

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA
POR FRICCIÓN BATIDO EN LOS LABORATORIOS DE LA
SECCIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller

DANIEL ALDO POMA VELAZCO

ASESORES

Dr. Francisco Aurelio Rumiche Zapata

Dr. Paul Pedro Lean Sifuentes

LIMA – PERÚ

2020

DEDICATORIA

Para mi amada esposa Andrea,
y mis queridas hijas Abygael, Zoe y
Emma, por su amor y apoyo constante.
Para mis padres por sus enseñanzas.



AGRADECIMIENTOS

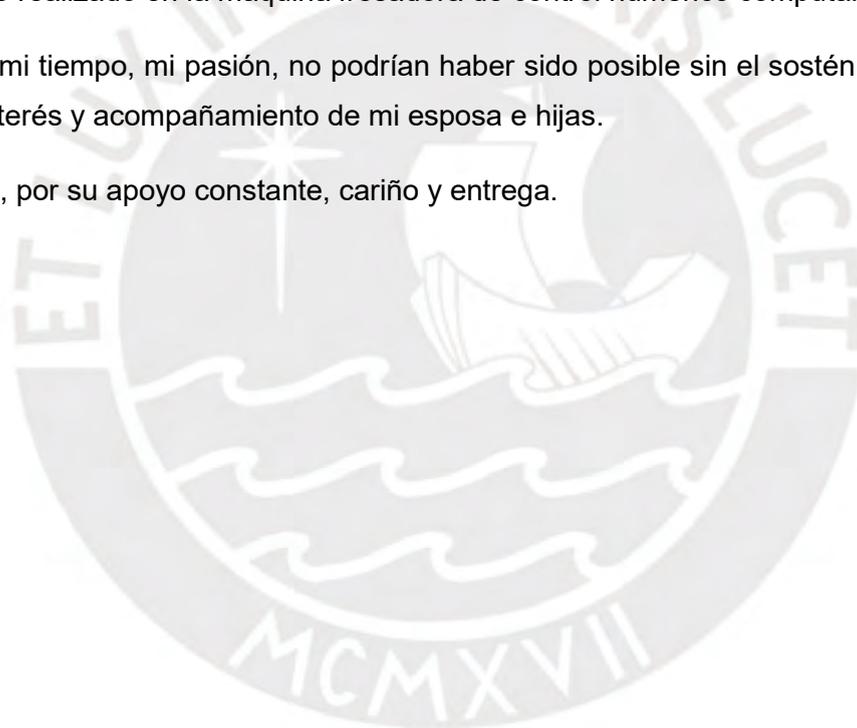
Quisiera agradecer a mis asesores Dr. Francisco Rumiche y Dr. Paul Lean Sifuentes por el tiempo que entregaron para la realización de este trabajo, por su apoyo moral y la paciencia con la cual despejaron mis dudas durante todo este largo camino.

Al personal del Laboratorio de Materiales, en especial al Ing. Sócrates Cutipa Castelo por su apoyo en la realización del tratamiento térmico de la herramienta, así como al Ing. José Sakihama por su apoyo en la realización de la caracterización de las probetas; sin cuya ayuda incondicional no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

Al personal del Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica, en especial al Sr. José Brañez por su tiempo y paciencia en la realización de la soldadura por fricción batido realizado en la máquina fresadora de control numérico computarizado.

Mi esfuerzo, mi tiempo, mi pasión, no podrían haber sido posible sin el sostén, la paciencia, el amor, el interés y acompañamiento de mi esposa e hijas.

A mis padres, por su apoyo constante, cariño y entrega.



RESUMEN

La gran parte de procesos para soldar materiales requiere el uso de elevadas temperaturas y la presencia de fases líquidas, condiciones que pueden promover la formación de compuestos indeseables, pérdida de integridad microestructural, y consecuente degradación de propiedades del material base cercano a la soldadura.

El presente tema de tesis propone implementar el proceso de soldadura por fricción batido en los laboratorios de la Sección de Ingeniería Mecánica (SIM), dado que este proceso permite soldar materiales en estado sólido a temperaturas considerablemente menores a las de fusión, con lo cual, se evita producir fases líquidas y cambios microestructurales que pudieran degradar el material.

En la primera parte del trabajo, se describe el proceso de soldadura por fricción batido, la influencia del diseño de la herramienta, los parámetros de soldadura, la microestructura generada, así como las ventajas y restricciones del proceso.

Posteriormente, se describe la metodología para realizar el proceso de soldadura por fricción batido en el aluminio AA1100-H18, la selección de la máquina que realiza el proceso; la selección del material, geometría y fabricación de la herramienta; y selección de los parámetros más importantes, como son: la frecuencia rotacional (800 rpm, 1000 rpm, 1250 rpm) y la velocidad de avance (60 mm/min, 140 mm/min, 200 mm/min). Por otro lado, se describen los ensayos mecánicos siguientes: ensayo de tracción, ensayo de doblado y ensayo de dureza Vickers, los cuales permiten caracterizar las muestras soldadas.

Además, se analiza el comportamiento de la máquina, la herramienta utilizada en el proceso y se analizan los resultados de la caracterización mecánica. Los valores de resistencia a la tracción de las muestras fueron satisfactorios según la norma AWS D1.2, encontrando un valor máximo de 120,2 MPa para una frecuencia rotacional de 1000 rpm y una velocidad de avance de 140 mm/min. Cabe resaltar, que en promedio hay una pérdida del 30% de la resistencia a la tracción respecto al material base AA1100-H18, este porcentaje de pérdida es similar a valores obtenidos mediante procesos de soldadura convencionales en aluminio. En el ensayo de doblado las muestras de cara y raíz soldadas a una frecuencia rotacional de 1000 rpm pasaron la prueba.

En el presente trabajo se pudo implementar el proceso de soldadura por fricción batido, logrando soldar mediante este proceso las planchas de aluminio AA1100-H18.

TEMA DE TESIS

PARA OPTAR : Título de Ingeniero Mecánico

TEMA : IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN BATIDO EN LOS LABORATORIOS DE LA SECCIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA.

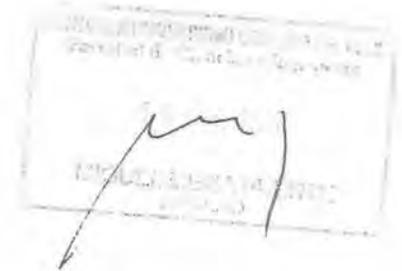
ÁREA : Materiales #138

ASESOR : Dr. Francisco Rumiche Zapata
Dr. Paul Lean Sifuentes

ALUMNO(S) : Daniel Aldo Poma Velazco - 19982313

FECHA : 06/09/2018

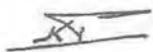
MÁXIMO : 100 páginas



DESCRIPCIÓN:

La gran parte de procesos para soldar materiales requiere el uso de elevadas temperaturas y la presencia de fases líquidas, condiciones que promueven la formación de compuestos indeseables, pérdida de integridad microestructural, y consecuente degradación de propiedades del material. El proceso por fricción batido, permite procesar materiales en estado sólido a temperaturas considerablemente menores a las de fusión, con lo cual se evita producir fases líquidas y cambios microestructurales que degraden el material.

El presente tema de tesis propone implementar el proceso de fricción batido y realizarlo en los laboratorios de la Sección de Ingeniería Mecánica. En este método una herramienta rotativa, no consumible, es insertada entre las piezas de material a unir y, es desplazada a la largo de la junta a soldar. La rotación de la herramienta genera calor suficiente para calentar y plastificar el material. El desplazamiento de la herramienta genera movimiento del material desde el frente hacia la parte posterior, produciendo una unión en estado sólido. El trabajo propuesto comprende el diseño y fabricación (financiamiento a cargo de la Unidad de Ingeniería de Soldadura) tanto del sistema de sujeción del material como de la herramienta rotativa. Asimismo, involucra la determinación de los parámetros óptimos de procesamiento tales como velocidad de rotación y avance de la herramienta. Finalmente, se propone constatar la efectividad del proceso para soldar aluminio.



OBJETIVO GENERAL:

Implementar el proceso de fricción batido en los laboratorios de la Sección de Ingeniería Mecánica de nuestra universidad.

OBJETIVO ESPECÍFICOS:

- Seleccionar la máquina adecuada para el proceso.
- Diseñar y fabricar la herramienta no consumible.
- Diseñar y fabricar la mesa soporte.
- Determinar parámetros óptimos de proceso.
- Realizar soldaduras en aleaciones de aluminio.
- Caracterizar las muestras soldadas.

CONTENIDO:

Introducción

Capítulo 1: Fundamentos Teóricos.

Capítulo 2: Metodología Experimental.

Capítulo 3: Resultados y Discusión.

Conclusiones

Bibliografía

Máximo: 100 páginas



Dr. Francisco Rumiche Z.
Asesor



Dr. Paul Lean S.
Asesor



INDICE

INDICE DE FIGURAS.....	v
INDICE DE TABLAS.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Descripción del proceso de soldadura por fricción batido.....	4
1.3 Descripción de la herramienta.....	7
1.3.1 Geometría del pin y del hombro de la herramienta.....	8
1.3.2 Configuración de la herramienta.....	11
1.4 Parámetros determinantes del proceso de soldadura por fricción batido.....	12
1.4.1 Geometría de la herramienta.....	14
1.4.2 Relación entre frecuencia rotacional y velocidad de avance.....	15
1.5 Aspectos microestructurales de las aleaciones soldadas por fricción batido...	19
1.6 Materiales soldados por fricción batido.....	20
1.6.1 Aleaciones de cobre.....	21
1.6.2 Aleaciones de titanio.....	22
1.6.3 Acero.....	24
1.7 Geometría de juntas de soldadura por fricción batido.....	27
1.8 Ventajas y restricciones.....	28
CAPÍTULO II METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	29
2.1 Características nominales del material base – aluminio.....	29
2.2 Equipo y materiales de soldadura por fricción batido.....	30
2.2.1 Selección de la máquina herramienta.....	30
2.2.2 Sistema de sujeción.....	32
2.2.3 Determinación de herramienta.....	33
a) Geometría de la herramienta.....	33
b) Selección del material de la herramienta.....	34
c) Tratamiento térmico de la herramienta.....	35
2.3 Fabricación de uniones soldadas por fricción batido.....	38
2.3.1 Elaboración de juntas.....	38
2.3.2 Parámetros de soldadura.....	39
2.3.3 Procedimiento de soldadura.....	41
2.3.4 Diseño experimental.....	44
2.4 Evaluación de uniones soldadas por fricción batido.....	44

2.4.1 Ensayo de tracción.....	45
a) Preparación de la muestra.....	45
b) Máquina de ensayo de tracción.....	46
2.4.2 Ensayo de dureza Vickers.....	47
2.4.3 Ensayo de doblado.....	48
CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
3.1 Ensayos mecánicos al material base.....	49
3.2 Máquina – Sistema de sujeción.....	49
3.3 Herramienta.....	50
3.4 Evaluación del proceso de soldadura.....	51
3.4.1 Inspección visual.....	52
a) Unión soldada a 800 rpm y 60 mm/min	52
b) Unión soldada a 800 rpm y 140 mm/min.....	53
c) Unión soldada a 800 rpm y 200 mm/min.....	54
d) Unión soldada a 1000 rpm y 60 mm/min.....	54
e) Unión soldada a 1000 rpm y 140 mm/min.....	55
f) Unión soldada a 1000 rpm y 200 mm/min.....	56
g) Unión soldada a 1250 rpm y 60 mm/min.....	57
h) Unión soldada a 1250 rpm y 140 mm/min.....	58
i) Unión soldada a 1250 rpm y 200 mm/min.....	58
3.4.2 Ensayo de tracción.....	59
a) Uniones soldadas a velocidad de avance constante.....	60
b) Uniones soldadas a frecuencia rotacional constante.....	61
c) Relación frecuencia rotacional y velocidad de avance.....	63
3.4.3 Ensayo de doblado.....	64
3.4.4 Ensayo de dureza.....	69
a) Perfiles de dureza de uniones soldadas a 800 rpm.....	69
b) Perfiles de dureza de uniones soldadas a 1000 rpm.....	71
c) Perfiles de dureza de uniones soldadas a 1250 rpm.....	72
d) Dureza promedio en el cordón de soldadura.....	74
CONCLUSIONES.....	76
BIBLIOGRAFIA.....	78

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Procesos de soldadura por fricción.....	4
Figura 1.2 Esquema del proceso de soldadura por fricción batido.....	5
Figura 1.3 Descripción del las fases de soldadura por fricción batido.....	6
Figura 1.4 Esquema de la herramienta de la soldadura por fricción batido.....	8
Figura 1.5 Ejemplos de herramientas desarrolladas por TWI.....	9
Figura 1.6 Herramientas desarrolladas por TWI.....	10
Figura 1.7 Herramientas de hombro cónico.....	10
Figura 1.8 Configuración de la herramienta.....	11
Figura 1.9 Evolución de defectos en el cordón de soldadura en función de la interacción del hombro y el material base.....	13
Figura 1.10 Comparación de herramienta cónica roscada y Four-flute.....	14
Figura 1.11 Efecto de la frecuencia rotacional en las propiedades de la tracción de la unión soldada.....	16
Figura 1.12 Efecto de la velocidad de avance en las propiedades de tracción de la unión soldada.....	16
Figura 1.13 Variación de las propiedades de tracción en función del “revolutionary pitch”.....	17
Figura 1.14 Secciones de cordón de soldadura a diferentes valores de “revolutionary pitch”; 0,13 mm/rev, 0,25 mm/rev y 0,53 m/rev.....	17
Figura 1.15 Resistencia a la tracción en función del “revolutionary pitch”.....	18
Figura 1.16 Secciones de cordón de soldadura a diferentes valores de “revolutionary pitch”; 0,02 mm/rev, 0,07 mm/rev y 0,27 mm/rev.....	18
Figura 1.17 Esquema de una sección transversal de un cordón de soldadura realizada mediante la Soldadura de Fricción Batido, se muestran cuatro zonas: (A) metal base, (B) ZAT, (C) ZATM, (D) Núcleo central.....	19
Figura 1.18 Geometría de juntas de soldadura por fricción batido.....	27
Figura 2.1 Fresadora de Control Numérico Computarizado del Laboratorio Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica.....	31
Figura 2.2 Sistema de sujeción de las planchas de aluminio.....	32
Figura 2.3 Geometría de la herramienta de pn roscado.....	33
Figura 2.4 Horno de Calcinación CARBOLITE 1100.....	36
Figura 2.5 Curvas para el tratamiento térmico de revenido para el material K340.	38
Figura 2.6 Herramienta después del revenido.....	38
Figura 2.7 Dimensiones de las planchas de aluminio AA1100-H18.....	39

Figura 2.8 Posicionamiento de la herramienta sobre las planchas de aluminio.....	42
Figura 2.9 Inmersión de la herramienta dentro de las planchas de aluminio.....	42
Figura 2.10 Avance de la herramienta en las planchas de aluminio.....	43
Figura 2.11 Plancha de aluminio AA1100-H18 soldada por fricción batido.....	43
Figura 2.12 Distribución de las probetas en la muestra, a) tracción, b) doblado y c) dureza.....	45
Figura 2.13 Probeta para ensayo de tracción.....	45
Figura 2.14 Equipo empleado para el ensayo de tracción.....	46
Figura 2.15 Equipo empleado para el ensayo de dureza.....	47
Figura 2.16 Probetas empleadas para el ensayo de doblado.....	48
Figura 2.17 Etapas del ensayo de doblado (a) y (b).....	48
Figura 3.1 Herramienta después de realizada la soldadura por fricción batido.....	50
Figura 3.2 Probeta soldada 800 rpm - 60 mm/min. (a) vista de cara, (b) vista de raíz.....	52
Figura 3.3 Probeta soldada 800 rpm - 140 mm/min. (a) vista de cara, (b) vista de raíz.....	53
Figura 3.4 Probeta soldada 800 rpm - 200 mm/min. (a) vista de cara, (b) vista de raíz.....	54
Figura 3.5 Probeta soldada 1000 rpm - 60 mm/min. (a) vista de cara, (b) vista de raíz.....	55
Figura 3.6 Probeta soldada 1000 rpm - 140 mm/min. (a) vista de cara, (b) vista de raíz.....	56
Figura 3.7 Probeta soldada 1000 rpm - 200 mm/min. (a) vista de cara, (b) vista de raíz.....	57
Figura 3.8 Probeta soldada 1250 rpm - 60 mm/min. (a) vista de cara, (b) vista de raíz.....	57
Figura 3.9 Probeta soldada 1250 rpm - 140 mm/min. (a) vista de cara, (b) vista de raíz.....	58
Figura 3.10 Probeta soldada 1250 rpm - 200 mm/min. (a) vista de cara, (b) vista de raíz.....	59
Figura 3.11 Efecto de la frecuencia rotacional sobre la resistencia a la tracción de las probetas.....	61
Figura 3.12 Efecto de la frecuencia rotacional sobre el alargamiento de las probetas.....	62

Figura 3.13 Efecto de la velocidad de avance sobre la resistencia a la tracción de las probetas.....	62
Figura 3.14 Efecto de la velocidad de avance sobre el alargamiento de las probetas.....	63
Figura 3.15 Curva de tendencia de “ <i>Revolutionary pitch</i> ” de las probetas.....	64
Figura 3.16 Ensayo de doblado de probetas soldadas a 800 rpm.....	65
Figura 3.17 Ensayo de doblado de probetas soldadas a 1000 rpm.....	67
Figura 3.18 Ensayo de doblado de probetas soldadas a 1250 rpm	68
Figura 3.19 Perfiles de dureza realizadas en probetas soldadas a 800 rpm.....	70
Figura 3.20 Perfiles de dureza realizadas en probetas soldadas a 1000 rpm.....	72
Figura 3.21 Perfiles de dureza realizadas en probetas soldadas a 1250 rpm.....	74
Figura 3.22 Dureza promedio en el cordón de soldadura.....	74



INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Resumen de aleaciones de cobre soldadas por fricción batido.....	21
Tabla 1.2 Resumen de las propiedades de tracción realizadas mediante la soldadura por fricción batido en Ti-6Al-4V y el metal base	23
Tabla 1.3 Parámetros y materiales de herramientas para la soldadura por fricción batido en aceros.....	24
Tabla 1.4 Resumen de las propiedades de tracción mediante la soldadura por fricción batido en diferentes aceros.....	26
Tabla 2.1 Composición química nominal del aluminio AA1100-H18 % peso.....	29
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas nominales del aluminio AA1100-H18.....	29
Tabla 2.3 Especificación técnica de la máquina fresadora utilizada por Sathari, Rajamanickam y Vural para la soldadura por fricción batido.....	30
Tabla 2.4 Especificación técnica de la máquina fresadora del Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica.....	31
Tabla 2.5 Composición química del CHRONIT T1 500 - % peso.....	32
Tabla 2.6 Propiedades mecánicas del CHRONIT T1 500.....	33
Tabla 2.7 Composición química de los materiales utilizados en la fabricación de herramientas para la soldadura por fricción batido.....	34
Tabla 2.8 Parámetros de soldadura por fricción batido para el aluminio AA1100-H18.....	40
Tabla 2.9 Muestras en función de los parámetros del proceso de soldadura por fricción batido.....	44
Tabla 3.1 Propiedades mecánicas del aluminio AA1100-H18 a temperatura ambiente (24 °C).....	49
Tabla 3.2 Condiciones de soldadura y resultados de ensayos de tracción realizado en probetas soldadas de aleaciones de aluminio.....	51
Tabla 3.3 Resultados del ensayo de tracción realizadas a las probetas del aluminio AA1100-H18 a temperatura ambiente (24°C).....	59
Tabla 3.4 Resultados del ensayo de dureza realizadas a probetas soldadas a 800 rpm.....	69
Tabla 3.5 Resultados del ensayo de dureza realizadas a probetas soldadas a 1000 rpm.....	71
Tabla 3.6 Resultados del ensayo de dureza realizadas a probetas soldadas a 1250 rpm.....	73

INTRODUCCIÓN

El proceso de Soldadura por Fricción Batido, "*Friction Stir Welding*" (FSW) es inventado por *The Welding Institute* (TWI) a mediados del año 1991, como un proceso para soldar aleaciones metálicas. [1]

Desde sus inicios este proceso atrajo el interés de muchas instituciones científicas y empresas, debido a las ventajas que posee sobre las técnicas tradicionales de soldadura, tales como: excelentes propiedades mecánicas en la unión, cero salpicaduras, bajo nivel de contracción, manejo eficiente de la energía, utilización de una herramienta no consumible, ahorro en material de aporte y no necesita en algunos casos de gas de protección para proteger el cordón de soldadura.

Este proceso se basa en la utilización de una herramienta rotativa de forma cilíndrica, no consumible, la cual es insertada entre las piezas a unir, y es desplazada a lo largo de la línea de junta a soldar. La rotación de la herramienta genera calor suficiente para calentar y plastificar el material. El desplazamiento de la herramienta genera movimiento del material desde el frente hacia la parte posterior, produciendo la unión en estado sólido.

La soldadura por Fricción Batido es especialmente adecuada para soldar aleaciones con bajo punto de fusión y maleables a altas temperaturas, como las aleaciones de aluminio especialmente las series 2000, 6000 y 7000, las cuales presentan dificultades para ser soldadas por métodos convencionales como: "*Gas Metal Arc Welding*" (GMAW) y "*Gas Tungsten Arc Welding*" (GTAW); además, estudios recientes indican que este proceso ha tenido éxito en la soldadura de una amplia gama de materiales como: polímeros, cobre, acero al carbono, acero inoxidable, magnesio, aleaciones de níquel y titanio. [2]

Las aleaciones de aluminio son utilizadas como materiales de fabricación debido: su baja densidad (sobre un tercio del peso del cobre y el acero), resistencia a la corrosión (característica muy útil para aquellos productos que requieren de protección superficial), buena resistencia mecánica, ductilidad, alta conductividad térmica, etc.; además, de la simplicidad que implica realizar cordones de soldadura mediante este proceso. Todo esto ha llevado a que muchas empresas lo empleen en el sector transporte (terrestre, aeronáutico, naval y espacial). En Japón empresas como: Hitachi, Kawasaki, Sumitomo, utilizan el proceso para poder fabricar trenes de gran velocidad. La NASA ha utilizado este proceso para soldar tanques criogénicos de cohetes, como el módulo del cohete DELTA II. También, este proceso está siendo utilizado por países industriales como: Estados Unidos, Japón, Noruega, Suecia y Dinamarca. [2]

El presente trabajo de tesis tiene como objetivos los siguientes:

Objetivo general:

Implementar el proceso de soldadura por fricción batido en los laboratorios de la Sección de Ingeniería Mecánica de nuestra universidad.

Objetivos específicos:

- Seleccionar la máquina adecuada para realizar el proceso, la cual otorgue un amplio rango de velocidades y permita generar la presión necesaria durante el proceso de soldadura.
- Seleccionar la herramienta rotativa no consumible, quien es la encargada de producir el calentamiento de las planchas gracias a la fricción y agitación durante el proceso de soldadura.
- Seleccionar el sistema de sujeción capaz de mantener fijas las planchas de aluminio durante el proceso de soldadura por fricción batido.
- Determinar parámetros óptimos de proceso que permitan obtener buenas uniones de soldadura.
- Realizar soldaduras en aleaciones de aluminio que permitan conseguir uniones satisfactorias que posean propiedades mecánicas adecuadas.
- Caracterizar las muestras soldadas mediante ensayos mecánicos: tracción, doblado y dureza.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se presenta el proceso de soldadura por fricción batido, los parámetros más influyentes en la realización de este proceso, como son: la herramienta rotativa, las velocidades del proceso, a su vez, se menciona la microestructura que se genera al realizar la soldadura. De otro lado, se describen los materiales que pueden ser soldados mediante este proceso, por último, se describirá las ventajas y restricciones del proceso.

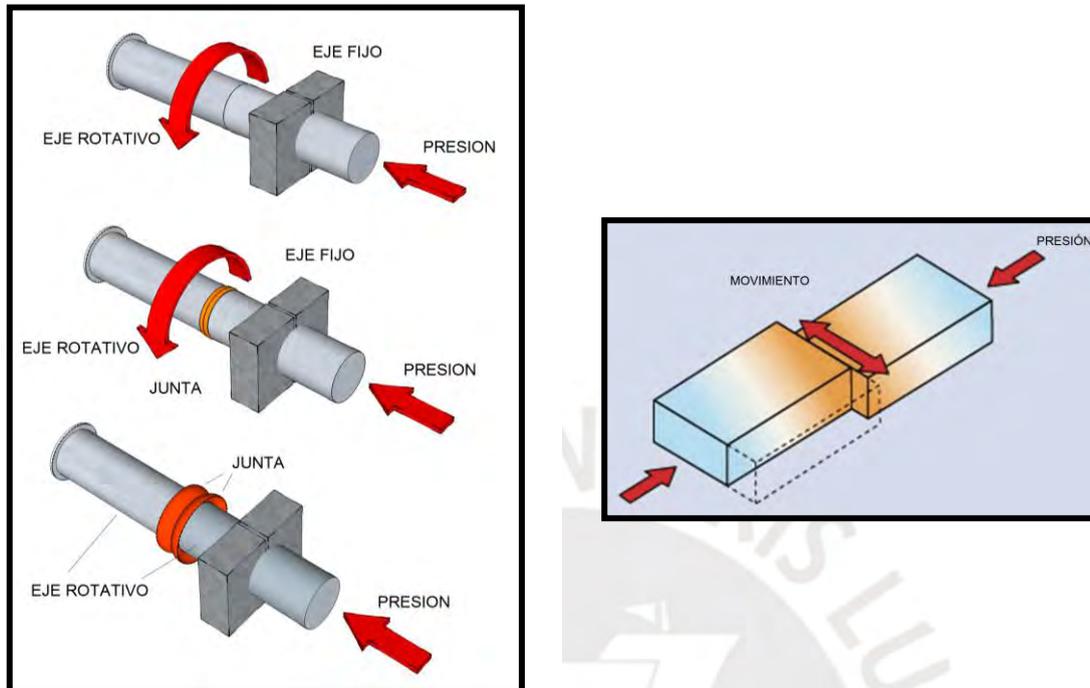
1.1 Introducción

La soldadura por fricción batido convierte la energía mecánica en calor y deforma el material para poder crear la soldadura. La unión se produce en estado sólido, por tanto, el material base no llega a la temperatura de fusión, con lo cual se evitan posibles complicaciones metalúrgicas, como son: generación de porosidades, grietas o imperfecciones en la unión soldada. Una de las principales ventajas de las tecnologías basadas en la fricción, es que permiten unir combinaciones de materiales que antes eran difíciles de soldar. Además, en comparación con la soldadura de arco tradicional, la soldadura por fricción produce poca o ninguna distorsión en el cordón de soldadura, cero porosidades, no produce humos durante soldadura y tiene excelentes propiedades mecánicas. [1]

En la figura 1.1 (a) se muestra la soldadura por fricción rotativa, la cual es utilizada desde hace cincuenta años en la industria y sigue siendo el proceso más utilizado de las tecnologías de soldadura por fricción, este proceso permite la unión de dos barras de sección circular, de las cuales una gira a una frecuencia rotacional constante, mientras que la otra barra es presionada contra la otra a una presión definida. Las superficies en contacto se calientan debido al movimiento relativo y a la presión ejercida. Posteriormente, se detiene la rotación y se vuelve a aumentar la presión, de esta manera, las barras pueden unirse. Durante un tiempo determinado, los dos componentes se mantienen bajo presión para que puedan enfriarse lentamente.

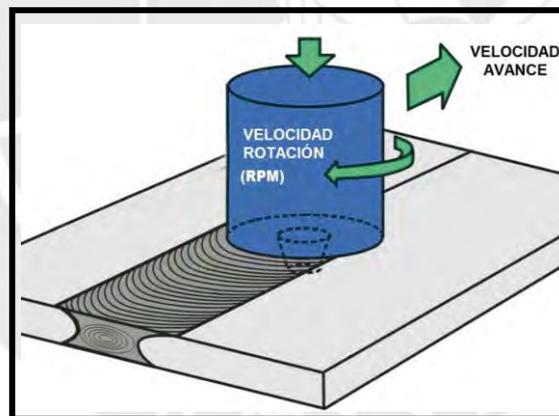
La soldadura por fricción lineal ha sido una importante modificación al proceso original, ver figura 1.1 (b), en este proceso uno de los componentes que se va a unir se sujeta con firmeza. El otro componente se acelera con un movimiento lineal, posteriormente, los dos componentes se presionan una contra la otra a alta presión creando calor por fricción. Esto permite unir los dos materiales. Sin embargo, la soldadura por fricción batido (FSW), ha

diversificado el ámbito de aplicación de las tecnologías basadas en la fricción desde su invención en 1991 por The Welding Institute (TWI) en Inglaterra, ver figura 1.1 (c). [6,7]



a) soldadura por fricción rotativa.[32]

b) soldadura por fricción no-rotativa,[33]



c) soldadura por fricción batido.[34]

Figura 1.1 Procesos de soldadura por fricción.

