CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EFECTO DE LA GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA DEL PROCESO FSW EN UNIONES DE ALEACIÓN DE ALUMINIO 5052-H32

POR

ING. PAOLA BILAY CERNA ARELLANO

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO COAHUILA, A 20 DE NOVIEMBRE DE 2020

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EFECTO DE LA GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA DEL PROCESO FSW EN UNIONES DE ALEACIÓN DE ALUMINIO 5052-H32

POR

ING. PAOLA BILAY CERNA ARELLANO

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO COAHUILA, A 20 DE NOVIEMBRE DE 2020

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la monografía **"EFECTO DE LA GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA DEL PROCESO FSW EN UNIONES DE ALEACIÓN DE ALUMINIO 5052-H32"**, realizada por el alumno(a) **PAOLA BILAY CERNA ARELLANO,** con número de matrícula 19ES-256 sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila
Tutor Académico

Mtra. Cindy Estefanía Morales Bazaldúa
Asesor

Mtro. Bryan Ramiro Rodríguez Vargas
Asesor

Vo.Bo.
Dr. Pedro Pérez Villanueva
Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Especialización del alumno **PAOLA BILAY CERNA ARELLANO** una vez leído y revisada la monografía titulada **"EFECTO DE LA GEOMETRIA DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA DEL PROCESO FSW EN UNIONES DE LA ALEACION DE ALUMINIO 5052-H32",** aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente el día 20 de noviembre del 2020.

Dr. Esteban Sánchez Valdés

Presidente

Dr. José Jorge Ruíz Mondragón

Secretario

Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila

Vocal

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, PAOLA BILAY CERNA ARELLANO, estudiante con matrícula 19ES-256, del Programa de Posgrado ESPECIALIZACIÓN EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. (COMIMSA), declaro que el presente trabajo terminal con título "EFECTO DE LA GEOMETRIA DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA DEL PROCESO FSW EN UNIONES DE LA ALEACION DE ALUMINIO 5052-H32" es original, de mi autoría y producto de mi contribución intelectual y de investigación.

Así mismo, manifiesto que los datos, imágenes y textos tomados de fuentes publicadas, como artículos y tesis, están debidamente citados y referenciados, dando el crédito a los investigadores y fuentes originales.

Paola Bilay Cerna Arellano

Nombre y Firma del estudiante

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado bajo la supervisión del Dr. Jorge L. Acevedo Dávila, por la Mtra. Cindy Estefanía Morales Bazaldúa y el Mtro. Bryan Ramiro Rodríguez Vargas de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales a quienes me gustaría expresar mi agradecimiento por su tiempo, dedicación y por confiar en mi capacidad, tienen toda mi admiración y respeto, gracias por el gran apoyo que me han brindado a lo largo de este proceso y también por las enseñanzas que me han transmitido, pero sobre todo, gracias por hacer posible este trabajo.

Del mismo modo a la institución por el apoyo destinado para que este trabajo se realizara de manera exitosa.

A mis maestros que me apoyaron y guiaron a lo largo de mi desarrollo académico.

Y, por último, pero no menos importante, agradezco a mi familia, a mis hijos por ser mi motivación principal y a mi abuela, mis padres y hermanas, por todo el apoyo que me han brindado, por estar ahí en los momentos más difíciles, incluso cuando pensé en rendirme. Sin ustedes definitivamente no hubiera llegado hasta aquí, gracias por tanto amor, el cual es correspondido infinitamente. Esto es por y para ustedes

DEDICATORIA

A mis padres, abuela y hermanas, a mis hijos Ángela y Elías.

Pero sobre todo a mí misma, Bilay, siempre has demostrado que puedes con esto y más, gracias por no dejarnos caer a pesar de las adversidades. (Abre esta página cada que estés a punto de rendirte)

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS i
DEDICATORIA ii
ÍNDICE iii
SÍNTESIS 1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN 3
1.1 Antecedentes 3
1.2 Objetivos 5
1.2.1 Objetivo general 5
1.2.2 Objetivos específicos 5
1.3 Justificación 5
1.4 Planteamiento del problema 6
1.5 Aportación tecnológica y/o industrial 7
1.6 Alcance y delimitaciones 7
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO 8
2.1 Generalidades del aluminio 8
2.1.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio 9
2.1.2 Nomenclatura de los temples 12
2.1.3 Aleaciones de la serie 5XXX 14
2.1.4 Sistema Al-Mg 16
2.1.5 Aleación 5052-H32 y sus propiedades y aplicaciones 18
2.2 Proceso de soldadura por Fricción-Agitación (FSW) 20
2.2.1 Parámetros del proceso 21

2.3 Herramienta de FSW 22
2.3.1 Geometría de la herramienta 24
2.4 Pin de la Herramienta y su función. 25
2.5 Hombro de la herramienta y su función 28
2.6 Clasificación de las zonas generadas en el proceso FSW 30
2.7 Generación de calor en el proceso de FSW 32
2.8 Flujo de material y transferencia de calor en el proceso de FSW .. 37
CAPÍTULO 3 ESTADO DEL ARTE 38
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS Y DISCUSION DE LA BIBLIOGRAFÍA 48
CONCLUSIONES 50
BIBLIOGRAFÍA 51
ÍNDICE DE TABLAS 57
ÍNDICE DE FIGURAS 58

SÍNTESIS

En el presente trabajo monográfico se hace una recopilación del estado del arte sobre la influencia de la geometría de la herramienta de soldadura del proceso de fricción- agitación, en las propiedades microestructurales y mecánicas de uniones de aluminio específicamente de la aleación 5052-H32

En la actualidad, el aluminio es un metal ligero de amplia aplicación estructural y funcional, debido a sus propiedades mecánicas y químicas, especialmente cuando se encuentra aliado con otros elementos, gracias a esto surge la necesidad de implementar nuevas técnicas de unión, así como mejorar el desempeño de las mismas, siendo el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) uno de los más estudiados.

Debido al reciente desarrollo del proceso de FSW este se encuentra en constante investigación con el objetivo de conocer a profundidad tanto su principio así como su funcionamiento, además de lograr establecer un método adecuado de determinación de parámetros que produzcan soldaduras de calidad, independientemente de los tipos de aleaciones procesadas, sin embargo, es inherente que la herramienta de soldadura a utilizar, cumpla su principal objetivo durante el proceso ya que siendo el responsable de la generación de calor y la plastificación del material, así como la distribución del mismo, lo vuelve un parámetro crucial para la calidad final de la soldadura.

En la actualidad se han desarrollado diversas geometrías y perfiles tanto del hombro como el pin para conformar la herramienta, esto comto parte de la búsqueda de la combinación adecuada para cada tipo de material por medio del estudio de la influencia que tiene el variar las geometrías de dicho dispositivo en las propiedades resultantes de las uniones.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Actualmente diferentes sectores industriales tal es el caso del sector automotriz ha incrementado su interés por el uso de aleaciones ligeras como el aluminio, debido a la creciente necesidad de reducir el peso de las estructuras para un eficiente consumo de combustible, mantener el correcto desempeño mecánico del producto y a su vez, contribuir de manera positiva al cuidado del medio ambiente [1].

Entre las principales propiedades características de este tipo de materiales ligeros se destacan su baja densidad, buena conformabilidad, capacidad para reciclarse, bajo costo de procesamiento y versatilidad para aplicaciones prácticas; por tal motivo, no solo la industria automotriz está enfocada en el uso de aleaciones de aluminio, sino también otros campos industriales tales como el aeroespacial y naval. Esta última, encauza su interés principalmente en la aleación 5052 la cual por no ser tratable térmicamente es endurecida por deformación exhibiendo una alta resistencia a la corrosión en ambientes salinos [2].

Considerando las necesidades de la industria antes mencionadas, ha sido inherente recurrir a las técnicas de unión, sin embargo, realizar soldaduras de

aluminio y sus aleaciones por medio de procesos de fusión resulta difícil de lograr, ya que este metal puede reaccionar químicamente con el oxígeno y nitrógeno ocasionando defectos como distorsiones, agrietamiento en caliente, porosidad, y faltas de fusión [3], además de la alta conductividad térmica y eléctrica que presenta este metal ya que logra que gran parte del calor generado se transfiera rápidamente al interior del material base, absorbiéndolo. [4]. No obstante, con la invención de tecnologías de unión en estado sólido, como el proceso de soldadura por fricción agitación, FSW por sus siglas en inglés estos problemas se han reducido a través de los años [3].

En 1991, en el Instituto Tecnológico de la Soldadura en Inglaterra (TWI, por sus siglas en inglés) se desarrolla el proceso de soldadura por fricción agitación, el cual es considerado como una técnica de unión en estado sólido que no alcanza la fusión, dado que plastifica localmente el material por medio del calor producido por la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo, lo anterior promueve ventajas en las uniones resultantes entre las que se encuentran; ausencia de defectos relacionados con la solidificación, grietas y gases atrapados, además de producir una baja distorsión en comparación con otras técnicas de soldadura, sin dejar de mencionar que no utiliza gases protectores debido a que no libera emisiones ni humos tóxicos.Dicho proceso, además, es considerado como amigable con el medio ambiente, ya que no utiliza gases protectores ni ningún tipo de metal de aporte evitando la liberación y emisión de humos tóxicos, así como también la formación de fases no deseadas en la microestructura.

Con la llegada de esta nueva tecnología de unión, diferentes ventajas han sido introducidas en el campo industrial entre las que se encuentran que mencionada técnica además de utilizarse como método de unión, puede usarse también como una tecnología de habilitación de componentes navales. Demostrado que es capaz de emplearse como proceso de unión sustituyendo a los procesos convencionales de fusión para distintas aplicaciones como lo son la construcción de barcos de pesca, trenes de alta velocidad, entre otros [5].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un estudio bibliográfico acerca del efecto que la geometría de la herramienta empleada tiene al fabricar uniones de aluminio 5052-H32 mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación.

1.2.2 Objetivos específicos

- Recopilar la información bibliográfica relevante sobre los tipos de herramientas empleadas en la soldadura por fricción-agitación de aleaciones de aluminio 5052-H32.
- Estudiar de acuerdo con la literatura las características mecánicas y microestructurales de la aleación 5052-H32.
- Analizar la relación existente, así como el efecto que tiene la geometría de la herramienta de soldadura con el comportamiento microestructural y mecánico de las uniones de la aleación 5052-H32
- Identificar, así como proponer el tipo de geometría adecuado a emplear en aleaciones de grado naval; 5052-H32 para uso posterior.

1.3 Justificación

Al realizar uniones por medio del proceso de soldadura por fricción agitación, es necesario mantener un adecuado control de las variables del proceso para la obtención de uniones libres de defectos y que presenten un excelente desempeño industrial. Los parámetros que comúnmente se controlan son las variables de operación; es decir, la velocidad de avance, fuerza axial y ángulo de inclinación, velocidad de rotación, entre otros. No obstante, el estudio de otros parámetros como el diseño y geometría de la herramienta es de suma importancia para alcanzar dichos objetivos en las uniones.

En anteriores estudios realizados sobre este proceso se ha observado que la información acerca del efecto de la herramienta y tópicos relacionados a ella tales como la geometría de pin/hombro al unir aleaciones de aluminio, han sido pasados por alto, omitiendo la importancia que esta parte tiene sobre el comportamiento final de la unión. Por lo que la justificación del presente se basa en el estudio del efecto que tiene específicamente la geometría de la herramienta sobre uniones por FSW de la aleación de aluminio 5052-H32 buscando analizar su relevancia para controlar la calidad final de la unión.

1.4 Planteamiento del problema

Al desarrollar uniones soldadas a través del proceso por fricción-agitación ocurren cambios microestructurales en las distintas zonas características de la unión, las cuales se encuentran influenciadas por las diversas variables del proceso tales como: velocidad de rotación, velocidad de avance, configuración de la junta, fuerza axial, ángulo de inclinación y la herramienta de soldadura la cual requiere una adecuada selección que depende del material con el cual está fabricada, su diseño y geometría tanto del hombro como del pin que la conforman.

Precisamente esta última, es un factor clave ya que tanto el contacto directo que tiene con la pieza de trabajo, la forma en que plastifica y distribuye el material base, así como los esfuerzos a los que se encuentra sometida durante el proceso son de gran importancia, puesto que se ha observado en estudios previos que dicha herramienta tiene un gran efecto en el desarrollo microestructural, aspecto visual y propiedades finales de las uniones.

Por otro lado, se ha observado que, al elegir la herramienta, ciertos aspectos son ignorados, debido a esto la finalidad de identificar y analizar el efecto de la geometría de la herramienta de FSW sobre uniones de una aleación de aluminio grado naval 5052-H32 es muy importante en este trabajo monográfico para conocer los factores de la herramienta requeridos para la obtención de uniones de calidad.

1.5 Aportación tecnológica y/o industrial

El presente trabajo aporta investigación importante para el área de estudio del proceso de soldadura por fricción-agitación por medio del análisis del efecto que causa la geometría de la herramienta con la cual se realizan las uniones de aluminio 5052-H32, facilitando así la selección y diseño de este tipo de dispositivos para investigaciones futuras.

