



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO

**ANÁLISIS Y MODELADO DEL PROCESO DE SOLDADURA POR
FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW)**

TESIS

**Para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

Presenta:

Ing. Jacobo Iván Ramos Ramírez

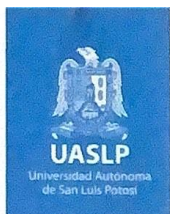
Asesor:

Dr. Hugo Iván Medellín Castillo

San Luis Potosí, S. L. P.

Junio 2024





16 de noviembre de 2023

**ING. JACOBO IVÁN RAMOS RAMÍREZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Hugo Iván Medellín Castillo**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ingeniería Mecánica**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de noviembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Análisis y modelado del proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW)"

Introducción.

1. Antecedentes teóricos del proceso de soldadura por fricción-agitación.
 2. Análisis del proceso de soldadura por fricción-agitación.
 3. Modelado por el método de elementos finitos del proceso de soldadura por fricción-agitación.
 4. Análisis y discusión de resultados.
- Conclusiones.
Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR**

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 28290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2336

Copia. Archivo
*etn.

"UASLP, más de un siglo educando con autonomía"



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
**INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

ANÁLISIS Y MODELADO DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW)

se realizó en el periodo febrero de 2021 a mayo de 2024 bajo la dirección del Dr. Hugo Iván Medellín Castillo

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito,
Jacobo Iván Ramos Ramírez

Resumen

La soldadura es un proceso fundamental en la fabricación y construcción de una amplia variedad de productos y estructuras en diversas industrias, desde la construcción naval y automotriz hasta la aeroespacial. Este proceso implica la unión de materiales de manera permanente mediante la aplicación de calor, presión o con la combinación de ambos. La soldadura juega un papel fundamental en la creación de componentes estructurales y en la reparación de equipos, garantizando la fabricación de productos que son de uso crítico en el diario vivir.

La soldadura por fricción-agitación (FSW) es una técnica innovadora que presenta ventajas significativas sobre los métodos de soldadura convencionales. El proceso FSW implica la unión de materiales sin fundirlo en su totalidad, lo que reduce el riesgo de deformaciones y distorsiones en la pieza de trabajo además de prevenir defectos asociados con la fusión completa. Este proceso de soldadura permite unir materiales que son considerados difíciles de soldar con técnicas convencionales, como aleaciones de aluminio y materiales compuestos.

Debido a la creciente importancia y aplicaciones tan relevantes del proceso de soldadura por fricción-agitación, es fundamental comprender en profundidad este proceso y los parámetros que lo involucran para maximizar su eficiencia y calidad. El objetivo principal del presente trabajo de tesis fue el desarrollar un modelo mediante el método de elementos finitos (MEF) para simular el proceso FSW, así como analizar y evaluar el efecto que tienen los diferentes parámetros involucrados en el desempeño final del proceso de soldadura por fricción-agitación.

Para abordar el estudio del proceso FSW, se adoptó una metodología integral que comenzó con una exhaustiva revisión bibliográfica para comprender a fondo el proceso en cuestión. Este paso inicial permitió identificar y analizar los modelos analíticos y numéricos existentes, lo que resultó crucial para poder entender las dinámicas y los parámetros fundamentales que rigen al proceso de soldadura por fricción-agitación. A partir de esta comprensión, se procedió a desarrollar un modelo detallado de simulación mediante el método de elementos finitos, con el objetivo de simular el proceso FSW de una manera precisa y eficaz. Este modelo se sometió a una rigurosa evaluación y validación contra datos experimentales obtenidos de la literatura, asegurando su fiabilidad y precisión. Finalmente se realizó un análisis paramétrico detallado para conocer la influencia que tienen los diferentes parámetros sobre el desempeño final de la calidad de las uniones FSW.

Los resultados obtenidos demuestran la importancia de utilizar herramientas de simulación como el método de elementos finitos para comprender mejor los procesos de soldadura por fricción-agitación y optimizar los parámetros involucrados. El modelo desarrollado proporcionó una visión clara sobre el impacto de los diversos parámetros del proceso en la eficiencia de éste, posibilitando de esta manera su optimización para mejorar la calidad de las uniones.

Agradecimientos

Estoy muy agradecido por todo el apoyo recibido a lo largo del proceso de desarrollo de este trabajo de tesis. Con todas las personas que directa e indirectamente estuvieron involucradas en el avance y consolidación de este trabajo.

Primeramente, me gustaría agradecer a mis padres, Jacobo Ramos y Patricia Ramírez que han estado al pendiente en todo momento de mi desarrollo como persona y profesional, con su apoyo y dedicación incondicional me han brindado todas las herramientas necesarias para sobrellevar las adversidades que se me presentaron a lo largo del desarrollo de este proyecto y me motivaron a seguir adelante.

A mis hermanos Julián Ramos y Jimena Ramos por su cariño y respaldo a lo largo de este proceso, su apoyo ha sido clave para llegar a este punto.

A mi asesor de tesis el Dr. Hugo Medellín que, con su asesoría y apoyo, pude realizar un buen proyecto de investigación, agradezco su entrega y disposición para resolver todas mis dudas, revisar mis avances y proporcionar valiosos comentarios que me permitieron concluir mi trabajo de tesis, crecer como profesional e investigador.

A la Facultad de Ingeniería y al Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, a los profesores de posgrado por todos los conocimientos adquiridos durante la estancia en la universidad, y al Conahcyt por la beca otorgada.

San Luis Potosí, marzo del 2024

Jacobo Iván Ramos Ramírez

Contenido

Resumen	I
Agradecimientos	II
Contenido	III
Lista de figuras	VI
Lista de tablas	IX
Introducción.....	1
Planteamiento del problema.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos particulares	2
Estructura de la tesis	3
Capítulo 1	4
Antecedentes teóricos del proceso de soldadura por fricción-agitación.....	4
1.1 Soldadura	4
1.1.1 Soldadura de gas	4
1.1.2 Soldadura de resistencia	5
1.1.3 Soldadura de alta densidad energética.....	5
1.1.4 Soldadura de estado sólido	6
1.2 Proceso de soldadura por fricción-agitación	8
1.2.1 Etapas del proceso FSW	9
1.2.2 Microestructura de la soldadura	11
1.2.3 Ventajas, desventajas y áreas de aplicación del proceso FSW	12
1.3 Parámetros del proceso FSW.....	14
1.3.1 Parámetros de la herramienta	15
1.3.2 Parámetros de la soldadura	19
1.4 Trabajos de investigación relacionados con el proceso FSW.....	20
Capítulo 2	26
Análisis del proceso de soldadura por fricción-agitación.....	26
2.1 Modelo analítico de la generación de calor	27
2.1.1 Generación de calor por el hombro de la herramienta.....	29