1.2 Descripción del proceso de soldadura por fricción batido

El proceso de soldadura por fricción batido, es un proceso que combina el calor generado y el flujo de material que se produce cuando la herramienta entra en contacto con las piezas a unir y es desplazada a lo largo de la línea a soldar, esto genera un sobrecalentamiento que permite el ablandamiento de la materia, ver figura 1.2.

Para realizar el proceso se utiliza una herramienta cilíndrica no consumible, la cual consta de un hombro ("shoulder") a la cual se fija un pin sobre su cara inferior; a su vez, distinguimos dos lados en el cordón de soldadura, el primero se llamará lado de avance ("advancing side"), este será el lado del cordón donde la frecuencia rotacional y la velocidad de avance posean el mismo sentido y se denomina lado de retroceso ("retreating side") al otro lado del cordón. [5][6]

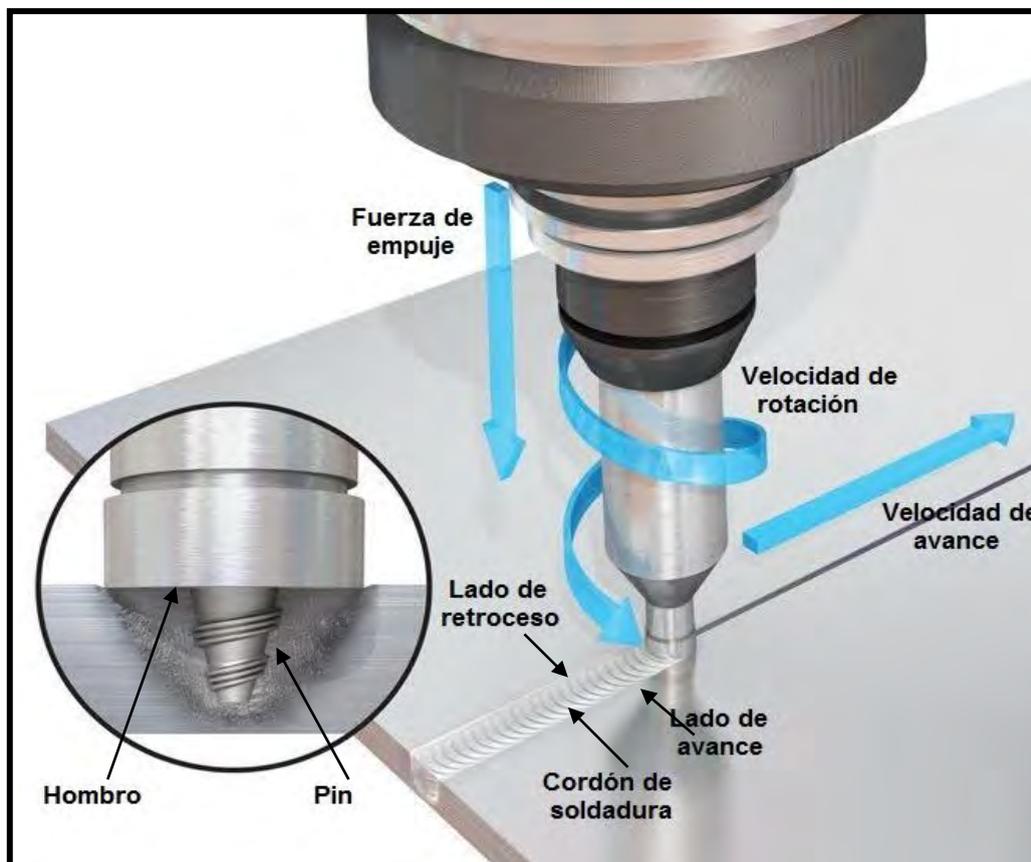


Figura 1.2 Esquema del proceso de soldadura por fricción batido. [39]

El proceso de soldadura por fricción batido consiste en tres fases, las cuales pueden ser apreciadas en la figura 1.3. La primera fase inicia con la aproximación de la herramienta hasta uno de los extremos de la junta a soldar, posteriormente la herramienta es puesta en rotación, esta frecuencia rotacional puede variar por lo general desde 400 rpm hasta 1500 rpm, posteriormente, se procede a introducir el pin de la herramienta lentamente entre las planchas a soldar, las cuales han sido fijadas previamente a una placa soporte, hasta que el hombro de la herramienta entra en contacto con ellas, la figura 1.3 (a) muestra la fase de inmersión de la herramienta. [5, 6]

La inmersión de la herramienta entre las planchas a soldar se produce gracias a la rotación, la cual genera el calentamiento de la región por fricción, una vez que el hombro de la herramienta entra en contacto con la superficie de la plancha, se produce una fuerza vertical debido al contacto entre ellas, lo cual evita que el material fluya hacia arriba, permitiendo de esta manera el conformado de la junta, con una potencia suministrada que varía entre 1 kW y 3 kW. [5]

La segunda fase del proceso corresponde al avance de la herramienta, la velocidad de avance varía entre 30 mm/min - 400 mm/min. Debido a la fricción entre la herramienta (hombro y pin) y la plancha a soldar, se genera en el material un incremento local de la temperatura, pero no superior a la de fusión, además, durante esta fase la deformación plástica constituye otra fuente de calor importante, debido a todo esto el material se ablanda y alcanza un estado plástico, facilitando el movimiento de la herramienta a lo largo de la junta a soldar, ver figura 1.3 (b). [5]

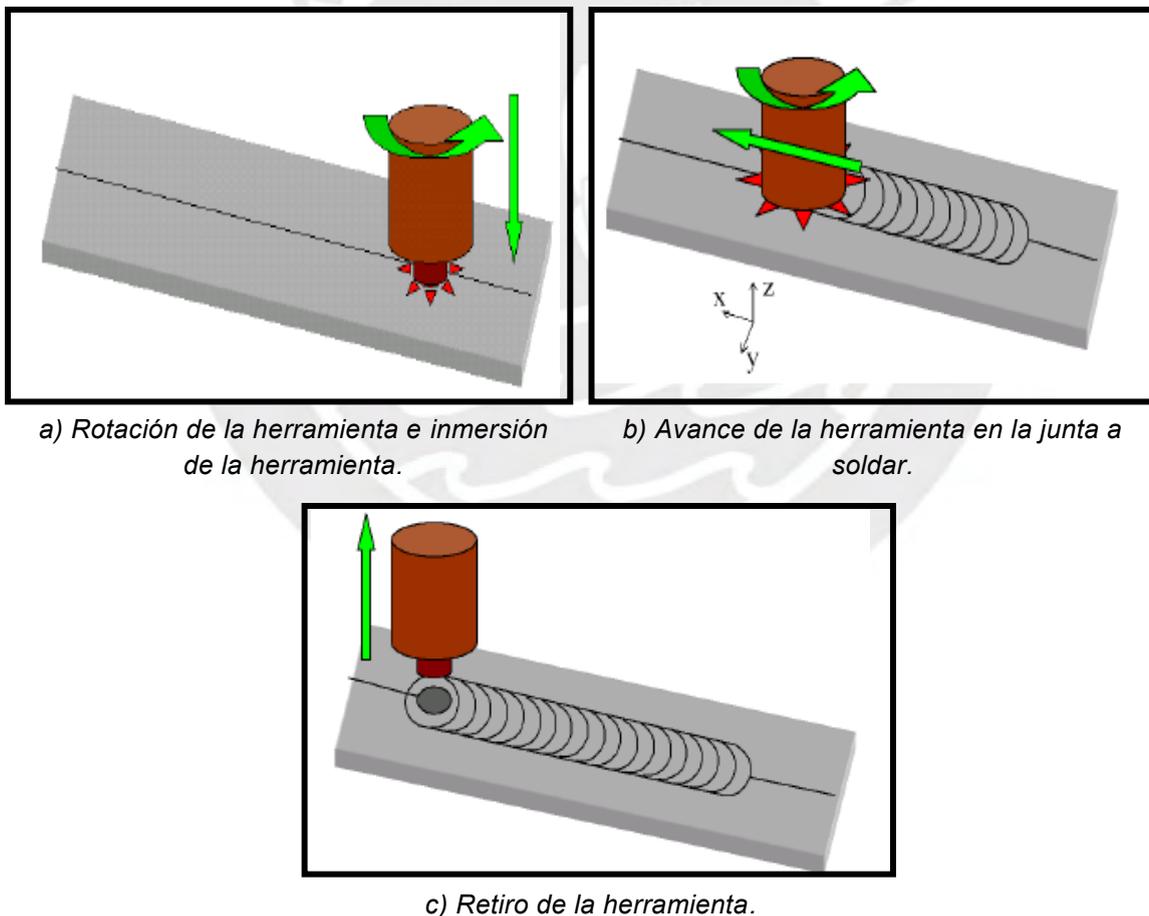


Figura 1.3 Descripción de las fases de la soldadura por fricción batido. [5]

Además, la frecuencia rotacional permite la mezcla del material de las planchas a soldar, la combinación de estos movimientos (velocidad de avance y frecuencia rotacional) logran

que el material entre en contacto con el pin por debajo y alrededor de éste, de esta manera el cordón queda constituido únicamente por el material base.

La tercera fase del proceso ocurre cuando la herramienta llega al final de la junta, ésta se retira de las planchas dejando ver un agujero con la forma del pin, ver figura 1.3 (c).

Según Bastier [5] el calor que se genera debido al proceso alcanza en promedio un 75% de la temperatura de fusión del metal base, por tanto, el material siempre se encuentra en estado sólido, lo cual evita problemas referentes a la solidificación y permite que las propiedades mecánicas de la soldadura sean más cercanas a la del material base. Según Campbell et al. [8] las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 2024-T351 realizadas mediante el proceso de fricción batido alcanzaron valores entre 80 y 90% respecto al material base.

1.3 Descripción de la herramienta

El proceso de soldadura por fricción batido implica movimiento de material y deformación plástica, esto depende principalmente de la geometría de la herramienta, la frecuencia rotacional y velocidad de avance. Estos parámetros generan cambios en el flujo del material, producen un gradiente de temperatura a lo largo del cordón de soldadura, así como, cambios en la microestructura del material; todo esto conlleva a obtener diferentes propiedades mecánicas según la configuración utilizada al momento de realizar el proceso. [6]

La geometría de la herramienta es el parámetro más importante a considerar en el proceso de soldadura por fricción batido, a su vez, juega un papel crítico en el movimiento de material y regula su velocidad. Como se mencionó anteriormente, la herramienta tiene dos funciones principales: producir un calentamiento localizado y generar un adecuado flujo del material alrededor del pin de la herramienta. [1]

Por lo general, la herramienta es fabricada de un acero aleado resistente como un AISI H13 o D2 y con un valor de dureza que varía entre 55 y 60 HRC, de tal manera que pueda soportar los esfuerzos generados durante el proceso de soldadura por fricción batido; las dimensiones de la herramienta varían dependiendo de la aplicación, la altura del pin varía entre 5 - 8 mm, el radio del hombro varía entre 9 - 13 mm, y el radio del pin entre 3 - 6 mm (existe una proporción clásica de 3 entre estos radios). La altura del pin es ligeramente inferior al espesor de las planchas, lo cual permite una adecuada presión por parte del hombro.

La herramienta consta de un hombro ("shoulder") y un pin ("pin") como se muestra en la figura 1.4, en la fase inicial de inmersión de la herramienta se genera calor que resulta de la fricción del pin y del material a soldar, así mismo, el calor generado sigue aumentando debido a la deformación que produce el pin durante la inmersión en el material, finalmente, cuando el hombro de la herramienta entra en contacto con el material a soldar, se genera el mayor componente de calor de este proceso; así mismo, el hombro debe "bloquear" el flujo de material, de tal manera que éste quede atrapado entre la herramienta y la plancha a soldar. [1,3]

Otra función importante de la herramienta es la de "agitar" y "mover" el material. La uniformidad de la microestructura y propiedades mecánicas, así como las cargas de proceso, se rigen por la geometría de la herramienta. En la actualidad el pin cilíndrico roscado es el más utilizado.

El hombro de la herramienta es generalmente plano y perpendicular al eje de rotación, su diámetro exterior sigue siendo lo suficientemente grande y alrededor de tres veces del diámetro del pin para cubrir completamente el área procesada. [4, 6]

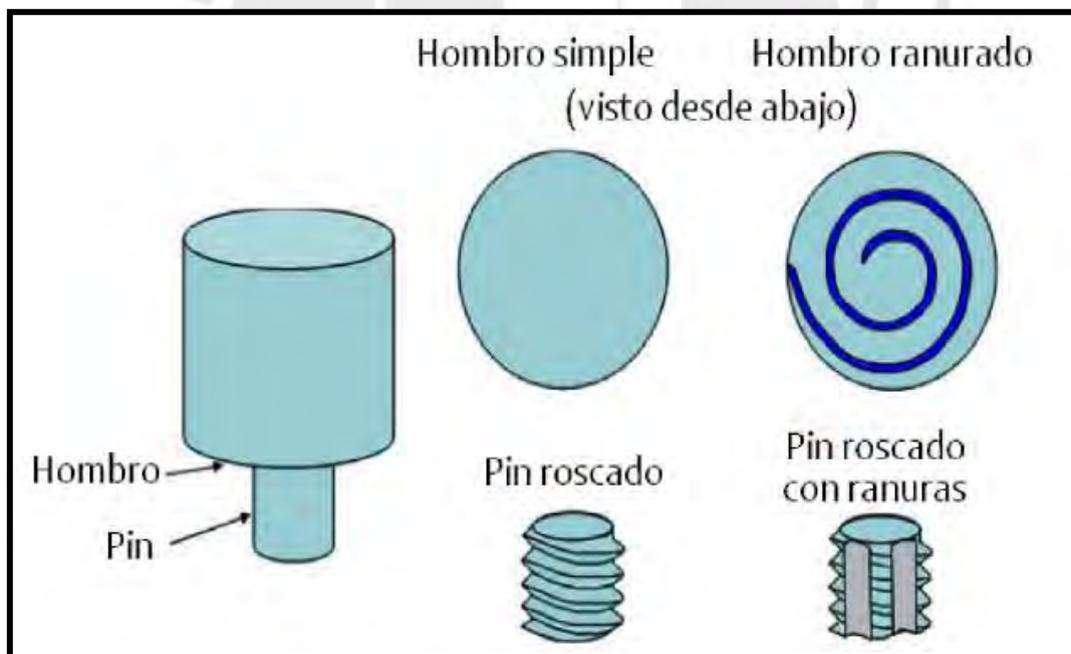


Figura 1.4 Esquema de la herramienta de la soldadura por fricción batido. [6]

1.3.1 Geometría del pin y del hombro de la herramienta

La geometría del pin y del hombro son los parámetros predominantes, ya que determinan la calidad de la junta a obtener. Por lo tanto, son objeto de estudio y desarrollo con el fin de

optimizar el proceso de soldadura por fricción batido. En la actualidad, se hacen grandes esfuerzos para desarrollar herramientas (material, geometría) que conduzcan a un mejor rendimiento de la soldadura. La cantidad de material impulsado, generación de calor, potencia requerida y uniformidad en el cordón de soldadura, están directamente relacionados con la geometría de la herramienta. [2, 6]

La herramienta con hombro de cara plana y pin con rosca es la más utilizada para soldar, con una experiencia cada vez mayor y una mejor comprensión del flujo de materiales, la geometría de la herramienta ha evolucionado de manera significativa. Funciones más complejas se han añadido a la forma de la herramienta como son: alterar el flujo del material y reducir los esfuerzos generados durante el proceso. [11]

Por ejemplo, las herramientas Whorl™ y MX-Triflute™ desarrolladas por TWI, ver figura 1.5, poseen ambos pines la forma de tronco cónico, el cual desplaza menos material que un pin cilíndrico del mismo diámetro, además ambas herramientas inducen un componente vertical de velocidad que facilita el flujo del material en estado plástico.

Así mismo, la herramienta Whorl™ reduce el volumen desplazado en un 60%, mientras que el Triflute™ reduce el volumen desplazado por sobre un 70%. [9]



Figura 1.5 Ejemplos de herramientas desarrolladas por TWI. [11]

La herramienta Flared-Triflute es similar a la MX-Triflute, con la única diferencia que posee una especie de flauta ampliada, mientras que la herramienta A-skew es una herramienta cónica roscada, la cual posee su eje inclinado respecto al eje de la máquina, ambas herramientas aumentan el flujo de material removido con respecto a una herramienta cilíndrica convencional, de esta manera se genera una mayor agitación del área soldada, lo

cual origina cordones muchos más amplios, estas herramientas son usadas para uniones traslapadas, ver figura 1.6.

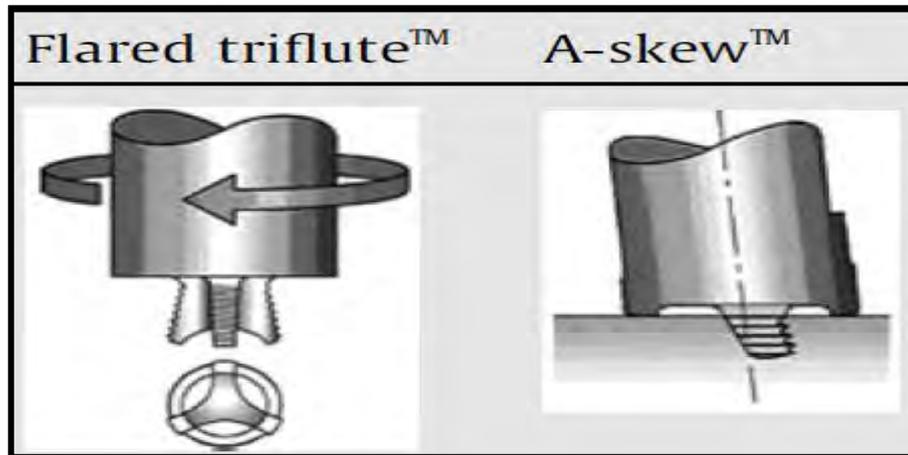


Figura 1.6 Herramientas desarrolladas por TWI. [11]

Colligan [12] desarrolló una herramienta que posee un hombro cónico que se extiende desde el borde exterior del cuerpo hacia el eje del pin (ángulo θ), a su vez la cara del hombro posee ranuras, las cuales pueden ser concéntricas o en forma de espiral, ver figura 1.7. En primer lugar, la geometría de esta herramienta permite obtener diferentes anchos de cordón de soldadura, anteriormente se fabricaban herramientas con diferentes diámetros de hombro fijo en función del espesor del material, diámetro del pin y otros factores.

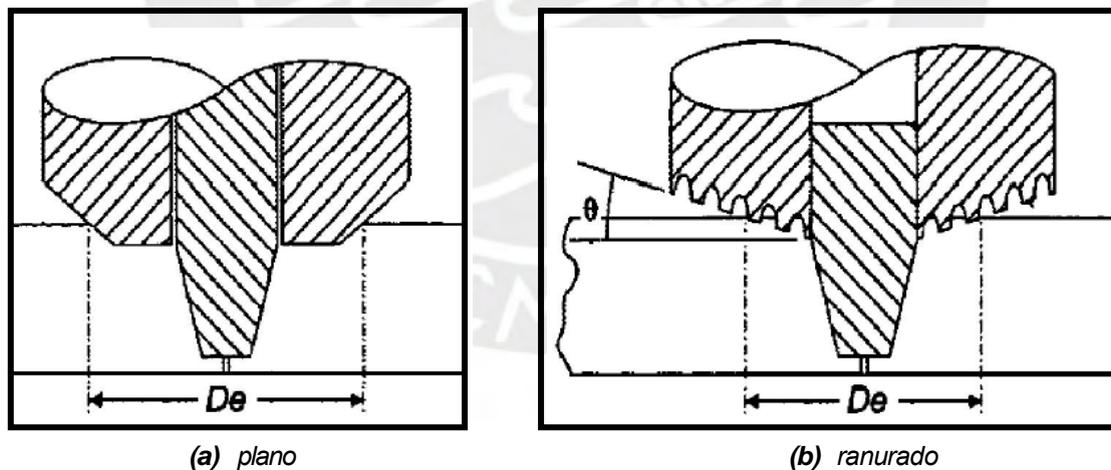


Figura 1.7 Herramientas de hombro cónico. [12]

Una segunda ventaja de la geometría del hombro cónico es que la herramienta de soldadura puede acomodarse a variaciones en el espesor del material y en la profundidad de inmersión de la herramienta, con poco o ningún cambio en la calidad de la soldadura. Una tercera ventaja del diseño es el aumento de calor por fricción generado por las ranuras mecanizadas en la cara del hombro.

1.3.2 Configuración de la herramienta

Hay tres configuraciones posibles, ver figura 1.8. La primera utiliza una herramienta convencional, esto permite la soldadura de las piezas en una de sus caras, la herramienta es de una sola pieza y no permite el movimiento relativo entre el pin y el hombro, adicionalmente, se debe considerar una placa soporte y bridas como sistema de sujeción, el cual sujetará firmemente al material durante la realización del proceso

La segunda configuración considera una herramienta retráctil, el pin y el cuerpo de la herramienta tienen un movimiento relativo. De esta manera, el pin tiene un movimiento de traslación axial independientemente del hombro. Esta configuración permite la creación de juntas de espesores variables y también ayuda a sellar la formación del agujero que se produce en el extremo de la soldadura durante la soldadura con una herramienta convencional, también requiere del uso de una placa soporte y bridas. [2]

Por último, la herramienta con doble hombro (llamada "*bobbin tool*"), posee dos hombros en caras opuestas a la pieza, ambos hombros generan calor por fricción y agitación en ambas caras de la pieza.

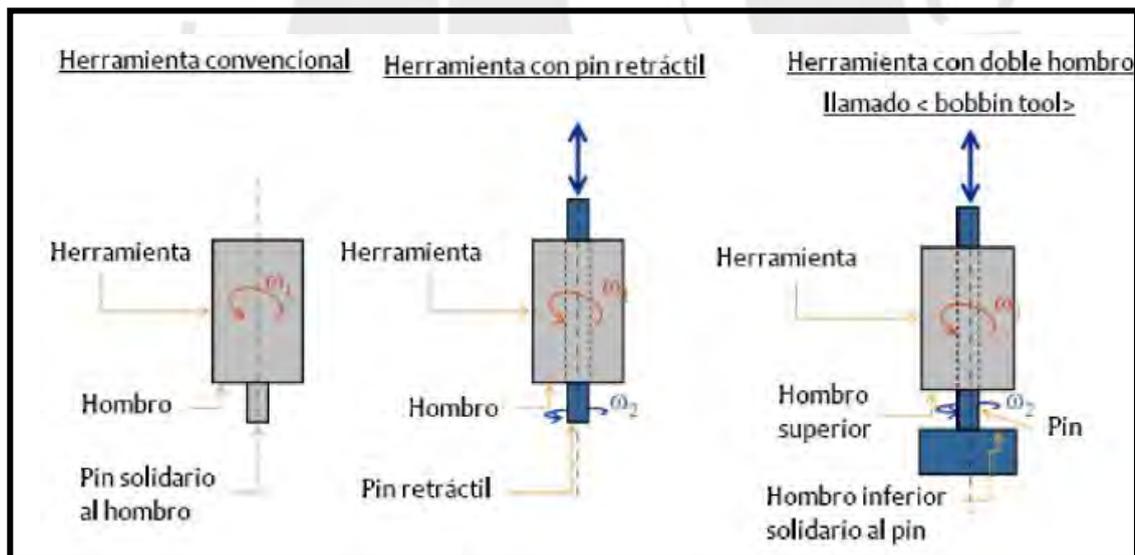


Figura 1.8 Configuración de la herramienta. [2]

El cordón de soldadura tiene una forma simétrica, además el uso de un hombro por debajo de la pieza permite contrarrestar la fuerza ejercida por forjar la parte superior del hombro, y así deshacerse de la placa soporte. Los esfuerzos generados durante la soldadura son considerablemente menores (equivalente a 1/4 de los esfuerzos generados respecto a una herramienta de soldadura de un solo hombro). [2]

1.4 Parámetros determinantes del proceso de soldadura por fricción batido

Como se mencionó, la herramienta es el primer parámetro a definir, según su geometría ésta producirá deformación e incremento de calor en el material, lo cual permitirá alcanzar un comportamiento plástico y a su vez generar un adecuado flujo de material alrededor de la herramienta.

Según Record et al. [13] numerosos parámetros tienen un rol significativo sobre la calidad del proceso de fricción batido, su trabajo consistió en examinar la influencia de los parámetros siguientes:

- Geometría de la herramienta: diámetros del hombro y del pin, longitud del pin.
- Frecuencia rotacional de la herramienta.
- Velocidad de avance de la herramienta.
- Ángulo de inclinación de la herramienta.
- Profundidad de inmersión de la herramienta.
- Fuerza de inmersión.
- Duración de estabilización de la herramienta. (tiempo de movimiento o mezcla, el cual se realiza entre el fin de la fase de inmersión de la herramienta y el inicio de la fase de avance).

La frecuencia rotacional de la herramienta (V_r , rpm) provoca agitación y mezcla de material alrededor del pin y la velocidad de avance de la herramienta (V_a , mm/min) mueve el material de la parte delantera a la parte posterior del pin. Altos valores de frecuencia rotacional en la herramienta generaran altos valores de temperatura a causa de la fricción entre la herramienta y el material. [6]

Otro parámetro importante del proceso es el ángulo de inclinación de la herramienta, una inclinación adecuada del eje por detrás de la dirección de soldadura asegura que el hombro de la herramienta mantenga agitado el material y la rosca del pin permite que el material se mueva de la parte delantera a la posterior del pin.

La profundidad de inmersión del pin en el material, es un parámetro importante, porque permite obtener cordones de soldadura de buena calidad, la profundidad de inmersión del pin está asociada a su altura. Cuando la profundidad de inmersión es poco profunda, el hombro de la herramienta no hace contacto con la superficie del material, de esta manera, el hombro de rotación no puede mover el material de manera eficiente desde el frente hasta la parte posterior del pin, lo que resulta en la generación de cordones de soldadura con

defectos en el interior. Por el contrario, cuando la profundidad de inmersión es muy profunda, el hombro de la herramienta genera rebabas en el cordón. [6]

Kumar et al. [9] estudiaron el rol de la herramienta del proceso de fricción batido sobre el flujo de material y la formación del cordón de soldadura, en el estudio se introduce progresivamente la herramienta generando una fuerza de inmersión, cuando el valor de esta fuerza se encuentra por debajo de 7,4 kN en la aleación de aluminio AA7020-T6 se presentan defectos de soldadura debido a un insuficiente contacto entre el hombro y las planchas, lo cual a su vez origina una deficiente generación de calor; por el contrario, cuando el valor de la fuerza fue superior a 7,4 kN no se presentaron defectos en el cordón de soldadura, ver figura 1.9.

El conjunto de estos parámetros juega un rol importante sobre los esfuerzos absorbidos por la herramienta durante su avance, sobre la distribución de la temperatura en las planchas y a la vez en la herramienta y finalmente, sobre la calidad de la junta obtenida. A continuación, examinaremos los tres parámetros más influyentes: la geometría de la herramienta, la frecuencia rotacional y la velocidad de avance.