1.6 Alcance y delimitaciones

El alcance de este trabajo radica en la recopilación, análisis y estudio de información acerca del efecto que la geometría de la herramienta de soldadura por fricción agitación tiene en las características microestructurales y mecánicas resultantes de la soldadura de placas de aluminio 5052-H32. Esto con el fin de establecer una adecuada selección de herramienta en investigaciones posteriores.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades del aluminio

El aluminio y sus aleaciones son de los materiales ampliamente utilizados a nivel mundial debido a que proporcionan combinaciones únicas de propiedades, que lo hacen de este metal uno de los más versátiles, económicos y atractivos para una amplia gama de aplicaciones que van desde espesores pequeños hasta aplicaciones de ingeniería más exigentes. Siendo, únicamente liderados por el acero [6].

El aluminio cuenta con distintas propiedades mecánicas favorables, entre las que se encuentran su baja densidad (2.7 g/cm^3), alta resistencia y bajo peso; características útiles para emplear en vehículos tales como naves espaciales y aviones, así como autos, autobuses y vehículos acuáticos [7]. Otra de sus características, es la excelente resistencia a la corrosión en diferentes entornos además de presentar una excelente conductividad térmica y eléctrica.

Se reconocen más de trescientas composiciones de aleaciones de aluminio de las cuales se han desarrollado muchas variaciones adicionales a nivel internacional [6][8].

2.1.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio

La mayoría de las aleaciones de aluminio contienen aproximadamente entre un 90 a 96 % e.p. de aluminio, con uno o más elementos adicionales que proporcionan una combinación específica de propiedades específicas [8].

La principal clasificación de las aleaciones de aluminio se divide en dos principales categorías: de fundición y forjadas, diferenciándose en el mecanismo empleado para el desarrollo de sus propiedades.

- ✓ **Aleaciones forjadas de aluminio:** Producidas en lingotes o palanquillas que posteriormente son trabajadas mediante procesos tales como laminado, extrusión, forja, estirado entre otros, generando productos semiacabados a partir de los cuales se elaboran productos de uso final.

- ✓ **Aleaciones fundidas de aluminio:** Aleaciones que generalmente se fabrican en piezas o moldes fundidos para obtener una forma final o casi definitiva. En términos generales, las composiciones de estas no se utilizan para procesos posteriores de laminación, extrusión, forja u otros moldeados metálicos [8].

La Asociación del Aluminio ha desarrollado un sistema de identificación para las aleaciones de aluminio donde emplea diferentes nomenclaturas para ambas clasificaciones, dividiéndolas así en familias de acuerdo al principal elemento de aleación [9].

Para las aleaciones forjadas, se utiliza un sistema de cuatro dígitos constituido de la siguiente manera:

AA X X X X

- **El primer** digito, representa el elemento dominante, o el principal elemento de aleación.

- **El segundo** digito, hace referencia al control de impurezas. En las aleaciones de la serie 1XXX, el 0 indica que no hay control, los números del 1 al 9, indican un control especial.

  En las aleaciones de la 2XXX a la 9XXX, el 0 indica que se trata de una aleación original. Si se coloca algún número del 1 al 9, entonces se trata de una aleación controlada o modificada.
- **El tercer y cuarto** digito, representan las anotaciones especiales. En la serie 1XXX, indican el porcentaje mínimo de aluminio sobre el 99%.

En las demás series, los dígitos no tienen un significado especial, usándose para identificar aleaciones diferentes dentro de un mismo grupo [7][8][9].

Esta clasificación, resulta en una lista de familias de composiciones forjadas la cual se muestra en la **Tabla 1**:

Tabla 1 Clasificación de las aleaciones forjadas de aluminio.

	Serie	Aleante principal	Termotratables	Aplicación
ALEACIONES FORJADAS DE ALUMINIO	1XXX	aluminio puro (99%)	NO	Utilizada principalmente en industria química y eléctrica.
	2XXX	cobre	SI	Son ampliamente utilizadas en aviones.
	3XXX	manganeso	NO	De uso general para aplicaciones arquitectónicas y diversos productos
	4XXX	silicio	NO	Se utiliza en varillas de soldadura y láminas de soldadura fuerte
	5XXX	magnesio	NO	Se utiliza en cascos de barcos, pasarelas y productos expuestos a ambientes salinos.
	6XXX	silicio-magnesio	SI	Utilizado para extrusiones de arquitectura.
	7XXX	zinc	SI	Utilizado en componentes estructurales de aviones y otras aplicaciones de alta resistencia.
	8XXX	Otros	-	Aleaciones que incluyen estaño y algunas composiciones de litio.

Por otro lado, las composiciones de fundición se describen mediante un sistema de tres dígitos seguido de un valor decimal. El decimal .0 en todos los casos corresponde a los límites de aleación de fundición. Los decimales .1, y .2 se refieren a composiciones de lingotes, que después de la fusión y el procesamiento deben dar lugar a productos químicos que se ajusten a los requisitos de las especificaciones de colada.

Las familias de aleaciones para composiciones de fundición se muestran en la **Tabla 2** (7) (8) (9).

Tabla 2 Clasificación de aleaciones coladas de aluminio.

	Serie	Aleante principal	Termotratables	Aplicación
ALEACIONES COLADAS DE ALUMINIO	1XX.X	aluminio puro (99%)	NO	Fabricación de rotores.
	2XX.X	cobre	SI	-
	3XX.X	silicio-cobre-magnesio	La mayoría.	Constituye el 90% de la producción de aleaciones de colada.
	4XX.X	silicio	Solo algunos.	-
	5XX.X	magnesio	NO	-.
	6XX.X	poco empleadas.	-	-
	7XX.X	zinc	SI	-
	8XX.X	estaño	SI	-

2.1.2 Nomenclatura de los temples

Las aleaciones de aluminio también pueden clasificarse según el proceso seguido que se empleó para llegar al producto final, y así obtener sus propiedades finales. En la **Tabla 2** se indican las series que son o no son tratables térmicamente.

Aleaciones trabajadas en caliente: Para esta clasificación, se usa la nomenclatura T (Tempered) más un digito convencional, que define los procesos calóricos seguidos para obtener el producto final así **Tabla 3**:

Tabla 3 Nomenclatura de los temples para aleaciones trabajadas en caliente.

T	Tratado térmicamente para producir temples más estables
T1	Enfriado y envejecido naturalmente
T2	Recocido (solo productos fundidos)
T3	Tratamiento en solución y luego trabajado en frio.
T4	Tratamiento en solución y envejecido naturalmente.
T5	Envejecimiento artificial.
T6	Tratamiento en solución y envejecido artificialmente.
T7	Tratamiento en solución y estabilizado.
T8	Tratamiento en solución, trabajado en frio y envejecido artificialmente.
T9	Tratamiento en solución, envejecido artificialmente y trabajado en frio.
T10	Enfriado, envejecido artificialmente y trabajado en frio.

Aleaciones trabajadas en frío: Para esta clasificación se usa la nomenclatura H (Hardened) más tres dígitos convencionales que identifican los procesos seguidos para obtener el producto final, de acuerdo como se observa en la **Tabla 4**

Tabla 4 Nomenclatura de los temples para aleaciones trabajadas en frío.

H	X	X	X
	Tipo de trabajo	**Grado de dureza**	**Variaciones de temple**
ENDURECIDO	**1**: En frío	**1**: 1/8 de dureza	**1:** Endurecido por debajo del temple exigido
	2: En frío y parcialmente recocido	**2:** ¼ de dureza	**2:** Endurecido naturalmente, pero sin control de temperatura.
	3: En frío y estabilizado	**3:** 3/8 de dureza	**3:** Resistencia aceptable a corrosión por ranura**.**
		4: ½ de dureza	**4:** Producto grabado en la superficie con un patrón.
		5: 5/8 de dureza	
		6: ¾ de dureza	
		7: 7/8 de dureza	
		8: Dureza total	
		9: Muy duro	

2.1.3 Aleaciones de la serie 5XXX

Son aleaciones de forja, no tratables térmicamente, endurecibles por deformación actualmente usadas por la mayoría de las industrias navales. Estas aleaciones son menos costosas que la serie 6XXX, ya que, aunque son altamente empleadas requieren un tratamiento térmico para alcanzar las propiedades deseadas para su aplicación.

Las aleaciones de esta serie 5XXX (Al-Mg), poseen una combinación de buena formabilidad, soldabilidad, resistencia a la corrosión y una alta resistencia, especialmente los endurecidos por deformación, ofreciendo un potencial para incrementar su uso en la industria de transportación [10].

La composición química nominal de algunas de las aleaciones pertenecientes a esta familia se muestra en la **Tabla 5**.

Tabla 5 Composiciones químicas (% e.p.) de algunas aleaciones de aluminio de la serie 5XXX (Al balance) [9][10][11][12].

Aleación	Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Ti	Cu	Zn	Otros
5005	0.5-1.1	0.30	0.20	0.70	0.1	-	0.20	0.25	0.15
5052	2.2-2.8	0.25	0.1	0.40	0.15-0.35	-	0.10	0.10	0.15
5251	1.7-2.4	0.40	0.1-0.5	0.50	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
5083	4.0-4.9	0.40	0.4-1.0	0.40	0.05-0.25	0.15	0.10	0.25	0.15
5086	3.5-4.5	0.4	0.2-0.7	0.5	0.05-0.25	0.15	-	0.25	0.15
5154	3.1-3.9	0.25	0.10	0.40	0.15-0.35	0.20	0.10	0.20	0.15
5182	4.0-5.0	0.20	0.2-0.5	0.35	0.10	0.10	0.15	0.25	0.15
5754	2.6-3.6	0.4	0.5	0.4	0.30	0.15	0.10	0.20	

El hierro y el silicio se presentan usualmente en bajas cantidades, (menos del0.5 % e.p. cada uno) actuando como impurezas, además de contener otros elementos como el titanio, cromo, manganeso, cobre y zinc los cuales se presentan en cantidades menores mejorando las propiedades de resistencia y corrosión. Específicamente el titanio, actúa como refinador de grano, mientras que el zinc se agrega a aleaciones con alto contenido de magnesio para mejorar su resistencia al agrietamiento por corrosión a través de la formación de una fase ternaria estable Al-Mg-Zn [13].

2.1.4 Sistema Al-Mg

El magnesio es el principal elemento de las aleaciones en la serie 5XXX teniendo como máxima solubilidad del 2% e.p. a temperatura ambiente, y 17.4 % e.p. a 450 °C como se muestra en la **Figura 1**[14].

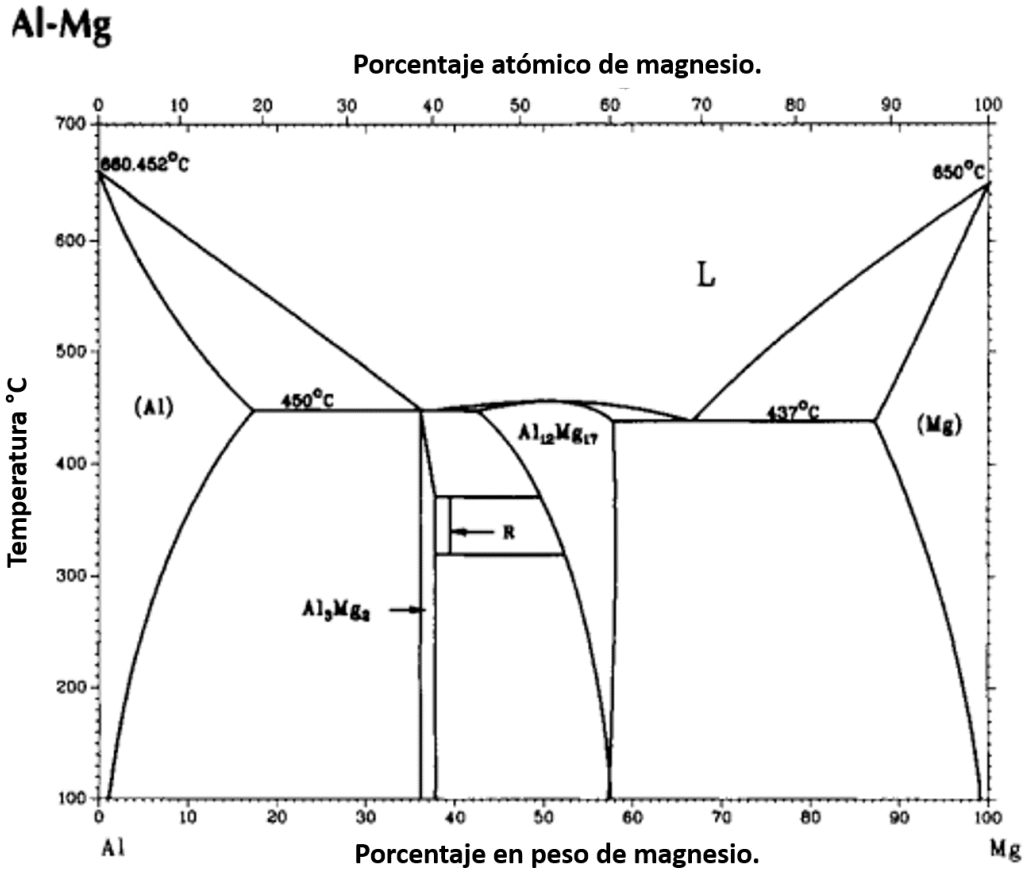

Figura 1 Diagrama de fases del sistema Al-Mg [14]

Estas aleaciones pueden contener diferentes tipos de partículas intermetálicas, las cuales se clasifican en los siguientes tipos [15][16]:

1. **Partículas constituyentes:** (precipitados primarios): ricas en impurezas, insolubles, las cuales se forman durante la solidificación, con un rango de tamaño entre 1-10 micras tales como Al (Fe,Mn)Si, Mg_2Si, y Al_3Mg_2.

