulo	10
herramienta	3 caras

ENSAYO 2 (invertido)	
	
rpm	800
profundidad	2
tiempo	00:04:10
desplazamiento	94
avance [mm/min]	22,56
ángulo	10
herramienta	3 caras
ENSAYO 3	
	
rpm	600
profundidad	1
tiempo	00:04:30
desplazamiento	96
avance [mm/min]	21,33
ángulo	10
herramienta	3 caras
ENSAYO 3 (invertido)	
	
rpm	600
profundidad	2
tiempo	00:06:20
desplazamiento	96
avance [mm/min]	15,15
ángulo	10
herramienta	3 caras

ENSAYO 4	
	
rpm	400
profundidad	1
tiempo	00:05:50
desplazamiento	96
avance [mm/min]	16,45
ángulo	10
herramienta	3 caras
ENSAYO 4 (invertido)	
	
rpm	400
profundidad	2
tiempo	00:04:55
desplazamiento	95
avance [mm/min]	19,32
ángulo	10
herramienta	2 caras
ENSAYO 5	
	
rpm	200
profundidad	1
tiempo	00:05:40
desplazamiento	96
avance [mm/min]	16,94

ángulo	10
herramienta	2 caras
ENSAYO 5 (invertido)	
	
rpm	200
profundidad	2
tiempo	00:08:15
desplazamiento	94
avance [mm/min]	11,39
ángulo	10
herramienta	2 caras

En un posterior ensayo, se realizaron pruebas con un perfil en ángulo con 5mm de espesor con el fin de poder evaluar cualitativamente cual de las tres herramientas, es la que se comporta de mejor manera.

El espesor de estos ángulos, requiere de una herramienta más robusta y con geometría más compleja, para poder que el material a lo largo de todo su espesor se alcance a fundir y mezclarse correctamente.

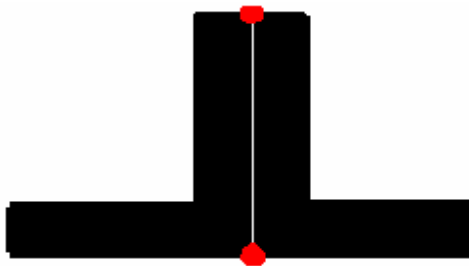
El ensayo con perfilería comercial cuya sección transversal se aprecia en la imagen 17, y este se llevó a cabo el día 4 de Octubre de 2008 y se realizaron cinco pruebas con de a 2 cordones por ensayo, variando los parámetros de funcionamiento, para cada una de ellas.

Imagen 17. Sección transversal de los perfiles utilizados en este ensayo.




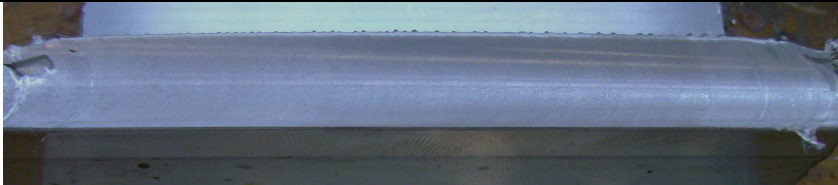
En la imagen 18 se aprecia la sección transversal de los perfiles, después de una correcta unión por medio de soldadura por fricción.

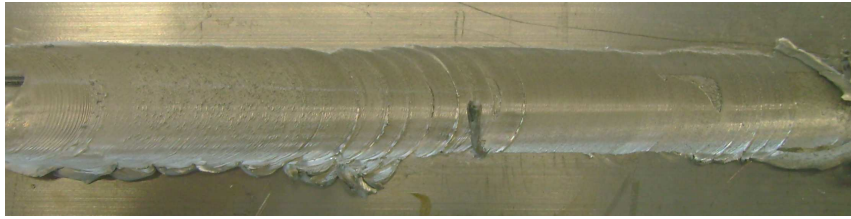
Imagen 18. Sección transversal resultante de los perfiles utilizados en este ensayo después de su unión.