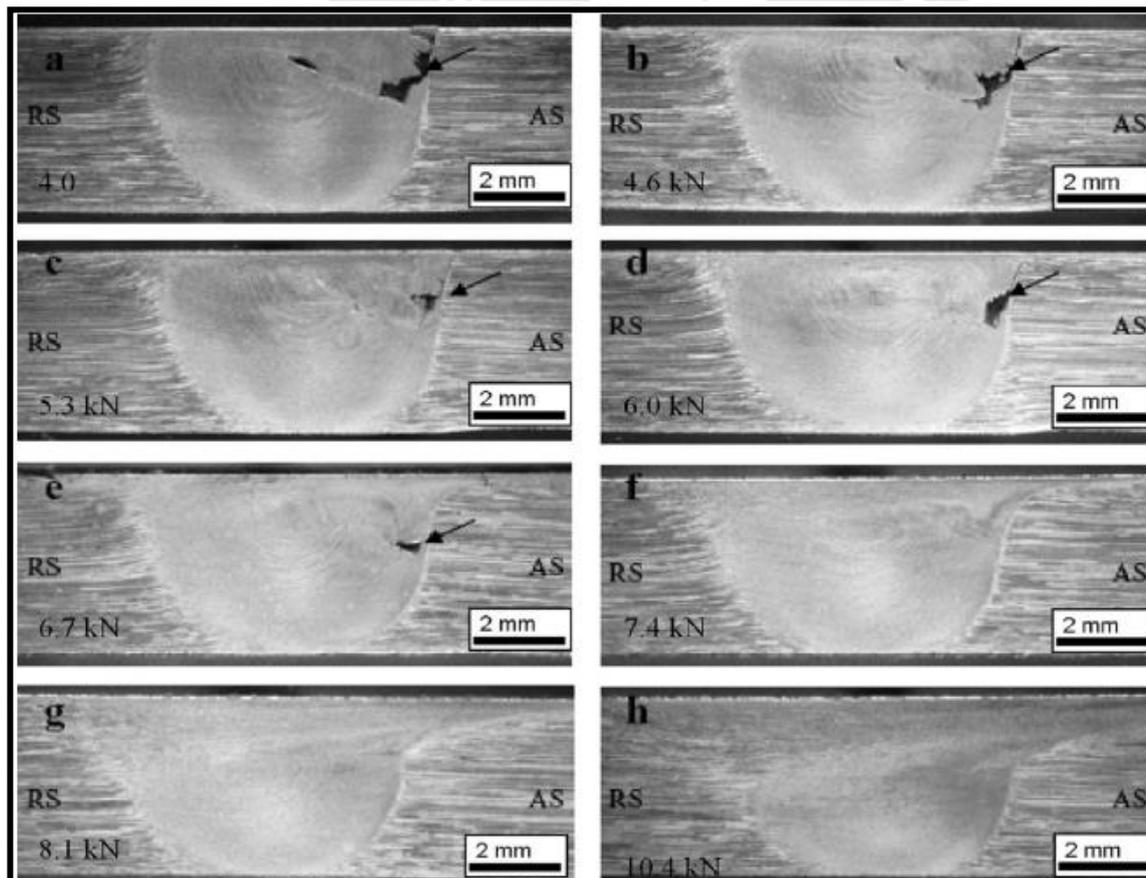


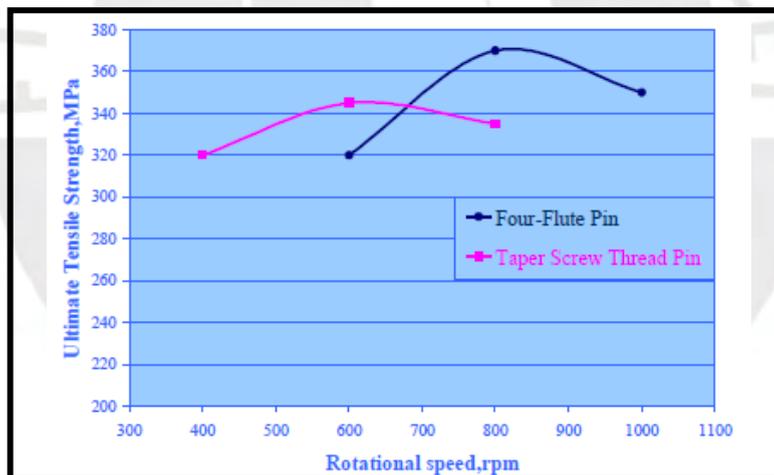
Figura 1.9 Evolución de defectos en el cordón de soldadura en función de la interacción del hombro y el material base. [9]

1.4.1 Geometría de la herramienta

Bahemmat et al. [14] señalaron que la forma del pin de la herramienta tiene un efecto significativo en la estructura de la junta y en las propiedades mecánicas. La junta fabricada con la herramienta four-flute muestra mejores propiedades de tracción que la herramienta cónica roscada, ver figura 1.10 (a), utilizando los mismos parámetros de soldadura la resistencia máxima a la tracción obtenida por la herramienta four-flute fue de 90% respecto al material base y la herramienta cónica roscada obtuvo un valor de resistencia máxima a la tracción de 84%, ver figura 1.10 (b).



(a) Herramienta Cónica Roscada y Four-Flute.



(b) Gráfica de esfuerzo último a la tracción vs frecuencia rotacional.

Figura 1.10. Comparación de herramienta cónica roscada y Four-flute. [14]

Sree et al. [15] estudiaron el efecto de perfiles de pin en la microestructura y propiedades mecánicas de la soldadura por fricción batido bajo el agua en la aleación de aluminio AA2519-T87, en este estudio se utilizaron cuatro herramientas: la primera con un pin cilíndrico roscado, la segunda con un pin cilíndrico liso, la tercera con un pin cónico roscado, y la cuarta con un pin cónico liso. En este estudio la herramienta con el pin cónico roscado proporciona una mejor calidad de junta. No se producen grandes defectos en el cordón de

soldadura, el batido que se obtiene con esta herramienta es el mejor, en tal sentido la textura de la región central ("*nugget*") del cordón de soldadura fue lo más homogénea posible. Además, las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de tracción y doblado son las mejores. A su vez, la ausencia de roscado provoca defectos (cavidades) en el cordón de soldadura, el roscado genera una cantidad de calor importante, el cual permite mejorar la agitación y batido del material. [14]

1.4.2 Relación entre frecuencia rotacional y velocidad de avance

Vidakis et al. [16], estudiaron el efecto de la frecuencia rotacional en las propiedades mecánicas en planchas de aluminio AA1050 soldadas mediante fricción batido, encontrando que manteniendo la velocidad de avance constante en 50 mm/min y al aumentar la frecuencia rotacional a partir de 500 rpm hasta 750 rpm la resistencia a la tracción aumenta hasta un valor máximo de 97 MPa, a partir del cual la resistencia a la tracción comienza a decrecer hasta 74 MPa para una frecuencia rotacional de 2500 rpm, a su vez reporta en promedio una eficiencia de 70% en las juntas de soldadura respecto al metal base 107 MPa, similar a otros estudios realizados.

Rajamanickam et al. [10] encontraron que un aumento en la velocidad de avance aumenta la resistencia a la tracción, y el aumento de la frecuencia rotacional disminuye la resistencia a la tracción. El aumento en la frecuencia rotacional genera un incremento en el flujo de calor que, a su vez, aumenta la zona afectada termomecánicamente (ZATM) y la zona afectada térmicamente (ZAT), en consecuencia, los resultados de resistencia a la tracción decrecen. Además, el aumento de la velocidad de avance reduce el flujo de calor generado, lo cual reduce el tamaño de la ZATM y ZAT, que conduce a una mayor fuerza de tracción.

Liu et al. [17] estudiaron las propiedades mecánicas de las juntas realizadas por soldadura de fricción batido en la aleación de aluminio AA1050-H24, encontrando que manteniendo la velocidad de avance constante en 200 mm/min y aumentando la frecuencia rotacional hasta 1000 rpm, el valor de resistencia a la tracción se incrementa conforme lo hace la frecuencia rotacional, pero cuando la frecuencia rotacional supera los 1000 rpm, la resistencia a la tracción disminuye. Los resultados indican que para una velocidad de avance de 200 mm/min y una frecuencia rotacional de 1000 rpm, el valor de esfuerzo a la tracción fue de 84 MPa, lo cual representa el 80% del esfuerzo del material base, ver figura 1.11.

Además, realizaron ensayos manteniendo la frecuencia rotacional constante en 1500 rpm y aumentando la velocidad de avance hasta 400 mm/min, encontrando que la resistencia a la tracción aumenta conforme lo hace la velocidad de avance, para valores superiores de

400 mm/min, la resistencia a la tracción disminuye, los valores óptimos de velocidad para este estudio fueron: 1500 rpm y 400 mm/min, obteniendo un esfuerzo a la tracción de 85 MPa, lo cual representa el 80% del esfuerzo del material base, ver figura 1.12.

A su vez, define el término "*revolutionary pitch*" como la velocidad de avance dividida por la frecuencia rotacional, indicando además que la generación de calor es inversamente proporcional al valor de "*revolutionary pitch*"; en su estudio se comprueba que para valores altos de "*revolutionary pitch*" el calor generado fue bajo y que para valores bajos de "*revolutionary pitch*" el calor generado fue alto.

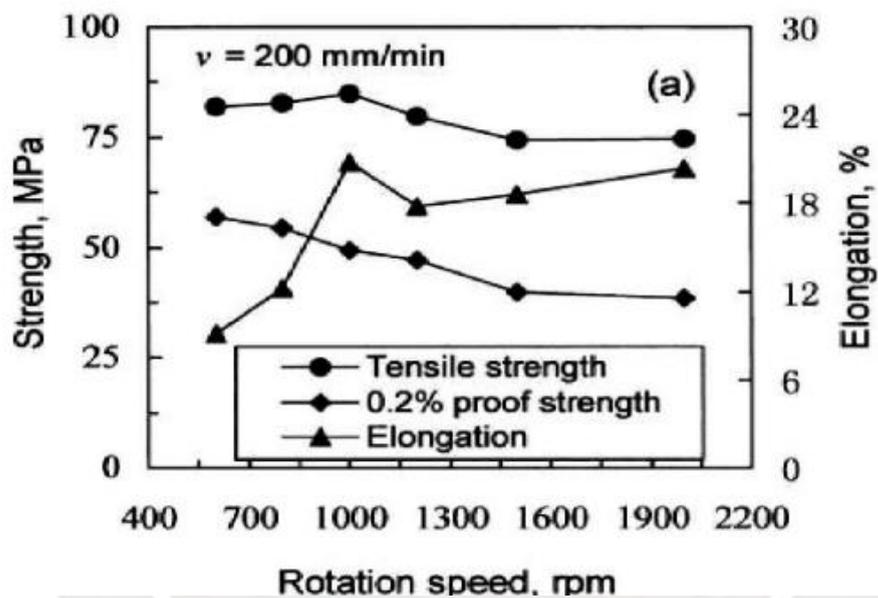


Figura 1.11 Efecto de la frecuencia rotacional en las propiedades de tracción de la unión soldada. [17]

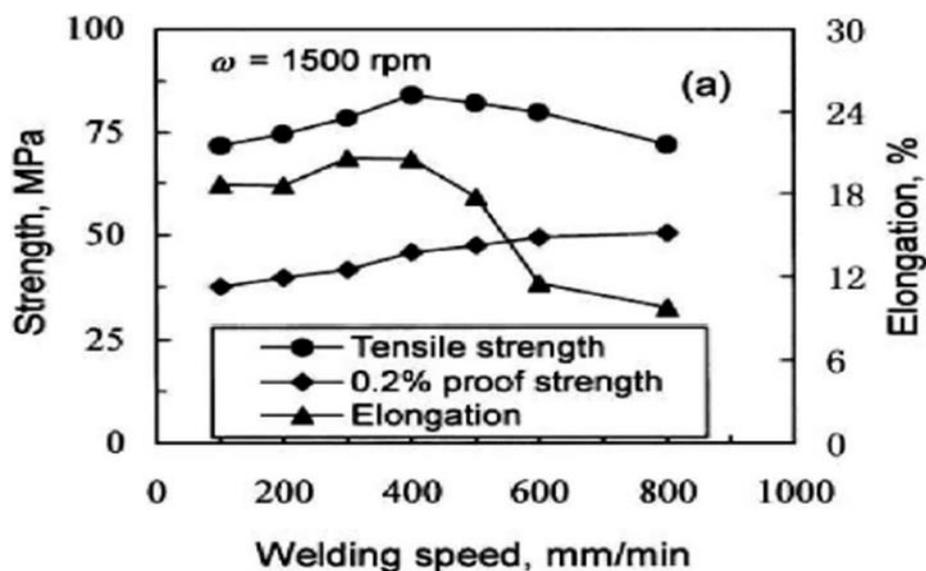


Figura 1.12 Efecto de la velocidad de avance en las propiedades de tracción de la unión soldada. [17]

La figura 1.13. muestra un valor óptimo de "revolutionary pitch" de 0,2 mm/r, cuando el proceso de fricción batido es realizado para este valor óptimo de "revolutionary pitch", el calor real generado es igual al calor necesario para producir juntas sólidas y libres de defectos.

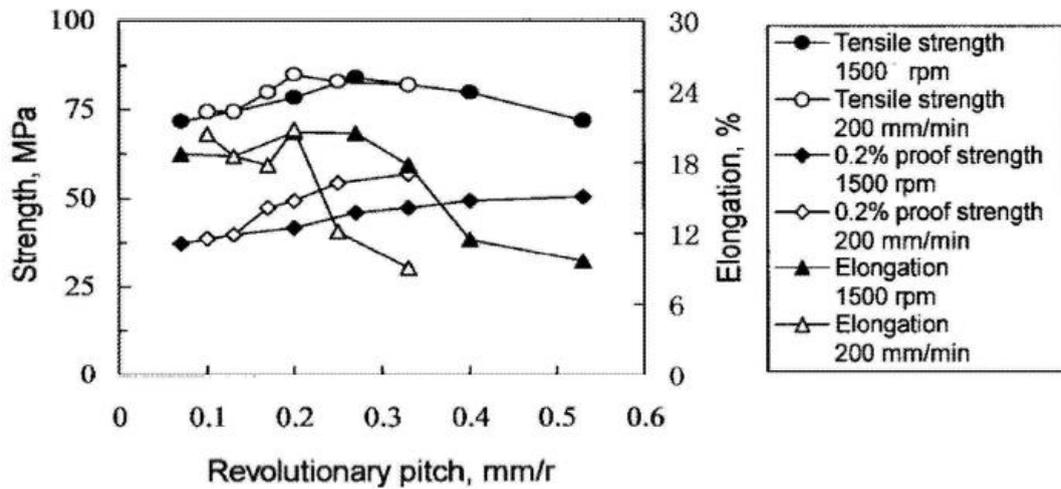


Figura 1.13 Variación de las propiedades de tracción en función del "revolutionary pitch". [17]

Además cuando el valor de "revolutionary pitch" es más elevado que el valor óptimo de 0.20 mm/r ocurren defectos de soldadura en el cordón, debido al menor aporte de calor en la junta; pero cuando el valor de "revolutionary pitch" es menor que el valor óptimo, el grado de ablandamiento de la junta se incrementa, debido al calor excesivo que ocurre en la junta, aunque sin defectos, la propiedades de tracción en la junta disminuyen, ver figura 1.14.

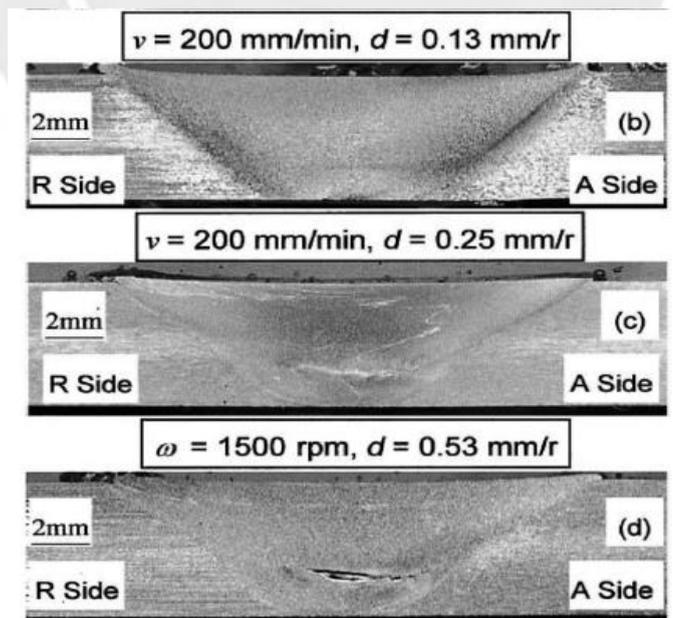


Figura 1.14 Secciones de cordón de soldadura a diferentes valores de "revolutionary pitch", 0,13 mm/rev, 0,25 mm/rev y 0,53 m/rev. [17]

Liu et al. [18], realizaron pruebas en la aleación de aluminio AA2017-T351, para estudiar el efecto que tiene el valor de "revolutionary pitch" sobre las propiedades de tracción, tomando como valor de frecuencia rotacional el de 1500 rpm e incrementando el valor de velocidad de avance desde 25 mm/min hasta 600 mm/min. Se encontró un valor óptimo de "revolutionary pitch" 0,07 mm/r, para el cual, el valor de esfuerzo de tracción fue 354 MPa, el cual representa el 82% con respecto al material base, ver figura 1.15.

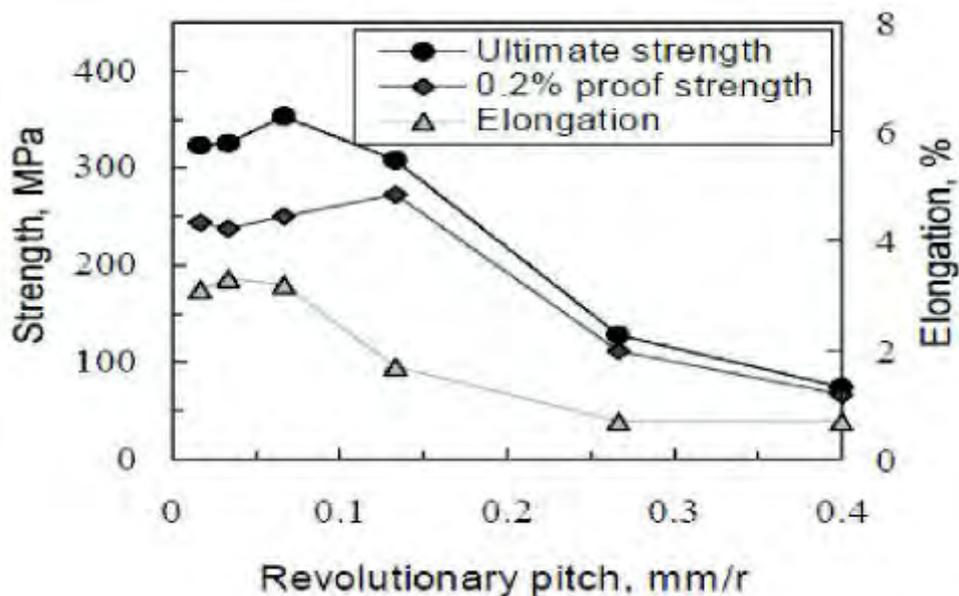


Figura 1.15 Resistencia a la tracción en función del "revolutionary pitch". [18]

Cuando el valor de "revolutionary pitch" es menor a 0.07 mm/r, no se producen defectos en las juntas, pero cuando este valor es mayor, se producen defectos por la poca aportación de calor en las juntas. Cabe señalar que las juntas fueron sometidas a ensayos de tracción, resultando que todas las probetas fracturaron en el lado de avance o en el centro del cordón de soldadura, pero no en lado de retroceso, ver figura 1.16.

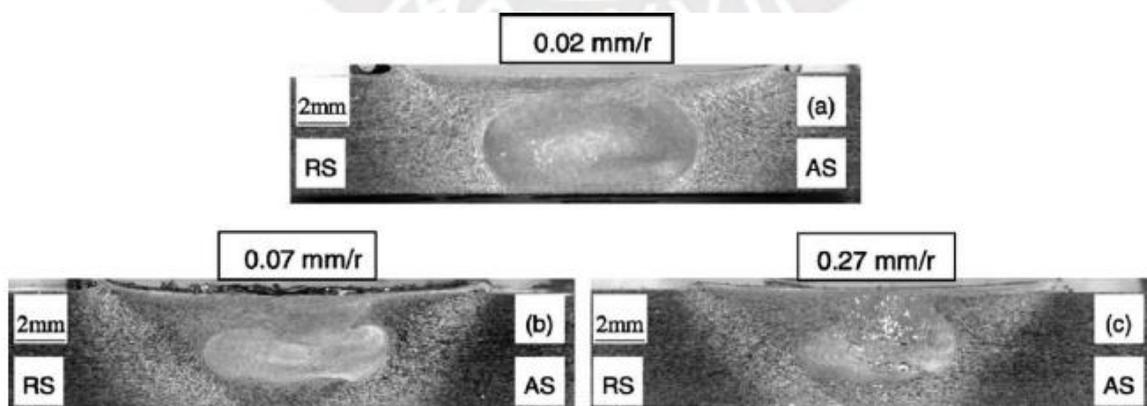


Figura 1.16. Secciones de cordón de soldadura a diferentes valores de "revolutionary pitch", 0,02 mm/rev, 0,07 mm/rev y 0,27 mm/rev. [19]

Esto implica que las propiedades de tracción de las juntas no son las mismas en ambas zonas del cordón de soldadura, por lo tanto, las propiedades de tracción del lado de avance son más bajas que las del lado de retroceso.

1.5 Aspectos microestructurales de las aleaciones soldadas por fricción batido

La microestructura generada durante la soldadura mediante el proceso de fricción batido muestra cuatro zonas principales, las cuales presentan microestructura y propiedades mecánicas diferentes. El gradiente térmico y la deformación generada durante el proceso derivan en un gradiente de microestructuras a lo largo del cordón de soldadura. Se han realizado diferentes estudios sobre la evolución microestructural en aleaciones de aluminio de la serie 2000, 6000 y 7000, los cuales son los mejores candidatos para este proceso. [19]

Basado en esto, se puede distinguir las siguientes zonas: núcleo central (“*nugget zone*”), zona afectada térmomecánicamente (ZATM), zona afectada térmicamente (ZAT) y el material base, como se muestra en la figura 1.17.

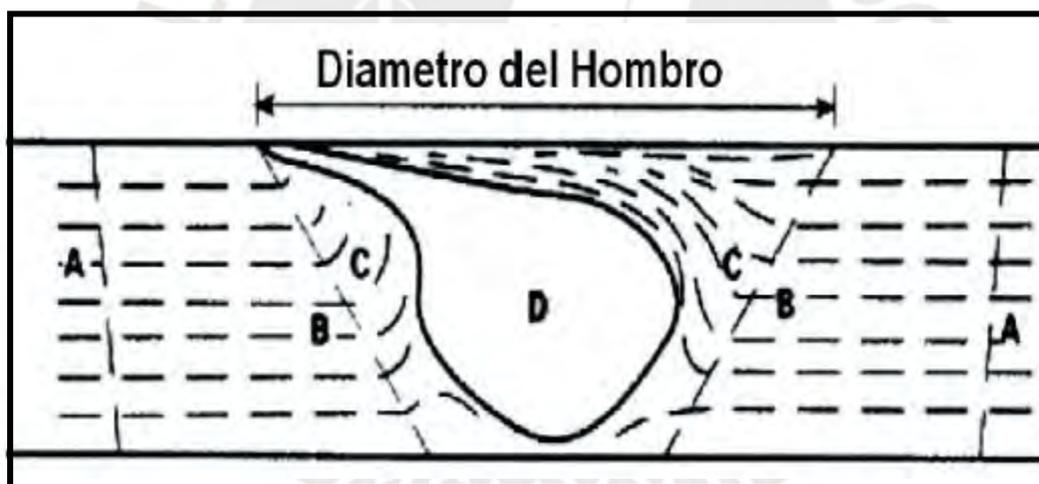


Figura 1.17 Esquema de una sección transversal de un cordón de soldadura realizada mediante la Soldadura de Fricción Batido, se muestran cuatro zonas: (A) metal base, (B) ZAT, (C) ZATM, (D) Núcleo central. [11]

Zona A: El metal base que se encuentra cerca de la zona de soldadura, no sufre calentamiento importante, tampoco deformación, por consiguiente, conserva sus propiedades microestructurales originales.

Zona B: Zona afectada térmicamente (ZAT), las propiedades mecánicas, así como la microestructura son modificadas por el paso del calor generado por la herramienta. Los cambios de propiedades son análogos a los de una zona afectada térmicamente obtenida

por procedimientos de soldadura convencional (TIG, MIG). Esta zona no ha sufrido ninguna deformación plástica debido al paso de la herramienta [6]. Las temperaturas varían entre 250 °C - 400 °C. Según Bastier [5] el tamaño de precipitados del tipo MgZn₂ presentes en la aleación de aluminio 7075-T651 aumenta de 10 - 20 nm a 20 - 30 nm, este agrandamiento va conllevar una caída en la resistencia mecánica en esta zona. Según Genevois [19], la ZAT se define como un área que ha sufrido un ciclo térmico de recocido, por tanto, puede producirse una pequeña deformación e introducir dislocaciones. Sin embargo, esta deformación es muy baja para producir un cambio en la estructura de grano en comparación con la del metal base.

Zona C: Zona afectada termomecánicamente (ZATM), las propiedades mecánicas y la microestructura son modificadas no solamente por el calor generado por la herramienta, sino también por las grandes deformaciones causadas por la rotación de la herramienta. Según Bastier [5] las temperaturas varían entre 400 °C - 450 °C. Aunque la ZATM sufre deformación plástica, no llega a ocurrir recristalización debido a la tensión de deformación insuficiente. En esta zona, los granos son extremadamente deformados, la densidad de dislocaciones es relativamente baja, además se observa una disminución de la resistencia mecánica. [19]

Zona D: Zona núcleo central ("*nugget zone*"), experimenta deformaciones todavía más importantes que la zona afectada termomecánicamente y las temperaturas se encuentran entre 450 °C - 500 °C. La microestructura está enteramente recristalizada dinámicamente, lo cual origina una disminución de tamaño de grano que varía entre 3 μm y 10 μm. La densidad de dislocaciones es muy baja en esta zona y los precipitados inicialmente presentes se disuelven completamente. Esto explica la disminución de la resistencia mecánica en la zona del núcleo central después de la soldadura. [5,6]

1.6 Materiales soldados por fricción batido

El rápido desarrollo del proceso de fricción batido en aleaciones de aluminio y su aplicación con éxito en aplicaciones comerciales ha motivado su aplicación a otros materiales no ferrosos (Mg, Cu, Ti, así como sus aleaciones), el acero, e incluso de materiales termoplásticos. Sin embargo, un posible obstáculo para el éxito comercial de este proceso, se basa en la alta temperatura que se requiere para poder procesar el titanio y el acero; el desarrollo de nuevos materiales que permitan ser usados en la fabricación de herramientas son la clave para hacer posible este proceso. A diferencia de las aleaciones de aluminio de alta resistencia, las cuales son difíciles de soldar por técnicas de fusión convencionales; las

aleaciones de titanio y aceros se pueden soldar por diversas técnicas de fusión y de esta manera lograr una alta eficiencia.

Por lo tanto, no sólo es importante demostrar la viabilidad del proceso de soldadura mediante fricción batido, sino también delinear sus ventajas sobre otras técnicas. A continuación, se examina el desarrollo del proceso de fricción batido en otros materiales. [6]

1.6.1 Aleaciones de cobre

Según Mishra et al. [6] soldar cobre es generalmente difícil por técnicas convencionales de soldadura de fusión, debido a su alta difusividad térmica, que varía de 10 - 100 veces mayor que la de los aceros y aleaciones de níquel. Por lo tanto, el aporte de calor necesario para la soldadura es mucho mayor, resultando en velocidades de soldadura muy baja. Recientemente, se han realizado varios intentos de soldar cobre puro y 60/40 de bronce a través del proceso de fricción batido. La tabla 1.1 resume el espesor de las planchas, materiales para herramientas y parámetros del proceso de soldadura por fricción batido. Planchas de cobre de 1,5 mm - 50 mm de espesor fueron soldadas con éxito mediante este proceso.

