



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN- AGITACIÓN
(FSW) EN PLACAS DE ACRÍLICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

RICARDO MOISÉS LOZANO RAMÍREZ

ASESOR: M.I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis :

Proceso de Soldadura por Fricción, Agitación
(FSW) en Placas de Acrílico

que presenta el pasante: Ricardo Moises Lozano Ramírez
con número de cuenta: 406051686 para obtener el título de :
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 26 de Julio de 2010

PRESIDENTE Ing. María de la Luz González Quijano

VOCAL Ing. Enrique Cortés González

SECRETARIO M.I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez

PRIMER SUPLENTE M.I. Sergio Martín Durán Guerrero

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Eusebio Reyes Carranza

AGRADECIMIENTOS

Al Padre Eterno

Al Maestro Inalcanzable Jesús

Al Espíritu Santo

A mi Padre por enseñarme el camino

A mi Madre por estar siempre ahí

A mi Hermano por seguirme

A mi Hermana por apoyarme

A mi Asesor por transmitirme el conocimiento que me hará un profesionalista de bien

A todos y cada uno Gracias

Señor, enséñame a ser generoso

A servirte como lo mereces

A dar sin medida

A combatir sin miedo a que me hieran

A trabajar sin descanso

Y a no buscar más recompensa

Que saber que hago tu voluntad

Así sea, así se haga, y así lo esperamos

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

José Guillermo Elías Lozano Pratt

Dolores Ramírez López

A MIS HERMANOS

Eduardo Noé Lozano Ramírez

Iliana Isabel Ramírez López

A MIS PARIENTES:

María Blanca Caridad Lozano Pratt

María Ventura Alicia Lozano Pratt

Amparo Francisca Elizabeth Lozano Gómez

Víctor Manuel Díaz Lozano

A MIS SCOUTERS:

Mario Lorenzo Vigueras Prieto

Joel Villavicencio Pérez

María Luisa Contreras Moya

A MIS AMIGOS Y HERMANOS SCOUTS:

Alberto Daniel Carbajal Menes

José Luis Martínez Ruiz

Aldo Gómez López

Francisco Javier Rivera Toledo

Ángel Gutiérrez Pérez

Alan Antonio Camargo Espinoza

Ángel García Pérez

José Iván Flores Preciado

José María Alberto Pedraza Cuevas

Jorge Jacob Monroy Cid

Anabel Melina Monroy Cid

María del Carmen Maciel Hernández

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
INTRODUCCIÓN.....	5

CAPÍTULO 1

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN- AGITACIÓN

1. Principio de funcionamiento.....	6
1.1 Ventajas y restricciones del principio.....	7
1.2 Estructura de la zona de Trabajo	8
1.3 Materiales usados en la técnica de FSW.....	10

CAPÍTULO 2

HERRAMIENTA FSW

2. La herramienta.....	11
2.1 Diseño de la herramienta.....	12
2.2 Inclinación de la herramienta y la profundidad de incisión.....	13
2.3 Rotación de la herramienta y velocidades del recorrido.....	14

CAPÍTULO 3

MAQUINARIA Y EQUIPO

3. Maquinaria.....	18
3.1 La instalación fija y el proceso de soldadura.....	20
3.2 La robótica.....	21
3.3 Características de los robots especializados para FSW.....	23

CAPÍTULO 4

MATERIALES

4.1 Soldadura por Fricción – Agitación en aleaciones de Aluminio.....	24
4.2 FSW de Acero.....	27
4.3 La fuerzas de soldadura en los materiales.....	28
4.4 Marco teórico de la técnica de FSW.....	29

CAPITULO 5

VENTAJAS y APLICACIONES

5.1 Ventajas del proceso de soldadura por Fricción – Agitación.....	32
5.2 Ventajas industriales.....	33
5.3 Ventajas del proceso de friction stir welding frente al proceso MIG.....	34
5.4 Aplicaciones.....	35

CAPITULO 6

DESARROLLO EXPERIMENTAL

6.1 El diseño de la herramienta.....	39
6.2 La fabricación de las herramientas.....	43
6.3 Las herramientas.....	46
6.4 Ensamble de máquina herramienta.....	48
6.5 Preparación del material.....	51
6.6 Proceso de soldadura por Fricción – Agitación.....	53
6.7 Prueba del proceso de soldadura por fricción y agitación en plomo.....	57
CONCLUSIONES.....	60
BIBLIOGRAFIA.....	61

RESUMEN

El proceso de Soldadura por Fricción-Agitación (FSW) "Friction Stir Welding" desarrollado por el (TWI) "Technological Welding Institute de Inglaterra" en las última décadas es un nuevo concepto en soldadura en fase sólida por fricción especialmente apto para la soldadura del aluminio y sus aleaciones que ofrece aspectos interesantes y que en muchos casos puede reemplazar con ventaja a los procesos usuales por arco.

Es un proceso automático que permite soldar juntas a tope y traslape de gran longitud y por consiguiente supera la mayor limitación del proceso convencional por fricción que consiste precisamente en la restricción de su aplicación a piezas con simetría de revolución.

El FSW se basa esencialmente en la utilización de una herramienta cilíndrica de un perfil especial, la cual se inserta entre las superficies de encuentro de los materiales a unir con una cierta velocidad de rotación y bajo una fuerza determinada. Las piezas deben estar rígidamente vinculadas a tope o superpuestas para evitar su movimiento cuando avanza la herramienta a lo largo de la junta produciendo la dispersión de los óxidos, la plastificación localizada del material y la soldadura.

Esta nueva variante de la soldadura por fricción permite la soldadura de piezas planas de gran extensión

La coalescencia de los materiales la produce una herramienta de rotación que se introduce y avanza a lo largo de la junta.

Entre las ventajas fundamentales del método se encuentran: capacidad de unión de aleaciones de difícil soldabilidad, soldadura de 15 mm de espesor en una pasada y 30 mm en dos sin necesidad de biseles.

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.

Si bien en una primera etapa el desarrollo se focalizó en unión de aleaciones base aluminio, actualmente se está experimentando para aplicar con aceros, cobre, titanio, magnesio, plomo, zinc, etc.

En las siguientes figuras (a, b) se puede apreciar el inicio del recorrido en el proceso de soldadura por fricción – agitación, así como el resultado final de las placas soldadas



a)

Técnica de FSW sobre magnesio, inicio de la soldadura



b)

Vista próxima del final de la soldadura

INTRODUCCIÓN

La primera referencia a la utilización de calor de fricción en fase sólida para la soldadura, apareció en una patente hace más de un siglo en Estados Unidos. Un período de cincuenta años que pasaron antes de que cualquier avance significativo en la tecnología de la fricción tuviera lugar en una patente británica en 1941, que introdujo lo que ahora se conoce como la superficie de fricción. Sin embargo, otros cincuenta años pasaron antes de la soldadura por fricción - agitación (FSW) su sigla, en inglés (friction stir welding) fue inventado en el TWI. Esta reciente innovación ha permitido a la tecnología de la fricción que se utilizan para producir soldaduras continuas en la fabricación de placas, en particular en aleaciones ligeras.

La soldadura por fricción y agitación (FSW) es un proceso para unir las piezas en la fase sólida, con un intermedio no consumibles ni material de apoyo (Figura 1).

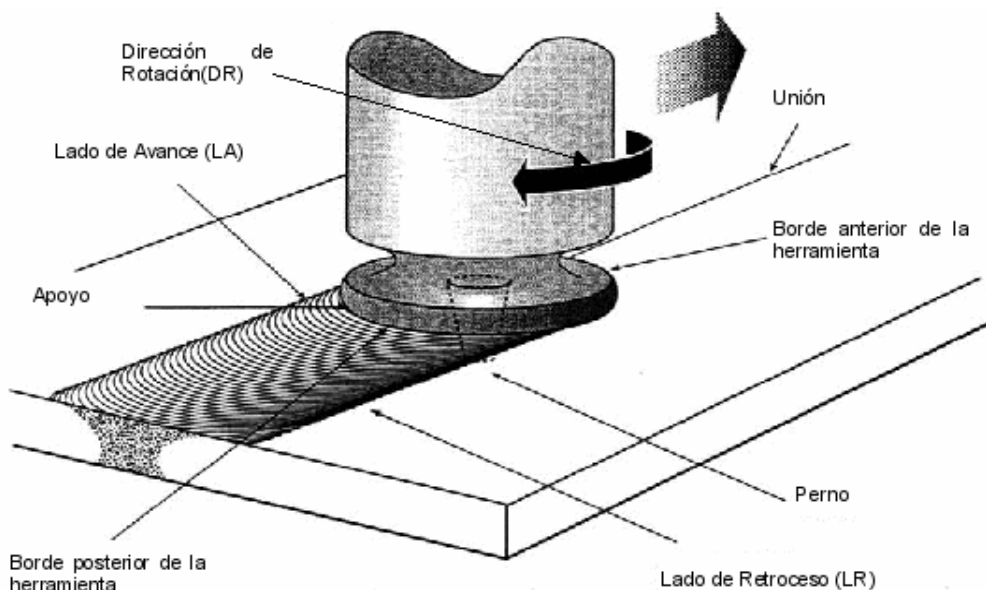


Figura 1: Esquema del proceso de Soldadura por Fricción-Agitación

CAPITULO 1

EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Este consiste en que la herramienta de revolución gira en un movimiento de rotación fijo o variable alrededor de su eje longitudinal y se asienta sobre las placas a soldar

La técnica de FSW se basa esencialmente en la utilización de una herramienta cilíndrica de un geometría específica, la cual se inserta entre las superficies de encuentro de los materiales a unir con una cierta velocidad de rotación y bajo una fuerza determinada (figura 1.1) Las piezas deben estar rígidamente vinculadas a tope o superpuestas para evitar su movimiento cuando avanza la herramienta a lo largo de la junta produciendo la dispersión de los óxidos, la plastificación localizada del material y finalmente la unión.

Este nueva variante de 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.

La coalescencia de los materiales la produce una herramienta de rotación que se introduce y avanza a lo largo de la junta.

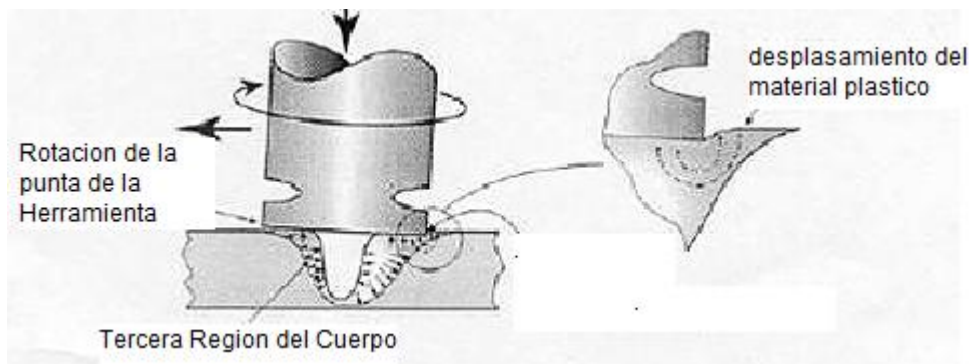


Figura 1.1. "Tercer cuerpo" región de transición que existe en la superficie de fricción entre el material y entre la herramienta en FSW.

1.1 Ventajas y restricciones del principio

Entre las ventajas fundamentales del método se encuentran: capacidad de unión de aleaciones de difícil soldabilidad, soldadura de 15 mm de espesor en una pasada y 30 mm en dos sin necesidad de biselés, ausencia de metal de aporte y gas de protección, ausencia de distorsión, no generación de humos tóxicos. Las propiedades mecánicas y sanidad de las uniones producidas resultan en general superiores a las obtenidas por procesos de arco convencionales (figura1.2). 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.

Si bien en una primera etapa el desarrollo se focalizó en unión de aleaciones base aluminio, actualmente se está experimentando para aplicar con aceros, cobre, titanio, magnesio, plomo, zinc, etc.