2. **Fases eutécticas divorciadas (partículas solubles):** las cuales se forman durante la solidificación como eutécticos divorciados, como lo son Al_3Mg_2 y Mg_2Si. Durante la homogeneización (500-600°C), los precipitados de Al_3Mg_2 pueden ser disueltos, mientras que los precipitados de Mg_2Si son parcialmente disueltos, por lo que usualmente quedan fuera de la solución en aleaciones forjadas.

3. **Dispersoides (Precipitados secundarios):** Precipitados finos que se forman durante las operaciones después del vaciado (homogeneización o recristalización) por precipitación de la matriz. Aparecen en varias formas; planas, redondas, rectangulares o esféricas, con un rango de tamaño < 0.5 micras, como la: Al_6(Fe, Mn). Estas ayudan en el control del tamaño de grano durante la recristalización.[17][18]

Tabla 6 Fases intermetálicas presentes en aleaciones 5XXX

Fase	Otra designación	Red/Estructura	Parámetros de red, Å			c/a α o β
			a	B	c	
Mg_2Si	β	Fcc/Fm3m	6.351	…	…	…
Al_6Mn	…	Ortho/Cmcm	6.498	7.552	8.870	…
Al_3Mg	β	Fcc/Fd3m	28.16	…	…	…
Al_8Fe_2Si	α-FeSi	Hex/$P6_3$/mmc	12.3	…	26.3	…
$Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$	α'-FeSi	BCC/IM3	12.548	…	…	…
$Al_{12}(Fe,Mn)_3Si_3$						
$Al_{12}Mn$	…	Cubic	~7.47	…	…	..
Al_4Mn	…	Hex	28.41	…	12.38	0.436
$Al_{15}Mn_3Si_2$	α-MnSi	Cubic	12.652	…	…	…
$Al_{10}Mn_3Si$	β-MnSi	Hex/$P6_3$/mmc	7.513	…	7.745	1.031
Al_5FeSi	βFeSi	Mono	6.12	6.12	41.48	91°
Al_4FeSi_2	δ-FeSi	Tet	6.16	…	9.49	1.54
$AlCr_2Mg_3$	E	FCCFd3m	14.55			
Al_6CuMg_4	T	BCC	14.31	…	…	…
$Al_{13}Cr_4Si_4$	α	FCC/F43m	10.971	…	…	…
$Al_3(Fe,Mn)$	…	Mono	8.08	…	12.48	107.75°

***La estequiometria de algunas fases puede variar a medida que Cr, Mn y Fe tienden a sustituirse entre ellos.**

2.1.5 Aleación 5052-H32 y sus propiedades y aplicaciones

El empleo de aleaciones de aluminio ha crecido de manera importante en la industria, por ejemplo, en el giro automotriz debido a la necesidad de reducir el peso de sus productos, y, por lo tanto, el consumo de combustible, generando un impacto ambiental positivo, no obstante, la industria que ampliamente utiliza este material es

la industria naval, poniendo especial atención en la aleación de aluminio 5052. Por tal motivo las aleaciones pertenecientes a esta serie también son llamadas aluminio naval o aluminio grado marítimo.

Esta aleación es endurecida por deformación y exhibe una alta resistencia a la corrosión. [1][3]. Algunas de las características más destacables de esta son:

- No es térmicamente tratable.
- Contiene Mg como su principal elemento de aleación.
- Es dura en comparación con otras aleaciones de aluminio, manteniendo esta propiedad aun cuando se enfría a temperaturas extremas, por este motivo, se puede utilizar para aplicaciones criogénicas.
- Resistente a la corrosión en ambientes salinos, por esta razón, puede ser usado para productos marítimos.
- Presenta buen desempeño ante la soldadura y moldeado.

En la **Tabla 7** se presentan algunas de las propiedades mecánicas que reporta la literatura acerca de esta aleación [9].

Tabla 7 Propiedades mecánicas reportadas en la literatura para la aleación 5052-H32.

Aleación	**Resistencia ultima a la tensión**		**Limite elástico**		**Elongación en 50mm(2in), %**	
					1.6mm (1/16in.)	**1.3mm (1/2in.)**
	MPa	**ksi**	**MPa**	**ksi**	**Espesor de la muestra**	**Diámetro de la muestra**
5052-H32	**228**	**33**	**193**	**28**	**12**	**18**

2.2 Proceso de soldadura por Fricción-Agitación (FSW)

El proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) produce uniones por medio del uso de una herramienta rotativa no consumible que consta de un hombro y un pin, esta suaviza localmente la pieza de trabajo a través del calor producido por la fricción y el trabajado plástico, por lo tanto, permite a la herramienta “agitar” las superficies de unión [5]. En la

Figura 2 se observa el diagrama ilustrativo del funcionamiento de

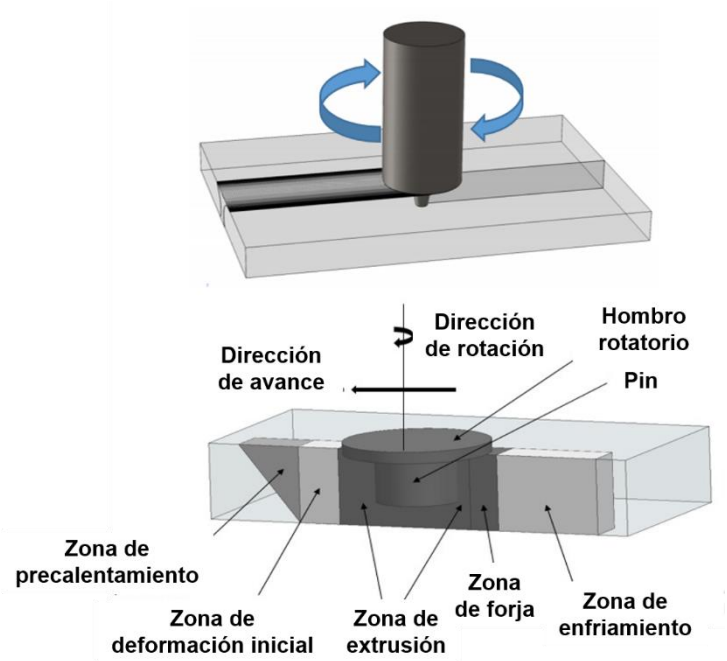

Figura 2 Diagrama del proceso de soldadura por fricción-agitación para una configuración a tope.

mencionado proceso de soldadura.

La generación de calor depende de la fricción y el trabajo plástico producido durante el proceso, ya que debido a que no se alcanzan temperaturas suficientemente altas, no se llega a una fusión completa del material trabajado, por lo cual se evitan diversas dificultades que surgen cuando ocurre un cambio de

estado, incluyendo los cambios que a menudo afectan durante los procesos de soldadura por fusión.

Entre las principales ventajas del proceso de FSW se encuentran: [5].

- Mejorada soldabilidad.
- Reducción en la distorsión.
- Reduce el esfuerzo residual, mejora la resistencia a la fatiga, a la corrosión, y la corrosión por agrietamiento por esfuerzo.
- Apariencia mejorada.
- Eliminación de un material de aporte.
- Mejora la resistencia estática y la ductilidad.
- Proceso mecanizado.
- Pocas variables del proceso

2.2.1 Parámetros del proceso

El proceso de FSW implica una elevada deformación plástica, así como movimientos complejos del material es por eso que tanto los parámetros de soldadura, como la geometría de la herramienta, el diseño de la unión, así como la distribución de la temperatura son aspectos de elevada importancia para el proceso, puesto que ejercen un efecto significativo en el patrón de flujo del material afectando directamente la evolución microestructural del mismo [19][20].Sin embargo, los principales parámetros son: la velocidad de rotación de la herramienta (v, rpm) ya sea en sentido horario o antihorario y la velocidad de desplazamiento de la herramienta (n, mm / min) a lo largo de la línea de unión.

La rotación de la herramienta da como resultado la agitación y la mezcla de material alrededor del pin, así como la traslación de la herramienta, la cual mueve el material plastificado desde la parte frontal hacia la parte posterior del pin [21]. Se ha observado que a mayores velocidades de rotación de la herramienta se genera una mayor temperatura debido al mayor calentamiento por fricción dando como resultado que la agitación y mezclado del material es más intenso. Además de la

velocidad de avance y la de rotación de la herramienta, otro parámetro importante del proceso es el ángulo de inclinación de la herramienta con respecto a la superficie de la pieza, así como la profundidad de inserción del pin en las piezas la cual está asociada con la altura de este. [22]

2.3 Herramienta de FSW

La herramienta de soldadura por fricción agitación es un elemento clave para el éxito del proceso. Como se mencionó anteriormente, la herramienta está compuesta de un hombro redondo giratorio y un pin el cual es el encargado de calentar la pieza de trabajo, principalmente por acción de la fricción, y mezclado de la aleación plastificada alrededor de el dónde después de la solidificación se forma la unión. En la **Figura 3** se puede observar la herramienta de soldadura con sus principales partes características.

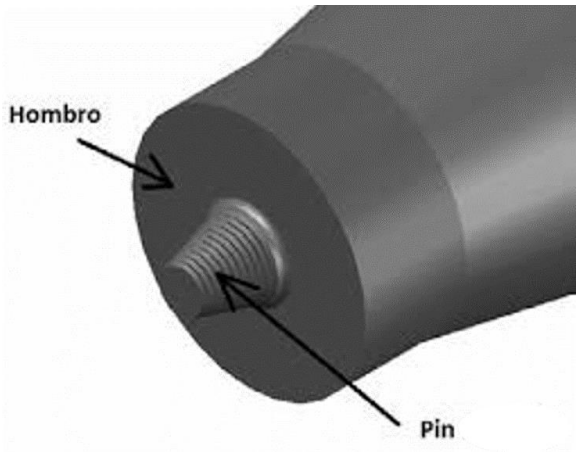

Figura 3 Herramienta de soldadura para FSW [21]

Cabe mencionar que la herramienta utilizada en FSW fue diseñada para estar sujeta a altos esfuerzos y altas temperaturas [21].

Existen diversos tipos de herramientas, entre las que se encuentran aquellas fabricadas a partir de acero, nitruro de boro policristalino, o carburo de tungsteno. La correcta selección de la herramienta, así como del material con el que se

encuentra fabricada aporta parte de la calidad de la unión final, ya que esto influye en la generación y disipación de calor, así como en la microestructura final de la unión. Cabe destacar que los materiales a soldar tales como aleaciones de aluminio, magnesio y compuestos de matriz metálica de aluminio son comúnmente soldados con herramientas de acero, demostrando que parte de lo importante es seleccionar un material de fabricación que tenga una mayor dureza que el material que se va a soldar.

Algunos otros factores que son importantes a considerar para la calidad de la soldadura son el diámetro del hombro, el ángulo de la superficie del hombro, la geometría del pin, incluida su forma y tamaño, así como la naturaleza de las superficies de la herramienta [21].[23]

Entre los distintos tipos de herramientas mayormente empleadas en el proceso FSW se encuentran: de pin fijo, ajustable y de tipo bobina, como se ilustra en la **Figura 4.**

La herramienta de pin fijo corresponde a una sola pieza que comprende tanto el hombro como el pin (**Figura 4a**). Esta herramienta sólo puede soldar una pieza de espesor constante debido a la longitud del pin fijo, si este se desgasta significativamente o se rompe, se debe cambiar toda la herramienta y esa representa una de sus principales desventajas.

La herramienta ajustable consta de dos piezas independientes, es decir, hombro y pin separados, lo que permite el ajuste de la longitud del pin durante el proceso de soldadura [24][25] (**Figura 4b**). En este diseño, el hombro y el pin pueden fabricarse con diferentes materiales y el pin puede ser fácilmente reemplazado cuando se desgasta o se daña. Además, la longitud ajustable del pin puede permitir la soldadura de piezas de trabajo de espesor variable y de calibre múltiple. Tanto las herramientas fijas como las ajustables a menudo requieren un yunque de respaldo.

La herramienta de tipo bobina (**Figura 4c**) también llamada de hombro doble, está compuesta por tres piezas: hombro superior, pin y hombro inferior. [26][27] Esta herramienta puede ajustarse a espesores de calibre múltiple debido a que el pin cuenta con una longitud ajustable entre el hombro inferior y el hombro superior [28][29].

Una de las ventajas de este tipo de dispositivo es que no necesita una pieza de respaldo o sistema de sujeción complejo, sin embargo, la herramienta de tipo bobina sólo puede trabajar perpendicularmente a la superficie de la pieza de trabajo mientras que las herramientas fijas y ajustables pueden inclinarse longitudinal y lateralmente [29].