Tabla 1.1 Resumen de las aleaciones de cobre soldadas por fricción batido. [6]

Materiales	Espesor (mm)	Material de la herramienta	Frecuencia rotacional (rpm)	Velocidad avance (mm/min)
Cobre puro	3	Acero	---	---
Cobre puro	10 - 25	Aleación de tungsteno sinterizado	---	---
Cobre puro	10 - 50	Material resistente a alta temperatura	---	---
Cobre libre de oxígeno	1,5 - 5,0	Superaleación de Ni (Inconel 718), Carburo sinterizado ISO K40UF (WC-Co). Acero para trabajo en caliente tipo Cr-Mo-V (QR090).	375 - 1250	250 - 400
Cobre puro	4	---	1250	61
60/40 Bronce	2	---	250 - 1500	500 - 2000

Algunas observaciones importantes pueden hacerse de los estudios anteriores. En primer lugar, el material de la herramienta y la geometría de la herramienta ejercen un efecto significativo sobre la viabilidad de este proceso en las planchas de cobre. Se mostró que el pin hecho de acero para herramientas de alta temperatura con un perfil cilíndrico podría ser utilizado para unir planchas de cobre de hasta de 3 mm de espesor, pero no era apropiado para soldar planchas de 10 mm de espesor, debido al ablandamiento de la herramienta de acero por encima de 540 °C. Se utilizó una herramienta de tungsteno sinterizado, la cual fue mucho más eficaz para soldar planchas de cobre de espesor de 10 mm - 25 mm. Además, para soldar planchas de cobre de espesor mayores a 30 mm se utilizó un nuevo diseño de pin y diferentes materiales para herramientas de alta temperatura, lo cual resultó siendo lo suficientemente fuerte como para poder realizar el proceso. [6]

La soldadura por fricción batido en aleaciones de cobre presenta las cuatro zonas microestructurales: el núcleo central, la ZAT, la ZATM y material base. El núcleo presenta granos equiaxiales recristalizados y su dureza puede ser más alta o más baja que el material base dependiendo del tamaño de grano. Se obtuvo como promedio de tamaño de grano 210 μm para planchas de cobre de 4 mm de espesor, soldadas con una frecuencia rotacional de 1250 rpm y una velocidad de avance de 60,6 mm/min, la dureza de la zona central fue de 60 - 90 HV, en comparación con la del metal base de 105 - 110 HV. Aun cuando el tamaño de grano decrece de 210 μm a 100 μm , la dureza decrece debido a la reducción en la densidad de dislocaciones. En planchas de cobre de 2 mm de espesor con un promedio de tamaño de grano de 30 μm , soldadas a 1000 rpm y 30 mm/min, la dureza del núcleo central fue de 128 - 136 HV, valores más elevados que los correspondientes al metal base 106 - 111 HV, debido a la reducción del tamaño de grano. [11]

1.6.2 Aleaciones de titanio

La más comercial de las aleaciones de titanio es la Ti-6Al-4V, esta aleación representa aproximadamente la mitad de todas las aleaciones de titanio que se producen, siendo muy popular debido a su resistencia a la tracción de 1100 MPa, resistencia a la fluencia de 900 MPa, resistencia a la fatiga y propiedades de colado. [11]

Aunque muchas aleaciones de titanio se sueldan con facilidad mediante procesos de fusión convencionales como GTAW, en algunos casos pueden requerir de un tratamiento posterior a la soldadura, incrementando los costos de producción. Se espera eliminar la necesidad de un tratamiento térmico posterior a la soldadura, utilizando la soldadura por fricción batido

como un proceso en estado sólido. Se examinó el efecto del proceso de fricción batido en la evolución microestructural y propiedades de la aleación Ti-6Al-4V. [6]

Estos estudios revelaron las siguientes observaciones: en primer lugar, se produjeron cordones libre de defectos mediante la soldadura por fricción batido, en segundo lugar, en general, hay una ausencia de una aparente ZATM, que se observa típicamente en las aleaciones de aluminio, aunque se identificó la existencia de una muy estrecha ZATM de aproximadamente 30 μm , en tercer lugar, se conectaron sensores de temperatura a la circunferencia de la herramienta a 3,2 mm por encima del hombro y se registró una temperatura máxima de 990 °C. Esto implicaba que la temperatura máxima en la zona del núcleo central podría superar los 1000 °C. [6]

Además, se reportó que la dureza aumentó de aproximadamente 340 HV en el metal base y en la zona del núcleo central, a 370 HV en la zona afectada térmicamente. Claramente, los perfiles de dureza a través del cordón de soldadura deben estar asociados con las diferentes características microestructurales reveladas en estos estudios.

Así mismo, el mayor desgaste de la herramienta se llevó a cabo durante la inmersión en las planchas. La tabla 1.2 muestra las propiedades de resistencia a la tracción de la aleación Ti-6Al-4V y el metal base. Claramente, las soldaduras muestran una eficiencia conjunta del 100% con respecto al esfuerzo de fluencia y a la resistencia máxima a la tracción. Por otra parte, la ductilidad de las soldaduras se compara favorablemente con la del metal de base.

Tabla 1.2 Resumen de las propiedades de tracción realizadas mediante la soldadura por fricción batido en Ti-6Al-4V y el metal base. [6]

Material	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo último a la tracción (MPa)	Elongación (%)	Ubicación de la falla
Metal base	897,0 \pm 0,7	957,7 \pm 3,4	12,7 \pm 0,5	---
FSW	912,9 \pm 8,3	1013,6 \pm 8,3	12,7 \pm 0,9	Metal base

Aunque las investigaciones preliminares indican que la soldadura mediante el proceso de fricción batido es, potencialmente, una eficaz técnica de soldadura para la unión de las aleaciones de titanio, evidentemente se necesita más investigación para comprender la evolución microestructural de aleaciones de titanio mediante este proceso. Dos cuestiones fundamentales deben ser investigadas específicamente, en primer lugar, el control de la

temperatura del proceso y sistemas de enfriamiento necesarios para soldar aleaciones de titanio, en segundo lugar, seleccionar los materiales adecuados para herramientas, las cuales deben soportar altas temperaturas (1000 °C), así como un buen diseño de la geometría de la herramienta. [6]

1.6.3 Acero

Si bien la mayoría de los esfuerzos del proceso de fricción batido hasta la fecha se han centrado en las aleaciones de aluminio, existe un considerable interés para ser aplicado en los aceros. Se espera que el reducido calor generado durante la soldadura por fricción batido produzca menos cambios metalúrgicos en la ZAT, para minimizar la distorsión y reducir las tensiones residuales en los aceros, que es extremadamente importante en la soldadura de los componentes de sección gruesa, como en la construcción naval y las industrias de fabricación pesada. Además, los problemas con el agrietamiento por hidrógeno en aceros se eliminarían debido a la naturaleza del proceso (soldadura en estado sólido). [6]

Algunos estudios de soldadura mediante el proceso de fricción batido se llevaron a cabo en aceros de bajo carbono, acero aleado con 12% de cromo, AISI 1010, acero austenítico inoxidable 304L y 316L, acero superaustenítico AI 6XN, HSLA65 (ASTM A945), DH-36, y C-Mn. El espesor de las planchas y los parámetros del proceso de soldadura y materiales para herramientas para el proceso se resumen en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Parámetros y materiales de herramientas para la soldadura por fricción batido en aceros. [6]

Material a soldar	Espesor (mm)	Frecuencia rotacional (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Material de la herramienta
Acero aleado 12% cromo	12	---	240	---
Acero bajo carbono	12, 15	---	102	---
AISI 1010	6,4	450 - 650	25 - 102	Acero aleado base Mo y W
304L	3,2; 6,4	300, 500	102	Acero aleado base W
304	6	550	78	Acero recubierto PCB
304L, 316L	5, 10	300 - 700	150, 180	---
AI 6XN	6,4; 12,7	---	102	Acero aleado base W

Material a soldar	Espesor (mm)	Frecuencia rotacional (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Material de la herramienta
HSLA - 65	6,4; 12,7	400 - 450	99 - 120	Acero base W
DH - 36	6,4	---	102 - 457	Acero aleado base W
C - Mn	6,4	---	---	Acero recubierto PBCN

Estos estudios revelaron las siguientes observaciones. En primer lugar, el uso de argón como gas de protección, permite proteger tanto a la herramienta y al cordón de soldadura de la oxidación durante el proceso de fricción batido en los aceros. Además, no se informó en ningún estudio sobre el efecto del gas protector en la calidad de las juntas de acero procesadas mediante fricción batido. [6]

En segundo lugar, se informó que la temperatura del hombro de la herramienta fue superior a los 1000 °C. Además, se afirma que la mayoría de planchas de acero de espesor de 3,2 mm – 6,4 mm pueden ser soldadas con éxito en una sola pasada de soldadura, la unión de planchas de acero 304L mayores a un espesor de 6,4 mm pueden realizarse generalmente con dos pasadas de soldadura, por ambos lados, porque el rango de influencia de la herramienta es relativamente menor en aceros que en aleaciones de aluminio. [6].

En tercer lugar, el precalentamiento de la herramienta y planchas de acero a 300 °C facilitó la unión de las planchas de acero HSLA-65 de espesor 6,4 mm en una sola pasada. [6]

En cuarto lugar, se observa la ZATM en las aleaciones de aluminio soldadas mediante fricción batido, pero esta zona no es evidente en los aceros durante el ciclo térmico generado por el proceso de fricción batido. Sin embargo, se identificó la existencia de la ZATM en los aceros 304 y 316L, además, se reportó la evidencia de recristalización parcial en esta zona. [6]

En quinto lugar, la evolución microestructural de los aceros durante el proceso de fricción batido es más complicada que en el caso de las aleaciones de aluminio debido a la presencia de la recristalización, así como el crecimiento del grano a alta temperatura (1000 °C o superior). [6]

Estos cambios están influenciados significativamente por la composición química de la aleación. Para los aceros inoxidables austeníticos, se informó que la estructura del grano equiaxial desarrollada dentro de la zona del núcleo central guarda relación con respecto al

del metal base. Sin embargo, para el acero dulce, acero con 12% de cromo, y el acero HSLA-65, dependiendo de la temperatura y la composición de la aleación, se observan diferentes microestructuras en los cordones de soldaduras realizadas mediante el proceso de fricción batido. [6]

En sexto lugar, los ensayos de tracción mostraron que los valores de esfuerzo a la fluencia y de resistencia a la tracción son generalmente más altos que el metal base, así mismo, la rotura se produjo en el material base lejos de la junta o la ZAT, mientras que la ductilidad es comparable a la del metal base, ver tabla 1.4. La dureza de la unión soldada es superior a la del metal base, lo cual es coherente con el valor de la resistencia a la tracción. [6]

Tabla 1.4 Resumen de las propiedades de tracción mediante la soldadura por fricción batido en diferentes aceros. [6]

Material a soldar	Condición	Esfuerzo último a la tracción (MPa)	Esfuerzo a la fluencia (MPa)	Elongación (%)
Acero aleado 12%cromo	Metal base	---	---	---
	FSW	539 - 541	---	---
Acero bajo carbono	Metal base	---	---	---
	FSW	453 - 457	---	---
AISI 1010	Metal base	463	310	33,9
	FSW	476	331	22
304L	Metal base	483	172	---
	FSW	621	340	---
HSLA — 65	Metal base	537	448	20
	FSW (12,7 mm)	569	493	30
	FSW (6,4 mm)	569	483	18,5
DH — 36	Metal base	579	428	---
	FSW	624	566	---
C — Mn	Metal base	248	204	9,5
	FSW	179	151	2,6

Las primeras investigaciones sobre la viabilidad del proceso han demostrado una perspectiva prometedora para la aplicación del proceso de fricción batido para la unión de los distintos tipos de aceros. Además, los esfuerzos continuos para optimizar los parámetros de soldadura y la evolución microestructural durante el proceso de fricción batido,

dependerán de la selección del material de la herramienta que realizará el proceso de soldadura por fricción batido.

1.7 Geometría de juntas de soldadura por fricción batido

Las geometrías de juntas generalmente usadas para la soldadura por fricción batido son: junta a tope y junta traslapada. Una simple junta a tope se muestra en la figura 1.18 (a), dos planchas del mismo espesor se colocan en una placa de respaldo y son sujetadas con firmeza para evitar que éstas puedan separarse durante la inmersión de la herramienta en las planchas y durante la realización del cordón de soldadura. Una variación de la junta a tope se puede apreciar en la figura 1.18 (b), en donde se utilizan planchas de diferentes espesores.

Por otra parte, para lograr una junta traslapada la herramienta rotatoria atraviesa verticalmente la plancha superior y se introduce en la plancha inferior, posteriormente recorre a lo largo de la dirección deseada para unir las dos planchas, ver figura 1.18 (c). Una variación de esta geometría se puede apreciar en la figura 1.18 (d), en donde cuatro planchas son soldadas a la vez.

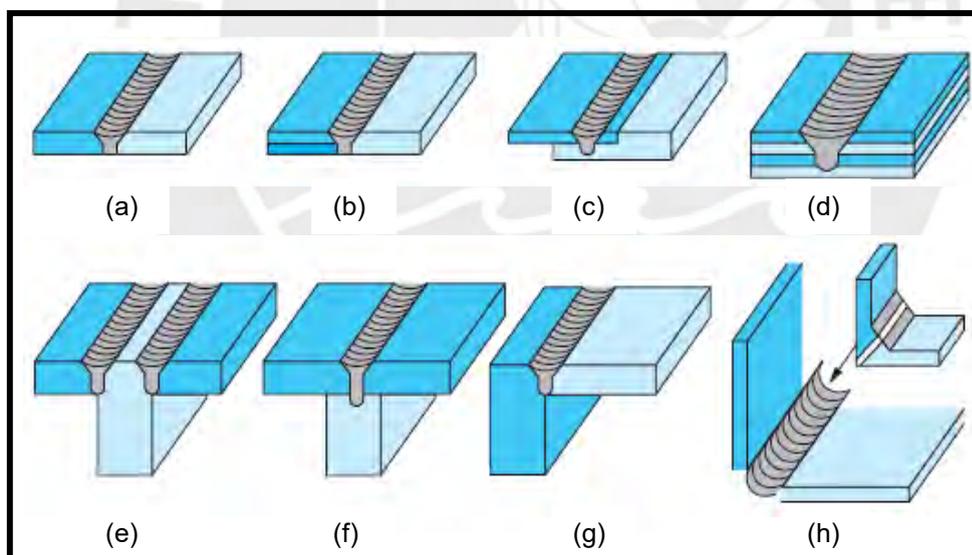


Figura 1.18 Geometría de juntas de soldadura por fricción batido. [3]

Muchas otras geometrías pueden ser producidas por la combinación de la junta a tope y traslapada, ver figura 1.18 (e) y (f), así como la junta en "L", ver figura 1.18 (g), finalmente, otros tipos de diseños de juntas pueden realizarse como la de ángulo, ver figura 1.18 (h). Es importante señalar que no se requiere preparación especial para la soldadura mediante el proceso de fricción batido de juntas de tope y traslapada.

1.8 Ventajas y restricciones

La soldadura mediante el proceso de fricción batido es considerada como el acontecimiento más importante en unión de metales de la última dos décadas y es considerado como una tecnología ecológica, debido a su eficiencia energética y al nulo deterioro del medio ambiente, en comparación con los métodos convencionales de soldadura. La soldadura por fricción batido consume mucho menos energía y no utiliza gas como cubierta protectora durante el proceso. La soldadura no implica ninguna utilización de metal de aporte y por lo tanto cualquier aleación de aluminio puede unirse sin preocuparse por la compatibilidad de la composición, lo cual es un problema en la soldadura por fusión. Además, no se necesita soldadores calificados para la realización del proceso. [6]

Las ventajas del proceso se pueden resumir de la manera siguiente:

- **Beneficios metalúrgicos**

Proceso realizado en fase sólida.

Baja deformación del material base.

No hay pérdidas de elementos de aleación.

Excelentes propiedades metalúrgicas en la junta, ausencia de grietas en los cordones de soldadura.

- **Beneficios medioambientales**

No necesita gas de protección.

No requiere limpieza superficial.

Elimina desechos, como la escoria.

Elimina el uso de disolventes, requeridos para desengrasar.

No utiliza material de aporte.

- **Beneficios Energéticos**

Puede soldar planchas de aluminio y de cobre de hasta 50 mm de espesor en una sola pasada.

Utiliza solamente el 2.5% de la energía necesitada para soldar mediante láser.

Las restricciones fundamentales que se aprecian son las siguientes:

Reducida versatilidad propia de un proceso automático.

Necesidad de firme sujeción de las piezas.

Aplicación limitada a piezas planas.

Agujero residual al final de la soldadura en el lugar de extracción de la herramienta. [6]

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se detalla, el procedimiento experimental realizado para soldar mediante el proceso de fricción batido, la selección de la máquina que realiza el proceso, así como el sistema de sujeción de las planchas para ser soldadas. Se menciona el criterio para seleccionar el material de la herramienta, definir su geometría, el tratamiento térmico utilizado para obtener una herramienta resistente al desgaste. Se describe la selección de los parámetros de proceso de soldadura por fricción batido, además, se describe las etapas del proceso de soldadura para obtener uniones soldadas.

Finalmente, se realiza la caracterización mecánica de las uniones soldadas, utilizando los ensayos mecánicos siguientes: ensayo tracción, ensayo de doblado y ensayo de dureza Vickers, los valores obtenidos permitirán comprobar este proceso de soldadura con respecto a los procesos de soldadura tradicionales.

2.1 Características nominales del material base - aluminio

El material seleccionado para poder realizar la soldadura mediante el proceso de fricción batido fue plancha de aluminio AA1100-H18 (plancha de aluminio de alta resistencia a la corrosión, alta maleabilidad, endurecida por deformación) de 3 mm de espesor.

Las tablas 2.1, 2.2 muestran la composición química y las propiedades mecánicas nominales del aluminio AA1100-H18 respectivamente.

Tabla 2.1 Composición química nominal del aluminio AA1100-H18 % peso. [30]

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Zn
99,00%	1,00 (Si+Fe)%		0,05 - 0,20%	0,05%	0,10%

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas nominales del aluminio AA1100-H18. [30]

Resistencia a la tracción		Dureza Vickers (HV)
Esfuerzo a la tracción (MPa)	Elongación (%)	
165	15	44

2.2 Equipo y materiales de soldadura

2.2.1 Selección de la máquina herramienta

La selección de la máquina se realizó en base a los trabajos realizados por investigadores en el campo de la soldadura por fricción batido en aleaciones de aluminio, tales como:

Sathari et al [40] seleccionaron una máquina fresadora de control numérico computarizado para realizar las uniones soldadas de planchas de aluminio AA1100, de las siguientes dimensiones 80 mm x 35 mm x 6 mm, además, utilizaron una frecuencia rotacional de 1400 rpm hasta 1800 rpm.

Rajamanickam et al. [10] realizaron ensayos en una máquina fresadora de control numérico computarizado, con planchas de aleación de aluminio AA2014, de las siguientes dimensiones: 127 mm x 60 mm x 5,4 mm, la frecuencia rotacional utilizada para este estudio fue de 600 rpm hasta 1200 rpm y velocidad de avance de 8 mm/min hasta 20 mm/min, ver tabla 2.3.

Vural et al [35] utilizaron una máquina similar para soldar planchas de aleaciones de aluminio AA2024-0 y AA5754-H22 de 3 mm a 6 mm de espesor, la tabla 2.3 muestra las especificaciones de las máquinas utilizadas.

Tabla 2.3 Especificación técnica de las máquinas fresadoras utilizadas por Sathari, Rajamanickam y Vural para la soldadura por fricción batido. [40, 20, 35]

Descripción	Sathari	Rajamanickam	Vural
Marca	Haas	Hartfort	Dahlih
Modelo	VF-6	HV-35	MCV 1020 BA
Potencia eléctrica	11,2 kW	7,4 kW	7,5 kW
Desplazamiento eje "X"	1626 mm	510 mm	1020 mm
Desplazamiento eje "Y"	813 mm	400 mm	550 mm
Desplazamiento eje "Z"	762 mm	400 mm	560 mm
Frecuencia rotacional	7500 rpm	60 - 1200 rpm	2000 - 3000 rpm
Velocidad de avance	15,2 m/min	8 - 20 m/min	5 - 25 m/min
Material soldado	Aluminio aleación 1100	Aluminio aleación 2014	Aluminio aleación 2024-0 y 5754-H22
Espesor de plancha	6 mm	5,4 mm	3 - 6 mm

De acuerdo a la información señalada anteriormente, se seleccionó la máquina fresadora de control numérico computarizado del Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica, por tener características técnicas similares, en la tabla 2.4 se muestra la especificación técnica del equipo seleccionado.

La máquina a utilizar posee características técnicas similares para realizar la soldadura por fricción batido en las planchas de aluminio AA1100-H18 de 3 mm de espesor, ver figura 2.1.

Tabla 2.4 Especificación técnica de la máquina fresadora del Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica. [21]

Marca	Mazak
Modelo	VTC-16B
Potencia eléctrica	11,2 kW
Desplazamiento eje "X"	1117 mm
Desplazamiento eje "Y"	406 mm
Desplazamiento eje "Z"	508 mm
Frecuencia rotacional	0 - 7000 rpm
Velocidad de avance	0 - 16 m/min



Figura 2.1 Fresadora de Control Numérico Computarizado del Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica.

2.2.2 Sistema de sujeción

El sistema de sujeción debe garantizar que las piezas de trabajo a soldar queden sujetas de forma segura a una placa soporte, de esta manera se evita que las piezas se muevan y las caras de las juntas contiguas se separen durante la realización de la soldadura por fricción batido. Además, la placa soporte protege la mesa de la máquina herramienta ante cualquier daño que la herramienta de fricción batido pueda ocasionar durante la realización del proceso. Por tanto, una de las primeras condiciones para realizar la soldadura mediante el proceso de fricción batido, fue mantener firmemente sujetas las planchas de aluminio AA1100-H18 a la mesa del centro de mecanizado de la fresadora, por tanto, nuestro sistema de sujeción utilizado constó de las partes siguientes: placa soporte y bridas de sujeción, ver figura 2.2.

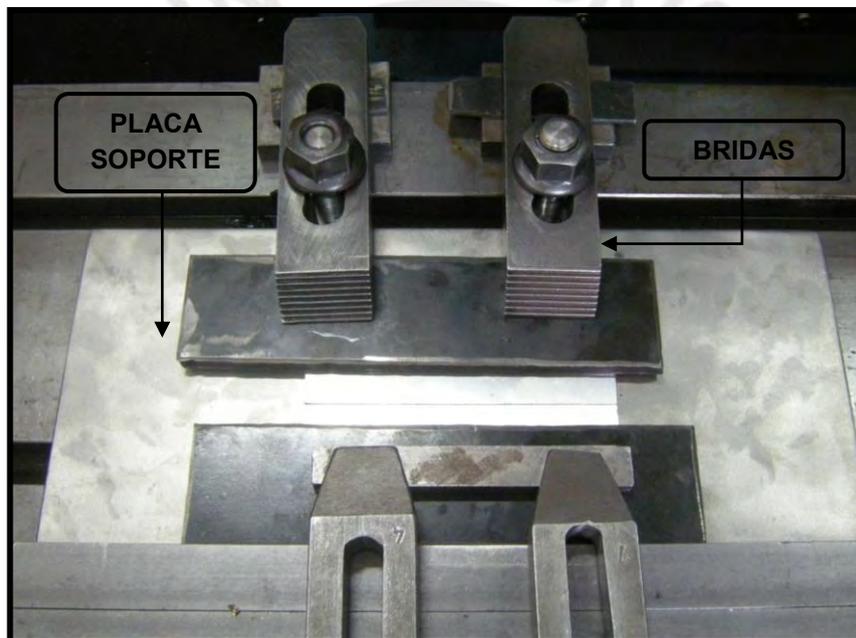


Figura 2.2 Sistema de sujeción de las planchas de aluminio.

Según el capítulo anterior, la utilización de una herramienta rotativa convencional requiere de una placa soporte para la realización del proceso. En consecuencia, el material de la placa soporte fue el acero comercial CHRONIT T1 500 (DIN 1.8721), plancha de acero resistente al desgaste, abrasión e impactos, de medidas 300 x 300 x 6,35 mm, ver tabla 2.5 y 2.6.

Tabla 2.5 Composición química del CHRONIT T1 500 - % peso. [36]

C	Mn	P	B	S	Ni	Cr	Mo
≤ 0,28	≤ 1,5	≤ 0,025	≤ 0,005	≤ 0,01	≤ 0,60	≤ 2,00	≤ 0,30

Tabla 2.6 Propiedades mecánicas del CHRONIT T1 500. [37]

Dureza HB	Resistencia tracción (MPa)	Resistencia fluencia (MPa)	Elongación en 2"
450 - 530	1650	1300	8%

2.2.3 Determinación de la herramienta

a) Geometría de la herramienta

La geometría de la herramienta es un factor muy importante durante la soldadura por fricción batido, como se mencionó anteriormente, la fricción que se produce entre la herramienta y las planchas generan el calor necesario para plastificar el material y realizar la unión soldada.

La herramienta seleccionada para soldar fue del tipo convencional, la cual es cilíndrica con pin roscado, el diámetro del hombro es de 15 mm, el diámetro del pin es de 5 mm, el pin posee una rosca exterior M5, la longitud del pin es de 2,8 mm un poco menor que el espesor de la plancha de aluminio AA1100-H18 a soldar; el hombro posee ranuras concéntricas en su cara, según Colligan [12] otorga mayor fricción entre las caras de la herramienta y la plancha, esto permite generar mayor calor durante el proceso debido a la fricción generada. Además, posee un chaflán a 45° lo cual permite a la herramienta adaptarse a cualquier tipo de irregularidad en el espesor de la plancha y producir menos rebabas, ver figura 2.3.

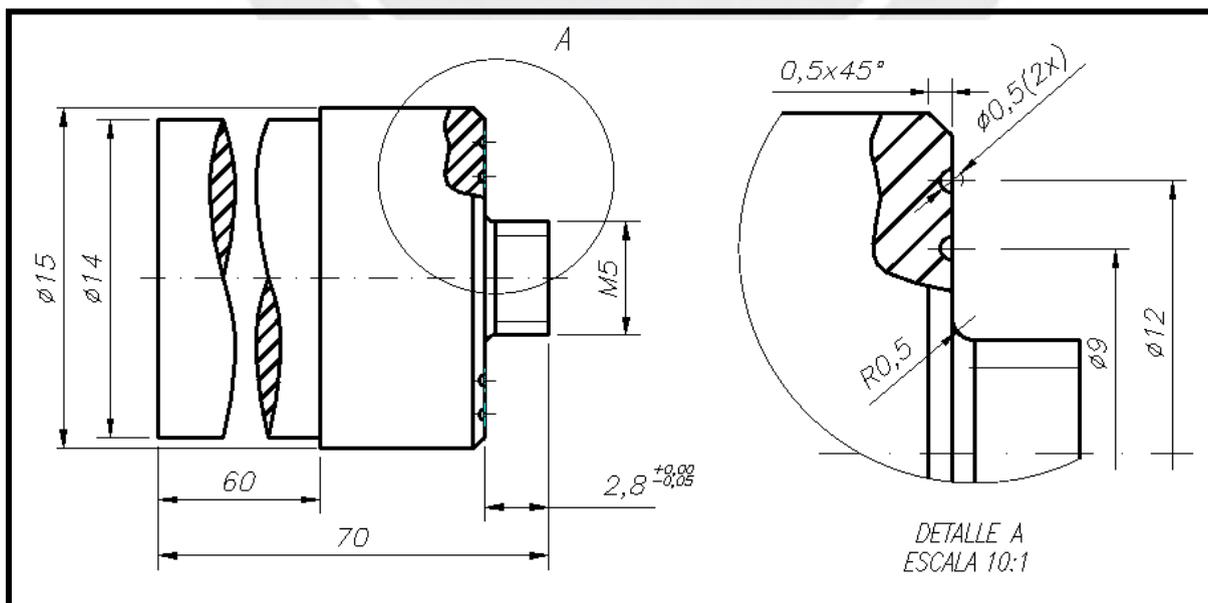


Figura 2.3 Geometría de la herramienta de pin roscado.

b) Selección del material de la herramienta

La selección del material de la herramienta se realizó siguiendo como referencia los estudios siguientes:

Rajamanickam et al. [10] indicaron que el material debe ser un AISI H13 por tener un alto nivel de cromo - molibdeno - carburos de vanadio; esto ofrece una extrema resistencia al desgaste abrasivo, ver tabla 2.7, gracias a estas características pudieron soldar planchas de aluminio AA2014 de 5,4 mm de espesor.

Bastier [5] utilizó el acero AISI D2, el cual es un acero aleado con un alto contenido de carbono, posee una alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la compresión, alta estabilidad en el endurecimiento, buena resistencia al templeado, ver tabla 2.7 [22]. Este acero fue utilizado para soldar planchas de aluminio AA6061 de 6,3 mm de espesor.