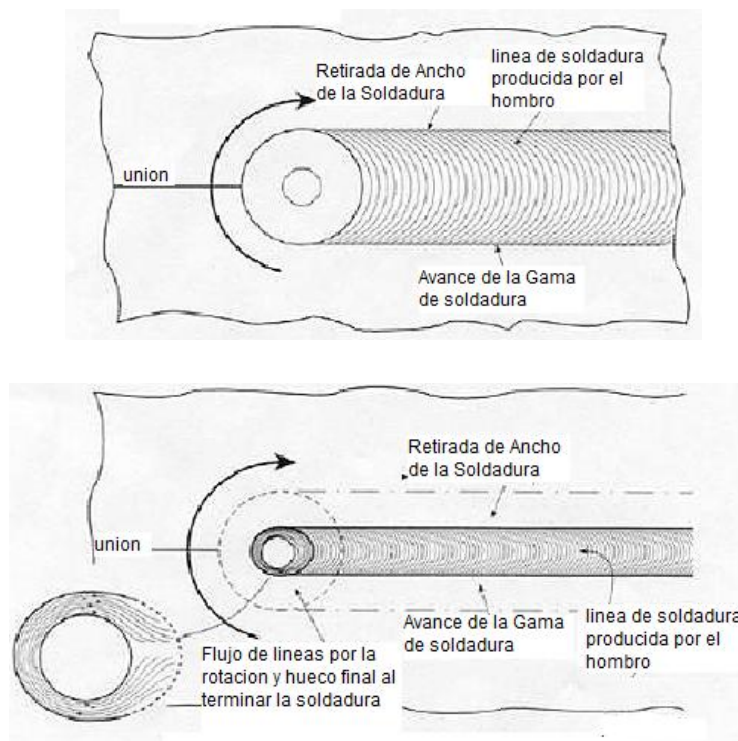


Figura 1.2. Ilustración de resultados de la soldadura por fricción - agitación

1.2 Estructura de la zona de trabajo

La micro estructura de la Soldadura por fricción y agitación depende en detalle en: el diseño de herramientas, la velocidad de rotación y traslación, la presión aplicada y las características de los materiales a unir. Hay una serie de zonas. La zona afectada por el calor (ZAC) es como se conoce en las soldaduras convencionales a la a región central de la unión de las placas, es la región más gravemente deformada, a pesar de que frecuentemente parece que recristalice dinámicamente, de modo que la micro estructura detallada puede consistir de granos equiaxiales. Las capas, común mente conocido como (anillo de cebolla) es una consecuencia de la forma en que la herramienta de soldado deposita el material de la parte delantera a la parte trasera de la soldadura. Parece que las uniones son cilíndricas de material extruido durante cada rotación de la herramienta, que es la que crea la soldadura y la Sección de capas con forma característica de anillos.

La zona afectada termo mecánicamente se encuentra entre el (ZAC) y el (Pin) de la herramienta, (figura 1.3) los granos de la micro estructura original se conservan en esta región, pero en un estado deformado. La superficie superior de la soldadura tiene una micro estructura diferente, una consecuencia de la rotura inducida por la herramienta rotatoria del hombro.

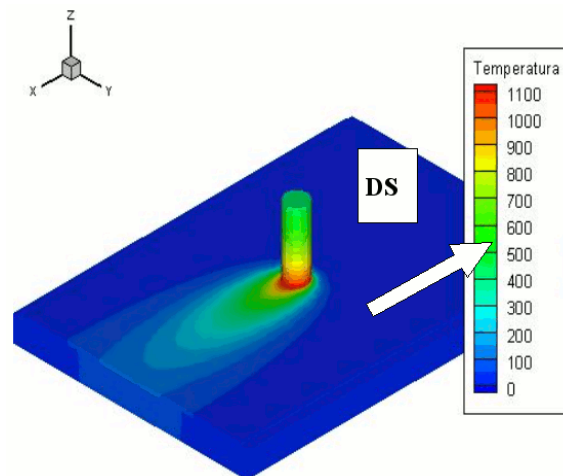


Figura 1.3. Rangos de temperatura en el proceso de FSW

La FSW es una técnica de soldadura a base de materiales principalmente de aluminio, que van en el espesor de la chapa de 0.8 mm a 7.5 mm.

FSW producen las uniones, con excelentes propiedades mecánicas estas en varias aleaciones de aluminio. (Figura 1.4)

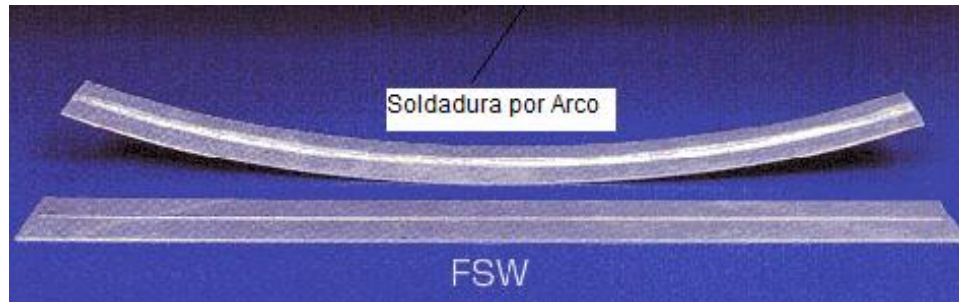


Figura 1.4. Comparación de distorsión entre la soldadura por arco y el método de FSW

La soldadura por fricción y agitación es un técnica que sólo en la región de trabajo de soldadura se procesa para formar una fase sólida y una unión soldada.

La soldadura por fricción ofrece una variedad de ventajas sobre los procesos de soldadura tradicionales. Estas ventajas incluyen mejorar la resistencia estática y las propiedades de fatiga. El proceso también es muy robusto, no es sensible a las condiciones ambientales, a diferencia de muchos procesos de soldadura tradicionales. Esto es especialmente cierto para la soldadura de materiales de bajo punto de fusión, tales como aluminio, magnesio, bronce y cobre. También produce una distorsión significativamente menor que los procesos de fusión de soldadura, lo que permite la reducción de costes dramáticos en muchas aplicaciones.

1.3 Materiales usados en la técnica de FSW

La soldadura por fricción puede utilizarse para unir láminas de aluminio y planchas sin la necesidad de usar material de aporte o ningún tipo de gases y materiales de un espesor de 0.8 hasta 7.5 mm pueden ser soldados con total penetración, sin porosidad o evasiones internas. Soldaduras altamente integrales y de muy baja distorsión pueden ser logradas con éxito en la mayoría de las aleaciones de aluminio, (figura 1.5) incluyendo aquellas consideradas "difíciles de soldar" con las técnicas regulares.

Entre los materiales que han sido soldados exitosamente con Fricción hasta la actualidad se incluye una gran variedad de aleaciones de aluminio (las series 2xxx, 5xxx, 7xxx, 8xxx) y las aleaciones Al-Li son las más recientes, la soldadura por fricción también ha demostrado ser efectiva en la unión de Plomo, Cobre, Magnesio y hasta aleaciones de Titanio.



Figura 1.5. Vista próxima de la Herramienta en el proceso de Soldadura por Fricción – Agitación sobre Aluminio

CAPITULO 2

LA HERRAMIENTA

La herramienta constituye la parte fundamental del proceso, se compone de dos cuerpos cilíndricos concéntricos, el de menor diámetro denominado “pin” es el que actúa en la interface de la junta y produce la plastificación, agitación y mezcla del metal, el de mayor diámetro o “hombro” trabaja sobre la superficie de la junta y es el que precalienta y consolida el material plastificado. La combinación de ambos efectos produce la re cristalización y coalescencia de las piezas, (figura 2.1)

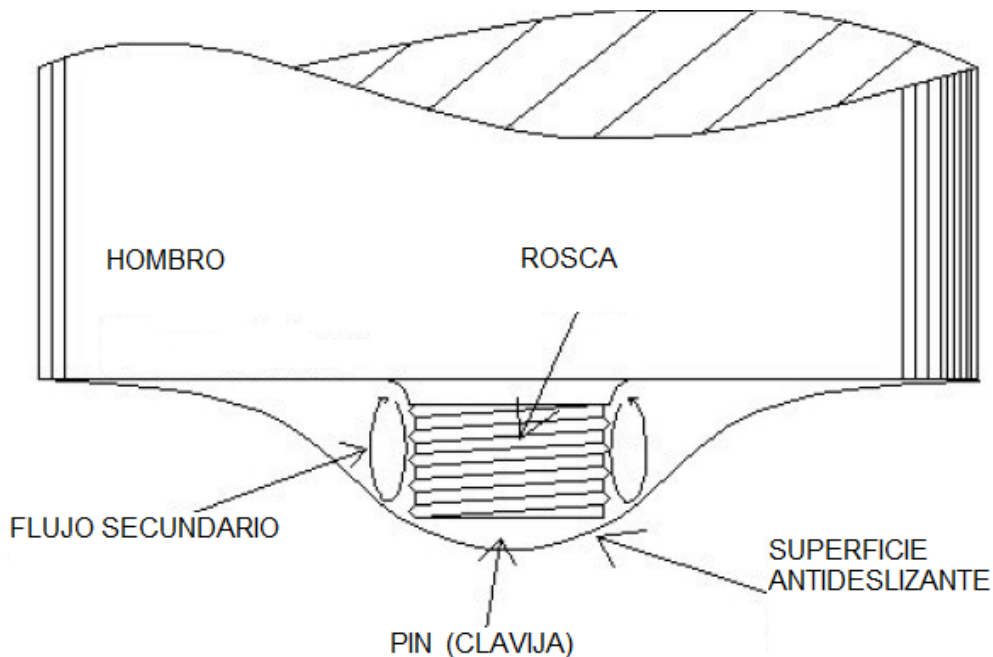


Figura 2.1. Herramienta usada en la tecnica de FSW

La forma y tamaño de la herramienta tiene gran influencia sobre la sanidad de la unión. Durante el proceso la misma es sometida a altas sollicitaciones mecánicas a temperatura próximas al punto de fusión del metal base, por lo cual el material y tratamiento empleado para su fabricación son fundamentales en lo concerniente a su vida útil.

2.1 Diseño de la Herramienta

El diseño de la herramienta es un factor crítico, una buena herramienta puede mejorar tanto la calidad de la soldadura como dar la máxima velocidad de soldadura posible.

Es deseable que el material de la herramienta sea lo suficientemente fuerte, duro y resistente a la temperatura de soldadura. Además deberá tener una buena resistencia a la oxidación y una conductividad térmica baja para minimizar la pérdida de calor y el daño térmico a la maquinaria en el tren de tracción.

El acero para herramientas Trabajado en caliente tal como AISI H13 ha demostrado ser perfectamente aceptable para la soldadura de aleaciones de aluminio dentro de los rangos de espesor de 5 a 25 mm.

Materiales para herramientas más avanzadas son necesarios para las aplicaciones más exigentes, como aquellos que son altamente abrasivos compuestos de matriz metálica o materiales de alto punto de fusión, como el acero o titanio.

Mejoras en la herramienta de diseño han demostrado que produce mejoras sustanciales en la productividad y la calidad. (Figura 2.2) TWI ha desarrollado herramientas diseñadas específicamente para aumentar la profundidad de la penetración y así aumentar el espesor de la chapa.

Un ejemplo es el diseño de la "espiral" que utiliza una aguja cónica con característica re-entrante o un hilo de paso variable, a fin de mejorar el flujo de material hacia abajo.

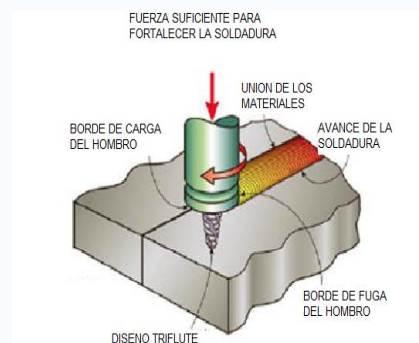


Figura 2.2. Ilustración de la herramienta FSW en proceso de soldado

Diseños adicionales incluyen la Triflute y series Trivex. (figura2.3) El diseño Triflute tiene un sistema complejo de cortes afilados, en el pin participante que parece incrementar el movimiento de material alrededor de la herramienta.



Figura 2.3. Diseño triflute de la herramienta de Soldadura por Fricción - Agitación

La mayoría de las herramientas tienen un perfil de hombros cóncava que actúa como un volumen de escape para el material desplazado por el PIN, se evita que el material de extrusión de los lados de la espalda y mantiene la baja presión y por lo tanto, una buena unión de material detrás de la herramienta. La herramienta Triflute utiliza un sistema alternativo con una serie de surcos concéntricos en la superficie que se destina a producir un movimiento adicional de materiales en las capas superiores de la soldadura

2.2. Inclinación de la herramienta y la profundidad de incisión

La profundidad de inmersión se define como la profundidad del punto más bajo del hombro por debajo de la superficie de la placa soldada y se ha encontrado ser un parámetro fundamental para garantizar la calidad de la soldadura. (Figura 2.4) Hundiendo el hombro por debajo de la superficie de la placa aumenta la presión por debajo de la herramienta y ayuda a garantizar la adecuada forja del material en la parte trasera de la herramienta.

