

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

Trabajo Fin de Máster

TÍTULO: Análisis y estudio del proceso de soldadura por fricción y agitación - Friction Stir Welding Process

AUTOR: Francisco Manuel Porras González

TUTOR: Marta M^a Marín Martín.

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA



**MÁSTER UNIVERSITARIO
EN INGENIERÍA AVANZADA
DE FABRICACIÓN**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL PROCESO DE
SOLADURA POR FRICCIÓN Y AGITACIÓN - FRICTION STIR WELDING PROCESS*

Departamento: Ingeniería de Construcción y Fabricación.

Tutor/a: Marta M^a Marín Martín.

Alumno: Francisco Manuel Porras González

Curso: 2021/2022.

COMISIÓN EVALUADORA

(A rellenar por la Comisión Evaluadora)

COMISIÓN EVALUADORA

PRESIDENTE:

VOCAL

SECRETARIO

FECHA DEFENSA ___ de _____ de _____

CALIFICACIÓN

Vocal

Presidente

Secretario

Fdo.: _____

Fdo.: _____

Fdo.: _____

CÓDIGOS UNESCO

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

AGRADECIMIENTOS

Llevar a cabo este Trabajo Fin de Máster me ha llevado a tener que realizar un gran esfuerzo el cual no hubiese sido posible sin el eterno apoyo de mis dos familias. Mi familia real, que aunque esté lejos siempre la siento cerca y a mi familia elegida y mi familia de Madrid, la cual la conforman mis antiguos y nuevos, pero siempre fieles amigos.

Quisiera agradecer además el apoyo incondicional de uno de los pilares de mi vida, gracias Antonio Salas, este esfuerzo sin tus ánimos no hubiera sido posible. Aún nos quedan muchas cosas por vivir.

Acordarme también de esa persona que me conoce mejor que nadie, amiga, confidente y compañera de vida. Ella es la única que sabe todo lo necesito. Gracias Blanca Díaz por acompañarme una vez más en la consecución de un nuevo objetivo. Esto también es tuyo.

Por último, quisiera agradecer a mi Tutora Marta M^a Marín Martín. Gracias por tu paciencia, comprensión y ayuda en todo momento, sobre todo en esa última fase donde tanto necesitaba su apoyo.

Gracias.

Fran Porras.

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

TP - Tutor del Trabajo
ETSII - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
TFM - Trabajo Fin de Máster
UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia
TWI - The Welding Institute
FSW - Friction Stir Welding
LFW - Linear Friction Welding
RFW - Rotational Friction Welding
IFW - Inertia Friction Welding
MMC - Metal Matrix Composite
HAZ - Heat Affected Zone
TMAZ - Thermomechanically Affected Zone
rpm - Revoluciones Por Minuto
MPa - Megapascales
kN - Kilonewtons
mm/min - Milímetros por minuto
 μm - Micrómetros
Hv - Dureza Vickers
Al - Aluminio
Si - Silicio
Mg - Magnesio
Fe - Hierro
Mn - Manganeseo
Cu - Cobre
Co - Cobalto
Zn - Zinc
Cr - Cromo
Ti - Titanio
WC - Carburo de Wolframio
RS - Rotational Speed
WS - Welding Speed
TA - Tilt Angle
IMC - Intermetallic Compounds
UTS - Ultimate Tensile Strength

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema tipos de procesos de unión.....	7
Figura 2: Ejemplos típicos de ensamblajes mecánicos. [26]	8
Figura 3: Carga en tracción (izq.), compresión (derch.) y cizallamiento (debajo) en uniones adhesivas. [1]	9
Figura 4: Carga en desgarro (izq.) y pelado (derch.) en uniones adhesivas. [1]	9
Figura 5: Tipos de esfuerzos a considerar en la unión por adhesivos. [26]	9
Figura 6: Sección transversal de una soldadura por fusión. [26].....	12
Figura 7: Proceso de unión por rodillos. [27]	14
Figura 8: Proceso de soldadura por explosión. [27]	14
Figura 9: Proceso de soldadura a tope por presión. [26]	15
Figura 10: Proceso de soldadura de proyección por resistencia. [26].....	15
Figura 11: Proceso de soldadura ultrasónica. [26]	16
Figura 12: Proceso de soldadura por difusión. [26].....	17
Figura 13: Proceso de soldadura por resistencia eléctrica. [27].....	17
Figura 14: Robot de soldadura por fricción en la automoción. [28].....	18
Figura 15: Etapas del proceso de soldadura por fricción. [2]	19
Figura 16: Blisk (izq.) y vía férrea (der.) soldados mediante LFW. [31]	20
Figura 17: Esquema soldadura por fricción rotacional. [33].....	21
Figura 18: Diagrama soldadura por fricción rotacional. [32].....	22
Figura 19: Fases proceso de soldadura por fricción rotacional. [34]	23
Figura 20: Turbinas-ejes (izq.) y válvulas huecas (der.) soldados mediante RFW. [31]	24
Figura 21: Esquema soldadura por inercia. [33].....	24
Figura 22: Sección de soldadura por inercia a diferentes velocidades periféricas. [30].....	25
Figura 23: Sección de soldadura por inercia a diferentes presiones axiales. [30]	25
Figura 24: Sección de soldadura por inercia con diferentes tamaños de volante. [30].....	26
Figura 25: Diagrama soldadura por fricción por inercia. [30].....	26
Figura 26: Drill pipes soldados mediante soldadura por inercia. [31]	27
Figura 27: Combinaciones de materiales posibles a unir por FSW. [35].....	28
Figura 28: Número de solicitudes totales de patentes FSW desde 1996-2008. [9].....	29
Figura 29: Esquema proceso FSW. [34]	29
Figura 30: Lado de avance y retroceso en una soldadura FSW. [4]	30
Figura 31: Sistema de sujeción convencional para FSW. [9]	31
Figura 32: Fases del proceso FSW. [32].....	32
Figura 33: Herramienta convencional FSW y parámetros clave. [9].....	34
Figura 34: Tipologías de soportes de herramientas de FSW. [36]	35
Figura 35: Geometrías de unión en FSW. [9].....	36
Figura 36: Microestructura de soldadura FSW. [9]	38
Figura 37: Zonas de la soldadura según el modelo de Arbegast. [38]	39
Figura 38: Sección de la herramienta FSW con pasador fijo. [9]	41
Figura 39: Sección de la herramienta FSW con pasador ajustable. [9].....	41

Figura 40: Sección de la herramienta FSW de bobina. [9].....	42
Figura 41: Tanque exterior Transbordador espacial soldado por FSW. [31]	44
Figura 42: Cadena de soldadura sector automovilístico. [31]	45
Figura 43: Influencia de la velocidad de giro sobre la resistencia a la tracción en uniones de A319. [43].....	48
Figura 44: Influencia de la velocidad de giro sobre la dureza en uniones de A319.[43]	48
Figura 45: Influencia de la velocidad de avance sobre la resistencia a la tracción y la dureza en uniones de A319.[43]..	49
Figura 46: Influencia de las fuerzas axiales sobre la resistencia a la tracción y la dureza en uniones de A319.[43]	50
Figura 47: Microestructura en las uniones de A319.[43]	51
Figura 48: Influencia de la velocidad de giro en uniones de AA6061-AA3003.	54
Figura 49: Influencia del ángulo de inclinación en uniones de AA6061-AA3003.	54
Figura 50: Influencia de la velocidad de giro en uniones de AA6061-AA6082.	56
Figura 51: Influencia del ángulo de inclinación en uniones de AA6061-AA6082.	56
Figura 52: Velocidad de giro y velocidad de avance analizadas en uniones FSW Al-Ti.....	58
Figura 53: Formas y características del hombro en FSW. [63]	59
Figura 54: Formas y características del pasador en FSW. [63]	60
Figura 53: Microdureza en diferentes uniones FSW Al-Ti. [55,60]	61
Figura 54: Imagen microscópica de una unión FSW Al-Ti. [57,66]	62
Figura 55: Velocidad de giro y velocidad de avance analizadas en uniones FSW Al-Acero.	63
Figura 56: Configuración soldadura solapada con taladros propuesta por Huang et al. [78].....	65
Figura 57: Microdureza soldadura FSW Al6061-Acero Q235. [69]	66
Figura 58: Microdureza soldadura FSW Al-6013T4-X5CrNi18-10. [79].....	66
Figura 59: Microdureza soldadura FSW Al-5052-Acero segunda fase. [80].....	67
Figura 60: Estructura intercalada (izq.) y estructura flujo de vórtice (derch.). [76,81].....	67
Figura 61: Velocidad de giro y velocidad de avance analizadas en uniones FSW Al-Cu.	68
Figura 62: Distribución de la microdureza en una unión a tope de FSW Al-Cu. [98].....	70
Figura 63: Microestructura unión FSW Al-Cu. [99].....	71
Figura 64: Aplicación del FSW entre polímeros y materiales metálico en A350XWB y mercedes-Benz F125. [102]	72
Figura 65: Esquema y ejemplos gráficos método FSS. [108]	73
Figura 66: Esquema del proceso FFSJ. [109].....	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Composición aleación A319.	47
Tabla 2: Propiedades mecánicas aleación A319.....	47
Tabla 3: Parámetros influencia de la velocidad de giro.....	47
Tabla 4: Parámetros para el análisis de la influencia de la velocidad de avance.....	49
Tabla 5: Parámetros para el análisis de la influencia de las fuerzas axiales.	50
Tabla 6: Composición aleaciones AA6061 y AA3003.	52
Tabla 7: Conjunto de valores para los parámetros de la unión AA6061-AA3003.....	52
Tabla 8: Resultados obtenidos de la unión AA6061-AA3003.	53
Tabla 9: Composición aleación AA6082.	55
Tabla 10: Conjunto de valores para los parámetros de la unión AA6061-AA6082.....	55
Tabla 11: Resultados obtenidos de la unión AA6061-AA6082.	55
Tabla 12: Parámetros y resultados obtenidos en uniones FSW Al-Ti.	59
Tabla 13: Parámetros y resultados obtenidos en uniones FSW Al-Acero.....	64
Tabla 14: Parámetros y resultados obtenidos en uniones FSW Al-Cu.....	69
Tabla 15: Materiales típicos para herramientas de FSW en uniones soldadas de materiales disímiles.....	75

INDICE

COMISIÓN EVALUADORA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABLAS.....	vi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	3
CAPÍTULO 3. PROCESOS DE UNIÓN.....	7
3.1. INTRODUCCIÓN.....	7
3.2. UNIONES MECÁNICAS.....	7
3.3. UNIONES ADHESIVAS.....	8
3.4. UNIONES SOLDADAS.....	10
3.4.1. SOLDADURA FUERTE Y SOLDADURA BLANDA.....	10
3.4.2.. SOLDADURA POR FUSIÓN.....	12
3.4.3. SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO.....	13
3.4.3.1. SOLDADURA POR PRESIÓN.....	13
3.4.3.2. SOLDADURA POR MOVIMIENTOS RELATIVOS.....	16
3.4.3.3. SOLDADURA POR DIFUSIÓN:.....	16
CAPÍTULO 4. PROCESOS DE SOLDADURA POR FRICCIÓN.....	18
4.1. SOLDADURA POR FRICCIÓN LINEAR - LINEAR FRICTION WELDING (LFW).....	19
4.2. SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL - ROTATIONAL FRICTION WELDING (RFW).....	21
4.3. SOLDADURA POR INERCIA - INERTIA FRICTION WELDING (IFW).....	24
4.4. SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN - FRICTION STIR WELDING (FSW).....	27
CAPÍTULO 5. CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN.....	33
5.1. PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN:.....	33
5.1.1. VELOCIDAD DE GIRO Y VELOCIDAD DE SOLDADURA.....	33
5.1.2. GRADO DE INCLINACIÓN Y PROFUNDIDAD DE LA HERRAMIENTA.....	33
5.1.3. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA.....	34
5.2. DISEÑO DE LA UNIÓN.....	36
5.3. MATERIALES A UNIR.....	37
5.4. MICROESTRUCTURA DE LA UNIÓN SOLDADA.....	38
5.5. EQUIPOS DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN.....	40
5.6. VENTAJAS, INCONVENIENTES Y ÁREAS DE APLICACIÓN.....	43
CAPÍTULO 6. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO SOBRE UNIONES DE MATERIALES SEMEJANTES.....	46

CAPÍTULO 7. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO SOBRE UNIONES DE MATERIALES DISÍMILES.....	57
7.1. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS SOBRE UNIONES ALUMINIO-TITANIO	57
7.1.1. INFLUENCIA SOBRE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	60
7.1.2. INFLUENCIA SOBRE LA DUREZA	61
7.1.3. INFLUENCIA SOBRE LA MACRO Y MICROESTRUCTURA	61
7.2. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS SOBRE UNIONES ALUMINIO-ACERO	62
7.2.1. INFLUENCIA SOBRE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	64
7.2.2. INFLUENCIA SOBRE LA DUREZA	66
7.2.3. INFLUENCIA SOBRE LA MACRO Y MICROESTRUCTURA	67
7.3. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS SOBRE UNIONES ALUMINIO-COBRE	68
7.3.1. INFLUENCIA SOBRE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	69
7.3.2. INFLUENCIA SOBRE LA DUREZA	70
7.3.3. INFLUENCIA SOBRE MACRO Y MICROESTRUCTURA	71
7.5. UNIONES ALUMINIO-POLÍMEROS: UNA NUEVA TENDENCIA.....	72
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA	77

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, la industria en general ha necesitado para llevar a cabo su desarrollo del proceso de unión de partes metálicas en un principio. Actualmente, a pesar de los grandes avances realizados en el área del conocimiento y desarrollo de nuevos materiales, la necesidad de unir estos materiales, ya sea para la nueva construcción de maquinaria, piezas, herramientas, edificios o para la reparación de los mismos, no ha desaparecido. Es más, es posible aventurarse a afirmar que incluso los procesos o tecnologías de unión han ido desarrollándose a la par.

Continuando con lo anterior, es cierto que debido a esta continua aparición de nuevos materiales se han ido desarrollando nuevas técnicas de unión como ya se ha comentado, sin embargo, la clasificación de los tipos de uniones sigue siendo prácticamente la misma en su esencia.

Existen dos tipos principales de unión. Estos son, uniones no permanentes tales como las uniones mecánicas, como son por ejemplo tornillos, remaches, juntas de chaveta o pernos, y por otro lado, uniones permanentes, donde entran los grupos de las uniones mediante adhesivos y uniones mediante soldadura. A ésta última, pertenece el proceso que será objeto de estudio del presente estudio: proceso de soldadura por fricción-agitación ó Friction Stir Welding Procces (FSW) en su nomenclatura anglosajona.

Por tanto, tras lo expuesto anteriormente, se puede afirmar que la soldadura es un proceso de unión permanente que une dos o más componentes sólidos para formar una sola unidad, la cual no es posible separar sin antes causar daño alguno en los componentes que conforman dicha nueva unidad formada.

Existen tres tipos principales de procesos de soldadura. Soldadura fuerte y blanda, donde en ambos casos se produce la fundición del metal de aportación pero no la del metal base. Siempre existe una fase líquida que está formada sólo por metal de aportación [1].

Soldadura por fusión, el cual es un proceso que consiste en la unión de dos superficies mediante la fusión de las mismas hasta lograr la unión sin aplicación de fuerzas externas. En ocasiones, se lleva acabo mediante aportación de un material de relleno, el cual, en dicho caso también se funde junto a ambos materiales base. Es decir, siempre existe fase líquida formada por metal base, o por metal base más el de aportación [1].

Por último, soldadura de estado sólido, donde nunca se produce la fusión del material base ni del material de aportación si lo hubiese, es decir, nunca existe fase líquida. No requiere de la aplicación de calor externo pero sí una presión para producir una unión sólida. Dentro de esta última subcategoría de los procesos de unión por soldadura se encuentra ubicado el proceso de Soldadura por Fricción, el cual como se ha comentado anteriormente es el tema principal del presente documento [1,2].

El proceso de Soldadura por Fricción-Agitación, es un tipo de proceso de soldadura en estado sólido desarrollado por The Welding Institute (TWI), Reino Unido en el año 1991, usada inicialmente solo para aleaciones de aluminio.

Desde su descubrimiento en 1991, el proceso de FSW ha evolucionado como una técnica bastante popularizada entre los procesos de unión de piezas metálicas de aluminio. Por otro lado, su aplicación a la hora de unir materiales metálicos con propiedades más severas que el aluminio, tales como el acero o el titanio, están cada vez más desarrolladas aunque a un ritmo menor. Actualmente el proceso de soldadura por fricción-agitación es muy empleado en casi toda la industria. La industria aeroespacial, naval, automotriz o ferroviaria son claros ejemplos donde a día de hoy se lleva a cabo este proceso de unión [3,4].

Por otro lado, como ya se ha anunciado anteriormente, el proceso de soldadura por fricción-agitación será el epicentro del presente documento. Para el desarrollo del mismo en primer lugar se realizará una clasificación de los diferentes tipos de uniones existentes haciendo especial hincapié en los procesos de soldadura por fricción, grupo donde se encuentra encasillado el proceso FSW.

Posteriormente, se analizará el proceso de soldadura por fricción-agitación con mayor detalle. Para ello, se llevará a cabo una descripción detallada del proceso, sus parámetros claves, diseño de uniones, materiales a unir, entre otros aspectos relevantes.

Por último, teniendo en cuenta la importancia que tiene la correcta selección de los parámetros de este proceso sobre los resultados finales obtenidos, se realizará una investigación sobre la influencia de la elección de los parámetros de velocidad de giro, velocidad de soldadura y fuerzas axiales aplicadas durante el proceso de FSW, sobre los resultados obtenidos de tensión, dureza y microestructura en una unión de aluminio.

Tras ello, aprovechando que el FSW es un proceso el cual sigue en continua evolución y que actualmente se llevan a cabo investigaciones sobre uniones de materiales disímiles, también se realizará un análisis de los resultados obtenidos en la estructura de la unión tanto macro como microestructuralmente junto con la dureza y tensiones alcanzadas en la unión realizando una comparativa entre aluminio con otros materiales tales como aleaciones de titanio, acero, cobre y polímeros.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo del presente estudio se ha llevado a cabo un análisis del estado del arte de la materia que supone el tema principal del mismo, el proceso de soldadura. Para llegar hasta una de las primeras apariciones de la soldadura como tal, hay que remontarse a los inicios de la fabricación de armas, concretamente a la Edad del Hierro y Edad del Bronce.

Aunque aquellas metodologías poco o nada se parece a las actuales, servían en aquel entonces para unir trozos de metal, los cuales eran calentados hasta alcanzar un estado plástico que permitía dicha unión a base de golpes que conseguían que una parte de una pieza penetrara en otra. Este método, se conoce como “caldeado”, y se continuó utilizando hasta no hace mucho aunque su uso estaba limitado a piezas de acero forjable, de diseño sencillo y tamaño reducido [5,6].

A mediados del siglo XIX, se inventó el generador eléctrico. Este invento hizo que durante el período comprendido entre 1899-1903 se realizaran una gran cantidad de inventos relacionados con la soldadura. Por ejemplo Sir Humphry Davy, sentó las bases de la soldadura moderna con la invención del acetileno y la producción del primer arco eléctrico entre dos electrodos de carbono usando baterías [7].

En 1890, Charles Lewis Coffin, un ingeniero estadounidense, inventó y patentó un proceso de soldadura mediante arco eléctrico utilizando electrodos metálicos recubiertos, convirtiéndose de este modo en el precursor de la soldadura por arco metálico [7].

A partir de entonces, se desarrollaron multitud de técnicas de soldadura por fusión como por ejemplo el proceso de soldadura por arco o por gas, sin embargo con estas técnicas, la densidad de energía es alta y por tanto la zona afectada por el calor es mucho más amplia, dando lugar a defectos tales como solidificación, distorsiones, propiedades mecánicas reducidas, entre otras clases de defectologías [8].

A mediados del siglo XX se desarrollaron técnicas como el proceso de soldadura por arco de plasma o soldadura por rayo laser, los cuales eran capaces de unir materiales más gruesos obteniendo una soldadura sólida y con una zona afectada por el calor mucho más estrecha. A pesar de este avance, las propiedades mecánicas tales como la ductilidad, resistencia a la tracción o resistencia a la fatiga seguían viéndose afectadas por el alto calor generado en la zona de soldadura. Además, estas técnicas no son adecuadas para elementos reactivos como el aluminio o el magnesio [9].

Estos inconvenientes hicieron que se hiciera un mayor hincapié en la exploración de técnicas de soldadura en estado sólido como son la soldadura por resistencia o la soldadura por fricción, en las que la unión se produce a una temperatura inferior al punto de fusión de los materiales base además de no ser necesario el uso de materiales de relleno o gases de protección.

Por un lado, la soldadura por resistencia tampoco era una buena opción para la unión de materiales que tengan una alta conductividad eléctrica, tales como el aluminio o el cobre, ya que la coalescencia en este tipo de soldaduras se obtiene gracias al calor generado por resistencias eléctricas [8].

Por otro lado, se avanzó en la exploración de procesos de soldadura por fricción, consiguiéndose unir piezas gracias al calor generado por fricción entre ellas. Es decir, la unión se generaba con una pieza de trabajo en movimiento y un componente fijo, que al friccionar entre ellos obtienen el calor y la temperatura necesarias para que exista deformación plástica, dándose lugar finalmente la unión entre ambas piezas [8].

Uno de los avances más significativos dentro de estas investigaciones sobre los procesos de soldadura por fricción fue la aparición del proceso de soldadura por fricción-agitación, el cual es un tipo de proceso de soldadura sólida patentado por The Welding Institute, Reino Unido en el año 1991, usada inicialmente solo para aleaciones de aluminio [10].

Wayne Thomas y sus compañeros de investigación se dieron cuenta de que la junta de soldadura obtenida por FSW estaba libre de defectos en un 90% y que no fundía la pieza de trabajo como en el caso de los procesos de soldadura por fusión, lo que abría una posibilidad a disminuir en gran medida los defectos encontrados hasta el momento en las uniones realizadas por dichos procesos [11,12].

Después del desarrollo de este gran descubrimiento, las industrias comenzaron a implementar esta técnica para la fabricación de componentes de aluminio, como por ejemplo para la fabricación de paneles de aluminio destinados a los congeladores de los barcos o tanques de combustible para naves espaciales. Este proceso reducía al 50% los costes y hacía disminuir el tiempo de fabricación de 23 a 6 días [9].

En las últimas décadas, diversos profesionales de la investigación han dedicado parte de su estudio al análisis de este tipo de unión con el objetivo de desarrollar métodos o procesos que permitan fijar piezas metálicas, o en la actualidad incluso no metálicas, de la forma más permanente y fuerte posible.

Uno de los parámetros indicado por la gran mayoría como el más importante a la hora de realizar una soldadura mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación es la geometría de la herramienta. Los primeros diseños de herramientas consistían en hombros planos y sin rasgos distintivos. Algunas de las primeras innovaciones de diseño de herramientas para el FSW fueron desarrolladas por Thomas et al. [13].

Siguiendo con sus estudios los cuales estaban centrados en las herramientas necesarias para llevar a cabo el proceso, Thomas et al. fueron unos de los primeros investigadores que también estudiaron el proceso centrado en el acero, demostrando que el desgaste de la herramienta planteaba una gran barrera para la aplicabilidad del proceso [14].

Debido a la importancia que comenzaba a tener este tipo de soldadura para la industria de la automoción, aeroespacial o marina, sumado a la falta de información al respecto, R.A. Prado et al. realizaron también un estudio sobre el desgaste de las herramientas. Para ello examinaron dicho desgaste al realizar el proceso de soldadura por fricción-agitación entre placas de aluminio AA6061, y lo compararon con los resultados obtenidos ante el desgaste de herramientas obtenidos al realizar el mismo proceso en una placas de aluminio MMC (AA6061-T6 + 20% vol. Al_2O_3).

Tal es la importancia de la herramienta durante el proceso que es posible encontrar numerosos estudios sobre dicho tema, por ejemplo, Pabitra Maji et al. investigó las diferentes tipologías de herramientas para el proceso así como su geometría, los materiales, y el comportamiento al desgaste de las mismas dando como conclusión una serie de comentarios al respecto de cada una, afirmando cuales son, según su investigación, los tipos de herramientas más apropiadas dependiendo del tipo de resultados que se busquen [15].

K. Kumar et al. estudiaron la influencia de la herramienta de soldadura por fricción-agitación sobre el flujo de material y la correspondiente formación de la unión soldada, afirmando que existen dos tipos de flujos, el forzado por la acción del "pin" y el correspondiente a la acción realizada por el "hombro". Finalmente se propone al final de su investigación un mecanismo de formación de soldadura para este tipo de proceso [16].

Liu et al. realizaron una investigación la cual estuvo basada en el estudio de la influencia de la geometría de la herramienta sobre la resistencia a la tracción de las soldaduras. Para ello, realizó diferentes procesos de soldadura por fricción-agitación en placas de 6061Al-T651 de seis milímetros de espesor con diversos parámetros de soldadura y dimensiones de la herramienta [17].

Otro de los parámetros importantes a la hora de realizar el proceso de soldadura por fricción-agitación es la inclinación de la herramienta sobre el plano de trabajo. Por ello, Narges Dialami et al. investigaron la influencia del ángulo de inclinación de la herramienta sobre el flujo de material generado en la zona de la unión soldada. Concluyeron que la modificación de dicho ángulo ayuda a prevenir la generación de defectos en la soldadura gracias a que el flujo de material en el lado posterior de la herramienta mejora considerablemente [18].

Por otro lado, Long et al. investigaron la influencia del ángulo de inclinación de la herramienta mediante el desarrollo de un modelo termomecánico en 3D. En dicha investigación estudiaron y compararon los resultados obtenidos por el modelo cuando la herramienta estaba inclinada 2° y 0°. Encontraron defectos por porosidad con 0° de inclinación, mientras que con 2° de inclinación la zona estaba libre de porosidad [19].

Llegados a este punto es fácil comprobar que el ángulo de la herramienta es importante a la hora de analizar la calidad de la unión de soldadura, no obstante, también tiene su influencia sobre los efectos del ángulo de inclinación de la herramienta en la transferencia de calor y la transferencia de masa durante el proceso de soldadura por fricción-agitación.

Shuai Zhang et al. en su investigación proponen un modelo geométrico con condiciones límites para estudiar dicha influencia del ángulo de inclinación. Concluyen tres efectos sobre la influencia de la inclinación de la herramienta en la transferencia de calor y la transferencia de masa en base a los resultados de la simulación. Primero, la herramienta de soldadura genera una temperatura más alta en el lado de avance, en segundo lugar, la herramienta de soldadura genera una mayor fuerza de fricción en la interfaz herramienta/pieza de trabajo, lo que mejora significativamente la velocidad del flujo del material detrás de la herramienta y en tercer lugar, la herramienta de soldadura genera una acción de agitación más fuerte en el material alrededor de la herramienta de soldadura, lo que es beneficioso para la mezcla de materiales y la formación de soldaduras por fricción y agitación [20].

Respecto al estudio de la influencia de la velocidad de giro de la herramienta no hay tanta cantidad de estudios realizados, sin embargo, Mouminah Amatullah et al. estudiaron la influencia de este parámetro sobre el flujo de material y la generación de calor alrededor de la zona de soldadura durante el proceso en placas de aluminio. Su conclusión más genérica fue afirmar el hecho de que este parámetro es uno de los más importantes a controlar en el proceso debido a su capacidad de variar o controlar las propiedades mecánicas y microscópicas de la unión soldada. Además confirmó que, para las aleaciones de aluminio serie 2xxx, el aumento de la velocidad de giro provoca un aumento del ancho de la zona de recristalización y por otro lado, en el caso de las aleaciones de aluminio de la serie 7XXX, un aumento en la velocidad de giro de la herramienta provoca una disminución en la calidad de las propiedades mecánicas de la unión [21].

Por otro lado, Shengchong Ma et al. estudiaron la influencia de la velocidad de avance de la herramienta a la hora de realizar el proceso de soldadura. Respecto al tamaño de grano en la zona de la unión soldada, observaron un aumento al incrementar la velocidad de avance de la herramienta de 75 mm/min hasta 100 mm/min. A esta velocidad de avance, también se obtuvo el mayor valor de resistencia a la tracción aunque este aumento de la velocidad hizo que la dureza de la unión se redujera considerablemente debido al efecto termodinámico que tuvo lugar en la zona afectada por el calor, aunque dicha zona, fue considerablemente menor que a velocidades más bajas [22].

La influencia del estado de la herramienta con la que se lleva a cabo el proceso también ha sido analizada . Haijun Wang et al. afirmaron con su estudio que el estado de la herramienta es un factor importante que afecta la calidad de la soldadura. Para ello realizaron experimentos de soldadura por fricción-agitación en aleaciones de aluminio AA2219 con herramientas bajo diferentes condiciones de desgaste para observar los cambios en las características topográficas de la superficie. Los resultados mostraron que una mala calidad superficial de las herramientas produce la aparición de rebabas a lo largo de la zona de unión, así como una mala textura exterior del propio cordón de soldadura [23].

A pesar de que a sus inicios el proceso de unión mediante soldadura por fricción-agitación estaba destinado a placas del mismo material, se ha progresado en este campo consiguiéndose uniones de placas de diferente material. Uzun H. et al. realizó un estudio sobre la unión de una placa de aleación de aluminio Al6013-T4 con una placa de acero inoxidable X5CrNi18-10. En dicho estudio se obtuvieron buenos resultados de dureza y resistencia a la fatiga, lo que confirmaba que es posible realizar uniones de diferentes materiales mediante este proceso de soldadura por fricción-agitación [24].

Posteriormente se han llevado a cabo más investigaciones en uniones soldadas de materiales diferentes como las las investigaciones. R.S. Coelho et al. En su trabajo analizaron la unión de placas de aluminio con diferentes placas de acero de alta resistencia con los mismos parámetros para poder realizar una comparativa posterior. Los resultados obtenidos arrojaron que, aunque existían ciertas diferencias en la morfología microscópica de la unión soldada, la resistencia de ambas era similar, lo que confirma que la eficiencia de la unión depende principalmente de las propiedades de la zona afectada termodinámicamente [25].

CAPÍTULO 3. PROCESOS DE UNIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

Si se observa los objetos que están a nuestro alrededor, encontramos una gran cantidad de ellos los cuales están formados por una sola pieza. Sin embargo, es imposible que todos los objetos que se fabriquen estén fabricados con un solo elemento. Es donde entra en juego los diferentes procesos de unión existentes.

Estos procesos de unión son todos aquellos que llevan intrínsecamente con ellos la acción de unir dos o más partes del mismo o diferente material. Según el tipo de unión es posible realizar una pequeña clasificación general mostrada a continuación con la ayuda del siguiente esquema:

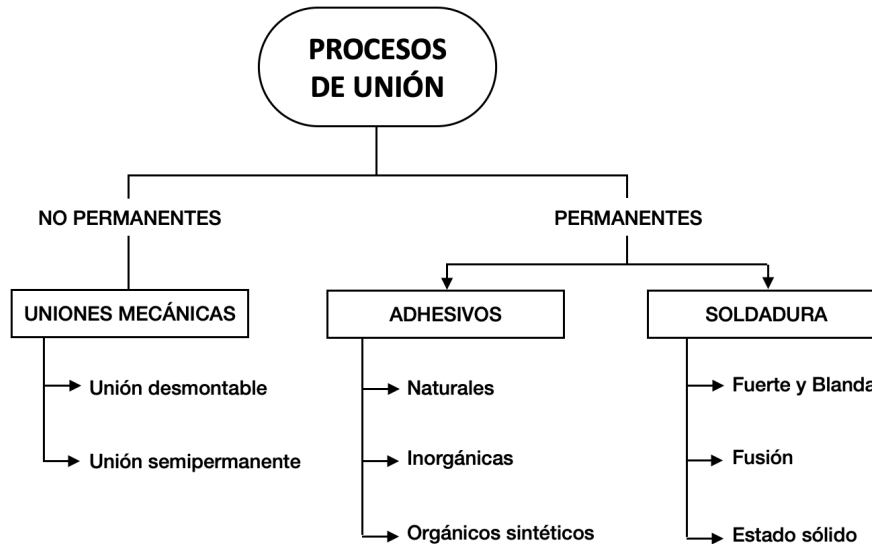


Figura 1: Esquema tipos de procesos de unión.

Las uniones no permanentes son aquellas uniones las cuales es posible separar con relativa facilidad sin que los elementos que conforman dicha unión sufran daño alguno. Con este tipo de procesos, la unión no es continua ni homogénea. Atendiendo a la clasificación mostrada en la figura 3, dentro de este tipo de uniones se encuentran las uniones mecánicas.

Por otro lado, las uniones permanentes son aquellas uniones las cuales no es posible separar sus elementos sin que éstos sufran un daño mínimo. En este grupo se encuentran principalmente los procesos de unión por adhesivo y por soldadura [1,26,27].

3.2. UNIONES MECÁNICAS

Las uniones mecánicas pertenecen al grupo de uniones no permanentes y están clasificadas a su vez en dos subgrupos:

- Unión desmontable: es posible la separación de sus elementos para realizar procesos de mantenimiento, reparación o reemplazamiento.
- Unión semipermanente: es aquella unión la cual sería posible desmontar, aunque no se tiene intención de llevar a cabo dicha separación de sus elementos.

El uso más común de sujeción mecánica es el uso de los tornillos, tuercas, pernos, pasadores y otra gran cantidad de variedades [1,26,27].

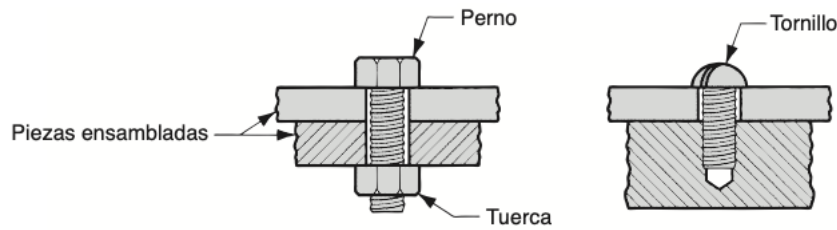


Figura 2: Ejemplos típicos de ensamblajes mecánicos. [26]

3.3. UNIONES ADHESIVAS

Las uniones adhesivas posiblemente fueron uno de los primeros métodos de unión permanente que se comenzaron a utilizar en la antigüedad. Una de sus características más beneficiosas es la posibilidad de poder unir tanto materiales iguales como diferentes, lo que hace que tome importancia dentro de las tecnologías de unión.

Los adhesivos son materiales capaces de mantener unidas a las superficies de otros dos materiales sólidos proporcionando la fuerza de atracción física entre las dos superficies. Por lo general no es una sustancia metálica, si no que se trata normalmente de un polímero el cual se usa de relleno entre el espacio que existe entre los dos elementos que se requiere unir, los cuales se denominan sustratos o adherentes.

Para que se produzca la adhesión es necesario considerar el material de los sustratos a unir, y con carácter general puede decirse que se ha de cumplir que la tensión superficial del adhesivo, en estado líquido, ha de ser menor que la del sustrato. Además la viscosidad y las condiciones de aplicación del adhesivo han de facilitar que la superficie del sustrato sea mojada completamente.

La unión por este tipo de proceso es continua y no altera las propiedades de los materiales que sufren dicha unión. Existe una gran variedad de adhesivos disponibles en el mercado, clasificados principalmente en adhesivos reactivos y no reactivos (prepolimerizados).

Los adhesivos prepolimerizados pueden encontrarse en fase líquida como las soluciones acuosas, soluciones orgánicas y las emulsiones. En fase sólida es posible encontrar los termofusibles como el EVA (Ethylene Vinyl Acetate) o los piezosensibles. La mayoría son termoplásticos y, en líneas generales, se caracterizan por ablandarse hasta que funden con la temperatura; por ello su resistencia al calor y a la fluencia es reducida; esto les da unas propiedades buenas para las aplicaciones de sellado con una resistencia al despegue aceptable [1].

En cuanto a los adhesivos reactivos, se caracterizan por endurecer mediante una reacción química, lo que influye en el tiempo de curado. Esta reacción química puede ser bien por poliadición como los denominados anacrónicos, cianoacrilatos y acrílicos, o bien de policondensación, como las resinas epoxi y a las siliconas. La mayoría son termoestables y sus propiedades finales son una buena resistencia a la fluencia, alto módulo de elasticidad y mayor resistencia a la temperatura que el resto. Su fragilidad depende, entre otras cosas, de la estructura molecular del monómero; sin embargo, se pueden conseguir comportamientos mecánicos diferentes ajustando las composiciones y condiciones de curado. En consecuencia, son los que se emplean para uso estructural [1].

Las uniones realizadas con adhesivos no son tan fuertes como las realizadas por soldadura o elementos mecánicos, por lo que, al realizarse se debe de tener en consideración algunos principios [1,26,27]:

- Maximizar el área de contacto entre las superficies a unir.
- Procurar un diseño donde las tensiones que se apliquen sean de compresión o en su defecto de tracción o de cizallamiento ya que de esta forma se consiguen adhesiones más resistentes debido a que la distribución de tensiones es uniforme (figura 3).
- Evitar uniones que soporten cargas en desgarro o pelado, pues son uniones más débiles (figura 4).

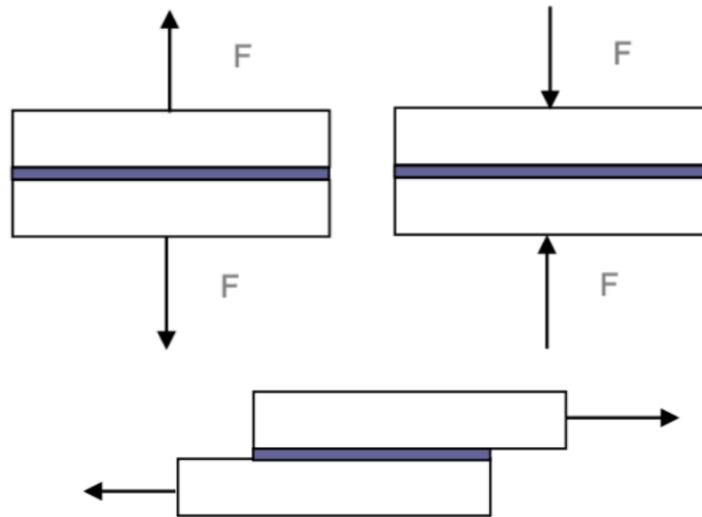


Figura 3: Carga en tracción (izq.), compresión (derch.) y cizallamiento (debajo) en uniones adhesivas. [1]

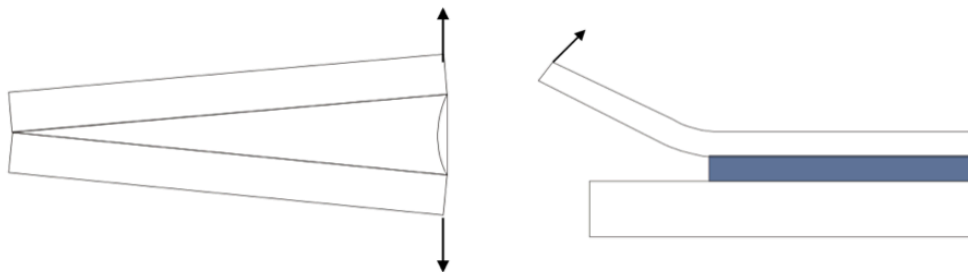


Figura 4: Carga en desgarro (izq.) y pelado (derch.) en uniones adhesivas. [1]

Por tanto, es posible afirmar que al diseñar este tipo de uniones se debe buscar que en la unión se produzcan esfuerzos de corte o tensión y, además, evitar hendiduras o desprendimientos que debiliten dicha unión [26,27].