2.1.2	Generación de calor por el lateral del pin de la herramienta	29
2.1.3	Generación de calor por la base del pin de la herramienta	30
2.1.4	Influencia del estado de contacto: adherencia y deslizamiento	30
2.1.5	Proporciones de generación de calor	32
Capítulo 3		33
Modelado por el método de elementos finitos del proceso de soldadura por fricción-agitación		33
3.1	Método de elementos finitos.....	34
3.2	Análisis en el método de elemento finito	35
3.2.1	Análisis no lineal	36
3.3	Programas de cómputo MEF para el análisis y simulación del proceso FSW	37
3.3.1	Software ABAQUS	37
3.3.2	Solución de problemas no lineales en ABAQUS	38
3.4	Modelo numérico MEF del proceso FSW	39
3.4.1	Modelado geométrico	41
3.4.2	Modelado del material	42
3.4.3	Condición de contacto	44
3.4.4	Condiciones de frontera térmicas	45
3.4.5	Condiciones de frontera mecánicas	46
3.4.6	Asignación de cargas de la herramienta	47
3.5	Validación térmica del modelo numérico.....	48
Capítulo 4		53
Análisis y discusión de resultados		53
4.1	Análisis paramétrico en el proceso FSW	53
4.1.1	Metodología	53
4.1.2	Análisis de la velocidad rotacional de la herramienta.....	55
4.1.3	Análisis de la velocidad de soldadura de la herramienta	58
4.1.4	Análisis del radio del hombro de la herramienta.....	61
4.2	Discusión de resultados	65
4.2.1	Velocidad de rotación de la herramienta.....	65
4.2.2	Velocidad de soldadura de la herramienta	66

4.2.3 Radio del hombro de la herramienta	67
Conclusiones.....	68
a) Simulación por Elementos Finitos (MEF).....	68
b) Análisis paramétrico	68
Contribuciones	69
Trabajo futuro	70
Referencias	71

Lista de figuras

Figura 1 Esquema del proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW).....	1
Figura 1.1 Esquema de soldadura por fricción agitación [11].....	8
Figura 1.2 Etapas del proceso FSW: a) Posicionamiento de la herramienta; b) Penetración de la herramienta; c) Precalentamiento; d) Soldado; y e) Fin de la soldadura y retiro de la herramienta [14].	10
Figura 1.3 Zonas microestructurales en la soldadura FSW [2].	12
Figura 1.4 Herramienta con hombro cóncavo [15].....	17
Figura 1.5 Herramienta con hombro convexo [2].	17
Figura 1.6 a) Pin cilíndrico roscado; b) Pin cono truncado roscado, con hombro cóncavo; c) Herramienta de pin sin rosca con superficies planas en la punta [15].....	18
Figura 1.7 Tipos de Herramientas usadas en la soldadura por fricción-agitación [17].	19
Figura 1.8 a) Micrografía electrónica de barrido (SEM) de partículas de acero en una matriz de aluminio. b) Microscopía óptica de partículas de acero en una matriz de aluminio. c) Propagación de una grieta junto a una partícula de acero [22].....	22
Figura 1.9 Microestructuras complejas y mixtas en la mitad del espesor del centro de la zona agitada, con ferrita resaltada como "F", martensita como "M" y bainita como "B" [23].....	23
Figura 1.10 Probetas dobladas, entrada de calor y ángulo medido para cada condición de velocidad de soldadura [23].....	23
Figura 2.1 Esquema de la configuración de la FSW con la pieza de trabajo, la herramienta y la placa de respaldo, así como el movimiento de la herramienta durante los períodos de inmersión, retención, soldadura y extracción [18].	27
Figura 2.2 Contribuciones de generación de calor desde el hombro, el lado del pin y la punta del pin [32].	28
Figura 2.3 La fracción de calor generada por el hombro y el pin ($R_h = 9 \text{ mm}$, $R_p = 3 \text{ mm}$, $H_p = 4 \text{ mm}$ y $\alpha = 10^\circ$).....	32
Figura 3.1 Aproximación del método de Newton-Raphson [32].	38
Figura 3.2 Modelo de la pieza de trabajo y la herramienta.	39
Figura 3.3 Pasos generales para realizar la simulación MEF del proceso FSW.	40
Figura 3.4 Dimensiones herramienta.....	41
Figura 3.5 Dimensiones pieza de trabajo (Euleriano) y pieza de referencia.	42
Figura 3.6 Coeficiente de fricción dependiente de la temperatura AA 6061 [42].....	44
Figura 3.7 Formulación acoplada Euleriana-Lagrangiana: a) Cuerpo Euleriano; b) Cuerpo Lagrangiano; c) Formulación acoplada Euleriana-Lagrangiana	45
Figura 3.8 Esquema de representación de las condiciones de contorno térmico del análisis	46
Figura 3.9 Esquema de representación de las condiciones de contorno mecánicas de la pieza de trabajo.	46
Figura 3.10 Ubicación del termopar en la pieza de trabajo.	48

Figura 3.11 Comportamientos de la temperatura durante el desarrollo del proceso FSW en la ubicación del termopar resultado experimental y resultado obtenido modelo MEF.	49
Figura 3.12 Distribuciones de temperatura transitorias en la superficie de la pieza de trabajo y ubicación de la sección A-A.	50
Figura 3.13 Distribución térmica en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura en sección A-A.	50
Figura 3.14 Distribuciones transitorias de temperatura en la superficie de la pieza de trabajo en los tiempos (a) 0.9 segundos, (b) 6.05 segundos, (c) 12.1 segundos, (d) 12.3 segundos, (e) 19.8 segundos (mitad del largo), y (f) 27.5 segundos (final de la soldadura FSW).	51
Figura 4.1 Curva de temperatura de referencia en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm), resultado obtenido mediante modelo MEF.	54
Figura 4.2 Perfil de temperatura de referencia del ancho de la placa en la sección A-A.	54
Figura 4.3 Distribución térmica de referencia en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura Sección A-A.	54
Figura 4.4 Curva de temperatura del análisis de la velocidad rotacional de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm).	55
Figura 4.5 Perfil de temperatura del ancho de la placa en la sección A-A del análisis de la velocidad rotacional de la herramienta.	56
Figura 4.6 Microestructura en la sección transversal del material de la pieza después del proceso de FSW: A, metal base; B, Zona afectada por el calor (HAZ); C, Zona termomecánicamente afectada (TMAZ); D, cordón de soldadura (zona de recristalización).	57
Figura 4.7 Distribución térmica en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura sección A-A: a) 600 rpm, b) 1200 rpm y c) 2400 rpm.	57
Figura 4.8 Temperatura máxima del análisis de la velocidad rotacional de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm).	58
Figura 4.9 Curva de temperatura del análisis de la velocidad de soldadura de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm).	59
Figura 4.10 Perfil de temperatura del ancho de la placa en la sección A-A del análisis de la velocidad de soldadura de la herramienta.	59
Figura 4.11 Distribución térmica en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura a) $v = 2$ mm/s, b) $v = 4$ mm/s y C) $v = 8$ mm/s.	60
Figura 4.12 Temperatura máxima del análisis de la velocidad de soldadura de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm).	61
Figura 4.13 Curva de temperatura del análisis del radio del hombro de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm).	62
Figura 4.14 Perfil de temperatura del ancho de la placa en la sección A-A del análisis del radio del hombro de la herramienta.	63
Figura 4.15 Distribución térmica en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura: a) Radio hombro herramienta 7 mm, b) Radio hombro herramienta 9 mm y C) Radio hombro herramienta 12 mm.	64

Figura 4.16 Temperatura máxima del análisis del radio del hombro de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm).	65
--	----

Lista de tablas

Tabla 1.1 Principales parámetros del proceso FSW [18].	15
Tabla 1.2 Propiedades relativas de materiales para herramientas FSW para soldar aleaciones de Al de alta resistencia.	16
Tabla 3.1 Propiedades aluminio AA7075-T651.....	43
Tabla 3.2 Propiedades aluminio AA7075-T651modelo Johnson-Cook.....	43
Tabla 3.3 Propiedades H13.....	43
Tabla 3.4 Etapas del modelo y condiciones de cargas de la herramienta.....	47

Introducción

La unión entre materiales se necesita constantemente en un punto u otro durante las etapas de ensamble o fabricación de componentes, así como para la reparación de piezas dañadas. Los dos principales tipos de uniones son los procesos de unión permanente y los temporales. Entre las técnicas de unión permanente se encuentran la unión con remache, las juntas adhesivas y la soldadura [1].