La inclinación de la herramienta suele ser de 2-4 grados, de manera que la penetración de la parte trasera de la herramienta es mayor que la parte delantera, se ha encontrado que esto es para ayudar a este proceso de la forja.

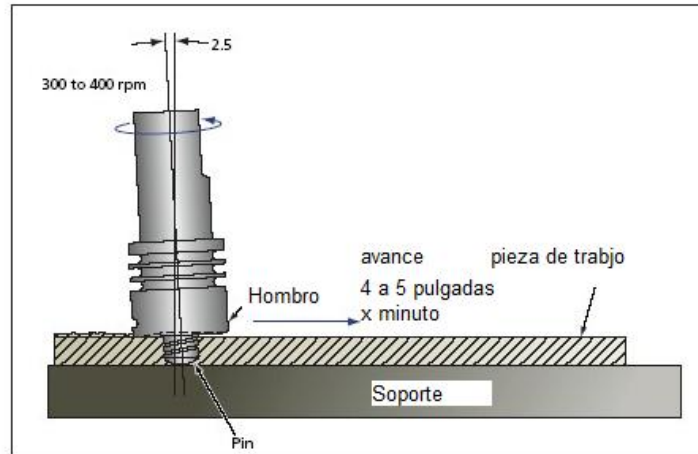


Figura 2.4. Ilustración de la inclinación de la herramienta y la profundidad de incisión

La profundidad de inmersión debe ser correctamente definida, para garantizar la presión adecuada, es necesario que se consiga la penetración perfecta de la herramienta para iniciar la soldadura. Dada la alta carga que requiere la máquina de soldar puede desviar y reducir así la profundidad de inmersión en comparación con el valor nominal, lo que puede dar lugar a defectos en la soldadura. Por otra parte, una profundidad de inmersión excesiva puede provocar el roce de pines en la superficie de la placa de acompañamiento o una sobrecarga significativa del espesor de la soldadura en comparación con el material de base.

Maquinarias con carga variable se han desarrollado para compensar automáticamente los cambios en la fuerza y el desplazamiento de la herramienta, mientras que en TWI han desarrollado un sistema de rodillos que mantiene la posición de la herramienta encima de la placa de la soldadura.

2.3 Rotación de la herramienta y velocidades del recorrido

Hay dos velocidades de la herramienta a ser consideradas en la soldadura por fricción - agitación; la rapidez de rotación en la herramienta y la rapidez con que atraviesa la interfaz. Estos dos parámetros tienen una importancia considerable y se debe elegir con cuidado para garantizar un ciclo de soldadura exitosa y

eficiente. La relación entre las velocidades de la herramienta y la entrada de calor que se produce durante la soldadura es compleja, (figura 2.5) pero en general, puede decirse que el aumento de la velocidad de rotación o disminuyendo la velocidad de desplazamiento se traducirá en un proceso de soldadura más caliente. Con el fin de producir una soldadura con éxito es necesario que el material que rodea a la herramienta este lo suficientemente caliente como para permitir el flujo plástico del material y minimizar las fuerzas que actúan sobre la herramienta. Si el material está muy fresco entonces puede haber vacíos y defectos que estarán presentes en la zona de la agitación y en casos extremos esto puede producir que la herramienta se pueda romper.

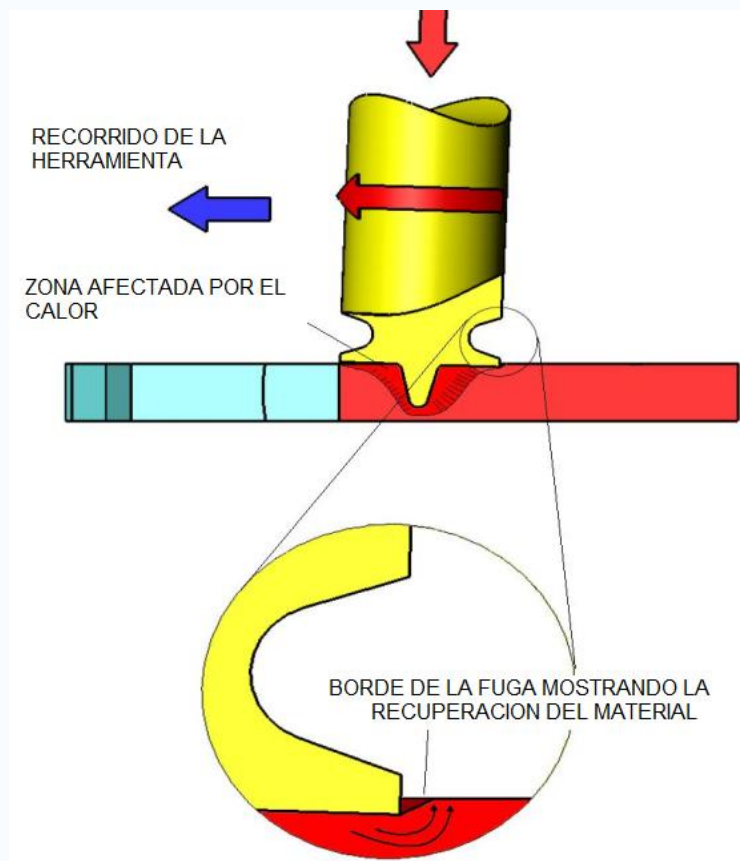


Figura 2.5. Rotación de la herramienta y zona afectada por el calor

En el otro extremo de la escala, el calor excesivamente alto puede ser perjudicial para las propiedades finales de la soldadura. En teoría esto podría incluso dar lugar a defectos debido a la licuación de bajo punto de fusión de las fases (similar a la licuación de grietas en las soldaduras de fusión). Estas demandas de unión son el concepto de una "ventana de transformación»: que son un conjunto de parámetros de transformación que producirá una soldadura de buena calidad. Dentro de esta ventana , la soldadura resultante tendrá una entrada de calor lo suficientemente alta para garantizar la plasticidad del material adecuado pero no tan alto que las propiedades de soldadura sean excesivamente reducidas de tal manera que es muy importante el diseño de la herramienta (figura 2.6) para garantizar la unión entre materiales.



Figura 2.6. Diseño de la herramienta que muestra los canales de agitación que ayudan a mezclar el material en el proceso de soldado

En la figuras (2.7 y 2.8) se muestran algunos tipos de herramientas. Cada herramienta tiene un hombro cuya rotación contra el material a soldar genera la mayor parte del calor necesario para soldar. El pin o perno de la herramienta se hunde en el material y ayuda a revolver el metal, para generar la unión



a)



B)

Figura 2.7. Herramientas de FSW sin contar con el diseño Triflute ni los canales de Agitación



a)



b)

Figura 2.8. Herramientas de FSW con cambios de diseños de Hombro y de Pin con diferentes profundidades

CAPITULO 3

MAQUINARIA Y EQUIPO

En principio el equipo debe ser capaz de ejecutar cuatro operaciones básicas: avance longitudinal de la pieza y/o de la herramienta, ajuste vertical del husillo porta herramienta, giro del husillo sobre su eje e inclinación de este respecto a la pieza. (Figura 3.1) En particular cuando se emplea para la puesta a punto de procedimientos, debe además permitir operar dentro de rangos suficientemente amplios de velocidades de giro y translación. Debido a los grandes esfuerzos que se producen durante la soldadura la rigidez estructural es otro requerimiento fundamental. En general para muchas aplicaciones dichas características se pueden encontrar en máquinas y herramientas convencionales o ligeramente modificadas, como en el ejemplo de la Figura (3.2)

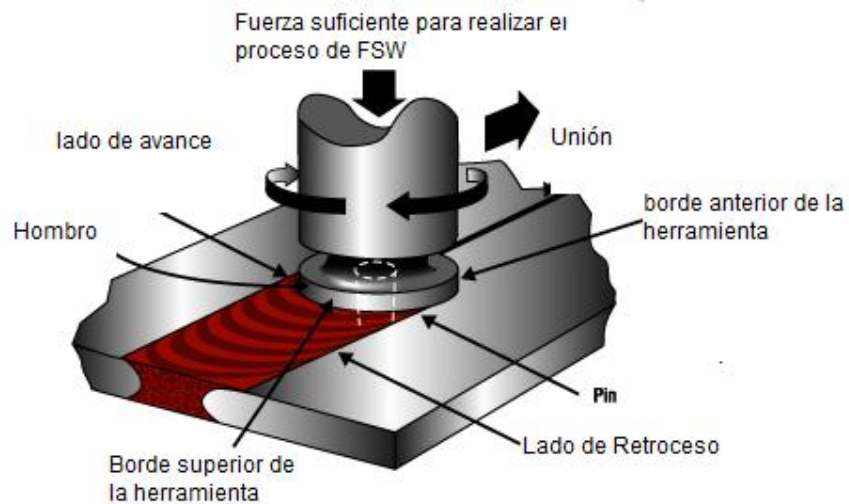


Figura 3.1. Ilustración que describe partes de la herramienta y áreas de trabajo en la FSW

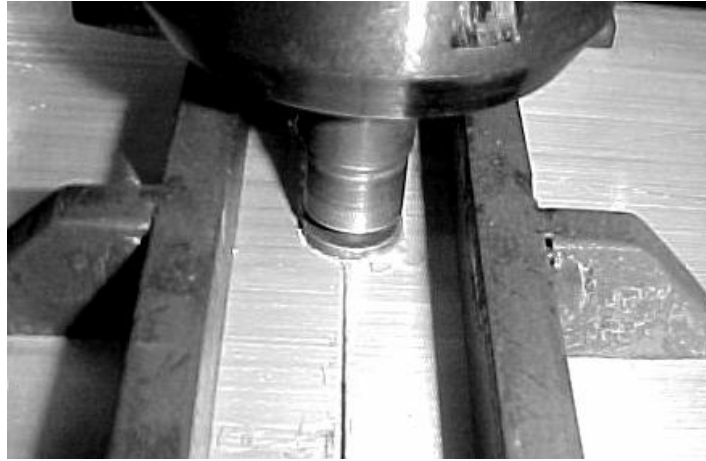


Figura 3.2. Vista general de un equipo utilizado para la Soldadura por Fricción y Agitación

Las figuras (3.3 y 3.4) muestran algunas maquinas usadas para el proceso de Soldadura de Fricción y Agitación



Figura 3.3. Robot utilizado en Pruebas de FSW en magnesio



Figura 3.4. Robot con mecanismos eléctricos para soldar aluminio

3.1 La Instalación fija y el Proceso de Soldadura

Las dos partes a unir deben fijarse de forma rígida antes de la operación de soldadura (figura 3.5). El Pin, que es una parte integral de la herramienta se hunde en el metal para ayudar a la entrada, el hombro de la herramienta genera la mayor parte del calor. Como se ha completado la soldadura se retira la herramienta dejando un agujero. La soldadura puede estar diseñada para que estas regiones puedan ser descartadas del componente.



Figura 3.5. Piezas sujetadas listas para entrar en el proceso de soldado

En la figura (3.6), la presencia de un agujero no puede ser apropiado cuando se fabrican tubos o tanques de almacenamiento. El agujero puede ser evitado mediante el diseño de la herramienta de forma que sólo el perno se pueda recoger de forma automática y suavemente en el hombro, dejando atrás una soldadura integral.



a)



b)

Figura 3.6. Ejemplo de recorrido de la Herramienta (a) y acercamiento al hueco dejado al final de la soldadura (b)

Gracias a los avances en la tecnología ya se fabrican robots con especificaciones necesarias para llevar a cabo el proceso de Soldadura por Fricción y Agitación

3.2 La robótica

Para aplicaciones donde la productividad debe ser maximizada o multidimensional de soldadura se ha desarrollado un robot para el proceso de Fricción y Agitación (figura 3.7)

El sistema se basa en el uso de una alta carga útil. El sistema es capaz de soldar material de 1 mm a 60 mm para la mayoría de las aleaciones de aluminio, y hasta 25 mm de espesor para 6xxx en aleaciones de aluminio.