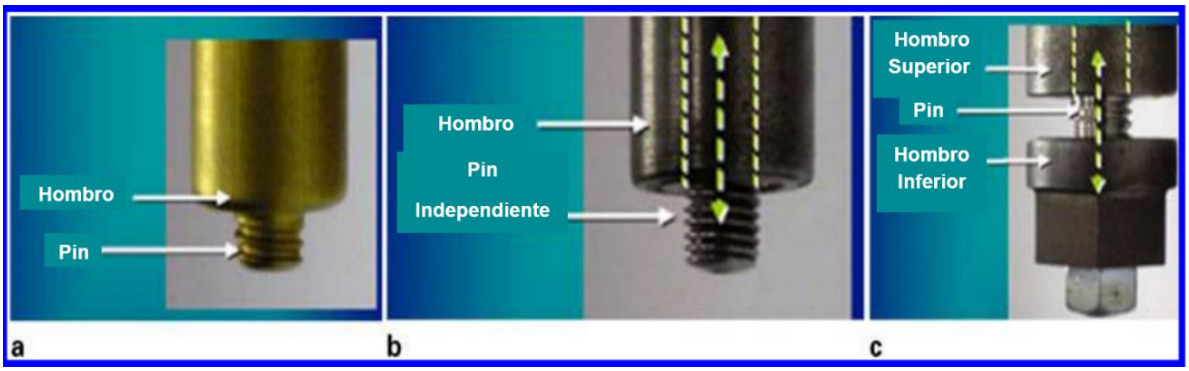

Figura 4 Tipos de herramientas de FSW a) Fija, b) Ajustable, c) Tipo bobina.[29]

2.3.1 Geometría de la herramienta

La geometría de la herramienta es el aspecto más influyente del desarrollo del proceso ya que esta juega un papel crítico en el flujo de material; teniendo dos funciones principales: (a) calentamiento localizado y (b) flujo de material. En la etapa inicial, el calentamiento se debe principalmente a la fricción entre el pin y la pieza de trabajo, en la segunda etapa la herramienta se hunde hasta que el hombro toca la pieza de trabajo donde la fricción entre el hombro y la pieza de trabajo da como resultado el mayor momento de calentamiento.

Debido a que la herramienta está compuesta por dos partes fundamentales se ha optado por estudiarlas de manera separada, esto con el fin de encontrar una combinación de geometrías óptimas tanto del hombro como del pin para soldar el tipo de aleación metálica que se desee; no obstante, se ha observado que para las aleaciones de aluminio generalmente se utiliza hombro cóncavo y pin cilíndrico roscado, sin embargo, la geometría ha ido evolucionando significativamente [20][21].

Por otro lado, algunos estudios han demostrado que la correcta selección de la herramienta dependerá no solamente del material base a soldar, sino también de la configuración de la junta y el espesor de la misma y desde el punto de vista de la generación de calor, el tamaño del pin y del hombro son importantes, debido a que el hombro proporciona confinamiento para el volumen plastificado de metal, mientras que la segunda función de la herramienta es "agitar" y "mover" el material [23].

2.4 Pin de la Herramienta y su función.

Las características del diseño del pin están destinadas para mejorar el flujo del material y facilitar el mezclado con lo cual las propiedades mecánicas del material se ven claramente afectadas [30].

Cabe mencionar que hay dos características que conforman al pin, su geometría y su perfilado; Se le llama geometría a la forma definida que tiene el cuerpo del pin, el cual puede ser cuadrado, triangular, cónico, hexagonal, cilíndrico (**Figura 5)** etc. mientras que el perfilado se refiere a las marcas, huellas o trazos que tiene el mismo, algunos ejemplos son: trivex, triflut, roscado, entre otros. (**Figura 6**) [31].

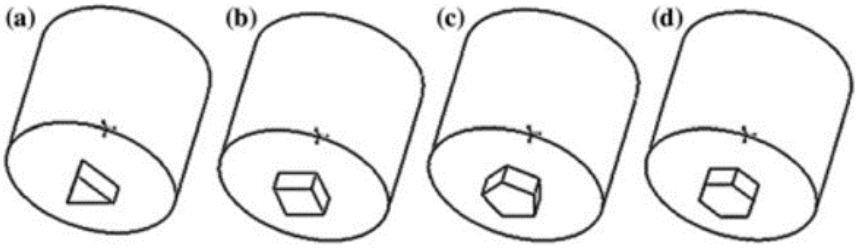

Figura 5 Algunos tipos de geometrías que puede poseer el pin: a) triangular, b) cuadrada, c) pentagonal, d) hexagonal.[31]

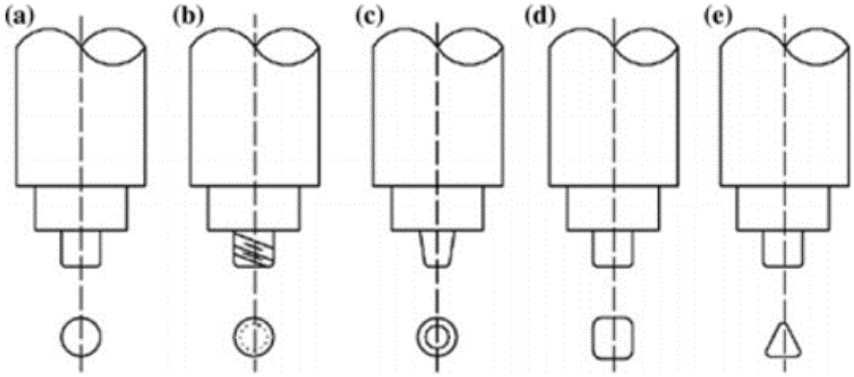

Figura 6 Algunos tipos de perfiles de pin: a) recto, b) roscado, c) cónico, d) perfilado cuadrado, e) perfilado triangular.[31]

El pin está diseñado para interrumpir las superficies de contacto de la pieza de trabajo, cortar el material delante de la herramienta y mover el material detrás de la herramienta, sin embargo, dentro del proceso y hablando específicamente de la función de este, ocurren distintitos fenómenos y es por esto que hay varios estudios enfocados en el pin de la herramienta a partir de los cuales se han implementado tipos y geometrías de pin variados con el fin de optimizar la calidad de las soldaduras no solamente de metales ligeros, sino también de otros metales con mayor dureza como lo son el titanio y el acero, por mencionar algunos.

Algunos científicos encontraron que la herramienta de pin cuadrada produce soldaduras libres de defectos sin importar la velocidad de rotación que se esté utilizando y que al aplicar una velocidad de rotación de 1600 rpm es posible obtener propiedades de tracción superiores en comparación con otras geometrías, mientras que otros investigadores han obtenido mejores resultados con herramientas cónicas roscadas específicamente en las propiedades mecánicas y flujo de material. [31]

Algunas de las geometrías de pin que se han implementado se muestran en la **Figura 7** las cuales muestran diversos resultados en las soldaduras en combinación con la geometría del hombro y con otros parámetros como lo son la velocidad de avance, rotación, fuerza axial, ángulo de inclinación, etc.

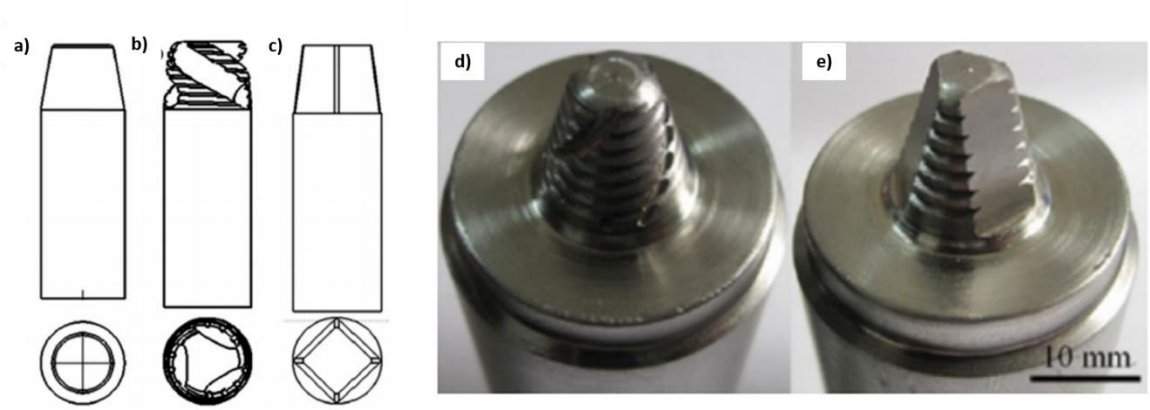

Figura 7 Ejemplos de geometrías que se han implementado actualmente**.**[31]

Como se mencionó anteriormente, dentro del proceso, específicamente en lo que al pin concierne, ocurren fenómenos distintos cuando la herramienta entra en contacto con el material a soldar. El primero de ellos es la adherencia, sin embargo, pocas veces se considera que también existe cierto grado de deslizamiento entre el pin y la pieza de trabajo debido a la reducción de la tensión del flujo de material con el aumento de la temperatura. En una situación de adherencia perfecta, no se produce fricción ya que no se produce ningún movimiento entre las dos superficies en contacto, por lo tanto, el calor se genera sólo por el proceso de agitación del material. El segundo fenómeno es el deslizamiento perfecto, donde existe una

velocidad relativa entre la herramienta y la pieza de trabajo, y por lo tanto el calor se genera también por la fricción. En este caso, el proceso de agitación es menos pronunciado que en el caso de adherencia perfecta. En una situación de deslizamiento perfecto, la velocidad entre la herramienta y la pieza de trabajo es máxima y no existe tensión de cizallamiento interfacial.

Cuando ocurre adherencia perfecta:

- Cuanto mayor es el área del pin, mayor es el calor generado en la pieza y mayor es la fuerza que experimenta la herramienta. Sin embargo, en este caso, el campo de temperatura no es significativamente diferente al variar las formas del pin.
- No se observa ninguna diferencia notable en la tasa de deformación y en las líneas de corriente al variar las formas del pin.
- La forma final de la unión parece ser muy similar para todas las formas de pines consideradas.

Cuando ocurre deslizamiento perfecto:

- Las esquinas y segmentos afilados son la causa de la generación de calor y la deformación del material en la pieza. Prácticamente, no se genera calor usando un pin circular.
- La forma del pin tiene un fuerte efecto sobre la velocidad de deformación y la aerodinámica.
- Los pines circulares y triflut actúan como obstáculos y el flujo de material pasa por encima de ellos. No se puede formar ninguna junta usando pines circulares y triflut. [32]

2.5 Hombro de la herramienta y su función

Un aspecto importante en la selección del hombro de la herramienta a emplear en el proceso de soldadura por FSW es la geometría de la superficie de este. Se ha observado que se utilizan comúnmente tres tipos: superficie plana,

cóncava y convexa, siendo el de superficie plana el más empleado, debido a su simplicidad de fabricación, aunque, por otro lado, este tipo de superficie tiene una gran desventaja principal y es que este diseño no es muy eficaz para atrapar el material metálico que fluye bajo el hombro, lo que conduce a la generación de un exceso de flash.

Para evitar ese problema, se diseñó una superficie cóncava en la superficie del hombro que se ha hecho popular por la capacidad de restringir la extrusión de material a los extremos del hombro evitando así la formación de la discontinuidad antes mencionada [33][34][35]. Este tipo de superficie es fácil de mecanizar, produciendo soldaduras de calidad ya que, durante la inmersión de la herramienta, el material desplazado por el pin se introduce en la concavidad del hombro de la herramienta, sirviendo como volumen de escape o depósito para el material desplazado del pin.

El funcionamiento adecuado de este tipo de hombro también requiere la inclinación de la herramienta, dando lugar a mayores presiones de forja e hidrostáticas, que pueden promover la agitación del material y mejorar la integridad de la zona de agitación [33].

Otra posible forma de la superficie del hombro es un perfil convexo. [36][37] Los primeros intentos que realizó el instituto de la soldadura para fabricación de hombro convexo no tuvieron éxito porque se determinó que este tipo de superficie alejaba el material del pin [38][39]. La principal ventaja una superficie de hombro convexa es que puede entrar en contacto con la pieza de trabajo en cualquier punto de la superficie del extremo convexo y, por lo tanto, acomodar las diferencias de planitud o grosor entre las dos piezas de trabajo adyacentes [37]. En la **Figura 8** que se encuentra a continuación, se muestra de forma gráfica una ejemplificación de algunos de los casos antes mencionados.