Tomando como referencia los estudios anteriores y el manual de aceros especiales BOHLER [23], se seleccionó un acero cuya composición química fuera similar al estudio de Bastier [5], por tanto, se escogió el acero comercial K340 IMPACT EXTRA cuya equivalencia corresponde a la norma DIN 1.2990, ver tabla 2.7, debido a que posee poca variación dimensional después del tratamiento térmico de temple, además posee alta tenacidad con muy buena resistencia a la compresión y alta resistencia al desgaste después del tratamiento térmico de revenido.

Tabla 2.7 Composición química de los materiales utilizados en la fabricación de herramientas para la soldadura por fricción batido. [10,5,23,38]

Composición	AISI H13 (%)	AISI D2 (%)	DIN 1.2990 (%)
Carbono	0,32 - 0,45	1,55	1,10
Manganeso	0,20 - 0,50	0,40	0,40
Silicio	0,80 - 1,20	0,30	0,90
Cromo	4,75 - 5,50	11,80	8,30
Níquel	0,30	--	--
Molibdeno	1,10 - 1,75	0,80	2,10
Vanadio	0,80 - 1,20	0,80	0,50
Cobre	0,25	--	--

c) Tratamiento térmico de la herramienta

La herramienta fue sometido a un tratamiento térmico, para poder obtener la dureza deseada (60 - 55 HRC), en consecuencia, se realizó el siguiente procedimiento:

Temple

Templar un acero significa calentarlo hasta una temperatura adecuada el tiempo suficiente y luego enfriarlo rápidamente para conseguir una estructura martensítica. Dado que la austenita es el constituyente del acero que da origen a la martensita, es necesario calentar el acero hasta formar esta fase. [24]

El calentamiento a la temperatura de temple debe realizarse uniformemente en superficie y en profundidad. Generalmente se introduce la pieza previamente precalentada a un horno que se encuentra a la temperatura de temple. Todo precalentamiento debe hacerse lento y en profundidad, con esto se evita primero, roturas por tensiones al calentar y segundo, oxidación excesiva. El precalentamiento debe hacerse en aceros cuya temperatura de temple se halla por encima de 900 °C, en lo posible en etapas. Se calcula un tiempo de 10 min para aceros de alta aleación, por cada 10 mm de espesor. [25]

Tomando como referencia lo anterior la herramienta fue precalentada en el horno de calcinación CARBOLITE 1100 del Laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica, ver figura 2.4, a una temperatura de 500 °C, durante un periodo de 20 minutos.

Además, siguiendo las recomendaciones del manual de aceros especiales BOHLER [23], el cual nos indica que la temperatura de temple debe estar entre 1020 °C - 1080 °C, se seleccionó 1050 °C como temperatura de temple; el tiempo de permanencia dentro del horno fue de 45 minutos. En general el tiempo de permanencia oscila entre treinta minutos y una hora por pulgada de espesor. [26]

Con frecuencia durante el calentamiento de los aceros a alta temperatura se produce descarburación, esto modifica la composición de la capa periférica de las barras por la acción de las atmósferas de los hornos, que algunas veces llegan a ocasionar graves entorpecimientos en los procesos de fabricación. Debido a la acción del oxígeno del aire o de gases oxidantes se produce en los aceros la oxidación del hierro de las capas superficiales con formación de cascarilla (óxido de hierro), que envuelve todo el material y se presenta en gran cantidad; y se separa con relativa facilidad.



Figura 2.4 Horno de Calcinación CARBOLITE 1100.

Un método muy empleado para evitarlo es hacer el tratamiento dentro de cajas bien cerradas, dentro de las cuales se coloca el material cubierto con trozos de carbón vegetal, grafito mineral o de viruta de fundición. De esta forma se evita la descarburación superficial y se obtiene en general buenos resultados [26]. Para evitar este problema durante el tratamiento, la herramienta fue introducida en un medio recubierto de grafito mineral.

Según el manual de aceros especiales BOHLER [23], el medio de enfriamiento de este acero puede ser al aire libre, aceite o agua, debido a la presencia de elementos aleantes presentes en la herramienta (lo cual hace más templeable este acero con respecto a los aceros al carbono), el medio de enfriamiento seleccionado fue al aire libre, de esta manera se espera conseguir 100% de martensita [24]. La dureza alcanzada después de realizar el temple fue de 59 HRC.

Un acero templado (100% martensita) no tiene ninguna aplicación práctica, pues es tan frágil que no soportaría golpes o cargas de impacto y es tan inestable que puede provocar fácilmente cambios físicos o dimensionales que afecten las características tecnológicas del componente fabricado con él. [24]

Revenido

El tratamiento de revenido consiste en calentar un acero a una temperatura entre 100 °C y 650 °C (<723 °C) a fin de alcanzar las propiedades mecánicas óptimas que requiere el acero en función de su aplicación en servicio. El revenido transforma la martensita obtenida durante el temple en microestructuras más estables, constituidas principalmente por ferrita y carburos con morfologías que van cambiando conforme se

eleva la temperatura de revenido. Conforme la temperatura de revenido se incrementa, la microestructura de forma "acicular" de la martensita va desapareciendo con la temperatura para dejar paso a una estructura constituida por ferrita y carburos globulares cuando el revenido se realiza a una temperatura cercana a los 700 °C. [24]

Cuando se emplea revenidos a temperaturas elevadas (500 °C - 600 °C), se consigue un buen compromiso entre resistencia mecánica y tenacidad (resiliencia); mientras que con revenidos a bajas temperaturas (150 °C - 200 °C), se consiguen durezas elevadas, especialmente apropiadas para resistir al desgaste o para la fabricación de herramientas de corte.

El rendimiento de las herramientas fabricadas con aceros rápidos, de alto contenido en cromo, se suele mejorar dándoles después del temple un doble revenido, con el que se eliminan las tensiones residuales y se evita que las herramientas terminadas queden algo frágiles.

En el primer revenido se verifica la transformación de la martensita tetragonal en martensita revenida, que se manifiesta por un oscurecimiento de la estructura. En este calentamiento, la austenita retenida se transforma de manera distinta que la martensita. En general, en la austenita residual al ser revenida, se produce una precipitación de carburos aleados y entonces disminuye el contenido de aleación de la austenita, recibiendo esta evolución el nombre de "acondicionamiento de la austenita", porque ahora el material está en condiciones más favorables para transformarse.

En nuestro caso, la herramienta fue sometida a dos revenidos para poder garantizar una buena resistencia mecánica y evitar la presencia de austenita residual. Se evitó realizar un tercer revenido como recomienda Apraiz [24] debido a que el material a soldar fue aluminio AA1100-H18, el cual no presenta propiedades mecánicas superiores al material de la herramienta.

Según el manual de aceros especiales BOHLER [23] la temperatura recomendada para el revenido dependerá de la temperatura a la cual se realizó el temple, según la figura 2.5, le corresponde una temperatura de 500 °C aproximadamente.

Se realizó dos revenidos, el primero a 500 °C y durante 80 minutos, el enfriamiento de la herramienta se realizó al aire y la dureza obtenida en este primer revenido fue de 56 HRC; el segundo revenido se realizó a 500 °C durante 60 minutos, la herramienta fue enfriada en aceite, de esta manera la dureza final de la herramienta fue de 55 HRC.

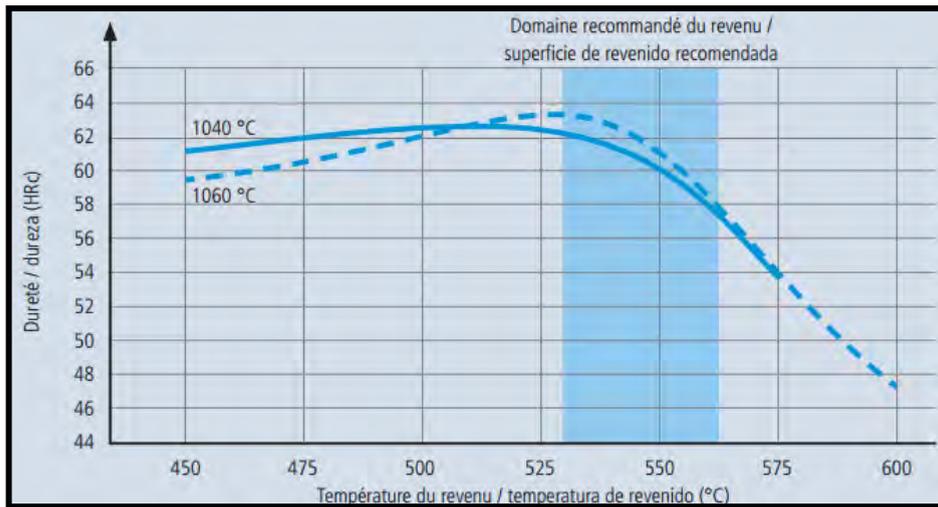


Figura 2.5 Curvas para el tratamiento térmico de revenido para el material K340. [23]

La figura 2.6 muestra el resultado de la selección de la geometría de la herramienta, el material y tratamiento térmico realizado, cabe mencionar que, la figura muestra la herramienta después de realizado la soldadura por fricción batido, por esta razón el pin tiene rastros del material procesado.



Figura 2.6 Herramienta después del revenido.

2.3 Fabricación de uniones soldadas

2.3.1 Elaboración de juntas

Para la realización de los cupones de soldadura se utilizaron planchas de aluminio AA1100-H18 de 130 mm (largo), 65 mm (ancho), 3 mm (espesor), como muestra la figura 2.7.

Se efectuaron nueve cupones de soldadura del tipo de junta a tope.

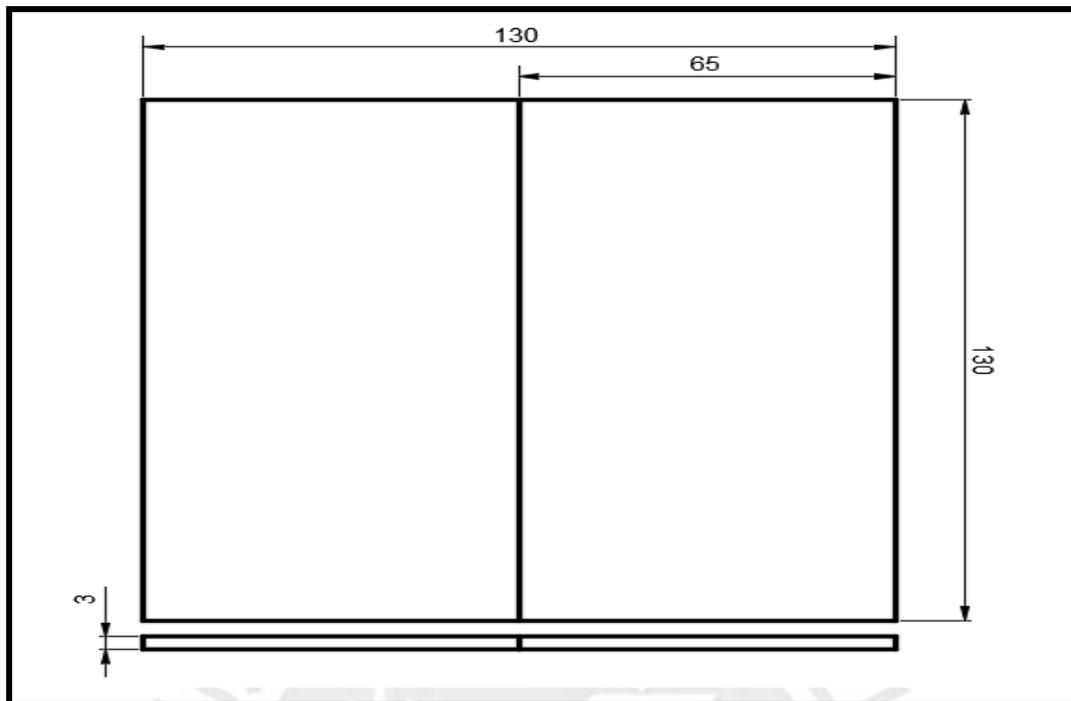


Figura 2.7 Dimensiones de las planchas de aluminio AA1100-H18.

2.3.2 Parámetros de soldadura

Los parámetros más importantes para la realización de la soldadura por fricción batido son:

- Geometría de la herramienta.
- Frecuencia rotacional de la herramienta.
- Velocidad de avance de la herramienta.
- Tiempo de precalentamiento.
- Fuerza de inmersión.
- Ángulo de inclinación de la herramienta.

El primer parámetro a definir fue la geometría de la herramienta, ya que dependerá de ésta la generación de calor entre las planchas y la cantidad de material impulsado. Para soldar por fricción batido las planchas de aluminio AA1100-H18, se utilizó una herramienta fabricada en acero comercial K340 Impact Extra marca Böhler, la cual tiene un pin roscado y la cara inferior tiene ranuras concéntricas alrededor del pin, las medidas de la herramienta se detallan en la tabla 2.8.

Para la selección de la frecuencia rotacional y velocidad de avance, se consideraron las condiciones que permitan alcanzar los mayores valores de

resistencia a la tracción en muestras de aleaciones de aluminio soldadas por fricción batido. Por tanto, las velocidades seleccionadas para las pruebas se basaron en los resultados alcanzados por Liu et al. [17, 18] y Rajamanickam et al. [10], en los cuales obtuvieron una resistencia a la tracción entre 80 - 85% con respecto al material base.

Tabla 2.8 *Parámetros de soldadura por fricción batido para el aluminio AA1100-H18.*

Parámetro	Valor	Unidad
Herramienta	Diámetro pin	5,0
	Longitud pin	2,8
	Diámetro hombro	15,0
Frecuencia rotacional	800	rpm
	1000	rpm
	1250	rpm
Velocidad de avance	60	mm/min
	140	mm/min
	200	mm/min
Profundidad de inmersión	2,9	mm
Ángulo de inclinación	0	°
Tiempo de permanencia	10	s

Liu et al. [17] estudiaron las propiedades mecánicas de las juntas realizadas por soldadura de fricción batido en la aleación de aluminio AA1050-H24, empleando velocidades de avance desde 100 mm/min hasta 800 mm/min y de frecuencia rotacional desde 500 rpm hasta 1900 rpm. Rajamanickam et al. [10] estudiaron el efecto de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas de soldaduras por fricción, utilizaron los siguientes valores de frecuencia rotacional: 600 rpm, 900 rpm, 1200 rpm, y como velocidad de avance: 8 mm/min, 12 mm/min, 20 mm/min. Por tanto, para la realización de la soldadura por fricción batido se seleccionó como valores de frecuencia rotacional: 800 rpm, 1000 rpm, y 1250 rpm; y como valores de velocidad de avance: 60 mm/min, 140 mm/min y 200 mm/min, ver tabla 2.8.

El tiempo de precalentamiento es otro aspecto importante a tener en cuenta, dado que la herramienta durante la fase de inmersión dentro del material debe permanecer en su interior un tiempo prudente, esto permitirá que el material alcance una temperatura adecuada, en consecuencia, permitirá que el material fluya plásticamente, de esta manera se realizará la soldadura por fricción batido sin ningún problema. No se obtuvo información sobre el tiempo de precalentamiento empleado por los investigadores para soldar mediante fricción batido, debido a esto el tiempo de precalentamiento deberá ser ajustado durante la realización de los ensayos, se iniciará con un tiempo de 10 segundos para las pruebas.

La fuerza de inmersión permite producir la presión necesaria para lograr el confinamiento de la materia dentro del cordón de soldadura, además, permite la generación de calor en el material a soldar producida por la fricción del hombro de la herramienta y las planchas. Sin embargo, debido a no contar con un instrumento para medir la fuerza de inmersión generada durante la soldadura, la herramienta será introducida una distancia de 2,9 mm en las planchas (profundidad de inmersión), permitiendo de este modo que el hombro de la herramienta penetre 0,1 mm en ellas.

El ángulo de inclinación de la herramienta es otro aspecto importante, asegura un buen acabado superficial en el cordón de soldadura y contribuye a obtener buenas propiedades mecánicas, Liu et al [17], utilizaron una inclinación de 3°, con lo cual aseguraron un adecuado confinamiento de la materia y obtuvo un 80% del esfuerzo de tracción del material base del aluminio AA1050-H24. Para la realización de los cordones, el ángulo de inclinación fue fijado en 0°, debido que el husillo vertical de la fresadora de control numérico computarizado no permite girar.

2.3.3 Procedimiento de soldadura

Para realizar la soldadura por fricción batido en las planchas de aluminio AA1100-H18 se siguió los siguientes pasos:

a) Sujeción de las planchas de aluminio

Se colocó la placa soporte en las guías de la máquina fresadora de control numérico computarizado, a continuación, se colocó las planchas de aluminio AA1100-H18 que fueron firmemente sujetadas mediante las bridas de sujeción, ver figura 2.2

b) Preparación de la máquina fresadora

Los valores de frecuencia rotacional y de velocidad de avance fueron introducidos en la máquina fresadora; así mismo, se introdujo el valor de la inmersión de la herramienta. Se colocó la herramienta rotativa en la torreta de la máquina fresadora, a continuación, se posicionó sobre las planchas de aluminio para realizar tangencia y marcar el punto cero máquina, ver figura 2.8.

c) Primera fase del proceso de soldadura

Con la máquina preparada se inició la primera fase de la soldadura, la cual empezó con la tangencia y posterior inmersión del pin de la herramienta en las planchas de aluminio AA1100-H18 a la frecuencia rotacional predefinida, ver figura 2.9.

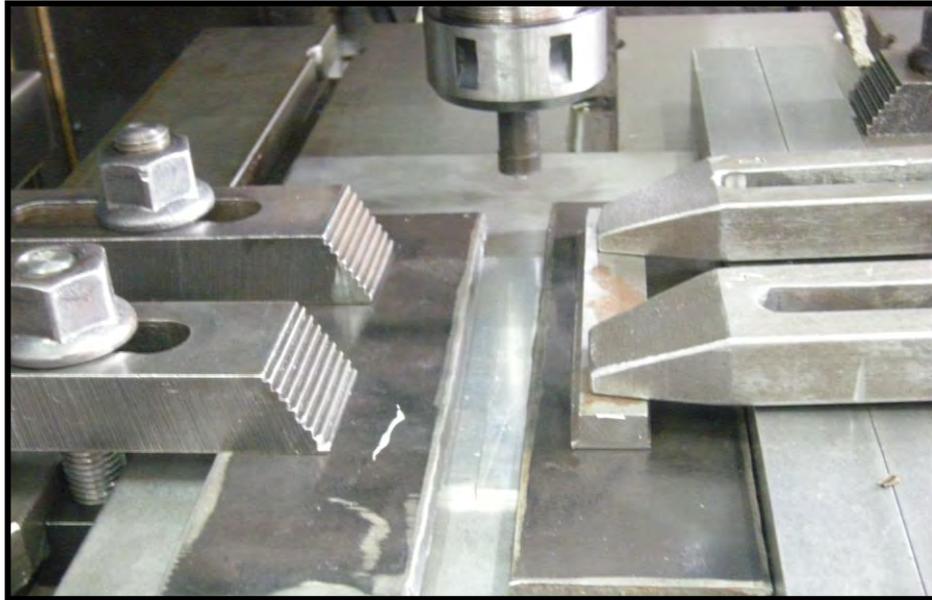


Figura 2.8 Posicionamiento de la herramienta sobre las planchas de aluminio



Figura 2.9 Inmersión de la herramienta dentro de las planchas de aluminio

Una vez introducido el pin de la herramienta en las planchas, este debe permanecer un tiempo determinado antes de iniciar con la velocidad de avance a la herramienta.

d) Segunda fase del proceso de soldadura

Una vez transcurrido el tiempo de permanencia, se inició la segunda fase del proceso, en el cual se procedió a realizar el cordón de soldadura, a una velocidad de avance constante de la herramienta, ver figura 2.10.



Figura 2.10 Avance de la herramienta en las planchas de aluminio

e) Tercera fase del proceso de soldadura

Por último, cuando la herramienta recorrió toda la junta, se detuvo la velocidad de avance y se procedió a retirarla verticalmente de las planchas de aluminio manteniendo la frecuencia rotacional constante, esto permite que no se aglomere material en la herramienta, a su vez, se aprecia el agujero característico del proceso dejado en la plancha soldada, ver figura 2.11.



Figura 2.11. Plancha de aluminio AA1100-H18 soldada por fricción batido.

2.3.4 Diseño experimental

La parte experimental tiene por objetivo producir cordones de soldadura por fricción batido en los laboratorios de la Sección de Ingeniería Mecánica, los cuales posean propiedades mecánicas satisfactorias. Para cumplir con el objetivo, se utilizaron algunos parámetros constantes, como son: la geometría de la herramienta fue cilíndrica roscada, la profundidad de inmersión de la herramienta (se introdujo la herramienta una distancia de 2,9 mm dentro de las planchas de aluminio), el tiempo de permanencia definido fue de 10 segundos y el ángulo de inclinación fue de 0° grados.

Además, los parámetros variables para el proceso de soldadura por fricción batido para las planchas de aluminio AA1100-H18 fueron: tres valores de frecuencia rotacional, tres valores para la velocidad de avance, obteniendo de las combinaciones de estas velocidades 9 muestras para analizar, ver tabla 2.9.

Tabla 2.9 Muestras en función de los parámetros del proceso de soldadura por fricción batido.

Muestra	Frecuencia rotacional (rpm)	Velocidad avance (mm/min)	Herramienta	Ángulo de inclinación	Profundidad de inmersión	Tiempo de permanencia
1	800	60	Cilíndrica roscada	0°	2,9 mm	10 s
2	800	140				
3	800	200				
4	1000	60				
5	1000	140				
6	1000	200				
7	1250	60				
8	1250	140				
9	1250	200				

De cada muestra se obtuvieron 2 probetas para ensayo de tracción (total 18 probetas), 2 probetas para ensayo de doblado (total 18 probetas) y 1 probeta para ensayo de dureza Vickers (total 9 probetas).

2.4 Evaluación de uniones soldadas

Para evaluar las uniones soldadas se utilizaron los ensayos mecánicos siguientes: tracción, doblado y dureza Vickers. En la figura 2.12 se aprecia la distribución de las probetas obtenidas para la realización de los ensayos mecánicos anteriormente señalados.

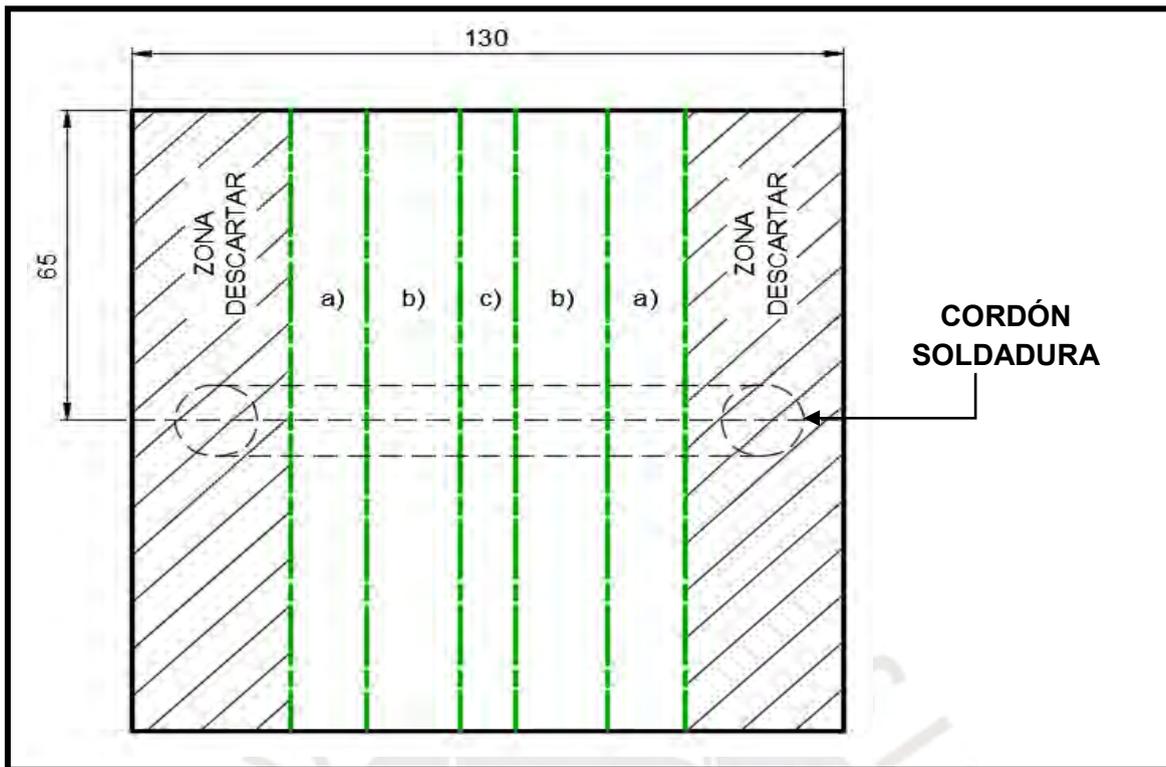


Figura 2.12 Distribución de las probetas en la muestra, a) tracción, b) doblado y c) dureza.

2.4.1 Ensayo de tracción

a) Preparación de la muestra

Las muestras tomadas para el ensayo de tracción son fabricadas según la norma ASTM E 8M-16a [27], que corresponde al método de ensayo de tracción para materiales metálicos, las dimensiones de las muestras se indican en la figura 2.13 para un espesor de 3 mm; además las muestras fueron cortadas en dirección perpendicular al cordón de soldadura.

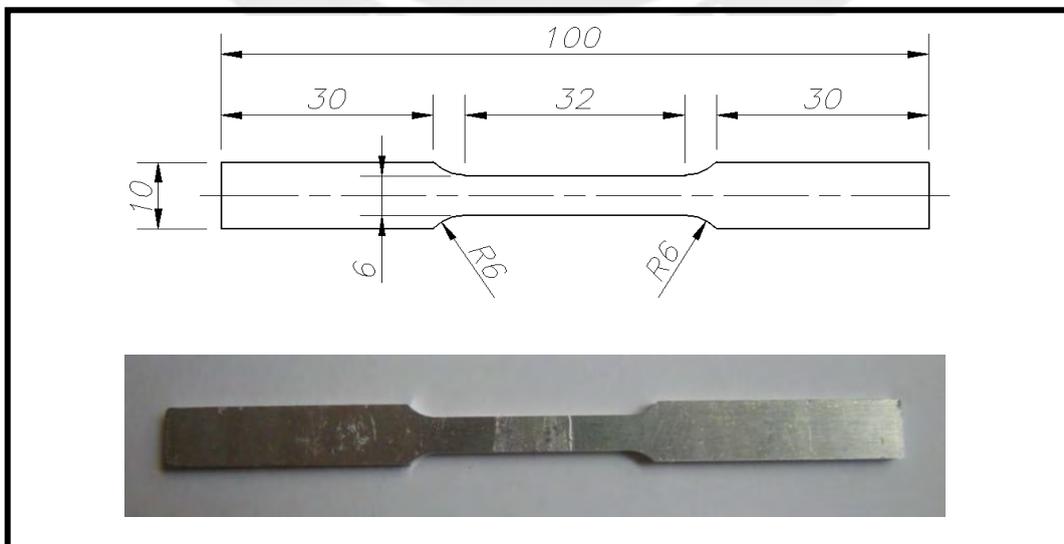


Figura 2.13 Probeta para ensayo de tracción.

b) Máquina de ensayo de tracción

El equipo empleado para la realización de los ensayos de tracción fue la máquina de ensayos marca Zwick / Roell modelo Special Metal Testing Machina SP, con una capacidad de carga máxima a la tracción de 60 kN, el cual lleva un sistema de control y registro informático, ver figura 2.14.



Figura 2.14 Equipo empleado para el ensayo de tracción.

Según como indica la norma se tomaron dos probetas de cada muestra de soldadura, las probetas fueron cortadas del principio y del final de cada muestra. La velocidad de sollicitación aplicada en todos los ensayos de tracción fue de 0,1 mm/s.

2.4.2 Ensayo de dureza Vickers

Estas pruebas se realizaron en la máquina de ensayo de dureza Vickers modelo HTM1130 del Laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica, ver figura 2.15. Las medidas de dureza Vickers fueron tomadas en secciones transversales al cordón de soldadura, con la finalidad de determinar la variación de la dureza en las diferentes zonas de la unión.