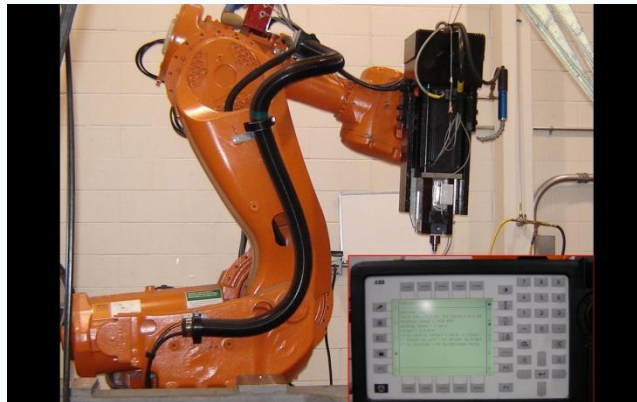


Figura 3.7. Robot diseñado para la Soldadura de Fricción - Agitación

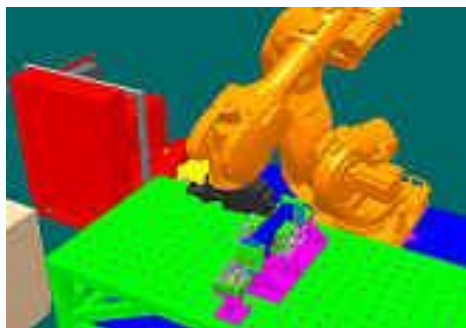
Se ha desarrollado ya un software de aplicación para permitir que el sistema integrado pueda realizar la soldadura por fricción (FSW), por fricción de transformación (FSP), y por fricción de soldadura por puntos (FSSW). El software permite la capacidad de la fuerza de control y sobre la marcha da ajuste de los parámetros de soldadura (la fuerza, posición, etc.) para minimizar el tiempo de instalación. El software también tiene la capacidad de configuración automática de viaje (inclinación) y ángulos de trabajo necesarios para el proceso de FSW. Las opciones de software incluyen la adquisición de datos y la capacidad de supervisión constante.

El sistema es autónomo consta de: un brazo robot, su plataforma, la mesa de control del robot, el controlador de FSW y un motor eléctrico. (Figura 3.8) El sistema está disponible con la fuerza y el par necesario, sensor de eje y motor de 5 kw. El equipo opcional permite aumentar la potencia del motor y el multi-eje de la fuerza de sujeción y movimiento de la herramienta.

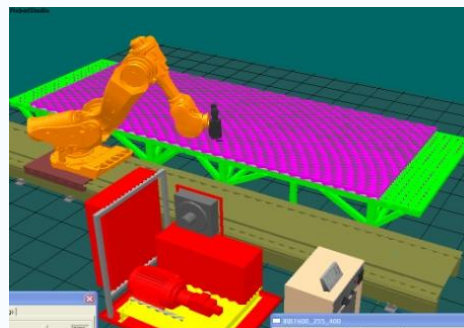


Figura 3.8. Estación robótica de trabajo para Soldadura FSW

El sistema permite realizar Simulaciones de una celda Robótica en una estación de producción, (figura3.9) estas se realizan para estimar los tiempos de ciclo y realizar análisis de interferencias.



a)



b)

Figura 3.9. Simulaciones de celdas robóticas en proceso de Soldadura por Fricción Y Agitación

3.3 Características de los robots especializados para FSW

- 1) Sistemas eléctricos y mecánicos (no hidráulicos)
- 2) Capacidad de la fuerza de empuje de hasta 25 kN (5.000 libras) a velocidades de hasta 250 mm / s.
- 3) Una potencia de 5 kW
- 4) Tiempos de soldadura de menos de 0,75 segundos, depende (de espesor y las aleaciones usadas) , así como uso en aplicaciones no lineales(figura 3.10)
- 5) La garganta mínimo de 12 "
- 6) La profundidad mínima de 0.8 "
- (7) Comunicación de Dispositivo de red

Las opciones incluyen:

- 1) Auto de sujeción del sistema, que sirve para eliminar la necesidad de sujeción manual
- 2) Fuerza y par Motores
- 3) Rotativos más grandes o más pequeños
- 4) Mayor o menor capacidad de la fuerza de empuje
- 5) Aumento o disminución de la garganta o de la profundidad.
- 6) Adquisición de datos que se guardan

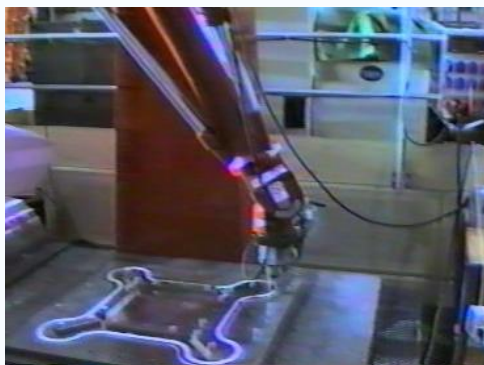


Figura 3.10. Robot realizando un proceso de Soldadura por Fricción y Agitación no lineal

CAPITULO 4

MATERIALES

4.1 Soldadura por Fricción - Agitación en aleaciones de aluminio

La más popular aleación de aluminio contiene aproximadamente el 8% en peso de silicio. Por lo tanto se solidifica bastante bien, el aluminio primario es rico en dendritas y una mezcla eutéctica de aluminio sólido y la solución de silicio casi puro. Este último se produce en forma de partículas de silicio secundarios que tienden a ser frágiles.

La soldadura por fricción –agitación tiene la ventaja de que rompe las partículas de silicio secundarias y cubre los poros de la transformación mecánica, como se muestra en la (figura 4.1)

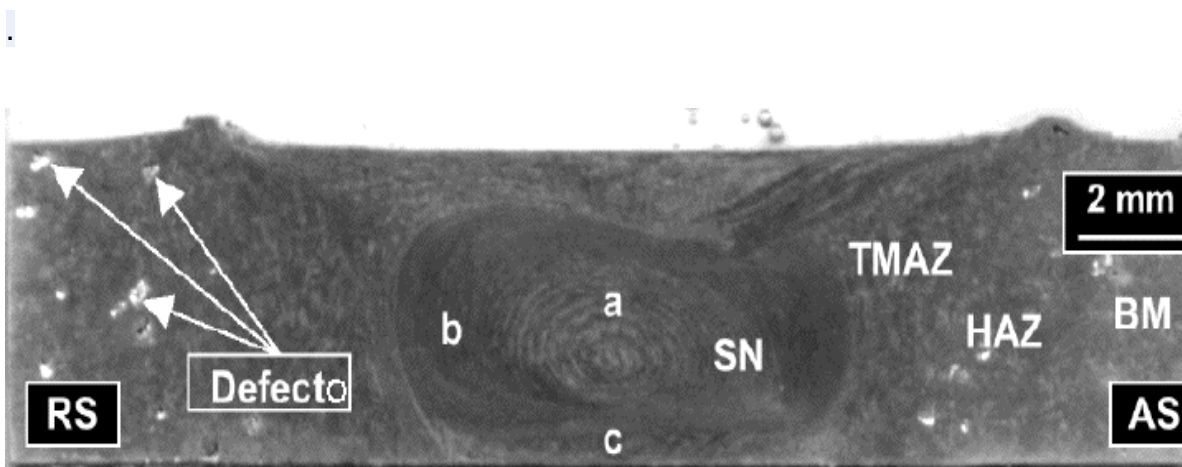


Figura 4.1. Sección a través de una soldadura por fricción y agitación en una aleación de Al-Si. En la que existen porosidades indicadas en el metal base (BM), el (HAZ) representa la zona afectada por el calor, el (TMAZ) la zona afectada termo mecánicamente, y la agitación (SN).

Pruebas microscópicas se realizan a trabajos de soldadura por fricción y agitación (figuras 4.2, 4.3) indicando en el estudio de estas, varias zonas de interés para observar el comportamiento del material y a su vez realizar en estas zonas pruebas que den resultados de la unión por FSW (tabla 4.1)

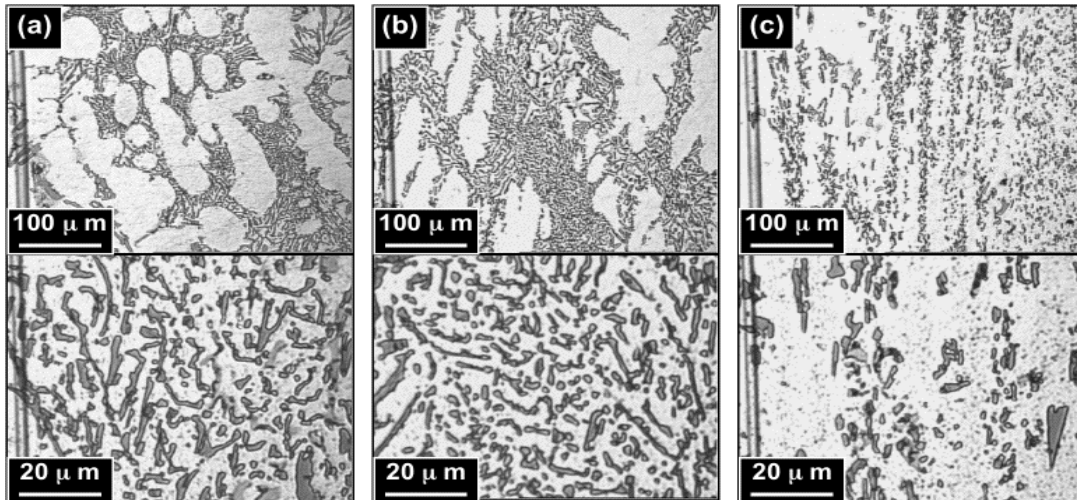


Figura 4.2. Microscopía óptica que muestra la micro estructura de metal de la base (a), zona afectada térmicamente (b), zona afectada termo mecánica (c), donde un considerable refinamiento del silicio se ha producido.

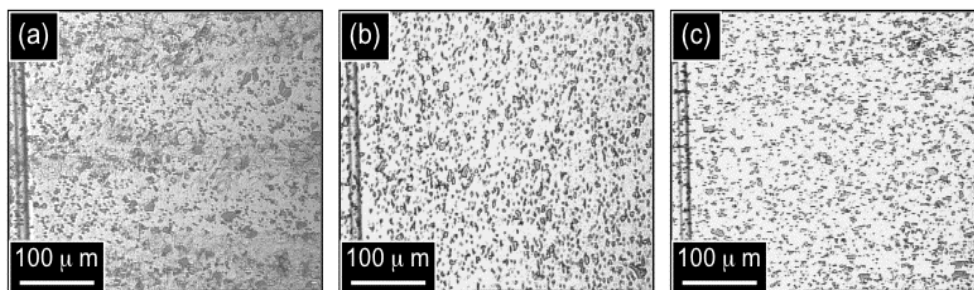


Figura 4.3. Microscopía óptica de las regiones (a), (b) y (c) de la agitación. La ubicación de estas regiones es identificada en la sección macroscópica presentada anteriormente.

Tabla 4.1. Resultados de la anterior muestra de estudio

	Resistencia a la tracción (MPa)	Prueba de esfuerzo(MPa)	Porcentaje de elongación	Ubicación de la fractura
Unión	150	85	1.6%	BM
soldadura	179	87	5.3%	TMAZ
SN	251	96	14.4%	SN

El refinamiento de silicio y la eliminación de la porosidad conducen a una mejora mecánica de las propiedades de la soldadura en las placas base, las placas a soldar deben estar sujetadas a tope para realizar correctamente el soldado ya que al acercarse la herramienta(figura 4.4) e iniciar la penetración al material , la fuerza que produce podría separar las placas y arruinar la soldadura , al final de la soldadura puede apreciarse la junta de unión de las placas y el agujero de salida de la herramienta(figura 4.5)



Figura 4.4. Acercamiento a la Herramienta antes de penetrar en la placa



Figura 4.5. a) FSW, junta a tope entre las placas aluminio



b) El agujero en la parte final es en donde la operación termina

La aplicación de la soldadura por fricción y agitación en el aluminio no solo es en placas y con soldaduras lineales un ejemplo de esto es el uso de la soldadura en ruedas (figura 4.6)



Figura 4.6. Vista interior de una soldadura hecha por Fricción y Agitación en una rueda de aluminio y silicio serie 5000 para un coche deportivo. La FSW se lleva a cabo como un cordón de soldadura en un cilindro, seguido por la operación de conformado.

4.2 FSW de Acero

El acero puede ser soldado por Fricción - Agitación pero el problema esencial es que los materiales para herramientas se desgastan rápidamente. De hecho los restos de desgaste de la herramienta con frecuencia se pueden encontrar dentro de la soldadura. El proceso sería por tanto a utilizarse en circunstancias especiales en que los métodos de soldadura común sean insuficientes. Estas circunstancias aún no se han aclarado. Hay tantos buenos métodos por los cuales puede ser el acero soldado y en un requerimiento especial se usaría el FSW. El ejemplo siguiente (figura 4.7) es el FSW de acero inoxidable. Observe que la muestra de soldado se vuelve roja durante la soldadura.