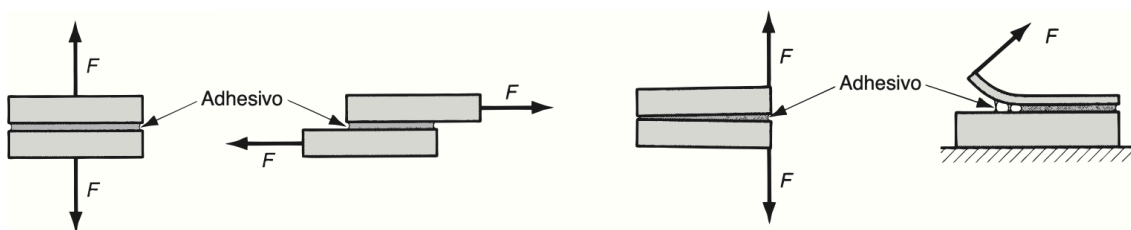


Figura 5: Tipos de esfuerzos a considerar en la unión por adhesivos. [26]

3.4. UNIONES SOLDADAS

Continuando con las uniones permanentes se encuentra el grupo de uniones realizadas mediante el proceso de soldadura. Este tipo de proceso se caracteriza por que establece continuidad entre las partes a unir con o sin calentamiento, con o sin aplicación de presión, con o sin aportación de material.

De forma genérica se conoce como unión por soldadura al proceso de fijación de dos o más piezas, normalmente de metal, que mediante la aplicación de calor y/o la acción de fuerzas externas, se funde parte de dichas piezas o se añade un material de aportación, que al enfriarse produce la unión entre ambas partes.

La soldadura puede ser de carácter homogéneo o heterogéneo. Se entiende como soldadura homogénea aquella la cual se lleva a cabo para la unión de piezas de la misma composición sin aportación de material o con la aportación de material de misma composición que las piezas a unir. Por otro lado, se conoce como soldadura heterogénea aquella en la que se unen piezas de diferente composición con o sin aporte de material.

Aunque anteriormente se define de una forma muy genérica en qué consiste el proceso de unión por soldadura, existen diferentes tipos dependiendo del resultado que se quiera obtener o de las características de los materiales a unir. Se dividen principalmente en tres grandes grupos descritos en los siguientes subapartados [1,26,27].

3.4.1. SOLDADURA FUERTE Y SOLDADURA BLANDA

La soldadura fuerte o “*brazing*” es un tipo de soldadura heterogénea en el que el material de aporte se coloca entre las superficies a unir. Dicho material de aportación es de diferente composición que el material de las piezas a unir y tiene una temperatura de fusión mucho menor, por lo que durante el proceso de soldadura el material de aportación se funde elevando dicha temperatura, consiguiendo que éste penetre y se extienda entre las piezas a unir. Esta temperatura es elevada, por encima de los 450°C, pero nunca se alcanzan las temperaturas necesarias para que se funda los materiales base.

Es un tipo de soldadura bastante extendido en la industria en general, llevándose a cabo sobre todo en tareas de reparación y mantenimiento debido a su gran versatilidad, rapidez y a que no necesita de grandes temperaturas en comparación con otros procesos de soldadura. Sin embargo, para obtener buenos resultados de resistencia, limpiar la zona de soldadura tanto química como mecánicamente es necesario [1,26,27].

Dentro de este tipo de soldadura, se puede realizar una clasificación en función del medio por el que se consigue la energía necesaria para llevarse a cabo [1,26,27]:

- Convección: Soldadura fuerte en horno.
- Conducción: Soldadura fuerte por inmersión.
- Descarga eléctrica: Soldadura fuerte por resistencia.
- Corriente eléctrica: Soldadura fuerte por inducción.
- Gas: Soldadura fuerte por llama.
- Radiación: Soldadura fuerte por infrarrojos o láser-brazing.

El material de aportación se encuentra en diferentes estados como por ejemplo, alambres, varillas, polvos o pastas. Dentro de estos materiales se encuentran por ejemplo aleaciones de aluminio-silicio, magnesio, cobre-zinc, plata o níquel-cobalto.

Algunas de las características más importantes a tener en cuenta a la hora de su elección son [1,26,27]:

- Temperatura de fusión inferior a la de los materiales de las piezas a unir.
- Alta fluidez para conseguir una buena penetración en el material base.
- Tensión superficial baja para una buena humificación.
- Deben evitarse las reacciones química y/o físicas con el material base.
- Debe ser capaz de conseguir una unión de resistencia adecuada para la aplicación requerida.

Los fundentes son esenciales para conseguir buenas soldaduras. Con ellos se evita la corrosión, óxido y otras impurezas. Éstos deben de tener también una temperatura de fusión inferior a la del material base y deben de poder eliminarse con facilidad tras la operación de soldadura [1,26,27].

Por otro lado, la soldadura blanda o “soldering” se diferencia principalmente de la soldadura fuerte en que durante este proceso, el material de aportación se funde y distribuye por acción capilar entre las superficies a unir sin superar los 450°C. Es decir, la temperatura de fusión del material de aportación no es nunca mayor a 450°C [1,26,27].

Como aplicación industrial, debido a su alta conductividad eléctrica y térmica en la unión, la soldadura blanda está estrechamente relacionada con procesos de unión de elementos electrónicos, aunque también se usa para uniones mecánicas que no vayan a estar sujetas a altos esfuerzos o temperaturas elevadas. Al igual que la soldadura fuerte, es necesaria una limpieza previa tanto química como mecánica para obtener resultados óptimos.

Al igual que se hizo con la soldadura fuerte, a continuación es posible observar una clasificación de los procesos de soldadura blanca dependiendo de la fuente de energía [1,26,27]:

- Convección: Soldadura blanda en horno o con pasta/reflujo.
- Conducción: Soldadura blanda con olas.
- Descarga eléctrica: Soldadura blanda por resistencia.
- Corriente eléctrica: Soldadura blanda por inducción.
- Gas: Soldadura blanda por llama.
- Radiación: Soldadura blanda por infrarrojos o láser-brazing.

Respecto a los materiales de aportación para este proceso se encuentran aleaciones de estaño-plomo, estaño-plata, estaño-zinc o aleaciones fusibles, las cuales son aleaciones de bismuto al 50% junto a plomo y estaño. Como es posible ver, destaca el uso de estaño y plomo, los cuales son materiales perfectos para este tipo de proceso debido a sus bajas temperaturas de fusión [1,26,27].

Las características que deben de respetar generalmente estos materiales de aportación son principalmente las mismas que para el proceso de soldadura fuerte.

Respecto a las características de los fundentes utilizados durante este proceso destacan la capacidad de remover películas de óxido y manchas en la superficie base, evitar la oxidación durante el calentamiento y poseer una alta capacidad de humificación de los materiales base. Éstos suelen ser orgánicos como las resinas, o inorgánicos como el ácido clorhídrico o el ácido fosfórico [1,26,27]

3.4.2.. SOLDADURA POR FUSIÓN.

La soldadura por fusión es definida como la fusión y coalescencia de materiales mediante la aplicación de calor. Para llevar a cabo este proceso es posible el uso de materiales de aporte o no. Cuando no se aplica material de aporte en la zona de soldadura se conoce como soldadura autógena.

Durante el proceso de soldadura por fusión, los extremos de las piezas base son sometidos a un aumento de la temperatura hasta alcanzar su fusión. Una vez alcanzada dicha temperatura de fusión los materiales se licuan formando un baño líquido el cual estará formado por los materiales de los extremos de las piezas bases y por el material de aportación en el caso de las soldaduras de tipo no autógenas .

Este baño líquido se encuentra en lo que es conocido como zona de fusión y conforma una de las partes características del proceso descrito. Dicha zona está caracterizada por una alta homogeneidad entre los componentes que lo conforman [1,26,27].

La segunda zona o parte característica es la denominada como interfaz de soldadura. Esta zona no es más que una estrecha banda de material base fundido o parcialmente fundido que separa la zona de fusión de la zona afectada por el calor. Esta banda se solidifica inmediatamente después del proceso de fusión, pero antes de mezclarse con el metal en la zona de fusión. Es decir, la composición química de esta zona es igual a la del metal base.

Por otro lado, las uniones permanentes son aquellas uniones las cuales no es posible separar sus elementos sin que éstos sufran un daño mínimo. En este grupo se encuentran principalmente los procesos de unión por adhesivo y el proceso de unión por soldadura. Por último, la tercera zona típica de la soldadura por fusión es aquella la cual ha sido afectada por el calor. Aquí el metal no llega a fusionar debido a que las temperaturas a las que se ve sometido no son nunca mayores a su punto de fusión, aunque si es lo suficientemente alta para que produzca cambios microestructurales en el material [1,26,27].

También es posible definir otra zona, la zona de metal base no afectado. Esta zona tiene una menor importancia, ya que es la la zona donde el metal base no se ha visto afectado, y por tanto no ha ocurrido ningún cambio metalúrgico.

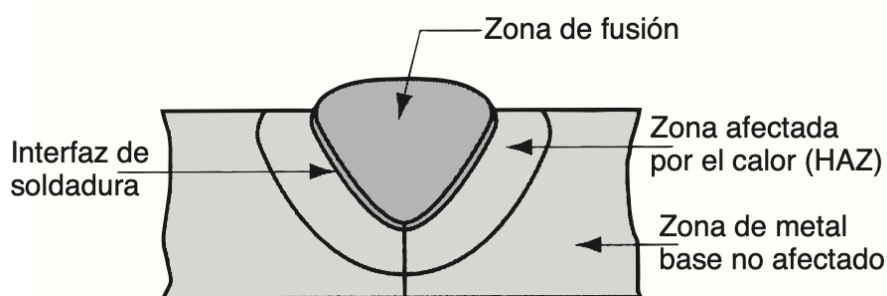


Figura 6: Sección transversal de una soldadura por fusión. [26]

Respecto a la clasificación del proceso de soldadura por fusión, es posible realizarla según varios criterios como por ejemplo, en función del tipo de fase durante la soldadura (sólida o líquida), en función de la protección del baño (vacío, gas, con revestimiento o sin protección), en función del uso (manual, semiautomática, automática o mecánica) o, según la fuente de energía utilizada para llevar el proceso [1,26,27].

A continuación, con el objetivo de utilizar el mismo criterio que en ocasiones anteriores, se detalla la clasificación de los tipos de procesos de soldadura por fusión dependiendo de la fuente de energía utilizada para llevar a cabo el proceso [1,26,27]:

- Descarga eléctrica: Soldadura por fusión por arco.
- Corriente eléctrica: Soldadura por fusión por electroescoria o por electrogas.
- Gas: Soldadura por fusión por llama.
- Radiación: Soldadura por fusión por haz de electrones o por láser.
- Líquido: Soldadura por fusión aluminotérmica o por moldeo.

3.4.3. SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO.

En este tipo de procesos la unión entre las superficies de las piezas se obtiene mediante presión solamente o mediante calor y presión, sin embargo, en este segundo caso la cantidad de calor ejercida durante el proceso no será nunca suficiente para llegar a la temperatura de fusión de los materiales en cuestión. Es decir, usando solo esta cantidad de calor externo, nunca se llegará a fundir las piezas que se disponen a unir.

Durante la soldadura en estado sólido, la presión ejercida con o sin calor añadido, genera suficiente energía para producir la unión entre ambas partes mediante una fusión localizada de las superficies de empalme. Por otro lado, mientras se realiza esta tipología de proceso de soldadura ocurrirá al menos uno de los siguientes fenómenos, e incluso es posible que se dé incluso una combinación de más de uno de ellos: Difusión, Presión o Movimientos relativos.

Debido a que el proceso que ocupa el tema central del presente documento, Soldadura por fricción-agitación (FSW, en sus siglas inglesas) pertenece a este grupo o tipología de soldadura, se realizará a continuación un análisis más exhaustivo de cada fenómeno de los anteriormente nombrados, incluyendo una breve descripción de los diferentes tipos de procesos de soldadura que se incluyen en cada uno de dichos fenómenos [1,26,27].

3.4.3.1. SOLDADURA POR PRESIÓN

Se produce una deformación plástica, normalmente pequeña, entre las superficies de las piezas a unir. Dentro de esta tipología de procesos en algunas ocasiones se utiliza la combinación entre presión y aportación de calor por resistencia para mejorar su capacidad de soldabilidad. En la mayor parte de las ocasiones, concretamente casi en su mayoría se lleva a cabo sin aportación de material. Dentro se encuentran las siguientes metodologías de soldadura [1,26,27]:

- Soldadura por laminación:

Este tipo de proceso se realiza a temperatura ambiente. La fuerza necesaria para alcanzar una temperatura que permita la deformación plástica de los materiales base se alcanza mediante la presión de un par de rodillos. Para este proceso es importante la preparación del material base. Además es posible realizarlo a altas temperaturas siempre recordando que en los procesos de soldadura en estado sólido nunca se llega a la temperatura de fusión de los materiales de las piezas base.

También es posible realizar esta unión de forma localizada mediante el uso de grafito o cerámica a modo de agente separador, lo que se conoce como “bloqueador”. Un ejemplo típico de este tipo de soldadura es el revestimiento o chapeado [1,26,27]:

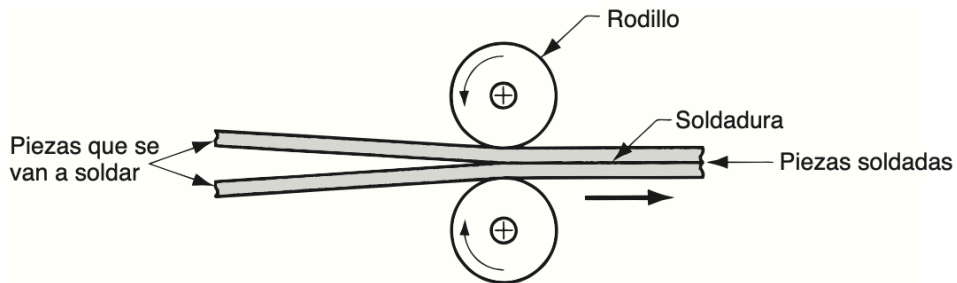


Figura 7: Proceso de unión por rodillos. [27]

o Soldadura por explosión:

También conocida como soldadura explosiva. Durante este proceso se produce una rápida coalescencia entre las piezas a unir gracias a la acción de la energía disipada durante la detonación de un explosivo. No se usa material de relleno ni calor externo.

La velocidad cinética con la que se golpean los componentes a unir generan presiones de contactos extremadamente elevadas, facilitando la deformación plástica de los elementos. Algunos de sus parámetros más importantes son la velocidad de choque y el ángulo de impacto durante la detonación, ya que una variación de los mismos puede provocar lo que se conoce como una interfaz de unión rizada o ondulada. Este tipo de interfaz aumenta la resistencia de la la unión debido a que el área de contacto es mayor [1,26,27].

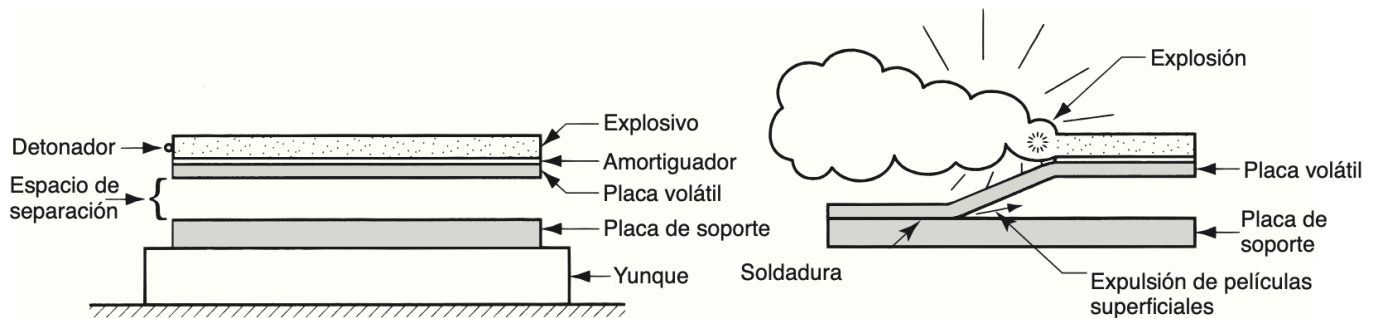


Figura 8: Proceso de soldadura por explosión. [27]

- Soldadura a tope por presión:

Durante este proceso se genera calor a una velocidad muy alta gracias a la resistencia por arco que generan los elementos al entrar en contacto. Una vez alcanzada la temperatura necesaria, la interfaz comienza a ablandarse formándose la soldadura mediante deformación plástica que produce la aplicación de fuerzas axiales controladas que se ejercen sobre la superficie de unión. Es un proceso totalmente automatizable [1,26,27].

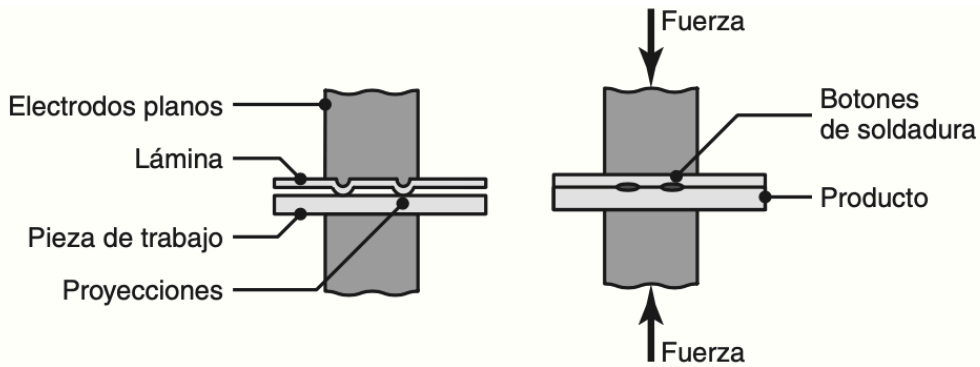


Figura 9: Proceso de soldadura a tope por presión. [26]

- Soldadura de proyección por resistencia:

Se utiliza una combinación de presión y calor para obtener la coalescencia entre materiales. Dicho calor es generado mediante un repujado de las superficies a unir debido a la acción de una resistencia eléctrica la cual está dirigida hacia el flujo de unión. No se utilizan fundentes ni material de relleno, y los electrodos utilizados durante el proceso no son consumibles [1,26,27].

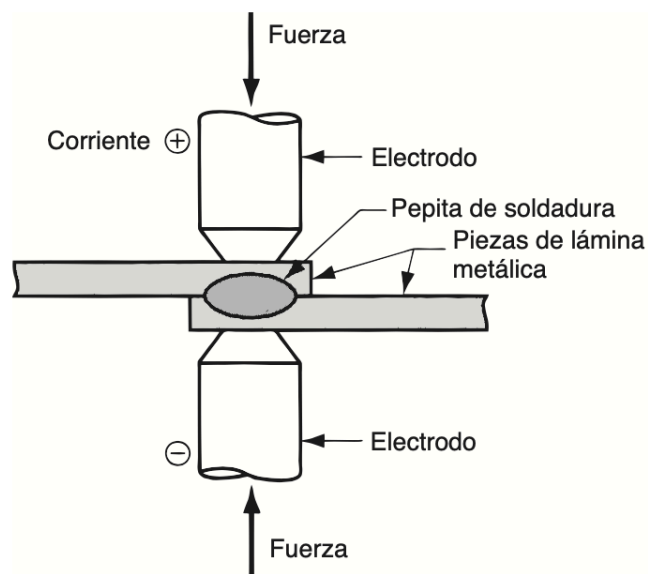


Figura 10: Proceso de soldadura de proyección por resistencia. [26]

3.4.3.2. SOLDADURA POR MOVIMIENTOS RELATIVOS

Para comprender esta tipología de soldadura sólida, se acudirá a la descripción del proceso por soldadura ultrasónica, explicado a continuación:

- Soldadura ultrasónica:

Durante este proceso la soldadura entre los componentes se lleva cabo gracias a la acción de fuerzas normales estáticas y a la aplicación de esfuerzos cortantes oscilatorios de frecuencia ultrasónica. Estos esfuerzos cortantes se aplican mediante la acción del transductor y son los causantes de que aparezca la deformación plástica necesaria para llevar a cabo la coalescencia o unión.

Las temperaturas alcanzadas debido a la fricción son bajas, siempre muy por debajo del punto de fusión de los materiales a unir, aproximadamente un tercio de la mitad de dicha temperatura, y no se requieren materiales de aportación ni fundentes para llevar a cabo el proceso de forma exitosa.

Este proceso es versátil y generalmente se utiliza para uniones de piezas pequeñas de materiales suaves tales como el cobre o el aluminio, o para materiales no metálicos como los plásticos [1,26,27].

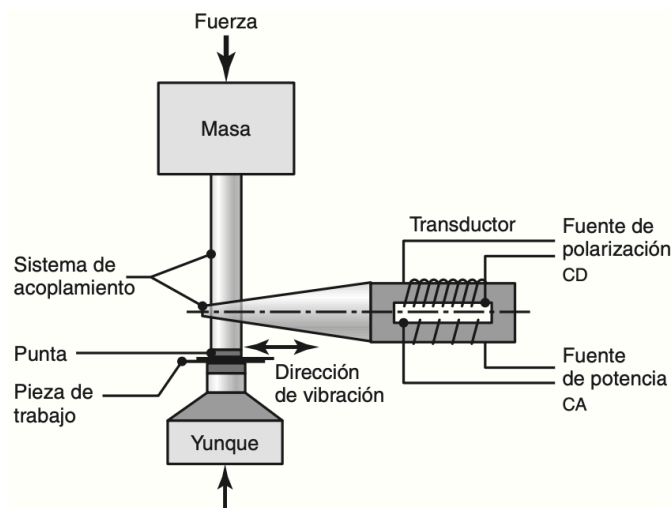


Figura 11: Proceso de soldadura ultrasónica. [26]

3.4.3.3. SOLDADURA POR DIFUSIÓN:

Ocurre cuando existe transferencia de átomos a través de una interfaz, por ello, con el objetivo de mejorar la resistencia de la soldadura, se realiza una aplicación de calor externo. Este calor externo es posible generarlo de diferentes maneras ya sea mediante resistencias eléctricas, calor interno, inducción o por fricción [1,26,27].

- Soldadura por difusión:

Es un tipo de proceso basado en la aplicación de calor y presión, generalmente bajo la acción de una atmósfera controlada. La resistencia de la unión a realizar depende del movimiento de los átomos a través de la interfaz (difusión) y a la deformación plástica de las piezas a unir.

Por un lado, el calor, el cual es mínimo, se consigue con la ayuda de hornos o resistencias eléctricas. Por otro lado la presión se consigue mediante la acción de pesos muertos, prensa y/o dilatación térmica de las partes a unir mediante presión diferencial de gas.

Se suele utilizar para la unión de materiales diferentes, utilizando con frecuencia material de aportación para facilitar la aparición del fenómeno de la difusión [1,26,27].

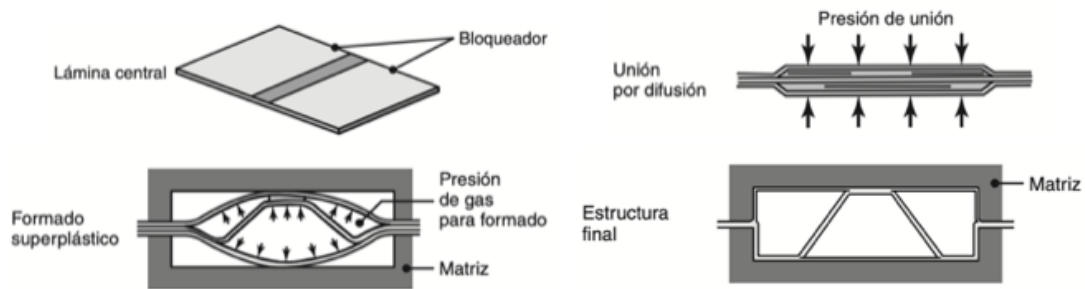


Figura 12: Proceso de soldadura por difusión. [26]

o Soldadura por resistencia eléctrica:

Es el tipo de proceso predominante en este grupo. En él se obtiene la fusión mediante electrodos opuestos, concretamente en un punto superpuesta de las piezas a unir. Si la soldadura se hace correctamente, su resistencia es similar a la del material soldado.

Hay diferentes tipos, pero el más común es el tipo prensa, durante el cual el electrodo superior tiene un movimiento rectilíneo y perpendicular a la superficie de unión proporcionado por una prensa vertical.

El proceso es perfecto para largas tardas de producción y normalmente se usa para unir láminas metálicas con un espesor de 3 mm o en ocasiones incluso menor, mediante rodaduras de puntos consecutivos [1,26,27].

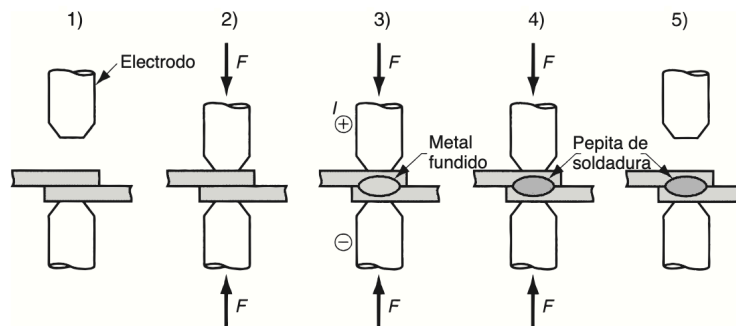


Figura 13: Proceso de soldadura por resistencia eléctrica. [27]

o Soldadura por fricción:

Durante este tipo de soldaduras, la coalescencia entre materiales se consigue mediante el calor producido por la acción de la fricción mecánica entre superficies además de la presión ejercida durante el proceso.

El uso de este proceso está muy extendido en las industrias automotriz, aeronáutica, agrícola, petrolera y del gas natural ya que debido a sus ciclos rápidos es ideal para la alta producción en masa.

A su vez, dentro de este método de soldadura existen diferentes tipos o metodologías de aplicación, encontrándose entre ellas el proceso de soldadura por fricción-agitación. El siguiente apartado estará centrado en el análisis y explicación de los diferentes tipos existentes de soldadura por fricción [1,26,27].

CAPÍTULO 4. PROCESOS DE SOLDADURA POR FRICCIÓN

Como se comentaba anteriormente, el principio general que cumplen los diferentes métodos dentro de este grupo es que la coalescencia entre los materiales a unir se consigue gracias a la acción de un calor generado en ambas superficies de contacto y su posterior deformación plástica. Este calor es producido por un movimiento relativo establecido entre las piezas de unión que están a su vez sometidas a fuerzas axiales de compresión.

Este grupo de procesos de soldadura, están aun en vías de investigación y desarrollo, sin embargo este hecho no impide que ya se posicionen claramente como una opción y, elección real, en el mercado industrial a la hora de realizar cierto tipos de procesos de soldadura.

Los procesos de soldadura por fricción producen normalmente una estrecha zona afectada por el calor y no suelen usar material de aportación, ni fundentes, ni gases protectores, lo que hace que el proceso se vuelva aún más simple y sostenible en comparación con otros métodos de soldadura. Por otro lado, con este tipo de procesos de soldadura es posible unir materiales disímiles.

Todo esto hace posible afirmar que la soldadura por fricción es un proceso económico e innovador, que, unido a la simplicidad del principio general por el que consiguen la unión, además del bajo coste energético requerido por este tipo de procesos hacen de este tipo de procesos sean una elección perfecta en muchos ámbitos de la industria actual, ya que además son respetuosos con el medio ambiente.

Sin embargo, no todo son beneficios, existen también algunos inconvenientes los cuales hay que tener en cuenta. Por ejemplo, a pesar de que el principio que cumplen para llevar la coalescencia es sencillo, su ejecución en la mayoría de los casos no es tan sencilla ya que requiere de cierta experiencia y conocimiento del propio proceso.

En este tipo de procesos intervienen una gran cantidad de variables la cuales se deben de controlar para tener una buena unión, es decir, cuanto mayor sea el control de dichas variables mayor será la calidad final de la unión soldada. Algunas de estas variables son, por ejemplo, el tiempo que deben estar en contacto las piezas, la velocidad a la que deben girar o moverse relativamente, la fuerza máxima aplicable, velocidad de avance, velocidad de giro de la herramienta, etc.

Actualmente se distinguen 4 tipos diferentes de procesos de soldadura por fricción, que a continuación se detallarán de manera resumida:

- Soldadura por fricción lineal (Linear Friction Welding - LFW).
- Soldadura por fricción rotacional (Rotational Friction Welding - RFW).
- Soldadura por inercia (Inertia Friction Welding - IFW).
- Soldadura por fricción-agitación (Friction Stir Welding - FSW).

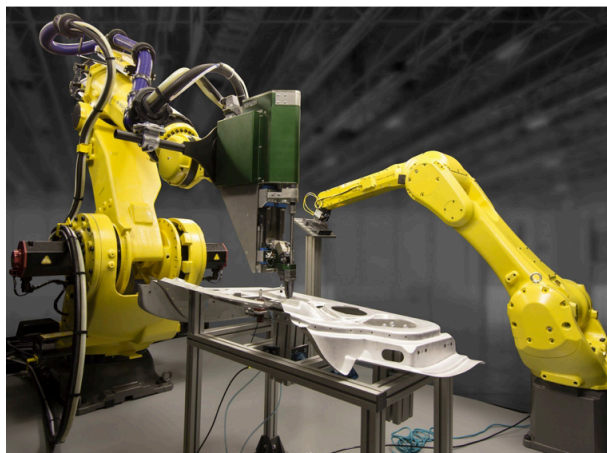


Figura 14: Robot de soldadura por fricción en la automoción. [28]

4.1. SOLDADURA POR FRICCIÓN LINEAL - LINEAR FRICTION WELDING (LFW).

La soldadura por fricción lineal (Linear Friction Welding - LFW), es un tipo de proceso de soldadura por fricción que utilizan en la actualidad los fabricantes en las industrias más importantes para el proceso de fabricación de piezas con diversas formas geométricas y sin importar generalmente la complejidad de las mismas.

Durante este tipo de proceso, se consigue la unión de los componentes a unir con la acción de un movimiento relativo lineal entre ellos al mismo tiempo que se les aplican fuerzas axiales de compresión. Gracias al movimiento lineal y a las grandes fuerzas de compresión, se genera calor por rozamiento en el plano de contacto de ambas caras a unir, consiguiendo un estado plástico en la zona de unión o zona de soldadura. Este movimiento se produce normalmente utilizando pequeñas distancias de recorrido que oscilan entre 1-3 mm y altas frecuencias de entre 25-100 Hz.

A medida que continúa el proceso, el material en estado plástico es forzado a salir de la interfaz en forma de rebaba, esto provoca que las piezas reduzcan su longitud en la dirección de la fuerza de compresión aplicada mientras se logra la unión deseada. Este material en forma de rebaba es comúnmente conocido como "flash" [2].

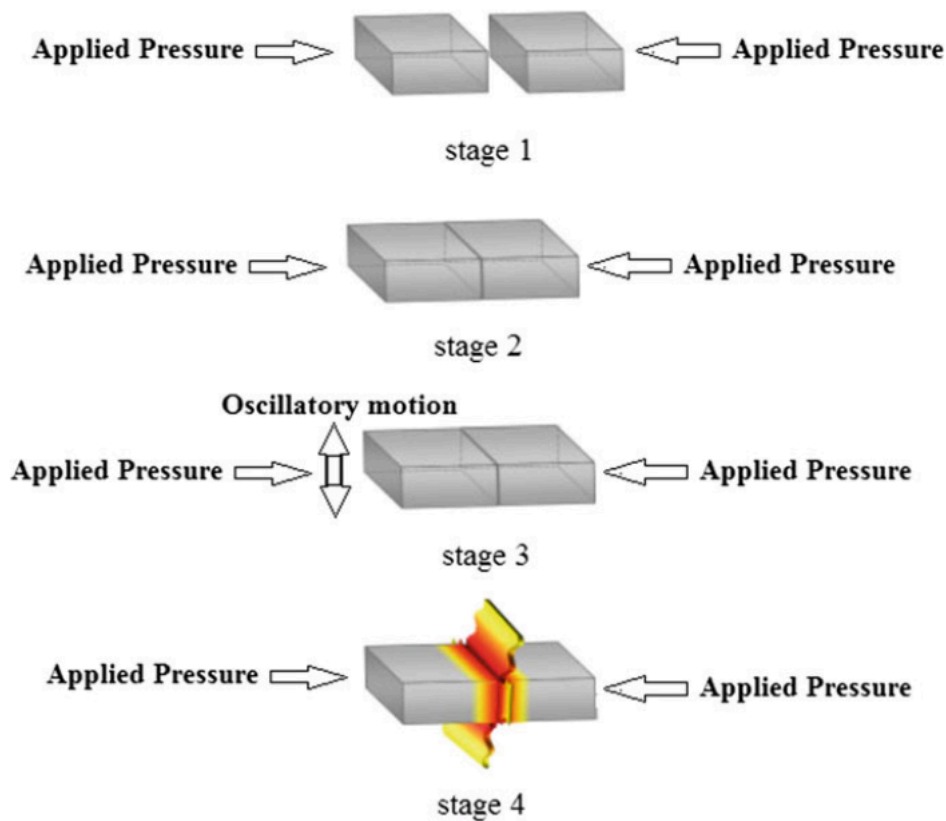


Figura 15: Etapas del proceso de soldadura por fricción. [2]

Con este proceso de soldadura es posible unir piezas de igual o diferente material, sin embargo, para llevarlo a cabo necesario que las piezas tengan una alta resistencia a esfuerzos cortantes. Además, este proceso se usa para unir piezas de material metálico con elevadas propiedades mecánicas a altas temperaturas y baja conductividad térmica.

Durante el proceso de soldadura por fricción lineal no se produce fusión del material de los componentes, por lo que no se genera una alteración de la composición del material de la zona de soldadura. Gracias a esto se consiguen elevadas propiedades mecánicas en la zona de unión, superiores a las conseguidas con procesos de soldadura basados en este fenómeno de fusión del material.

En el proceso de soldadura por fricción lineal, la zona afectada por el calor generado durante el proceso es estrecha y se obtiene una estructura de grano fino con una transición suave de la zona de soldadura al material base, es decir, la unión es homogénea. En aspectos generales la soldadura realizada por este proceso es de alta calidad y sus características mecánicas finales dependerá en gran parte de la velocidad de enfriamiento del proceso [29].

Respecto a los tiempos necesarios para su ejecución, con este tipo de proceso de soldadura por fricción también se ahorra tiempo de fabricación ya que es más rápido en comparación con otros procesos, no necesita tiempos de preparación de superficies dado que cuanto más irregular es la superficie, mayor es el rozamiento, ayudando al proceso de unión. En este proceso se pueden unir simultáneamente gran cantidad de piezas, lo que reduce el tiempo del ciclo de fabricación. El proceso es repetitivo y se puede automatizar fácilmente lo que también hace que se aumente la productividad principalmente producciones elevadas [2,9].

Sin embargo existen ciertos inconvenientes como que el tamaño de las piezas a unir mediante soldadura por fricción lineal están limitadas por el tamaño de la máquina empleada. En consecuencia, dependiendo del volumen o tamaño de la máquina, se podrá ampliar o disminuir el rango de tamaños de pieza posibles de unir.

Respecto a las aplicaciones industriales más significativas, este tipo de proceso se lleva a cabo en grandes industrias como son la automoción, aeronáutica o la industria ferroviaria.

Cabe destacar que, en la industria aeronáutica el proceso de soldadura por fricción lineal se utiliza para la fabricación de los "blisk" de las turbinas de los motores. Gracias a que este tipo de proceso de soldadura permite la unión de piezas en su estado final, no es necesario realizar el complejo post-procesamiento de las mismas mediante mecanizado una vez finalizado el proceso de unión, ahorrando de esta manera elevados costes de producción.

La soldadura por fricción lineal también es utilizada para la unión de los raíles destinados a las vías férreas para trenes. En consonancia a lo que ocurría con el ejemplo de los "blisk", también se ahorran costes de post-procesamiento de la zona donde se produce el rozamiento entre las vías y las ruedas del tren [30].

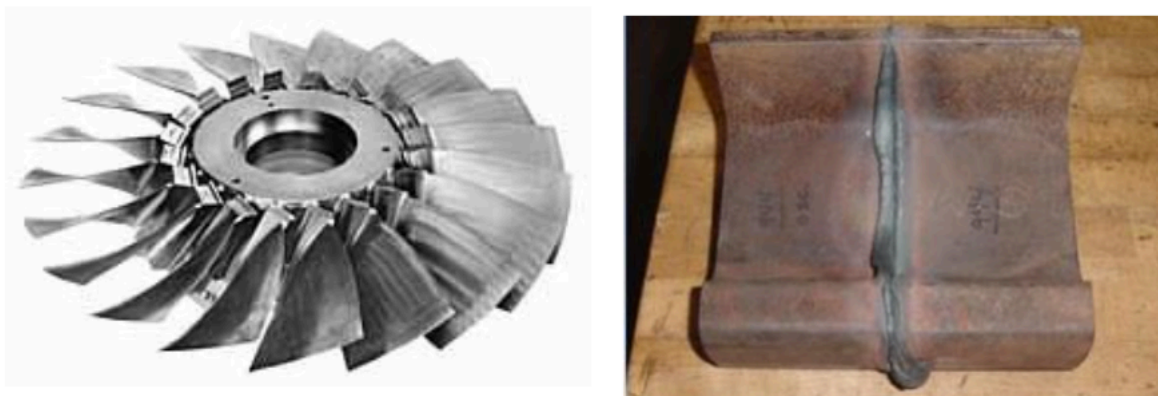


Figura 16: Blisk (izq.) y vía férrea (der.) soldados mediante LFW. [31]

4.2. SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL - ROTATIONAL FRICTION WELDING (RFW).

La soldadura por fricción rotacional (Rotational Friction Welding - RFW), es un tipo de soldadura extendido en la industria para la unión de dos piezas siendo una de ellas como mínimo, cilíndrica. Estas uniones pueden ser por ejemplo entre ejes macizos, tubos, o combinaciones entre ellos.