Para el desarrollo del ensayo, se tomó como referencia la norma ASTM E92-17 que corresponde al método de ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos. [28]

Las probetas fueron cortadas con disco abrasivo, utilizando refrigerante para evitar el calentamiento de las probetas y de esta manera no afectar su microestructura. Posteriormente las caras de las probetas fueron desbastadas con papel abrasivo a partir del número 100 hasta el 600, para obtener una superficie adecuada para el ensayo. Las huellas fueron realizadas a la mitad de las caras desbastadas de las probetas, la distancia entre marcas fue de 1 mm y la carga aplicada durante el ensayo fue de 5 kgf.



Figura 2.15 Equipo empleado para el ensayo de dureza.

2.4.3 Ensayo de doblado

Se realizó el ensayo de doblado para comprobar la ductilidad de las probetas y la integridad de los cordones realizados mediante la soldadura por fricción batido en las planchas de aluminio AA1100-H18. Las muestras para el ensayo de doblado fueron realizadas según la norma AWS D1.2/D1.2M:2014 [29], el cual corresponde a la norma estructural de soldadura en aluminio, las muestras fueron cortadas transversalmente a las uniones soldadas.

Se fabricaron dos probetas por cada muestra con la finalidad de ser probadas de cara y raíz, además, éstas tuvieron un espesor de 3 mm, ancho de 15 mm y un largo de 130 mm, ver figura 2.16.

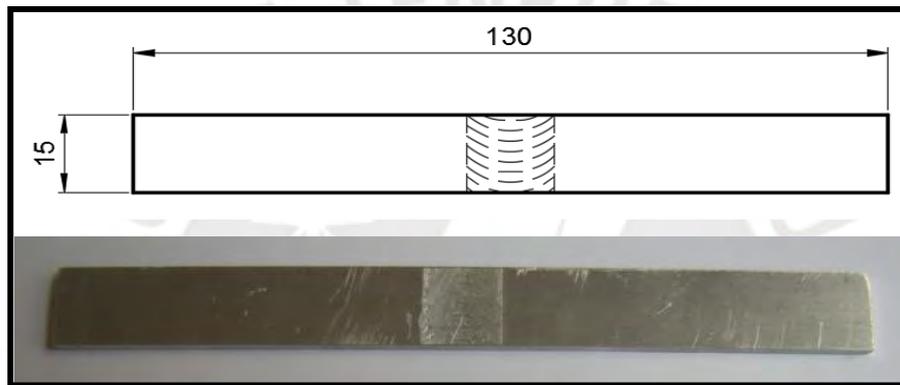
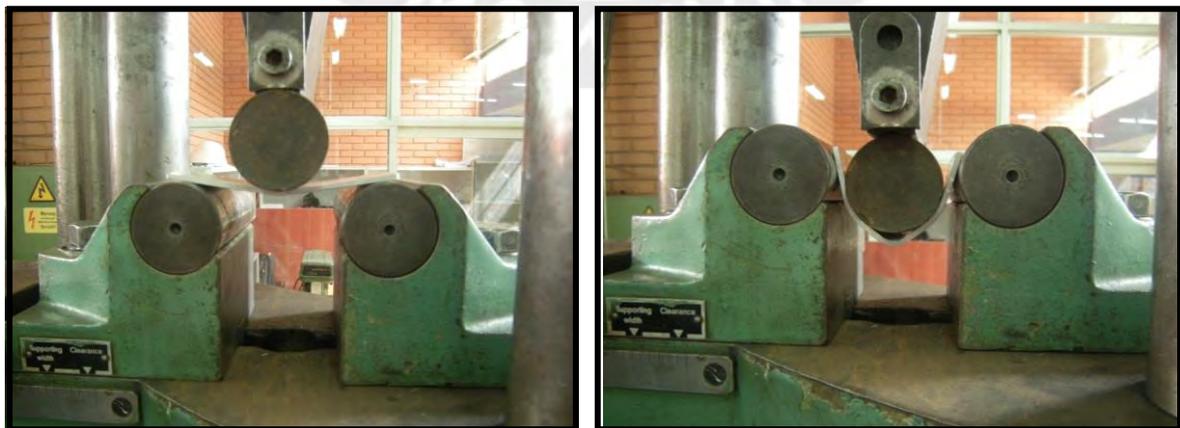


Figura 2.16 Probetas empleadas para el ensayo de doblado.

Se inició el ensayo colocando los dos extremos de la probeta sobre los apoyos, ver figura 2.17 (a), situados a 60 mm según como indica la norma; se aplica en el centro de la probeta una carga (el diámetro del rodillo fue de 52 mm) hasta que se dobló totalmente, ver figura 2.17 (b).



(a)

(b)

Figura 2.17 Etapas del ensayo de doblado (a) y (b).

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se evalúa el comportamiento de la máquina, herramienta rotativa y accesorios utilizados durante la soldadura por fricción batido de aluminio AA1100-H18; a su vez, se evalúa la implementación del proceso de soldadura por fricción batido; para ello se muestra los resultados de la inspección visual realizada en las probetas y los valores obtenidos durante la caracterización de las juntas (ensayos de tracción, doblado y dureza).

3.1 Ensayos mecánicos al material base

Se evaluaron tres probetas del material base mediante el ensayo de tracción para determinar el valor promedio del esfuerzo a la tracción. Además, se evaluaron cinco probetas mediante el ensayo de dureza, los valores fueron tomados a la mitad de las caras de las probetas, la distancia entre marcas fue de 1 mm, en la tabla 3.1 se muestran los valores promedios de dichos resultados.

Tabla 3.1 Propiedades mecánicas del aluminio AA1100-H18.a temperatura ambiente (24 °C) [30].

Resistencia a la tracción		Dureza Vickers (HV)
Esfuerzo a la tracción (MPa)	Elongación (%)	
160	15	52,9

3.2 Máquina – Sistema de sujeción

La máquina fresadora de control numérico computarizado del Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP, permitió realizar la soldadura por fricción batido de las muestras de aluminio AA1100-H18 según lo establecido en el procedimiento. Durante la realización del proceso la máquina registró en su panel de control una potencia eléctrica del 40% de su potencia nominal. Cabe mencionar, que los cordones de soldadura realizados en las muestras 1 y 2 (frecuencia rotacional de 800 rpm y velocidades de avance 60 mm/min, 140 mm/min) no fueron realizados según indica el procedimiento. La variación tuvo lugar en la primera

fase del proceso, en donde la herramienta no ingresa de forma vertical a las planchas, por el contrario, después de realizar la tangencia de la herramienta en las planchas, ésta se retira y desciende 2,9 mm en vacío, para posteriormente ingresar en dirección horizontal, esto permitió el ingreso gradual de la herramienta, desde la tangencia del pin con las planchas hasta el ingreso total, y posterior avance.

El sistema de sujeción formado por la placa soporte y las bridas de sujeción pudieron sujetar firmemente las planchas durante la realización del cordón de soldadura mediante la soldadura por fricción batido.

3.3 Herramienta

La herramienta rotativa del proceso de soldadura por fricción batido permitió soldar todas las muestras, durante las tres fases del proceso de soldadura no presentó problemas para la generación del cordón de soldadura.

De otro lado, la herramienta no sufrió deformación permanente después de realizados los cordones de soldadura, la figura 3.1 muestra la herramienta después de realizado el proceso, lo que demuestra que la selección del material y el tratamiento térmico de la herramienta resultaron ser acertados, dado que no se presentó un desgaste notorio en el pin roscado. A su vez, la figura 3.1 muestra que una capa delgada del material se adhirió al pin y al hombro de la herramienta, esto debido a la elevada temperatura, cercana a los 500 °C y a la extrema presión en la interfase herramienta-material.



Figura 3.1 Herramienta después de realizada la soldadura por fricción batido.

3.4 Evaluación del proceso de soldadura

Con la finalidad de evaluar la implementación del proceso de soldadura por fricción batido, se realizó en primer lugar el ensayo no destructivo de inspección visual a las muestras soldadas con el objetivo de encontrar defectos superficiales, a su vez, se evaluaron los resultados obtenidos del ensayo de tracción de las probetas de aluminio AA1100-H18, éstos fueron confrontados con resultados de ensayos de tracción realizados en muestras soldadas de aleaciones de aluminio mediante procesos convencionales (*Tungsten Inert Gas, Metal Inert Gas*). Además, se evaluaron los resultados del ensayo de doblado con la finalidad de comprobar la integridad de los cordones de soldadura, por último, se evaluaron los perfiles de dureza.

En la tabla 3.2 se muestran resultados de ensayos de tracción realizados en aleaciones de aluminio mediante procesos de soldadura convencional y por fricción batido, encontrando en promedio una pérdida de resistencia a la tracción del 30% y una pérdida de alargamiento en 70% respecto al material base. Los valores entre paréntesis indican el porcentaje con respecto al material base antes de su soldeo.

Tabla 3.2 Resultados de ensayos de tracción realizado en probetas soldadas de aleaciones de aluminio. [31,40, 41, 42]

Material base	Espesor (mm)	Aporte	Proceso	Junta	Esfuerzo tracción (MPa)	Elongación (%)
AA1100 *	6,0	---	FSW	"I"	106	---
AA1100 **	2,0	---	FSW	"I"	52	---
AA1100-H14 ***	2,0	---	FSW	"I"	58,7(60%)	---
AA2017	3,0	ER4043	TIG	"I"	171 (50%)	---
AA7015	6,0	ER5183	TIG	"X"	290 (75%)	---
AA6061	6,0	ER4043	MIG	"V"	227 (69%)	2,3 (15%)
AA7020	5,0	ER4043	MIG	"V"	276 (71%)	1,8 (11%)
AA7020	5,0	ER5356	MIG	"V"	265 (68%)	2,0 (13%)

* [40] Investigation of single-pass/double-pass techniques on friction stir welding of aluminium.

** [41] Influence of Tool Rotation and Welding Speed on The Friction Stir Welding of AA1100 and AA 6061-T6

*** [42] Optimization of Friction Stir Welding Parameters for AA1100-H14 Aluminium Alloys Sheet.

3.4.1 Inspección visual

La manera más sencilla de poder predecir el comportamiento mecánico de las uniones soldadas fue realizando la inspección visual de las muestras. En ellas se aprecian defectos como rebabas y la falta de penetración en los cordones de soldadura, los cuales tienen repercusión en una disminución importante en la resistencia a la tracción.

a) Unión soldada a 800 rpm y 60 mm/min

El proceso permitió la unión de las planchas de aluminio, aunque todavía se debe mejorar la calidad del cordón realizado, la figura 3.2.(a) muestra la vista de cara del cordón de soldadura de la probeta, el proceso se inicia en el lado izquierdo de la probeta, en donde se aprecia que el material del cordón no se mezcló adecuadamente, dejando ver zonas irregulares, esto posiblemente se debe a que el material del cordón no alcanzó una temperatura de trabajo adecuada, evitando que la zona alrededor de la herramienta no alcance un estado plástico inmejorable que contribuya a una adecuada unión entre las planchas de aluminio.

En la figura 3.2 (b) se aprecia la vista de raíz del cordón de soldadura de la probeta, presenta en casi toda su totalidad una falta de penetración.



(a)



(b)

Figura 3.2 Probeta soldada 800 rpm - 60 mm/min. (a) vista de cara, (b) vista de raíz,

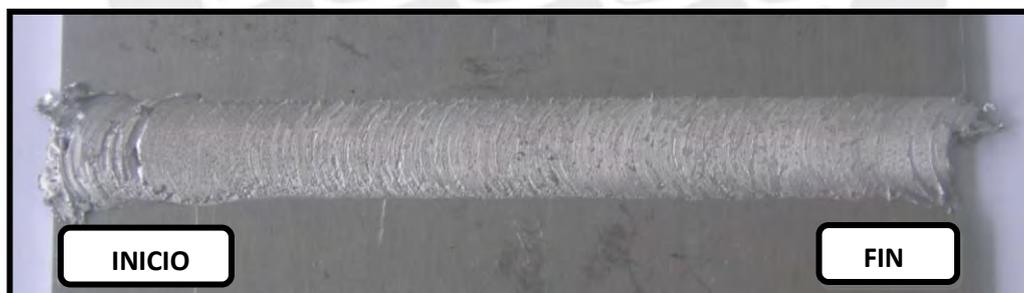
Cabe indicar que la primera y tercera fase del proceso, el cual se refiere al ingreso y retiro de la herramienta, no se realizaron de forma perpendicular a las planchas, sino que una vez realizado la tangencia con las planchas, esta se retira y desciende 2,9 mm en vacío, para posteriormente ingresar y retirarse de manera horizontal de las planchas, este cambio en el proceso no afecta los resultados, debido a que la parte inicial y final del proceso serán retirados como indica la figura 2.12, y las probetas serán tomadas de la zona central de las muestras.

En el cordón de soldadura se aprecia que no existe sobremonta, sin embargo, se aprecia rebabas al inicio del cordón.

b) Unión soldada a 800 rpm y 140 mm/min

La figura 3.3 (a) muestra la vista de cara del cordón de soldadura, donde se aprecia todavía que el cordón de soldadura al inicio del proceso no es uniforme, en la parte central del cordón se aprecia un mejor acabado superficial y no hay presencia de rebabas.

En la figura 3.3 (b) se sigue apreciando falta de penetración en la vista de raíz del cordón de soldadura, el incremento de temperatura no es el adecuado como para generar un buen cordón.



(a)



(b)

Figura 3.3 Probeta soldada 800 rpm - 140 mm/min. (a) vista de cara y (b) vista de raíz.

c) Unión soldada a 800 rpm y 200 mm/min

Después de haber obtenido dos muestras de soldadura por fricción batido sin mayores inconvenientes, se decidió realizar la primera y tercera etapa del proceso de soldadura por fricción batido según indica el procedimiento, en las muestras siguientes se evidencia el agujero que deja la herramienta cuando se retira de las planchas de aluminio.

La figura 3.4. (a) muestra un buen acabado superficial en la cara del cordón de soldadura, superior a las probetas anteriores, no hay presencia de rebabas, también se aprecia el agujero característico al final del cordón de soldadura.

La figura 3.4 (b) muestra falta de penetración en la raíz del cordón de soldadura, sin embargo, existe un mayor porcentaje de penetración que en las muestras anteriores.

Del grupo de muestras soldadas a 800 rpm, esta última muestra posee mejor acabado superficial, se espera conseguir mejores acabados superficiales para frecuencias de rotación superiores a 800 rpm.



(a)



(b)

Figura 3.4 Probeta soldada 800 rpm – 200 mm/min. (a) vista de cara y (b) vista de raíz.

d) Unión soldada a 1000 rpm y 60 mm/min

La figura 3.5 (a) muestra un buen acabado superficial en la cara del cordón de soldadura, también se aprecia el orificio al final del cordón, sin embargo, se observa

rebabas a lo largo del cordón de soldadura. De otro lado, cabe resaltar que la probeta se adhirió a la placa soporte al inicio y final de la muestra, esto posiblemente sucedió por un aumento excesivo de la temperatura en las posiciones mencionadas, para poder retirar la muestra se utilizó un cincel, por tanto, se aprecia la marca dejada en la muestra. Con la finalidad de evitar este incidente se dejará enfriar totalmente la herramienta y la placa soporte.

La figura 3.5 (b) muestra una completa penetración de la herramienta en la raíz del cordón de soldadura, esto se debe a que durante el proceso de soldadura el material alcanzó una temperatura de trabajo adecuada.

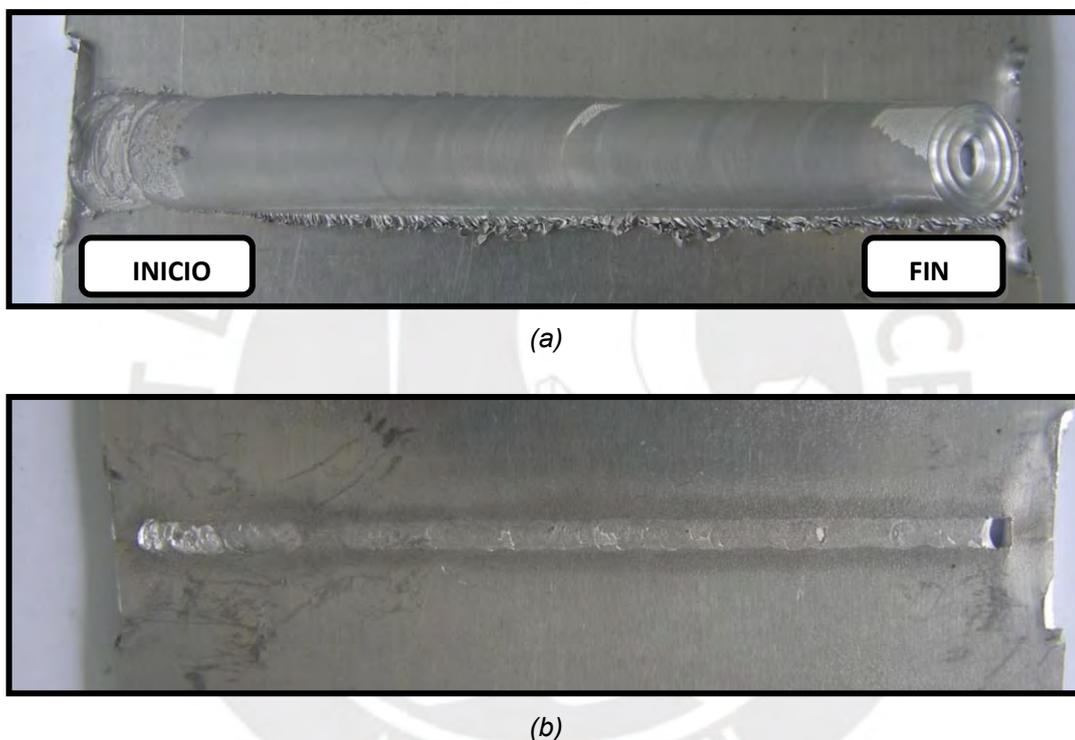


Figura 3.5 Probeta soldada 1000 rpm - 60 mm/min. a) vista de cara y (b) vista de raíz.

e) Unión soldada a 1000 rpm y 140 mm/min

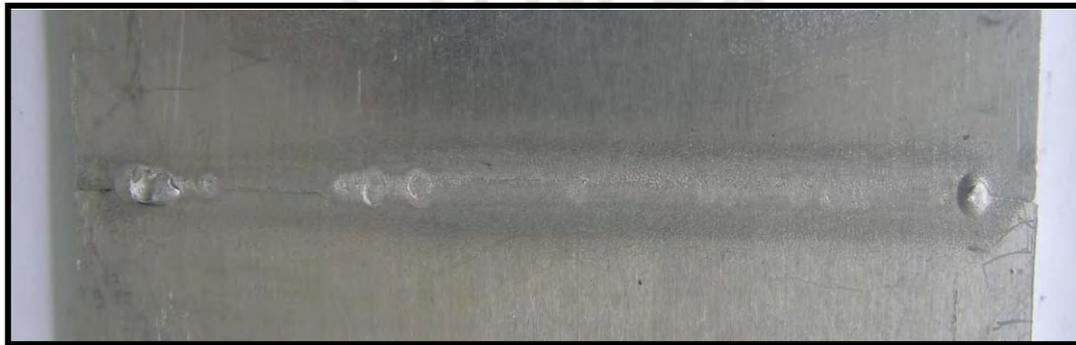
La muestra se volvió adherir a la placa soporte en el inicio y final del proceso de soldadura pero de manera leve, esto se debe al incremento excesivo de la temperatura en estas posiciones, al igual que en la muestra anterior se debió utilizar un cincel para retirar la muestra.

La figura 3.6 (a) muestra un buen acabado superficial de la vista de cara del cordón de soldadura, no hay presencia de rebabas a lo largo del cordón. Al igual que la muestra

anterior se aprecia una buena penetración de la herramienta en el lado de raíz del cordón, ver figura 3.6 (b).



(a)



(b)

Figura 3.6 Probeta soldada 1000 rpm - 140 mm/min. (a) vista de cara y (b) vista de raíz

f) Unión soldada a 1000 rpm y 200 mm/min

La figura 3.7 (a) muestra un buen acabado superficial en la vista de cara del cordón de soldadura. Bastier indica que, durante la segunda fase o etapa del proceso de soldadura, el cual corresponde al avance de la herramienta, la fricción entre la herramienta (el hombro y el pin) y las partes a soldar generan en el material una elevación local de la temperatura, pero no superior a la de fusión, debido esto el material se ablanda y puede fluir alrededor del pin de la herramienta, durante el recorrido de la herramienta a lo largo de la junta a soldar.

El aumento en la velocidad de avance genera una deformación elevada, ocasionando un aumento importante en la generación de calor. Este es el motivo por el cual las planchas se adherieron a la placa soporte como se muestra en la figura 3.7 (b).



(a)



(b)

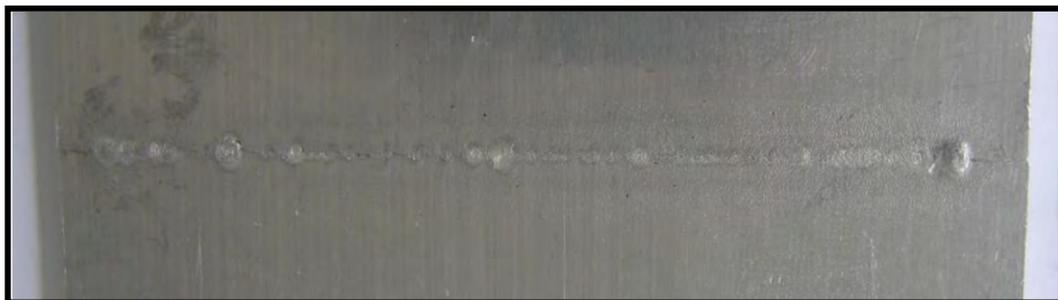
Figura 3.7 Probeta soldada 1000rpm — 200mm/min. (a) vista de cara y (b) vista de raíz

g) Unión soldada a 1250 rpm y 60 mm/min

La figura 3.8 (a) muestra un buen acabado superficial sin la presencia de rebabas en la cara del cordón; en la figura 3.8 (b) muestra una buena penetración de la herramienta en el cordón de soldadura.



(a)



(b)

Figura 3.8. Probeta soldada 1250 rpm - 60 mm/min. (a) vista de cara y (b) vista de raíz

En ciertos tramos del cordón se puede apreciar que la probeta se adhirió levemente a la placa soporte, lo cual se muestra como orificios en la vista de raíz del cordón.

h) Unión soldada a 1250 rpm y 140 mm/min

La figura 3.9 (a) muestra un buen acabado superficial en la vista de cara del cordón de soldadura, similar a las probetas anteriores.

La figura 3.9 (b) muestra presencia de adhesión de la muestra en ciertos tramos del cordón de soldadura con la placa soporte, dejando ver poros en la vista de raíz.

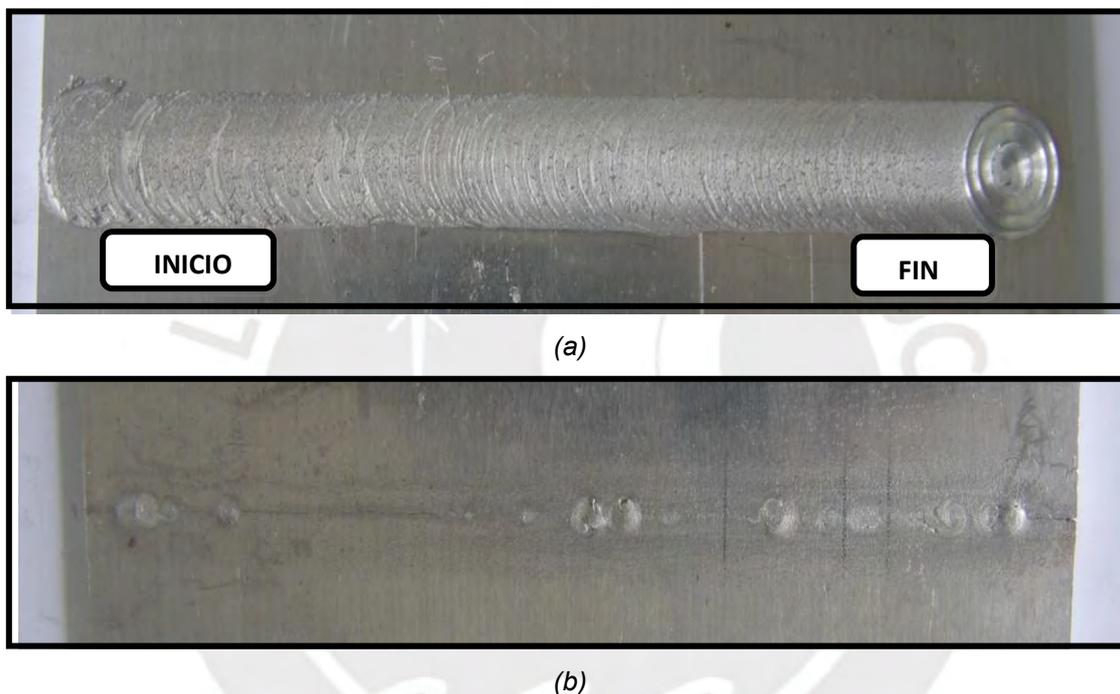
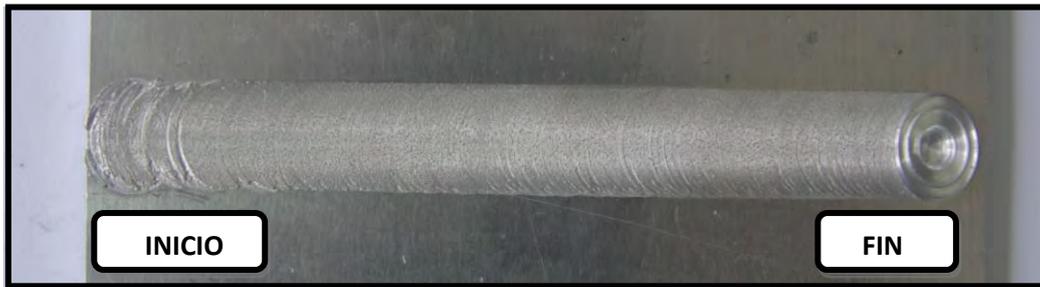


Figura 3.9. Probeta soldada 1250 rpm - 140 mm/min. (a) vista de cara y (b) vista de raíz

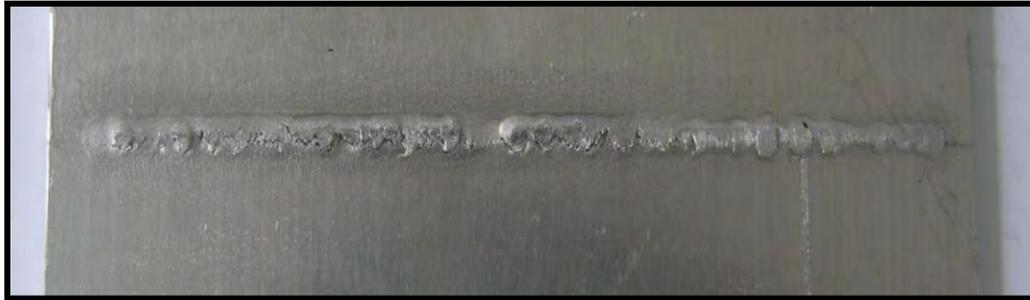
i) Unión soldada a 1250 rpm y 200 mm/min

Al igual que las probetas anteriores, la figura 3.10 (a) muestra un buen acabado superficial en la vista de raíz, por el contrario, en la figura 3.10 (b) se aprecia que la muestra se adhirió en casi todo el cordón de soldadura

Cabe recordar que la generación de calor es un parámetro importante a controlar, por tanto, estudios posteriores deberán hacer énfasis en el efecto de la velocidad de avance y frecuencia rotacional sobre las propiedades mecánicas de los materiales soldados mediante la soldadura por fricción batido.



(a)



(b)

Figura 3.10 Probeta soldada 1250 rpm - 200 mm/min. (a) vista de cara y (b) vista de raíz

3.4.2 Ensayo de tracción

La tabla 3.3 muestra los valores de esfuerzo a la tracción máxima obtenidas de las probetas soldadas mediante la soldadura por fricción batido.