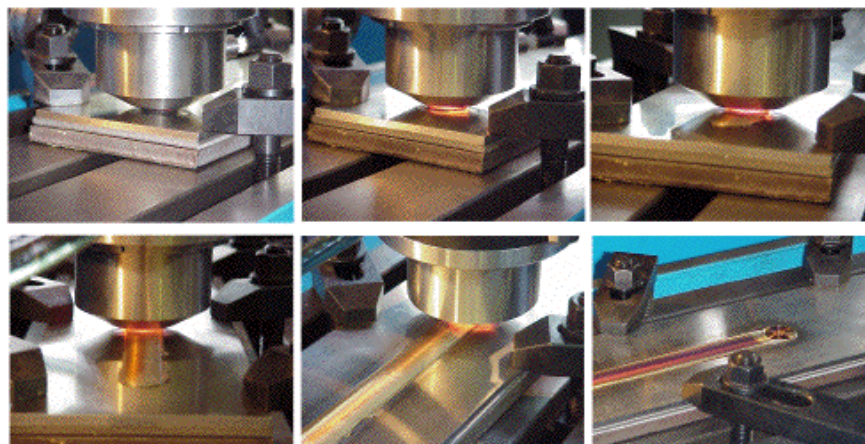


Figura 4.7. Proceso paso a paso de la soldadura por Fricción y Agitación en Acero

Dado que la herramienta se pone al rojo vivo y alcanza una alta temperatura, es necesario proteger el proceso con algún refrigerante.

Un posible uso de FSW en la soldadura de los aceros es en el contexto de los aceros inoxidable, Los aceros inoxidable austeníticos se pueden soldar fácilmente mediante la soldadura de arco convencional y otros procesos. Sin embargo, FSW puede ofrecer una menor distorsión, menor contracción y porosidad. Más importante es la prevención de los humos que contienen cromo hexavalente, que es cancerígeno. Además evita los efectos de segregación de químicos asociados con procesos de soldadura donde intervienen gases dañinos.

4.3 Las fuerzas de Soldadura en los Materiales

Durante la soldadura por Fricción y Agitación una serie de fuerzas actúan sobre la herramienta:

- Una fuerza hacia abajo es necesario para mantener la posición de la herramienta en o por debajo de la superficie del material. Algunas de las máquinas de soldadura por Fricción y Agitación operan bajo el control de la carga, pero en muchos casos la posición vertical de la herramienta está prefijada y la carga puede variar durante la soldadura.
- La fuerza al recorrer el material en el desplazamiento depende también de la velocidad de la herramienta y es positivo en la dirección de recorrido. Desde esta fuerza surge como resultado la resistencia del material al movimiento de la herramienta, se podría esperar que esta fuerza se reducirá a medida que la temperatura del material alrededor de la herramienta sea mayor.
- La fuerza lateral puede actuar en la herramienta de manera perpendicular a la dirección transversal y se define como positivo el avance hacia el lado de la soldadura.

- El torque es necesario para la rotación de la herramienta, cuyo importe dependerá de la fuerza hacia abajo y coeficiente de fricción (rozamiento) y / o la fuerza del flujo del material en la región circundante.

4.4 Marco teórico de la técnica de FSW

Con el fin de evitar la fractura de la herramienta y para minimizar el desgaste excesivo en la herramienta y maquinaria asociada, el ciclo de soldadura debe ser modificado para que las fuerzas que actúan en la herramienta sean tan bajas como sea posible, y se evitan los cambios bruscos. Con el fin de encontrar la mejor combinación de parámetros de soldadura, es probable que un acuerdo deba ser alcanzado, ya que las condiciones que favorecen a las fuerzas de trabajo (por ejemplo de entrada de alta temperatura, velocidad del recorrido etc.) para estas es deseable desde el punto de vista de la productividad y las propiedades de soldadura que las fuerzas de trabajo sean las necesarias

La generación de calor durante la Soldadura por Fricción Agitación surge de dos fuentes principales: la fricción en la superficie de la herramienta y la deformación del material alrededor de la herramienta. La generación de calor se considera a menudo que esta predominantemente en el hombro debido a su mayor superficie, y será igual a la potencia necesaria para superar las fuerzas de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo. La condición de contacto de entrada en el hombro puede ser descrito por el rozamiento, utilizando un coeficiente de fricción (μ) y la presión de la interface (P), o adherencia de la fricción sobre la base de la resistencia al corte de la interface , a una temperatura adecuada (T) y la velocidad de deformación. Donde (ω) es la velocidad angular de la herramienta, (R_{hombro}) es el radio de la herramienta de hombro y (R_{pin}) el radio del pin . Varias otras ecuaciones han sido propuestas para tener en cuenta factores tales como el PIN, pero el enfoque general sigue siendo el mismo.

Aproximaciones matemáticas para el calor total generado por el hombro de la herramienta (Q_{total}) se han desarrollado utilizando los modelos de deslizamiento y unión de fricción,(ecuaciones 4.1 , 4.2)

$$Q_{total} = \frac{2}{3}\pi P \mu \omega (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \text{ (Deslizamientos).....(4.1)}$$

$$Q_{total} = \frac{2}{3}\pi \tau \omega (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \text{ (Unión).....(4.2)}$$

(Q total) = calor total generado por el hombro de la herramienta
 (μ) = el coeficiente de fricción, (P) = la presión de la interface
 (T) = temperatura de fricción, (ω) = es la velocidad angular de la herramienta
 (Rhombro) es el radio del hombro de la herramienta
 (Rpin) el radio del pin

Una dificultad importante en la aplicación de estas ecuaciones es la determinación de los valores adecuados para el coeficiente de fricción o el esfuerzo de corte entre las placas. Las condiciones en la herramienta son extremas y muy difíciles de medir. Hasta la fecha, estos parámetros se han utilizado como "parámetros de ajuste", donde el modelo se analiza a partir de datos térmicos para obtener una medida razonable de un campo térmico simulado.

Como una demostración práctica paso a paso del proceso de soldadura por fricción y agitación se tienen las siguientes figuras que muestran los momentos más relevantes de esta técnica de soldado que son: la entrada de la herramienta (figura 4.8), entrada total del pin e inicio del recorrido (figura 4.9) avance del recorrido y unión de las placas figura (4.10) y finalmente la salida de la herramienta (figura 4.11)



Figura 4.8. Herramienta en Penetración del material para iniciar la unión por Soldadura Fricción - Agitación



Figura 4.9. Penetración total del PIN e inicio del recorrido



Figura 4.10. Avance que muestra el resultado del Soldado entre las placas

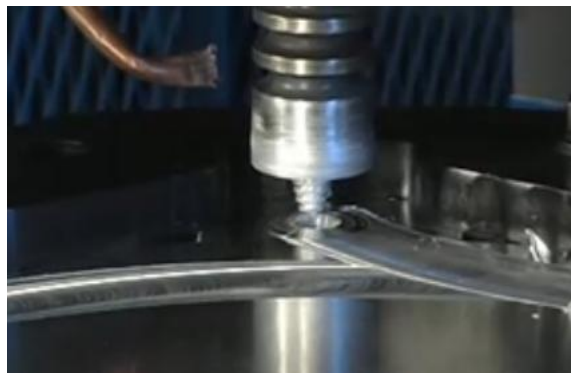


Figura 4.11. Fin del recorrido de soldado y salida de la herramienta

CAPITULO 5

VENTAJAS y APLICACIONES

5.1 Ventajas del proceso de soldadura por fricción - agitación

- Permite a menudo, soldar metales diferentes con facilidad, aun algunos considerados como incompatibles o insoldables.
- El proceso de soldadura por fricción es al menos 2 y hasta 100 veces más rápido que otras técnicas de soldado.
- Las soldaduras por fricción son lo suficientemente versátiles para unir un amplio rango de formas, materiales y tamaños.
- La preparación de superficies de unión no es crítica, así sean maquinadas, aserradas o hasta cizalladas, todas son soldables.
- Las uniones resultantes tienen calidad de forjado, con soldaduras 100% al tope en toda la superficie de soldado.
- Como no hay derretimiento, no ocurren defectos de solidificación, por ejemplo porosidad de gas, segregación, ni inclusiones de escoria.
- Los componentes pulvimetalúrgicos pueden soldarse a otros materiales pulvimetalúrgicos, forjados, fundiciones o material forjado trabajado.
- No requiere de insumos como flux, rellenos o gas protector.
- 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.

5.2 Ventajas Industriales

- Es ecológicamente limpio, no se genera humo, emisiones o gases que necesiten ser evacuados.
- No hay salpicaduras de la soldadura y se producen pocas chispas.
- El requerimiento de energía es de hasta un 20% menos del requerido en procesos de soldadura convencionales.
- No se necesita una cimentación o requerimientos de energía especiales.
- Los parámetros del proceso son fácilmente monitoreados.
- El equipo de Soldadura por Fricción es fácilmente automatizado para lograr tasas de producción elevadas.
- Parámetros pre-calculables para la mayoría de materiales y geometrías. El proceso puede por lo tanto matemáticamente calcularse a escala (por ejemplo muestras pequeñas pueden utilizarse para el desarrollo de partes grandes).
- Su aplicación no se rige a formas lineales(figura 5.1)



Figura 5.1. FSW en aplicación no lineal

5.3 Ventajas del proceso de Friction stir welding frente al proceso MIG

El uso de la soldadura al arco (MIG, TIG) para unir metales está muy extendido. La unión se produce mediante la fusión de la intercara y su posterior solidificación. Por ello, la micro estructura obtenida no presenta unas propiedades del todo óptimas al ser un proceso de solidificación.

Con el objeto de superar las limitaciones actuales se están investigando nuevos procesos de unión. La técnica, denominada, **Friction Stir Welding (FSW)**, es capaz de unir aleaciones de aluminio consideradas no soldables y además unir las ya soldables de una manera más eficiente. Es un proceso que admite diferentes diseños de unión (a tope o traslape).

Tabla 5.1 que describe las ventajas del proceso FSW

Tabla 5.1	
Ventajas	Descripción
Distorsión ensamblado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baja distorsión, incluso en soldaduras largas. ▪ Baja contracción.
Propiedades mecánicas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Propiedades mecánicas excelentes. <ul style="list-style-type: none"> . Fatiga (Tensiones residuales menores). . Ensayos de tracción. . Ensayos de doblado. ▪ No porosidad.
Condiciones de trabajo / Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No humos. ▪ No proyecciones. ▪ No ruido. ▪ Opera en todas las posiciones. ▪ Totalmente automatizable.

Productivas / Económicas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pocos parámetros. ▪ Eficiencia energética. ▪ Herramienta no consumible (la vida de la herramienta se puede estimar en 1000m en las aleaciones de aluminio de la serie 6000). ▪ No es necesario hilo de aporte. ▪ No es necesario gas de protección para soldar aluminio. ▪ No es necesaria la homologación de soldadores. ▪ Tolerancia a preparaciones de soldadura imperfectas. Se aceptan capas finas de óxido. ▪ No es necesario el pulido en la producción en masa.
Medio-ambientales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficiencia energética ▪ No es necesario gas de protección para soldar aluminio.