Este proceso, al igual que los demás procesos de soldadura por fricción, se basa en la conversión directa de la energía mecánica en energía térmica para formar la soldadura, sin la aplicación de calor desde cualquier otra fuente externa. Es decir, la unión no se produce por la acción de la fusión de los materiales si no gracias al estado de plasticidad del propio material alcanzado gracias al rozamiento entre los componentes a unir.

El calor necesario para llegar a este estado plástico en la soldadura por fricción rotacional, se consigue gracias al rozamiento entre las caras de las piezas. Durante el proceso, los componentes a unir se encuentran girando a una gran velocidad y mediante la aplicación de unas determinadas cargas axiales constantes o aumentadas en progresión, se lleva a las superficies que se desea unir a un contacto íntimo entre ellas.

Una vez que la interfaz entre ambas superficies se calienta, se genera el estado de plasticidad necesario, ocurriendo la difusión atómica mientras las interfaces están en contacto, lo que permite una unión metalúrgica entre los dos materiales [2,9,32].

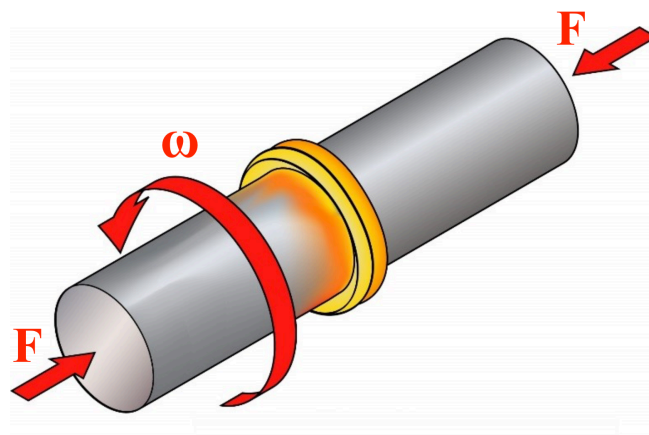


Figura 17: Esquema soldadura por fricción rotacional. [33]

Las variables más significativas que intervienen en este proceso serían la velocidad de giro, la presión axiales ejercidas durante la fase de calentamiento y durante la forja, la temperatura y el tiempo de soldadura. El control de estas variables es necesario para poder alcanzar el equilibrio adecuado entre calor y presión. Este control y conocimiento del comportamiento de estas variables para los materiales involucrados en el proceso de soldadura, dictaminará la calidad de la unión realizada entre los componentes unidos.

Estas variables, están estrechamente relacionadas con el proceso de soldadura en sí, sin embargo, existen otras variables a tener en cuenta relacionadas exclusivamente con el material a unir como son sus propiedades físico-químicas y el estado de las superficies de contacto [2,9,32].

En la siguiente figura se aprecia un diagrama el cual presenta la relación entre las variables del proceso de soldadura por fricción rotacional. El tiempo requerido para detener la rotación del proceso completamente es también una variable importante porque afecta a la temperatura de soldadura.

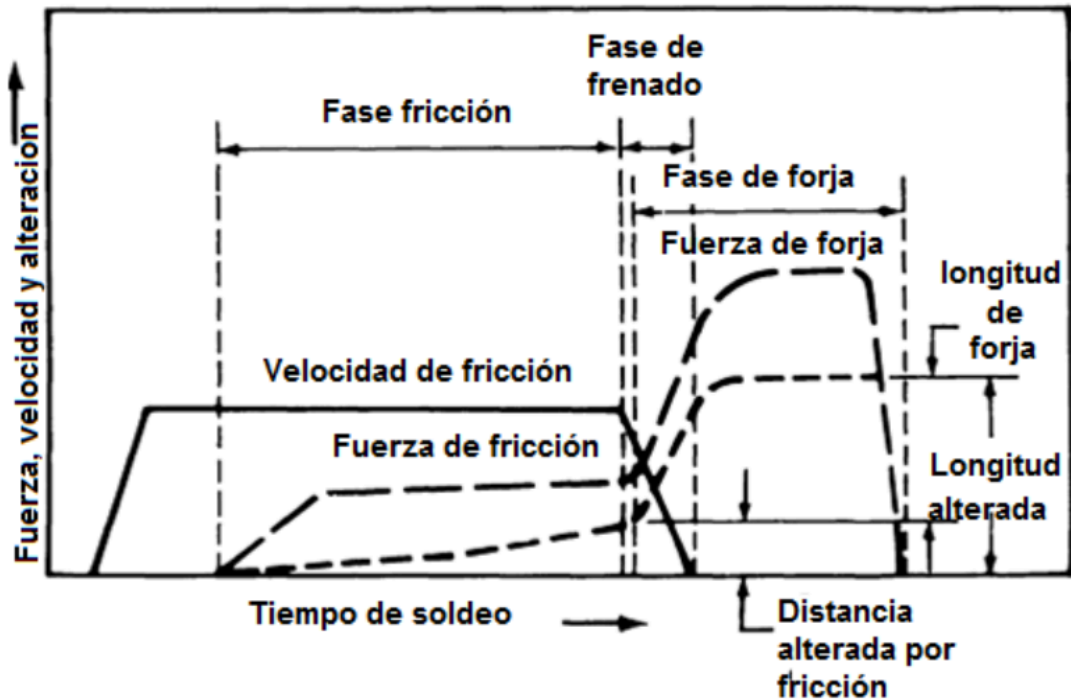


Figura 18: Diagrama soldadura por fricción rotacional. [32]

En una primera etapa, denominada fase de fricción, se genera calor debido a que las dos caras de ambos materiales están en contacto, es decir, se genera fricción a una velocidad determinada la cual es constante durante toda esta primera etapa. Al respecto de la fuerza aplicada, una vez alcanzado un valor determinado se mantiene constante.

La siguiente etapa importante del proceso de soldadura por fricción rotacional se denomina fase de frenado. Durante esta etapa tiene lugar la desaceleración del husillo rotatorio hasta llegar a dejar de girar, dando lugar entonces al final de dicha fase.

En un momento determinado de esta fase, tiene lugar la siguiente etapa denominada como fase de forja. Esta fase implica la aplicación de una mayor fuerza o presión entre los componentes a unir para, de este modo, conseguir una unión de mayor calidad. Esta fuerza es conocida comúnmente como fuerza de recalado y es directamente proporcional a la contracción del material. Cuanto mayor sea la fuerza de recalado mayor será la deformación del material.

Volviendo a las variables del proceso, la velocidad de giro es uno de los parámetros más importantes. Por un lado, a velocidades bajas de giro se desarrollan altos pares de rotación lo cual no es recomendable, y por otro lado, a velocidades demasiado altas, la zona afectada por el calor es excesivamente grande por lo que tampoco es recomendable.

Como ya se ha comentado, existen diferentes fuerzas o presiones ejercidas a lo largo de las diferentes etapas del proceso completo. Por un lado, la presión de calentamiento, la cual es ejercida durante la fase de fricción. Ésta debe ser suficiente para asegurar el contacto íntimo entre la superficie de ambos componentes a unir y para evitar además la contaminación atmosférica durante proceso de soldadura. A presiones de calentamiento bajas la zona de calentamiento aumentará, mientras que si el material se ve sometido a presiones de calentamiento excesivas se producirán defectos en la unión ya que el material sería deformado plásticamente de forma demasiado rápida. Por otro lado, la fuerza o presión de forja dependerá de la resistencia a la unión que tengan los materiales a unir.

Como última variable, el tiempo de duración del proceso. Éste depende de los dos parámetros anteriormente descritos, tanto de la velocidad de giro, como de las diferentes presiones axiales a las que se somete el material durante las diferentes etapas del proceso de soldadura por fricción rotacional.

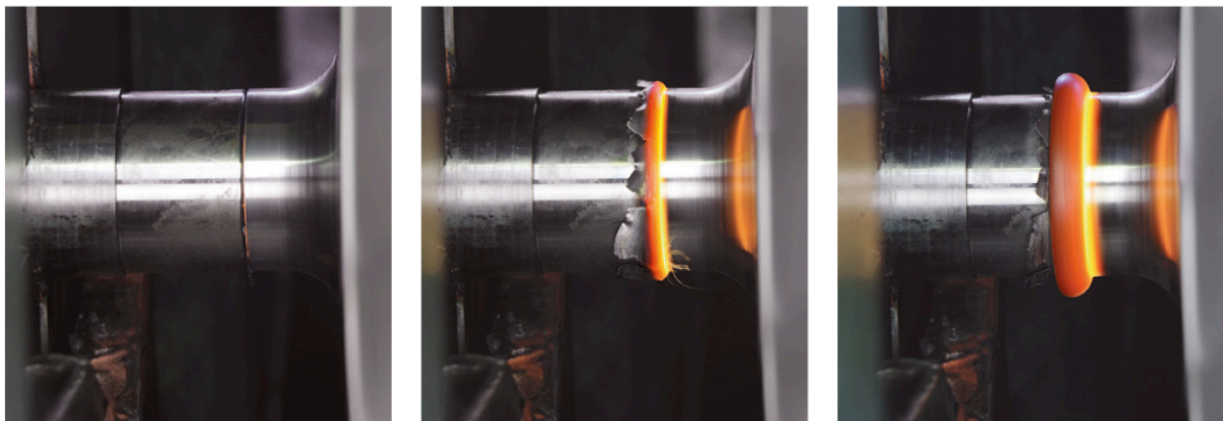


Figura 19: Fases proceso de soldadura por fricción rotacional. [34]

Al respecto de las ventajas de este proceso encontramos como principales la gran calidad de la unión y su carácter resistente. Tampoco necesita una preparación excesiva de la zona de soldadura y desde el punto de vista de la sostenibilidad ecológica es un proceso bastante sostenible debido a la no utilización de consumibles y a que no es necesario crear ninguna atmósfera controlada con gases contaminantes. Además, al ser posible la unión de materiales disímiles se aumenta su versatilidad.

También es un proceso totalmente automatizable para grandes series de producción con la ayuda de robots autónomos programables, lo que hace que aumente así su tasa de productividad y disminuya el factor del error humano en comparación a otros métodos más tradicionales de soldadura.

Sin embargo, a pesar de estas ventajas es un proceso limitado a la unión de elementos cilíndricos tales como redondos, tubos o componentes con geometrías de superficie plana, además de la limitación dimensional la cual está establecida en 200 mm de diámetro para piezas cilíndricas. Otro inconveniente es el alto coste de la inversión en maquinaria en el caso de querer automatizar el proceso.

Aunque esto último establece una serie de inconvenientes, el mayor de los problemas a la hora de llevar a cabo el proceso de unión por fricción rotacional es la necesidad del total control de los parámetros descritos anteriormente para así conseguir una soldadura resistente y de gran calidad sin fundir los materiales a unir. Para este control, es necesario la realización de pruebas casi totalmente manuales en tornos hasta que se consigue una relación de parámetros adecuadas para llevar el proceso a cabo sin riesgos [2,30,32].

Al igual que ocurre con la soldadura por fricción lineal su aplicación está prácticamente centralizada en la industria aeroespacial y automoción. Por ejemplo en el sector aeronáutico es utilizado normalmente para la unión de ejes con turbinas o la unión de los émbolos con ejes o válvulas huecas en el sector automovilístico.

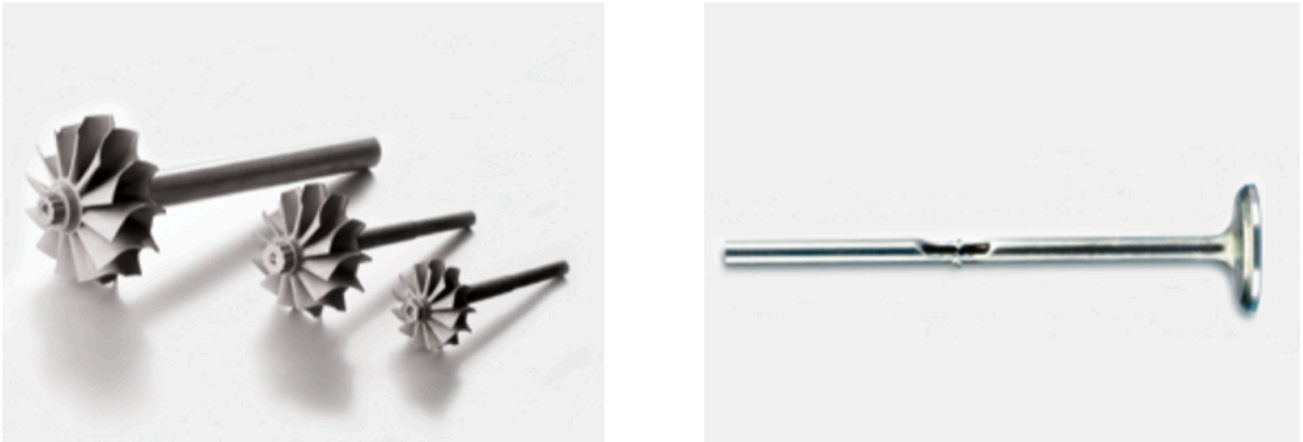


Figura 20: Turbinas-ejes (izq.) y válvulas huecas (der.) soldados mediante RFW. [31]

4.3. SOLDADURA POR INERCIA - INERTIA FRICTION WELDING (IFW).

Este método de soldadura es un derivado o evolución del proceso de soldadura por fricción rotacional.

La diferencia principal entre ambos es que durante el proceso de soldadura por inercia, la pieza gira unida a un volante de inercia, denominado volante del eje o volante de inercia, el cual controla y almacena la energía de entrada necesaria para llevar a cabo el proceso de soldadura. Cuando se alcanza la velocidad de giro deseada, este volante se desacopla del motor rotatorio dejando que el volante gire sólo por inercia. Es entonces donde se aplica las fuerzas de presión necesarias.

La energía cinética almacenada en el volante se disipa en forma de calor por fricción para producir la coalescencia entre los componentes. A medida que el momento de inercia va disminuyendo, el volante se detiene automáticamente sin necesidad de un freno.

Otras de las diferencias de este proceso respecto al proceso de soldadura rotacional, es que el proceso de soldadura por inercia no requiere fuerza de recalado, es decir, las fuerzas de presión axiales a las que están sometidos los componentes a unir, se aplican de forma continua hasta que se forma la unión deseada [2,9].

En la siguiente figura es posible observar un esquema simplificado de la unión de dos barras sólidas durante el proceso de soldadura por inercia.

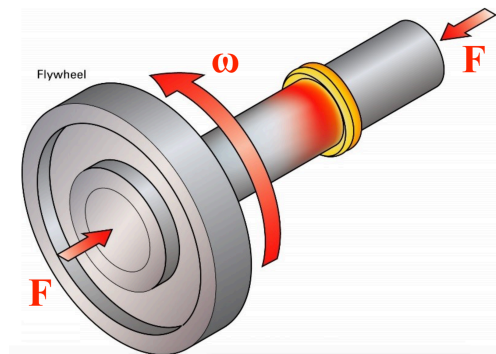


Figura 21: Esquema soldadura por inercia. [33]

Continuando con las principales diferencias entre el proceso de soldadura por fricción rotacional y el proceso de soldadura por inercia, se encuentra la velocidad de fricción. Como se ha comentado, durante el proceso de soldadura por fricción rotacional la velocidad de fricción permanece constante, mientras que en el proceso de soldadura por inercia esta velocidad disminuye continuamente durante la etapa de fricción hasta finalizar el proceso.

Entre las variables más importantes que controlan el proceso de soldadura por inercia se encuentran la velocidad rotacional de los componentes, la presión axial y el tamaño del volante. Ésta última controla el momento de inercia de dicho proceso de soldadura.

Atendiendo a influencia de la velocidad de giro sobre los resultados de la unión obtenida, se ha demostrado que a velocidades periféricas demasiado bajas la soldadura es estrecha y borrosa en el centro de la misma y que, por el contrario, a velocidades demasiado altas la unión soldada se vuelve demasiado gruesa y concentrada en el centro. Gracias a la experimentación se han conseguido diferentes patrones relacionados con la velocidad de giro para conseguir resultados exitosos. Por ejemplo, para un proceso de unión de componentes planos y uniformes, en uniones de aceros al carbono, la velocidad mínima perimetral es de unos 1,5 m/s y como máximo no se recomienda superar los 5 m/s [30].

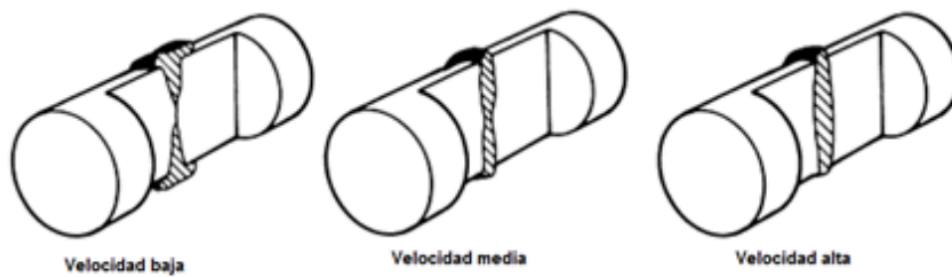


Figura 22: Sección de soldadura por inercia a diferentes velocidades periféricas. [30]

Por otro lado, al igual que ocurre con la soldadura por fricción rotacional, la presión axial ejercida sobre los componentes afecta al calentamiento de la zona de unión o soldadura. A presiones altas la zona afectada por el calor en soldadura se es más pequeña y reduce el tiempo de soldadura, a diferencia de lo que ocurre con bajas presiones, donde la soldadura se hace más gruesa y redondeada.

Si se observa la siguiente imagen es posible detectar que la relación entre la velocidad superficial y la presión axial, atendiendo a la apariencia obtenida de soldadura, es inversa. Es decir, la apariencia de la soldadura realizada a bajas velocidades, es similar a la obtenida a altas presiones y viceversa [30].

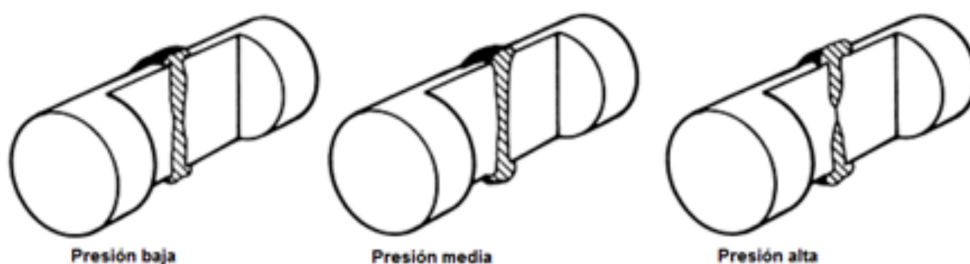


Figura 23: Sección de soldadura por inercia a diferentes presiones axiales. [30]

Por último, como se ha comentado anteriormente, durante este proceso de soldadura por inercia el volante de inercia es el encargado de controlar y almacenar la energía cinética producida durante el proceso y generar así la fuerza de torsión necesaria. Por tanto, el tamaño de este volante es muy importante ya que con volantes de menor tamaño no se conseguirá alcanzar la fuerza de torsión mínima necesaria para que se produzca una unión satisfactoria, mientras que con volantes demasiado grandes respecto al diámetro de los componentes a unir, se generará una energía excesiva produciendo así una mayor cantidad de rebaba [30].

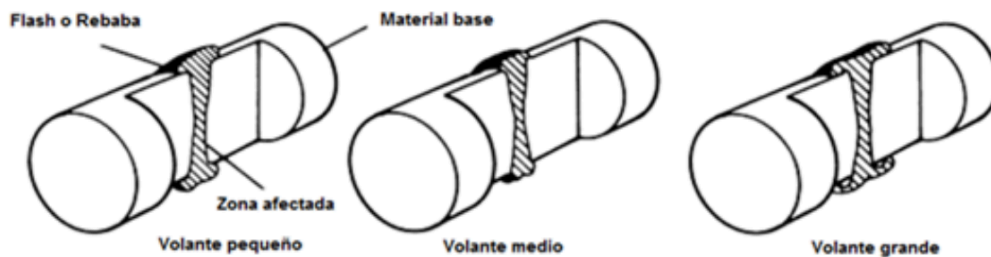


Figura 24: Sección de soldadura por inercia con diferentes tamaños de volante. [30]

Al igual que ocurre en el proceso de soldadura por inercia rotacional, el proceso de soldadura por inercia también es posible dividirlo en una serie de etapas, concretamente en dos: fase de fricción y fase de forjado. A continuación se muestra un diagrama aproximado con las diferentes etapas y variables del proceso.

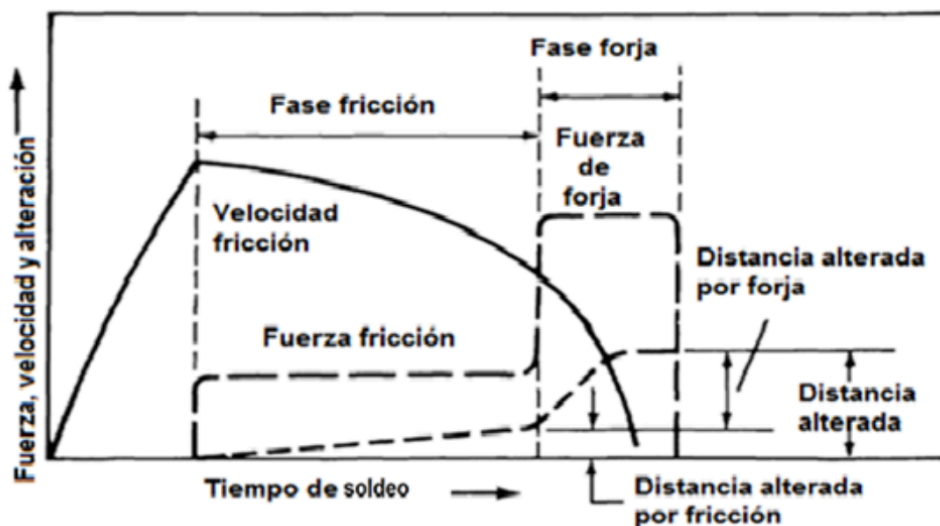


Figura 25: Diagrama soldadura por fricción por inercia. [30]

El comienzo de la fase de fricción coincide con la velocidad de giro máxima alcanzada, esto ocurre cuando el volante de inercia se desacopla del eje y comienza a disminuir la velocidad. Justo en este instante se empiezan a ejercer una fuerza de fricción constante hasta la finalización de esta etapa de fricción, tal y como ha sido comentado anteriormente.

La segunda etapa o fase forja del proceso comienza cuando el volante está a punto de parar por inercia debido a la pérdida de energía cinética. En este momento se aplica una mayor presión axial denominada fuerza o presión de forja, consiguiendo así una mayor distancia alterada por la fricción ejercida. Una vez que el volante se detiene y se dejan de realizar las presiones axiales sobre los componentes, se da por finalizado el proceso de unión.

Sus ventajas y desventajas como proceso son similares a las descritas para el proceso de soldadura por fricción rotacional, es decir, proceso que no necesita material de aportación, respetuoso con el medio ambiente, capacidad de unión de materiales disímiles, uniones con buena resistencia, proceso versátil y automatizable, altos costes de inversión necesarios, sólo una piezas de revolución o con superficies de unión planas, entre otras.

Algunos ejemplos no mencionados anteriormente pueden ser engranajes soldados a sus ejes en el sector del automóvil o componentes de los ventiladores dentro de las turbinas de los aviones. Otros ejemplos correspondientes a otros sectores podrían ser terminales eléctricos de aluminio o cobre para el sector eléctrico o los extremos de los tubos de perforación, “*Drill pipes*”, utilizados para la obtención de petróleo.



Figura 26: *Drill pipes* soldados mediante soldadura por inercia. [31]

4.4. SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN - FRICTION STIR WELDING (FSW).

El proceso de soldadura por fricción-agitación, en adelante FSW por sus siglas en inglés, es un proceso de soldadura avanzado el cual, al igual que todos los procesos descritos con anterioridad durante el presente documento, utiliza la fricción para generar el calor suficiente para producir el estado plástico necesario para llevar a cabo la unión o coalescencia de los componentes.

Por un lado, al igual que ocurre con los anteriores métodos de unión por soldadura mediante fricción, este proceso no requiere materiales de aportación lo que supone un ahorro económico. Por otro lado, no es necesario alcanzar los puntos de fusión de los materiales a unir, lo que da como resultado un ahorro de energía considerable además de hacer de este método de unión, un proceso de fabricación verde y ecológico, aspecto cada vez más perseguido por las autoridades pertinentes.

Además de esto, al igual que la mayoría de procesos de fabricación necesita una serie de herramientas para llevarse a cabo, sin embargo a diferencia de métodos de soldadura tradicional, el FSW es un proceso en el cual sus herramientas tienen una larga vida, lo que hace posible afirmar que éstas pueden ser prácticamente denominadas como herramientas no consumibles. Estas herramientas serán de diferentes materiales y características geométricas dependiendo de los resultados que se quieran obtener o de la tipología de aplicación que se deba de llevar a cabo. Esto será objeto de estudio en capítulos posteriores.

Otra de las características destacadas del FSW es sin duda, su capacidad a la hora de la unión de materiales de diferente naturaleza, lo que hace que se convierta en un proceso versátil que aumenta las posibilidades y variantes puestas a disposición de los ingenieros de diseño.

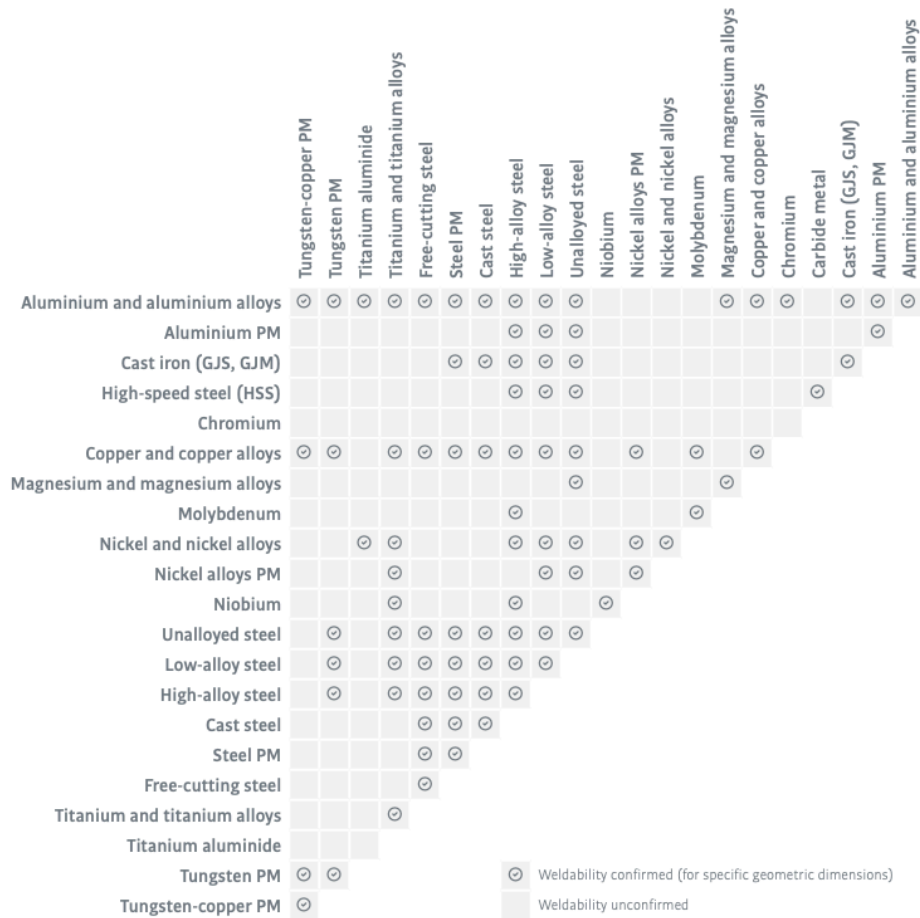


Figura 27: Combinaciones de materiales posibles a unir por FSW. [35]

Por todo esto, actualmente, el FSW se usa ampliamente en los principales sectores industriales como son el aeroespacial, naval, electrónica, automotriz, electrodomésticos, ferroviario e incluso nuclear. Además, gracias al este aumento de su popularidad entre las diferentes principales industrias del mercado actual, este proceso ha sido elegido como objeto de estudio por un mayor número de investigadores, lo que ha llevado a producir una rápida evolución y desarrollo en sus prestaciones y resultados, consiguiendo mejores rendimientos ante la resistencia la fatiga, homogeneidad de la soldadura, versatilidad del proceso, capacidad para la unión de materiales diferentes, automatización del proceso, mejora económica, entre otros, en comparación con procesos de soldadura tradicionales.

De hecho, desde que fue patentado por primera vez en 1991 por el TWI el objetivo no fue privatizar esta tecnología y ocultarla solo para su propio disfrute y desarrollo, si no que la intención desde el principio fue difundir esta tecnología a la comunidad mundial de ingenieros para poder conseguir un desarrollo mayor y más rápido de esta tecnología con tan alto potencial [9].

En la figura que se muestra a continuación es posible ver el número de solicitudes de patentes desde 1996 hasta 2008, lo que demuestra el auge que ha tenido esta tecnología en los últimos años.

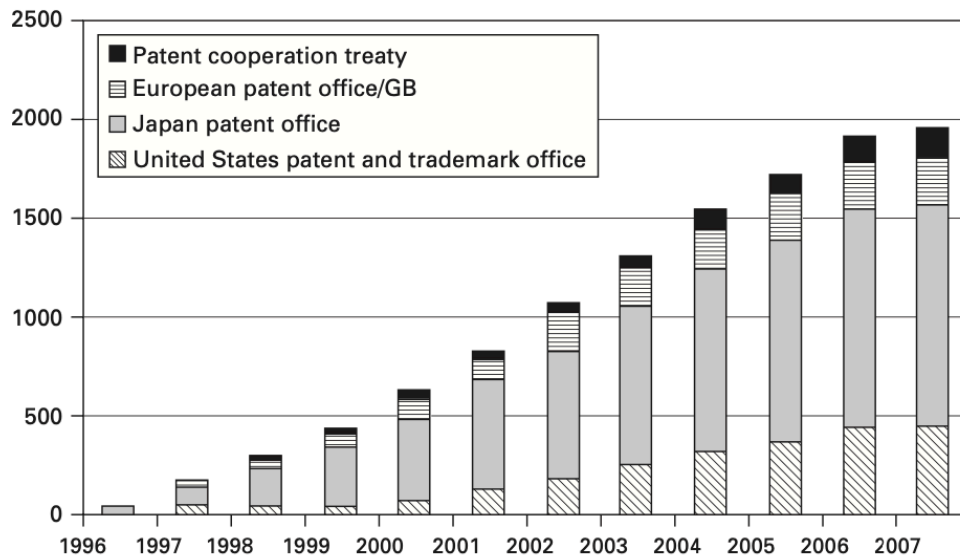


Figura 28: Número de solicitudes totales de patentes FSW desde 1996-2008. [9]

Hitachi, compañía japonesa que produce componentes de automóviles, representó hasta 2008 más del 45% de las patentes concedidas, lo que hizo de ésta la empresa la cual apostó más fuerte por la investigación y desarrollo de esta tecnología. Las siguiente organización con más patentes aprobadas fue Boeing, empresa aeroespacial estadounidense, con un 10%. Tras ellas estaban empresas como KHL, Showa, o NLM [9].

Si se observa la historia de la evolución y desarrollo de los procesos de fabricación, no muchos procesos han alcanzado tantas patentes como FSW pudo alcanzar en un tramo de años tan corto como el mostrado. Lo que de nuevo su importancia y la alta tasa de investigación asociada a este nuevo proceso de soldadura.

El proceso de soldadura por fricción-agitación, FSW, se basa en el principio de generación de calor por fricción. Este calor se genera mediante el trabajo realizado por una herramienta de soldadura específica para el proceso. Estas herramientas normalmente son cilíndricas y constan de dos partes concéntricas, que giran a alta velocidad a lo largo de las superficies de contacto de dos placas rígidamente sujetas colocadas sobre una placa base de respaldo. La parte de mayor diámetro de la herramienta se denomina hombro, mientras que la parte de menor diámetro se denomina pasador.

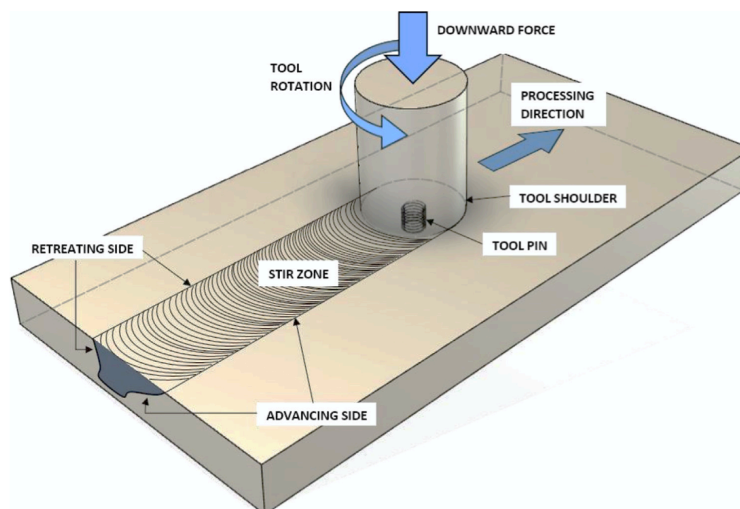


Figura 29: Esquema proceso FSW. [34]

El diseño de esta herramienta es una de las características más notables a tener en cuenta a la hora de conseguir grandes resultados mediante este tipo de proceso de soldadura. Esta herramienta es la responsable del calor por fricción que se genera y está realizada partir de un material resistente al desgaste consiguiendo así que sea una herramienta no consumible. Gracias al desarrollo de este proceso, en los últimos años se han agregado muchas variaciones y características nuevas a esta herramienta básica descrita, lo que será analizado en apartados posteriores de este capítulo.

El pasador de la herramienta se sumerge en el material de trabajo hasta que el hombro alcanza un contacto total con la superficie de los componentes a unir. Una vez ocurre esto, la herramienta comienza a girar localmente en un punto del material de trabajo haciendo que se produzca deformación plástica y logrando así finalmente el ablandamiento o agitación de las superficies de la junta de unión.

El movimiento de avance de la herramienta se realiza siguiendo una dirección determinada, denominada "dirección de soldadura". El flujo del metal plastificado se avanza desde la parte frontal de la herramienta hasta el plano inferior de la pieza a medida que la herramienta se traslada a lo largo de esta dirección de soldadura. En dicho plano inferior es donde, gracias a la aplicación de elevadas fuerzas de presión, el material se consolida creando una fuerte soldadura en estado sólido de alta calidad.

A la hora de definir la configuración del proceso de soldadura por fricción-agitación, se debe de tener claro los conceptos de "lado de avance" y "lado de retroceso". El lado de la unión soldada donde el sentido de la velocidad de giro es el mismo que el sentido de la velocidad de soldadura, se denomina lado de avance. El lado opuesto donde el sentido de la velocidad de giro de la herramienta es contrario al sentido de la velocidad de soldadura, se denomina lado de retroceso. Esto se muestra en la siguiente figura:

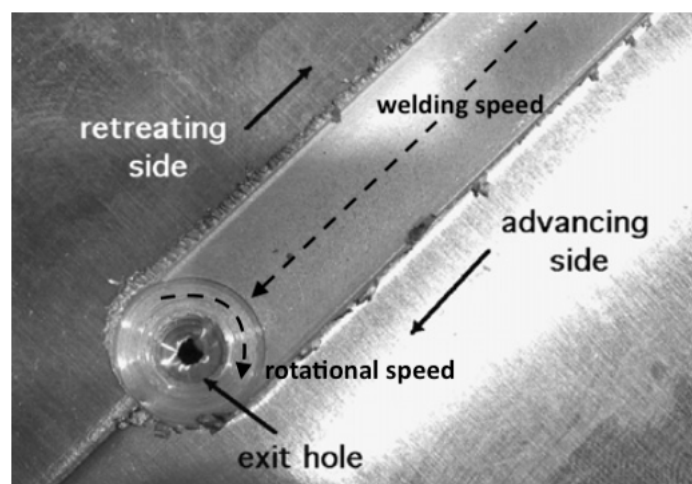


Figura 30: Lado de avance y retroceso en una soldadura FSW. [4]

A diferencia de la mayoría de procesos de soldadura tradicionales, el FSW, no necesita de la fusión de los materiales de trabajo, lo que evita muchas de las dificultades que surgen debido a los cambios de estado de los mismos y que afectan al propio proceso de soldadura y a los resultados finales obtenidos.

Al respecto de la distorsión y de las tensiones residuales obtenidas durante este proceso en comparación con otros tradicionales, éstos son considerablemente menores, lo que permite un mejor comportamiento de la soldadura ante la fatiga, nuevas técnicas de construcción y hace posible la soldadura de materiales muy finos o muy gruesos indistintamente. Este baja cantidad de tensiones residuales es consecuencia de no tener que alcanzar temperaturas de fusión de los materiales de lo que están realizados los componentes a unir.

Por otro lado, a la hora de realizar el FSW se debe diseñar y fabricar un soporte o yunque, el cual se coloca debajo de la pieza durante la soldadura FSW para soportar las fuerzas verticales de presión, así como el sistema de sujeción de forma que se garantice la sujeción en los 3 ejes.

Entonces es cuando se sujetan las placas o láminas que se van a unir de forma firme tal como se muestra en la siguiente figura. Un buen sistema de sujeción evita que la pieza se abra, se deslice y se levante, lo que es esencial para la adecuada calidad de la soldadura.