La soldadura por fricción-agitación (FSW, por sus siglas en inglés, Friction Stir Welding) se utiliza principalmente para la unión de aleaciones de aluminio [2]. A pesar de que es un proceso relativamente nuevo, el FSW está siendo ampliamente utilizado en aplicaciones industriales de estructuras de trenes, barcos, automóviles y de obra civil. Su proceso consiste en utilizar una herramienta cilíndrica giratoria con un pin en su extremo, el cual se introduce entre los materiales con el fin de calentarlos y unirlos en estado sólido. En la Figura 1 se puede observar el esquema del proceso FSW.

Entre las ventajas de la soldadura FSW resalta su capacidad para unir materiales disimilares debido que no requiere de material de aporte ni de un gas protector, lo cual la hace más segura comparado con otros tipos de soldadura. Además, su impacto ecológico es mucho más bajo. Sin embargo, el FSW es un proceso complejo que comprende fenómenos termo-mecánicos y de flujo de materiales, así como varios parámetros del proceso. Por tanto, es de suma importancia comprender la influencia de estos parámetros en el desempeño final del proceso de soldadura por fricción-agitación para lograr obtener bases que permitan optimizar y garantizar resultados de calidad en las uniones soldadas a la hora de implementar este tipo de soldadura.

En este trabajo de tesis se abordan aspectos teóricos y experimentales del proceso FSW, se desarrolla y valida un modelo mediante el método de elementos finitos que permite estudiar el efecto de los diferentes parámetros en el comportamiento de la unión soldada, lo cual puede generar un impacto significativo en la industria, permitiendo contribuir a la fabricación de componentes más seguros y eficientes.

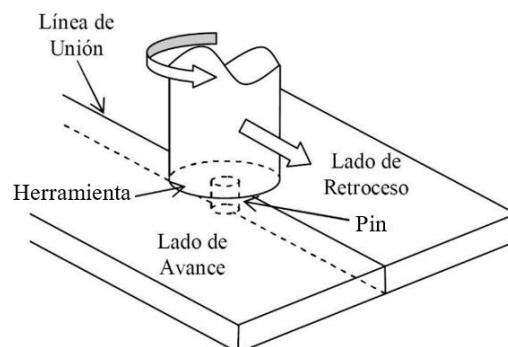


Figura 1 Esquema del proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW).

Planteamiento del problema

En la industria la unión de materiales durante las etapas de desarrollo, fabricación y reparación de productos es de gran relevancia. En los procesos de soldadura convencionales se generan defectos producidos por el calor afectando la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión, lo cual puede producir fisuras en el material [3]. El proceso de soldadura por fricción-agitación minimiza los defectos mencionados con anterioridad y permite la unión de materiales considerados difíciles de soldar [4].

Al ser el proceso de soldadura por fricción-agitación, una de las tecnologías de unión más recientes, no existen modelos numéricos tan precisos que permitan analizar y evaluar el desempeño del proceso FSW, por lo que se propone estudiar los datos y resultados experimentales disponibles en la literatura para desarrollar un modelo mediante el método de elementos finitos, que permitan analizar y evaluar el desempeño del proceso FSW, así como la influencia que tienen los diferentes parámetros del proceso en la calidad de la unión.

El desarrollo de modelos y herramientas de simulación es muy importante porque permite analizar problemas complejos a través de una alternativa práctica. En este caso particular, permite conocer la influencia que tienen los diferentes parámetros del proceso en los resultados de la soldadura. El uso de herramientas de simulación permite simular un ambiente controlado para determinar cómo serán los resultados de la soldadura, así como identificar las ventajas, desventajas y consecuencias de cambios en los parámetros del proceso. Además, el uso de modelos de simulación en los procesos de soldadura FSW es una práctica económica y confiable que ayuda a reducir tiempo y costos en el proceso.

Objetivo general

Analizar y modelar el proceso de soldadura por fricción-agitación para evaluar su desempeño y sensibilidad a los diferentes parámetros del proceso.

Objetivos particulares

Los objetivos particulares del trabajo de tesis son:

- Conocer el estado actual de los modelos analíticos y numéricos del proceso FSW.
- Conocer los parámetros del proceso FSW.
- Desarrollar y validar un modelo MEF para el análisis del proceso FSW.
- Conocer el efecto de los diversos parámetros en el desempeño del proceso FSW.

Se considera que al lograr los objetivos anteriores el objetivo general de la tesis se cumple, contribuyendo de esta manera el desarrollo de conocimiento que mejore el desempeño del proceso de soldadura por fricción-agitación.

Estructura de la tesis

Esta tesis está organizada de la siguiente manera. El capítulo 1 presenta los conceptos básicos sobre los diferentes procesos de soldadura existentes, la historia del proceso de soldadura por fricción-agitación, los parámetros involucrados en el proceso FSW, las ventajas y desventajas del proceso de soldadura FSW, así como el análisis de diferentes trabajos de investigación en la literatura relacionados al proceso FWS. En el capítulo 2 se desarrolla un análisis teórico del proceso de soldadura por fricción-agitación centrado en la generación de calor. El capítulo 3 aborda el desarrollo del modelo por el método de elementos finitos del proceso FSW. Este apartado incluye la descripción del modelo desarrollado y se lleva a cabo su validación utilizando datos experimentales de la literatura. En el capítulo 4 se realiza el análisis paramétrico a partir del modelo MEF para determinar la influencia que tienen los diferentes parámetros involucrados en el proceso de soldadura por fricción-agitación en el desempeño final de la unión soldada. Se examinan y se discuten los resultados obtenidos del estudio paramétrico, lo que proporciona información valiosa para optimizar el proceso de soldadura FSW. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas con el desarrollo del presente trabajo.

Capítulo 1

Antecedentes teóricos del proceso de soldadura por fricción-agitación

1.1 Soldadura

La soldadura se puede definir como un proceso de fabricación utilizado para unir materiales, incluyendo metales y termoplásticos. Durante la soldadura las piezas de trabajo que se unirán se funden en la interfaz de unión, por lo general se añade un material de relleno para formar un conjunto de material fundido que se solidifica para convertirse en una articulación fuerte. Existen diferentes tipos de soldadura, entre los que se encuentra la soldadura de estado sólido que incluye la soldadura por fricción-agitación [5].

1.1.1 Soldadura de gas

Este proceso de soldadura implica la unión de dos piezas de metal mediante la aplicación de calor y la adición de un material de relleno. Una llama de alta temperatura generada por la combustión de gas es la encargada de generar el calor necesario para fundir las piezas de trabajo. El tipo más común de soldadura de gas es la soldadura oxiacetilénica; donde la llama se obtiene debido a la combustión del gas acetileno con el oxígeno [6]. El proceso de soldadura de gas presenta muchas ventajas y limitaciones, tales como [7]:

Ventajas

- Una de las técnicas de soldadura más versátiles.
- La zona afectada por el calor es muy delgada.
- El costo del equipo y de mantenimiento es bajo.
- No hay necesidad de un suministro de corriente eléctrica.

Desventajas

- Las piezas de trabajo con espesores grandes no se pueden unir eficientemente.
- No todos los tipos de metales se pueden unir.
- Se recomienda más seguridad.
- Un almacenamiento adecuado de cilindros de acetileno es esencial.
- Los metales refractarios, incluidos el tungsteno y la cerámica, no se pueden unir.
- El calentamiento continuo de la articulación resulta en una gran zona afectada por el calor.