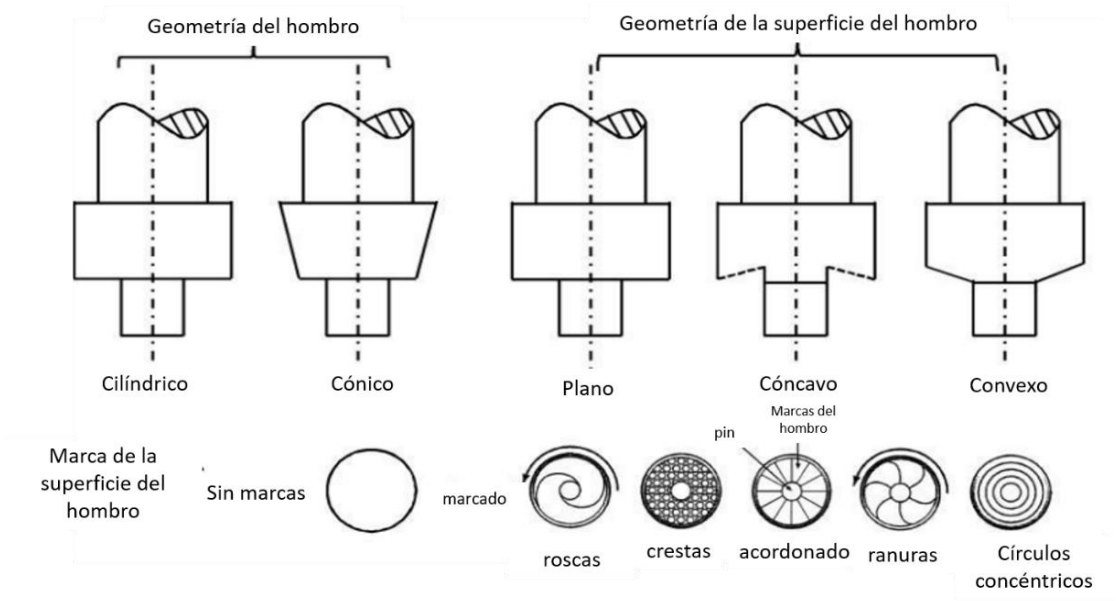

Figura 8 Ejemplos de la geometría del hombro y la geometría de la superficie del hombro de la herramienta.[21]

2.6 Clasificación de las zonas generadas en el proceso FSW

El proceso de FSW, a diferencia de los procesos de la soldadura convencional, carece de una zona de fusión. Sin embargo, tiene cuatro diferentes zonas microestructurales, las cuales son: zona de agitación (ZA), zona termo mecánicamente afectada (ZTMA), zona afectada por el calor (ZAC), y material base (MB), como se muestra en la **Figura 9**

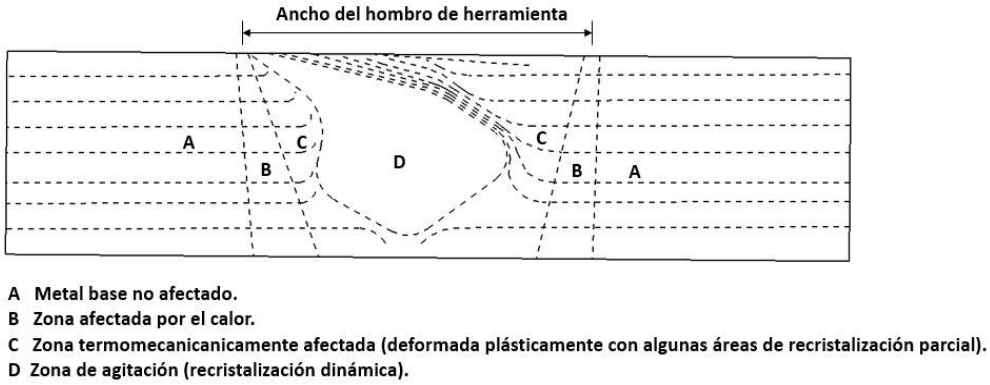

Figura 9 Diagrama de las zonas que se generan en la soldadura FSW [10]

Zona de Agitación (ZA): Se refiere a la región previamente ocupada por el pin de la herramienta, también puede encontrarse con el nombre de zona agitada, en esa zona, se puede encontrar un tamaño de grano muy pequeño, como resultado de los altos esfuerzos que ocurren derivados de plastificación, provocando una recristalización dinámica [19].

Zona Termo mecánicamente Afectada (ZTMA): Es una región trapezoidal cuyas bases son el diámetro del hombro y el diámetro del pin, incluidas las regiones C y D, en esta zona existen granos plásticamente deformados o parcialmente recristalizados como efecto secundario de la acción de agitación experimentada en combinación con las altas temperaturas. dentro de la zona ZTMA/ZA, **Figura 9** [19], en esta zona, una fracción de la deformación plástica se almacena en forma del aumento de la densidad de los defectos, la deformación no solo aumenta la densidad de las dislocaciones, sino también la superficie y borde de grano por unidad de volumen y al cortar los precipitados estos pueden forzarse a disolverse [40]–[45]

Zona afectada por el calor (ZAC): Es aquella zona típicamente estrecha que se encuentra después de la ZTMA, en la cual no hubo deformaciones plásticas, pero sí una variación de temperaturas que pueden afectar a la microestructura, en esta zona solo se experimenta una disminución del campo térmico hasta alcanzar, la zona no afectada o material base. [46]

Material Base (MB): también llamada zona no afectada, es aquella donde no ocurrió ningún cambio derivado del proceso de FSW, por lo tanto, ahí prevalecen las propiedades originales del material.

Además, debido a que la rotación de la herramienta tiene distinta dirección de rotación en cuanto avanza en la soldadura, su morfología de la soldadura aparece asimétrica entre el lado de avance (AS) hasta el lado de retroceso (RS) **Figura 10**[10].

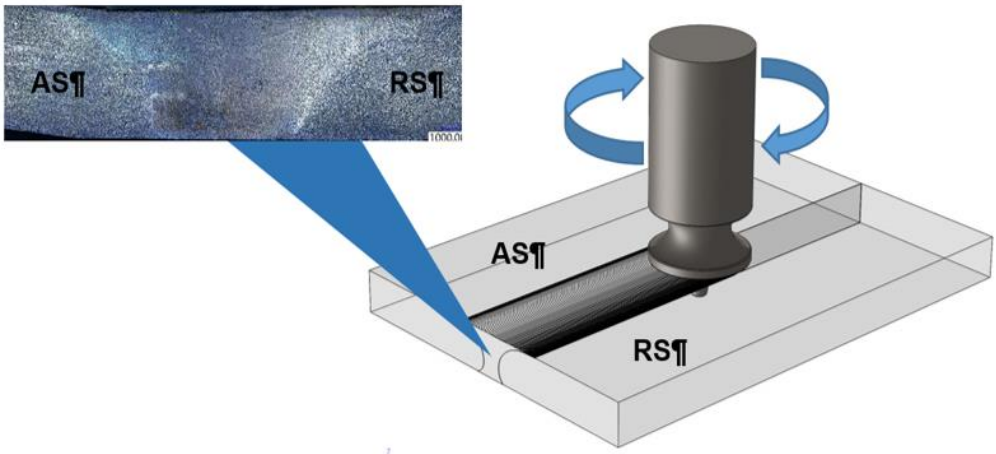

Figura 10 Direcciones de rotación de la herramienta y morfología asimétrica de la soldadura obtenida.

2.7 Generación de calor en el proceso de FSW

La generación y transferencia de calor se convirtió en un tema de investigación relacionado con el proceso FSW, sin embargo, para la comprensión de la transformación de fases que se producen durante la soldadura es necesario comprender varios procesos físicos, que distintos autores han clasificado de maneras diferentes, como Mishra y Colligan , quienes en el año 2008, dividieron el proceso FSW en dos componentes: generación de calor y flujo de material, esto con el objetivo de poder explicar ciertos fenómenos que ocurren así como las variables directas e indirectas que influyen en el proceso.

Para una mejor explicación, en la **Figura 11** se muestra un diagrama realizado por estos autores, el cual ayuda a deducir el efecto de las variables independientes sobre las dependientes dentro del proceso, gracias a esto, es posible realizar deducciones sencillas con respecto a diferentes variables; un ejemplo es el siguiente: al aumentar el diámetro del hombro de la herramienta, se tendrá un incremento de temperatura y un impacto en la distribución de la misma, siempre y cuando se mantengan constantes el resto de las variables y del mismo modo, habrá un impacto en las variables dependientes torque y potencia de entrada.

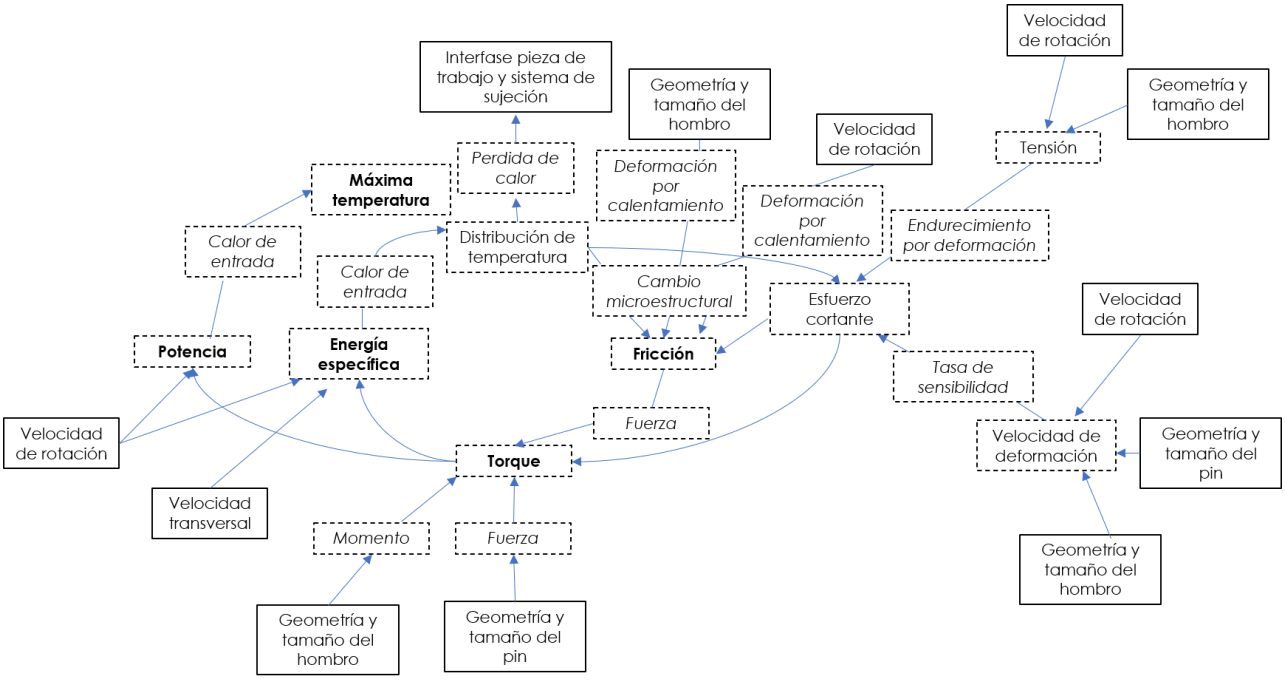

Figura 11 Diagrama de las principales variables del proceso (dependientes e independientes) que deforman y afectan el flujo de material y la distribución de la temperatura del proceso FSW [47]

Por otro lado, Nandan et al. (2008) clasificaron la generación de calor en los siguientes procesos:

1. Cuando ocurre el flujo del material alrededor de la herramienta de soldadura.

2. Cuando ocurre la presión de contacto que causa la herramienta.
3. El coeficiente de fricción del material de la herramienta.
4. El cambio de las propiedades termo mecánicas y el coeficiente de transferencia de calor entre las piezas.

Sin embargo debaten que los actuales modelos de simulación existentes de proceso de FSW para determinar la generación de calor son complejos, llevan mucho tiempo y no pueden ser utilizados en tiempo real, además, todos ellos adolecen de falta de fiabilidad de los resultados previstos porque la física que este proceso implica es muy compleja y dichos modelos actuales no están diseñados para garantizar enteramente el cumplimiento de los resultados experimentales, lo que puede deberse en gran medida, a la incertidumbre de varios parámetros de entrada. Estos parámetros inciertos incluyen:

- El coeficiente de fricción
- El grado de deslizamiento entre la herramienta y la pieza de trabajo
- EL coeficiente de transferencia de calor en varias superficies de la pieza de trabajo.
- La distribución de calor entre la pieza de trabajo y la herramienta en la interfaz herramienta/pieza de trabajo.
- Así como los valores calculados de la viscosidad basados en los modelos que se encuentran disponibles.

Por lo cual, los modelos actuales de FSW no tienen ningún mecanismo incorporado para abordar estas incertidumbres.

Del mismo modo, estos autores mencionan que puede haber una manera de resolver este problema combinando un modelo de simulación del proceso que sea riguroso con un esquema de optimización multivariable apropiado para poder determinar valores optimizados de las variables inciertas por medio de una cantidad limitada de datos experimentales. Ese método daría lugar a resultados experimentales con un mayor grado de fiabilidad.[48]

Mientras que Mijajlović, en su tesis doctoral (2012) menciona dos fuentes de calor principales en el proceso FSW, una de ellas ocurre cuando la energía mecánica se transforma en calor, esto cuando la herramienta y el material a unir se ponen en contacto. La otra fuente de calor se origina cuando el material se deforma alrededor del pin de la herramienta durante la soldadura. Se puede deducir entonces, que la manera en que interactúan los parámetros del proceso, tiene influencia directa en la cantidad de calor por fricción que se genera, por lo cual, el aumento de la temperatura, va de la mano con el aumento de la velocidad de rotación, fuerza axial y la disminución de la velocidad de desplazamiento, debido a que la magnitud de la fricción es mayor. [49]

Los autores Schmidt y Hattel, (2005) propusieron una ecuación general para la generación de calor total en el proceso de fricción agitación

$$Qtotal = \delta de\ contacto + (1-\delta)\ Qdeslizamiento$$
$$= \frac{2}{3}\pi\omega\ [\delta\tau\ rendimiento + (1-\delta)\mu\rho]X[(R^3\ hombro$$
$$+ R^3\ pin)(1-\tan a) +\ R^3 pin + 3R^3\ pinH$$

Ecuación 1 ecuación general para la generacion de calor total [50]

Siendo δ la tasa de deslizamiento adimensional entre la herramienta y la pieza de trabajo tomando como valor 1 para contacto de adherencia y 0 para contacto de deslizamiento, cabe mencionar que cada superficie geométrica de la herramienta posee una ecuación generadora de calor.

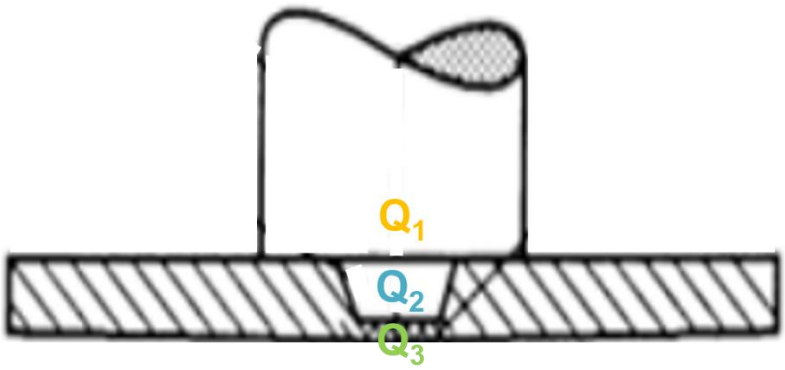

Figura 12 Diagrama de las superficies geométricas existentes en la herramienta.