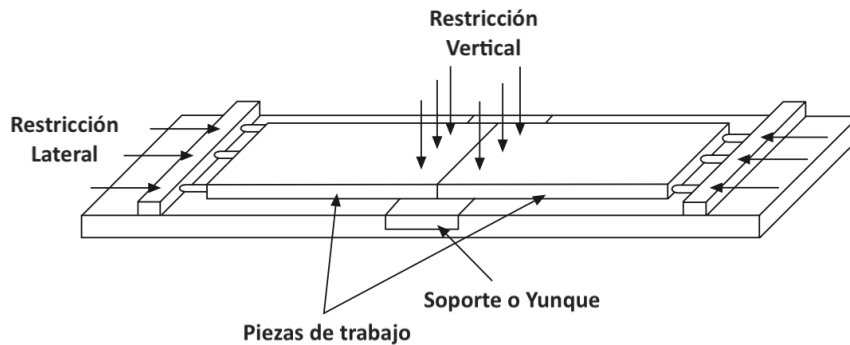


Figura 31: Sistema de sujeción convencional para FSW. [9]

Una vez asegurada la sujeción entra en juego el trabajo de la herramienta. La herramienta se sumerge en la zona de la junta de unión de los componentes. Aunque es cierto que, gracias a la alta cantidad de investigaciones se han desarrollado diferentes formas de inmersión, normalmente el pasador se introduce de forma perpendicular a la superficie de contacto a una velocidad y fuerza de presión concreta.

Cuando el pasador toma contacto con la superficie y, gracias al calentamiento por fricción sumado a las fuerzas de presión ejercidas sobre el mismo, se produce una deformación plástica y desplazamiento del material de trabajo, formándose un vórtice o anillo y produciendo por tanto la expulsión del mismo. Con el objetivo de reducir el calor y fuerzas de presión necesarias para que la herramienta se sumerja en el material de trabajo, es posible la realización de una pequeña perforación donde será introducido el pasador.

A medida que la herramienta se sumerge en la junta de unión, el calor generado se transmite al material que se encuentra a su alrededor. Una vez que el pasador está totalmente dentro de la junta de unión y el hombro toca la superficie del material de trabajo la herramienta comienza su movimiento a lo largo de la dirección de soldadura sin demora, aunque en algunos materiales, puede ser necesario que la herramienta deba detenerse en el lugar de inmersión durante algún tiempo para permitir que la herramienta de soldadura produzca la temperatura necesaria para conseguir su correcta inmersión en el material de trabajo.

Una vez que la herramienta de soldadura comienza a moverse a lo largo de la junta según la dirección de soldadura, la fricción y el trabajo plástico producen calor para mantener suficiente ablandamiento en la pieza de trabajo permitiendo así que el material fluya alrededor del pasador.

Las características del pasador son muy importantes, ya que si éste tiene superficies tales como roscas, planos o ranuras en espiral, ayudan a facilitar el flujo de este material al aumentar la resistencia entre el pasador y el material circundante de tal manera que se evita la formación de huecos internos o fracturas. Esto será analizado en siguientes apartados de este capítulo.

El calor del proceso de soldadura se extiende por el interior de las piezas de trabajo y sirve para precondicionar el material antes de la llegada de la herramienta, lo que produce ablandamiento a partir de la recuperación del endurecimiento por trabajo. Esta alteración metalúrgica puede ser leve, como cuando las soldaduras se realizan a una velocidad de avance muy alta, o puede ablandar drásticamente la pieza de trabajo.

A medida que este material de la pieza de trabajo "precondicionado" interactúa con la herramienta de soldadura a su llegada, el material se deforma y calienta rápidamente gracias a la fricción y al trabajo plástico, elevando la temperatura hasta cerca de la temperatura de fusión del material, pero nunca por encima de ella. Simultáneamente, este material fluye alrededor de la herramienta de soldadura y se deposita detrás de ella de forma que se evita la formación de huecos.

Cabe señalar que se pueden considerar que la fase principal de la soldadura está dividida a su vez en 3 subfases o períodos. Un primer período en el que la temperatura se distribuye a través de la herramienta y la pieza de trabajo, un segundo período donde se estabiliza dicha distribución de temperatura y un período final, donde esta distribución de temperatura es alterada a medida que se alcanza el límite de la pieza de trabajo. Dependiendo de las condiciones de soldadura, los períodos inicial y final pueden tener diferentes duraciones, y a su vez, influir o no en la soldadura producida.

Por último, a medida que la herramienta llega a los límites de las piezas de trabajo, se altera la distribución de la temperatura. Cuando esto ocurre se detiene el movimiento y se retira la herramienta de la pieza de trabajo por la parte delantera de la herramienta, dejando un ojo de cerradura al final de la soldadura.

En ocasiones también es posible retirar la herramienta por el extremo de la pieza de trabajo produciéndose lo que se denomina como desgarro. Sea cual sea la alternativa seleccionada, el extremo de la soldadura generalmente no se puede utilizar y debe recortarse mediante un corte o mecanizado. Con el objetivo de desperdiciar el menor material posible, es común el uso de pestañas de entrada y salida en los extremos de la junta facilitando así el corte de dicho material. Por último a veces también se realizan operaciones de acabado.

Debido a las fuerzas típicamente altas en el proceso, la FSW generalmente se practica como un proceso totalmente mecanizado, lo que aumenta el costo del equipo en comparación con las técnicas de soldadura por arco, al tiempo que reduce el grado de habilidad del operador requerido. También se ha demostrado que FSW elimina o reduce drásticamente la formación de humos peligrosos y reduce el consumo de energía durante la soldadura, lo que reduce el impacto ambiental del proceso de unión. Además, FSW se puede utilizar en cualquier orientación sin tener en cuenta la influencia de los efectos gravitacionales en el proceso, haciendo de él un proceso de soldadura flexible y con posibilidad de poder ser automatizado fácilmente.

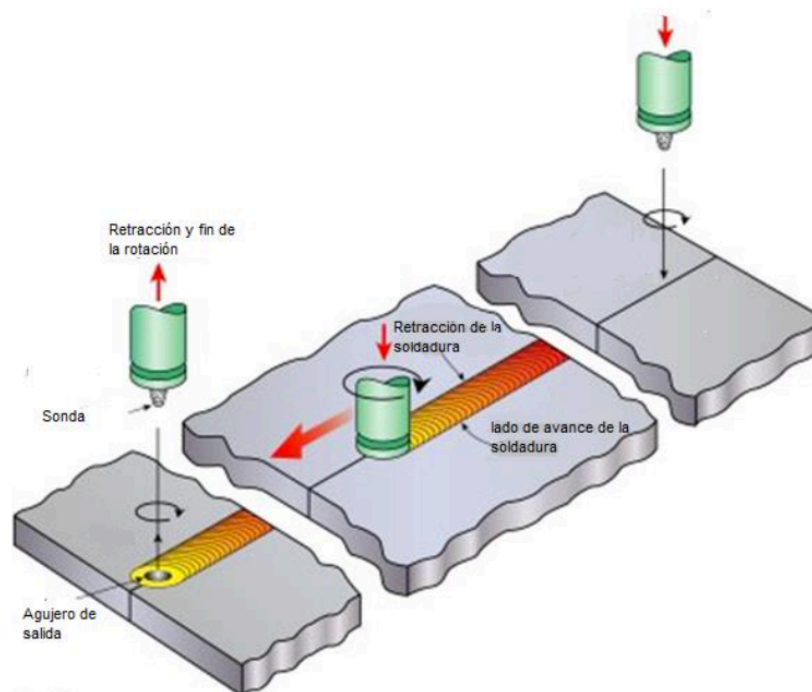


Figura 32: Fases del proceso FSW. [32]

En el siguiente capítulo se describirán los diferentes parámetros más influyentes del proceso de soldadura por fricción-agitación, diseños de unión, materiales utilizados, entre otros aspectos de gran interés a la hora de conocer con una mayor profundidad este proceso de fabricación.

CAPÍTULO 5. CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN

5.1. PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN:

El proceso de soldadura por fricción-agitación se caracteriza por ser un proceso complejo durante el cual se deben controlar ciertos parámetros para asegurar unos buenos resultados de soldadura. Entre los principales parámetros del proceso de soldadura por fricción y agitación, se encuentran la velocidad de giro, la velocidad de soldadura, la inclinación de la herramienta, la profundidad de la herramienta y el diseño de la herramienta, sin embargo, no son los únicos ya que existe una serie de parámetros menos importantes pero no por ello despreciables como por ejemplo son el aporte de calor extra, la presión ejercida entre los componentes a unir, propiedades sobre el comportamiento de los materiales a unir, el cabeceo de la herramienta entre otros [2,9].

Estos parámetros principales, son denominados de esta forma ya que son aquellos que influyen directamente en las propiedades de la soldadura producida, por ello son analizados con mayor detalle a continuación:

5.1.1. VELOCIDAD DE GIRO Y VELOCIDAD DE SOLDADURA

Son las dos velocidades más importantes a controlar durante el proceso de soldadura por fricción-agitación, es decir, qué tan rápido debe girar y qué tan rápido debe viajar la herramienta a través de la interfaz de unión durante el proceso para que se produzca la unión deseada.

Para conseguir garantizar una soldadura exitosa y eficiente es necesario el control y la optimización de estos parámetros de procesamiento ya que ambos tienen una gran influencia en la calidad y propiedades de la soldadura producida.

El factor que se ve más influido por estos dos parámetros es el calor resultante producido durante el proceso de soldadura. Es importante conseguir una temperatura adecuada del material que rodea la herramienta de manera que esté lo suficientemente caliente para permitir una deformación plástica adecuada de forma que se pueda conseguir minimizar las fuerzas que actúan sobre la herramienta. Aumentar la velocidad de giro de la herramienta o disminuir la velocidad de desplazamiento de la misma ayudará a producir una soldadura más caliente.

Del mismo modo, si los materiales a unir no estuviesen lo suficientemente calientes, aparecerían espacios vacíos a lo largo del cordón de soldadura u otros defectos. Además esto podría ocasionar defectos en la herramienta al no existir continuidad.

Sin embargo, por contra, un calor excesivamente alto tampoco es bueno ya que pueden dar paso a la fusión de los materiales lo que sería nefasto de cara a las propiedades finales de la soldadura obtenida. Por tanto, como ya se ha indicado, el control de las velocidades de giro y desplazamiento de la herramienta deben controlarse de una forma adecuada para conseguir una soldadura con las propiedades deseadas [2,9].

5.1.2. GRADO DE INCLINACIÓN Y PROFUNDIDAD DE LA HERRAMIENTA

Una de las características del proceso FSW es que, para evitar las fuerzas verticales ejercidas sobre la unión, la soldadura se realiza con la herramienta inclinada un número concreto de grados respecto a la vertical. Normalmente, esta inclinación está entre los 2° y 4°, y tiene también una gran influencia sobre la calidad final de la soldadura producida.

Por otro lado, la profundidad de la herramienta es la distancia total a la cual es sumergida la herramienta en el interior del material de trabajo. Esta inmersión de la herramienta ayuda a lograr la presión deseada durante el proceso y asegura que la herramienta penetre completamente en la soldadura consiguiendo así que la máquina utilizada durante el proceso no se desvíe de su posición.

Es importante controlar que no se produzca una profundidad excesiva, ya que esto puede ocasionar la aparición de marcas debido al roce el hombro de la herramienta sobre la superficie de la soldadura. Se debe establecer una profundidad de la herramienta la cual garantice alcanzar la presión adecuada y que además también asegure que la herramienta está completamente inmersa en la unión de soldadura.

Si no se logra lo descrito anteriormente, es posible que la presión requerida durante el proceso sea tan alta que pueda derivar en que la máquina de soldadura se desvíe de su posición, entre otros defectos potenciales que pueden afectar al resultado final de la soldadura obtenida [2,9].

5.1.3. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA

Este parámetro es otro de los más importantes el cual afecta en gran medida en la calidad de la soldadura obtenida mediante FSW. Como principios fundamentales, el material de la herramienta debe ser fuerte y altamente resistente al desgaste, además de tener bajas propiedades de conductividad térmica para evitar así las pérdidas del calor generado gracias a la fricción.

Originalmente la herramienta utilizada durante el proceso FSW, como se ha definido en apartados anteriores, se concibió como una herramienta la cual consta de dos partes, denominadas hombro y pasador. El hombro se desplaza sobre la superficie cumpliendo la función de evitar el escape del material que va fluyendo hacia el exterior a medida que la herramienta gira y se fuerza a lo largo de la junta. Se podría decir, a modo coloquial, que cumple funciones parecidas a la de una tapadera.

Por otro lado, el pasador, como a estas alturas ya es conocido, se mueve a través de la junta de unión según la dirección de soldadura con una profundidad determinada. Este pasador, normalmente penetra dentro del material de trabajo unos 0,5 mm garantizando así la penetración completa de la herramienta y además está dispuesto en forma de rosca lo cual facilita su acción de empuje hacia abajo sobre el material caliente de la pieza de trabajo circundante a la herramienta, ayudando a retener dicho material dentro de la zona de soldadura. Otro de los beneficios de esta forma a modo de tornillo evitan la formación de poros o huecos vacíos en la soldadura [2,9,32].

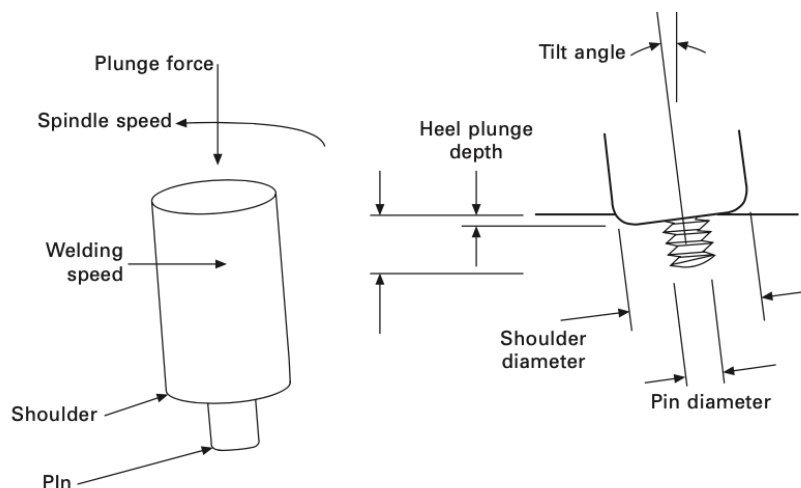


Figura 33: Herramienta convencional FSW y parámetros clave. [9]

A lo largo de la evolución de este proceso, el diseño del hombro y del pasador ha sido un área de intensa investigación, lo que ha dado como resultado una diversa variedad de herramientas diferentes con las que se han conseguido una mejora desde el rendimiento, la resistencia de la unión y la calidad de la soldadura, así como en la gama de materiales posibles a unir, geometrías de unión, parámetros de soldadura, mayores espesores de piezas de trabajo hasta el desarrollo de nuevos equipos de soldadura por fricción-agitación.

Por otro lado, el desarrollo de materiales para herramientas de soldadura ha permitido soldar materiales de alto punto de fusión, como titanio, acero y cobre, y ha mejorado la productividad en la soldadura de aluminio.

La gran variedad de posibilidades que muestra la elección de herramienta de este proceso no excluye que la primera geometría desarrollada por The Welding Institute en 1991 haya quedado obsoleta. De hecho para soldaduras que se necesiten realizar a velocidades de desplazamiento muy altas o con una penetración más profunda del pasador, siguen utilizando dicha geometría primitiva del proceso.

Esto lleva a la afirmación de que para el FSW no existe un diseño de herramienta definitivo, si no que dependiendo de las características de la soldadura a realizar se puede optar por una u otra opción.

Respecto a esta elección de la tipología de herramienta, generalmente para soldaduras de aleaciones de aluminio con un espesor entre 6 y 12 mm, el acero para herramientas H13 es generalmente adecuado, además para este tipo de soldaduras es posible usar diseños de herramientas enterizas. Por otro lado, si se necesitan altas tasas de productividad o soldar materiales con un espesor mayor, se necesita un estudio y diseño de herramienta y su correspondiente elección del material algo más elaborado [2,9].

Para soldaduras de materiales más pesados y resistentes que el aluminio como pueden ser el acero o el titanio, las herramientas de soldadura pueden fabricarse con materiales a base de tungsteno, nitruro de boro cúbico policristalino o cualquier otro material que ofrezca un alto rendimiento a altas temperaturas y una alta capacidad de resistencia al desgaste.

El diseño de la herramienta puede ser de dos tipos, convencionales, cuando la soldadura se realiza por solo un lado del material de trabajo, o de bobina (también conocido como carrete), mediante el cual la soldadura se realiza por ambos lados del material de trabajo. Para ello, se utilizan dos herramientas, una por cada lado, con sus pasadores conectados y rotando de forma unísona. Este última tipología de pieza conseguirá mejores propiedades ya que no se producen defectos de unión en la soldadura por la parte opuesta a donde se realiza la soldadura [2,9,32].

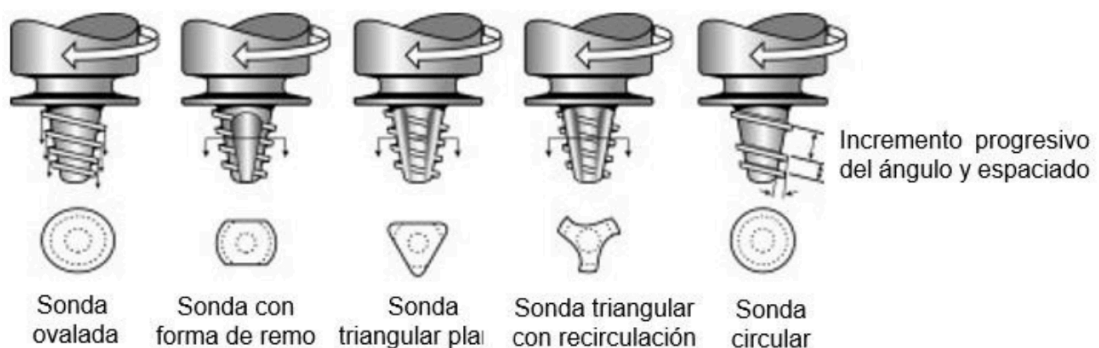


Figura 34: Tipologías de soportes de herramientas de FSW. [36]

5.2. DISEÑO DE LA UNIÓN

La soldadura por fricción-agitación ofrece la capacidad de poder unir diferentes geometrías, sin embargo existen ciertas limitaciones. Por ejemplo, cualquier tipo de soldadura de filete es imposible realizarla por FWS debido a que este proceso es un proceso de soldadura autógena.

Por otro lado, es importante destacar que los requisitos de diseño y fabricación del yunque y de la herramienta están relacionados con cada tipología de unión. A continuación se muestran en la figura un resumen de las geometrías de unión más comunes para FWS [9]:

- I. Soldadura a tope recta.
- II. Soldadura de solape.
- III. Soldadura de esquina a 90°.
- IV. Soldadura en T
- V. Soldadura en ángulo oblicuo
- VI. Soldadura a tope con desajuste

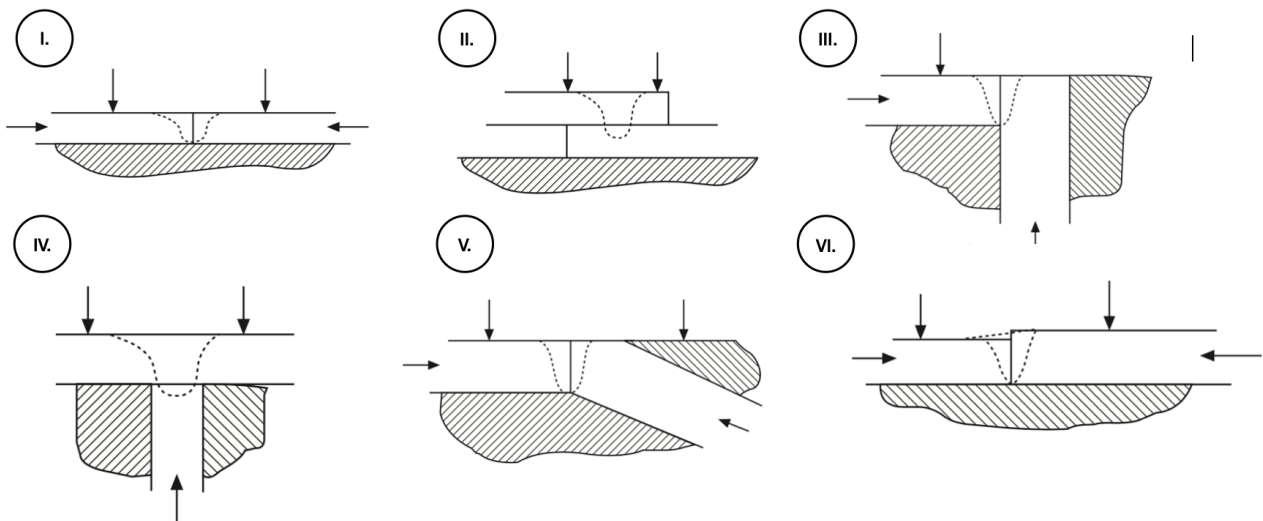


Figura 35: Geometrías de unión en FSW. [9]

A pesar de lo comentado anteriormente, es posible la unión de otro tipo de geometrías mediante FSW. Para ello es necesario que se cumplan una serie de requisitos [9]:

- Proporcionar un área suficientemente amplia para permitir la trayectoria del hombro.
- Proporcionar una contención suficiente del metal de soldadura ablandado por el calor ejercido.
- Proporcionar la fuerza suficiente de sujeción para evitar el movimiento de las piezas de trabajo.
- Proporcionar un disipador de calor adecuado para disipar el calor de la soldadura.

Al respecto del área requerida para permitir la trayectoria del hombro de la herramienta de soldadura comentar que depende del espesor del material y la aleación a unir. Por lo general, para las aleaciones de aluminio, el área requerida para el hombro es de tres a cinco veces el espesor del material. Por otro lado para aleaciones de acero o titanio normalmente requerirán menos área. Esto es debido a que estos materiales tienen una conductividad térmica más baja y, por lo tanto, requieren un diámetro de hombro más pequeño.

Para finalizar, indicar que los detalles mecanizados, como agujeros perforados, los cuales estén muy cerca de una junta de soldadura deben evitarse o taponarse temporalmente durante la soldadura para evitar que el material ablandado se salga.

5.3. MATERIALES A UNIR

Las primeras uniones realizadas mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación fueron partiendo del aluminio como material de trabajo. Con el tiempo, gracias al afán por investigar cuanto de potente era este proceso, se ha ido demostrando que muchos de los beneficios demostrados para uniones de aluminio también se pueden ver en soldaduras de otros materiales como por ejemplo en el acero, titanio, cobre, magnesio o plomo .

Aunque la capacidad de soldabilidad de diferentes materiales mediante este proceso ha sido demostrada, es cierto que, para materiales de alto punto de fusión, se producen unas condiciones más duras sobre el material de la herramienta lo que hace que sea mucho más difícil llevar a cabo la operación de soldadura. Es decir, aunque el proceso FSW tiene esta característica, antes de realizar una soldadura con un material de alto punto de fusión, es necesario realizar un estudio económico previo así como de rendimiento del proceso para que éste sea un proceso productivo y práctico [2,9].

Ciertamente, gracias a la gran versatilidad que muestra este proceso de soldadura, no se tienen unas características específicas las cuales deba cumplir un material para ser soldable por FSW. Sin embargo, gracias a la experiencia obtenida a lo largo del tiempo gracias a las diferentes investigaciones se tienen algunas sugerencias sobre requisitos muy generales. Dichas sugerencias están basadas en pruebas realizadas en uniones de piezas de trabajo de aluminio, origen del FSW.

Por un lado, para comenzar el proceso de soldadura es necesario que se produzca un ablandamiento térmico del material de la pieza de trabajo, por lo que de aquí se extrae que el proceso se producirá a una temperatura cercana a la del punto de fusión del material, lo que implica que es necesario que se genera un calor de tal intensidad que permita superar la pérdida de calor en la zona de soldadura debido a la conducción térmica existente hacia la pieza de trabajo.

Aunque normalmente para el desarrollo del FSW en aluminio no se necesitan gases de protección, es cierto que el uso de otros materiales puede llevar a la necesidad de usarlos para evitar reacciones con gases atmosféricos [2,9].

Siguiendo con lo comentado al principio del apartado sobre los materiales de las herramientas, es cierto, que para la soldadura de metales de alto punto de fusión, la elección del material adecuado para la herramienta es la principal limitación para la soldabilidad de este tipo de metales mas duros y resistentes que el aluminio. Sin embargo, esto ha mejorado con el tiempo gracias al desarrollo de nuevos materiales y nuevas geometrías de herramientas para la soldadura, haciéndose posible la unión de materiales como el acero o el titanio.

Con la soldadura por FSW de acero se han alcanzado propiedades de unión únicas ya que, gracias a que la temperatura de soldadura es más baja, da lugar a una distorsión del material también muy baja. Una de las aplicaciones más atractivas para este material son la unión de placas de acero para el sector naval, aunque aún se deben desarrollar equipos de soldadura de menor costo y materiales de herramienta más robustos.

Por otro lado, aunque el titanio también es considerado un material soldable mediante FSW, este método de soldadura con este material es interesante simplemente para algunas aleaciones específicas, para algunas formas concretas de productos o para algunas aleaciones las cuales son más difíciles de alcanzar su punto de fusión.

Respecto al cobre, la soldadura por fricción- agitación del cobre se ha desarrollado durante varios años para la construcción de recipientes para almacenar desechos nucleares. Para esta aplicación tan concreta se requieren tasas de defectos muy bajas, lo que se llegó a conseguir gracias al FSW, ya que, al usar una velocidad de giro relativamente alta, se puede desarrollar suficiente intensidad de calor para lograr soldaduras sólidas y de alta calidad en cobre [2,9].

En definitiva, en cuanto a materiales, la FSW es un proceso de soldadura el cual está perfectamente adaptado a las uniones de elementos metálicos de aluminio, aunque gracias a las últimas investigaciones y avances en la materia se ha conseguido adaptar a uniones de materiales como cobre, titanio, plomo, zinc y magnesio, cada vez obteniendo unos mejores resultados.

Además, el FSW es un proceso el cual es seleccionado en ocasiones para realizar soldaduras de unión de algunas aleaciones de aluminios o fundiciones que resulta difícil o imposible realizar soldadura por otros métodos debido a las altas temperaturas de fusión que se deben alcanzar u otros impedimentos.

Para materiales poliméricos solo se han llevado a cabo un reducido número de experiencias. Hasta la fecha se sabe que materiales como polipropileno, polietileno, peeks o nylon pueden ser unidos mediante esta técnica, no siendo adecuada para termoplásticos ya que el calor produciría la descomposición de este.

Por último destacar de nuevo que es un proceso el cual está demostrado científicamente, a base de experimentos e investigaciones, que puede utilizarse para la soldadura o unión de materiales de diferente naturaleza [2,9].

5.4. MICROESTRUCTURA DE LA UNIÓN SOLDADA

A continuación se observa una sección transversal de una soldadura realizada por FSW para así comprender de una mejor manera la forma en la que se comporta microscópicamente dicha la soldadura.

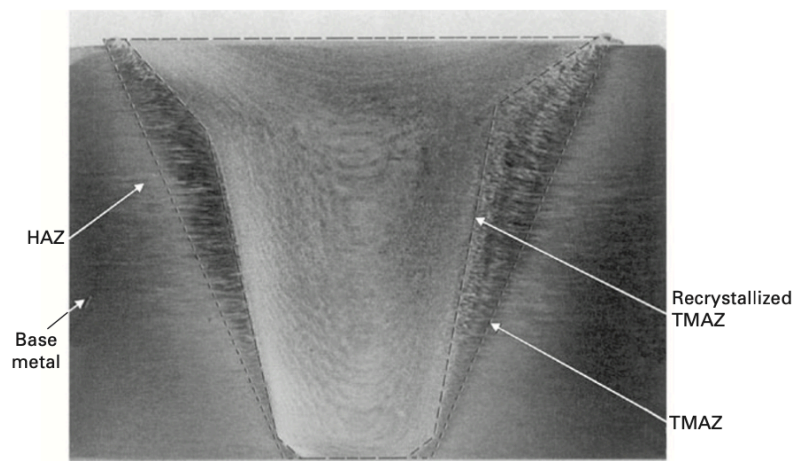


Figura 36: Microestructura de soldadura FSW. [9]

Se observa que la soldadura está delimitada en ambos lados por metal base inalterado. Aunque este material base cerca de la zona de soldadura experimenta una temperatura elevada durante la soldadura, no se ve afectado por ella y por tanto exhibe las mismas propiedades y condiciones que la pieza de trabajo antes de realizar la soldadura.

Más cerca de la soldadura está la zona afectada por el calor (HAZ). Esta zona a diferencia de la anterior si que sufre alteraciones de sus propiedades, pero sin deformación plástica de la estructura de grano original, debido a que se calienta lo suficiente durante el proceso de soldadura.

La alteración de las propiedades en el HAZ puede incluir cambios en la resistencia, ductilidad, susceptibilidad a la corrosión y tenacidad de la pieza de trabajo, pero normalmente no incluirá cambios en el tamaño del grano o la composición química del mismo.

El calentamiento en el HAZ es generalmente lo suficientemente alto en las aleaciones de aluminio para dar como resultado la recuperación del trabajo en frío y el agrandamiento de los precipitados, lo cual es la fundamental causa de los cambios en las propiedades en esta región [9,37].

A continuación se encuentra la zona afectada termomecánicamente (TMAZ). Esta zona abarca todo el material el cual ha sido deformado plásticamente dentro de la unión o zona de soldadura. Es decir, en esa zona, la pieza de trabajo se ha calentado y ablandado lo suficiente como para que, sumando además las fuerzas de presión del proceso, se haya producido deformación plástica de la estructura de grano original del material de partida.

Este TMAZ, a su vez puede dividirse en dos tipos. El TMAZ no recristalizado y el TMAZ recristalizado o pepita. En las aleaciones de aluminio, el TMAZ no recristalizado puede ser una característica importante en la soldadura debido a que puede tener un tamaño significativamente grande y por tanto, puede representar una región de baja microdureza y mayor susceptibilidad a la corrosión.

Normalmente, en materiales que experimentan una transformación de fase inducida térmicamente, el TMAZ puede consistir completamente en material recristalizado, mientras que en otros materiales, el TMAZ puede no estar completamente recristalizado, sin importar el tamaño o la forma del pin.

El análisis del comportamiento del material no sólo se queda en el estudio microscópico de una soldadura una vez está realizada, si no que otro aspecto importante es el estudio del comportamiento de cómo fluye el material durante el ablandamiento y deformación plástica que sufre.

Entender este flujo es un punto muy importante a la hora de conseguir una soldadura de alta calidad, ya que ésta depende en cierta medida del grado de batido entre ambas piezas, ya que a su vez, dependiendo de este grado de batido depende la aparición de defectos en la soldadura tales como la aparición de huecos de aire vacíos entre otros [9,37].

Como ya se ha definido en capítulos anteriores, el lado de avance del proceso FSW será aquel lado de la soldadura en la que el movimiento de la herramienta tiene la misma dirección que el avance, mientras el opuesto es el lado de retroceso.

A continuación se observa la propuesta de Arbegast, el cual para soldaduras de FSW en metales distinguió 4 zonas de deformación distribuidas alrededor del pin y debajo del hombro:

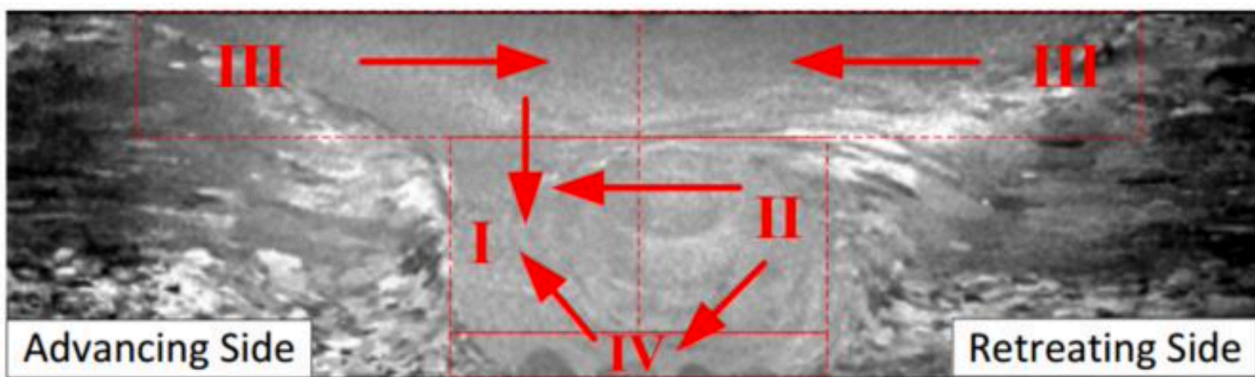


Figura 37: Zonas de la soldadura según el modelo de Arbegast. [38]

Por tanto, teniendo en cuenta la definición de los lados de la soldadura, sumado a la propuesta de Arbegast, se obtiene que la zona II estará en el lado de avance mientras que la zona I en el lado de retroceso. Es decir, debido a la rotación del pin el material de la zona II es fluido hacia a la zona I.

Según el modelo de Arbegast el material de la zona II es batido por el soporte de la herramienta hacia la zona de avance a la vez que es arrastrado hacia abajo. Si el material que se bate desde la zona II a la zona I está lo suficientemente cerca de la zona baja del soporte, se puede introducir en una zona denominada como zona IV y subir de nuevo a la zona I al ser impulsado de nuevo por el soporte de la herramienta.

Además de estas tres zonas, existe otra denominada como zona III. La zona III es la de menor importancia y es generada por el hombro. Parte del material perteneciente a esta zona será arrastrado a la zona I.

El material que se encuentra en frente de la herramienta será batido hacia la parte posterior de ésta, creando flujos de material. Estos flujos de material tienen una importancia muy grande en la calidad final de la soldadura ya que dependiendo de la calidad de éstos se obtendrán uniones con altas propiedades mecánicas o por el contrario, generar uniones soldadas deficientes o no correctas.

Por otro lado, la acumulación de material se producirá en el parte superior de la zona de avance y en la parte inferior de la zona de retroceso, por lo que, un excesivo flujo podrá originar una excesiva acumulación de material en la zona I y por lo tanto, también provocaría una unión deficiente [38,39,40].

5.5. EQUIPOS DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN

En la actualidad existen muchos tipos diferentes para FSW. Algunas están configurados para una aplicación específica y otros tienen una configuración más general que les permite realizar una gama más amplia de tipos de soldaduras diferentes.

A la hora de desarrollar un equipo de soldadura, es necesario determinar los requisitos y rendimientos necesarios para el proceso de soldadura que se va a llevar a cabo concretamente.

Sin embargo, es cierto que todos deberán tener en cuenta el análisis de cuatro parámetros críticos del proceso que deberán ser controlados por la máquina FSW. Estos son la posición de la herramienta, la orientación, las fuerzas axiales, la velocidad de giro y la velocidad de soldadura. En definitiva, tanto el equipo de soldadura como las herramientas deben diseñarse de tal manera que asegure el ajuste, la sujeción y la rigidez adecuados para garantizar que la pieza se mantenga en su lugar, además de disipar el calor que se produce durante el proceso.

Un buen punto de partida para comenzar con los requisitos necesarios es decidir el tipo de soldadura que se va a realizar, y por tanto, el tipo de máquina-herramienta que se necesitará desarrollar. Actualmente encontramos tres tipos principales: Pasador fijo (FSW fixed pin mode), pasador ajustable (FSW adjustable-pin mode) o autorreaccionante (FSW self-reacting mode) [9].

- Pasador fijo (FSW fixed pin mode):

La soldadura de pasador fijo es la forma más tradicional de FSW y es la más fácil de administrar desde la perspectiva del control y el diseño de la máquina. La herramienta de pasador fijo es básicamente una pieza entera que consiste en el hombro y el pasador. Cualquier movimiento del husillo del cabezal del equipo de soldadura se traduce en un cambio asociado en la posición y las cargas del hombro y el pasador [9].

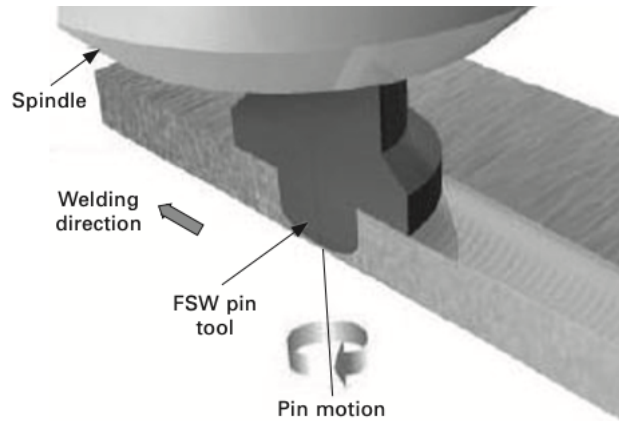


Figura 38: Sección de la herramienta FSW con pasador fijo. [9]

- Pasador ajustable (FSW adjustable-pin mode):

La herramienta del pasador consta de dos piezas, un pasador y un hombro, los cuales pueden moverse de forma independiente uno del otro. Este método, gracias a este motivo principalmente, permite una mayor flexibilidad a la hora de soldar piezas de diferentes tipologías, por ejemplo, piezas con espesores variables, algo que con el método fijo casi es imposible.

Para el desarrollo de este tipo de equipos se necesita un diseño de máquina y esquema de control algo más complejos. Como se ha comentado, la máquina debe tener la capacidad de mover el pasador y el hombro independientemente uno del otro, incluso potencialmente en diferentes direcciones para las velocidades de giro y/o de soldadura. Esto se puede lograr mediante la actuación independiente de los dos ejes dentro del cabezal de soldadura, o controlando el movimiento del pasador dentro del cabezal de soldadura y el hombro mediante la manipulación del eje Z de la herramienta [9].

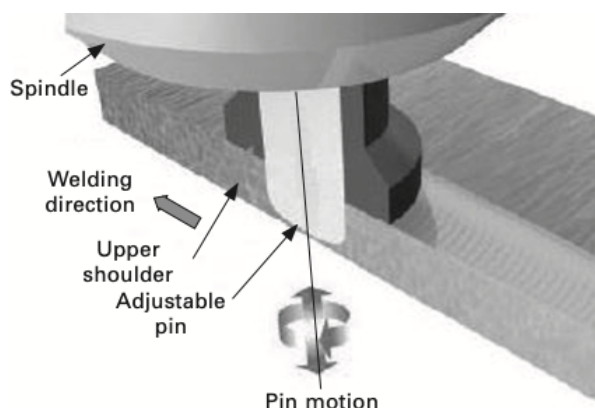


Figura 39: Sección de la herramienta FSW con pasador ajustable. [9]

- Pasador autorreactivo (FSW self-reacting mode):

También se denomina de bobina o carrete. Este tipo de equipos consta de una herramienta con tres piezas: el hombro superior, el pasador y el hombro inferior. A efectos prácticos, siguen existiendo dos elementos a controlar ya que el pasador y el hombro inferior están unidos entre sí.