1.1.2 Soldadura de resistencia

Esta técnica de soldadura implica la generación de calor al pasar una alta corriente a través de la resistencia causada por el contacto entre dos o más superficies metálicas que hacen que se formen piscinas de metal fundido en el área de la soldadura [6]. Los tipos más comunes de soldadura por resistencia son: soldadura de resistencia por puntos, soldadura de resistencia por proyección y soldadura de resistencia por costura [8]. Algunas de las ventajas y limitaciones del proceso de soldadura de resistencia son:

Ventajas

- Pueden unirse mayoría de los metales, pero funciona mejor con el acero.
- Posibilidad de obtener una velocidad de soldadura extremadamente rápida.
- El aspecto auto-sujeción de los electrodos hace que sea muy bueno para la automatización y la producción.
- No se necesitan materiales de relleno.
- Las láminas delgadas se pueden unir perfectamente por la soldadura por puntos y la soldadura por costura.

Desventajas

- El costo del equipo es elevado.
- La inspección visual de las uniones no es posible.
- Se requieren corrientes extremadamente altas, lo que resulta en altas demandas de líneas eléctricas.
- Los procesos, como la soldadura por puntos, producen malas propiedades mecánicas (es decir, tracción y fatiga) debido a las características geométricas afiladas en el borde de la soldadura.

1.1.3 Soldadura de alta densidad energética

La soldadura de áreas muy pequeñas se puede lograr mediante el uso de métodos de soldadura de alta densidad de energía, los cuales enfocan la energía necesaria en esa área. La degradación es básicamente insignificante, el esfuerzo residual y la distorsión se pueden lograr porque el proceso permite una entrada de calor general muy baja a las piezas de trabajo. Además, la velocidad de unión puede ser muy rápida. La soldadura por haz láser y la soldadura por haz de electrones son los dos procedimientos principales y conocidos por las densidades energéticas extremas [8].

Las ventajas y limitaciones del proceso de soldadura por haz láser son:

Ventajas

- El proceso permite una baja entrada general de calor.
- Velocidades altas de soldadura.
- No se requiere metal de relleno.
- La concentración de la fuente de calor permite la creación de juntas de tamaños extremadamente pequeños, necesarias para componentes pequeños e intrincados.
- Capaz de soldar juntas con difícil accesibilidad.

Desventajas

- El costo del equipo es por lo general muy alto.
- El equipo no se puede mover fácilmente.
- Los metales muy reflectantes son difíciles de soldar.
- Los láseres tienen una mala eficiencia energética.
- Se puede producir una microestructura quebradiza al soldar ciertos aceros debido a la alta tasa de enfriamiento de la soldadura.

Por otro lado, las ventajas y limitaciones del proceso de soldadura de haz de electrones son:

Ventajas

- El proceso permite una entrada de calor generalmente baja.
- No se necesita gas de protección ni material de relleno.
- Los metales reflectantes se pueden unir sin problemas.
- Mayor profundidad que la soldadura por haz láser.
- La "estética" de la soldadura es muy buena.

Desventajas

- Equipos muy costosos.
- Las juntas requieren ajustes muy precisos.
- Las velocidades de refrigeración rápidas pueden crear microestructuras quebradizas en algunos aceros.
- Los métodos de soldadura por haz producen rayos X peligrosos, por lo que es necesario el uso de protección contra la radiación.

1.1.4 Soldadura de estado sólido

En este método de unión los materiales se someten a presión y se deforman plásticamente sin llegar a fundirse completamente, lo que permite que los átomos de las superficies de las

piezas se difundan y se unan entre sí. La pieza de trabajo no experimenta una deformación excesiva. Este proceso se lleva a cabo a temperaturas inferiores al punto de fusión de los materiales, lo que permite que los átomos se difundan a través de la interfaz para rellenar los vacíos restantes y completar el proceso de unión evitando defectos como la porosidad [6]. La unión de dos superficies tiene lugar por enlace atómico; el proceso no implica la fusión de los materiales. A medida que las superficies se presionan, los átomos en las dos superficies se atraen entre sí para formar enlaces entre las superficies, los enlaces formados por los átomos son responsables del proceso de unión. Las propiedades mecánicas de las uniones soldadas son similares a las de los materiales originales, el proceso se utiliza comúnmente para soldar materiales diferentes, como aluminio con acero [9]. Para que la soldadura de estado sólido sea exitosa, es necesario que las superficies a unir estén limpias en su totalidad y se debe garantizar el contacto físico muy cercano entre las dos superficies para permitir la unión atómica.

Los procesos de soldadura que no implican fusión tienen una gran cantidad de ventajas sobre aquellos procesos que necesitan de la fusión para generar la soldadura. Al no producirse la fusión de los materiales, la zona afectada por el calor se reduce considerablemente, por lo que el material que rodea la unión soldada conserva de sus propiedades originales. Otra de las ventajas destacadas de ciertos procesos de soldadura de estado sólido es su capacidad de unir materiales diferentes sin requerir precauciones adicionales relacionadas con la expansión térmica relativa, conductividades y otros problemas comunes que suelen surgir a la hora de unir materiales diferentes mediante los procesos de soldadura convencionales que involucran la fusión de los materiales.

Hay muchos tipos de soldadura de estado sólido, incluyendo soldadura por forja, soldadura en frío, soldadura por fricción, soldadura explosiva, soldadura por difusión, soldadura ultrasónica, soldadura por fricción-agitación.

1.2 Proceso de soldadura por fricción-agitación

La soldadura por fricción-agitación (FSW, por sus siglas en inglés) fue inventada y patentada en 1991 por The Welding Institute (TWI) para la unión a tope y unión a traslape de metales ferrosos, metales no ferrosos y plásticos. El proceso consiste en sumergir una herramienta giratoria especial entre las caras de las piezas de trabajo. El contacto entre la herramienta giratoria y las piezas de trabajo generan calor por fricción, lo que resulta en la creación de una región plastificada alrededor de la porción sumergida de la herramienta [10].

En el proceso de soldadura por fricción-agitación se emplea el uso de una herramienta no consumible conformada por un pin y un hombro, la herramienta a medida que gira se inserta en los bordes contiguos de las placas para unirlos. Una vez que el pin se encuentra introducido entre la junta de las dos placas y el hombro de la herramienta está en contacto con la superficie superior de las piezas de trabajo, se procede a trasladar la herramienta a lo largo de la línea de unión [2]. El lado de avance de la pieza de trabajo siempre se ubicará del lado de rotación de la herramienta; es decir, si la herramienta gira en sentido de las manecillas del reloj, el lado de avance será el izquierdo y el lado de retroceso será el derecho de la pieza de trabajo como se muestra en la Figura 1.1. Por el contrario, si la herramienta gira en contra de las manecillas del reloj el lado de avance será el lado derecho y el lado de retroceso será el izquierdo [11].

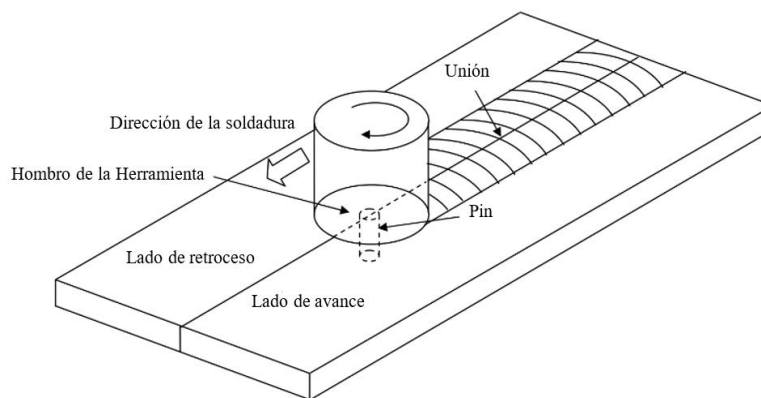


Figura 1.1 Esquema de soldadura por fricción agitación [11].