En la siguiente tabla se muestra de una forma resumida, los parámetros y la respectiva fotografía de la junta.

Tabla 4. Resumen de los parámetros utilizados para los ensayos con perfiles en ángulo de 5mm.

ENSAYO 1	
	
rpm	1200
profundidad	2.5
tiempo	00:06:00
desplazamiento	96
avance [mm/min]	16.66
ángulo	10
herramienta	hombro
ENSAYO 1 (invertido)	
	
rpm	1200
profundidad	3
tiempo	00:04:50
desplazamiento	100
avance [mm/min]	20.68
ángulo	15
herramienta	hombro
ENSAYO 2	



rpm	1100
profundidad	3
tiempo	00:06:20
desplazamiento	100
avance [mm/min]	15.78
ángulo	10
herramienta	hombro

ENSAYO 2 (invertido)


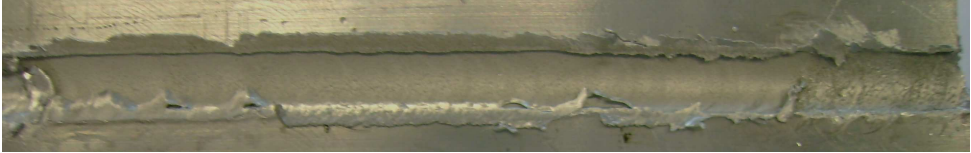




rpm	1000
profundidad	3
tiempo	00:03:50
desplazamiento	100
avance [mm/min]	26.08
ángulo	15
herramienta	hombro

ENSAYO 3



rpm	1000
-----	------

profundidad	3
tiempo	00:06:20
desplazamiento	100
avance [mm/min]	15.78
ángulo	15
herramienta	hombro
ENSAYO 3 (invertido)	
	
rpm	800
profundidad	3
tiempo	00:05:15
desplazamiento	100
avance [mm/min]	19.04
ángulo	15
herramienta	hombro
ENSAYO 4	
	
rpm	900
profundidad	2.5
tiempo	00:05:10
desplazamiento	100
avance [mm/min]	19.35
ángulo	15
herramienta	hombro
ENSAYO 4 (invertido)	

	
rpm	1000
profundidad	2
tiempo	00:04:50
desplazamiento	100
avance [mm/min]	20.68
ángulo	15
herramienta	2 caras
ENSAYO 5	
	
rpm	800
profundidad	3
tiempo	00:04:50
desplazamiento	100
avance [mm/min]	20.68
ángulo	15
herramienta	hombro

El montaje del sistema para logra la soldadura por fricción en ángulos de aluminio, se logra, con la utilización de calzas y una prensa mecánica, donde se sujetan firmemente cada cara del perfil, con las calzas que hay disponibles en el laboratorio de modelos de la universidad.

En la imagen 19, se aprecia la forma en que quedan montadas las juntas en la fresadora listas para iniciar el proceso.

Imagen 19. Montaje requerido para las juntas en ángulo de 2mm.



Para el caso de los perfiles en ángulo de 5mm se realiza el mismo tipo de montaje que para los de 2mm, se utiliza una prensa mecánica, y unas calzas con el fin de no alterar o lastimar la prensa.

En la fotografía siguiente, se aprecia, el montaje de los ángulos de 5mm, listo para iniciar el proceso de soldadura por fricción.

Imagen 20. Montaje requerido para las juntas en ángulo de 5mm de espesor.



Para el caso de perfilaría comercial de 2mm de espesor se basa en un tipo de montaje con una prensa mecánica, garantizando que las juntas queden bien alineadas y presionadas la una contra la otra.

Imagen 21. Montaje requerido para las juntas de perfilaría comercial de 2mm de espesor.



### 9.3. RESULTADOS DE PRUEBAS DE TENSIÓN

Los ensayos de tensión, son muy importantes a la hora de evaluar si realmente este sistema de soldadura es eficiente con respecto al tipo de soldadura convencional.