Donde:

Q_1 Generación de calor por el hombro de la herramienta.

Q_2 Generación de calor por el pin de la herramienta.

Q_3 Generación de calor por la punta del pin de la herramienta.

A partir de esto, se deduce una fórmula general para la generación de calor en las diferentes zonas de la interfase herramienta-pieza que es la siguiente:

$$dQ = \omega \cdot r \cdot dF$$

Ecuación 2 Fórmula general para la generación de calor en las diferentes zonas de la interfase

Por lo tanto, por medio de las ecuaciones 1 y 2, se deduce que la generación de calor en el proceso de FSW surge principalmente a partir de dos fuentes, (a) la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo y (b) el calor generado durante la deformación plástica en la pieza de trabajo.

2.8 Flujo de material y transferencia de calor en el proceso de FSW

Como se mencionó anteriormente, la geometría de la herramienta es la encargada del movimiento y flujo del material plastificado alrededor del pin, así como por el movimiento lineal y de la rotación del mismo [20][21]. Parte del calor generado en la interfaz hombro/pieza de trabajo se transporta al material de la herramienta, mientras el resto entra en la pieza de trabajo y del mismo modo se disipa proporcionalmente entre ellos [51].

CAPÍTULO 3 ESTADO DEL ARTE

Varios han sido los estudios acerca de la influencia de los parámetros del proceso en la calidad de la unión de la soldadura, un aspecto importante a considerar es la geometría de la herramienta y el material con el cual está fabricada, cabe mencionar, que debido a que la herramienta está compuesta por dos partes (pin y hombro) los investigadores se han encargado de estudiarlas por separado, tal es el caso de algunos autores como Buffa et al. (2005) quienes han estudiado diferentes aspectos en los cuales la geometría del pin de la herramienta podría afectar de manera positiva o negativa las uniones,.

Dichos autores, en su trabajo titulado “Design of the Friction Stir Welding tool using the continum based FEM model” realizaron el proceso de soldadura por fricción agitación utilizando herramientas con geometrías variadas (cilíndrica y cónica) la velocidad de avance fue modelada numéricamente, y se realizó un análisis MEF en 3D acoplado termo mecánicamente, capaz de predecir las variables del proceso, así como el patrón de flujo de material y el tamaño de grano en las uniones soldadas. Los resultados obtenidos permitieron encontrar la geometría óptima del pin de la herramienta y velocidad de avance para mejorar la integridad de la zona de agitación de las aleaciones de aluminio.[52]

Mientras que Aissini et al. (2010) en su trabajo denominado Design and Optimization of Friction Stir Welding Tool, seleccionaron una herramienta adecuada para el proceso de FSW en aleaciones de aluminio con el propósito de obtener un excelente aspecto de la soldadura sin huecos, grietas o distorsiones incluyendo un sistema de seguridad destinado a evitar daños prematuros en la herramienta, y

permitir medir la presión aplicada, los autores probaron la herramienta mejorada en láminas de aleación de aluminio AA2024-T4 y AA7075-T6. La calidad de la soldadura fue evaluada mediante un análisis de microestructura y mediciones de microdureza.[53]

Más adelante, Biswas et al. (2011) en la investigación titulada “Friction stir welding of aluminum alloy with varying tool geometry and process parameters” establecieron dos objetivos: en primer lugar, estudiar el efecto de la geometría del pin de la herramienta, y, en segundo lugar, el efecto de la rotación de la herramienta y de las velocidades de soldadura sobre las propiedades mecánicas de las uniones soldadas por fricción realizadas para aleaciones de aluminio de grado comercial. Los resultados obtenidos de los experimentos realizados mostraron que las herramientas con pines cónicos crearon propiedades mecánicas superiores para las juntas soldadas por fricción. También se encontró que la respuesta mecánica global dependía de la relación entre la velocidad de rotación de la herramienta y su velocidad de desplazamiento.[54]

Por otro lado, Suresha et. al. (2011) hicieron un estudio en el cual tuvieron por objetivo identificar el parámetro influyente más importante y la contribución porcentual de cada parámetro sobre la resistencia a la tracción de las uniones de aluminio AA 7075-T6 soldadas por fricción mediante la realización de un número mínimo de experimentos utilizando un diseño experimental. Conocido como método de Taguchi, El cual fue empleado para la predicción de las propiedades de tracción y la optimización logrando eliminar la necesidad de realizar experimentos sobre la base del método convencional a prueba y error.

Se utilizaron dos tipos de pin, cuadrado y cónico **Figura 13** empleando una relación señal-ruido y un análisis de varianza para encontrar la contribución de los principales parámetros de soldadura como la velocidad de rotación de la herramienta, la velocidad de desplazamiento de la soldadura y la profundidad de penetración en la resistencia a la tracción de la unión soldada

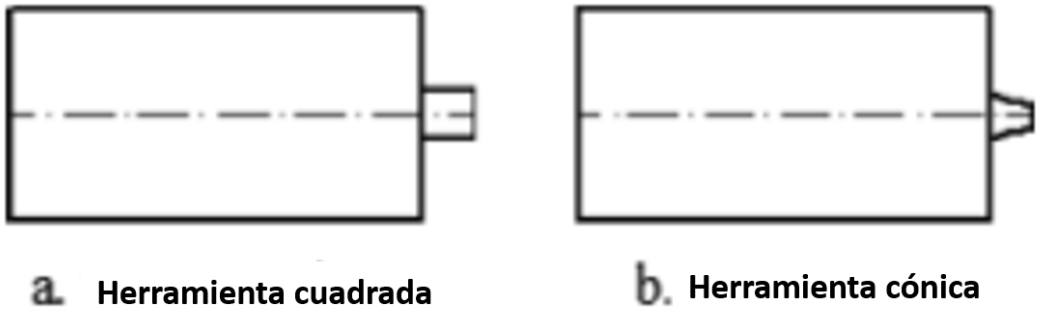

Figura 13 Diagrama que muestra las geometrías de pin utilizadas por Suresha et. al. (2011) [55]

Observando que, en al emplear ambos pines, la velocidad de rotación de la herramienta muestra mayor influencia sobre la resistencia a la tracción que la velocidad de desplazamiento de la soldadura y la profundidad de penetración. Al igual que Biswas et. al, (2011), encontraron que la herramienta que tiene pin cónico presenta resultados con una mejor eficiencia de unión que la herramienta con pin cuadrado.

En la **Tabla 8**, se muestran los resultados obtenidos de este estudio

Tabla 8 Eficacia de la resistencia a la tracción y relación S/N de herramienta cónica y herramienta cuadrada.[55]

Sl No.	**Velocidad de herramienta longitudinal**			**Herramienta cónica**			**Herramienta cuadrada**		
		Velocidad de herramienta transversal	Profundidad de penetración	Fuerza de tensión	Eficiencia conjunta	Relación S/N	Fuerza de tensión	Eficiencia conjunta	Relación S/N
1	900	40	4.93	289.00	55.15	49.22	290.10	55.36	46.05
2	900	50	4.96	265.00	50.57	48.46	289.40	55.22	39.02
3	900	63	4.99	275.60	52.60	48.81	225.63	43.65	47.05
4	1120	40	4.96	220.20	42.02	46.86	311.40	59.42	49.86
5	1120	50	4.99	226.00	43.12	47.08	279.30	53.30	45.07
6	1120	63	4.93		39.46	46.31	289.10	55.17	45.53
7	1400	40	4.99		46.62	47.76	239.24	45.65	31.87
8	1400	50	4.93		44.42	47.34	245.50	46.85	41.25
9	1400	63	4.96	213.60	40.76	46.59	241.95	46.17	47.67

Loureiro et al. (2014) desarrollaron varias geometrías de herramientas, analizando su efecto sobre la morfología de la soldadura por fricción agitación en aleaciones de aluminio AA6082-T651 y AA5083-H11, el flujo de material, la microestructura y la dureza de las regiones procesadas. También examinaron su efecto sobre la resistencia a la fatiga de las soldaduras para las herramientas más prometedoras. Se determinó que la calidad de las regiones procesadas está muy influenciada por la geometría de la herramienta, y que las herramientas con hombro de borde cóncavo y redondeado y pin roscado cilíndrico permiten mejorar la resistencia a la fatiga de las soldaduras en ambas aleaciones.[56]

Posteriormente, Dialami et.al. (2016) mencionan que la geometría del pin es una consideración fundamental en la soldadura por fricción (FSW) ya que influye en el comportamiento térmico, el flujo de material y las fuerzas involucradas durante la soldadura lo cual se refleja en la calidad de la unión. El objetivo de este trabajo se enfocó en estudiar el efecto de la geometría del pin en la soldabilidad, las fuerzas y el torque en el estado periódico de FSW, teniendo en cuenta la fricción en los casos límite (adherencia y deslizamiento perfectos), para lograrlo, se estudiaron cuatro pines de herramientas con perfiles circulares, triflut, trivex y triangulares como se muestra en la Figura 14**,** adoptando un modelo validado del proceso de FSW desarrollado por los autores, este modelo se denomina modelo constitutivo de Norton-Hoff el cual se adopta para caracterizar el comportamiento del material durante la soldadura.

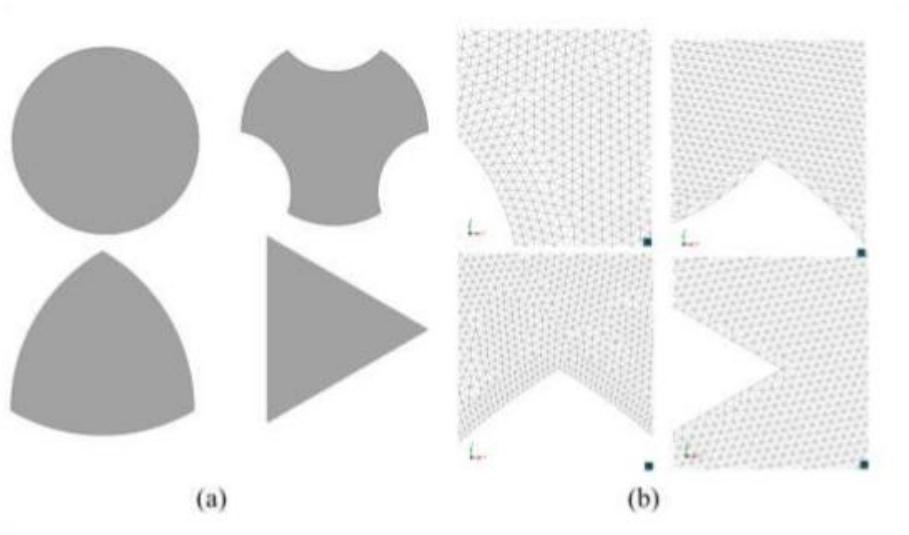

Figura 14 a) Geometrías de pin empleadas por Dialami et. al. (2016) (De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: circular, triflut, trivex y triangular) b) Mallas EF cerca del pin. [32]

Se analizó el efecto de la geometría de la herramienta giratoria en el comportamiento del flujo y los resultados del proceso. Además, se calcularon numéricamente y se compararon las fuerzas longitudinales transversales, así como el torque para las diferentes formas de pines. El estudio se lleva a cabo para los casos de fricción que limitan el deslizamiento y la adherencia entre el pin y la pieza de trabajo. En la **Figura 15** y la **Figura 16** se observa y explica lo obtenido en el presente trabajo, mientras que en la **Tabla 9** se muestran las fuerzas absolutas obtenidas para cada geometría del pin.