Los hombros permanecen correspondientemente en las superficies superior e inferior de la pieza de trabajo a medida que el pasador se mueve transversalmente a través de la zona de soldadura. Este tipo de equipos garantizan la penetración, aunque es necesario controlar dos ejes separados, uno para los hombros superior e inferior [9].

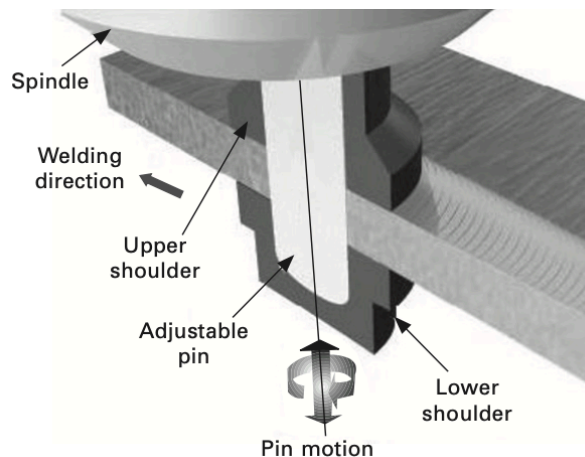


Figura 40: Sección de la herramienta FSW de bobina. [9]

Por otro lado, otros requisitos fundamentales para la máquina FSW incluyen las cargas, el par, las tasas de desplazamiento y el entorno de trabajo. Sin duda, éste último es el más fácil de controlar ya que viene definido por las piezas que se requiere soldar.

Sin embargo, la correlación de las cargas, el par y las velocidades de desplazamiento con los requisitos de la máquina no es tan sencilla. Esto se debe a que estos requisitos dependen de las variables interrelacionadas, como las aleaciones que se van a soldar, la geometría de la pieza, el tipo de unión (por ejemplo, a tope, solape, en 90°, etc), el diseño de la herramienta del pasador, el modo de soldadura y los programas de soldadura.

Las cargas y el par se ven afectados directamente por características y elementos geométricos del hombro y del pasador, como por ejemplo sus diámetros, por las revoluciones por minuto (rpm) del husillo o por las velocidades de desplazamiento. Además el tipo de aleación y el modo de soldadura (pasador fijo, pasador ajustable o de bobina) afectan también a las cargas, los pares y otros requisitos de la máquina.

Dada esta relación de múltiples variables entre el proceso y los requisitos de la máquina resultante, éstas generalmente se especifican para funcionar dentro de un rango. Generalmente es posible afirmar que las piezas con espesores más grandes requieren un par más alto, menos rpm y velocidades de desplazamiento más bajas. Por otro lado, las piezas más delgadas requieren menor par, mayores rpm, y mayores velocidades de desplazamiento [9].

5.6. VENTAJAS, INCONVENIENTES Y ÁREAS DE APLICACIÓN

Aunque a lo largo del desarrollo del presente documento ya se han ido comentado algunas de las ventajas, limitaciones y áreas de aplicación de FSW, en el presente apartado se muestran de una forma conjunta, genérica y ordenada.

Como se ha comentado, el proceso de soldadura por fricción-agitación es un proceso de soldadura económico porque no es un proceso que necesita grandes cantidades de aporte de energía. Aproximadamente utiliza un 20% de entrada de calor en comparación con los procesos tradicionales de soldadura por arco.

Además, este proceso de soldadura requiere una preparación mínima de la superficie, no produce humos ni gases tóxicos que puedan tener un efecto adverso en la salud del operador y del resto del personal, lo que hace de este proceso un método respetuoso con el medio ambiente. Aunque para muchos, la mayor ventaja está en la soldadura de materiales y aleaciones diferentes como el cobre, el aluminio o el acero.

Por otro lado, en comparación con procesos de soldadura tradicionales, el FSW ha demostrado una serie de ventajas. A continuación se muestran las consideradas como más importantes [2,9,40,41]:

- Proceso en estado sólido, por lo que no hay problemas por agrietamiento y/o porosidades.
- No se requiere material de relleno ni gas de protección de atmósfera.
- No es necesario alcanzar las temperaturas de fusión por lo que no hay producción de humos.
- No hay radiación ultravioleta, por lo que de nuevo se afirma que es ambientalmente respetuoso.
- Fácilmente automatizable, por lo que reduce la necesidad de soldadores expertos.
- La soldadura se puede producir en cualquier posición.
- Las propiedades mecánicas no se degradan, si no que mejoran gracias al proceso.
- Se pueden unir tanto materiales metálicos como no metálicos o entre ellos.
- Es posible realizar diferentes tipos de uniones: a tope, en T, en 90°, etc.
- Soldadura de alta calidad gracias a los tamaños de granos finos producidos durante el proceso.
- Soldadura con bajo HAZ (Heat Affected Zone).
- Reducida preparación de superficies a unir, no requiere tratamiento de limpieza previo.

Al respecto de los inconvenientes se encuentran principalmente los siguientes [2,9,40,41]:

- El orificio de salida que queda tras realizar el proceso y proceder a retirar la herramienta.
- Requiere cargas aerodinámica y fuerzas transversales significativas.
- Requiere un sistema de sujeción para la pieza de trabajo más complejo que en otros métodos.
- La inversión inicial de la máquina FSW es demasiado alta.
- Incremento excesivo de la fuerza de penetración y avance respecto a otros procesos tradicionales.

Por último, gracias al alto nivel de éxito que ha desarrollado la soldadura por fricción-agitación en un espacio de tiempo relativamente corto, ha hecho que cada vez haya tomado más importancia en los diferentes sectores industriales más importantes de la historia. Dichas áreas de aplicación siguen creciendo día tras día. La aplicación del proceso de soldadura por fricción-agitación va desde la microsoldadura de componentes electrónicos hasta la fabricación de servicio pesado de componentes automotrices y aeroespaciales [2].

Esta popularidad también fue alimentada gracias a la investigación y desarrollo de nuevas herramientas a base de alta resistencia como por ejemplo el nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN) o el renio de tungsteno. Gracias a estos avances el proceso pudo expandirse y comenzar a utilizarse en soldaduras de aleaciones más duras y con mayores temperaturas de fusión, ya que, como se ha descrito en anteriores capítulos el campo de trabajo original del FSW estaba delimitado a materiales de baja temperatura de fusión como el aluminio o posteriormente el cobre.

A medida que continúa el desarrollo de materiales, se seguirán desarrollando diferentes materiales de herramientas para expandir aún más las áreas de aplicación de esta tecnología.

Algunas de las áreas de aplicación del proceso FSW son las siguientes [2]:

- Industrias marinas: Las industrias marinas han adoptado el proceso de soldadura por fricción-agitación para soldar grandes partes del barco como paneles para cubiertas, mamparas, pisos y superestructuras. También se han comenzado a utilizar para el ensamble de plataformas de aterrizaje de helicópteros y estructuras submarinas.
- Transbordador espacial: Gracias al descubrimiento y exitosos resultados obtenidos con la nueva aleación Al-Li 2195, la cual es mucho más liviana que otros materiales de igual resistencia, el gigantesco tanque externo del transbordador espacial ahora se construye usando soldadura por fricción-agitación.



Figura 41: Tanque exterior Transbordador espacial soldado por FSW. [31]

- Plantas nucleares: La soldadura por fricción-agitación se utiliza en las antiguas plantas nucleares que aún siguen activas para reparar las partes afectadas por los problemas de agrietamiento por corrosión bajo tensión que sufren debido a la presión ejercidas sobre el reactor y al agua en la boquilla del reactor.
- Aplicaciones aeroespaciales: El proceso de soldadura por fricción-agitación se utiliza en la reparación de aeronaves envejecidas, la fabricación de nuevas estructuras y para la fabricación de herramientas para estructuras ensambladas de piezas aeroespaciales.

Tradicionalmente las uniones aeroespaciales se han realizado mediante remachado. Sin embargo cada vez está mas extendido el uso de la soldadura por fricción-agitación ya que ésta puede ofrecer ventajas significativas en comparación con el remachado en términos de ahorro de peso y menores costes de fabricación.

El proceso de soldadura por fricción y agitación se usa principalmente para unir piezas más grandes como alas, fuselajes, empenajes, tanques de combustible criogénicos para vehículos espaciales, tanques de combustible de aviación y otras estructuras más grandes en las industrias aeroespaciales.

- Industrias automotrices: El proceso de fricción-agitación se utiliza en las industrias automotrices para soldar muchas piezas, como llantas, chasis, tanques de combustible y otros trabajos estructurales para reducir el peso que ayuda a aumentar la economía de combustible.

Otras piezas que se pueden unir incluyen cunas de motor y chasis, carrocerías de camiones, trampillas elevadoras para camiones, grúas móviles, vehículos blindados, camiones cisterna y caravanas.

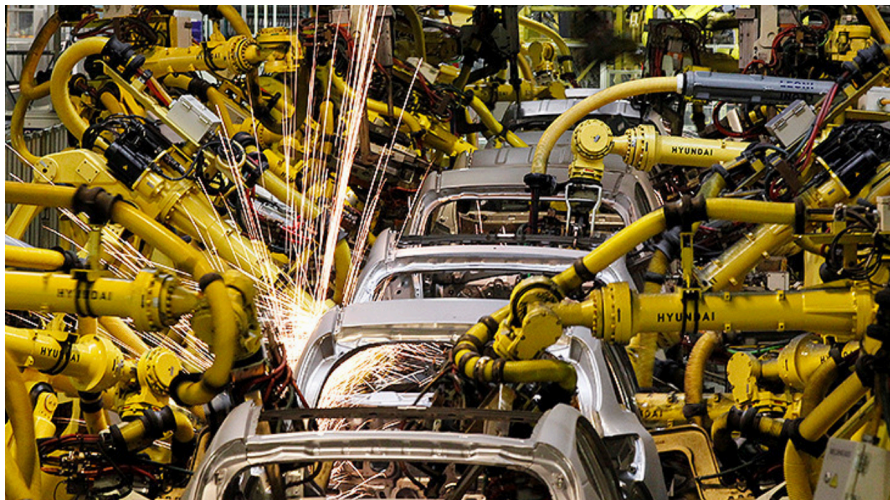


Figura 42: Cadena de soldadura sector automovilístico. [31]

- Otros: La soldadura por fricción-agitación se utiliza en la industria ferroviaria para la construcción de cabinas de tren para unir los paneles o para la unión de las vías ferroviarias. También se usa en industrias químicas para unir intercambiadores de calor, tuberías, etc.

También se usa en las industrias electrónicas para unir aluminio con cobre, conectores y otros equipos electrónicos e incluso se utiliza en las industrias de fabricación en la fabricación de metales.

CAPÍTULO 6. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO SOBRE UNIONES DE MATERIALES SEMEJANTES

El proceso FSW apareció gracias al afán de los investigadores por optimizar los procesos de unión de materiales metálicos mediante soldadura y llegar a subsanar los problemas y defectologías que encontraban en las uniones realizadas mediante otros procesos de soldadura entre materiales semejantes. Concretamente estas primeras investigaciones se realizaron en uniones por soldadura entre aleaciones de aluminio.

El aluminio ha sido el material preferido durante años por parte de los ingenieros de diseño debido a su alta disponibilidad en la naturaleza y a lo económico que resulta respecto a otros materiales. Además de estas características esenciales, dispone de otras muy importantes a la hora de hacer que los ingenieros se decanten por su elección, es un material ligero, robusto y con una extraordinaria resistencia al desgaste. Otra característica importante es su naturaleza reciclable, lo que lo hace más respetuoso con el medio ambiente que otros materiales como el acero o el titanio [42].

Con el tiempo y gracias a la multitud de investigaciones realizadas, este proceso se ha convertido en una de las mejores opciones cuando de procesos de soldadura se habla y con una gran popularidad de aplicación en los sectores ya descritos en el capítulo anterior. Esto es debido a que es capaz de realizar uniones más rápidamente, a su facilidad operativa, y a las grandes características metalúrgicas que se consiguen en comparación con procedimientos de soldadura por fusión [43].

El FSW es un proceso de soldadura en estado sólido que utiliza el calor por fricción generado por una herramienta giratoria para alcanzar un estado plástico de los materiales, el cual, permita la unión de los mismos.

Debido a las altas temperaturas locales que se generan por el rozamiento entre los materiales base, durante el proceso de soldadura por fricción-agitación existe un alto flujo de material en estado plástico. Esto lleva a que durante el FSW tengan lugar modificaciones tanto en las características microestructurales de la unión por soldadura, como en sus propiedades mecánicas.

Por consiguiente, los parámetros más importantes de este proceso de unión por soldadura, serán aquellos que influyan directamente en el calor generado durante la ejecución del mismo. Estos parámetros son la velocidad de giro, la velocidad de soldadura, la inclinación de la herramienta, el diseño de la herramienta y la profundidad de la herramienta, estando este último parámetro estrechamente relacionado con las fuerzas axiales o de presión ejercidas durante el proceso de soldadura por fricción-agitación.

Tras la revisión de diversas investigaciones de procesos de soldadura por fricción-agitación entre materiales de la misma naturaleza, es posible afirmar que es habitual que los investigadores centren sus estudios en el análisis de las tensiones máximas obtenidas a partir de ensayos de tracción, así como el estudio microscópico de la dureza obtenida en la zona de unión por soldadura.

Normalmente, para uniones entre materiales semejantes se utilizan tres tipologías diferentes de pasador, entre las que se encuentran las de perfil triangular, cuadrado o cilíndrico cónico roscado. Se observa que el perfil de pasador triangular proporciona los mejores resultados en comparación con otros perfiles de pasador, tanto de propiedades mecánicas como de dureza de las uniones soldadas mediante FSW [44].

El objetivo de este capítulo es analizar, mediante los resultados obtenidos en diferentes investigaciones, cómo afecta la selección de dichos parámetros sobre las propiedades micro-estructurales, dureza y resistencia a la tracción máximas obtenidas en la junta de unión entre piezas de trabajo del mismo material.

Existe una alta diversidad de investigaciones realizadas sobre las uniones por soldadura mediante FSW entre materiales semejantes, sin embargo, con el objetivo de facilitar la comparación de los resultados, obtener conclusiones, además de por la relevancia de los mismos, el presente capítulo se centrará el análisis de los resultados obtenidos en los estudios realizados por S. Kumar Maurya et al. [43], A. Nait Salah et al. [45] y Ravi Kumar et al. [46]

S. Kumar Maurya et al. llevó a cabo el proceso de unión mediante FSW de uniones para la aleación de aluminio fundido A319, cuya composición y propiedades mecánicas se muestran en las siguientes tablas [43]:

Metal Alloy	Al	Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
A319	Balance	5,9 %	0,12 %	0,8 %	0,31 %	3,4 %	0,4 %

Tabla 1: Composición aleación A319.

Metal Alloy	Resistencia a la tracción (Rm)	Dureza Vickers (Hv)
A319	160 MPa	78

Tabla 2: Propiedades mecánicas aleación A319.

La herramienta utilizada para llevar a cabo los diferentes ensayos fue una herramienta la cual tenía su hombro y pasador, ambos de forma cilíndrica acorde a lo indicado en la figura 34. Este tipo de herramienta es fue la primera que se desarrolló para llevar a cabo los primeros ensayos de FSW y sus características son ideales para llevar a cabo uniones por soldadura FSW de materiales semejantes y blandos tales como las diferentes aleaciones de aluminio.

Con el objetivo de analizar la influencia de la velocidad de giro de la herramienta en uniones de materiales semejantes mediante FSW, se realizaron diferentes ensayos durante los cuales se mantuvieron constantes los parámetros de velocidad de avance o velocidad de soldadura de la herramienta, así como la profundidad y fuerzas axiales aplicadas sobre la misma. A su vez, en cada ensayo diferente se fue incrementando el de la velocidad de giro en intervalos de 200 rpm, desde 800 rpm a 1600 rpm, obteniendo los siguientes resultados [43]:

Ensayo [-]	Velocidad de giro [rpm]	Velocidad de soldadura [mm/min]	Fuerzas Axiales [kN]
1	800	48	6
2	1000	48	6
3	1200	48	6
4	1400	48	6
5	1600	48	6

Tabla 3: Parámetros influencia de la velocidad de giro.

A continuación es posible observar estos resultados obtenidos por S. Kumar Maurya et al. representando de forma gráfica el aumento de la tensión máxima obtenida respecto a la variación de la velocidad de giro de la herramienta [43]:

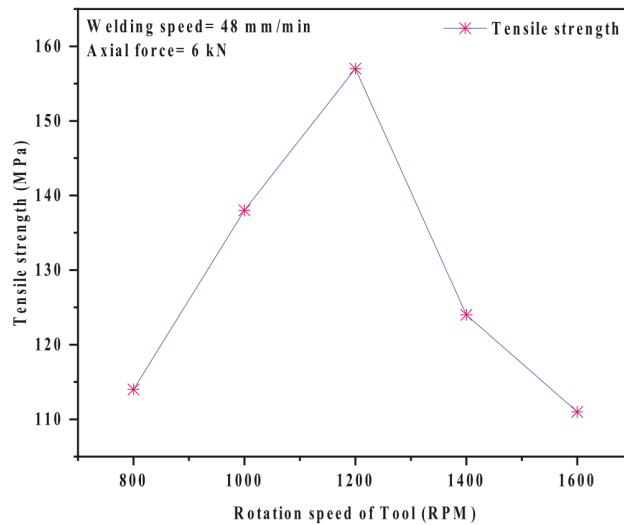


Figura 43: Influencia de la velocidad de giro sobre la resistencia a la tracción en uniones de A319. [43]

S. Kumar Maurya et al. [43] analizaron además la influencia de la velocidad de giro sobre la dureza. Tras la experimentación se demostró que realizando la soldadura a una velocidad de giro de unos 1200 rpm, se alcanza mejorar la dureza esperada de la aleación, llegando a obtener valores de 83,5 Hv, siendo la dureza vickers máxima de la aleación al rededor de los 78 Hv.

A continuación se muestran de manera gráfica los resultados obtenidos a la hora de medir la dureza Vickers (Hv) de la unión por soldadura FSW respecto a la velocidad de giro de la herramienta [43]:

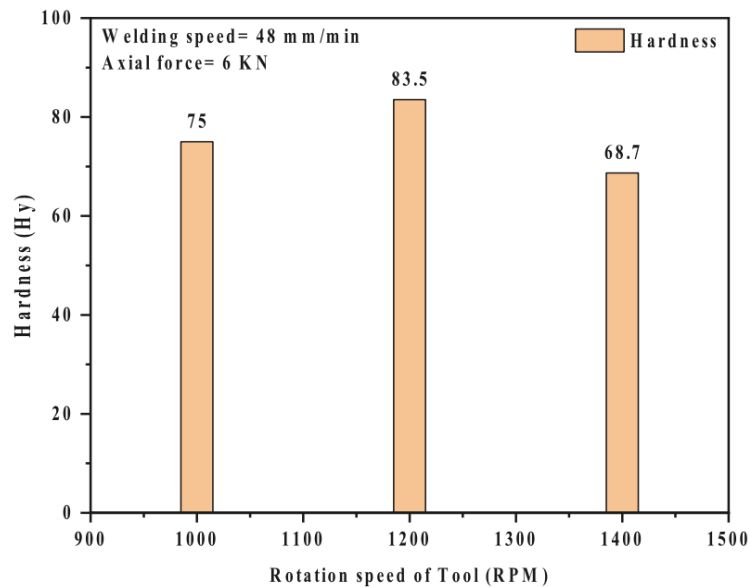


Figura 44: Influencia de la velocidad de giro sobre la dureza en uniones de A319.[43]

Se actuó del mismo modo con la velocidad de avance o velocidad de soldadura aumentando ésta en 12 mm/min partiendo desde los 12 mm/min para el ensayo 1, hasta llegar a una velocidad de soldadura de 96 mm/min para el ensayo 5. Como es posible observar, la velocidad de giro se mantuvo constante a 1200 rpm, valor al que se obtuvieron los mejores resultados en el análisis de dicho parámetro y la fuerzas axiales a un valor de 6 kN. A continuación se muestran los valores tomados en cuenta para los diferentes ensayos [43]:

Ensayo [-]	Velocidad de giro [rpm]	Velocidad de soldadura [mm/min]	Fuerzas Axiales [kN]
1	1200	12	6
2	1200	24	6
3	1200	48	6
4	1200	72	6
5	1200	96	6

Tabla 4: Parámetros para el análisis de la influencia de la velocidad de avance.

Tras el análisis de los diferentes ensayos se afirma que el valor máximo de resistencia a la tracción de 160 MPa se obtiene a una velocidad de avance de 48 mm/min, obteniendo además en este mismo punto, el mayor valor de dureza, 84 Hv. En las siguientes gráficas es posible observar la evolución de la resistencia a la tracción máxima (izquierda), así como la dureza Hv máxima obtenida (derecha) respecto al aumento de la velocidad de giro de la herramienta:

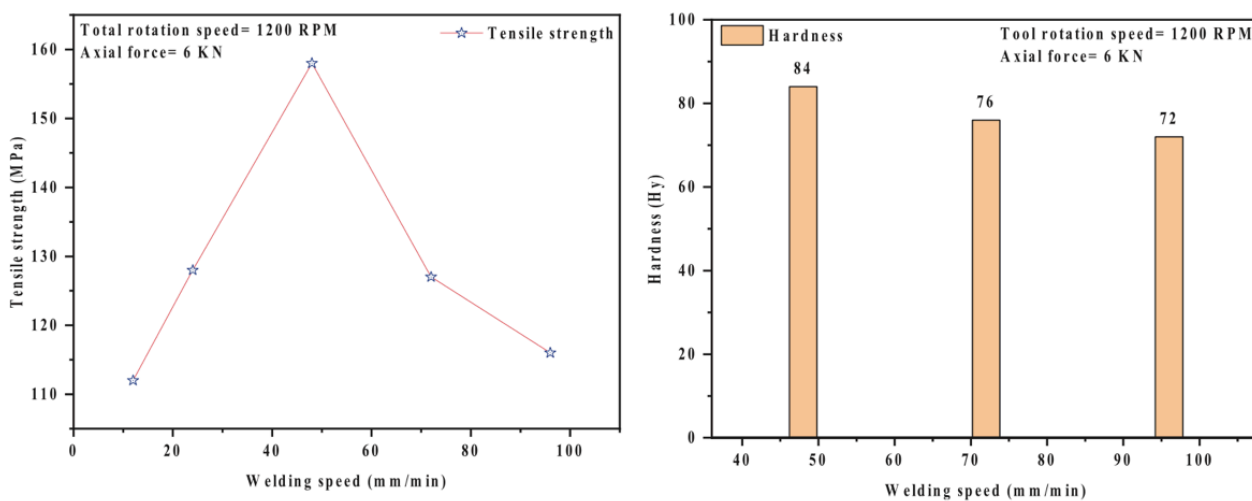


Figura 45: Influencia de la velocidad de avance sobre la resistencia a la tracción y la dureza en uniones de A319.[43]

Por último, con el objetivo de analizar la influencia de la variación de las fuerzas axiales sobre los resultados de fuerza a la tracción máxima y dureza de la unión soldada mediante FSW, se realizaron diferentes ensayos durante los cuales se mantuvieron constantes tanto la velocidad de giro a 1200 rpm, como la velocidad de soldadura de la herramienta a 48 m/min, velocidades a las que se encontraron los mejores resultados de dureza y resistencia a la tracción máxima en los dos anteriores análisis [43]:

Ensayo [-]	Velocidad de giro [rpm]	Velocidad de soldadura [mm/min]	Fuerzas Axiales [kN]
1	1200	48	3
2	1200	48	4
3	1200	48	5
4	1200	48	6
5	1200	48	7

Tabla 5: Parámetros para el análisis de la influencia de las fuerzas axiales.

Se obtuvieron los mejores valores de de resistencia máxima a la tracción y dureza de la unión soldada mediante FSW a un valor de 6 kN. Siguiendo con el mismo procedimiento se muestran a continuación las gráficas donde es posible observar la evolución de ambos valores respecto al aumento de las fuerzas axiales aplicadas a la herramienta [43]:

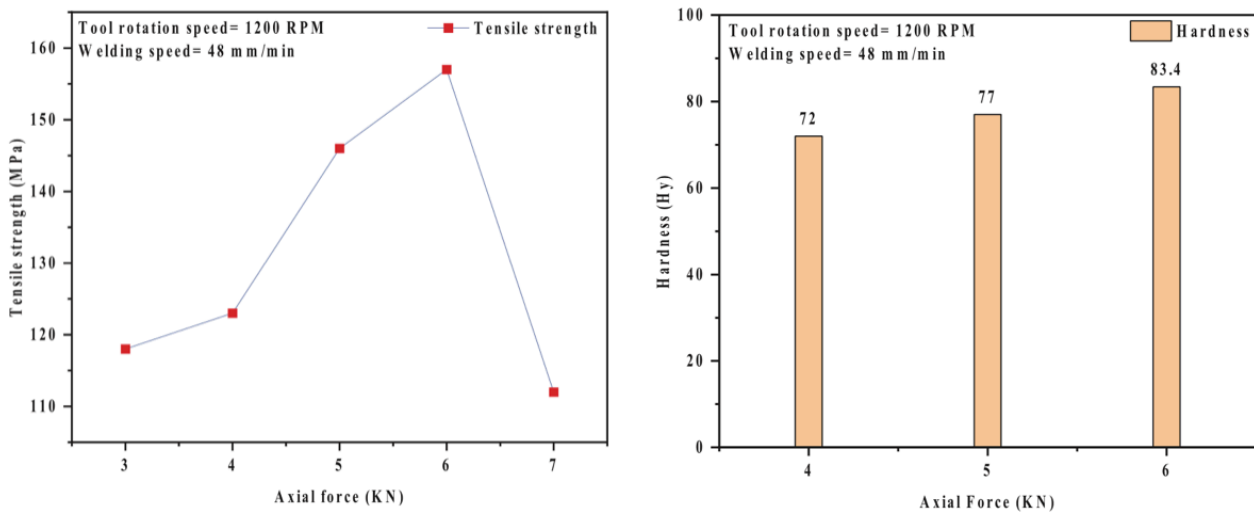


Figura 46: Influencia de las fuerzas axiales sobre la resistencia a la tracción y la dureza en uniones de A319.[43]

Este método experimental demuestra la relación existente entre los 3 parámetros. Mediante la combinación de 1200 rpm de velocidad de giro, 48 mm/min de velocidad de avance y unas fuerzas axiales de 6 kN, se obtuvieron las mejores propiedades mecánicas. Una resistencia a la tracción igual a 160 MPa aproximadamente y una dureza de 83,4 Hv.

En un primer análisis, al mantener la velocidad de soldadura a 48 mm/min, es claramente visible que la resistencia al tracción mostrada por la unión soldada aumenta exponencialmente hasta que, a partir de una velocidad de giro de 1200 rpm, punto donde alcanza aproximadamente los 160MPa indicados en la tabla 2, las propiedades de resistencia máxima a la tracción y dureza, decaen exponencialmente.

A su vez, en un segundo escenario, al mantener esta velocidad de giro constante a un valor de 1200 rpm y variar de forma paulatina la velocidad de soldadura o de avance de la herramienta, se obtienen los mejores valores de resistencia máxima a la tracción entre el rango de 40 a 60 mm/min, llegando a conseguir su máximo valor a una velocidad de soldadura de 48 mm/min. Esto demuestra la correlación existente entre la velocidad de giro y la velocidad de avance de la herramienta, confirmándose así la importancia que tienen estos parámetros a la hora de llevar a cabo una unión por soldadura mediante el proceso FSW.

Este comportamiento de la resistencia máxima a la tracción de la unión soldada puede deberse a que la generación de calor sobre la zona se eleva demasiado a partir de una velocidad de giro igual a 1200 rpm y una velocidad de avance de 48 mm/min. Esto provoca que la deformación plástica sea mucho mayor y más inestable en la zona de soldadura y que además, no se formen componentes intermetálicos en la unión soldada con la misma facilidad que a velocidades de giro menores. La organización de los granos microestructurales será más desordenada y menos compacta, haciendo la unión menos resistente a la tracción y menos dúctil.

Respecto a la resistencia a la tracción, tuvo el mismo comportamiento para los tres casos, es decir, sufría un aumento en sus valores hasta que, a un cierto valor del parámetro variable correspondiente en cada caso, decaía exponencialmente. Esto puede deberse a que, para ese conjunto de parámetros, la zona de soldadura se veía deformada plásticamente en demasía afectando esto negativamente a los valores de resistencia a la tracción.

La dureza para esta aleación fue máxima para valores de fuerzas axiales de 6 kN aplicada para un valor constante de la velocidad de giro de la herramienta y la velocidad de soldadura. Microestructuralmente hablando, la mayor dureza y resistencia a la tracción en las uniones correspondientes puede deberse a la creación de regiones de soldadura libres de defectos, con una dispersión fina y uniforme de las partículas que conforman la junta de unión.

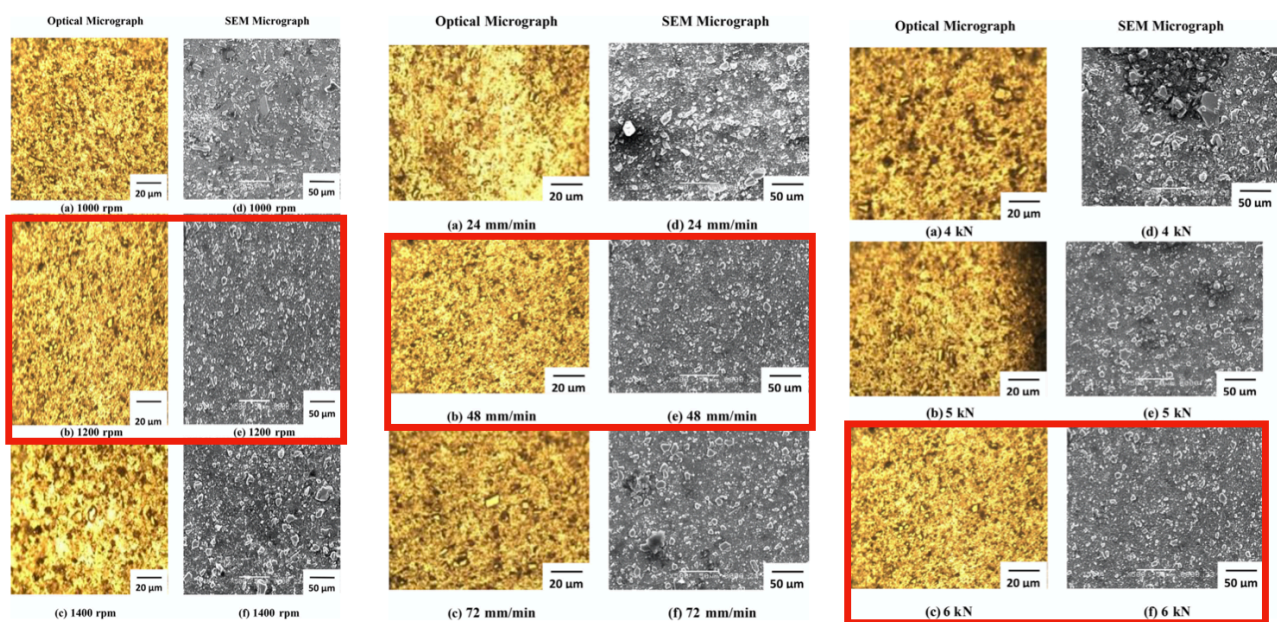


Figura 47: Microestructura en las uniones de A319.[43]

En la imagen mostrada anteriormente es posible observar la microestructura generada en las zonas de soldadura. Si se analiza, es posible demostrar lo afirmado anteriormente, es decir, con la combinación de parámetros óptima nombrada, recuadrada en rojo, se consigue una estructura ordenada, con una dispersión fina y uniforme la cual otorga a la junta de unión unas propiedades mecánicas óptimas y de gran calidad.

Sin embargo este análisis experimental realizado por S. Kumar Maurya et al. [43], no tiene en cuenta uno de los importantes parámetros descritos durante el desarrollo de este documento. Este parámetro es el ángulo de inclinación de la herramienta del FSW, el cual, como ya se ha indicado tiene una gran importancia e influencia a la hora de obtener una soldadura de gran calidad y con las propiedades adecuadas.

A. Nait Salah et al. Realizó una investigación en la cual, al igual que anteriormente, se estudió la influencia que tiene la velocidad de giro y la velocidad de avance de la herramienta en uniones por soldadura mediante fricción-agitación entre materiales semejantes, pero además se preocupó de analizar dicho conjunto de parámetros a diferentes inclinaciones de la herramienta. Para ello realizó diferentes uniones mediante el proceso de soldadura FSW.

Las dos aleaciones fueron de aluminio y sus composiciones se muestran a continuación [45]:

Metal Alloy	Al	Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ti
AA6061	Balance	0,56 %	0,9 %	0,28 %	0,12 %	0,25 %	0,25 %	0,15 %	0,1 %
AA3003	Balance	0,65 %	0,02 %	0,35 %	1,2 %	0,12 %	0,15 %	0,005 %	0,012 %

Tabla 6: Composición aleaciones AA6061 y AA3003.

A diferencia de S. Kumar Maurya et al. [43], A. Nait Salah et al.[45], tomaron de referencia una serie de valores para los parámetros del FSW. Estos valores de los diferentes parámetros de entrada están mostrados en la siguiente tabla [45]:

Velocidad de giro [rpm]	Velocidad de soldadura [mm/min]	Ángulo Inclinación [°]
1100	40	0
1250	55	1
1400	70	2

Tabla 7: Conjunto de valores para los parámetros de la unión AA6061-AA3003.

Los diferentes ensayos se llevaron a cabo mediante una herramienta con hombro cilíndrico y pasador con perfil triangular plano debido a que, a lo largo de los diferentes ensayos analizados por A. Nait Salah et al. [45], se afirma que es la tipología de herramienta que mejores resultados aporta en diferencia con el pasador cilíndrico o el pasador con sección cuadrada. La tipología de pasador con perfil triangular plano es posible observarla en la figura 34.

Realizaron en total 20 ensayos diferentes, para los cuales tomaron diferentes combinaciones de los valores indicados en la tabla 7, obteniendo diferentes resultados de resistencia máxima a la tracción y dureza Hv. A continuación se muestran dichos resultados obtenidos [45]:

Ensayo	Velocidad de giro [rpm]	Velocidad de soldadura [rpm]	Ángulo Inclinación [°]	Resistencia a la tracción [MPa]	Dureza [Hv]
1	1400	55	1	133.28	105
2	1250	55	1	104	79
3	1250	55	1	104.37	83
4	1250	55	1	102.41	78
5	1250	40	1	92.2	74
6	1400	70	0	124.35	92
7	1400	40	0	113.92	86
8	1400	40	2	117.24	92
9	1100	70	0	82.64	64
10	1100	55	1	88.01	71
11	1250	55	0	94.08	75
12	1100	40	0	82.34	68
13	1100	70	2	84.64	65
14	1400	70	2	141.3	101
15	1250	55	1	107.63	85
16	1250	70	1	104.87	75
17	1250	55	1	101.21	77
18	1250	55	1	110.47	82
19	1250	55	2	103.52	79
20	1100	40	2	78.62	63

Tabla 8: Resultados obtenidos de la unión AA6061-AA3003.

Analizando la tabla de resultados, se observa que se obtiene el mismo razonamiento que durante el análisis de la investigación de S. Kumar Maurya et al. [43].

Al mantener los valores de velocidad de soldadura o velocidad de avance, así como la inclinación de la herramienta constantes, y variar paulatinamente la velocidad de giro de la herramienta durante la ejecución del proceso de FSW se obtienen mayores valores de resistencia a la tracción máxima para la unión por soldadura realizada.

A continuación se muestra gráficamente los resultados obtenidos para una velocidad de avance constante igual a 55 mm/min y un ángulo de inclinación de 1°:

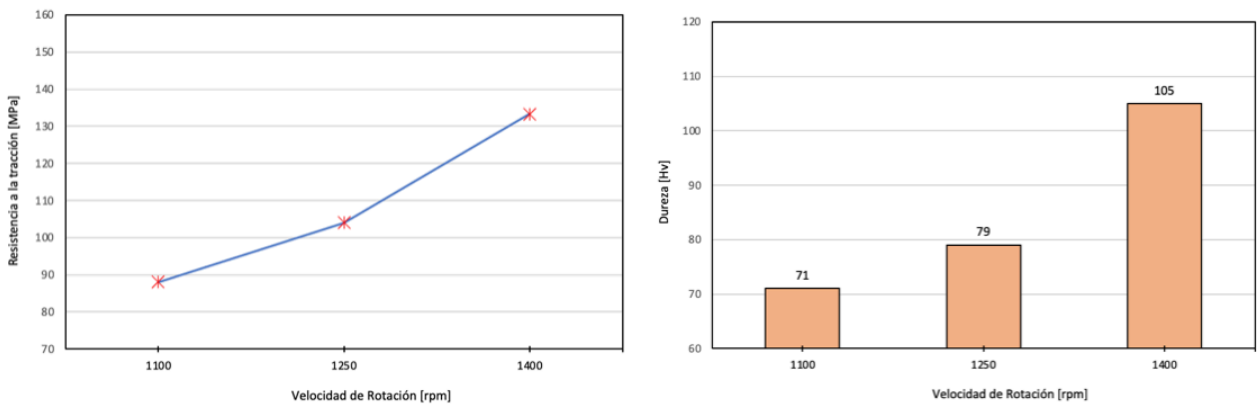


Figura 48: Influencia de la velocidad de giro en uniones de AA6061-AA3003.

El gráfico muestra como mejoran los valores obtenidos de resistencia máxima a la tracción y dureza de la unión de soldadura a medida que se aumentan los valores de velocidad de giro de la herramienta en FSW.