La herramienta tiene tres funciones principales: generar calor en la pieza de trabajo, generar el flujo del material para producir la unión, y contener el material caliente por debajo del hombro de la herramienta.

Además, del calor generado por la fricción, se genera calor por la deformación plástica que sufre la pieza de trabajo. El calentamiento localizado ablanda el material alrededor del pin de la herramienta, lo cual, combinado con la rotación y la traslación de éste, provoca el movimiento del material desde el frente hacia la parte posterior del pin, lo que permite el llenado del agujero que deja el rastro del pin a medida que avanza a lo largo de la línea de unión. El hombro de la herramienta limita el flujo del material caliente y evita que éste sobrepase la altura inicial de las piezas de trabajo. Como resultado de la acción de la herramienta y su influencia sobre la pieza de trabajo, se obtiene una unión en estado sólido, es decir sin la fusión del material [2].

El movimiento de las placas durante el proceso FSW se restringe mediante el uso de un sistema de fijación con mordazas que sujetan los extremos de las piezas y una placa de respaldo ubicado debajo de la pieza de trabajo, lo que permite contrarrestar los grandes esfuerzos que se producen. Además, la placa de soporte juega un papel importante en la extracción del calor.

1.2.1 Etapas del proceso FSW

El proceso de soldadura por fricción-agitación se divide en tres etapas: penetración de la herramienta, precalentamiento y soldadura.

La etapa de penetración de la herramienta se subdivide en dos pasos:

1. Posicionamiento de la herramienta Figura 1.2a.

Para iniciar el proceso FSW, se desplaza el pin de la herramienta hacia abajo en dirección al material que se va a unir, este movimiento permite establecer contacto con la superficie superior de la pieza de trabajo y genera una referencia que actúa como punto de partida del proceso.

2. Penetración de la herramienta en el material Figura 1.2b.

Con la posición del pin de la herramienta establecido, se procede a introducir el pin, a medida que gira, hasta que el hombro de la herramienta entra en contacto con las superficies de las piezas de trabajo [12].

El hombro de la herramienta se sumerge en el material a una profundidad preestablecida, normalmente de 0.1 a 0.2 mm, con el objetivo de evitar que el pin de la herramienta entre en contacto con la placa de soporte. El hombro de la herramienta genera calor adicional por fricción en la unión soldada, lo que provoca que el material se plastifique [13].

La segunda etapa del proceso FSW es el precalentamiento Figura 1.2c.

En este periodo la herramienta se mantiene rotando en la misma posición hasta que se genere y transfiera el calor necesario para que el material se plastifique completamente alrededor de la herramienta, obteniendo así un flujo estable. Si el tiempo de precalentamiento es demasiado corto y no se logra que el material se plastifique adecuadamente, se podría provocar que la herramienta se fracture debido a las altas fuerzas ejercidas sobre ella [13]. Si se excede el tiempo de precalentamiento puede ocasionar que el material se funda y no pueda fluir correctamente alrededor de la herramienta.

La última etapa del proceso de soldadura por fricción-agitación es la soldadura:

Cuando el material está completamente plastificado, la herramienta a medida que gira se desplaza a lo largo de la línea de unión y el calor generado por fricción continua a un ritmo constante Figura 1.2d.

Una vez terminado el proceso de soldadura se procede a retirar la herramienta a medida que gira, Figura 1.2e.

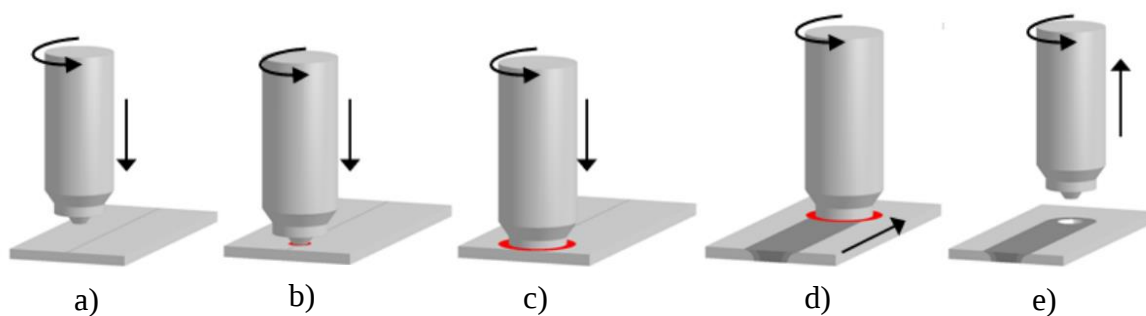


Figura 1.2 Etapas del proceso FSW: a) Posicionamiento de la herramienta; b) Penetración de la herramienta; c) Precalentamiento; d) Soldado; y e) Fin de la soldadura y retiro de la herramienta [14].

1.2.2 Microestructura de la soldadura

El proceso de soldadura FSW ocasiona alteraciones microestructurales en el material que influyen significativamente sobre las propiedades mecánicas de la unión. Estas modificaciones, que representan la transformación desde un estado inicial hasta uno final, son resultado de una deformación plástica intensa y la exposición a altas temperatura dentro de la zona de unión que el material experimenta. Con base a como es afectada la microestructura del material se pueden identificar diversas regiones o zonas:

- **Material no afectado o metal base (BM):**
Este material se encuentra alejado de la zona de soldadura, por lo que no ha sufrido deformación y aunque puede haber experimentado un flujo de calor, el material no se ve afectado en términos de microestructura o propiedades mecánicas [2].
- **Zona afectada por el calor (HAZ):**
Esta región se encuentra más cercana al centro de la soldadura. En esta zona, el material fue expuesto a un ciclo térmico que ha modificado la microestructura y/o las propiedades mecánicas de éste. Sin embargo, no ocurren deformaciones plásticas en esta área [2].
- **Zona afectada termo-mecánicamente (TMAZ):**
En esta área la herramienta del proceso FSW ha deformado plásticamente el material, y el calor del proceso también ejerce cierta influencia sobre el material. En el caso de aleaciones de aluminio es posible obtener una deformación plástica significativa sin que ocurra recrystalización en esta región, generalmente se puede observar una limitación clara entre la zona recrystalizada (el núcleo de la soldadura) y las zonas deformadas de la TMAZ [2].
- **Núcleo de la soldadura:**
Se le suele llamar zona agitada y se refiere a la zona previamente ocupada por el pin de la herramienta. Se distingue de la zona TMAZ porque se produce el proceso de recrystalización dinámica, esta zona se caracteriza por una microestructura de granos finos equiaxiales recrystalizados [2].

La Figura 1.3 muestra las zonas microestructurales formadas durante el proceso de soldadura por fricción-agitación de un aluminio 7075-T651. El proceso FSW produce una zona afectada por el calor pequeña, comparado con los procesos de soldadura tradicional, debido a que el flujo de calor al que se ve expuesto el material es inferior en el proceso FSW. Como resultado se obtienen uniones con una alta resistencia mecánica y tenacidad, aun en comparación con el metal base.



Figura 1.3 Zonas microestructurales en la soldadura FSW [2].