Para elaborar estas pruebas, se seleccionó la mejor probeta de dos ensayos; siendo las juntas de las placas de 3mm y del perfil en ángulo de 5 mm de espesor, y así poderla comparar con una junta soldada convencionalmente.

Los resultados que arrojó el equipo de ensayos de tensión se describen en la tabla 5, distribuidos así:

Tabla 5. Resumen de los resultados arrojados en las pruebas de tensión.

Soldadura convencional (placas 3mm)	3.25 KN
Soldadura convencional (placas 3mm)	3.5 KN
Soldadura por fricción (placas 3mm)	2.9 KN
Soldadura por fricción (placas 3mm)	5.7 KN
Soldadura por fricción (ángulos 5mm)	13.15 KN
Soldadura por fricción (ángulos 5mm)	13.1 KN

Los anexos J y K describen las gráficas arrojadas por la maquina para hacer ensayos de tensión, el perfil en ángulo de 5mm de espesor es la que mas sobresale con respecto a las otras.

Análisis de resultados arrojados. Se pudo observar que la soldadura por fricción es un método eficiente, arrojando en su mayoría resultados mayores a la soldadura

convencional; cabe aclarar que este es un proceso que se debe tener mucho cuidado a la hora de establecer los parámetros ya que de estos depende una buena resistencia de las juntas.

Para el caso del ensayo con ángulos de 5mm de espesor, se arrojan los mayores resultados de carga, ya que estos fueron soldados en ambas caras, pero el valor se tomo al momento de fallar la primera soldadura.

El espesor es un factor muy importante para saber cuando utilizar este proceso, ya se según los resultados, mientras mas espesor tengan las juntas, mas se va a mezclar el material y mas campo de acción tiene la punta de prueba de la herramienta.

## 10. PROBLEMAS RESULTANTES DE SOLDADURA POR FRICCIÓN

Se presenta un calentamiento considerable en la fresadora después de hacer varios ensayos, distribuyéndose y hasta calentando la prensa mecánica.

Trabajar con espesores tan reducidos, dificulta la tarea, ya que factores como la profundidad entran en juego a la hora de implementar el proceso de soldadura por fricción.

La falta del cuerpo, u hombro en la herramienta de tungsteno, hace menos resistentes las juntas, ya que el material mezclado no es distribuido correctamente.

Las piezas a unir deben estar muy bien unidas con un sistema de prensado al interior de la perfilería para que al profundizar la herramienta, estas no se abran o se despeguen la una de la otra.

## 11. RECOMENDACIONES

- Una buena geometría de la herramienta, con todos sus componentes (hombro, punta de prueba, espiral) garantiza una buena unión de las juntas, siendo estas de un espesor considerable para alcanzar a hacer turbulencia en el material.
- Al tener espesores muy delgados, actúa de mejor manera, la soldadura convencional, excepto cuando el fin es unir perfilería y obtener geometrías complejas.
- Se recomienda continuar este trabajo de investigación, empleando el otro método alternativo de soldadura por fricción, cuyo funcionamiento esta, dado por un torno convencional y para realizar uniones cilíndricas.
- Realizar ensayos de tensión es un punto importante para poder comparar la soldadura por fricción con la soldadura convencional, estos ensayos se deben realizar mientras se establecen los parámetros de operación.
- Sería recomendable realizar estudio de macroanálisis, para verificar que su estructura interna, sea adecuada y verificar que realmente el material ha alcanzado su punto de fusión.