No obstante, al analizar el comportamiento de la unión de soldadura entre ambas piezas de Aluminio, pero esta vez, siendo el ángulo de inclinación de la herramienta el parámetro variable, a una velocidad de giro de 1250 rpm y una velocidad de avance de 55 mm/min, es posible observar un comportamiento diferente al que ha sido expuesto en ambas investigaciones anteriores:

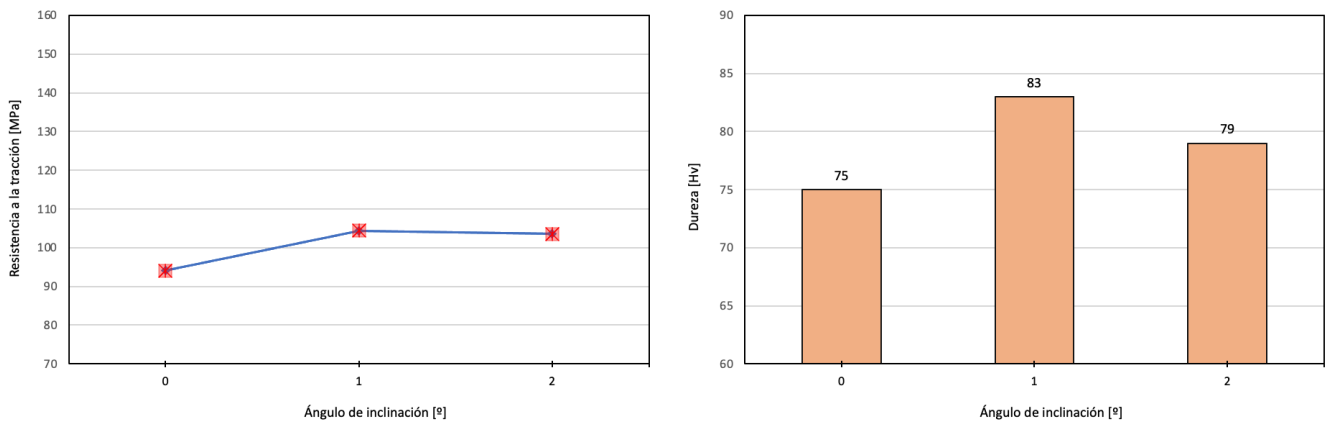


Figura 49: Influencia del ángulo de inclinación en uniones de AA6061-AA3003.

En esta ocasión, tanto la resistencia máxima a la tracción, como la dureza de la unión por soldadura no aumentan al incrementar el ángulo de inclinación. Su valor es prácticamente igual, por lo que podemos afirmar que el ángulo de inclinación no tiene una influencia tan directa sobre los valores obtenidos de resistencia a la tracción y/o dureza, aunque igualmente es cierto que, para valores de 1° de inclinación, se obtuvieron los mejores resultados respecto a las propiedades mecánicas obtenidas.

Por último, con el objetivo de realizar un ejercicio de comparación de resultados adecuado y conseguir una serie de conclusiones finales, también se analiza a continuación la investigación realizada por Ravi Kumar et al. [4] cuyo trabajo consistió en analizar del mismo modo la unión entre las aleaciones de aluminio AA6082 y AA6061, ésta última coincidente con la investigación de A. Nait Salah et al. [45].

En las siguientes tablas se muestran, la composición de la aleación AA6082[46]:

Metal Alloy	Al	Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ti
AA6082	Balance	1,2 %	0,95 %	0,3 %	0,45 %	0,15 %	0,2 %	0,15 %	0,08 %

Tabla 9: Composición aleación AA6082.

De igual modo que realizar su investigación A. Nait Salah et al. [45], Ravi Kumar et al. [46] tomó de regencia para la realización de sus ensayos una serie de valores de velocidad de giro, velocidad de avance o soldadura y ángulo de inclinación de la herramienta:

Velocidad de giro [rpm]	Velocidad de soldadura [mm/min]	Ángulo Inclinación [°]
800	40	0
1100	50	1
1400	60	2

Tabla 10: Conjunto de valores para los parámetros de la unión AA6061-AA6082.

Se realizaron un total 15 ensayos diferentes, para los cuales tomaron diferentes combinaciones de los valores indicados en la tabla 10, obteniendo diferentes resultados de resistencia máxima a la tracción y dureza Hv. A continuación se muestran dichos resultados obtenidos [46]:

Ensayo	Velocidad de giro [rpm]	Velocidad de soldadura [rpm]	Ángulo Inclinación [°]	Resistencia a la tracción [MPa]	Dureza [Hv]
1	1400	60	2	151	79
2	1400	40	2	225	104
3	800	60	2	135	78
4	1100	50	1	195	102
5	1400	50	1	211	84
6	1100	50	0	185	98
7	1400	40	0	177	100
8	1400	60	0	205	102
9	1100	60	1	157,3	79
10	800	40	2	196	98
11	1100	50	2	202	104
12	800	40	0	159,3	79
13	1100	40	1	175,4	88
14	800	50	1	192	92
15	800	60	0	195	84

Tabla 11: Resultados obtenidos de la unión AA6061-AA6082.

A continuación es posible observar los resultados obtenidos de resistencia a la tracción y dureza para una unión por soldadura mediante fricción-agitación realizada a una velocidad de giro de la herramienta variable, una velocidad de soldadura constante, igual a 50 mm/min, y un ángulo de inclinación de 1° por parte de Ravi Kumar et al. [46]:

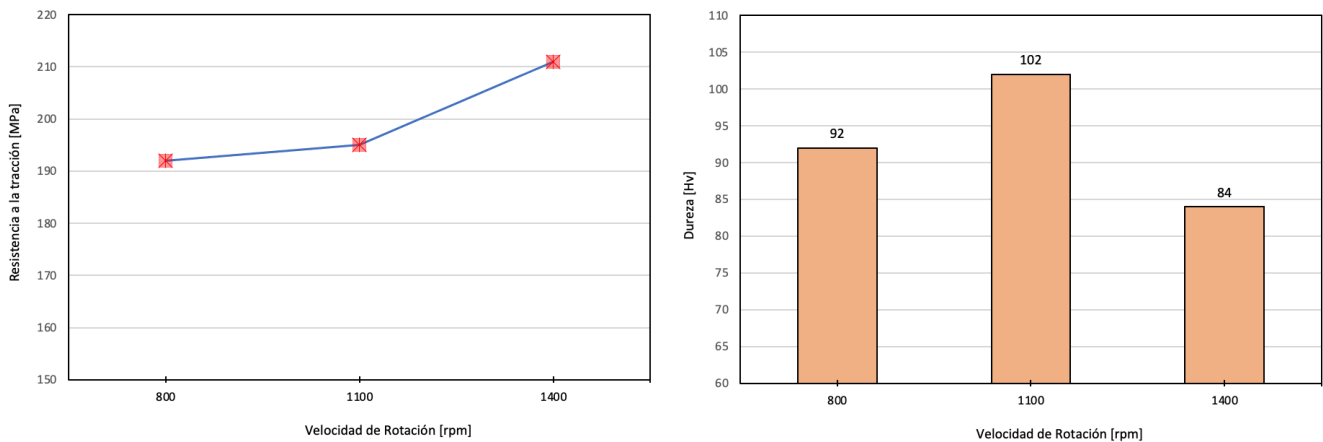


Figura 50: Influencia de la velocidad de giro en uniones de AA6061-AA6082.

Al analizar el comportamiento de la unión de soldadura entre ambas piezas de aluminio, pero esta vez, siendo el ángulo de inclinación de la herramienta el parámetro variable, a una velocidad de giro de 1250 rpm y una velocidad de avance de 50 mm/min, es posible observar un comportamiento diferente al que ha sido expuesto en la figura 50.

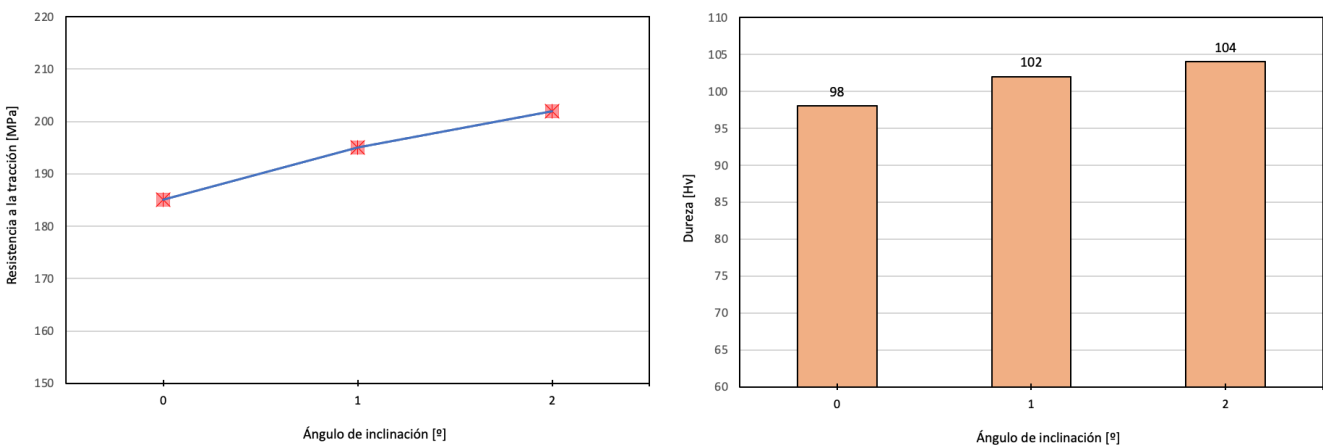


Figura 51: Influencia del ángulo de inclinación en uniones de AA6061-AA6082.

Los resultados obtenidos arrojan una afirmación muy importante sobre la influencia del ángulo de inclinación de la herramienta en uniones por soldadura mediante fricción-agitación de materiales semejantes.

Para una misma velocidad de rotación, el ángulo de inclinación tendrá una mayor influencia en los resultados de resistencia máxima a la tracción y dureza de la unión soldada, cuanto menores sean las velocidades de soldadura de la herramienta. En definitiva, a un mismo valor de velocidad de giro, y a velocidades de soldadura menores, se conseguirán mejores resultados de resistencia máxima a la tracción y dureza cuanto mayor sea el ángulo de inclinación de la herramienta, mientras que, a un mismo valor de velocidad de giro, cuanto mayores sean las velocidades de soldadura, menor influencia tendrá el ángulo de inclinación de la herramienta en la consecución de unos valores elevados de resistencia máxima a la tracción y dureza.

CAPÍTULO 7. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO SOBRE UNIONES DE MATERIALES DISÍMILES

A pesar a lo comentado al comienzo del capítulo anterior donde se describía la importancia y lo buena elección que resultaba el aluminio para cualquier ingeniero de diseño, en el escenario del mundo actual, el cual evoluciona tan rápidamente y es altamente competitivo, un material por sí solo no suele cumplir con todos los requisitos ingenieriles necesarios para asegurar un rendimiento que sea 100% confiable.

Si a esto se le suma el aspecto del peso/costo del material, hace que se haya abierto desde hace un tiempo hacia la actualidad un nuevo escenario o campo de investigación, la estructura híbrida, la cual no es más que la combinación múltiple de diferentes materiales. Por ejemplo, el proyecto de automóvil superligero europeo, en el que el bastidor delantero está compuesto de uniones de acero y aluminio o el techo con uniones de aluminio con magnesio [47,48].

También se encuentran ejemplos dentro de la industria aeroespacial donde se utilizan estructuras híbridas de aluminio y titanio para las guías de los asientos de los aviones [49] y la estructura tipo sándwich de panel para el avión supersónico [50].

Como es posible haber observado a estas altura de capítulo, una de las grandes complicaciones a la hora de la unión de estos materiales es la considerable diferencia de temperatura entre los puntos de fusión lo que hace que la soldadura por fusión sea una tarea difícil de llevar a cabo [51].

Es aquí donde entra en juego el proceso de soldadura por fricción-agitación y todas sus variantes desarrolladas, las cuales han sido investigadas para solventar defectos, mejorar el flujo de material, fortalecer y dar uniformidad al grano de la unión. En definitiva, esta tipología de soldadura sólida es considerada actualmente como el método de soldadura más adecuado para unir diferentes variedades de materiales, ya sea en combinaciones similares o diferentes.

Por todo lo descrito anteriormente, este capítulo estará centrado en el análisis detallado de la unión entre aleaciones de aluminio con metales como el titanio, acero o cobre, brindando una visión las sus propiedades microestructurales y mecánicas de cada tipología de unión.

7.1. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS SOBRE UNIONES ALUMINIO-TITANIO

La influencia de los parámetros principales analizados en las uniones de aluminio-aluminio, tales como la velocidad de giro (RS), la velocidad de soldadura (WS) o el ángulo de inclinación (TA) sigue siendo muy importante a la hora de obtener unos buenos resultados, sin embargo, para este tipo de uniones existen otro tipo de parámetros auxiliares no estudiados tan a fondo que también deben de ser tenidos en cuenta a la hora de llevar a cabo este tipo de uniones.

Es decir, para tener una mejor interacción entre las diferentes aleaciones de aluminio y titanio se debe de tener en cuenta aspectos como la posibilidad del uso de una herramienta de compensación hacia el aluminio, la correcta colocación de los materiales en los lados de avance y retroceso en la configuración del proceso en soldaduras a tope, o la correcta colocación de los lados superior e inferior en las soldaduras solapadas.

La mayoría de investigaciones científicas de este tipo de uniones están centradas en el análisis del comportamiento de las soldaduras realizadas entre Al-6Mg-Ti6Al4V [52], AA1060-Ti6Al4V [53], AA2024-Ti6Al4V [54,55,56], AA6061-Ti6Al4V [57,58,59] y algunas otras combinaciones de titanio y aluminio comercialmente puros [60,61,62]. En la siguiente figura se muestra un resumen de las diferentes combinaciones de velocidad de giro y velocidad de avance analizadas:

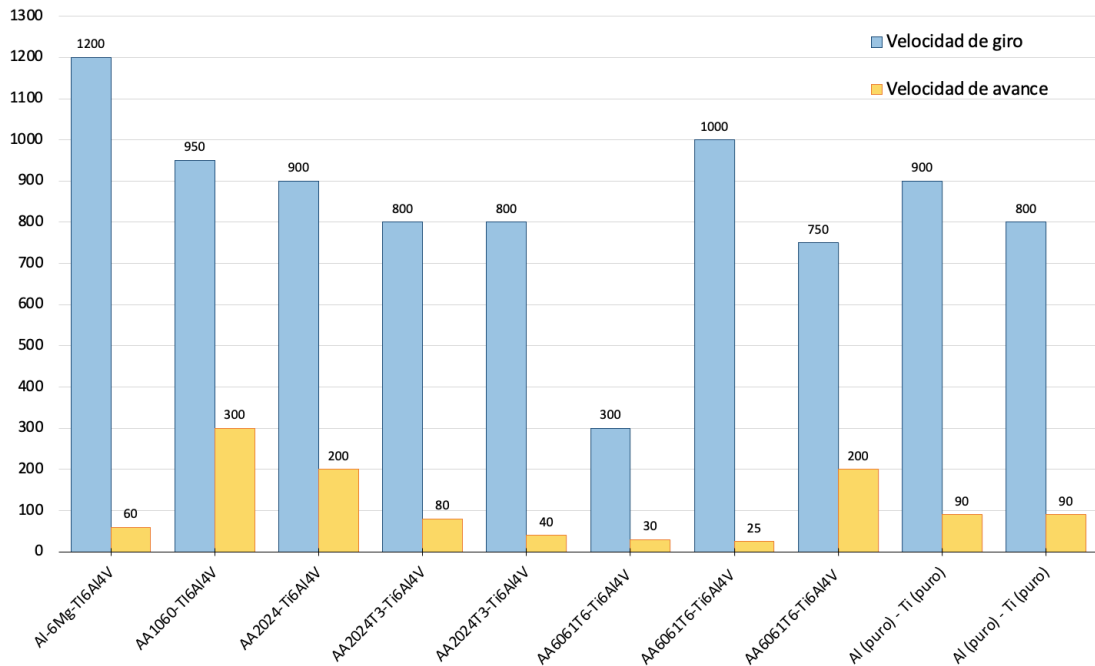


Figura 52: Velocidad de giro y velocidad de avance analizadas en uniones FSW Al-Ti.

Para diferentes soldaduras entre combinaciones de de Al-Ti se considera una velocidad de giro adecuada la comprendida entre de 750-950 rpm, mientras que respecto a la velocidad de avance, se considera adecuada entre 80-200 mm/min.

En este tipo de uniones se sigue trabajando debido a que todavía existe la formación de compuestos intermetálicos (IMC), defectos como agujeros de gusano o grietas y peores propiedades mecánicas en la región de la unión en comparación con los materiales base. Sin embargo, esta defectología no es tan crítica en comparación con los defectos encontrados en uniones realizadas por procesos de soldadura convencionales.

A día de hoy se llevan a cabo diferentes estrategias de fabricación, como el control de entrada de calor utilizando el diseño de herramientas y parámetros de proceso de FSW [57] o la aplicación de capas intermedias de niobio, zinc o cobre entre los materiales base de este tipo de unión entre Al-Ti para obtener soldaduras sólidas y libres de defectos con unas propiedades mecánicas apropiadas [60,61,62].

En la siguiente tabla se resumen los valores de los diferentes parámetros de entrada investigados tales como la velocidad de giro de la herramienta (RS), velocidad de soldadura de la herramienta (WS), ángulo de inclinación (TA), además de los diseños tenidos en cuenta y resultados obtenidos sobre máxima resistencia a la tracción de la unión por soldadura (UTS), efectividad de la unión soldada respecto a los materiales base (JE) o dureza Vickers (Hv):

Ref.	Tipo de soldadura	Diseño herramienta	Parámetros entrada	Resultados
[52]	Al-6Mg-Ti6Al4V	- Pasador cilíndrico cónico - TA: 0°	- RS: 1200 rpm - WS: 60 mm/min	- UTS: 292 MPa - JE: 92,65% resistencia a la tracción respecto a Al - IMC máxima de 10 μm
[53]	AA1060-Ti6Al4V	- Hombro cóncavo - TA: 0°	- RS: 950 rpm - WS: 300 mm/min	- UTS: 1910 N - JE: 100% respecto a Al1016
[54]	AA2024-Ti6Al4V	- Gas protector de argón para evitar la oxidación. - TA: 2°	- RS: 900 rpm - WS: 200 mm/min	- Resistencia máxima al corte: 200 N/mm - Alta influencia de RS en comparación con la fuerza axial y temperatura de entrada
[55]	AA2024T3-Ti6Al4V	- Pasador cónico roscado - Hombro cóncavo	- RS: 800 rpm - WS: 80 mm/min	- UTS: 348 MPa - JE: 73% respecto a Al2024-T3
[56]	AA2024T3-Ti6Al4V	- Hombro/pasador cilíndrico - TA: 0°	- RS: 800 rpm - WS: 40 mm/min	- UTS: 271 MPa - JE: 60% respecto a Al2024-T3
[57]	AA6061T6-Ti6Al4V	- Hombro cóncavo - Pasador cónico - TA: 2°	- RS: 300 rpm - WS: 30 mm/min	- UTS: 153 MPa - JE: 50% respecto a Al6061-T6
[58]	AA6061T6-Ti6Al4V	- Pasador cónico roscado - TA: 3°	- RS: 1000 rpm - WS: 25 mm/min	- UTS: 134 MPa - JE: 35% respecto a Al6061-T6
[59]	AA6061T6-Ti6Al4V	- Hombro cóncavo - TA: 3°	- RS: 750 rpm - WS: 200 mm/min	- UTS: 215 MPa - JE: 68% respecto a Al6061-T6
[60]	Al (puro) - Ti (puro)	- Capa intermedia de Niobio - TA: 0°	- RS: 900 rpm - WS: 90 mm/min	- UTS: 66 MPa - JE: 65% respecto al Aluminio comercial puro
[62]	Al (puro) - Ti (puro)	- Capa intermedia de Cobre - Pasador cilíndrico - TA: 0°	- RS: 800 rpm - WS: 90 mm/min	- La microdureza aumenta con una WS reducida - Dureza máxima: 300 HV

Tabla 12: Parámetros y resultados obtenidos en uniones FSW Al-Ti.

En la siguiente figura se puede observar las diferentes tipologías de hombros que se nombran en la tabla 13:

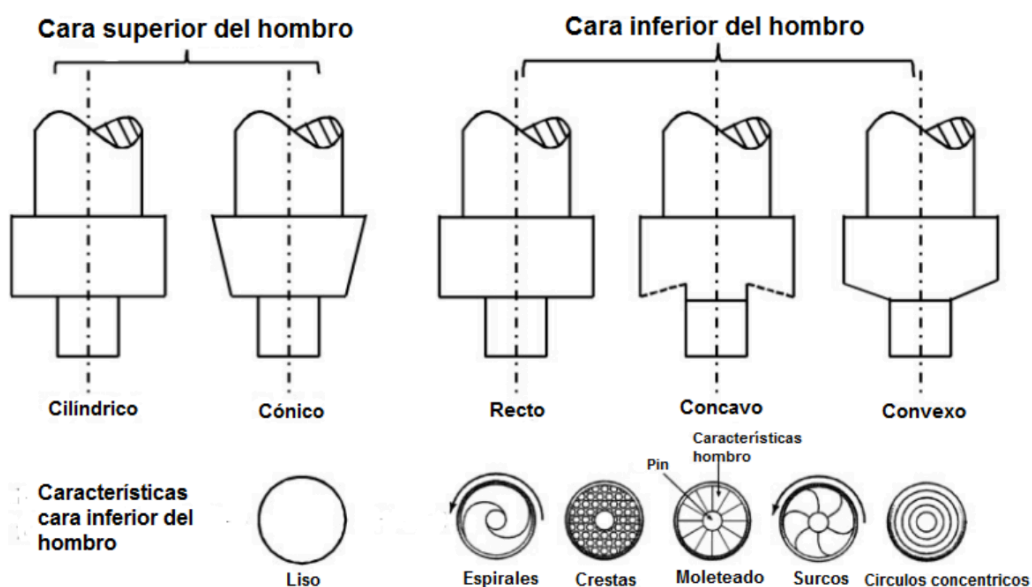


Figura 53: Formas y características del hombro en FSW. [63]

Por otro lado, de igual forma se muestran a continuación las diferentes tipologías de pasadores existentes a modo de aclaración:

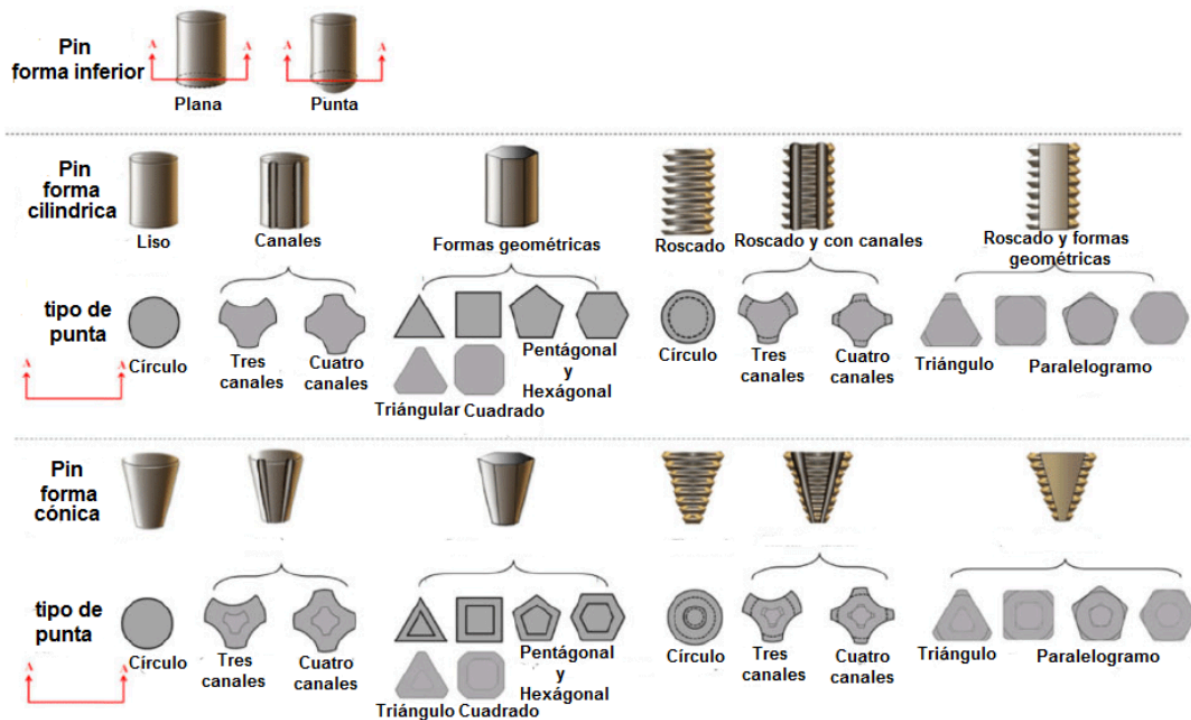


Figura 54: Formas y características del pasador en FSW. [63]

7.1.1. INFLUENCIA SOBRE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

Las uniones Al-Ti, al igual que ocurre en otras tipologías de uniones de materiales disímiles, tienen una menor resistencia a la tracción que la aleación de aluminio utilizada como material base en la soldadura.

Como es posible observar en los resultados expuestos en la tabla anterior, la eficiencia respecto a la aleación de Aluminio, en términos generales varía entre un 60%-90%. No obstante, existen valores máximos en casos concretos de 100% [53] y mínimos de un 35% tal y como advirtió Bang et al. [58].

Los métodos como la inserción de capas intermedias de diferentes aleaciones de cobre o niobio, o la modificación de la configuración de las juntas de soldadura, son usadas para aumentar la resistencia a la tracción. Li et al. [52] usó una configuración a tope modificada para unir Al-6Mg y Ti6Al4V con un conjunto diferente de parámetros y obtuvo una resistencia a la tracción máxima de 292 MPa, que es un 92,65% de resistencia a la tracción de la aleación de aluminio base, a 1200 rpm y 60 mm/min.

Kar et al. [60] unieron Al y Ti usando el niobio como una capa intermedia. La capa intermedia de niobio restringió la reacción entre Al y Ti haciendo que la unión mostrara una ductilidad del 34%, lo que significaba un 80 % superior a la de la aleación base de aluminio, y una resistencia a la tracción de 66 MPa, el 65 % de la aleación base más débil, en este caso, una tipología de aluminio comercial puro.

Buffa et al. [54] consiguieron una resistencia máxima a la tracción de 200 N/mm a 900 rpm y una velocidad de avance de 200 mm/min. Esto significaba una velocidad de giro mínima y una velocidad de avance de la herramienta máxima. Yue et al [57] también obtuvieron un resultado similar al unir aleaciones Ti6Al4-V/AA6061. La máxima resistencia al corte de 7667,1 N se logró a 300 rpm, la cual era también la más baja entre todas las velocidades de giro. Wei et al. [53] analizaron la resistencia a la tracción obteniendo un aumento de la misma hasta que se alcanzaba una velocidad de soldadura de 300 mm/min.

7.1.2. INFLUENCIA SOBRE LA DUREZA

En la zona del cordón de soldadura para uniones de Al-Ti, la dureza depende de la distribución de las partículas de titanio dentro del aluminio plastificado, por lo que se observa un aumento de la dureza en algunos puntos aislados debido a la existencia de fragmentos de titanio.

Ghogheri et al. [64] unieron titanio comercialmente puro y aleación de aluminio 5083 y observaron que el cordón de soldadura tiene mayores valores de dureza con respecto a la aleación de aluminio debido a la recristalización dinámica, la cual mejora el refinamiento del grano. Dressler et al. [55] también obtuvo un tipo de resultado similar, y afirmó que el motivo de esta mejora fue el endurecimiento del límite de grano. Es decir, se puede afirmar que la dureza en la interfaz del lado de la aleación de titanio siempre permanecerá más alta que la del titanio utilizado como metal base en la unión. Este incremento de la dureza se debe a la deformación plástica de la aleación de titanio por la sonda de la herramienta [60].

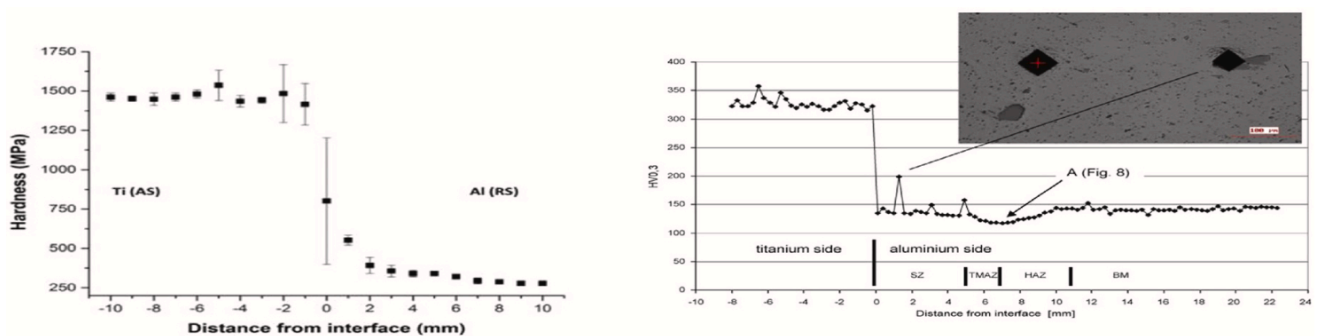


Figura 53: Microdureza en diferentes uniones FSW Al-Ti. [55,60]

7.1.3. INFLUENCIA SOBRE LA MACRO Y MICROESTRUCTURA

La macroestructura de la sección transversal de soldadura Al-Ti depende en gran medida de la velocidad de giro, la velocidad de soldadura, las fuerzas axiales aplicadas, el desplazamiento del pasador y el diseño de la herramienta en su conjunto. Una velocidad de desplazamiento decreciente conduce a que la mayor parte de la pepita de soldadura se encuentre en el lado del aluminio, ya que éste tiene una mejor estabilidad de grano que la zona sin procesar.

De manera similar, el cambio en el desplazamiento del pasador aumenta o disminuye la cantidad de titanio en la zona de la pepita. El área debajo del hombro experimenta la mayor fracción de calor y, por lo tanto, la parte superior de la aleación de titanio es la que se ve ablandada y deformada. La diferente concentración de aluminio y titanio en la pepita es posible observarlas en la siguiente figura gracias a la diferencia que existe entre sus apariencias ya que las regiones ricas en aluminio se muestran negras, mientras que la región blanca es aquella la cual es rica en titanio [61,65].

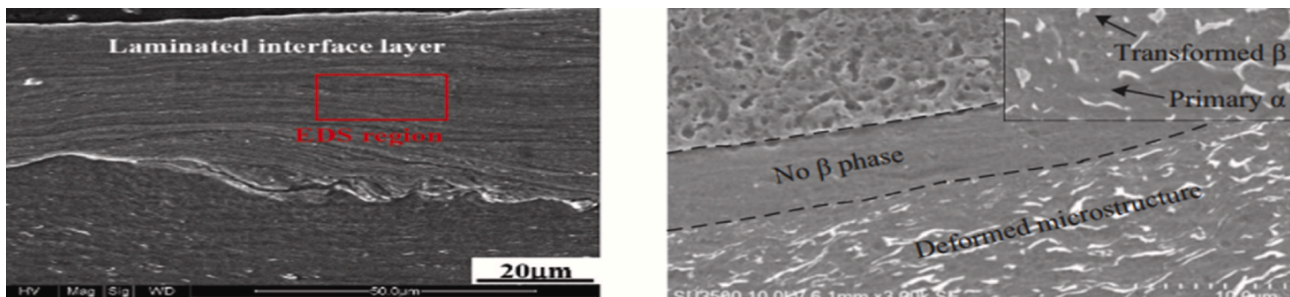


Figura 54: Imagen microscópica de una unión FSW Al-Ti. [57,66]

Como se puede observar en la figura 55, la región deformada tiene fases α y β , mientras que la región IMC formada en la interfase no tiene fase β [57]. Dressler et al. [55] también obtuvieron un tipo de resultado similar con granos primarios α y β transformados alargados, rotados y equiaxiales, como se muestra en la figura 55. Una de las características más interesantes de la zona de soldadura es la ausencia de TMAZ a lo largo del lado de la zona del titanio debido a la baja conductividad térmica de este material.

Chen et al. [58] concluyeron que el desarrollo de la nueva fase $TiAl_3$ en la interfaz de unión ocurre en dos pasos. Primero, la interfaz experimenta fricción, agitación y extrusión por parte de la herramienta, la película de óxidos se rompe, iniciándose un contacto superficial entre ambos metales. En segundo lugar, la alta presión y temperatura aumentan la velocidad de reacción entre el Al y el Ti en la interfase apareciendo así la fase indicada $TiAl_3$.

Huang et al. [67] utilizó un método novedoso de FSW asistido por superficies de fricción para uniones de aleaciones de Al-Ti y obtuvo una capa delgada de $TiAl_3$ en la interfaz, por lo que se pudo dar por exitosa su investigación. El enfoque evita el contacto directo entre la aleación de titanio y el pasador de la herramienta consiguiéndose así evitar la agitación del titanio en la zona de soldadura.

7.2. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS SOBRE UNIONES ALUMINIO-ACERO

Al igual que ocurre para las uniones entre Al-Ti, el proceso de soldadura por fricción-agitación es un método perfecto para la unión de aluminio y acero. La unión de estos metales mediante FSW minimiza las posibilidad de formación de grietas, la aparición de compuestos intermetálicos y la formación de óxido en la junta de soldadura.

Este tipo de uniones también tienen como desventaja el elevado desgaste de la herramienta debido al contacto directo de la herramienta en la zona del acero, el cual es un metal con una dureza alta. Esta desventaja es muy importante que sea analizada ante el estudio de la viabilidad del proceso.

El área inferior de la zona de soldadura es el lugar donde normalmente aparecen defectos debido a la baja generación de calor o a la falta de fluidez del acero [68]. Los tipos de defectos más comunes que se forman durante la soldadura FSW Al-Acero son la aparición de agujeros y o túneles huecos, grietas o falta de relleno.

Estos defectos han sido analizados en diferentes investigaciones llegando a conclusiones. Fei et al. [69] informó que los defectos como los agujeros y las grietas se pueden evitar seleccionando un correcto desplazamiento previo al agujero de entrada de la herramienta. Por otro lado, los defectos de túneles huecos o faltas de relleno generados por una falta de presión o agitación inadecuada de la herramienta se pueden evitar optimizando los parámetros de entrada del FSW u otros métodos tales como la compensación de la herramienta, tratamientos de precalentamiento de la herramienta o la vibración ultrasónica [70].

Del mismo modo, para llegar a conseguir un proceso cada vez más viable, se han desarrollado métodos híbridos de FSW con láser, los cuales ayudan a solventar los problemas generados por la alta dureza y resistencia del acero, así como su y su alto punto de fusión. Este tipo de proceso da como resultado una mejor fluidez del acero y un menor desgaste de la herramienta [71].

Algunas de las experimentaciones llevadas a cabo por los investigadores son por ejemplo la unión de acuerdo a sus aplicaciones del AA6061-TRIP Steel [72], AA7075-acero dulce [73], AA5052-HSLA Steel [74], AA6061-E235A [68], AA1050-acero bajo en carbono [70] o AA7075-Q235 Steel [75]. Al igual que se procedió con las uniones Al-Ti, en la siguiente figura es posible observar un resumen de las diferentes combinaciones de velocidad de giro y velocidad de avance analizadas:

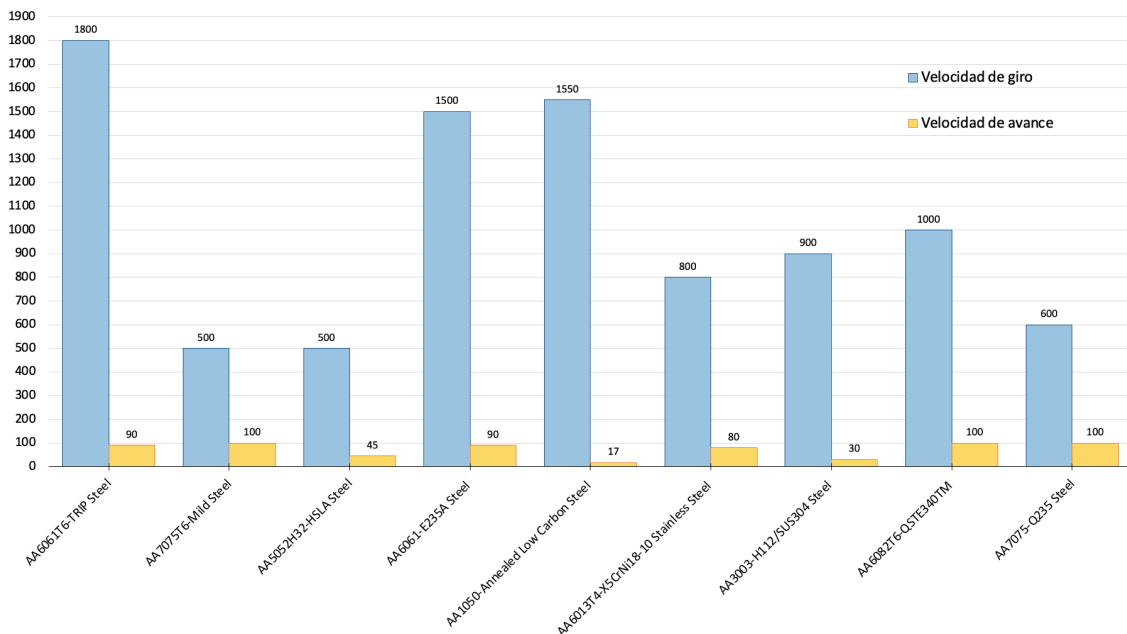


Figura 55: Velocidad de giro y velocidad de avance analizadas en uniones FSW Al-Acero.

Según las diferentes uniones analizadas, para conseguir unos resultados adecuados, es decir, una soldadura sólida y de gran calidad en este tipo de soldadura FSW Al-Acero, el rango adecuado para la velocidad de giro está entre 600-1800 rpm, mientras que la velocidad de soldadura se aconseja que esté entre 75-305 mm/min.

En la siguiente tabla se resumen los valores de los diferentes parámetros de entrada investigados, diseños tenidos en cuenta y resultados/defectologías obtenidos de una forma genérica para este tipo de soldaduras:

Ref.	Tipo de soldadura	Diseño herramienta	Parámetros entrada	Resultados
[116]	AA6061T6-TRIP Steel	- Pasador cónico	- RS: 1800 rpm - WS: 90 mm/min - Compensación: 1,63 mm	- UTS: 240 MPa - JE: 85% respecto a AA6061T6 - IMCs: FeAl, Fe ₃ Al
[71]	AA7075T6-Mild Steel	- Pasador cilíndrico	- RS: 500 rpm - WS: 100 mm/min	- UTS: 330 MPa - La resistencia de la unión aumenta con la disminución del espesor intermetálico
[74]	AA5052-H32/HSLA Steel	- Hta. cilíndrica cónica - TA: 1,5°	- RS: 500 rpm - WS: 45 mm/min - Compensación: 2 mm	- UTS: 188 MPa - JE: 91% respecto a AA5052 - IMCs: FeAl, Fe ₂ Al ₅ , FeAl ₃
[68]	AA6061-E235A Steel	- Hombro cilíndrico - Pasador cónico	- RS: 1500 rpm - WS: 90 mm/min	- UTS con FSW convencional: 226 Mpa - UTS con precalentamiento: 283 MPa - El precalentamiento mejora el flujo del material durante la soldadura.
[70]	AA1050-Annealed Low Carbon Steel	- Hombro cilíndrico - Pasador cilíndrico - TA: 1° - 1,5°	- RS: 1500 rpm - WS: 17 mm/min - Compensación: 0,5 mm	- UTS: 79 MPa - JE: 54,8% respecto a AA1050 - Mayor eficiencia cuanto menor TA.
[79]	AA6013T4-X5CrNi18-10 Stainless Steel	- Hombro cilíndrico - Pasador cónico	- RS: 800 rpm - WS: 80 mm/min	- JE: 70% respecto a AA6013T4
[77]	AA3003-H112/SUS304 Steel	- Hombro cilíndrico - TA: 1,5°	- RS: 900 rpm - WS: 30 mm/min	- UTS: 76,8 MPa - JE: 64 % respecto a AA3003 - IMCs: Al ₃ Fe, Al ₅ Fe ₂
[78]	AA6082T6-QSTE340TM	- Hombro cóncavo - Pasador roscado cónico - TA: 2,5°	- RS: 1000 rpm - WS: 100 mm/min	- UTS con taladros previos en la junta de soldadura: 3,21 N - UTS sin taladros previos en la junta de soldadura: 2,74 kN
[75]	AA7075-Q235 Steel	- Hombro cilíndrico - Pasador cónico	- RS: 600 rpm - WS: 100 mm/min - Compensación: 1,8 mm	- UTS: 2,3 kN - Se consigue una soldadura con microestructura fina gracias a la vibración ultrasónica.