Con la finalidad de conocer la influencia de la velocidad de avance y frecuencia rotacional en las propiedades mecánicas de las juntas, se evaluaron los resultados de esfuerzo máximo a la tracción y alargamiento en función de las velocidades.

Tabla 3.3 Resultados del ensayo de tracción realizadas a las probetas de aleación de aluminio AA1100-H18 a temperatura ambiente (24°C).

Probeta	Frecuencia rotacional (rpm)	Velocidad avance (mm/min)	Esfuerzo tracción (MPa)	Elongación (%)
1	800	60	86,9 (54,3%)*	7,2 (48,0%)*
2	800	60	89,6 (56,0%)*	4,2 (27,7%)*
3	800	140	97,7 (61,0%)*	5,4 (36,0%)*
4	800	140	**	**
5	800	200	102,6 (64,1%)*	7,8 (51,7%)*
6	800	200	114,2 (71,4%)*	6,5 (43,2%)*
7	1000	60	117,1 (73,2%)*	19,4 (129,1%)*
8	1000	60	118,2 (73,9%)*	19,6 (130,9%)*

Probeta	Frecuencia rotacional (rpm)	Velocidad avance (mm/min)	Esfuerzo tracción (MPa)	Elongación (%)
9	1000	140	110,7 (69,2%)*	8,9 (59,5%)*
10	1000	140	120,2 (75,1%)*	17,7 (117,9%)*
11	1000	200	120,1 (75,1%)*	17,6 (117,3%)*
12	1000	200	118,0 (73,7%)*	15,3 (102,1%)*
13	1250	60	87,0 (54,4%)*	6,8 (45,6%)*
14	1250	60	78,6 (49,1%)*	2,8 (18,7%)*
15	1250	140	81,8 (51,1%)*	4,2 (27,7%)*
16	1250	140	97,5 (60,9%)*	6,3 (41,9%)*
17	1250	200	78,2 (48,9%)*	2,1 (13,9%)*
18	1250	200	98,0 (61,2%)*	5,5 (36,5%)*

* Los valores entre paréntesis indican el porcentaje con respecto al material base antes de su soldeo.

** Debido a un problema con la máquina de ensayo de tracción no se pudo tener información de la probeta 4.

Todos los valores de resistencia a la tracción obtenidos del ensayo a la tracción fueron satisfactorios según la norma AWS D1.2/D1.2M:2014, el cual indica que el valor mínimo de resistencia a la tracción es de 75 MPa para el aluminio AA1100-H18 soldado por GTAW y GMAW. Además, los valores de resistencia a la tracción de las probetas soldadas a 1000 rpm presentan una pérdida de resistencia de 30% en promedio respecto al metal base aluminio AA1100-H18, los cuales son similares a valores obtenidos mediante procesos de soldadura convencional, ver tabla 3.2.

a) Uniones soldadas a velocidad de avance constante

Para la realización de estos cordones se utilizó una junta a tope, no hubo ningún tipo de limpieza mecánica, tampoco preparación de los bordes previos antes de realizar el proceso, los cordones fueron soldados a temperatura ambiente (24 °C), en la tabla 3.3 se muestran los valores encontrados para estas uniones.

La figura 3.11 muestra los valores de resistencia máxima a la tracción mediante la soldadura por fricción batido, manteniendo las velocidades de avance constantes. Cuando la velocidad de avance es 140mm/min, se puede apreciar que conforme el valor de frecuencia rotacional va aumentando desde 800 rpm hasta 1000 rpm, la resistencia a la tracción se incrementa hasta alcanzar un valor máximo de 120,2 MPa; para valores de frecuencia rotacional superiores a 1000 rpm los valores de esfuerzo a la tracción disminuyen, alcanzando un mínimo de 81,8 MPa. El mismo

comportamiento se puede observar en las muestras soldadas a velocidades de avance de 60 mm/min y 200 mm/min.

Como se aprecia en la figura 3.11. todos los valores de resistencia a la tracción se encontraron por debajo del valor de resistencia a la tracción del material base 160 MPa, siendo el mayor valor de 120,2 MPa para una velocidad de avance de 140 mm/min y una frecuencia rotacional de 1000 rpm, lo cual representa un 75,1% respecto al material base.

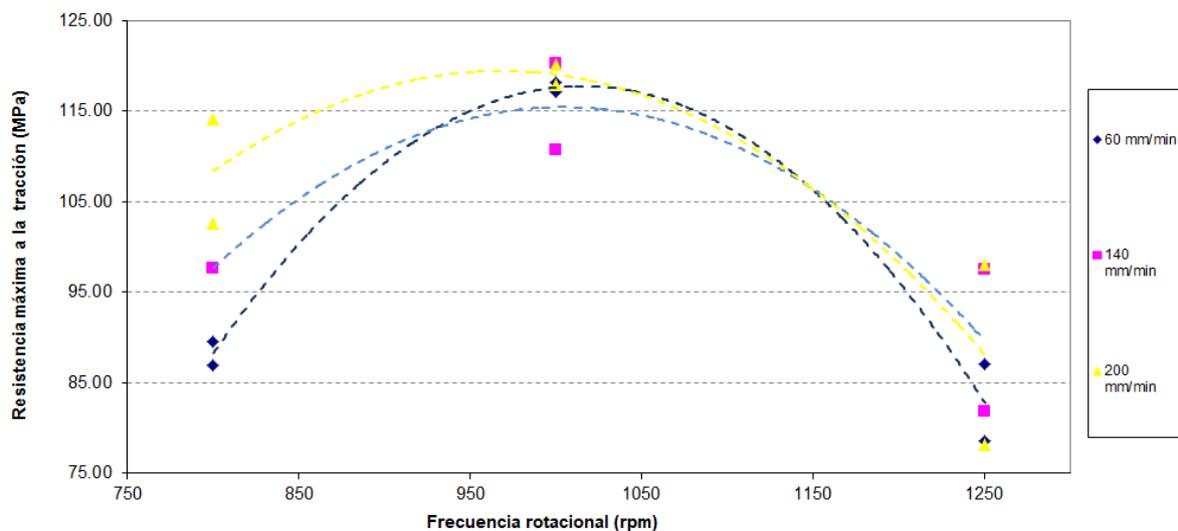


Figura 3.11 Efecto de la frecuencia rotacional sobre la resistencia a la tracción de las probetas.

Existe un comportamiento similar en los valores de alargamiento de las muestras soldadas, observando que los valores aumentan desde los 800 rpm hasta los 1000 rpm; y para valores superiores a 1000 rpm el valor de alargamiento disminuye, ver fig. 3.12. Dentro de los valores encontrados de alargamiento, la probeta soldada con una velocidad de avance de 60 mm/min y frecuencia rotacional de 1000 rpm obtuvo un valor de alargamiento de 19,6% por encima del encontrado en las planchas de aluminio de 15%, lo cual representa un incremento de 130,9% respecto al material base.

b) Uniones soldadas a frecuencia rotacional constante

La figura 3.13 muestra los valores obtenidos a frecuencia rotacional constante. Las probetas soldadas a una frecuencia rotacional de 1000 rpm muestran los mayores valores de resistencia a la tracción (en promedio 117 MPa) conforme la velocidad de avance aumenta se observa un incremento ligero.

Las probetas soldadas con una frecuencia rotacional constante de 800 rpm y 1250 rpm muestran la misma tendencia de incremento del valor de resistencia a la tracción conforme la velocidad de avance aumenta.

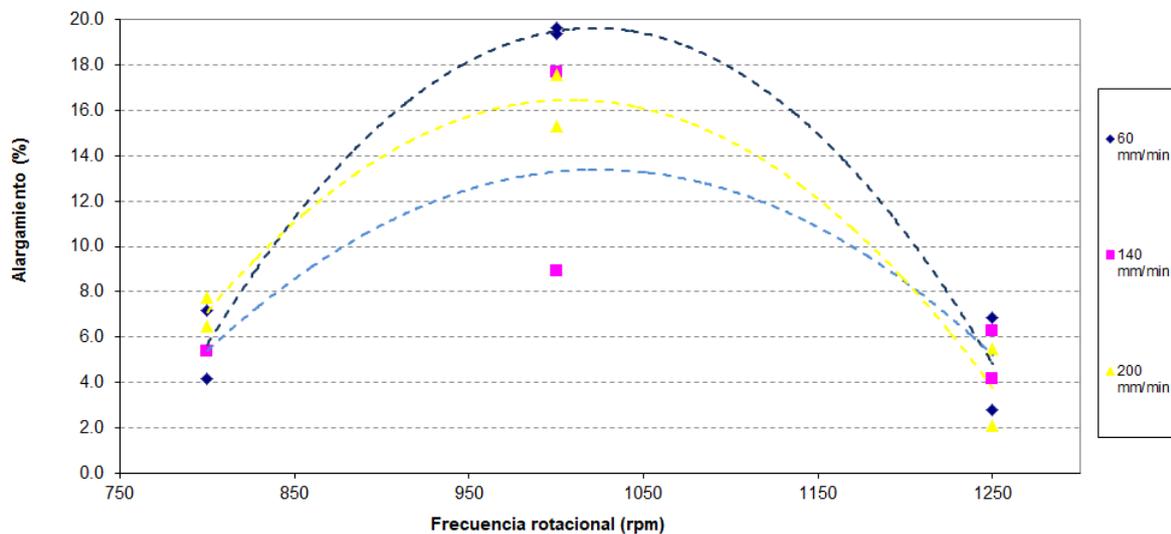


Figura 3.12 Efecto de la frecuencia rotacional sobre el alargamiento de las probetas.

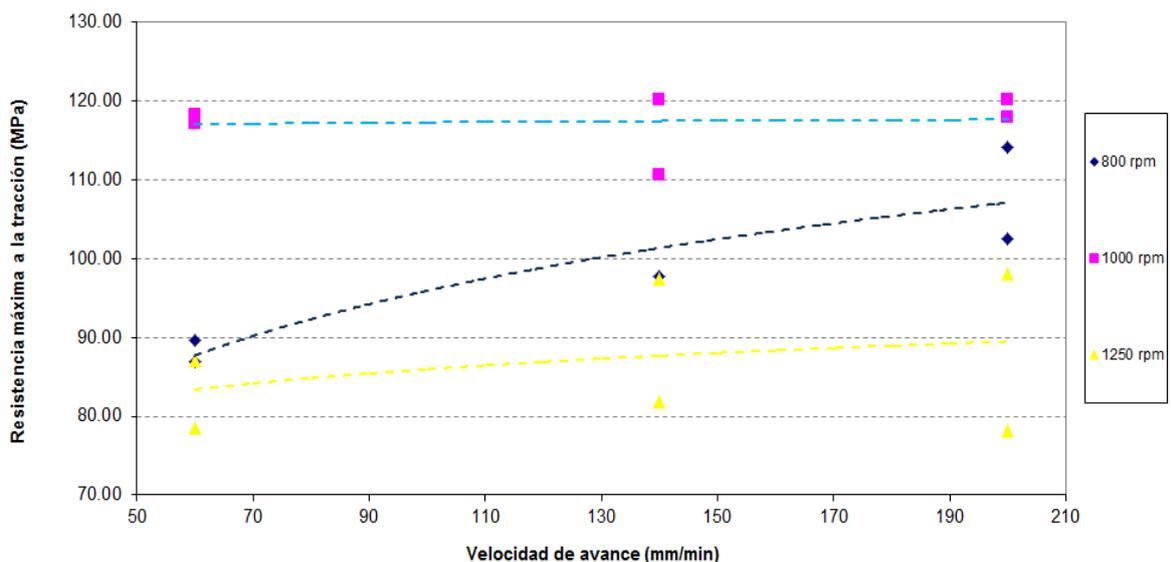


Figura 3.13 Efecto de la velocidad de avance sobre la resistencia a la tracción de las probetas.

Los valores de alargamiento son mayores para probetas soldadas con una frecuencia rotacional de 1000 rpm, siendo estos valores superiores al valor de alargamiento obtenido en el material base de aluminio AA1100-H18, ver figura 3.14.

Sin embargo, hay una tendencia de disminución de este valor conforme aumenta la velocidad de avance para muestras soldadas a 1000 rpm y 1250rpm, por el contrario,

las planchas soldadas a 800 rpm tienen una tendencia de aumento conforme el valor de velocidad de avance aumenta.

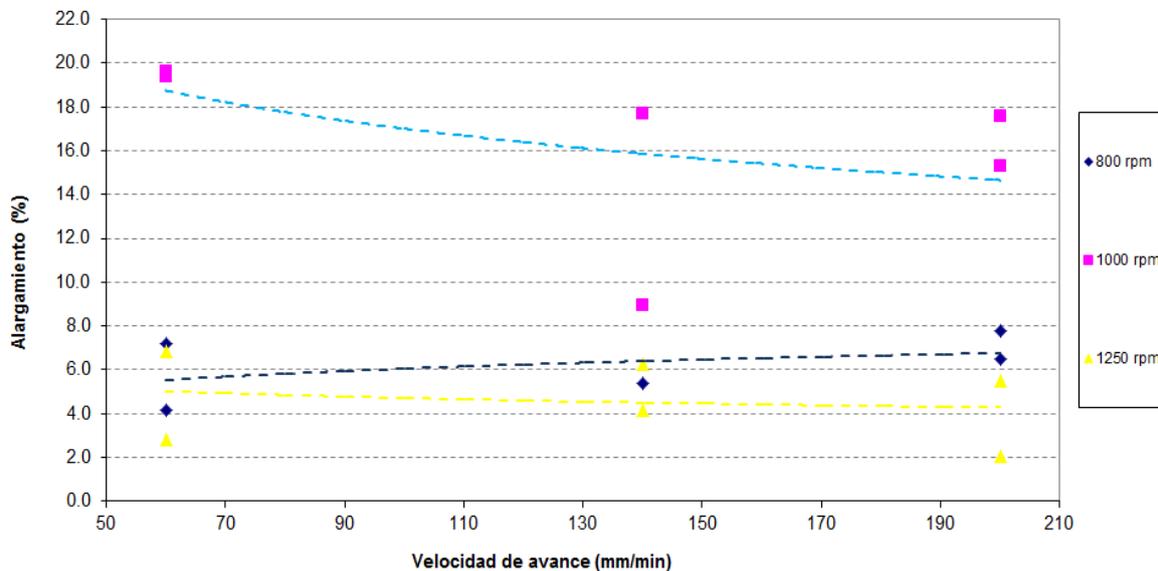


Figura 3.14 Efecto de la velocidad de avance en los valores de alargamiento de las probetas.

c) Relación frecuencia rotacional y velocidad de avance

Otro parámetro importante durante el proceso de soldadura por fricción batido es la relación de la frecuencia rotacional entre velocidad de avance, debido a que estos valores están ligados a la generación de calor que necesita el proceso para poder realizar la soldadura.

Bastier [5] introduce este parámetro ("*revolutionary pitch*"), el cual indica que; si esta relación es elevada se hablará de "soldadura en frío", debido a que el calor generado entre la herramienta y las planchas no induce valores importantes de temperatura en las piezas, por lo tanto, la soldadura generada no tendrá buenas propiedades mecánicas. Por el contrario, si esta relación es menor hablaremos de "soldadura en caliente" debido a que el calor generado por fricción generará elevadas temperaturas, en consecuencia, se producirán cordones de soldadura de buena calidad.

La fig. 3.15 muestra la curva de tendencia del esfuerzo a la tracción, en la cual se observa que mientras el valor de "*revolutionary pitch*" aumenta, el valor de esfuerzo a la tracción disminuye.

Es importante el estudio de este parámetro, dado que relaciona ambas velocidades con la generación de calor, a su vez, se deberán tomar valores de velocidades que permitan obtener un rango más amplio de "revolutionary pitch" para una mejor comprensión de este parámetro en las propiedades mecánicas de las probetas.

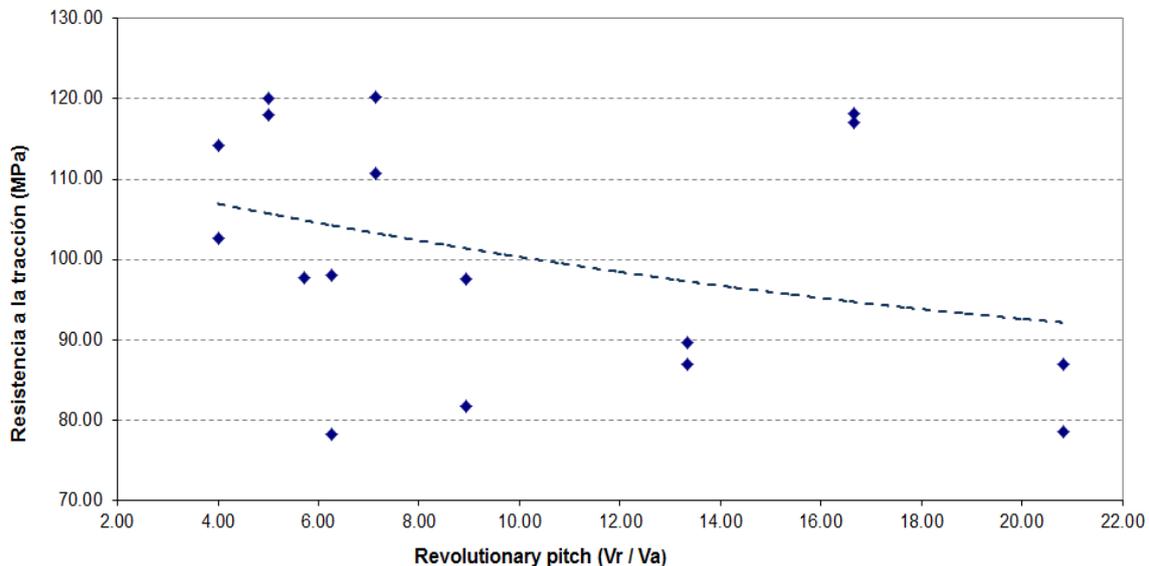


Tabla 3.15 Curva de tendencia de "Revolutionary pitch" de las probetas.

3.4.3 Ensayo de doblado

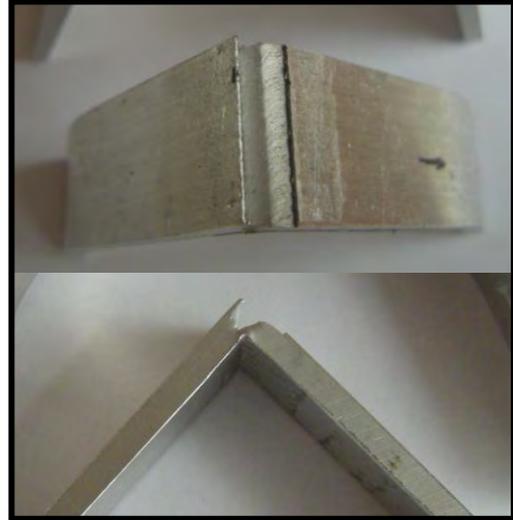
En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos durante el ensayo de doblado de cara y raíz de las probetas soldadas por fricción batido.

En la figura 3.16 se muestra las probetas dobladas de cara y raíz de las muestras soldadas con una frecuencia rotacional de 800 rpm, y velocidades de avance de 60 mm/min, 140mm/min y 200 mm/min, en las figuras 3.16 (a), (c), y (e) las probetas dobladas de cara no muestran fisuras en el cordón de soldadura, por el contrario en las figuras 3.16 (b) y (d) las probetas soldadas a una velocidad de 60 mm/min y 140 mm/min respectivamente, muestran un desprendimiento superficial del material al ser dobladas de raíz.

Esto se debe a que, durante la soldadura por fricción batido el mayor incremento de la temperatura que se produce en las planchas ocurre en el lado de cara de la unión soldada, como consecuencia de un mayor contacto entre el hombro de la herramienta (\varnothing 15 mm) y la superficie de la plancha, mientras que, el contacto entre el diámetro del pin (\varnothing 5 mm) y el fondo de la plancha de aluminio produce un menor incremento de temperatura.



(a) Doblado cara probeta 60 mm/min.



(b) Doblado raíz probeta 60 mm/min.



(c) Doblado cara probeta 140 mm/min.



(d) Doblado raíz probeta 140 mm/min.



(e) Doblado cara probeta 200 mm/min.



(f) Doblado raíz probeta 200 mm/min.

Figura 3.16 Ensayo de doblado de probetas soldadas a 800 rpm.

Cabe mencionar, que la probeta soldada a una frecuencia rotacional de 800 rpm y una velocidad de avance de 200 mm/min no presentó fisuras al ser doblada por el lado de cara y de raíz, esto debido al incremento de temperatura que proporciona estos valores, ver figuras 3.16 (e) y (f).

En la figura 3.17, se muestra el doblado de cara y raíz de las probetas soldadas con una frecuencia rotacional de 1000 rpm, y velocidades de avance de 60 mm/min, 140mm/min y 200 mm/min, donde se puede apreciar que en todas las probetas dobladas no existe la presencia de fisuras en los cordones de soldadura, lo que indica que la selección de parámetros fue el adecuado para una generación de calor satisfactoria que permita al material alcanzar temperaturas adecuadas que contribuyan con un movimiento adecuado del flujo del material alrededor de la herramienta, consiguiendo de esta manera unión de soldadura satisfactoria.

En la figura 3.18 se muestra el doblado de cara y raíz de las probetas soldadas con una frecuencia rotacional de 1250 rpm, y velocidades de avance de 60 mm/min, 140mm/min y 200 mm/min, en las figuras 3.18 (a), (c), y (e) las probetas dobladas de cara no muestran fisuras en los cordones de soldadura, por el contrario, en las figuras 3.18 (b), (d), y (f) se aprecia que todas las probetas dobladas por el lado de raíz muestran desprendimiento superficial en el cordón de soldadura.

Se puede inferir que los parámetros de soldadura por fricción batido para el grupo de muestras soldadas a una frecuencia rotacional de 1250 rpm, no han sido los adecuados; la excesiva generación de calor durante la realización del proceso ha permitido que el material alcance valores de temperatura cercanos a la temperatura de fusión, debido que al momento de retirar las muestras soldadas de la placa soporte, estas se encontraron adheridas a ella, por tanto fue necesario utilizar un cincel metálico y un martillo para poder retirarlas, lo cual generó debilitamiento en el lado de raíz de estos cordones y falta de material en esta zona.

Por lo tanto, de todo el grupo de probetas dobladas, las que aprobaron la norma AWS D1.2/D1.2M:2014, fueron las muestras soldadas a una frecuencia rotacional de 800 rpm y una velocidad de avance de 200 mm/min; y el grupo de muestras soldadas a frecuencia rotacional de 1000 rpm y velocidades de avance de 60 mm/min, 140 mm/min y 200 mm/min.



(a) Doblado cara probeta 60 mm/min.



(b) Doblado raíz probeta 60 mm/min.



(c) Doblado cara probeta 140 mm/min.



(d) Doblado raíz probeta 140 mm/min.



(e) Doblado cara probeta 140 mm/min.



(f) Doblado raíz probeta 200 mm/min.

Figura 3.17 Ensayo de doblado de probetas soldadas a 1000 rpm.



(a) Doblado cara probeta 60 mm/min.



(b) Doblado raíz probeta 60 mm/min.



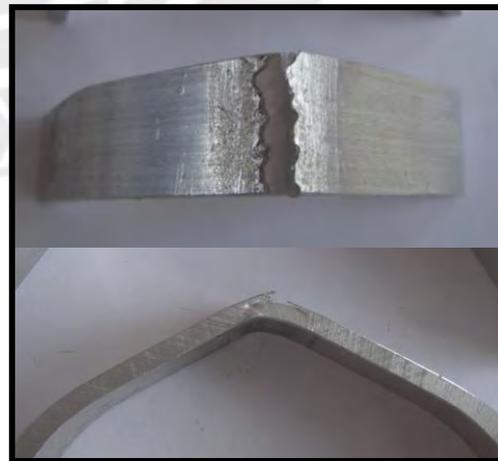
(c) Doblado cara probeta 140 mm/min.



(d) Doblado raíz probeta 140 mm/min.



(e) Doblado cara probeta 200 mm/min.



(f) Doblado raíz probeta 200 mm/min.

Figura 3.18 Ensayo de doblado de probetas soldadas a 1250 rpm.

3.4.4 Ensayo de dureza

La microestructura de la sección transversal del cordón de soldadura está dividida en las siguientes partes: zona núcleo central, zona afectada termomecánicamente (ZATM), zona afectada térmicamente (ZAT) y material base, por tanto, para obtener una información acertada del perfil de dureza de las zonas mencionadas, el ensayo de dureza Vickers se realizó empleando una carga de 5 kgf y con una separación entre las marcas de 1 mm. El ensayo fue realizado en el Laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica.

a) Perfiles de dureza de uniones soldadas a 800 rpm

La tabla 3.4 muestra los resultados del ensayo de dureza Vickers de las probetas soldadas a 800 rpm.

Tabla 3.4 Resultados del ensayo de dureza realizadas a probetas soldadas a 800 rpm.

Puntos	Distancia del centro de cordón soldadura	Dureza Vickers 5 HV		
		60 mm/min	140 mm/min	200 mm/min
1	-15	61,3	53,6	55,4
2	-14	57,2	54,2	53,6
3	-13	55,4	51,9	54,8
4	-12	59,9	54,8	52,5
5	-11	59,9	51,9	53,0
6	-10	57,2	52,5	53,0
7	-9	55,4	54,2	53,0
8	-8	55,4	51,4	53,6
9	-7	54,8	51,9	52,5
10	-6	53,6	51,4	50,3
11	-5	51,4	51,4	46,8
12	-4	45,5	44,6	47,8
13	-3	45,0	41,3	45,5
14	-2	42,1	42,1	46,8
15	-1	41,3	42,5	48,3
16	0	40,9	41,7	48,8
17	1	44,6	42,5	47,8
18	2	39,7	42,1	45,9
19	3	43,3	42,1	46,8
20	4	44,2	43,7	45,9
21	5	48,3	41,7	53,0
22	6	47,8	46,4	52,5
23	7	54,2	50,3	51,9
24	8	53,0	52,5	54,2
25	9	56,6	52,5	57,2
26	10	54,8	51,9	55,4
27	11	58,5	52,5	53,6
28	12	55,4	53,6	56,0
29	13	56,0	51,4	57,2
30	14	57,9	53,0	57,2
31	15	56,0	53,0	56,6

En la tabla 3.4 se aprecia que las probetas presentan un decrecimiento de la dureza a partir de la posición -4 mm hasta 4 mm del origen de coordenadas.

La figura 3.19 muestra los perfiles de dureza realizadas a probetas soldadas a una frecuencia rotacional de 800 rpm, donde se aprecia que la probeta soldada a 60 mm/min presenta un valor mínimo de dureza de 39,7 HV ubicado a 2 mm del origen de coordenadas en la zona del núcleo central y como valor promedio de esta zona 42,9 HV.

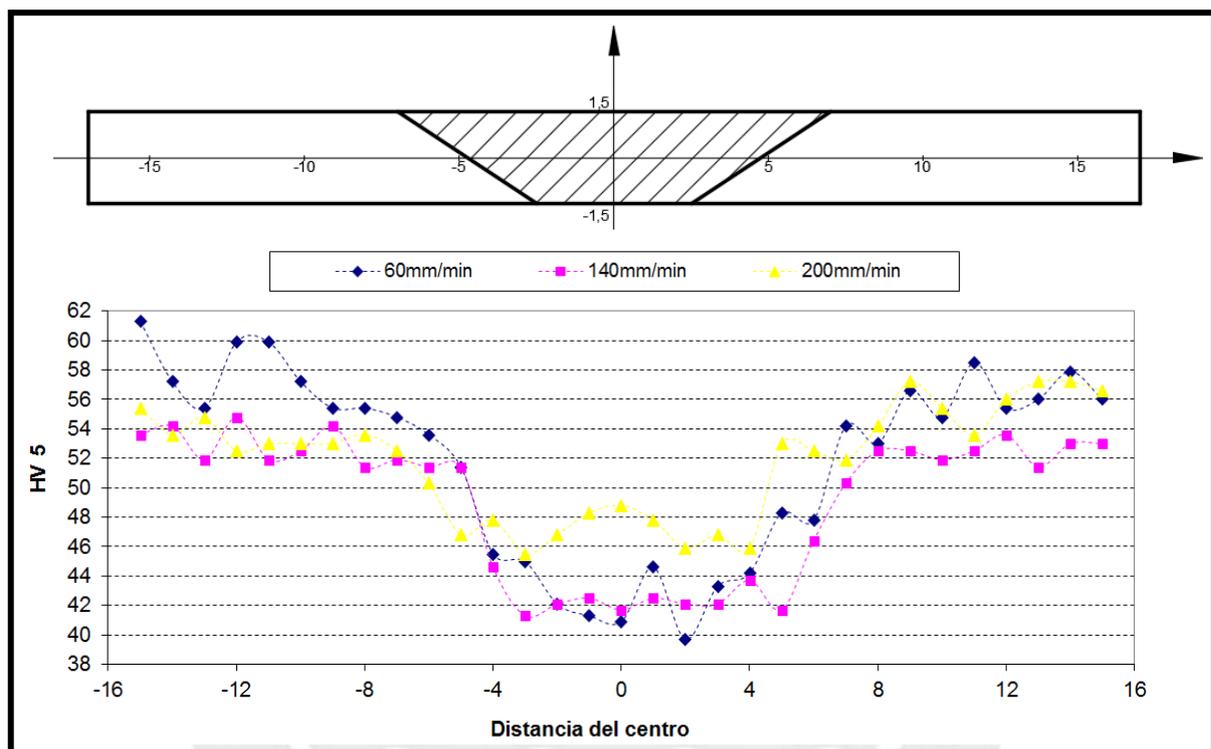


Figura 3.19 Perfiles de dureza realizadas en probetas soldadas a 800 rpm.