## 12. CONCLUSIONES

- Según los ensayos realizados, se pudo observar que mientras menos profundidad de la herramienta se logrará que la herramienta no quite tanto material de las placas ya que esto debilitaría la soldadura en el punto de la huella.
- Otro factor importante sería aumentar las rpm de la herramienta ya que se le va a poner menos profundidad de la herramienta para que se presente más fricción y no necesitar tanta profundidad.
- El avance se puede dejar igual debido a que es lento y esto hace que quede una mejor calidad de huella y halla más tiempo para que el material se funda por completo.
- Para el caso de la unión de perfilería, se puede observar que a los parámetros ideales, se llega con una buena cantidad de ensayos y variando los mismos.
- En el caso del avance, este debe ser lo menor posible para que el aluminio pueda llegar al punto de fusión esperado, en el caso que la herramienta pasara muy deprisa, el material no sería fundido sino cortado.
- La inclinación de la herramienta ideal, sería por debajo de  $10^\circ$  con respecto al eje vertical, decidiendo esto después de hacer pruebas con  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  y  $20^\circ$  de inclinación.
- En cuanto a la velocidad de giro, se realizaron pruebas variando desde 200rpm hasta 2000rpm, y se concluye fijando una velocidad entre 800 y 1200rpm, velocidad con la cual va quedando una mejor huella o cordón de soldadura.

- Mientras mas espesor tenga una junta es mas probable que mas porción de material se vaya a mezclar y por ende proporciones mas penetración a lo largo del espesor de la junta
- Es muy necesario recurrir a una herramienta que posea el hombro, ya que este se encarga de repartir el material mezclado a lo largo de toda la junta, y este no se salga por los lados del cordón.
- El hecho de que la herramienta no cuente con un hombro, hace que el parte del material plastificado se salga por los lados de la zona de soldadura, y esto causaría menos resistencia en el material.
- Los ensayos de tensión son importantes a la hora de evaluar este proceso y poder comparar con una soldadura convencional.
- Para lograr una buena soldadura, depende mucho del tipo de montaje y de amarre de las juntas, ya sea por sistema de bridas o de una prensa mecánica.
- Una de las ventajas que tiene este proceso implementado en perfilería, es poder conseguir geometrías que no se consiguen fácilmente en el mercado.
- Al unir perfilería y poder llegar a una sección transversal que es escasa, se podría ahorrar mucho dinero en fabricar unos dados con dicha geometría.
- El tungsteno es un material muy bueno para la herramienta en este proceso, pero es muy necesario adecuarle un hombro para así poder distribuir correctamente el material plastificado a lo largo de toda la junta.
- Lo ideal en una herramienta para implementarla en el proceso es que tenga una geometría en la punta de prueba, capaz de crear turbulencia, y de mezclar correctamente el material, es decir un tipo de anillos o de espiral.

- La inclinación del cabezote de la fresadora, incide sobre la plastificación del material, creando así más o menos turbulencia según su inclinación.
- Este proceso permite a menudo, soldar metales diferentes con facilidad, aun algunos considerados como incompatibles o insoldables.
- La preparación de superficies de unión no es crítica, así sean maquinadas, aserradas o hasta cizalladas, todas son soldables.
- El proceso controlado por la maquinaria elimina el error humano por lo que la calidad de la soldadura es independiente de la habilidad o actitud del operario.
- El proceso de soldadura por fricción es ecológicamente limpio, no se genera humo, emisiones o gases que necesiten ser evacuados.
- Los parámetros del proceso son fácilmente monitoreados.
- El equipo de soldadura por fricción es fácilmente automatizado para lograr tasas de producción elevadas.

## BIBLIOGRAFÍA

KALPAJIAN, Serope. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson, 2002, pp. 62-87. ISBN: 9702601371.

OSTWALD, Phillip F. y BEGEMAN, Myron L. Procesos de manufactura. México: Compañía editorial continental, 1996, pp. 123-151. ISBN: 9682602564.

### REFERENCIAS DE INTERNET:

CAMBRIDGE@, 2003. Estudio del proceso de soldadura por fricción elaborado por la Universidad de Cambridge, [En línea]. México. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en: <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/FSW/aaa.html>>.

CIMEC@, 2005. Friction stir welding (FSW), modelado tridimensional, flujo, temperatura, soldaduras de aluminio a tope. [En línea]. México. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en:  
<<http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/183/163>>.

COLLOID@, 2001. Importancia de la educación en soldadura en el desarrollo de nuevas tecnologías. [En línea]. USA. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en:  
<<http://colloid.org/~pmendez/Publications/Papers/2001GoierriPrest.pdf>>.