5.4 Aplicaciones

Las soldaduras por fricción son los suficientemente versátiles para unir un amplio rango de piezas formadas, de materiales de diferentes tamaños. Las aplicaciones típicas incluyen componentes para aeronaves y aeroespaciales, herramientas, maquinaria agrícola, partes automotrices, piezas de campos petroleros, contenedores de desecho, equipos militares, ejes y materiales bimetálicos

Áreas de aplicación adecuadas para FSW

- Construcción naval
- Plataformas petrolíferas marinas
- Industria aeroespacial
- Vagones de ferrocarril, tranvías, vagones de metro
- Industria de la automoción
- Industria cervecera
- Construcción de puentes

- Producción de motores eléctricos
- Industria de defensa

Cabe mencionar que el proceso está patentado por TWI en los países más industrializados y la licencia por más de 183 usuarios, incluyendo las costuras de soldadura en aluminio y aplicaciones específicas

Esta técnica de soldadura se ha aplicado en:

- Tanque externo del transbordador espacial, (figura 5.2)
- Orion Crew vehículo de asalto militar, (figura 5.3)
- Boeing Delta II, Delta IV Expendable Launch Vehicles , (figura 5.4)
- El Space X Falcon 1 cohete, (figura 5.5)
- Blindaje para los buques de asalto anfibio, (figura 5.6)
- La soldadura de las alas y los paneles de fuselaje de la nueva Eclipse 500 aeronaves de Eclipse Aviation.(figura 5.7)

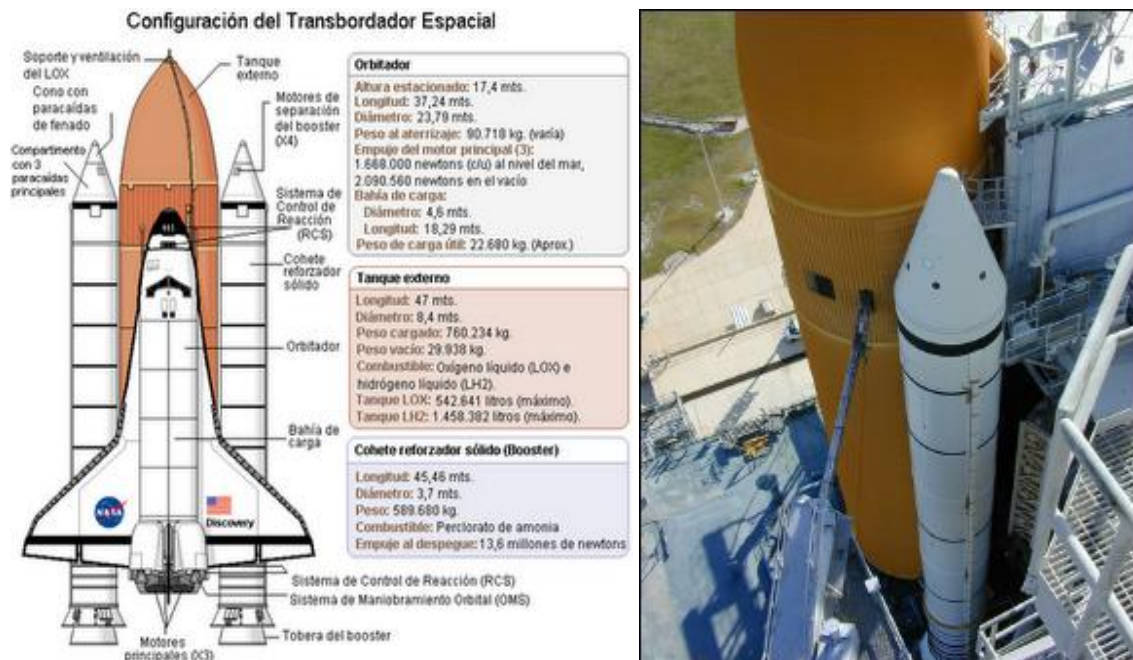


Figura 5.2. Tanque externo del transbordador espacial



Figura 5.3. En este vehículo se puede apreciar en su diseño donde se uso la Soldadura por Fricción y Agitación, con la Finalidad de soportar los impactos de proyectiles enemigos

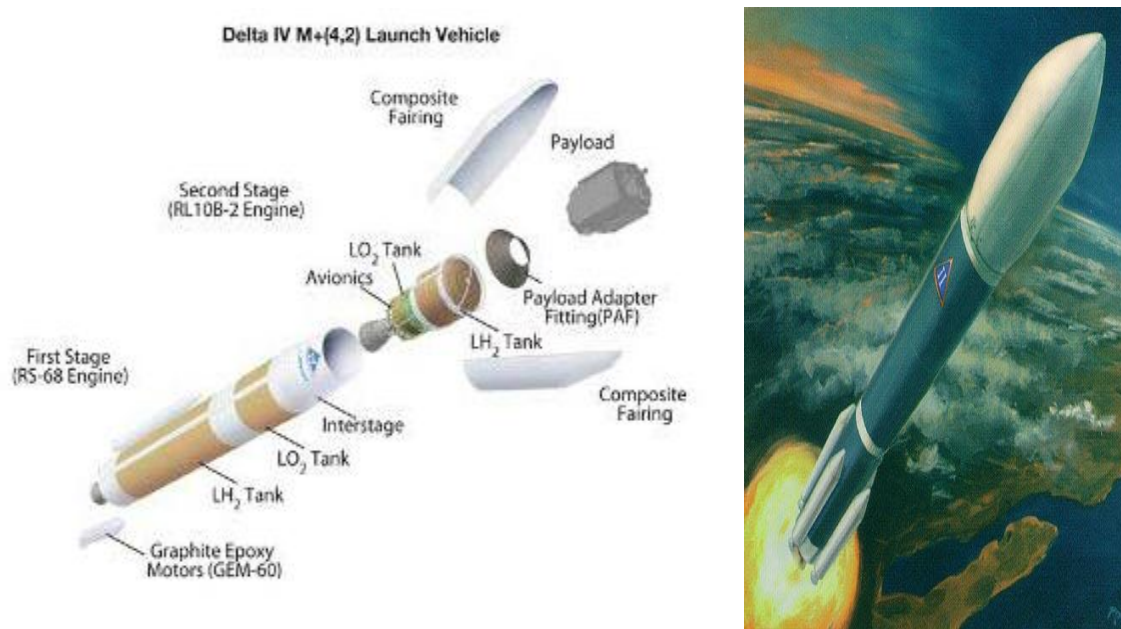


Figura 5.4. Boeing Delta II, Delta IV Expendable Launch Vehicles (vehículo de lanzamiento desechable) donde el tanque esta soldado por la técnica de FSW



Figura 5.5. El Space X Falcón 1 cohete soldado en su mayoría por FSW



Figura 5.6. La soldadura de las alas y los paneles de fuselaje de la nueva Eclipse 500 aeronaves de Eclipse Aviation.



Figura 5.7. Blindaje para los buques de asalto anfibio

CAPÍTULO 6

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Una vez concluida la investigación, con la finalidad de comprobar la técnica de Soldadura por Fricción Agitación se realizaron algunas pruebas para probar su aplicabilidad en placas de acrílico, para lo cual fue necesario diseñar la herramienta que se usaría para realizar estas pruebas, para posteriormente fabricarlas y finalmente poder aplicar este proceso de soldadura

6.1 El diseño de la herramienta

Primeramente se diseñó la herramienta que se usaría para el desarrollo experimental de FSW, asistido con ayuda del programa Mechanical Desktop 6 Power Pack y Auto CAD 2007, se realizaron dos modelos con diferentes formas y dimensiones considerando su uso y aplicabilidad en las pruebas que se realizarían

El Primer diseño (figura 6.1) muestra las dimensiones y la forma de la herramienta tomando en cuenta el tamaño de esta para ser ensamblada al Router que es una herramienta eléctrica de trabajo para rebajar piezas de madera.

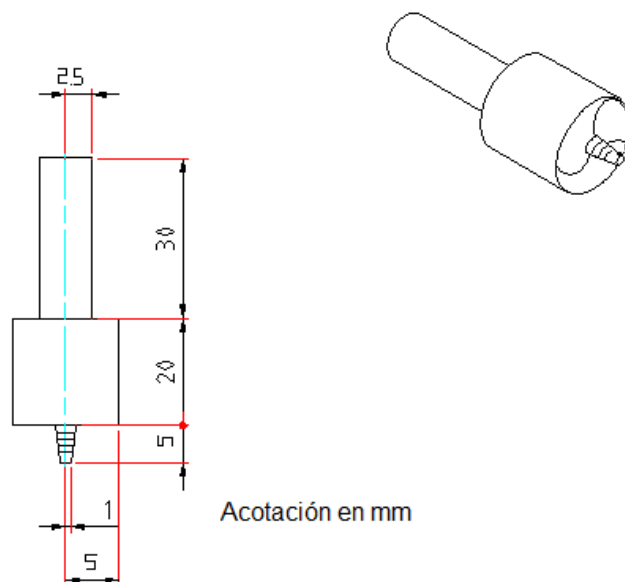


Figura 6.1. Primer diseño de la herramienta de FSW

Se consideraron las dimensiones de la herramienta para ser perfectamente acoplada a la herramienta eléctrica, así como el tamaño del pin y el diseño del hombro (figura 6.2) nos permiten hacer pruebas de soldado por fricción y agitación en placas de 7mm a 1.5 cm y con un profundidad de soldado de 5mm a 7mm y un espacio de soldado entre placas de 1 cm de ancho, 5mm en cada placa

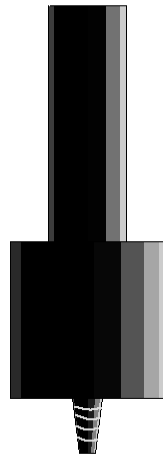


Figura 6.2. Herramienta diseñada en Mechanical Desktop con la forma de pin triflute

El hombro de la herramienta (figura 6.3) cuenta con 3 canales de agitación que ayudaran a revolver y mezclar el material de ambas placas en la región de transición en el proceso de soldado, fortaleciendo la unión del material

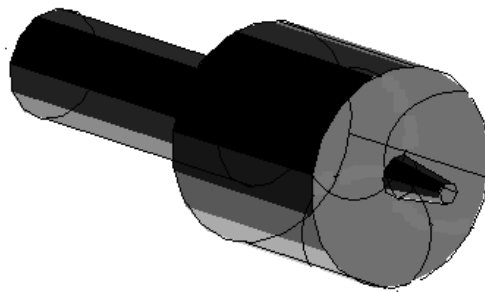


Figura 6.3 Vista del hombro de la herramienta que muestra los canales de agitación

Segundo diseño de la herramienta

La otra herramienta (figura 6.4) fue diseñada con forma y dimensiones diferentes de la primera, es más grande con la finalidad de adaptarla a un taladro vertical o de banco el cual ejerce mayor fuerza y presión sobre la herramienta y las placas del material a ser soldado, debido a esto el diseño incluye un hombro superior y otro inferior (figura 6.5) para soportar y transmitir la fuerza de penetración al pin y a los canales de agitación ubicados en la superficie del hombro inferior

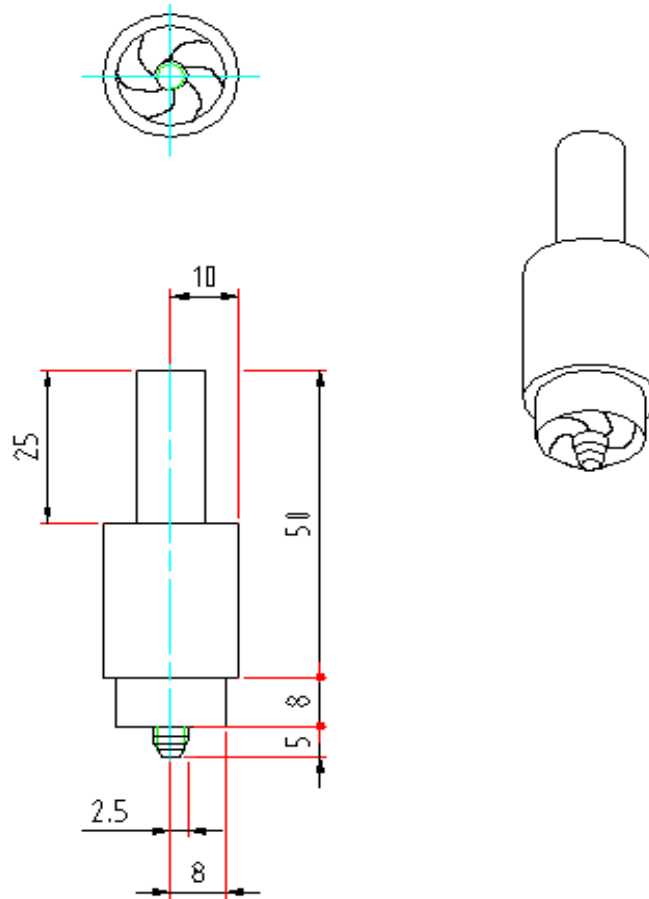


Figura 6.4. Segundo diseño de la herramienta para el Soldado por Fricción y Agitación

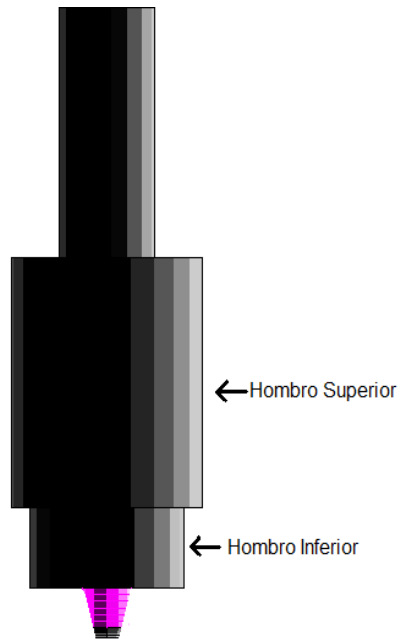


Figura 6.5. Vista frontal de la herramienta indicando el hombro superior e inferior de la pieza

Al igual que la primer herramienta se contempla la forma del pin o perno con el diseño trífute y en la superficie del hombro inferior los canales de agitación (figura 6.6) por el tamaño de la pieza y el área mayor del hombro inferior se consideran más canales de agitación siendo este el caso de contar la herramienta con 6 canales, con la finalidad de que estos ayuden a la mezcla del material.