1.2.3 Ventajas, desventajas y áreas de aplicación del proceso FSW

El proceso de soldadura por fricción-agitación es un proceso de unión económico debido a que no es un proceso que utilice una alta cantidad de energía, aproximadamente utiliza un 20% menos de entrada de calor en comparación con los métodos convencionales de soldadura. Además, el proceso FSW requiere de una preparación superficial mínima y no genera humos ni gases tóxicos que puedan afectar la salud del operador u otras personas.

La principal ventaja de este proceso es su capacidad de unir materiales y aleaciones diferentes como el cobre y el aluminio, con resultados excelentes. Inclusive es capaz de unir materiales que con anterioridad eran considerados difíciles de soldar. Este método de soldadura ha demostrado varias ventajas sobre los métodos de soldadura tradicionales, algunas de las cuales se detallan a continuación [1]:

- Al ser un proceso de soldadura en estado sólido, no presenta problemas de fisuras en caliente ni porosidades.
- No se produce humo ni salpicaduras no deseadas de metal fundido, que son comunes en otros procesos de soldadura como la soldadura por fusión. Además, no hay radiación ultravioleta en el proceso de soldadura, por lo que es respetuoso con el medio ambiente.
- No se requiere de material de relleno ni gas de protección para este proceso de soldadura.
- Este tipo de soldadura se puede automatizar fácilmente, lo que reduce la necesidad de soldadores altamente capacitados.
- Se puede realizar soldadura en cualquier posición.
- Las propiedades mecánicas del material no se degradan después del proceso FSW, existen casos en los que las propiedades incluso mejoran.
- Puede aplicarse a diferentes tipos de uniones como las uniones de traslape, las uniones a tope, las uniones en T, las uniones a tope con filete, entre otras.
- Puede utilizarse para unir aleaciones de aluminio que previamente eran consideradas imposibles de soldar.

- Este proceso de soldadura produce tamaños de granos finos, lo que resulta en una soldadura de alta calidad.

Entre las limitaciones del proceso FSW se encuentran [1]:

- Requiere fuerzas de empuje y de desplazamiento significativas, por lo que la pieza de trabajo necesita ser sujeta de manera más sólida que en la soldadura por arco.
- Cuando se completa el proceso de soldadura y se retira la herramienta queda un agujero de salida en la pieza de trabajo.
- La inversión inicial en una máquina de soldadura por fricción-agitación puede ser demasiado elevada.
- El desgaste de la herramienta puede ser excesivo, mucho más si se realiza en materiales que requieren mayor temperatura.

Las diferentes características descritas anteriormente, hacen que el proceso de soldadura FSW encuentre aplicación en diferentes industrias. Las aplicaciones van desde la microsoldadura de componentes electrónicos hasta la fabricación de componentes automotrices y aeroespaciales de alta resistencia. Inicialmente el proceso de soldadura FSW estaba limitado a materiales de bajas temperatura de fusión, gracias al desarrollo de herramientas de alta resistencia como el nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN), tungsteno-rhenium y cerámicas, es posible en la actualidad soldar materiales de altas temperaturas de fusión. Algunas de las áreas de aplicación del proceso de soldadura por fricción-agitación son [17]:

- Industria marítima:

La construcción naval y la industria marítima fueron de los primeros sectores industriales en adoptar el proceso FSW en aplicaciones comerciales. Este proceso es adecuado para unir paneles de cubiertas y suelos, extrusiones de aluminio, cascos y superestructuras, también se utiliza en plataformas de aterrizaje de helicóptero y estructuras submarinas.

- Industria aeroespacial:

En la industria aeroespacial, empresas como Boeing utilizan la soldadura por fricción-agitación para unir tanques de propelente de los vehículos de lanzamiento Delta II, III y IV, así como partes no estructurales para sus aeronaves civiles. Boeing ha demostrado con éxito el uso del FSW en partes complejas que requieren trayectorias curvilíneas, como las puertas del tren de aterrizaje.

El tanque externo del transbordador espacial es construido utilizando el proceso FSW, el cual permite la unión de una nueva aleación de aluminio-litio Al-Li 2195 la cual es mucho más ligera. De esta manera se logra que el tanque externo del transbordador espacial en la actualidad sea mucho más ligero. Además, el proceso FSW produce soldaduras más fuertes y fáciles de realizar. Pruebas mecánicas realizadas han demostrado que el proceso FSW produce uniones con más del doble de resistencia que una unión remachada de una sola fila. El proceso FSW se puede usar para la unión y elaboración de alas, fuselajes, tanques de combustible de aviación y cohetes militares.

- Industria automotriz:

El aumento del uso de aluminio en la industria automotriz, especialmente en motores, trenes de transmisión, intercambiadores de calor, ruedas y refuerzos de parachoques. Han llevado a la implementación del proceso de soldadura FSW en esta industria.

El proceso FSW se utiliza en la industria automotriz para soldar muchas piezas juntas como chasis, tanques de combustible y otros componentes estructurales con el objetivo de reducir peso. En Suecia, los marcos de los asientos de automóviles son soldados utilizando dos cabezas de soldadura FSW.

- Otras aplicaciones:

La soldadura por fricción-agitación se utiliza en la industria ferroviaria para la construcción de las cabinas de los trenes, mediante la unión de los paneles. También se utiliza en la industria química para la fabricación de intercambiadores de calor, tuberías, etc. En la industria electrónica, se utiliza la soldadura FSW para unir aluminio con cobre, conectores y otros equipos electrónicos.

1.3 Parámetros del proceso FSW

Los principales parámetros del proceso de soldadura por fricción-agitación se enumeran en la Tabla 1.1. Estas variables desempeñan un papel importante en la determinación del resultado final de la soldadura. El principal objetivo en estudiar el efecto de los parámetros durante el proceso FSW es comprender su impacto en las propiedades mecánicas estáticas de la unión, la resistencia a la fatiga, las propiedades de corrosión, resistencia a la corrosión en tensión y tenacidad, permitiendo de esta manera maximizar la productividad y el rendimiento del proceso FSW [18].

Tabla 1.1 Principales parámetros del proceso FSW [18].

Parámetros de la herramienta	Parámetros de la máquina	Otras variables
- Material del hombro/pin - Diámetro del pin - Diámetro del hombro - Largo del pin - Paso de la rosca - Características de la geometría	- Velocidad de soldadura - Velocidad de rotación - Fuerza de penetración o profundidad - Ángulo de inclinación	- Material de la placa de soporte - Tamaño de la placa de soporte - Tamaño de la pieza de trabajo - Propiedades de la pieza de trabajo

Los principales parámetros del proceso FSW se dividen en:

1.3.1 Parámetros de la herramienta

El diseño de la herramienta afecta en gran medida la calidad de la soldadura. Existen diferentes tipos de diseño de herramientas que se utilizan en el proceso FSW, cada uno tiene influencia en la calidad final de la unión soldada. El material de la herramienta debe tener propiedades de alta resistencia al desgaste para producir una soldadura con un buen acabado superficial. Además, la herramienta debe conducir menos calor, para minimizar las pérdidas de calor [1]. El instituto TWI durante los últimos 25 años ha identificado un pequeño grupo de materiales que se pueden adquirir y mecanizar con razonable facilidad, entre los que se encuentran:

- Acero para herramientas de trabajo en caliente (AISI H13 HWTS ha sido utilizado extensivamente)
- Aceros de alta velocidad
- Superalcaciones (basadas en Ni y Co)
- Carburos cementados (WC-Co, con uso limitado)

En la Tabla 1.2 se muestra un resumen comparativo de los materiales utilizados para las herramientas del proceso FSW.