La probeta soldada a 140 mm/min presenta un valor mínimo de dureza de 41,3 HV, ubicado a -3 mm del origen de coordenadas en la zona del núcleo central y como valor promedio de esta zona 42,5 HV.

Para la probeta soldada a 200 mm/min se tiene un valor mínimo de dureza de 45,5 HV, ubicado a -3 mm del origen de coordenadas en la zona del núcleo central y como valor promedio de esta zona 47,1 HV.

Para este grupo de probetas, se puede observar que el valor promedio de dureza en el núcleo central aumenta conforme la velocidad de avance se incrementa, obteniendo como mayor valor promedio de dureza 47,1 HV para la probeta soldada a 200mm/min, el cual representa el 89% del valor de dureza del metal base.

b) Perfiles de dureza de uniones soldadas a 1000 rpm

La tabla 3.5 muestra los resultados del ensayo de dureza Vickers de las probetas soldadas a 1000 rpm, donde se aprecia que las probetas presentan un decrecimiento de la dureza a partir de la posición -8 mm hasta 8 mm del origen de coordenadas.

Tabla 3.5 Resultados del ensayo de dureza realizadas a probetas soldadas a 1000 rpm.

Puntos	Distancia del centro de cordón soldadura	Dureza Vickers 5 HV		
		60 mm/min	140 mm/min	200 mm/min
1	-15	54,8	56,6	56,6
2	-14	54,2	56,6	55,4
3	-13	51,4	54,8	57,2
4	-12	54,2	54,8	56,0
5	-11	53,6	52,5	59,2
6	-10	46,8	53,6	54,2
7	-9	48,3	52,5	53,0
8	-8	46,8	49,3	51,4
9	-7	45,9	44,2	54,8
10	-6	47,8	45,5	47,8
11	-5	46,4	45,9	46,4
12	-4	45,9	46,4	47,3
13	-3	44,6	47,8	49,3
14	-2	46,4	43,7	47,8
15	-1	45,9	46,4	44,6
16	0	45,0	46,8	50,8
17	1	45,0	45,9	49,8
18	2	46,8	48,3	47,8
19	3	45,5	46,4	50,3
20	4	45,9	45,9	51,9
21	5	45,9	47,8	47,8
22	6	45,0	46,4	49,3
23	7	43,3	54,2	50,3
24	8	43,7	56,0	51,9
25	9	51,4	54,2	47,8
26	10	52,5	57,9	50,3
27	11	54,8	56,0	49,8
28	12	55,4	56,0	47,8
29	13	56,0	55,4	56,0
30	14	56,6	56,0	58,5
31	15	53,0	56,6	57,2

La figura 3.20 muestra los perfiles de dureza realizadas a probetas soldadas a 1000 rpm, donde se aprecia que la probeta soldada a 60 mm/min presenta un valor mínimo de dureza de 43,3 HV, ubicado a 7 mm del origen de coordenadas en la zona afectada térmicamente y como valor promedio de esta zona 45,6 HV.

Para la probeta soldada a 140 mm/min se tiene un valor mínimo de dureza de 43,7 HV, ubicado a -2 mm del origen de coordenadas en la zona del núcleo central y como valor promedio de esta zona 47,5 HV.

Para la probeta soldada a 200 mm/min se tiene un valor mínimo de dureza de 44,6 HV, ubicado a -1 mm del origen de coordenadas en la zona del núcleo central y como valor promedio de esta zona 49,4 HV.

Para este grupo de probetas, se puede observar que el valor promedio de dureza en el núcleo central aumenta conforme la velocidad de avance se incrementa, obteniendo como mayor valor promedio de dureza 49,4 HV para la probeta soldada a 200 mm/min, el cual representa el 93% del valor de dureza del metal base.

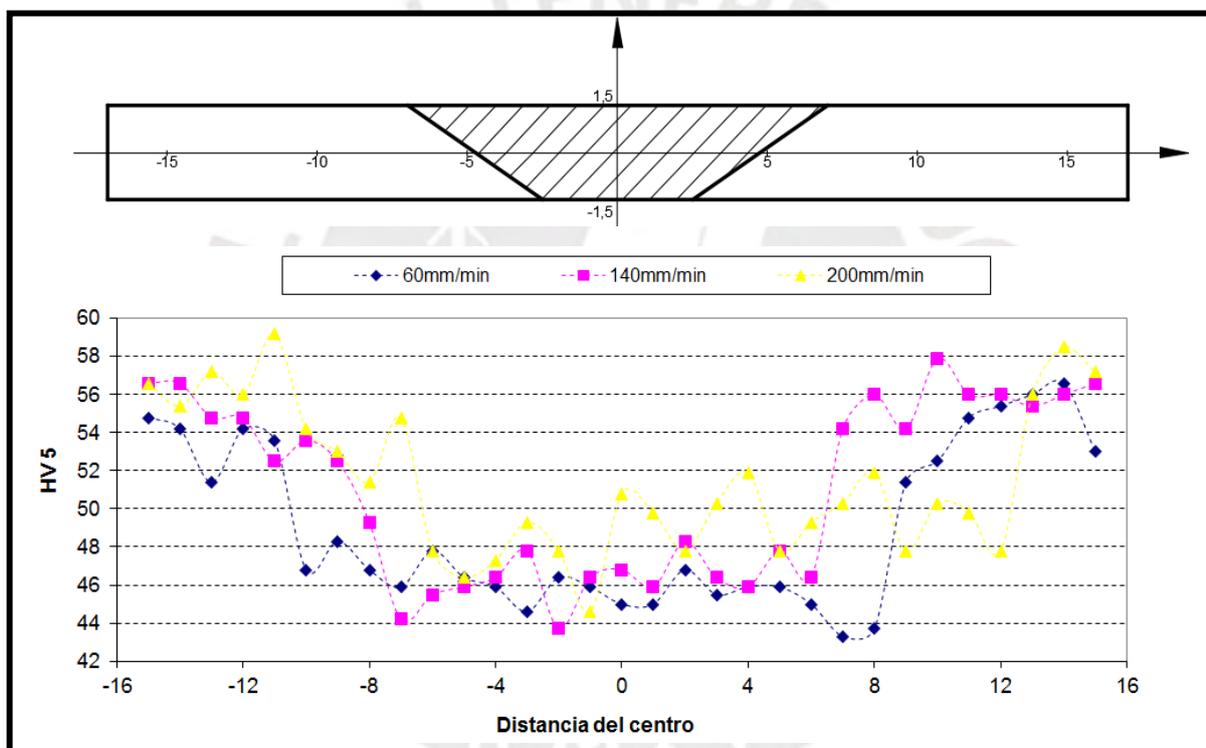


Figura 3.20 Perfiles de dureza realizadas en probetas soldadas a 1000 rpm.

c) Perfiles de dureza de uniones soldadas a 1250 rpm

La tabla 3.6 muestra los resultados del ensayo de dureza Vickers de las probetas soldadas a 1250 rpm, donde se aprecia que las probetas presentan un decrecimiento de la dureza a partir de la posición -8 mm hasta 8 mm del origen de coordenadas.

La figura 3.21 muestra los perfiles de dureza realizadas a probetas soldadas a 1250 rpm, donde se aprecia que la probeta soldada a 60 mm/min presenta un valor mínimo de dureza

de 44,2 HV, ubicado a 6 mm del origen de coordenadas en la zona afectada térmicamente y como valor promedio 46,1 HV. Para la probeta soldada a 140 mm/min se tiene un valor mínimo de dureza de 45,0 HV, ubicado a -2 mm del origen de coordenadas en la zona del núcleo central y como valor promedio de esta zona 48,5 HV.

Tabla 3.6 Resultados del ensayo de dureza realizadas a probetas soldadas a 1250 rpm.

Puntos	Distancia del centro de cordón soldadura	Dureza Vickers 5 HV		
		60 mm/min	140 mm/min	200 mm/min
1	-15	57,2	57,9	56,6
2	-14	54,8	59,2	55,4
3	-13	54,2	55,4	57,2
4	-12	53,0	56,6	56,0
5	-11	53,0	52,5	53,0
6	-10	53,6	53,0	53,0
7	-9	52,5	54,8	54,2
8	-8	47,8	54,8	57,9
9	-7	43,3	47,8	53,6
10	-6	46,4	48,3	45,5
11	-5	46,8	49,8	49,3
12	-4	46,8	46,4	53,0
13	-3	49,3	46,8	48,8
14	-2	46,4	45,0	46,8
15	-1	45,5	48,3	46,4
16	0	45,9	49,8	45,0
17	1	45,0	50,8	45,5
18	2	45,9	47,8	47,8
19	3	47,3	50,8	48,3
20	4	45,5	46,4	47,8
21	5	45,9	47,3	46,8
22	6	44,2	48,8	53,6
23	7	44,6	48,3	54,8
24	8	47,8	47,8	55,4
25	9	51,4	51,9	56,6
26	10	54,8	54,2	56,0
27	11	52,5	54,8	55,4
28	12	51,4	54,2	54,8
29	13	51,9	54,2	55,4
30	14	54,2	55,4	56,0
31	15	53,0	56,6	57,9

Para la probeta soldada a 200 mm/min se tiene un valor mínimo de dureza de 45,0 HV, ubicado en el origen de coordenadas en la zona del núcleo central y como valor promedio de esta zona 49,8 HV. Para este grupo de probetas se puede observar que el valor promedio de dureza en el núcleo central aumenta conforme la velocidad de avance se incrementa, obteniendo como mayor valor promedio de dureza 49,8 HV para la probeta soldada a 200 mm/min, el cual representa el 94% del valor de dureza del metal base.

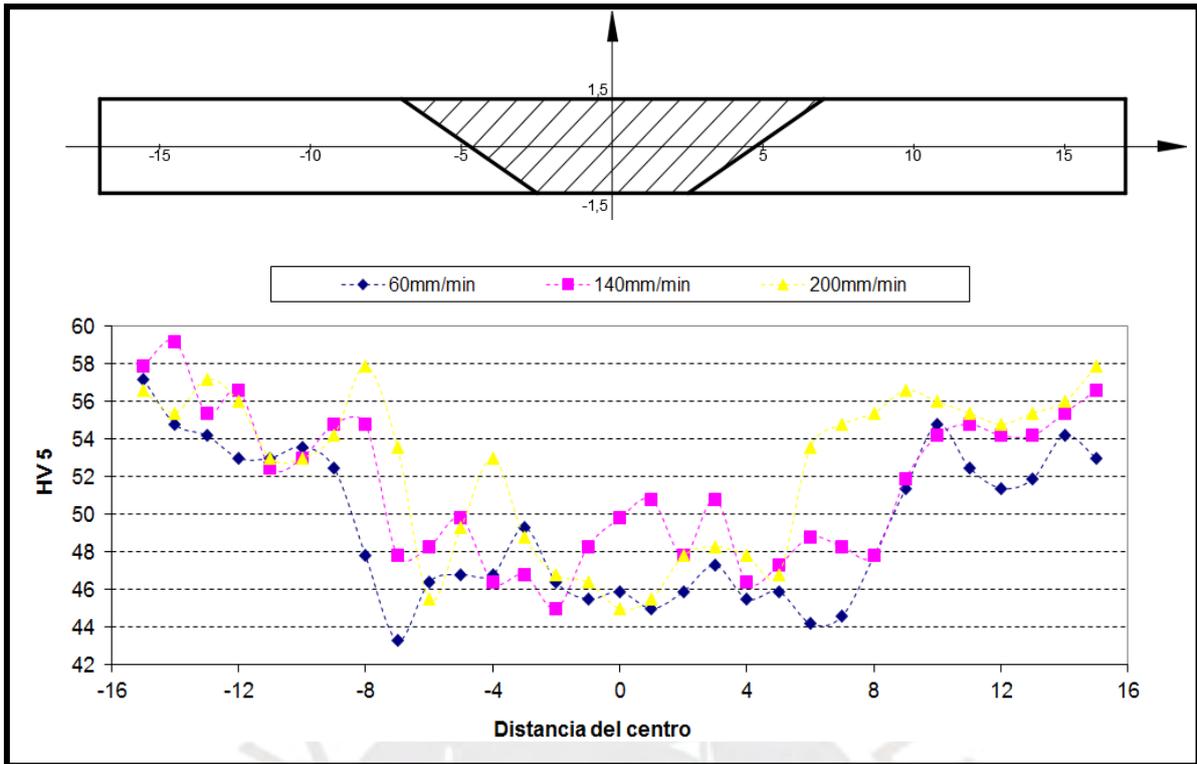


Figura 3.21 Perfiles de dureza realizadas en probetas soldadas a 1250 rpm.

d) Dureza promedio en el cordón de soldadura

En la figura 3.22 se puede apreciar la dureza promedio en el cordón de soldadura de las probetas ensayadas; se puede observar que la dureza de esta zona aumenta conforme la velocidad de avance se incrementa, además, las probetas soldadas por fricción batido a una frecuencia rotacional 1250 rpm obtuvieron un mayor promedio de dureza en esta zona respecto a las demás, alcanzando un valor máximo promedio de 49,8 HV.

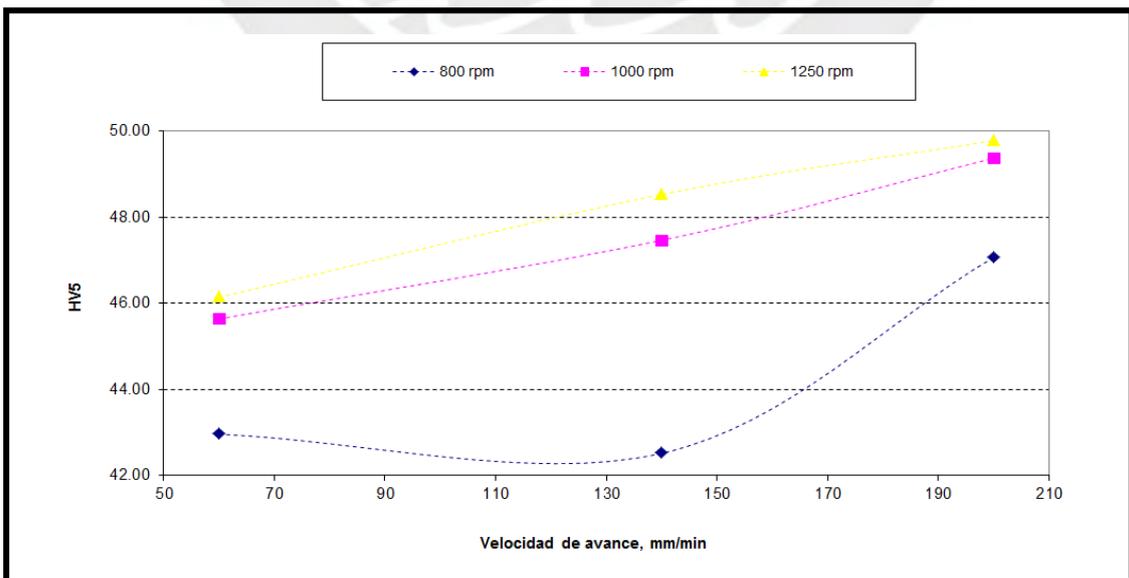


Figura 3.22 Dureza promedio en el cordón de soldadura.

Las planchas de aluminio AA1100-H18 de 3 mm de espesor al ser fabricadas por un proceso de laminado en frío, experimentan un endurecimiento por deformación plástica, lo cual origina que la dureza inicial del metal base sea en promedio 52,9 HV, según las gráficas presentadas se observa en general que los perfiles de dureza de las probetas presentan una disminución conforme se acercan al centro del cordón de soldadura, según señalan algunos autores como Mishra [6] la zona del núcleo central sufre una recristalización dinámica producto de la generación de calor y deformación originada por la herramienta durante el proceso, esto conlleva que la zona muestre granos equiaxiales al término de la soldadura, lo cual explicaría la disminución de la dureza en la zona del núcleo central con respecto al material base.



CONCLUSIONES

Como consecuencia del trabajo realizado puede extraerse las siguientes conclusiones:

1. Se implementó exitosamente el proceso de soldadura por fricción batido para la unión de aluminio AA1100-H18 en los laboratorios de la Sección de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, dado que se pudo soldar con éxito las muestras, las cuales presentaron un valor de resistencia a la tracción mínimo de 78,2 MPa y un máximo de 120,2 MPa, cuyos valores de resistencia a la tracción son superiores al valor mínimo de resistencia a la tracción indicada en la norma AWS D1.2/D1.2M:2014 para el aluminio AA1100-H18, el cual es 75 MPa.
2. De las condiciones ensayadas, las que permitieron un mejor desempeño durante la soldadura por fricción batido del aluminio AA1100-H18 fueron: la frecuencia rotacional de 1000 rpm y velocidades de avance de: 60 mm/min, 140 mm/min y 200 mm/min. Las muestras soldadas con estos parámetros presentaron en promedio una resistencia a la tracción de 117 MPa, el cual representa el 73% del valor del metal base. El alargamiento a la rotura fue superior al del metal base en las probetas soldadas con una frecuencia rotacional de 1000 rpm al margen de la velocidad de avance.
3. El material, la geometría de la herramienta cilíndrica de pin roscado, la fabricación de la herramienta y el tratamiento térmico seleccionados resultaron adecuados para la realización de la soldadura por fricción batido del aluminio AA1100-H18, dado que no se presentaron fisuras superficiales, ni un desgaste notorio al término de la soldadura de las muestras. La herramienta sigue siendo utilizada por alumnos de pregrado y posgrado de nuestra universidad.
4. Durante el ensayo de doblado, las muestras soldadas a una frecuencia rotacional de 1000 rpm no sufrieron fractura al ser dobladas ni por el lado de la cara ni por el de la raíz, lo cual confirma la ductilidad y ausencia de defectos superficiales de la unión soldada.
5. Los perfiles de dureza de las probetas muestran una disminución en promedio de 10% en la zona central de la unión soldada respecto al material base (52,9 HV), esto explica por qué durante el ensayo de tracción las muestras soldadas se fracturaron en esta zona.

6. La selección de la máquina fresadora de control numérico computarizado marca MAZAK modelo VTC-16B y del sistema de sujeción resultaron adecuados para el desarrollo del proceso de soldadura por fricción batido. Durante la realización del proceso el sistema de sujeción mantuvo firmemente sujetadas las planchas de aluminio y se registró un consumo del 40% de la potencia nominal de la máquina.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] **GUERDOUX**, Simon.
Simulation Numerique du Soudage par frottement-malaxage. Tesis de doctorado en mecánica numérica. Paris: École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
<https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00271234/document>
- [2] **TRANSTIR**,
Le procédé de Soudage Friction Malaxage, France.
http://www.transtir.eu/index.php?option=com_content&task=view&id=14&Itemid=28
- [3] **CAZES**, Roland
Soudage par friction et malaxage, TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR, 2003, p9.
<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblage-des-materiaux-par-soudage-42512210/soudage-par-friction-malaxage-bm7746/>
- [4] **CHING-JEN**, Lee., **HUANG**, Chih-Ching., **LUI**, Truan-Sheng, **CHEN**, Li-Hui, **CHANG**, Liu-Wen., **HO** New-Jin., **KAO**, Po-We.
Development and analysis of finegrained Mg base alloys and composites fabricated by friction stir processing. 2006, p. 236.
- [5] **BASTIER**, Arnaud
Modélisation du soudage d'alliages d'aluminium par friction et malaxage. Tesis de doctorado en mecánica materiales. Paris: Ecole Polytechnique X. 2006.
<https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00122388/document>
- [6] **MISHRA**, R.S y **MA**, Z.Y.
Friction Stir Welding and Processing, Material Science and Engineering, p 1-78. 2005.
<https://pdfs.semanticscholar.org/6f56/4a28d39f1365f337be04922424472dcf3413.pdf>
- [7] **NICHOLAS** E.D.
Friction Processing Technologies, Friction and Forge Processes Group, TWI Ltd., UK, p 8
<http://www.iiw-iis.org/iiw/extranet/static/MS/C-VI/VI-794-04.pdf>.
- [8] **CAMPBELL**, F.C
Manufacturing Technology for aerospace structural materials, USA, p 617, 2006
https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=R7NHvVJf_ZEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=manufacturing+technology+for+aerospace+structural+materials+pdf&ots=pPRm1Ckv4s&sig=XzY8FUjAg8B1trBvdVrZUajLZ4A#v=onepage&q&f=false
- [9] **KUMAR**, K, **KAILAS**, Satish V.
The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation, Material Science and Engineering, USA, p 367-374. 2008.
<https://core.ac.uk/download/pdf/148470215.pdf>
- [10] **RAJAMANICKAM** N., **BALUSAMY** V.,
Effects of process parameters on mechanical properties of friction stir welds using design of experiments, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, PSG College of Technology, Coimbatore, India, p 293-299. 2008.
<http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/1985/1/IJEMS%2015%284%29%20293-299.pdf>

- [11] **NANDAM, R., DEBROY, T., BHADESHIA H.K.D.H.,**
Recent advances in friction stir welding – Process, weldment structure and properties, Pennsylvania State University. 2003
<https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2008/FSW.pdf>
- [12] **COLLIGAN, Kevin**
Tapered Friction Stir Welding Tool, United States Patent, US 6,669,075, 2003, p11
<https://patentimages.storage.googleapis.com/60/91/76/617a75d72d5da9/US6669075.pdf>
- [13] **RECORD J.H., COVINGTON J.L., NELSON T.W., SORENSEN C.D.**
Fundamental characterization of Friction Stir Welding. Proceedings of the fifth international symposium on Friction Welding, Metz France 2004.
- [14] **BAHEMMAT P., RAHBARI A., HAGHPANAHI M., BESHARATI M. K.,**
Experimental Study on the effect of rotational speed and tool pin profile on AA2024 Aluminium friction stir welded butt joints, 2008 ASME Early Career Technical Conference, USA, p 7.
- [15] **SREE S.S., MALARVIZHI S., BALASUBRAMANIAN V.**
The effect of pin profiles on the microstructure and mechanical properties of underwater friction stir welded AA2519-T87. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2016.
- [16] **VIDAKIS N., VAIRIS A., DIOUF D., PETOUSIS M., SAVVAKIS K., TSAINIS A.**
Effect of the Rotational Speed on the Mechanical Properties of Thin AA1050 Friction Stir Welded Sheets, Journal of Engineering Science and Technology Review 9 (3) (2016) 123 - 129.
- [17] **LIU H.J., FUJII H., MAEDA M., NOGI K.,**
Mechanical properties of friction stir welded joints of 1050 – H24 aluminum alloy, Science and Technology of Welding and Joining, 2003, Vol. 8 p 450 – 454.
- [18] **LIU H.J., FUJII H., MAEDA M., NOGI K.,**
Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology, 2003, p 692 – 696.
- [19] **GENEVOIS C.,**
Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d’alliages d’aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2004, p 202.
- [20] Technical data Hartford vertical CNC machining center model HV 35,
https://www.apint.com/es/maquinaria-de-segunda-mano/centros-de-mecanizado-verticales/hartford-hv35-x-500-y-400-z-510mm_8121
- [21] Technical data Mazak VTC 16B,
<http://auctions.machinetoolbids.com/Listing/Details/568526/MAZAK-VTC16B-VERTICAL-MACHINING-CENTER>
- [22] AISI D2 Cold Work Tool Steel, USA, P 7.
<http://www.asimachinetool.com/vmc/8277.htm>.

- [23] **ACEROS BOEHLER DEL PERU S.A.**
Manual de Aceros Especiales, 2009, p 56.
- [24] **FOSCA, Carlos.**
Introducción a la Metalurgia de la Soldadura, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, 2007, Séptima edición, 2007, p 181.
- [25] **FOSCA, Carlos.**
Tratamientos Térmicos de los Aceros, Lima – Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú – Facultad de Ciencias e Ingeniería, 1987, p 100.
- [26] **APRAIZ J.**
Tratamientos Térmicos de los Aceros, Madrid - España, Dossat 2002, 10ma edición, p 737.
- [27] **ASTM International Metric**
Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Designation E8M – 04, USA, 2004, p 24.
- [28] **ASTM International Metric**
Standard Test Method for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, Designation E92 – 17, USA.
- [29] **American Welding Society**
AWS D1.2/D1.2M:2003 An American National Standard, Structural Welding Code-Aluminum, USA, 2003, p 199
- [30] **ASM International, Aluminum and aluminium alloys**, USA, 1996 p 732
- [31] **LEAN, Paul**
Soldabilidad de materiales compuestos de matriz metálica (AA6092/SiC/25p) mediante MIG-Pulsado, Universidad Complutense de Madrid, Madrid - España, 2000, p 313.
- [32] **Mech4study**
<http://www.mech4study.com/2017/04/friction-welding-principle-working-types-application-advantages-and-disadvantages.html>
- [33] **L'Institut Belge de la Soudure**
<http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction>
- [34] **Centre d'entrepreneuriat et d'essaimage**
Université du Québec á Chicoutimi
http://www.uqac.ca/ceeuqac/index/csfm_english
- [35] **VURAL M., OGUR A., CAM G., OZARPA C.**
On the friction stir welding of aluminium alloys EN AW 2024-0 and EN AW 5754-H22, Materials Science and Engineering, International Scientific Journal, India, p 49 - 54. 2007.
http://www.amse.acmsse.h2.pl/vol28_1/2817.pdf
- [36] **ACEROS DEL PERU S.A.C.**
Catálogo de aceros
<http://www.acerosdelperu.pe/es/tabla-comparativa-de-los-aceros-aceros-del-peru.php>

- [37] **ACEROS BOEHLER DEL PERU S.A.**
Hoja Técnica CHRONIT T-1 400
http://www.bohlerperu.com/media/CHRONIT_T-1_400_Y_CHRONIT_T-1_500_PLANCHA_ANTIDESGASTE.pdf
- [38] **ACEROS BOEHLER DEL PERU S.A.**
Hoja Técnica K340 IMPACT EXTRA
[http://www.bohlerperu.com/media/productdb/downloads/K340%20ISODUR%20FS p.pdf](http://www.bohlerperu.com/media/productdb/downloads/K340%20ISODUR%20FS.p.pdf)
- [39] **CAR AND DRIVER**
<https://www.caranddriver.com/features/two-metals-enter-one-metal-leaves-the-miracle-of-friction-stir-welding-tech-dept>
- [40] **SATHARI N.A.A., SHAH L.H., RAZALI A.R.**
Investigation of single-pass/double-pass techniques on friction stir welding of aluminium. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, Volume 7, pp. 1053 - 1061, December 2014 Universiti Malaysia Pahang, Malaysia.
- [41] **ANGGONO A. D., RIYADI T. W. B., RAZALI A.R.**
Influence of Tool Rotation and Welding Speed on The Friction Stir Welding of AA1100 and AA 6061-T6. AIP Conference Proceedings 1977, 020054 (2018) Department of Mechanical Engineering, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Indonesia.
- [42] **DARUIS D. D. I., KU AHMAD K. Z., ROSIAN M.A.**
Optimization of Friction Stir Welding Parameters for AA1100-H14 Aluminium Alloys Sheet. International Journal of Engineering & Technology (2018) 456-459 Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Pertahanan Nasional Malaysia.