Tabla 13: Parámetros y resultados obtenidos en uniones FSW Al-Acero.

7.2.1. INFLUENCIA SOBRE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

Las soldaduras realizadas por FSW de Al-Acero también ofrecen menos resistencia a la tracción que la aleación base de aluminio. Como es posible observar en la tabla 14, en la mayoría de los casos, la eficiencia de la junta (JE) varía entre el 50 y el 91 %.

Liu et al. [72] obtuvo una eficiencia de la soldadura de un 85% en comparación con el aluminio base AA6061. Además concluyó que la formación de FeAl y Fe₃Al en la interfaz afectaba a los valores obtenidos de resistencia a la tracción.

Elnabi et al. [70] obtuvieron una interesante relación en la fabricación de AA1050 y acero bajo en carbono. Con la variación en los espesores intermetálicos de 7,5 a 8 μm a 8 a 36 μm, la variación en la resistencia de la soldadura fue solo del 1,3 %, por lo que fue posible afirmar que la variación en los espesores intermetálicos tiene un efecto mínimo sobre la resistencia de la unión.

Ramachandran et al. [74] emplearon un pasador cónico cilíndrico con tres ángulos cónicos diferentes de 10°, 20° y 30°, además de un pasador cilíndrico recto para unir la aleación de aluminio AA5052 y el acero HSLA. La mayor eficiencia tuvo un valor de un 91% y fue obtenida con el ángulo de conicidad de la herramienta de 10° y un desplazamiento de la herramienta de 2 mm a lo largo de la aleación de aluminio.

T. Tanaka et al. [71] obtuvieron la mayor resistencia a la tracción mediante la unión de AA7075-acero dulce de entre las investigaciones analizadas. Su valor fue 330 MPa y observaron que este aumentaba a medida que el espesor intermetálico disminuía. Para conseguir este valor de la propiedad mecánica utilizaron una velocidad de giro de 500 rpm, el cual es el menor de todos los analizados, y una velocidad de soldadura igual a 100 mm/min, cuyo valor es de los más elevados respecto a las investigaciones analizadas.

Debido a la influencia de las velocidades de giro de la herramienta sobre los resultados de soldadura obtenidos, Kar et al. [76] analizó la influencia de la velocidad de giro en uniones de aluminio con acero dulce. Para ello se examinaron tres velocidades de giro diferentes. La fuerza de corte máxima de 4,2 kN se alcanzó a 1700 rpm, mientras que la fuerza de corte más baja de 3,6 kN se obtuvo a 1000 rpm.

Del mismo modo, Pourali et al. [77] unieron acero Al 1100 y St37 con diferentes combinaciones de soldadura y a tres velocidades distintas. La fuerza más alta de 1.925 kN se adquirió a 400 rpm y 50 mm/min, valores muy parecidos a los indicados por T. Tanaka et al [71], ya indicados anteriormente.

Huang et al. [78] propusieron taladros previos en la junta de soldadura para fortalecer la unión solapada de Al-Acero. La resistencia a la tracción máxima promedio con taladros previos fue de 3,21 kN, lo que suponía un 14,6 mayor que las muestras sin taladros previos.

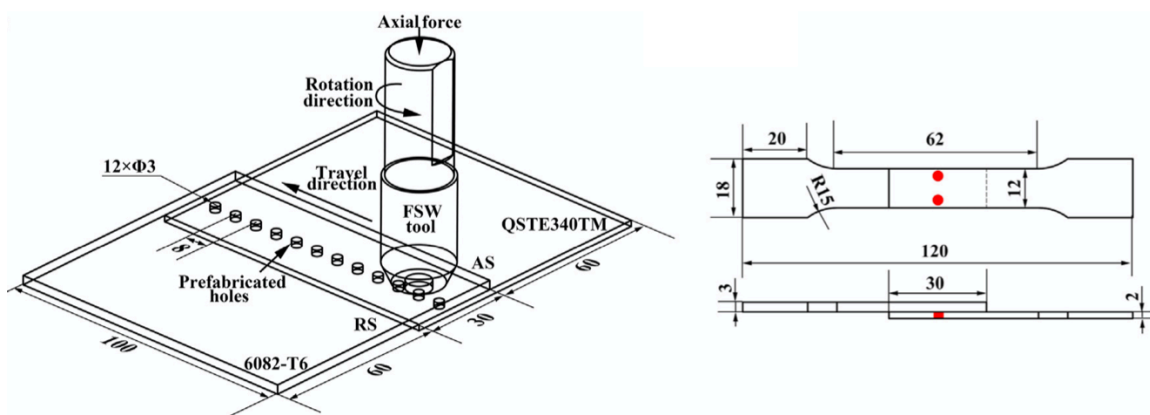


Figura 56: Configuración soldadura solapada con taladros propuesta por Huang et al. [78]

7.2.2. INFLUENCIA SOBRE LA DUREZA

Exceptuando casos de estudios excepcionales, la microdureza de las soldaduras se mide a lo largo del centro de la pepita.

Fey et al. [69] midieron la microdureza de la unión aluminio6061-acero Q235. A lo largo del lado del aluminio, la zona de soldadura tuvo menor dureza con respecto a la aleación base de aluminio, mientras que la región de soldadura del lado del acero tuvo mayor dureza que el metal base de acero, tal y como se muestra en la figura 58.

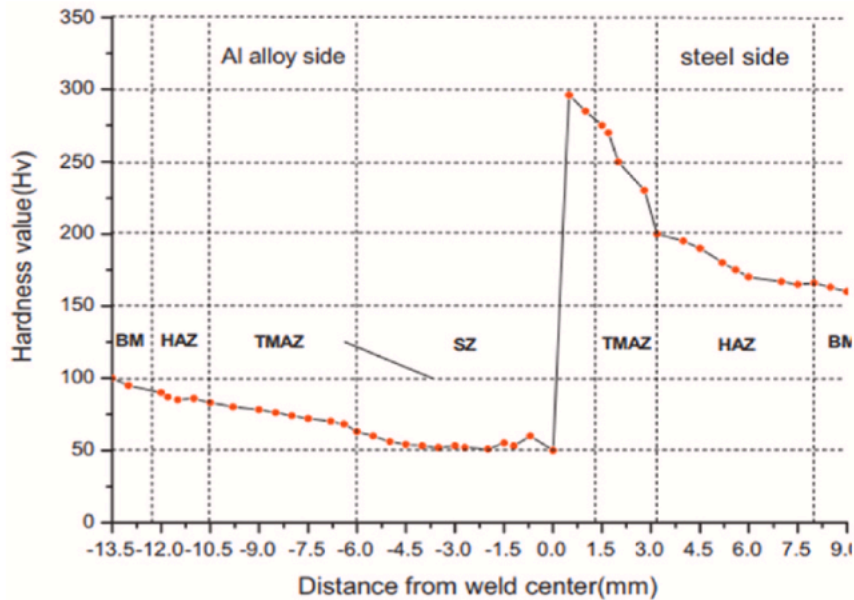


Figura 57: Microdureza soldadura FSW Al6061-Acero Q235. [69]

La dureza promedio de la región fue de alrededor de 50 Hv. Este resultado fue ligeramente diferente al obtenido por Uzun et al. [79] en la soldadura Al 6013T4-X5CrNi18-10, donde se detectó una fuerte disminución en el valor de la dureza en la región de la pepita a lo largo del lado del acero, como se muestra en la figura 59.

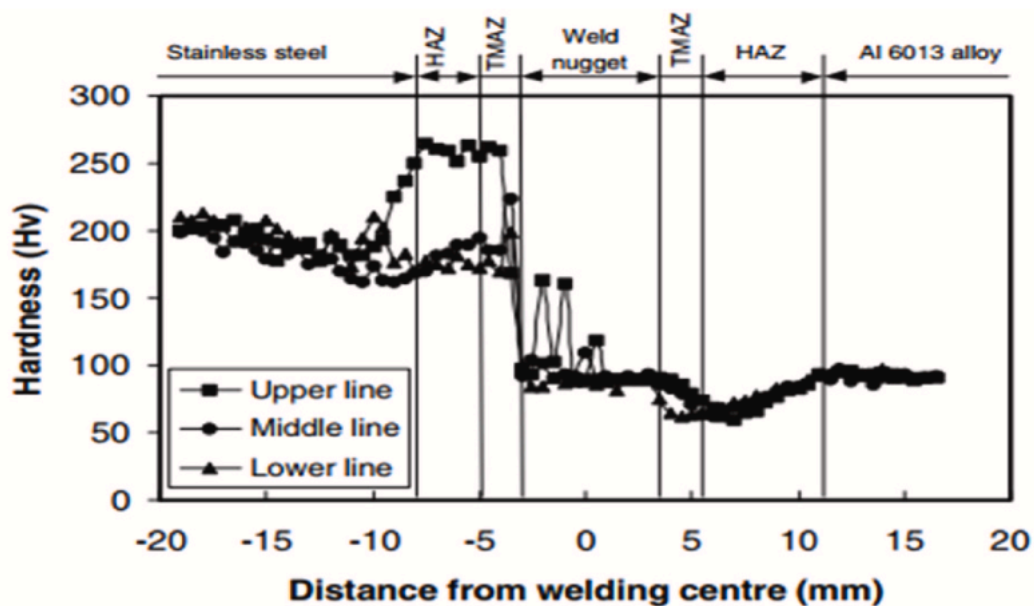


Figura 58: Microdureza soldadura FSW Al-6013T4-X5CrNi18-10. [79]

La reducción de la dureza a lo largo del lado de la zona de soldadura de aluminio se debe a la disolución de las partículas de la segunda fase y al engrosamiento provocado por las condiciones termomecánicas. Sin embargo, la variación de la microdureza a lo largo de la parte superior, media e inferior de la zona de la pepita muestra un patrón diferente.

Anamán et al. [80] midió la microdureza a lo largo de la parte superior, media e inferior. La superficie superior tiene una microdureza promedio mínima, mientras que la capa intermedia tiene la microdureza promedio máxima causada por la solución sólida de Fe-Al y los IMC, como se muestra en la figura 60.

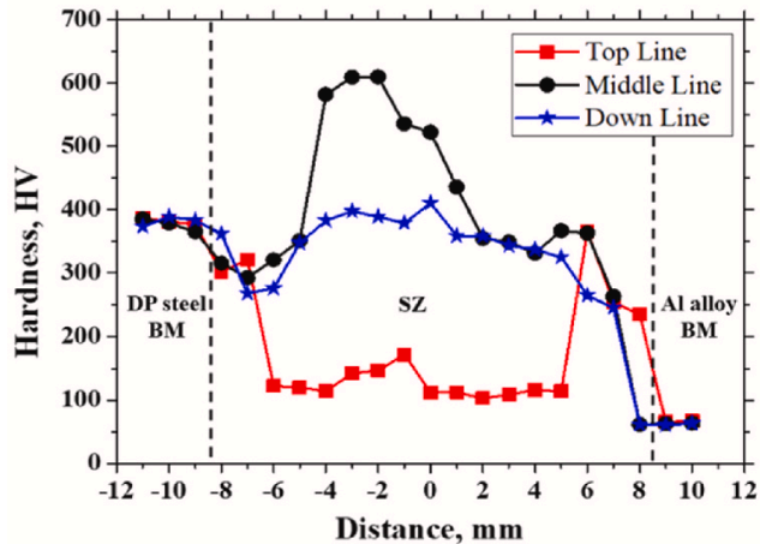


Figura 59: Microdureza soldadura FSW Al-5052-Acero segunda fase. [80]

7.2.3. INFLUENCIA SOBRE LA MACRO Y MICROESTRUCTURA

La distribución del acero en la zona de soldadura ocurre de dos maneras. En el primer caso, una fracción de acero se desprende del sustrato y se esparce dentro de la zona de soldadura en forma de pequeños fragmentos, mientras que en el segundo caso, una pieza de acero voluminosa se separa del sustrato y se desplaza hacia la zona de pepita sin fragmentarse, como se muestra en la Fig. 12 [72].

El movimiento de estas partículas de acero da lugar a diferentes estructuras de flujo metálico que afectan las propiedades microestructurales y mecánicas de la zona de soldadura. El flujo de vórtice es una estructura típica en el lado de avance de la soldadura a tope y en la parte inferior de la pepita en la soldadura solapada [81]. Otra posibilidad es una estructura intercalada que actúa como un mecanismo de unión adicional además de la acción de la difusión [76].

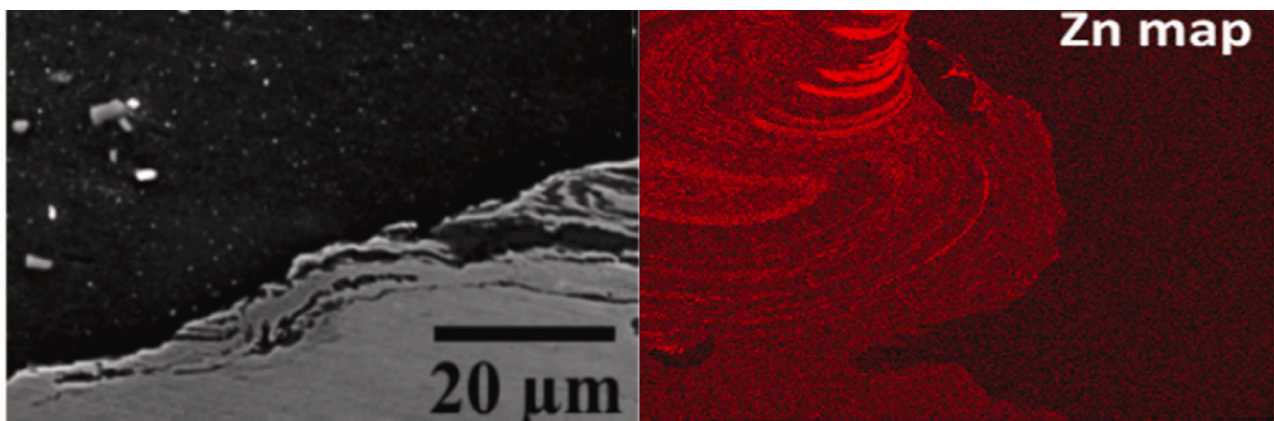


Figura 60: Estructura intercalada (izq.) y estructura flujo de vórtice (derch.). [76,81]

Según Wang y Huang [82], el espesor de la capa intermetálica depende de la cantidad de calor aportado. La velocidad de giro y la velocidad de soldadura son los dos parámetros principales del proceso que afectan el espesor de los IMC en la interfaz. A una mayor velocidad de giro, aumentará el espesor de la capa intermetálica debido a la mayor entrada de calor, mientras que una mayor velocidad de soldadura disminuirá el espesor de los intermetálicos debido a la menor entrada de calor. Además de la soldadura y la velocidad de giro, la fuerza de soldadura y la velocidad de deformación son otros factores que juegan un papel importante en el crecimiento de la capa IMC.

7.3. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS SOBRE UNIONES ALUMINIO-COBRE

El cobre es un material metálico el cual guarda ciertas similitudes con el aluminio debido a su naturaleza más suave en comparación con materiales como el titanio o el acero. Gracias a este parentesco entre el aluminio y el cobre, la soldaduras Al-Cu mediante FSW no requieren la selección de un material altamente resistente para la herramienta, además, se considera un proceso de soldadura de materiales disímiles mucho más económico que los descritos anteriormente.

La soldadura por fricción-agitación es un proceso muy adecuado para este tipo de uniones, por lo que no sorprende que, a día de hoy, se hayan realizado multitud de investigaciones relacionadas con la soldadura de aleaciones Al-Cu mediante FSW, por ejemplo, AA2024T3-Cu10100 [83], AA5754-H114/C10100 OFHC [84], AA1100-cobre comercialmente puro [84], AA6061-cobre [86,87], aluminio y cobre comercialmente puros [88] o AA1050-cobre comercialmente puro [89,90].

En su mayoría estas investigaciones analizan la mezcla inadecuada entre ambos materiales, la formación de IMCs o la aparición de posibles defectos que puedan deteriorar aún más la propiedad mecánica de resistencia a la tracción [91]. Otro de los factores más analizados son los resultados obtenidos respecto a sus propiedades térmicas y eléctricas.

Al igual que en capítulos anteriores, en la siguiente figura es posible observar un resumen de las diferentes combinaciones de velocidad de giro y velocidad de avance analizadas:

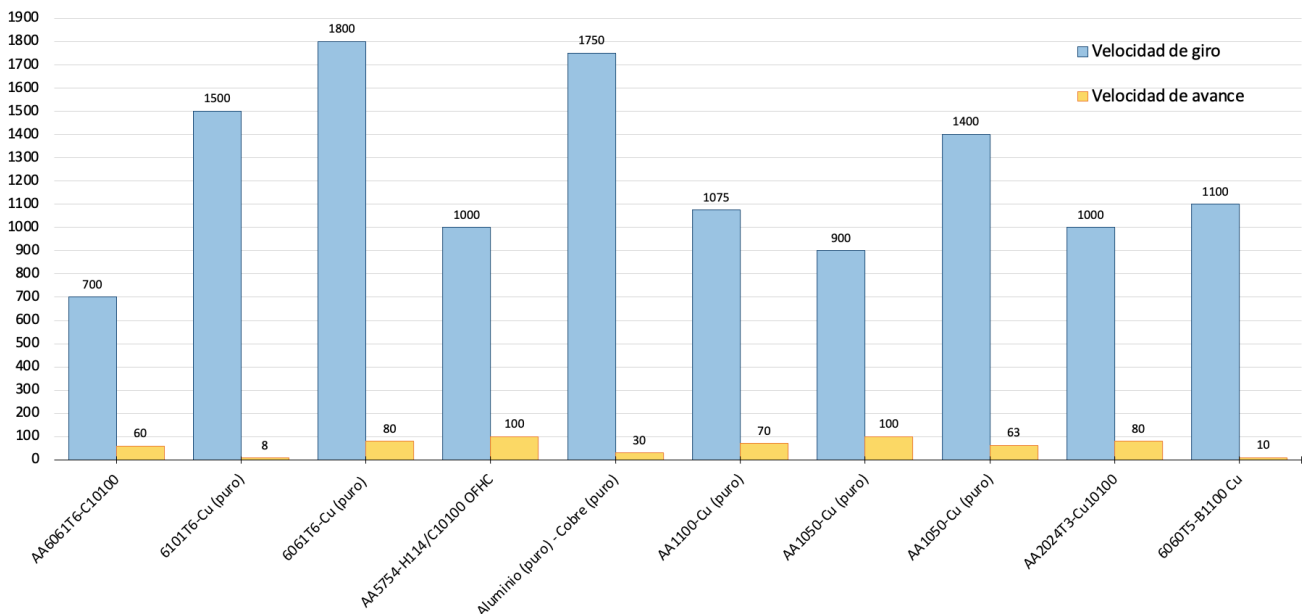


Figura 61: Velocidad de giro y velocidad de avance analizadas en uniones FSW Al-Cu.

A partir de las investigaciones nombradas se extrae la conclusión de que los valores adecuados para la velocidad de giro en este tipo de soldaduras está entre 600-1800 rpm. Por otro lado, respecto a la velocidad de soldadura, el margen sería el comprendido entre 60-118 mm/min.

Una característica destacable de este tipo de uniones entre Al-Cu es que se pueden soldar diferentes espesores de material base debido a su diferente capacidad de carga de corriente. Por ejemplo, Shankar et al. [91] y Eslami et al. [92] utilizaron dos enfoques diferentes para unir los diferentes espesores de Al-Cu basados en la implementación de fuentes auxiliares de calentamiento/enfriamiento asistido y vibración ultrasónica para aumentar la resistencia a la tracción de la unión.

En la siguiente tabla se resumen los valores de los diferentes parámetros de entrada investigados, diseños tenidos en cuenta y resultados/defectologías obtenidos de una forma genérica para este tipo de soldaduras:

Ref.	Tipo de soldadura	Diseño herramienta	Parámetros entrada	Resultados
[86]	AA6061T6-C10100	- Hombro cilíndrico - Pasador cilíndrico	- RS: 700 rpm - WS: 60 mm/min - Compensación: 1,8 mm	- UTS: 177,04 MPa - IMCs: Al ₂ Cu, Al ₃ Cu ₄ , AlCu
[85]	6101T6-Cu (puro)	- Hta. hexagonal - TA: 2º	- RS: 1500 rpm - WS: 8 mm/min - Compensación: 1,5-2,5 mm	- UTS: 181 MPa - Aparición de un compuesto intermetálico fino que aumenta la resistencia a la tracción de la unión
[87]	6060T5-B1100 Cu	- Hta. Convencional	- RS: 800-1100 rpm - WS: 10 mm/min	- Al colocar el cobre sobre aluminio se forman menos IMCs - Debido a la baja resistencia eléctrica, estas uniones se pueden utilizar en la aplicación eléctrica
[84]	AA5754-H114/C10100 OFHC	- Hombro cilíndrico - Pasador roscado cónico - TA: 1º	- RS: 1000 rpm - WS: 100 mm/min - Compensación: 1 mm	- UTS: 219 MPa - IMCs: Al ₂ Cu, Al ₄ Cu ₉ - El tamaño del grano se vuelve más pequeño debido a la recristalización dinámica
[88]	Aluminio (puro) - Cobre (puro)	- Hombro cilíndrico - Pasador cónico - TA: 1º - 1,5º	- RS: 1750 rpm - WS: 30 mm/min	- UTS: 79 MPa - IMCs: Al ₂ Cu, Al ₄ Cu ₉ - Al aumentar la velocidad de rotación de la herramienta, la soldadura pasó de frágil a dúctil
[80]	AA1100-Cu (puro)	- Pasador roscado cónico	- RS: 1075 rpm - WS: 70 mm/min	- UTS: 116 MPa - IMCs: Al ₂ Cu, Al ₄ Cu ₉ - JE: 68% respecto a AA1100
[89]	AA1050-Cu (puro)	- Hta. convencional	- RS: 900 rpm - WS: 30 mm/min	- IMCs: Al ₂ Cu, Al ₄ Cu ₉ - IMCs thickness: 200 nm - Capa muy delgada de intermetálicos debido a la interdifusión
[90]	AA1050-Cu (puro)	- Pasador roscado cónico	- RS: 1400 rpm - WS: 63 mm/min	- UTS: 88,47 MPa - JE: 68% respecto a AA1050
[83]	AA2024T3-Cu10100	- Hombro cilíndrico - Pasador cónico	- RS: 600 rpm - WS: 100 mm/min - Compensación: 1,8 mm	- UTS: 2,3 kN - Se consigue una soldadura con microestructura fina gracias a la vibración ultrasónica
[85]	6061T6-Cu (puro)	- Hta. cilíndrica - TA: 0,5º	- RS: 1100-1800 rpm - WS: 80 mm/min - Compensación: 2 mm	- UTS: 191 MPa - Altos valores de dureza a baja velocidad de soldadura debido a la inexistencia de IMCs

Tabla 14: Parámetros y resultados obtenidos en uniones FSW Al-Cu.

7.3.1. INFLUENCIA SOBRE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

Las propiedades de resistencia a la tracción para soldaduras de Al-Cu dependen de la composición de la mezcla, el flujo del material, el tipo de granos microestructurales existentes, la cantidad de compuestos intermetálicos y la distribución del cobre a lo largo de la zona de agitación [84].

La eficiencia de la unión de la soldadura Al-Cu varía del 68 al 91 %, donde la resistencia a la tracción promedio de la unión se mantiene alrededor del 85 %. Parámetros de entrada como el tipo de geometría del pasador, la velocidad de soldadura, la velocidad de giro, el ángulo de inclinación y el desplazamiento de la herramienta afectan la resistencia a la tracción de la unión.

Muthu y Jayabalan [85] estudiaron el efecto de diferentes perfiles de pasadores sobre la resistencia a la tracción de la unión. Llegaron a la conclusión de que el perfil del pasador cónico simple da como resultado una resistencia a la tracción máxima de 116 MPa y una eficiencia de unión del 68 %.

De manera similar, Mehta y Badheka [93] obtuvieron una resistencia a la tracción máxima de 89 MPa para juntas obtenidas con un perfil de pasador cilíndrico. Confirmaron que el perfil de pasador poligonal da como resultado defectos importantes en la zona de agitación y, por lo tanto, reduce la resistencia a la tracción de la soldadura.

Shankar et al. [91] utilizó conjuntos de velocidades de soldadura y compensaciones de herramientas para unir aleaciones de Al-Cu de espesores diferentes y obtuvo una eficiencia de unión del 91 % con una compensación de herramienta de 1 mm y una velocidad de soldadura de 213 mm/min. Esta mejora de la resistencia a la tracción se debió en gran parte a una mejor mezcla de los materiales base y además, a la reducción de la existencia de grandes fragmentos de cobre dentro de la zona intermetálica de la soldadura.

Muhammad et al. [94] realizaron una unión de Al-Cu mediante FSW asistida por ultrasonidos. Obtuvieron una resistencia a la tracción de 124 MPa, la cual es un 26 % más alta que la FSW convencional. Esto se debe a que la vibración ultrasónica mejora el transporte y la mezcla del material de cobre en la zona de agitación.

Por último, destacar el enfoque híbrido de calentamiento y enfriamiento asistido desarrollado por K.P. Mehta et al. [95] el cual también afecta la resistencia a la tracción de la junta. Gracias a esta metodología se obtuvo una pequeña mejora en la resistencia a la tracción mediante la aplicación de una corriente de 40 amperios.

7.3.2. INFLUENCIA SOBRE LA DUREZA

Del mismo modo que las demás soldaduras de materiales base disímiles descritas anteriormente, la microdureza de la zona de soldadura en uniones Al-Cu se evalúa por el tamaño de grano, la creación de IMC y la dispersión de una partícula de cobre en la zona de agitación [84].

Celik y Cakir [96] obtuvieron una microdureza máxima de 185 HV debido a la existencias de IMC en la interfaz de la unión Al-Cu. Mehta y Badheka [97] informaron una microdureza máxima de 186 HV en un ángulo de inclinación de la herramienta de 4°. Por su parte, Genevois et al. [89] obtuvieron una dureza máxima de 125 HV en la soldadura de aleaciones comercialmente puras de aluminio y cobre.

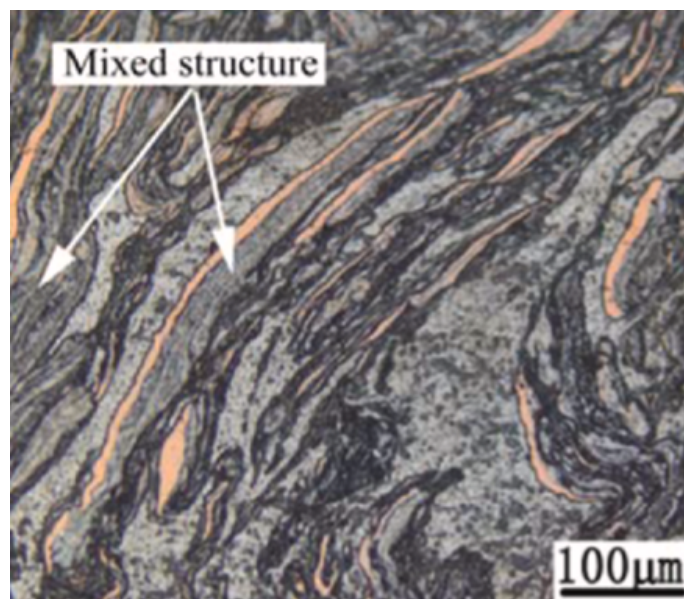


Figura 62: Distribución de la microdureza en una unión a tope de FSW Al-Cu. [98]

7.3.3. INFLUENCIA SOBRE MACRO Y MICROESTRUCTURA

La zona de pepita de la soldadura FSW A-Cu, es una estructura compuesta de ambos materiales en la que la macroestructura se asemeja a remolinos intercalados siguiendo un patrón parecido al perfil de vórtice [98].

Mehta y Badheka [95] realizaron calentamientos y enfriamientos asistidos en este tipo de uniones mediante FSW y observaron diferentes tipos de defectos en el análisis macroestructural. Los agujeros, vacíos y poros eran muy comunes en el FSW asistido por calentamiento debido a que un calentamiento excesivo provoca la formación de óxido en la superficie, siendo esta propensa a la absorción de hidrógeno de la atmósfera, dando como resultado la formación de agujeros y poros. Además, afirmaron que este tipo de uniones de Al-Cu sin macro defectos solo son posibles mediante FSW asistido por enfriamiento o mediante FSW convencional.

La microestructura de la zona de soldadura se ve muy afectada por el desplazamiento de la herramienta hacia el lado de aluminio [91]. Por lo tanto, la compensación de la herramienta afecta al tamaño y la cantidad de partículas de cobre en la zona de soldadura. Islami et al. [99] observó que con una compensación de herramienta de 3 mm, no se rayaba el cobre, como se muestra en la figura 63.

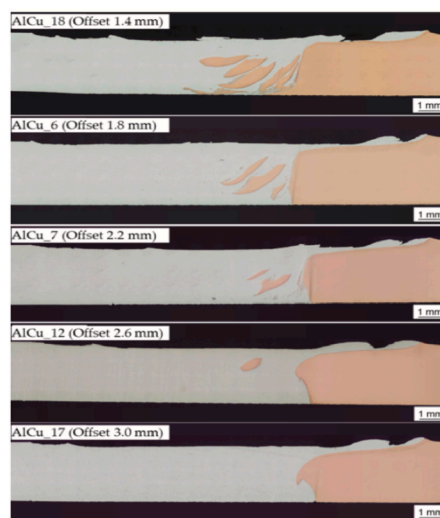


Figura 63: Microestructura unión FSW Al-Cu. [99]

Sin compensación de la herramienta se formaban grietas en la pepita de soldadura y en la superficie debido a las partículas de cobre agrupada. Por tanto, se afirma que una compensación de la herramienta adecuada aumenta el volumen de aluminio en la zona de soldadura, y debido a que este metal posee una mejor fluidez, las grietas se pueden eliminar fácilmente con partículas de cobre distribuidas a lo largo de la misma.

Los intermetálicos como Al_4Cu_9 , AlCu, Al_2Cu y Al_2Cu_3 se forman en la interfaz y en la zona de agitación de las aleaciones de Al-Cu [84]. La formación de IMCs es mayor a medida que se aumenta el ángulo de inclinación. Mehta y Badheka [97] reportaron la aparición de Al_2Cu y Al_3Cu_4 sin ángulo de inclinación y Al_4Cu_9 y $AlCu_3$ para un ángulo de inclinación de 2° .

Muhammad y Wu [100] realizaron uniones de Al-Cu mediante FSW con y sin vibración ultrasónica y observaron compuestos intermetálicos de AlCu, Al_2Cu , Al_2Cu_3 y Al_4Cu_9 independientemente de la ubicación de la placa de cobre.

Por otro lado, el calentamiento y enfriamiento asistidos también afectan significativamente a la formación de intermetálicos. El calentamiento asistido da como resultado un sobrecalentamiento y, por lo tanto, conduce a una mayor cantidad de intermetálicos, mientras que el enfriamiento asistido reduce la cantidad de intermetálicos al mantener la temperatura más baja [95].

7.5. UNIONES ALUMINIO-POLÍMEROS: UNA NUEVA TENDENCIA

Aunque el objetivo de este capítulo 7 está centrado en el análisis de uniones de materiales metálicos disímiles, es imposible no hacer una parada en el análisis del estado actual de las uniones realizadas mediante FSW entre aluminio y materiales poliméricos.

No es nada nuevo el hecho de conocer que los polímeros están ganando cada vez una mayor importancia y popularidad en diferentes sectores de la industria, tales como la automoción o la industria aeroespacial, debido a su naturaleza liviana y poco conflictiva medioambientalmente hablando [101].

En el campo de los aviones de nueva generación, las grandes estructuras multimaterial se han utilizado ampliamente en el Boeing 787 Dreamliner y el Airbus A350 XWB. Estas estructuras están compuestas en un 50% de su peso total de estructuras con materiales metálicos ligeros y otro 50% de peso correspondiente a materiales compuestos. Además, en los automóviles, el vehículo de investigación Mercedes-Benz F125 propone un nuevo concepto en desarrollo, que contiene una estructura híbrida de polímero y metal para satisfacer la movilidad libre de emisiones [102].

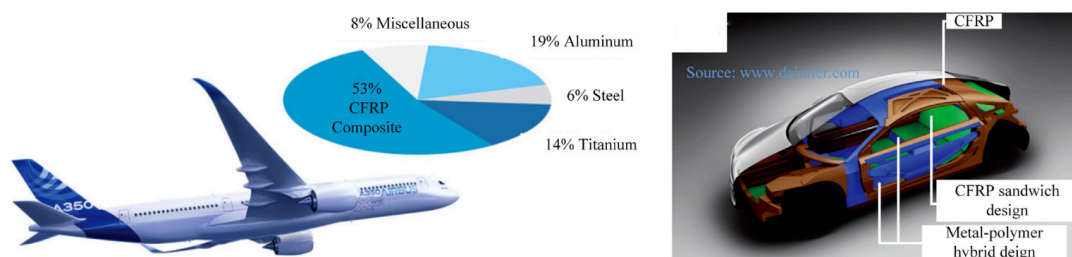


Figura 64: Aplicación del FSW entre polímeros y materiales metálico en A350XWB y Mercedes-Benz F125. [102]

Los polímeros son materiales fácilmente moldeables y además poseen una resistencia específica, un bajo coeficiente de expansión térmica y una gran resistencia a la fatiga y por ende, a la fractura [103]. Hoy en día ya se han fabricado polímeros que poseen la misma resistencia que algunos metales mediante procedimientos como el estirado por rodillos o la extrusión hidrostática [104].

Gracias a la investigación, se ha demostrado que el proceso de soldadura mediante fricción y agitación, FSW, es un método de fabricación adecuado para la unión de este tipo de materiales con el aluminio. Esto es gracias a que mediante este método de soldadura es posible la unión de metales por debajo de su temperatura de fusión.

Patel et al. [105] utilizó el método FSW para unir el AA6061 con policarbonato y concluyó que la velocidad de soldadura afecta significativamente las propiedades de la unión. Una velocidad de soldadura superior a 40 mm/min reducía la cantidad de calor producido durante la operación de soldadura, dando como resultado una mala agitación del material y por tanto, una soldadura de mala calidad entre ambos materiales base.

Derazkola et al. [106] soldaron mediante FSW la aleación AA5058 y PMMA en una configuración de junta solapada. Para ello colocaron aluminio en la parte inferior de la configuración de la soldadura. El ángulo de inclinación de la herramienta utilizado oscilaba entre los 0°-2° , concluyéndose que éste último proporcionaba una soldadura con mayores valores de resistencia a la tracción.

Uno de los defectos más desafiantes en este tipo de uniones es la aparición de defectos como la penetración en la raíz de la soldadura. Este defecto es debido a la baja conductividad térmica de los polímeros [107].

Además del método FSW convencional, se han llevado a cabo otro tipo de métodos para la unión entre Al-Polímeros. Como por ejemplo la técnica de trazado por fricción y agitación (FSS), durante la cual el material con el punto de fusión más bajo se coloca en la parte superior. Mientras que la parte regular de la herramienta FSW deforma plásticamente y agita la capa superior del material con el punto de fusión más bajo, el trazador hace un pequeño corte continuo en la superficie del material con el punto de fusión más alto que, como se ha dicho antes, se encuentra debajo, evitándose de esta forma la deformación plástica masiva de la capa inferior, la propensión a la fusión y la formación de huecos vacíos de soldadura [108].

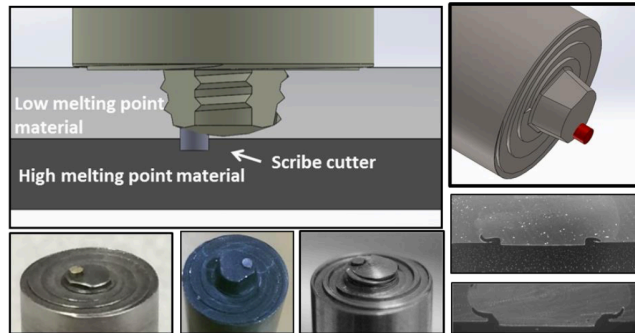


Figura 65: Esquema y ejemplos gráficos método FSS. [108]

Otro ejemplo podría ser el método de unión por apilamiento de relleno basada en la fricción entre metal y polímero (FFSJ) los cuales han mostrado resultados aceptables de resistencia a la tracción.

Durante este proceso el polímero se coloca en la parte inferior y el metal, el cual dispone de un orificio especial, se ubica en la parte superior. Un perno de llenado se ubicado en el orificio y comienza a girar junto a la vez que se sumerge en el material de trabajo hasta que se alcanza la profundidad deseada y se consigue la fricción entre el polímero y el metal, produciéndose a su vez el calor necesario para que se produzca la deformación plástica necesaria. En este punto permanecerá durante lo que se denomina como etapa de "tiempo de permanencia" de la fase de fricción, en la que la herramienta gira en la misma posición axial, generando gradualmente un calentamiento viscoso en el polímero ablandado o fundido. Durante dicha etapa de permanencia, el perno de relleno fundido o de ablandamiento comienza a unirse al polímero y llena el orificio en el metal [109].