Tabla 1.2 Propiedades relativas de materiales para herramientas FSW para soldar aleaciones de Al de alta resistencia.

Material de la herramienta	Propiedades del material	Maquinabilidad relativa	Coste relativo	Disponibilidad
WC	Buena resistencia, mala tenacidad a baja temperatura.	Pobre	Bajo	Razonable
Densimet D176	Fuerza y dureza razonables.	Bien	Medio	Bien
TZM	Resistencia y tenacidad razonables, pero produce un humo de óxido peligroso a temperaturas elevadas.	Bien	Medio	Bien
Aleaciones Nimónicas	Buena resistencia, pero dureza relativamente baja.	Razonable	Alto	Pobre
MP159	Buena fuerza y tenacidad.	Razonable	Alto	Razonable

La geometría de la herramienta desempeña un papel fundamental en el flujo del material y determina la velocidad de avance a la que se puede llevar a cabo la soldadura por fricción-agitación. La herramienta FSW está conformada de dos partes de un hombro y de un pin:

1.3.1.1 Hombro de la herramienta

El hombro de la herramienta se encarga de generar calor por deformación y calor por fricción en la parte superior de la pieza a medida que el pin de la herramienta se sumerge en el material. El hombro de la herramienta es responsable de aplicar una presión hacia abajo en la línea de soldadura. El hombro de la herramienta puede ser cóncavo, plano o convexo [2]. El hombro cóncavo de la herramienta se logra al permitir un ángulo (normalmente de 6 ° a 10 °) entre el borde del hombro y el pin. Para que sea efectiva la forma de la herramienta, se inclina negativamente con respecto a la línea de la soldadura, es decir se inclina hacia atrás. La Figura 1.4 ilustra una herramienta con hombro cóncavo [2].

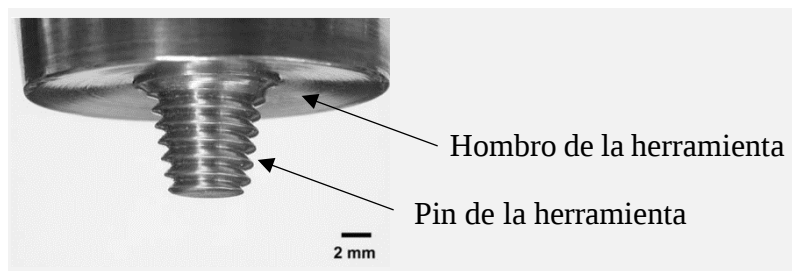


Figura 1.4 Herramienta con hombro cóncavo [15].

Algunos estudios realizados por el instituto TWI recomiendan que cuando el hombro de la herramienta es cóncavo se debe de incluir ciertas características en el hombro, como elevaciones que ayudan al movimiento del material desde el exterior del hombro hacia el interior del pin, de lo contrario, el material es empujado lejos de la punta [14]. El uso de hombros cóncavos aumenta la cantidad de deformación del material, lo que resulta en la mezcla adecuada del material. En la Figura 1.5 se muestra una herramienta con hombro de tipo convexo.

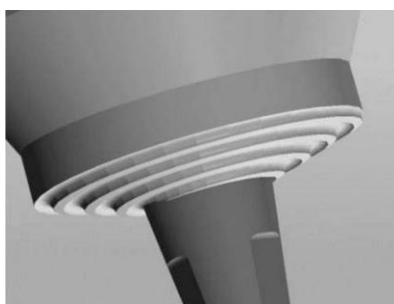


Figura 1.5 Herramienta con hombro convexo [2].

1.3.1.2 Pin de la herramienta FSW

El pin de la herramienta produce deformación del material debido al efecto de agitación y al calor por fricción en la intersección de la junta. Rompe el material frente a la herramienta y lo desplaza hacia la parte posterior de esta durante la rotación [2].

El instituto TWI ha desarrollado diferentes perfiles de pin en relación con el grosor de las placas que se van a soldar. La gama de formas del pin de la herramienta FSW puede ser cilíndrica, cono truncado, roscado o sin rosca, también puede incluir superficies planas mecanizadas en la punta de la herramienta [2]. En la Figura 1.6 se muestran algunos ejemplos de los perfiles de pin típicos. El diseño de la punta se optimiza con el objetivo de obtener mejor rendimiento de soldadura.

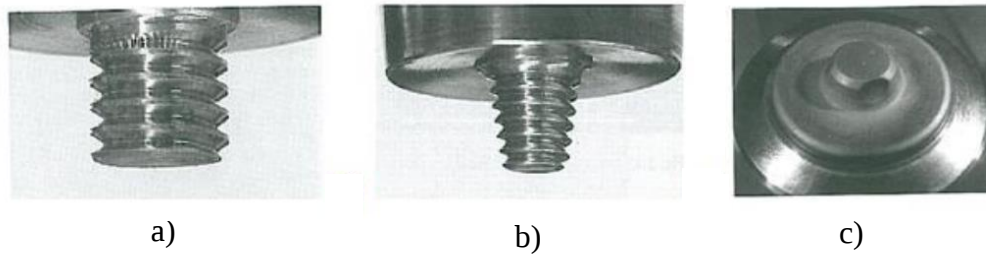


Figura 1.6 a) Pin cilíndrico roscado; b) Pin cono truncado roscado, con hombro cóncavo; c) Herramienta de pin sin rosca con superficies planas en la punta [15].

El pin cilíndrico roscado fue de los primeros en ser utilizados por el instituto TWI y hoy en día sigue siendo uno de los diseños más utilizados [15]. Como se muestra en la Figura 1.6a el pin roscado es más fácil de maquinar, pero no se puede utilizar a altas velocidades de desplazamiento, por esta razón se desarrolló un cono truncado con cargas transversales más bajas. Este diseño se desarrolló para materiales de alta temperatura, ya que las mayores cargas en la herramienta se encuentran en la base del cono [2]. En la Figura 1.6b se puede apreciar este tipo de diseño.

La herramienta de FSW puede incorporar superficies planas en el pin para mejorar la mezcla del material en la línea de la junta soldada. Estas superficies aumentarán la interrupción del material y mejoran el flujo del material plastificado [2, 15]. La Figura 1.6c muestra tres superficies planas a lo largo de la circunferencia del pin.

Se recomienda utilizar un pin sin rosca para soldar materiales de alta temperatura, ya que, durante la soldadura de estos materiales se produce desgaste excesivo de la herramienta. El desgaste debilita la punta y como resultado puede producirse la fractura prematura o una falla del pin [2].

En la Figura 1.7 se muestran las geometrías de las herramientas más usadas en la soldadura por fricción-agitación. En todas ellas existe una geometría helicoidal cuya función es asegurar que el material deformado plásticamente se dirija hacia la zona inferior de la pieza. Algunas de estas herramientas disponen de secciones no circulares para reducir el área y material de la herramienta y facilitar la circulación del material deformado plásticamente [16].