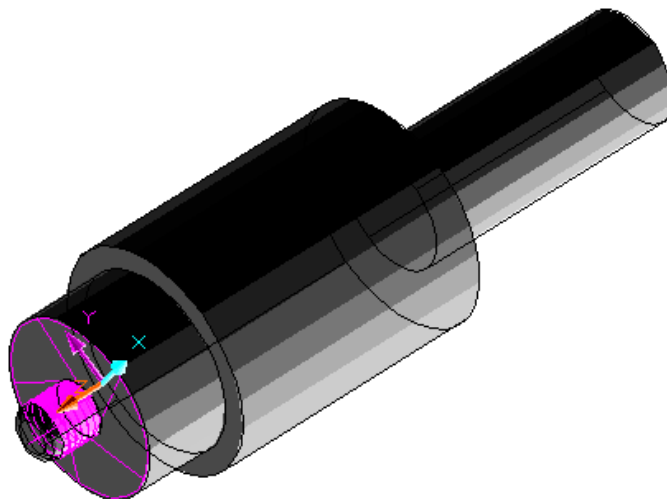


Figura 6.6. Diseño de herramienta con 6 canales de agitación

6.2 La Fabricación de las herramientas

Una vez concluidos los diseños se procedió a la fabricación de las herramientas la cual fue llevado a cabo en un torno paralelo de golpeo T1-1140 de 14 pulgadas de volteo y 40 pulgadas entre puntos, figura (6.7, 6.8)

El material usado para la fabricación fue un Acero P20 para herramientas



Figura 6.7. Torno de golpeo donde fueron fabricadas las herramientas

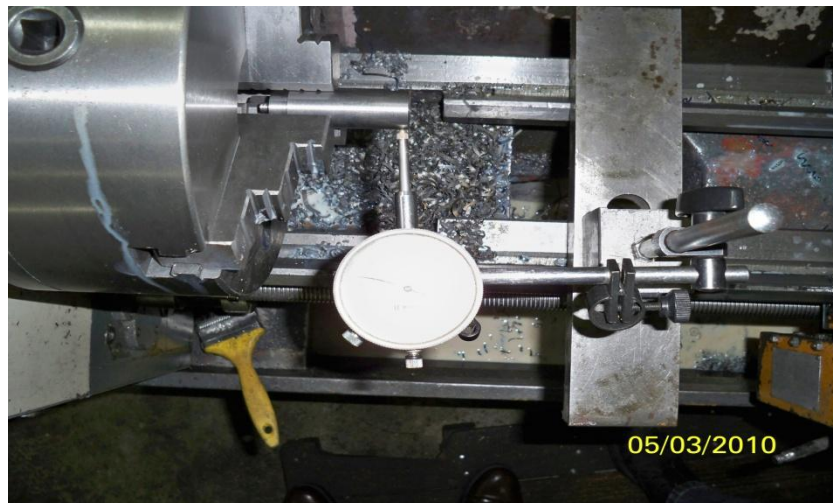


Figura 6.8. Vista proxima del torno en proceso de fabricacion de la herramienta

En la fabricación de las herramientas se incluye el diseño triflute en el pin y en el hombro los canales de agitación los cuales fueron hechos en una Electroerosionadora Engemac CNC de 40 amperes (figuras 6.9, 6.10, 6.11)



Figura 6.9. Electroerosionadora Engemac



Figura 6.10. Erosionadora acercandose a la herramienta



Figura 6.11. Vista proxima de la realizacion de los canales de agitacion

Una vez terminadas las piezas se les hizo una prueba para dictaminar su dureza (figura 6.12) siendo el resultado 32 Rc



Figura 6.12. Herramienta de FSW sometida a prueba de dureza

6.3 Las Herramientas

Las figuras (6.13 y 6.14) muestran las herramientas que fueron diseñadas y posteriormente fabricadas para el desarrollo experimental de la investigación del proceso de soldadura por fricción y agitación en placas de acrílico de espesor desde 5mm hasta 7mm



Figura 6.13. Herramientas de FSW



Figura 6.14. Vista superior de la herramienta que muestra los 6 canales de agitación

Las herramientas fabricadas cuentan con el diseño trífute en el perno (figura 6.15, 6.16), para ayudar a este en la penetración, así como en la agitación y mezcla del material de las placas que están siendo unidas mediante este proceso de soldadura

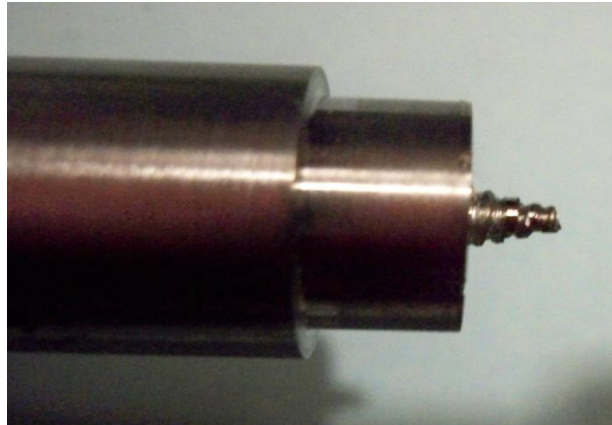


Figura 6.15. Vista lateral de los hombros superior e inferior de la herramienta



Figura 6.16. Vista frontal próxima de la herramienta donde se aprecia el diseño trífute o de espiral en el perno en forma de V

6.4 Ensamble de Máquina Herramienta

La primera herramienta fue diseñada para acoplarse a un router (figura 6.17) y usarse en la demostración de la unión de placas de acrílico por la técnica de soldadura por Fricción y agitación



Figura 6.17 Router o rebajador de madera

La segunda herramienta fue diseñada para ensamblarse en el taladro vertical o de banco (figura 6.18) el diseño fue de mayor tamaño en la pieza, para que esta soportara la fuerza de empuje



Figura 6.18. Taladro vertical o de banco

La herramienta se diseño con una longitud de acople similar a las herramientas de desbaste para router para que esta pudiera entrar y ser ensamblada sin ninguna complicación (figura 6.19, 6.20) el diámetro del hombro es de 10 mm y su longitud de 20mm un diseño que permite concentrar las fuerzas en el perno y en los canales de agitación



Figura 6.19. Vista lateral superior de la herramienta de FSW acoplada al Router



Figura 6.20. Vista frontal superior

La segunda herramienta se diseño con una longitud de acople similar a las herramientas usadas en el taladro (brocas) para que esta pudiera entrar y ser ensamblada sin ninguna complicación (figuras 6.21 y 6.22), el diámetro del hombro inferior es de 16 mm. y su longitud de 8mm, y el diámetro del hombro superior es de 20 mm. Y su longitud de 25 mm., este es un diseño que permite concentrar las fuerzas en el perno y en los canales de agitación



Figura 6.21. Herramienta ensamblada al taladro de banco



Figura 6.22. Vista proxima de la herramienta acoplada observandose los dos hombros

6.5 Preparación del material

El material principal a soldar es una placa de acrílico de espesor de 7 mm, esta placa será soldada en forma lineal con una penetración de la herramienta de 5mm (figura 6.23) y una junta a tope de 10mm, en promedio 5mm por cada placa figura (6.24)

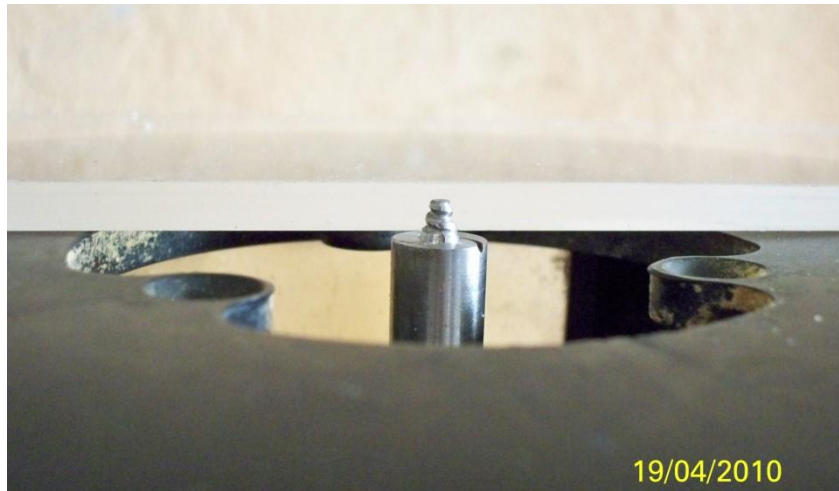


Figura 6.23. Penetración de la herramienta en el material



Figura 6.24. Ancho que tendrá la soldadura sobre las placas

Las placas de acrilico se cortaron de manera lineal (figura 6.25), para poder colocarlas a tope y poder iniciar las pruebas de soldado

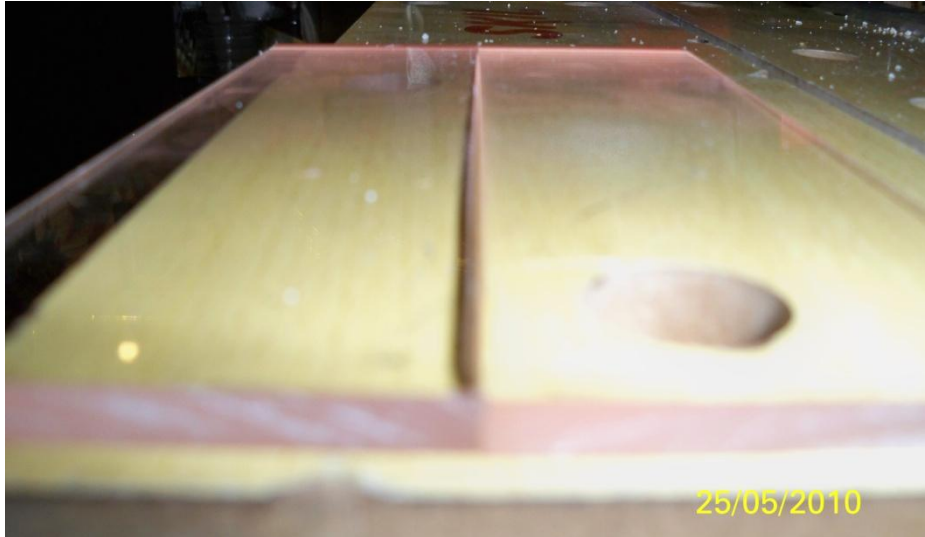


Figura 6.25. Placas de acrilico que seran soldadas

Una vez cortadas las placas se observó la linea (figura 6.26) donde se colocaron a tope para iniciar la prueba de soldadura por friccion y agitacion



Figura 6.26. Observandose la linea donde se realizara la unión

Para iniciar el proceso de soldado se sujetaron y fijaron rigidamente las placas a soldar, (figura 6.27), para evitar el movimiento entre ellas y la separacion de las mismas que podria producir una falla o un error en el soldado

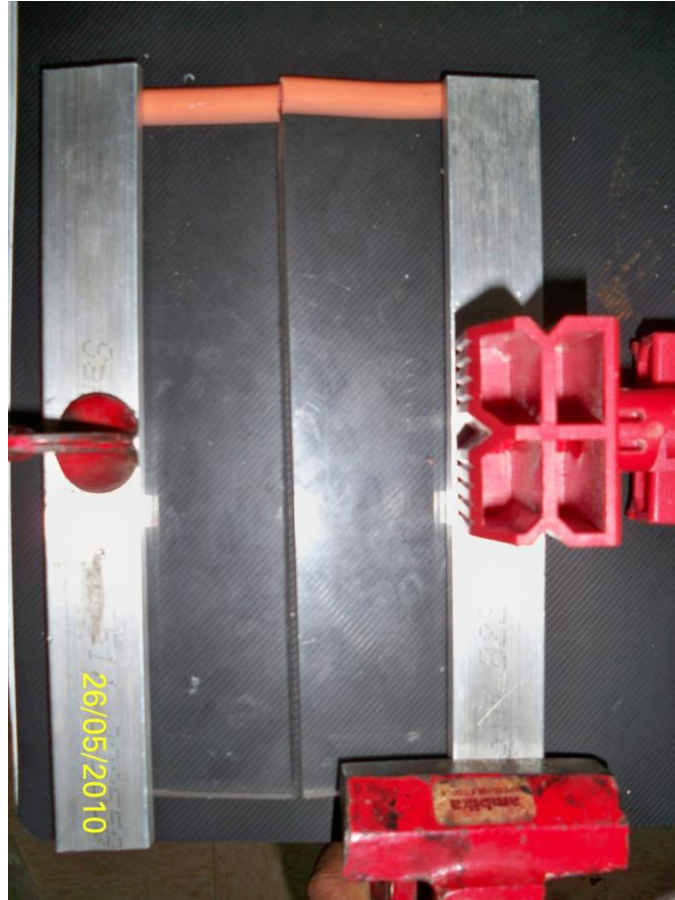


Figura 6.27. Placas sujetadas rigidamente

6.6 Proceso de Soldadura Por Fricción y Agitación

Una vez que se fijó el material, la herramienta acoplada y la maquina preparada, se procedió a iniciar el proceso de soldadura (figura 6.28), la maquina a usar en esta prueba es el router que cuenta con 25000 RPM y una potencia de 1 1/8 hp, en primera instancia, se puede observar que las revoluciones son demasiadas en comparación de las encontradas en los datos de la investigación , por lo tanto el avance de la pieza deberá reducirse lo suficiente para producir la mezcla y unión del material fundido y su posterior solidificación del mismo, dando como resultado la soldadura entre ambas placas.