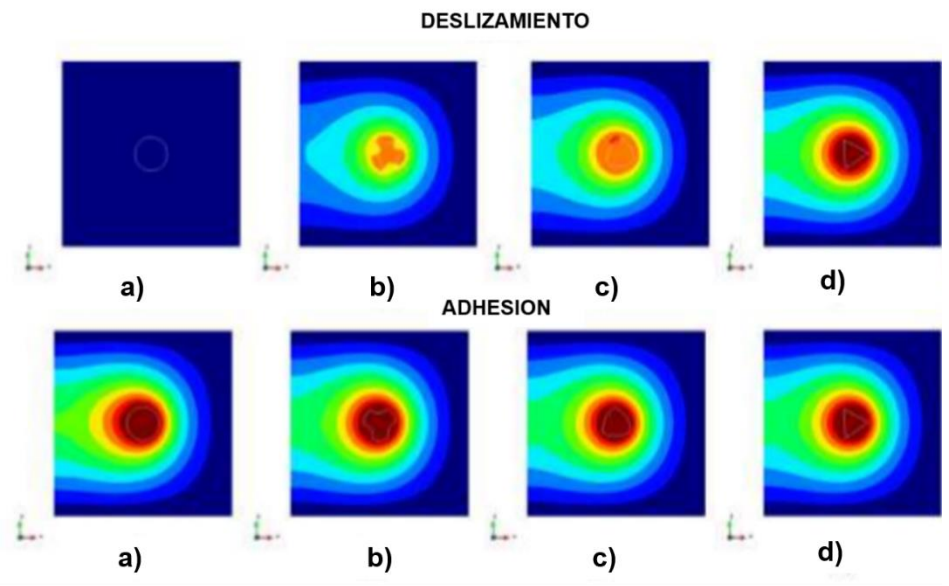

Figura 15 Contornos de temperatura en estado periódico de los pines a) circular, b) triflut, c) trivex, y d) triangular.[32]

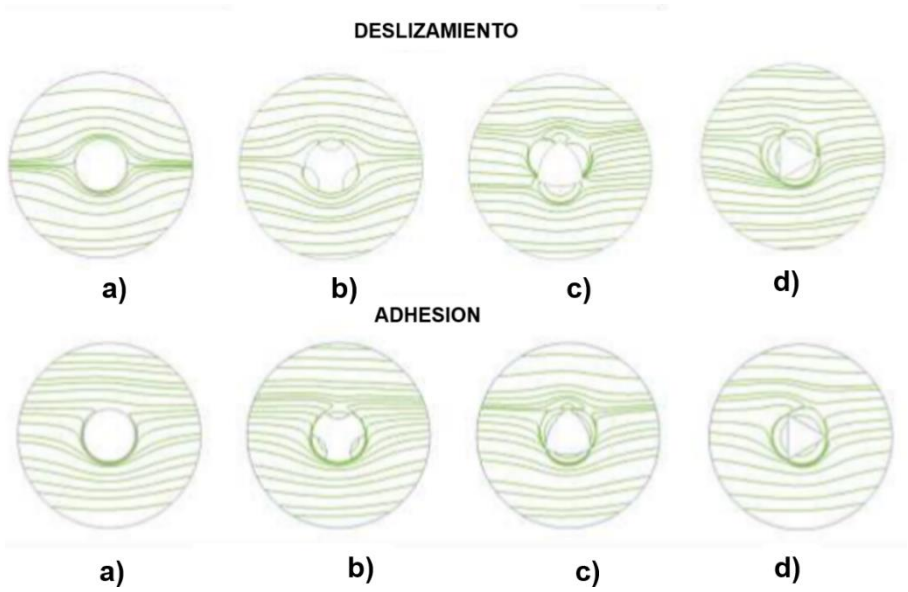

Figura 16 Líneas de corriente alrededor del pin.[32]

Tabla 9 Fuerzas absolutas obtenidas para cada geometría del pin.

	Circular		**Triflut**		**Trivex**		**Triangular**	
	Deslizam.	Adhes.	Deslizam.	Adhes.	Deslizam.	Adhes.	Deslizam.	Adhes.
Fuerza Longitudinal (N)	16101	4667	8725	4447	970	3934	3067	3512
Fuerza Transversal (N)	0.19	45.5	70.9	24.4	29.4	47.9	54.7	17.4
Torque (N, m)	0.0	26.9	22.7	26.7	22.6	26.1	26.2	25.5

En el año 2017, Kumar et.al., estudiaron la influencia de la geometría de la herramienta en el flujo de material durante la soldadura por fricción en dos aleaciones de aluminio diferentes. Para el proceso se utilizaron varios tipos de geometrías de herramientas las cuales fueron fabricadas de acero grado herramienta, H13. Diseñaron un sistema con termopares para medir las temperaturas en diferentes puntos (A, B, C, D y E) **Tabla 10**. y posteriormente se estudió la correlación entre la distribución de la temperatura y el patrón de flujo de material resultante mediante el análisis de las propiedades microestructurales de las distintas ubicaciones utilizando tanto el microscopio óptico como el microscopio electrónico de barrido (MEB) para finalmente registrar los valores de resistencia a la tracción y la microdureza para los distintos parámetros del proceso.

El análisis de la microestructura dio como resultado bandas laminares distintas y varios grados de entrecruzamiento que se correlacionaron con diferentes geometrías de herramientas. Se realizaron ensayos de tracción según las normas de la ASTM y se observa un aumento de la resistencia a la tracción con el aumento del número de bordes de la herramienta.

Tabla 10 Temperaturas (°C) registradas utilizando termopares en diferentes puntos para diferentes pines de herramienta.[57]

P. No.	Geometría de la herramienta	A	B	C	D	E
1	Triangulo	68	124	220	246	280
2	Cuadrado	97	146	272	282	296
3	Pentágono	98	210	320	328	364
4	Hexágono	112	226	420	436	454

Las soldaduras obtenidas por el proceso de soldadura por fricción con agitación utilizando diferentes perfiles de herramientas en forma de triángulo, cuadrado, pentágono y hexágono se someten a pruebas mecánicas y microestructurales para corroborar las historias térmicas. Para ello se realizan ensayos de tracción en las probetas según las normas ASTM, pruebas de dureza, de donde se obtienen los siguientes resultados **Tabla 11**

Tabla 11 Resistencia a la tracción y resultados de la prueba de dureza de muestras FSW obtenidas con diferentes pines de herramienta.[57]

S. No.	Geometría de la herramienta	Resistencia a la tracción	Brinell HB	
			AS	RS
1	Triangulo	67.6	81	82
2	Cuadrado	82.4	86	85
3	Pentágono	91.2	91	92
4	Hexágono	102.4	100	98

El microscopio electrónico de barrido fue empleado para inspeccionar las superficies de la fractura, lo que sugiere una baja resistencia mecánica y que el fallo a través de la zona de agitación se debe a una inadecuada mezcla de materiales. Los resultados obtenidos dieron a conocer que la herramienta hexagonal generó una rango de temperaturas mayor que el que generó la herramienta triangular, por lo cual se observó que a medida que aumenta el número de lados del pin de la herramienta hay más calor por fricción, lo que da lugar a un aumento de las temperaturas máxima y mínima y del rango en los registros térmicos y del mismo

modo, los resultados de los ensayos de tracción y de dureza mostraron tener correlación con las distribuciones de temperatura.

La distribución de temperaturas en el caso de la herramienta hexagonal, que mostró temperaturas medias elevadas, reveló que utilizando esa herramienta se generó un calor de fricción adecuado dando lugar a un flujo de material consistente y permitiendo una mezcla adecuada de los materiales de soldadura, dando como resultado la formación de una buena unión con buenas propiedades mecánicas, de donde se puede concluir que la geometría del pin de la herramienta es un parámetro importante del proceso y su diseño desempeña un papel importante en la decisión del patrón de flujo de material en el proceso de soldadura por fricción.

Particularmente en este estudio, los autores obtuvieron que la herramienta hexagonal mostró buenos resultados en comparación con otras geometrías de pin manteniendo constantes otros parámetros del proceso.

Recientemente, F.J. Liu et, al. (2019) investigaron la influencia de la geometría del hombro y la distancia de sujeción en la formación de la unión, la evolución de la microestructura y las propiedades mecánicas de una unión FSW Al6061-T6 de placas muy delgadas (0,8 mm de espesor).

Para este estudio se utilizó la herramienta con un hombro de 6 mm de diámetro y un pin cónico de 2 mm y 3 mm de diámetro en la parte superior y en la raíz respectivamente, y de 0,65 mm de longitud. Se utilizaron tres geometrías diferentes del hombro (hombro cóncavo de tres hélices, hombro cóncavo, y hombro plano de tres hélices) **Figura 17**.Se estudiaron velocidades convencionales (2000 rpm and 300 mm/min) y altas velocidades (8000 rpm and 1500 mm/min).

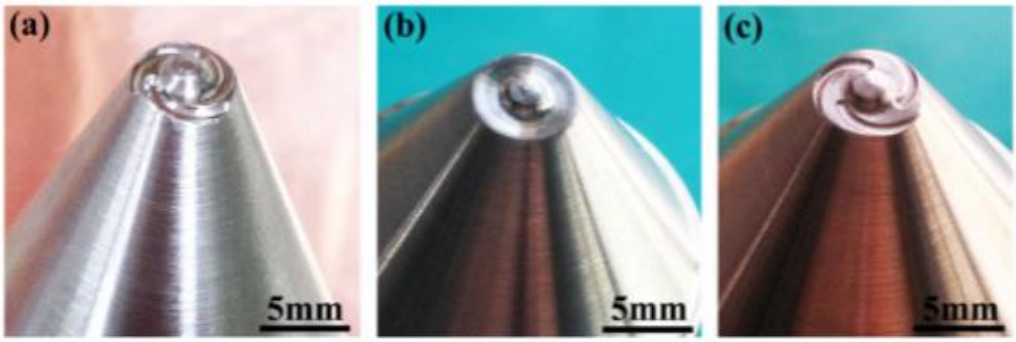

Figura 17 Geometrías del hombro utilizadas a) hombro cóncavo de tres hélices, b) hombro cóncavo, y c) hombro plano de tres hélices [58].

La formación de la unión, la evolución de la estructura de los granos, la distribución de los precipitados y las propiedades de tracción de la junta se vieron afectadas por la geometría del hombro y también por la distancia de sujeción, sin embargo, lograron obtener soldaduras sanas a velocidades convencionales utilizando la herramienta con hombro cóncavo de tres hélices.

Por otro lado, las distribuciones de microdureza se vieron afectadas principalmente por los parámetros del proceso mientras que la geometría del hombro y la distancia de sujeción, no mostraron efectos sustanciales, especialmente cuando el proceso se llevó a cabo a alta velocidad. Los autores concluyen que la combinación de la herramienta de hombro cóncavo de tres hélices y una pequeña distancia de sujeción era el camino óptimo para producir excelentes propiedades mecánicas en una junta FSW a alta velocidad.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS Y DISCUSION DE LA BIBLIOGRAFÍA

Este capítulo tiene como objetivo condensar la información realizada anteriormente para facilitar el análisis de influencia de la geometría de la herramienta de FSW en uniones de aleaciones de aluminio y poder seleccionar una adecuada geometría para investigaciones posteriores, específicamente para la aleación 5052-H32, logrando así proporcionar información certera acerca de los cambios que se producen en las uniones soldadas por el proceso de soldadura por fricción agitación, en las propiedades microestructurales y mecánicas de las mismas.

Como se ha visto en el capítulo introductorio de este trabajo, las aleaciones de aluminio son metales ligeros con excelentes propiedades de resistencia a la corrosión, baja densidad, y buena resistencia entre otras ventajas, lo que los hace candidatos ideales para las aplicaciones estructurales que la industria requiere.

Sin embargo, las aleaciones de aluminio no son fáciles de soldar por medio de los procesos convencionales de soldadura por fusión, de manera que los

procesos de unión en estado sólido, como el proceso FSW resultan adecuados para mantener las características más importantes de este material.

Es necesario destacar que es escasa la información existente sobre la influencia de la geometría de la herramienta, tanto hombro como pin, en la calidad de las uniones, específicamente en las aleaciones de la serie 5000.

En la bibliografía anteriormente estudiada se identifica que en definitiva, la selección de una adecuada geometría de la herramienta, tendrá un impacto directo en la calidad de las uniones, ya que entre mayor sea el contacto herramienta-pieza, la generación de calor será mayor, sin embargo, la herramienta de soldadura, al ser un dispositivo formado por dos componentes (hombro y pin) los investigadores han optado por estudiarlos por separado debido a que en cada uno de ellos ocurren fenómenos distintos y actúan esfuerzos distintos.

Se observa que principalmente está la geometría del hombro, la cual es primordial para lograr una apropiada distribución del metal plastificado a lo largo del cordón de soldadura, y por el otro lado se encuentra el pin, en donde ocurre la plastificación, y mezcla del metal a soldar.

La literatura también reporta los grandes esfuerzos que se generan por efecto de la fricción y las altas temperaturas que se producen en la superficie del material, promoviendo que ocurra una recristalización dinámica, que deriva en un refinamiento de grano y, por ende, un cambio en las propiedades mecánicas.

La investigación de estos fenómenos y características ocurridas durante el proceso, ayudan a mejorar el entendimiento de la evolución microestructural y mecánica de la soldadura de las aleaciones de aluminio, y poder seleccionar adecuadamente una geometría de herramienta específica para trabajos futuros.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos establecidos al inicio de esta monografía se puede concluir lo siguiente:

- En la bibliografía consultada, así como en el estado del arte, se encontró que para mejorar la eficiencia de las uniones y por consecuente la integridad de la zona de agitación de las aleaciones de aluminio se tiene que encontrar una adecuada combinación entre los parámetros de soldadura (velocidad de avance y de rotación) y la geometría de la herramienta de soldadura.
- Debido a que la herramienta está conformada por la geometría del hombro, la superficie del hombro, del pin y la geometría del pin, cada uno de estos influye de manera individual y específica en las propiedades mecánicas y microestructurales resultantes de la soldadura.
- A su vez se concluye que las herramientas con hombros cilíndricos de superficie cóncava con hélices o crestas, demuestran ser útiles para obtener uniones con buenas propiedades mecánicas con respecto a otras geometrías debido a que la concavidad del hombro le brinda al material un buen acomodo en el cordón de soldadura evitando la expulsión de material y por ende evitando defectos internos.
- Del mismo modo las herramientas con pines de geometría cónica con perfil roscado presentan un mejor desempeño con respecto a otras combinaciones de perfiles y geometrías, esto debido a que, a mayores áreas de contacto, se obtiene mayor fricción, generando un incremento en la temperatura que es esencial para plastificar el material.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Y. J. Kwon, S. B. Shim, and D. H. Park, “Friction stir welding of 5052 aluminum alloy plates,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.*, vol. 19, no. SUPPL. 1, pp. s23–s27, 2009.