Al final de la fase de fricción, la herramienta sin pasador se detiene rápidamente, mientras que la fuerza de inmersión aún se ejerce sobre el perno de llenado, lo que puede evitar efectos de relajación durante el enfriamiento. Por último, la herramienta se retira lográndose la unión híbrida una vez que el polímero se solidifica por completo [109].

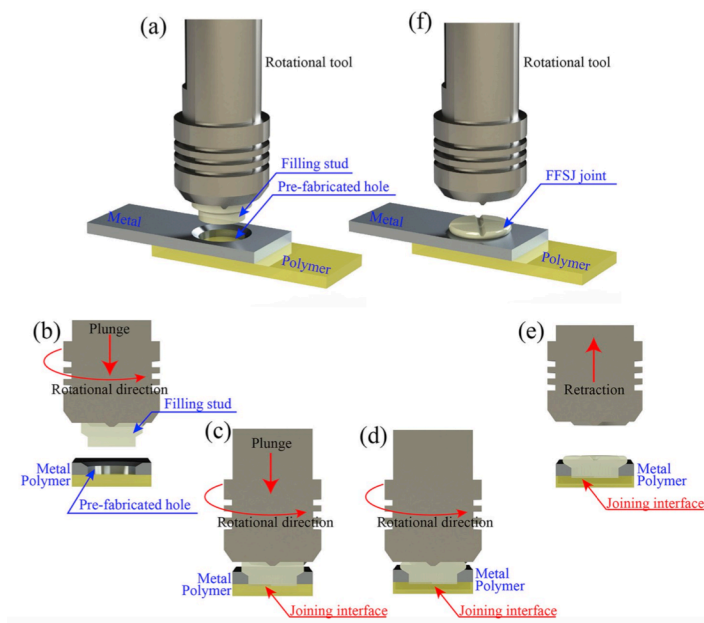


Figura 66: Esquema del proceso FFSJ. [109]

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

El proceso de unión por soldadura mediante fricción-agitación es un proceso en el cual la calidad de sus resultados y la efectividad de las uniones realizadas dependen mayoritariamente de la elección de una serie de parámetros principales tanto para uniones de materiales semejantes como para uniones de materiales disímiles.

Para uniones de materiales semejantes, las altas velocidades de giro de la herramienta aumentan la tasa de deformación del material de la unión por soldadura, lo que afecta el proceso de recristalización, otorgando peores resultados de resistencia máxima a la tracción y dureza de la unión por soldadura.

Por otro lado, las altas velocidades de soldadura están relacionadas con la baja generación de calor, lo que da lugar a velocidades de enfriamiento más rápidas de la unión, reduciendo la posibilidad de la aparición de transformaciones metalúrgicas que tienen lugar durante el proceso soldadura por fricción-agitación, tales como la solubilización o el aumento del tamaño de los precipitados. Esto, a su vez, disminuye la resistencia máxima a la tracción de la zona de soldadura.

En base a estas consideraciones, la relación entre la velocidad de soldadura y la velocidad de giro de la herramienta puede considerarse como un parámetro esencial en la determinación de la resistencia mecánica de la unión.

Tras el análisis de multitud de investigaciones referenciadas a lo largo del documento se puede afirmar que existe un rango óptimo de velocidad de giro de la herramienta, y, que a velocidades muy bajas o muy altas, se obtienen uniones por soldadura de baja calidad, demostrando a su vez que estos parámetros pueden optimizarse para obtener piezas sólidas con el menor número de defectos posibles.

Por otro lado, la calidad de las soldaduras FSW en materiales semejantes también varía según el ángulo de inclinación de la herramienta. Se ha afirmado que para uniones de aluminio AA6061, las fuerzas transversales y axiales aumentan a medida que se aumenta el ángulo de inclinación. Además se ha afirmado que para valores por debajo de 1° en el ángulo de inclinación de la herramienta, aparecen defectos en la zona de soldadura tales como porosidades o cavidades.

En uniones materiales iguales se utilizan normalmente hombros cónicos y tres perfiles de pasador de herramienta, estos son, pasador de perfil triangular, cuadrado o cilíndrico cónico roscado. Tras el análisis de los diferentes resultados obtenidos en las investigaciones, se observa que el perfil del pasador triangular muestra las mejores propiedades mecánicas de las uniones soldadas en comparación con los otros perfiles de pasador nombrados.

A pesar de que el FSW nació como un proceso de unión por soldadura exclusivo para aleaciones de aluminio, rápidamente los expertos visualizaron que un sólo material no puede cumplir con todos los requisitos deseados, por lo que se requería una combinación de materiales cuyas características de trabajo pudieran mejorar las del aluminio.

Realizar este tipo de uniones entre materiales disímiles mediante procesos de soldadura por fusión es un gran desafío debido a las grandes diferencias en las propiedades físicas y químicas existentes entre los materiales metálicos anteriormente nombrados. Sin embargo, el FSW es un proceso de unión en estado sólido que tiene la capacidad de unir materiales por debajo de su temperatura de fusión, lo que lo convierte en un proceso ideal para salvar las dificultades que encuentran los procesos de soldadura por fusión en la unión de materiales disímiles.

Como se ha visto durante el presente documento, la velocidad de giro de la herramienta, velocidad de soldadura, fuerzas axiales o ángulo de inclinación de la herramienta influyen de manera esencial en procesos de soldadura de materiales disímiles y su control es importante a la hora de mejorar la calidad y resistencia de la soldadura.

Estos parámetros son discutidos en una cantidad muy elevada, si no en la mayoría, de artículos que investigan el proceso de FSW, sin embargo, en comparación con las uniones de materiales semejantes, para este tipo de uniones mediante soldadura por fricción-agitación en materiales disímiles existen otro tipo de factores que afectan al resultado final, como por ejemplo son la selección del material de la herramienta, la geometría y diseño de la herramienta, la configuración de la unión.

La elección del material de la herramienta dependerá directamente de la resistencia del material a soldar así como el coste asociado al mecanizado necesario para la fabricación de dicha herramienta, siempre sin perder de vista también el coste asociado al material seleccionado.

Para las uniones por soldadura de materiales disímiles el desgaste de la herramienta es sin duda el factor más analizado a la hora de seleccionar el tipo de material, sobre todo para las uniones entre aluminio-cobre (Al-Cu), aluminio-acero (Al-Acero) y aluminio-titanio (Al-Ti) debido a su naturaleza más resistente respecto a las uniones entre aluminio-magnesio (Al-Mg).

El acero para herramientas H-13 es el material más común utilizado para las herramientas utilizadas para la unión de Al-Mg y Al-Cu [84,110,111,112]. Este acero es un acero para herramientas de trabajo en caliente con una excelente combinación de dureza y resistencia a la fractura

También se puede emplear para uniones soldadas de Al-Acero [113,114], sin embargo, los materiales más comunes para este tipo de uniones son WC (carburo de tungsteno) [115] y sus aleaciones como WC+10% Co (carburo de wolframio con un 10% de cobalto añadido)[116], W & Mo (acero de tungsteno y molibdeno) [117], W-Re (acero de tungsteno y renio) [118]. Finalmente para uniones entre Al-Ti los materiales de herramientas más comunes son WC-Co (acero de carburo de tungsteno y cobalto) [52], el acero WC-Re (acero de carburo de tungsteno y renio) [54] y el acero SKD61 [65], el cual es un acero para herramientas al carbono medio que posee una alta dureza y resistencia al desgaste tras realizarse un tratamiento térmico.

A continuación se muestra un resumen de lo descrito:

	Acero H-13	WC-Co	WC-Re	W-Re	SKD61
Aluminio-Cobre	X				
Aluminio-Magnesio	X				
Aluminio-Acero	X	X		X	
Aluminio-Titanio		X	X		X

Tabla 15: Materiales típicos para herramientas de FSW en uniones soldadas de materiales disímiles.

El tipo de herramienta que mejores resultados ha reportado a lo largo de los análisis para uniones por soldadura de materiales disímiles es aquella que tiene su hombro cilíndrico plano y cóncavo, mientras que el pasador es del tipo cilíndrico y cilíndrico cónico con o sin rosca. Este tipo de geometría de herramienta es adecuada para todo tipo de combinaciones de metales disímiles y la única diferencia es el material de la herramienta.

Sin embargo, es cierto que se han llevado investigaciones sobre el comportamiento de otro tipo de geometrías como por ejemplo hombros estacionarios o en espiral para uniones Al-Acero, o pasadores triangulares, cuadrados, hexagonales o cilíndricos para uniones entre Al-Cu.

Por otro lado, la configuración más típica encontrada tras diferentes investigaciones son, acorde a la figura 35, las juntas a tope y uniones solapadas.

Normalmente para uniones a tope de aluminio con acero, titanio o cobre, el material más duro y con mayor punto de fusión se coloca en el lado de avance. Por otro lado, para uniones solapadas el aluminio se coloca sobre el material más duro y la mayor parte del pasador permanece sobre dicha zona, lo que reduce el desgaste de la herramienta y el costo del material.

El pasador de la herramienta se coloca de tal manera que la mayoría de las partes del mismo se encuentran en el material más blando y descansan en el más duro, lo que ayuda a que la unión no tenga defectos.

No existe unos valores determinados para cada uno de los parámetros nombrados que puedan asegurar conseguir la soldadura deseada. Es decir, dependiendo de cada tipología de materiales a unir, o características deseadas de la unión soldada, se deberán de tomar en cuenta unos valores u otros.

Los resultados a niveles microestructurales para uniones por soldadura de materiales disímiles también han sido analizados. Las combinaciones realizadas mediante soldadura por fricción-agitación en materiales disímiles, como por ejemplo las uniones por soldadura entre aluminio y el titanio, acero o cobre, dan como resultado una zona de soldadura dividida en cuatro zonas principales: metal base, HAZ, TMAZ y dos zona de agitación, una a cada lado de la interfaz de la junta de soldadura.

La estructura granular de cada zona depende de la recristalización y del aporte de calor. La recristalización conduce a granos más refinados en la zona de agitación. Al igual que la estructura de grano, la distribución de material base más duro sobre el aluminio en la zona de soldadura, también juega un papel importante en la calidad final de la unión. Los granos en la zona TMAZ están más deformados debido a la deformación plástica, mientras que la HAZ tiene un grano más grueso.

Por otro lado, la unión de estos materiales disímiles da lugar a la formación de compuestos intermetálicos (IMCs) debido a la aparición de la difusión. Este aspecto también es crucial para determinar la calidad de la unión soldada, sin embargo, estos intermetálicos aparecidos durante el proceso de soldadura por fricción-agitación tienen un grosor menor en comparación con las uniones realizadas mediante procesos de soldadura por fusión.

Este espesor de la zona intermetálica, además de otro tipo de defectologías tales como los huecos vacíos de soldadura o la aparición de grietas, tienen efectos adversos sobre la resistencia a la tracción de la unión, de ahí que dicha resistencia a la tracción de las combinaciones metálicas realizadas mediante FSW sean siempre más bajas que la de los metales base.

Durante el desarrollo de este documento se han nombrado diferentes variantes del FSW desarrolladas con el objetivo de conseguir evitar la aparición de estos tipos de defectologías. Algunos ejemplos son el FSW asistido térmicamente, FSW asistido por enfriamiento, FSW con ultrasonidos.

Por último, cabe mencionar los diferentes métodos de FSW que están actualmente en fase de desarrollo para conseguir mejorar los resultados obtenidos en las uniones entre aluminio y polímeros. Estos son, por ejemplo, la técnica de trazado por fricción y agitación (FSS) o el método de unión por apilamiento de relleno basada en la fricción entre metal y polímero (FFSJ).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Marín Martín M.M.; 2022; Tecnologías de Unión; Universidad de Educación a Distancia (UNED).
- [2] Akinlabi, E. T., Mahamood, R. M; 2020; Solid-state welding: friction and friction stir welding processes; New York, NY, USA: Springer International Publishing.
- [3] N. Šibalić, M. Vukčević, M. Janjić, S. Savičević; 2016; A study on Friction Stir Welding of AlSi1MgMn aluminium alloy plates; Tehnički vjesnik, Vol. 23 No. 3.
- [4] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia; 2008; Recent advances in friction-stir welding-Process, weldment structure and properties; Progress in Materials Science 53, 980–1023.
- [5] Giachino, J. W.; Weeks, W.; 1999; Técnica y práctica de la soldadura; Barcelona: Reverté.
- [6] Granjon, H.; 1993; Bases metalúrgicas de la soldadura; París; Publicaciones de la Soldadura.
- [7] D.W. Rathod; 2021; Comprehensive analysis of gas tungsten arc welding technique for Ni-base weld overlay; Advanced Welding and Deforming, Pages 105-126.
- [8] S.M. Verma, J.P. Misra; 2015; A critical review of friction stir welding process; Daaam International Scientific Book, pp. 249-266 Chapter 22.
- [9] A.M. Mateo García, A. Grand; 2007; Soldadura por fricción lineal de las aleaciones de titanio: caracterización de una soldadura longitudinal mediante ensayos a tracción; Universidad Politécnica de Cataluña, Dpto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica.
- [10] Thomas WM, Nicholas ED, Needham JC, Murch MG, Temple-Smith P, Dawes CJ; 1991; Friction Stir Butt Welding, International Patent Application, No. PCT/GB92/02203.
- [11] W.M. Thomas; E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes; 1991; Patent 9125978.8.
- [12] C. Dawes, W.M. Thomas; 1995; The Welding Institute, TWI Bulletin, 6,124.
- [13] Thomas WM, Johnson KI, Wiesner CS; 2003; Friction stir welding-Recent developments in tool and process technologies; Advanced Engineering Materials, 5(7):485–90.
- [14] Thomas WM, Threadgill PL, Nichols ED; 1999; Feasibility of friction stir welding steel; Science and Technology of Welding and Joining, 4:365–72.
- [15] Pabitra, M.; Ranit, K.; Rahul, K.N.; Pritam, P.; 2022; An overview on friction stir welding/processing tools; Materials Today: Proceedings 58, 57–64.
- [16] Kumar, K.; Satish V.K.; 2008; The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation; Materials Science and Engineering A 485, 367–374.
- [17] Liu, FC.; Ma, ZY.; 2008; Influence of tool dimension and welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6061-T651 aluminum alloy; Metallurgical and Materials Transactions 39, 2378–88.
- [18] Dialami, N.; Cervera, M.; Chiumenti, M.; 2018; Effect of the Tool Tilt Angle on the Heat Generation and the Material Flow in Friction Stir Welding; International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Technical University of Catalonia, Campus Norte UPC, 08034 Barcelona, Spain.
- [19] Long, L.; Chen, G.; Zhang, S.; Liu, T.; Shi, Q.; 2017; Finite-element analysis of the tool tilt angle effect on the formation of friction stir welds.; J. Manuf. Process 30, 562–569.
- [20] Shuai Z.; Qingyu S.; Qu L.; Ruishan X.; Zhang. G.; Chen, G.; 2018; Effects of tool tilt angle on the in-process heat transfer and mass transfer during friction stir welding; International Journal of Heat and Mass Transfer 125, 32–42.
- [21] Mouminah A.; Mehwish J.; Munazah F.; Afra S.Z.; Annayath M.,; Noor Z.K.; 2022; Effect of tool rotational speed on the friction stir welded aluminum alloys: A review; Materials Today: Proceedings 62, 245–250.
- [22] Shengchong M.; Yong Z.; Jihong P.; Zhixia Z.; Chuan L.; Keng Y.; 2019; Effect of welding speed on performance of friction stir welded spray forming 7055 aluminum alloy; Journal of Manufacturing Processes 46, 304–316.

- [23] Haijun W.; Diqiu H.; Yunxin W.; Sheng X.; 2021; Study on wear state evaluation of friction stir welding tools based on image of surface topography.; *Measurement* 186, 110173.
- [24] Uzun H.; Dalle Donne C.; Argagnotto A.; Ghidini T.; Gambaro C.; 2005; Friction Stir Welding of Dissimilar Al 6013-T4 to X5crni18-10 Stainless Steel.; *Materials and Design* 26(1):41–46.
- [25] R.S. Coelho, R.S.; Kostka A.; dos Santos, J.F.; Kaysser-Pyzalla, A.; 2012; Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure; *Materials Science & Engineering A* 556, 175–183.
- [26] Kalpakjian, S; 2008; *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (5a. Edición); México, Ed. Pearson Educación.
- [27] Groover, M. P.; 2007; *Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, Procesos y Sistemas* (3a. Edición); Ed. Guadalajara, MC Graw-Hill Interamericana.
- [28] Iberisa; 2018; www.iberisasl.com
- [29] A. Dorbane, B. Mansoor, G. Ayoub, V.C. Shunmugasamy, A. Imad; 2016; Mechanical, microstructural and fracture properties of dissimilar welds produced by friction stir welding of AZ31B and Al6061; *Mater. Sci. Eng.* 651, 720–733.
- [30] L.R., López González, F., Grossman Cormezana; 2013; *Soldadura por fricción*; Facultad de Ingeniería - Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Bío-Bío, Chile.
- [31] Google Web, 2022, www.google.es
- [32] D. Merino Hernández, H. A. González Rojas; 2019; *Soldadura de ejes por fricción*; Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- [33] The Welding Institute; 2022; www.twi-global.com.
- [34] J. Sarvaiya, D. Singh; 2022; Selection of the optimal process parameters in friction stir welding/ processing using particle swarm optimization algorithm; *Materials Today: Proceedings* 62, 896–901.
- [35] KUKA Catalogue; 2022; *Rotatory friction Welding Techonology*; KUKA Deutschland GmbH, Alemania.
- [36] W. M. Thomas; 1998; *FSW basic variants for WhorlTM type tool*; Abington, Cambridge, Reino Unido.
- [37] Thomas W.M., Threadgill P.L., Nicholas, E.D.; 1999; Feasibility of friction stir welding steel; *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 4, No. 6, 365–372.
- [38] W. J. Arbegast; 2008; A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding; vol. 58, pp. 372-376.
- [39] L. C; 2008; Material flow in friction stir welding; *Microsc Microanal* 14(S3):87–90.
- [40] K. Colligan; 1999; Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminum; *Suppl. TO Weld. J.*, n.o July, pp. 229-237.
- [41] N. Kumar, R. S. Mishra, y J. A. Baumann; 2014; *Residual Stresses in Friction Stir Welding*; Ed. Elsevier.
- [42] R. Modaresi, D.B. Müller; 2012; The role of automobiles for the future of aluminium recycling; *Environ. Sci. Technol.* 46; 8587–8594.
- [43] S. K. Maurya, R. Kumar, S. K. Mishra, A. Sharma, A.S. Yadav, V. Ranjan; 2022; Friction stir welding of cast aluminum alloy (A319), Effect of process parameters; *Materials Today: Proceedings* 56, 1024–1033.
- [44] H.I. Dawood, K. S. Mohammed, A. Rahmat, M. B. Uday; 2015; Effect of small tool pin profiles on microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy by friction stir welding, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 25, ref. 28562865.
- [45] A. Nait Salah; H. Mehdi; A. Mehmood; A. W. Hashmi; C. Malla; R. Kumar; 2022; Optimization of process parameters of friction stir welded joints of dissimilar aluminum alloys AA3003 and AA6061 by RSM; *Materials Today: Proceedings* 56, 1675–1683.
- [46] R. Kumar; S. S. Dhama; R.S. Mishra; 2021; Optimization of friction stir welding process parameters during joining of aluminum alloys of AA6061 and AA6082; *Materials Today: Proceedings* 45, 5368–5376.
- [47] S . Ohhama; T. Hata; T. Yahaba; T. Kobayashi; T. Miyahara; M. Sayama; 2013; Application of an FSW continuous welding technology for steel and aluminium to an automotive subframe; *SAE Tech. Paper* 2.

- [48] O. Kayode; E.T. Akinlabi; An overview on joining of aluminium and magnesium alloys using friction stir welding (FSW) for automotive lightweight applications; 2019; *Mater. Res. Express* 6.
- [49] W. V. Vaidya, M. Horstmann, V. Ventzke, B. Petrovski, M. Koc, R. Kocik, G. Tempus; 2010; Improving interfacial properties of a laser beam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications; *J. Mater. Sci.* 45, 6242–6254.
- [50] D.J. Hagemaijer; 1976; NDT of aluminium-brazed titanium honeycomb structure; *Non- Destr. Test.* 9, 107–116.
- [51] S. Naik, S. Panda, S. Padhye, G. Lobo, G. Joshi, S. Deshmukh, A. Ingle; 2021; Materials Today: proceedings Parametric review on friction stir welding for under water and dissimilar metal joining applications; *Materials Today Proc.* 47, 3117–3122.
- [52] K. Kumar, S.V. Kailas, T.S. Srivatsan; 2011; The role of tool design in influencing the mechanism for the formation of friction stir welds in aluminium alloy 7020; *Mater. Manuf. Process.* 26, 915–921.
- [53] B. Li, Z. Zhang, Y. Shen, W. Hu, L. Luo; 2014; Dissimilar friction stir welding of Ti–6Al–4V alloy and aluminium alloy employing a modified butt joint configuration: influences of process variables on the weld interfaces and tensile properties; *Mater. Des.* 53, 838–848.
- [54] G. Buffa; 2016; Dissimilar titanium/aluminium friction stir welding lap joints by experiments and numerical simulation; *Adv. Manufacture.* 4, 287–295.
- [55] U. Dressler, G. Biallas, U. Alfaro Mercado; 2019; Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminium alloy AA2024-T3; *Mater. Sci. Eng.* 526, 113–117.
- [56] A. Kar, S. Suwas, S. V Kailas; 2018; Materials Science & Engineering A Two-pass friction stir welding of aluminium alloy to titanium alloy : a simultaneous improvement in mechanical properties; *Mater. Sci. Eng. A* 733, 199–210.
- [57] Y. Yue, Z. Zhang, S. Ji, Z. Li, D. Yan; 2018; Friction stir lap welding of 6061-T6 Al to Ti- 6Al-4V using low rotating speed; *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 96, 2285–2291.
- [58] K. Bang, K. Lee, H. Bang, H. Bang; 2011; Interfacial microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds between 6061-T6 aluminium and Ti-6 % Al-4 % V alloys; *Mater. Trans.* 52, 974–978.
- [59] A. Wu, Z. Song, K. Nakata, J. Liao, L. Zhou; 2015; Interface and properties of the friction stir welded joints of titanium alloy Ti6Al4V with aluminium alloy 6061; *Mater. Des.* 71, 85–92.
- [60] A. Kar, S.K. Choudhury, S. Suwas, S. V Kailas, Effect of niobium interlayer in dissimilar friction stir welding of aluminium to titanium, *Mater. Char.* 145 (2018) 402–412,
- [61] A. Kar, S. Suwas, S. V Kailas, Microstructural modification and high-temperature grain stability of aluminium in an aluminium-titanium friction stir weld with zinc interlayer, *J. Occup. Med.* 71 (2019) 444–451
- [62] A. Kar, S. Suwas, S. V Kailas, Significance of tool offset and copper interlayer during friction stir welding of aluminium to titanium, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 100 (2019) 435–443.
- [63] Y. Zhang, X. Cao, S. Larose, P. Wanjara; 2012; Review of tools for friction stir welding and processing”; *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol 51, no. 3, pp. 250-261.
- [64] M.S. Ghogheri, M. Kasiri, K. Amini; 2016; Friction stir welding of dissimilar joint of aluminium alloy 5083 and commercially pure titanium, *Kovove Mater.* 54, 71–75.
- [65] M. Aonuma, K. Nakata; 2011; Dissimilar metal joining of 2024 and 7075 aluminium alloys to titanium alloys by friction stir welding; *Mater. Trans.* 52, 948–952.
- [66] B. Li, Y. Shen, L. Luo, W. Hu; 2016; Effects of processing variables and heat treatments on Al/Ti-6Al-4V interface microstructure of bimetal clad-plate fabricated via a novel route employing friction stir lap welding; *J. Alloys Compd.* 658, 904–913
- [67] Y. Huang, Z. Lv, L. Wan, J. Shen, J.F. dos Santos; 2017; A new method of hybrid friction stir welding assisted by friction surfacing for joining dissimilar Ti/Al alloy; *Mater. Lett.* 207, 172–175.

- [68] J. Tang, Y. Shen; 2017; Effects of preheating treatment on temperature distribution and material flow of aluminium alloy and steel friction stir welds; *J. Manuf. Process.* 29, 29–40.
- [69] X. Fei, X. Jin, Y. Ye, T. Xiu, H. Yang; 2016; Effect of pre-hole offset on the property of the joint during laser-assisted friction stir welding of dissimilar metals steel and aluminium alloys; *Mater. Sci. Eng. A* 653, 43–52.
- [70] M.M. Abd, T.A. Osman, A. El Mokadem, A. Bakr; 2020; Evaluation of the formation of intermetallic compounds at the intermixing lines and in the nugget of dissimilar steel/aluminium friction stir welds; *J. Mater. Res. Technol.* 9, 10209–10222.
- [71] T. Tanaka, T. Morishige, T. Hirata; 2009; Comprehensive analysis of joint strength for dissimilar friction stir welds of mild steel to aluminium alloys; *Scripta Mater.* 61, 756–759.
- [72] X. Liu, S. Lan, J. Ni; 2014; Analysis of process parameters effects on friction stir welding of dissimilar aluminium alloy to advanced high strength steel; *J. Mater. Design.* 59, 50–62.
- [73] Q. Zhang, W. Gong, W. Liu; 2015; Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al – Cu joints by friction stir welding; *Trans. Nonferrous Metals Soc. China* 25, 1779–1786.
- [74] K.K. Ramachandran, N. Murugan, S.S. Kumar; 2015; Effect of tool axis offset and geometry of tool pin profile on the characteristics of friction stir welded dissimilar joints of aluminium alloy AA5052 and HSLA steel; *Mater. Sci. Eng. A* 639.
- [75] U.F.S. Welding, Y. Chen, F. Zhang; 2022; Improving the quality of dissimilar Al/steel butt-lap joint via; *Materials* 15.
- [76] A. Kar, B. Vicharapu, Y. Morisada, H. Fujii; 2022; Elucidation of interfacial microstructure and properties in friction stir lap welding of aluminium alloy and mild steel, *Mater. Char.* 168, 10572.
- [77] M. Pourali, A. Abdollah-zadeh, T. Saeid, F. Kargar; 2017; Influence of welding parameters on intermetallic compounds formation in dissimilar steel/aluminium friction stir welds; *J. Alloys Compd.* 715, 1–8.
- [78] Y. Huang, J. Wang, L. Wan, X. Meng, H. Liu, H. Li; 2016; Self-riveting friction stir lap welding of aluminium alloy to steel, *Mater. Lett.* 185, 81–184.
- [79] H. Uzun, C. Dalle, A. Argagnotto, T. Ghidini, C. Gambaro; 2005; Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel; *Mater. Des.* 26, 41–46.
- [80] S. Yaw, H. Cho, H. Das, J. Lee, S. Hong; 2019; Microstructure and mechanical/ electrochemical properties of friction stir butt welded joint of dissimilar aluminium and steel alloys; *Mater. Char.* 154, 67–79.
- [81] R.S. Coelho, A. Kostka, J.F. Santos, A. Kaysser-pyzalla; 2012; Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels : mechanical properties and their relation to microstructure, *Mater. Sci. Eng. A* 556, 175–183.
- [82] L. Wan, Y. Huang; 2018; Friction stir welding of dissimilar aluminium alloys and steels : a review; *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 99.
- [83] P. Carlone, A. Astarita, G.S. Palazzo, V. Paradiso, A. Squillace; 2015; Microstructural aspects in Al–Cu dissimilar joining by FSW; *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 79; 1109–1116.
- [84] F. Bakhtiari, A. Ali, S. Seyyed, E. Mirsalehi; 2018; Dissimilar joining of pure copper to aluminium alloy via friction stir welding; *Acta Metall. Sin.* 31, 1183–1196.
- [85] M. Felix Xavier Muthu, V. Jayabalan; 2016; Effect of pin profile and process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Cu joints; *Trans. Nonferrous Metals Soc. China* 26, 984–993.
- [86] N.A. Muhammad, C.S. Wu, H. Su; 2021; Concurrent influences of tool offset and ultrasonic vibration on the joint quality and performance of dissimilar Al/Cu friction stir welds; *J. Mater. Res. Technol.* 14, 1035–1051.
- [87] N. Kumar, G.K. Dhuria, R. Singh; 2018; Evaluation of tensile strength in friction stir welded aluminium alloy 6101-T6 and commercially pure copper joints, *Mater. Today Proc.* 5, 19230–19236.

- [88] H.I. Dawood, K.S. Mohammed, A. Rahmat, U.M. Basheer; 2015; Microstructural Characterizations and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Technique of Dissimilar (Al-Cu) Sheet; *Journal of Applied Science and Agriculture*.
- [89] C. Genevois, M. Girard, B. Huneau, X. Sauvage, G. Racineux; 2011; Interfacial reaction during friction stir welding of Al and Cu; *Metall. Mater. Trans.* 42A, 2290–2295.
- [90] S. Shankar, S. Chattopadhyaya; 2019; Friction stir welding of commercially pure copper and 1050 aluminium alloys; *Mater. Today Proc.*
- [91] S. Shankar, P. Vilaça, P. Dash, S. Chattopadhyaya, S. Hloch; 2019; Joint strength evaluation of friction stir welded Al-Cu dissimilar alloys; *Measurement* 146; 892–902.
- [92] N. Eslami, A. Harms, J. Deringer, A. Fricke, S. Böhm; 2018; Dissimilar friction stir butt welding of aluminium and copper with cross-section adjustment for current- carrying components; *Metals* 8.
- [93] K.P. Mehta, V.J. Badheka; 2017; Influence of tool pin design on properties of dissimilar copper to aluminium friction stir welding, *Trans. Nonferrous Metals Soc. China* 27, 6–54.
- [94] N.A. Muhammad, C.S. Wu; 2019; Ultrasonic vibration assisted friction stir welding of aluminium alloy and pure copper, *J. Manuf. Process.* 39, 114–127.
- [95] K.P. Mehta, V.J. Badheka; 2017; Hybrid approaches of assisted heating and cooling for friction stir welding of copper to aluminium joints, *J. Mater. Process. Technol.* 239, 336–345.
- [96] S. Celik, R. Cakir; 2016; Effect of friction stir welding parameters on the mechanical and microstructure properties of the, *Metals* 6.
- [97] K.P. Mehta, V.J. Badheka; 2014; Effects of Tilt Angle on Properties of Dissimilar Friction Stir Welding Copper to Aluminium; *Materials and Manufacturing Processes*, pp. 37–41.
- [98] Q. Zhang, W. Gong, W. Liu; 2015; Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al – Cu joints by friction stir welding; *Trans. Nonferrous Metals Soc. China* 25, 1779–1786.
- [99] N. Eslami, Y. Hischer, A. Harms, D. Lauterbach, S. Böhm; 2019; Optimization of process parameters for friction stir welding of aluminium and copper using the taguchi method; *Metals* 63.
- [100] N.A. Muhammad, C. Wu; Evaluation of capabilities of ultrasonic vibration on the surface , electrical and mechanical behaviours of aluminium to copper dissimilar friction stir welds; 2020; *Int. J. Mech. Sci.* 183, 105784.
- [101] P. Kah, R. Suoranta, J. Martikainen, C. Magnus; 2014; Techniques for joining dissimilar materials: metals and polymers, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 36, 152–164.
- [102] Y. Huang, X. Meng, Y. Xie, L. Wan, Z. Lv, J. Cao, J. Feng; 2018; Friction stir welding/ processing of polymers and polymer matrix composites; *Compos. Appl. Sci. Manuf.* 105, 235–257.
- [103] S.W. Ghorji, R. Siakeng, M. Rasheed, N. Saba, M. Jawaid; 2018; The role of advanced polymer materials in aerospace; *Sustain. Composite. Aerospace. Appl.* 6282038,
- [104] G. Ramarathnam, M. Libertucci, M. Sadowski, T. North; 1992; Joining of polymers to metal, *Weld. J.* 71, 483.
- [105] A.R. Patel, D.J. Kotadiya, J.M. Kapopara, C.G. Dalwadi, N.P. Patel, H.G. Rana; 2018; Investigation of mechanical properties for hybrid joint of aluminium to polymer using friction stir welding (FSW); *Mater. Today Proc.* 5, 4242–4249.
- [106] H.A. Derazkola, R.K. Fard, F. Khodabakhshi; 2018; Effects of processing parameters on the characteristics of dissimilar friction-stir-welded joints between AA5058 aluminium alloy and PMMA polymer; *Weld. World* 62, 117–130.
- [107] P. Upadhyay, Y. Hovanski, S. Jana, L.S. Fifield; 2017; Joining dissimilar materials using friction stir scribe technique; *J. Manufacture Sci. Eng. Trans. ASME* 139, 3–5.
- [108] Y. Huang, X. Meng, Y. Xie, L. Wan, Z. Lv, J. Cao, J. Feng; 2018; Friction stir welding/ processing of polymers and polymer matrix composites; *Compos. Appl. Sci. Manuf.* 105, 235–257.
- [109] P. Upadhyay, Y. Hovanski, S. Jana, L.S. Fifield; 2017; Joining dissimilar materials using friction stir scribe technique; *J. Manufacture Sci. Eng. Trans. ASME* 139, 3–5.

- [109] Y. Huang, X. Meng, Y. Xie, J. Li, L. Wan; 2019; New technique of friction-based filling stacking joining for metal and polymer; *Compos. B Eng.* 163, 217–223.
- [110] N.A. Muhammad, C. Wu; Evaluation of capabilities of ultrasonic vibration on the surface , electrical and mechanical behaviours of aluminium to copper dissimilar friction stir welds; 2020; *Int. J. Mech. Sci.* 183, 105784.
- [111] N.S. Asl, S.E. Mirsalehi, K. Dehghani; 2019; Effect of TiO₂ nanoparticles addition on microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA6063-T4 aluminium alloy and AZ31B-O magnesium allo; *J. Manuf. Process.* 38, 338–354.
- [112] P. Venkateswaran, A.P. Reynolds; 2012; Factors affecting the properties of Friction Stir Welds between aluminium and magnesium alloys; *Mater. Sci. Eng.* 545, 26–37.
- [113] T. Tanaka, T. Hirata, N. Shinomiya, N. Shirakawa; 2015; Analysis of material flow in the sheet forming of friction-stir welds on alloys of mild steel and aluminium; *J. Mater. Process. Technol.* 226, 115–124.
- [114] T. Watanabe, H. Takayama, A. Yanagisawa; 2006; Joining of aluminium alloy to steel by friction stir welding; *J. Mater. Process. Technol.* 178, 342–349.
- [115] H.A. Derazkola, H.J. Aval, M. Elyasi; 2015; Analysis of process parameters effects on dissimilar friction stir welding of AA1100 and A441 AISI steel; *Sci. Technol. Weld. Join.* 20 , 553–562.
- [116] X. Liu, S. Lan, J. Ni; 2014; Analysis of process parameters effects on friction stir welding of dissimilar aluminium alloy to advanced high strength steel; *J. Mater. Design.* 59, 50–62.
- [117] X. Fei, X. Jin, Y. Ye, T. Xiu, H. Yang; 2016; Effect of pre-hole offset on the property of the joint during laser-assisted friction stir welding of dissimilar metals steel and aluminium alloys; *Mater. Sci. Eng. A* 653, 43–52.
- [118] T. Wang, M. Komarasamy, K. Liu, R.S. Mishra; 2018; Friction stir butt welding of strain- hardened aluminium alloy with high strength steel; *Mater. Sci. Eng.* 737, 85–89.
- [119] M. Reza-E-Rabby, W. Tang, A.P. Reynolds; 2015; Effect of tool pin features on process response variables during friction stir welding of dissimilar aluminium alloys; *Sci. Technol. Weld. Join.* 20, 425–432.
- [120] M. Aissani, S. Gachi, F. Boubenider, Y. Benkedda; 2010; Design and optimization of friction stir welding tool; *Mater. Manuf. Process.* 25; 1199–1205.
- [121] K. Kumar, S.V. Kailas, T.S. Srivatsan; 2008; Influence of tool geometry in friction stir welding; *Mater. Manuf. Process.* 23, 188–194.
- [122] A.A. McLean, G.L.F. Powell, I.H. Brown, V.M. Linton; 2003; Friction stir welding of magnesium alloy AZ31B to aluminium alloy 5083; *Sci. Technol. Weld. Join.* 8, 462–464.
- [123] Y. Wei, J. Li, J. Xiong, F. Huang; 2012; Joining aluminium to titanium alloy by friction stir lap welding with cutting pin; *Mater. Char.* 71, 1–5.
- [124] S. Ji, Z. Li, L. Zhang, Z. Zhou, P. Chai; 2016; Effect of lap con fi guration on magnesium to aluminium friction stir lap welding assisted by external stationary shoulder; *JMADE* 103, 160–170.
- [125] A. Paoletti, F. Lambiase, y A. Di Ilio; 2015; Analysis of forces and temperatures in friction spot stir welding of thermoplastic polymers; *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.*
- [126] Lohwasser. D., C. Zan; 2010; Friction stir welding: from basics to applications; Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Granta Park, Great Abington, Cambridge.
- [127] Ferrer Giménez, C.; Amigó Borrás. V.; 2003; *Tecnología de materiales*, Universidad Politécnica de Valencia, Editorial UPV, Valencia.
- [128] R.A. Prado; L.E. Murr; D.J. Shindo; K.F. Soto; 2001; Tool wear in the friction-stir welding of aluminum alloy 6061+20% Al₂O₃: a preliminary study; *Scripta Materialia* 45, 75-80.
- [129] M.V.N. Srujan Manohar, K. Mahadevan; 2020; Prediction on mechanical and microstructural behaviour of friction stir welded thin gauge aluminium-copper sheets; *Mater. Today Proc.*
- [130] A.G. Wiedenhoft, H.J. Amorim, T.S. Rosendo, T.R. Strohaecker; 2017; Friction stir welding of dissimilar al-cu lap joints with copper on top; *Key Eng. Mater.* 724, 71–76.

- [131] A. Kar, S. Suwas, S. V Kailas; 2018; Materials Science & Engineering A Two-pass friction stir welding of aluminium alloy to titanium alloy: a simultaneous improvement in mechanical properties; Mater. Sci. Eng. A 733, 199–210.
- [132] T. Ogura, Y. Saito, T. Nishida, H. Nishida, T. Yoshida; 2012; Partitioning evaluation of mechanical properties and the interfacial microstructure in a friction stir welded aluminium alloy/stainless steel lap joint; Scripta Mater. 66, 531–534.
- [133] R. Beygi, M. Zarezadeh Mehrizi, A. Akhavan-Safar, S. Safaei, A. Loureiro, L.F. M. da Silva; 2021; Design of friction stir welding for butt joining of aluminium to steel of dissimilar thickness: heat treatment and fracture behavior; Int. J. Adv. Manuf. Technol. 112, 1951–1964.