El primer paso es la penetración del pin y del hombro en las placas colocadas a tope el cual genera el orificio de entrada e inicio del recorrido (6.29)

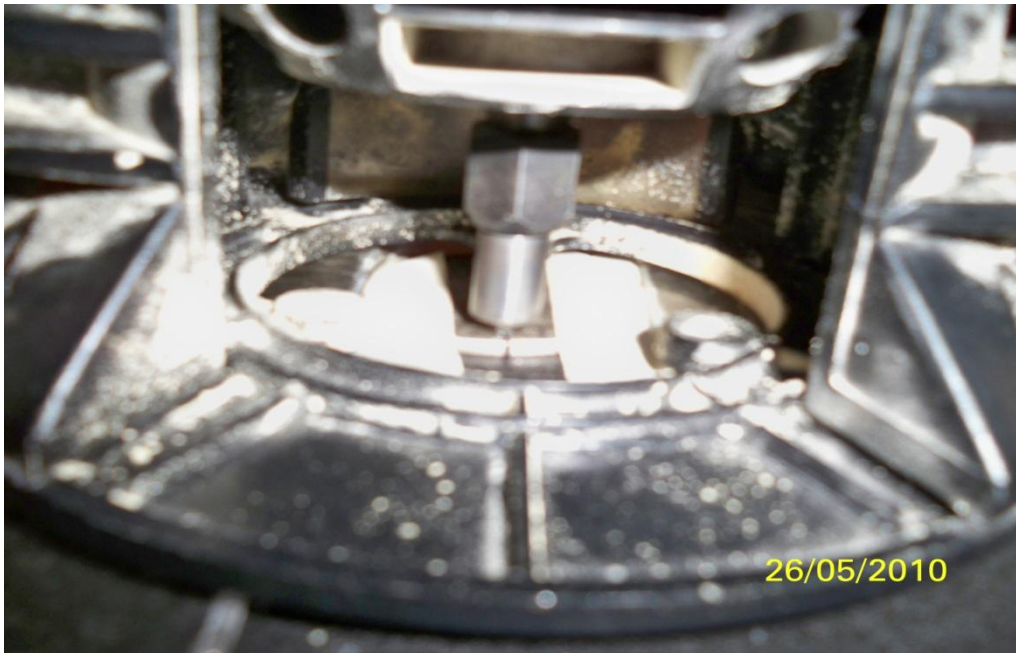


Figura 6.28. Inicio del proceso de soldado en placas de acrílico

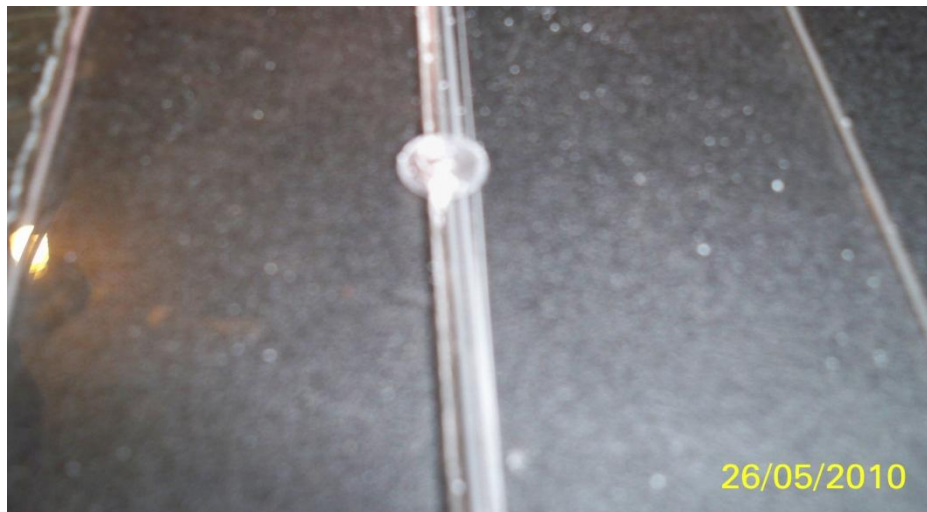


Figura 6.29 Orificio de entrada en la prueba , se aprecia la profundidad y el ancho de la soldadura entre las placas

El recorrido de la herramientas entre las placas fue lento permitiendo al material fundirse y mezclarse poco a poco (figura 6.30), la velocidad de avance fue de menos de un segundo por milímetro permitiendo una vez pasada la herramienta, la solidificación de la unión de las placas soldadas (figura 6.31)



Figura 6.30. Inicio del recorrido



Figura 6.31. Avance de la pieza sobre las placas de acrílico

La prueba se realizó en un tiempo de 65 segundos sobre una distancia de 100 mm obteniéndose una velocidad de avance de 92 mm/min

Como resultado de lo anterior se demostró la aplicabilidad del proceso de soldadura de fricción y agitación en placas de acrílico de 7mm, pudiéndose notar el orificio de salida de la pieza (figura 6.32) y el recorrido de la soldadura (figura 6.33)

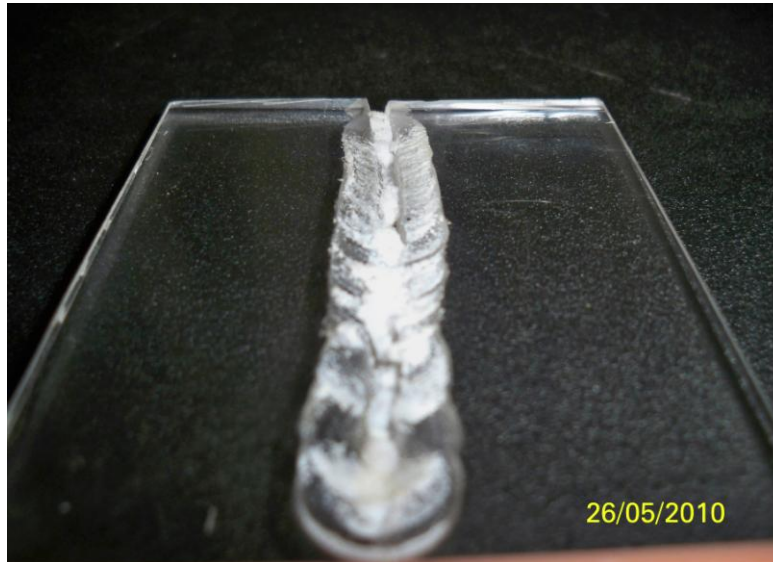


Figura 6.32. Orificio de salida de la herramienta



Figura 6.33. Union de las placas de acrilico

6.7 Prueba del proceso de soldadura por fricción y agitación en plomo

Continuando con la experimentación se realizo una prueba en unas placas de plomo con la herramienta diseñada para ser acoplada en el taladro de banco, las placas fueron sujetas (figuras 6.34, 6.35) y posteriormente se realizo el proceso de soldado figuras (6.36, 6.37)



Figura 6.34. Vista frontal de las placas sujetas



Figura 6.35. Sujeción rigida de las placas vista lateral

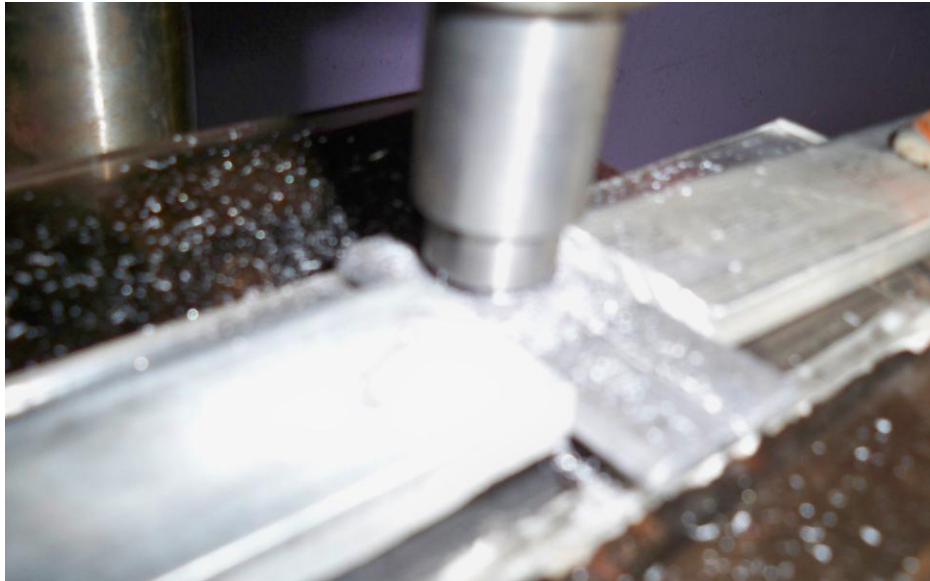


Figura 6.36. Inicio del proceso de soldadura de las placas



Figura 6.37. Proceso de unión de las placas

El plomo demostró ser un material que puede ser soldado exitosamente por la técnica de soldadura por fricción y agitación (figura 6.38, 6.39) , teniendo el diseño correcto de la herramienta y fabricada del material adecuado es posible y factible la soldadura por fricción y agitación en diversos materiales metálicos



Figura 6.38. vista frontal de la unión de las placas



Figura 6.39. placas de plomo soldadas por FSW , se aprecia el orificio de salida de la herramienta

CONCLUSIONES

Después del trabajo realizado se pueden establecer las conclusiones siguientes:

1. La soldadura por fricción-agitación (fsa) es una técnica relativamente nueva e innovadora con muchas aplicaciones, y grandes ventajas en la industria, que vienen a cambiar la forma de unir los materiales, a métodos más eficientes, seguros y amigables con el medio ambiente
2. El adecuado diseño de la herramienta es fundamental para que el proceso se lleve a cabo de manera exitosa.
3. El proceso de soldadura de las placas de acrílico se realizó de manera exitosa, aún con los equipos utilizados, que no son los más adecuados.
4. No se requirió de material de aporte para la unión de las placas
5. Con la automatización de las máquinas de fresado simple, podrán reducirse los costes de instalación y fabricación.

La aplicación de la soldadura por fricción y agitación en placas de acrílico es posible y viable ya que hasta ahora la única manera de unir las es a través de pegamentos, que no suelen ser del todo efectivos, y al realizar las pruebas y la experimentación se demuestra que el diseño de las piezas para esta técnica de soldado son correctas y útiles, aplicables a otros materiales que se permitan soldar por el material de la herramienta tal es el caso del plomo y el aluminio

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bulletin TWI, May/June
W. Thomas, C. Dawes, Inglaterra, 2002
- [2] Report TWI
B. Thread Gill, Inglaterra, pp 1-35,
- [3] Structural Welding Code of Aluminum AWS, Florida US, 1990.
- [4] A Welding Review
H. Larsson, L.Karls Son, Vol 54 N°2 ESAB AB, Sweden, 2000.
- [5] Fatigue design of welded joints and components, The International Institute of Welding, 1999.
- [6] Friction Stir Welding-Superior Weld Quality
S. Kallee, D.Nichols , CONNET TWI, Inglaterra, 2004.
- [7] Procesos De Fabricación,
Myron L. Begeman, B. H. Amsted, Editorial Continental, México
- [8] soldadura y metalurgia
Guillermo Fernández Flores Editorial Continental, México
- [9] <http://www.twi.co.uk/content/fswintro.html>
- [10] <http://www.frictionstirlink.com/fslfswdescription.html>
- [11]<http://news.alibaba.com/article/detail/metalworking/100186344-1-metals-knowledge%253Afriction-stir-welding%253A-part.html>
- [12] <http://www.msm.cam.ac.uk/phasetrans/2003/FSW/aaa.html>