EBSCO1@, 2005. Simulación de la temperatura durante el periodo de precalentamiento en el proceso de soldadura por fricción. [En línea]. Madrid, España. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en:  
<<http://web.ebscohost.com/ehost/pdf?vid=1&hid=117&sid=6244a94>>.

EBSCO2@, 2005. Análisis paramétrico de elementos finitos de la soldadura por fricción. [En línea]. Estocolmo, Sweden. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en: <<http://web.ebscohost.com/ehost/pdf?vid=1&hid=13&sid=2355d886-134f-4a7a-911d-ea7dd958f361%40sessionmgr8>>.

EBSCO3@2007. Influencia que tienen los parámetros y comparaciones con técnicas mecánicas clásicas de la soldadura por fricción. [En línea]. USA. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en: <<http://web.ebscohost.com/ehost/pdf?vid=1&hid=113&sid=5c78f46b-85d2-4cb0-be2e-86d4afa53a7f%40sessionmgr109>>.

EBSCO4@2007. Optimización de parámetros para la soldadura por fricción en línea de tuberías. [En línea]. USA. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en: <<http://web.ebscohost.com/ehost/pdf?vid=1&hid=117&sid=fed1838c-74eb-4030-aaf5-fbca62cfe899%40sessionmgr9>>.

EBSCO5@2007. Ayuda proporcionada por la NASA para mejorar el desarrollo de la tecnología de la soldadura por fricción. [En línea]. USA. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en: <<http://web.ebscohost.com/ehost/pdf?vid=1&hid=103&sid=16c176ee-b1f1-4d7e-b7b7-7b221587541f%40sessionmgr109>>.

NRC@, 2006. Objetivos, principios y ventajas de la soldadura por fricción. [En línea]. Madrid, España. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en: <[http://imi.cnrc-nrc.gc.ca/Carrefour\\_d\\_informations/Factsheets/cta\\_fsw\\_e.html](http://imi.cnrc-nrc.gc.ca/Carrefour_d_informations/Factsheets/cta_fsw_e.html)>.

PROQUEST1@,2007. Comparación de la soldadura convencional con respecto a la soldadura por fricción robótica. [En línea]. USA. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en: <<http://proquest.umi.com/pqdweb?index=5&did=1327680491&SrchMode=1&sid=1>>

4&Fmt=4&VInst=PROD&VType=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1191349567  
&clientId=65927>.

PROQUEST2@,2007. Formación de la micro estructura de la soldadura por fricción. [En línea]. USA. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en:  
<<http://proquest.umi.com/pqdweb?index=6&did=1328845041&SrchMode=1&sid=14&Fmt=4&VInst=PROD&VType=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1191349567&clientId=65927>>.

PROQUEST3@,2007. Corrosión que se podría presentar en aleaciones al aplicar soldadura por fricción. [En línea]. USA. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en:  
<<http://proquest.umi.com/pqdweb?index=15&did=1313218081&SrchMode=1&sid=14&Fmt=6&VInst=PROD&VType=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1191351329&clientId=65927>>.

PROQUEST4@,2007. Distribución del límite de grano en la zona afectada por el calor en el proceso de soldadura por fricción. [En línea]. USA. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en:  
<<http://proquest.umi.com/pqdweb?index=19&did=1323862711&SrchMode=1&sid=14&Fmt=6&VInst=PROD&VType=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1191351329&clientId=65927>>.

PROFIN@2004. Descripción del proceso de soldadura por fricción. [En línea]. USA. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en:  
<<http://www.proyectosfindecarrera.com/soldadura-friccion.htm>>.

SAE@, 2005. Modelación termo-mecánica de un proceso de soldadura por fricción. [En línea]. Valencia, España. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en:  
<<http://www.sae.org/technical/papers/2006-01-1392>>.

TWI@, 2006. Materiales y espesores que se utilizan en la soldadura por fricción.  
[En línea] México DF. [Citada en Marzo de 2007]. Disponible en:  
<[http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band\\_1/fswintro.html](http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/fswintro.html)>.

## ANEXOS