[2] W. S. Miller *et al.*, “Recent development in aluminium alloys for the automotive industry,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 280, no. 1, pp. 37–49, 2000.

[3] S. Shanavas and J. E. R. Dhas, “Quality Prediction of Friction Stir Weld Joints on Aa 5052 H32 Aluminium Alloy Using Fuzzy Logic Technique,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 12124–12132, 2018.

[4] S. R. Sekhar, V. Chittaranjandas, D. Govardhan, and R. Karthikeyan, “Effect of tool rotational speed on friction stir spot welded AA5052-H38 aluminum alloy,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 5536–5543, 2018.

[5] D. Lohwasser and Z. Chen, *Friction Stir Welding from basics to applications*. Cambridge: Woodhead publishing in materials, 2010.

[6] G. E. Totten and D. S. Mackenzie, *Handbook of Aluminium*. New York: MARCEL DEKKER, INC, 2003.

[7] A. I. H. Committee, “Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-purpose Materials,” *ASM Int.*, vol. 2, pp. 1143–1144, 1992.

[8] J. G. Kaufman, *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. 2000.

[9] J. R. Davis and A. I. H. C. J.R. Davis & Associates, Eds., *ASM specialty handbook. Aluminum and Aluminum Alloys.*, Ilustrada. ASM International, 1993.

[10] M. Atallah, *Friction stir welding of Aluminium Alloys*. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011.

[11] J. E. Hatch, *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. Ohio: ASM

International, 1984.

[12] L. F. Barlock and J. G. Mondolfo, “Sturcture of some Aluminum-Iron-Magnesium-Manganese-Silicon Alloys.,” *Zeitschrift für Met.*, vol. 66, pp. 605–611, 1975.

[13] M. C. Carroll, P. I. Gouma, M. J. Mills, G. S. Daehn, and B. R. Dunbar, “Effects of Zn additions on the grain boundary precipitation and corrosion of Al-5083,” *Scr. Mater.*, vol. 42, no. 4, pp. 335–340, 2000.

[14] L. F. Mondolfo, *Aluminum Alloys: Structure and properties.* Butterworth-Heinemann, 1976.

[15] E. Anselmino, A. Miroux, and S. Van Der Zwaag, “Dispersoid quantification and size distribution in hot and cold processed AA3103,” *Mater. Charact.*, vol. 52, no. 4–5, pp. 289–300, 2004.

[16] I. Polmear, D. StJohn, J.-F. Nie, and M. Qian, *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*, 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2017.

[17] W. B. Pearson, *A Handbook of Lattice Spacings and Structures of Metals and Alloys: International Series of Monographs on Metal Physics and Physical Metallurgy*, Revisada. Elsevier, 2013.

[18] D. T. L. Alexander and A. L. Greer, “Solid-state intermetallic phase tranformations in 3XXX aluminium alloys,” *Acta Mater.*, vol. 50, no. 10, pp. 2571–2583, 2002.

[19] H. G. Salem, “Friction stir weld evolution of dynamically recrystallized AA 2095 weldments,” *Scr. Mater.*, vol. 49, no. 11, pp. 1103–1110, 2003.

[20] W. M. Thomas and E. D. Nicholas, “Friction stir welding for the transportation industries,” *Mater. Des.*, vol. 18, no. 4–6, 1997.

[21] R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia, and T. DebRoy, “Review: Friction stir welding tools,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 16, no. 4, pp. 325–342, 2011.

[22] M. A. Sutton, B. Yang, A. P. Reynolds, and R. Taylor, “Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 323, no. 1–2, pp. 160–166, 2002.

[23] W. M. Thomas, D. G. Staines, I. M. Norris, and R. De Frias, “Friction stir welding tools and developments,” *Weld. World*, vol. 47, no. 11–12, pp. 10–17, 2003.

[24] R. J. Ding and P. A. Oelgoetz, “MECHANICAL PROPERTY ANALYSIS IN THE RETRACTED PIN-TOOL (RPT) REGION OF FRICTION STIR WELDED (FSW) ALUMINUM-LITHIUM 2195,” in *Proceedings of the First International Conference on Friction Stir Welding*, 1999.

[25] R. J. Ding, “Force Characterization on the Welding Pin of a Friction Stir Welding Retractable Pin-Tool Using Aluminum-Lithium 2195,” in *2nd International Symposium on Friction Stir Welding*, 2000.

[26] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, and S. D. Smith, “Friction stir welding - Tool developments,” in *TMS Annual Meeting*, 2001.

[27] M. Skinner and R. L. Edwards, “Improvements to the FSW process using the self-reacting technology,” in *Materials Science Forum*, 2003, vol. 426–432, no. 4.

[28] R. Edwards and G. Sylva, “Recent advances in welding of aluminum alloys using a Self Reacting Pin Tool (SRPT) approach with application examples,” in *ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research*, 2005, vol. 2005.

[29] F. Marie, D. Allehaux, and B. Esmiller, “Development of the bobbin tool technique on various Al alloys,” in *5th international conference on friction stir welding*, 2004.

[30] Y. H. Zhao, S. B. Lin, F. X. Qu, and L. Wu, “Influence of pin geometry on material flow in friction stir welding process,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 22, no.

1, 2006.

[31] S. Emamian *et al.*, “A review of friction stir welding pin profile,” *Lect. Notes Mech. Eng.*, 2017.

[32] N. Dialami, M. Cervera, M. Chiumenti, and C. Agelet de Saracibar, “A fast and accurate two-stage strategy to evaluate the effect of the pin tool profile on metal flow, torque and forces in friction stir welding,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 122, pp. 215–227, 2017.

[33] C. D. Sorenson, T. W. Nelson, S. M. Packer, and R. J. Steel, “Innovative technology applications in FSW of high softening temperature materials,” in *5th international conference on friction stir welding*, 2004.

[34] A. P. Reynolds and F. Duvall, “Digital image correlation for determination of weld and base metal constitutive behavior,” *Weld. J. (Miami, Fla)*, vol. 78, no. 10, 1999.

[35] T. Nelson, B. Hunsaker, and D. Field, “Local Texture Characterization of Friction Stir Welds in 1100 Aluminum,” in *1st International Symposium on Friction Stir Welding*, 1999.

[36] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. . Needham, P. Temple-Smith, S. W. K. . Kallee, and C. J. Dawes, “Friction Stir Welding,” 2306366, 1996.

[37] K. J. Colligan, “Tapered friction stir welding tool,” 6669075, 2003.

[38] K. J. Colligan and J. R. Pickens, “Friction stir welding of aluminum using a tapered shoulder tool,” in *Friction Stir Welding and Processing III - Proceedings of a Symposium sponsored by the Shaping and Forming Committee of (MPMD) of the Minerals, Metals and Materials Society, TMS*, 2005.

[39] Y. NAGASAKA and T. NISIHARA, “Development of Micro-FSW,” *Proc. Mater. Process. Conf.*, vol. 2003.11, no. 0, 2003.

[40] M. B. Bever, D. L. Holt, and A. L. Titchener, “The stored energy of cold work,” *Progress in Materials Science*, vol. 17, no. C. 1973.

[41] Q. Zhu, C. M. Sellare, and H. K. D. H. Bhadeshia, “Quantitative metallography of deformed grains,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 7, 2007.

[42] M. V. Belous and V. P. Cherepin, “Changes in the steel carbide phase under influence of cold plastic deformation,” *Fiz Mez Met.*, pp. 14:48-54, 1962.

[43] F. Danoix, D. Julien, X. Sauvage, and J. Copreaux, “Direct evidence of cementite dissolution in drawn pearlitic steels observed by tomographic atom probe,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 250, no. 1, 1998.

[44] J. Yin, M. Umemoto, Z. G. Liu, and K. Tsuchiya, “Formation mechanism and annealing behavior of nanocrystalline ferrite in pure Fe fabricated by ball milling,” *ISIJ Int.*, vol. 41, no. 11, 2001.

[45] Y. Ivanisenko, I. MacLaren, R. Z. Valiey, and H. J. Fecht, “The first observation of a shear-induced bcc → fcc transformation in nanocrystalline ferrite,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 7, no. 11, 2005.

[46] G. Carr, D. Santiago, G. Lombera, and S. Urquiza, “Modelado Numérico del Proceso de Soldadura de Punto por Fricción y su Aplicación en la Industria Naval,” *Mecánica Comput.*, vol. 35, no. 4, 2017.

[47] K. J. Colligan and R. S. Mishra, “A conceptual model for the process variables related to heat generation in friction stir welding of aluminum,” *Scr. Mater.*, vol. 58, no. 5, pp. 327–331, 2008.

[48] R. Nandan, T. DebRoy, and H. K. D. H. Bhadeshia, “Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 53, no. 6, pp. 980–1023, 2008.

[49] M. Mijajlovic, “Investigation and development of analytical model of estimation of amount of heat generated during FSW,” University of Nis, Nis, Serbia., 2012.

[50] H. Schmidt and J. Hattel, “A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding,” *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 77–93, 2005.

[51] T. j. Lienert, J. W. L. Stellwag, and L. R. Lehman, “Comparison of heat inputs: friction stir welding vs. arc welding,” Colombus, OH, 2002.

[52] G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri, and L. Fratini, “Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 419, no. 1–2, pp. 381–388, 2006.

[53] M. Aissani, S. Gachi, F. Boubenider, and Y. Benkedda, “Design and optimization of friction stir welding tool,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 25, no. 11, pp. 1199–1205, 2010.

[54] P. Biswas, D. A. Kumar, and N. R. Mandal, “Friction stir welding of aluminum alloy with varying tool geometry and process parameters,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 226, no. 4, pp. 641–648, 2012.

[55] C. N. Suresha, B. M. Rajaprakash, and S. Upadhya, “A study of the effect of tool pin profiles on tensile strength of welded joints produced using friction stir welding process,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 26, no. 9, pp. 1111–1116, 2011.

[56] J. S. De Jesus, A. Loureiro, J. M. Costa, and J. M. Ferreira, “Effect of tool geometry on friction stir processing and fatigue strength of MIG T welds on Al alloys,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 11, pp. 2450–2460, 2014.

[57] T. P. Kumar, “Influence of Tool Geometry in Friction Stir Welding on Material Flow Pattern,” *Int. J. Curr. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 230–235, 2013.

[58] F. J. Liu, Z. Y. Sun, Y. F. Tuo, Y. Ji, and Y. X. Bai, “Effect of shoulder geometry and clamping on microstructure evolution and mechanical properties of ultra-thin friction stir-welded Al6061-T6 plates,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 106, no. 3–4, pp. 1465–1476, 2020.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de las aleaciones forjadas de aluminio. 11
Tabla 2 Clasificación de aleaciones coladas de aluminio. 12
Tabla 3 Nomenclatura de los temples para aleaciones trabajadas en caliente. ... 13
Tabla 4 Nomenclatura de los temples para aleaciones trabajadas en frío..... 14
Tabla 5 Compocisiones químicas (%e.p.) de algunas aleaciones de aluminio de la serie 5XXX (Al balance) 15
Tabla 6 Fases intermetálicas presentes en aleaciones 5XXX 18
Tabla 7 Propiedades mecánicas reportadas en la literatura para la aleación 5052-H32..... 19
Tabla 8 Eficacia de la resistencia a la tracción y relacion S/N de herramienta cónica y herramienta cuadrada. 40
Tabla 9 Fuerzas absolutas obtenidas para cada geometría del pin..... 44
Tabla 10 Temperaturas (°C) registradas utilizando termopares en diferentes puntos para diferentes pines de herramienta..... 45
Tabla 11 Resistencia a la tracción y resultados de la prueba de dureza de muestras FSW obtenidas con diferentes pines de herramienta..... 45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de fases del sistema Al-Mg 16
Figura 2 Diagrama del proceso de soldadura por fricción-agitación para una configuración a tope 20
Figura 3 Herramienta de soldadura para FSW 22
Figura 4 Tipos de herramientas de FSW a) Fija, b) Ajustable, c) Tipo bobina. 24
Figura 5 Algunos tipos de geometrías que puede poseer el pin: a) triangular, b) cuadrada, c) pentagonal, d) hexagonal. 26
Figura 6 Algunos tipos de perfiles de pin: a) recto, b) roscado, c) cónico, d) perfilado cuadrado, e) perfilado triangular..... 26
Figura 7 Ejemplos de geometrías que se han implementado actualmente**.** 27
Figura 8 Ejemplos de la geometría del hombro y la geometría de la superficie del hombro de la herramienta. 30
Figura 9 Diagrama de las zonas que se generan en la soldadura FSW..... 31
Figura 10 Direcciones de rotación de la herramienta y morfología asimétrica de la soldadura obtenida..... 32
Figura 11 Diagrama de las principales variables del proceso (dependientes e independientes) que deforman y afectan el flujo de material y la distribución de la temperatura del proceso FSW..... 33
Figura 12 Diagrama de las superficies geométricas existentes en la herramienta. 36
Figura 13 Diagrama que muestra las geometrías de pin utilizadas por Suresha et. al. (2011) 40
Figura 14 a) Geometrías de pin empleadas por Dialami et. al. (2016) (De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: circular, triflut, trivex y triangular) b) Mallas EF cerca del pin. 42
Figura 15 Contornos de temperatura en estado periódico de los pines a) circular, b) triflut, c) trivex, y d) triangular. 43
Figura 16 Líneas de corriente alrededor del pin. 43

Figura 17 Geometrías del hombro utilizadas a) hombro cóncavo de tres hélices, b) hombro cóncavo, y c) hombro plano de tres hélices. 47