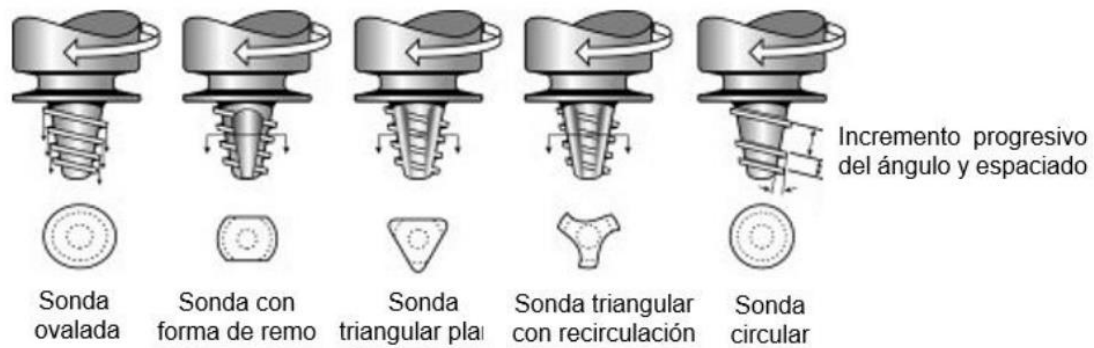


Figura 1.7 Tipos de Herramientas usadas en la soldadura por fricción-agitación [17].

1.3.2 Parámetros de la soldadura

1.3.2.1 Velocidad de rotación y velocidad de avance

En el proceso de soldadura FSW existen dos parámetros que son muy importantes: la velocidad de rotación de la herramienta ω (rpm) en dirección horaria o antihoraria y la velocidad de avance de la herramienta v (mm/min) a lo largo de la línea de unión. La rotación de la herramienta genera la agitación y mezcla del material alrededor del pin, la traslación de la herramienta mueve el material agitado desde la parte frontal hacia la parte trasera del pin y finaliza el proceso de soldadura [2]. Estos dos parámetros del proceso tienen una gran influencia en la calidad y las propiedades del resultado final de la soldadura ya que afectan de manera directa en la generación de calor resultante durante el proceso FSW. Aumentar la velocidad de rotación o disminuir la velocidad de avance tendrá como resultado un aumento de la producción de temperatura, lo cual es necesario para lograr una soldadura exitosa. Es de vital importancia que el material alrededor de la herramienta alcance la plasticidad para ayudar a disminuir las fuerzas que actúan sobre la herramienta, esto solo se logra si el material se calienta lo suficiente. Si el material no logra calentarse lo necesario, se desarrollarán vacíos u otros defectos en la soldadura, y también se pueden provocar daños en la herramienta debido a las fuerzas extremas requeridas. De igual manera un aporte de calor excesivo no es adecuado para las propiedades finales de la soldadura, esto puede ocasionar un defecto de licuación en materiales de bajo punto de fusión. Por lo tanto, las velocidades de soldadura deben controlarse adecuadamente para garantizar una buena calidad en la unión soldada [1].

1.3.2.2 Ángulo de inclinación del pin y profundidad de inserción de la herramienta

Otro parámetro importante en el proceso FSW es el ángulo del pin respecto a la superficie de la pieza de trabajo, una inclinación adecuada del pin de la herramienta hacia la dirección de avance garantiza que el hombro de la herramienta retenga el material agitado y permita que el pin mueva el material de manera eficiente desde la parte frontal hacia la parte posterior de la línea de soldadura. El ángulo de inclinación tiene una alta influencia en la calidad final de

la unión soldada, crea una ligera inclinación de entre 2 y 4° en la soldadura lo que permite contrarrestar los efectos negativos que generan las fuerzas descendentes sobre la unión [1,2].

Otro parámetro importante en el proceso FSW es la profundidad de inmersión, que es la profundidad a la que la herramienta se inserta en la pieza de trabajo, y está relacionada con la altura del pin de la herramienta. Cuando la profundidad de inserción es muy superficial el hombro de la herramienta no entra en contacto con la superficie de la pieza de trabajo, por lo que no se puede generar la fricción necesaria para la generación de calor. Además, el hombro de la herramienta no es capaz de mover eficientemente el material agitado de la parte frontal a la parte posterior del pin, lo que resulta en la generación de defectos en la soldadura. Cuando la profundidad de inserción es demasiado profunda, el hombro de la herramienta se sumerge en la pieza de trabajo creando un exceso de material fundido, lo cual produce una soldadura de tipo cóncava que conlleva al adelgazamiento local de las piezas soldadas [2].

1.4 Trabajos de investigación relacionados con el proceso FSW

El proceso de soldadura por fricción-agitación ha ganado mucha atención en la comunidad de la investigación debido a su gran importancia como tecnología de fabricación en la industria. Este proceso se encuentra en constante evolución y como resultado de las diferentes actividades de investigación ha adquirido una serie de mejoras. Algunos de los trabajos de investigación relacionados al proceso FSW se presentan a continuación.

Dong *et al.* [19] y Chao *et al.* [20] analizaron el comportamiento termo-mecánico del proceso FSW. Los investigadores realizaron el análisis de la distribución del calor generado utilizando técnicas experimentales y modelos numéricos en el proceso FSW. Realizaron pruebas experimentales en las que usaron termopares para registrar las temperaturas transitorias durante el proceso de soldadura tanto en la pieza de trabajo como en la herramienta. Mediante un modelo numérico se modeló la herramienta y se generó una malla de elementos finitos para simular la distribución de temperatura en la herramienta durante el proceso de soldadura, se llevó a cabo un experimento separado utilizando una máquina de soldadura por fricción-agitación personalizada para determinar la potencia mecánica aplicada al proceso de soldadura. Esta información se utilizó para calcular la cantidad de energía térmica generada durante la soldadura en fricción-agitación. Finalmente, al comparar la potencia mecánica aplicada al proceso con la cantidad de calor generado, se pudo determinar la eficiencia de conversión de energía mecánica en calor en el material de trabajo y en la herramienta. Esto permitió calcular la proporción de calor dirigido a la pieza de trabajo y a la herramienta. Los resultados indicaron que la mayor parte del calor generado (alrededor del 95%) se dirige a las láminas de soldadura y solo un 5% del calor se dirige a la herramienta de soldadura. Por otro lado, Jain *et al.* [21] realizaron un estudio de la distribución de temperatura y deformación en el proceso FSW mediante el uso de una simulación por

elementos finitos. Como resultado del estudio se logró representar la distribución de temperatura en la pieza de trabajo y en la herramienta, observando que la temperatura máxima se ubica en la superficie superior de la pieza de trabajo.

Sadeghian *et al.* [22] estudiaron el comportamiento del flujo de materiales disímiles durante el proceso de soldadura por fricción-agitación, su objetivo fue desarrollar una capacidad predictiva para entender cómo se comporta el flujo de materiales disímiles en este proceso. Para lograrlo, llevaron a cabo simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) y térmicas para determinar la distribución de temperatura y la velocidad del flujo de material durante la soldadura. Para predecir la morfología de la soldadura, los investigadores utilizaron el método del conjunto de nivel con base a los resultados obtenidos a partir de las simulaciones de CFD. En estas simulaciones exploraron diferentes velocidades de rotación de la herramienta, posiciones de desplazamiento y niveles de altura de las muestras de acero y aluminio soldadas juntas. La validez de los resultados de la simulación se comprobó a través de experimentos, observando que los datos de la simulación coincidieron notablemente con los datos experimentales. Los resultados de las simulaciones realizadas por Sadeghian *et al.* revelaron que, al aumentar la velocidad de rotación y el desplazamiento a través del lado de acero, se generaban más partículas de acero en la zona soldada, y estas partículas eran más abundantes en la parte superior de la sección de soldadura en comparación con las partes intermedias y más bajas. Además, se observó que la causa principal de los defectos en la zona de soldadura se debía a las partículas de acero que se desprendían y se incorporaban en la matriz de aluminio como se observa en la Figura 1.8, lo que ocasionaba micro fisuras en las interfaces de ambos materiales debido a sus propiedades significativamente diferentes. Sadeghian *et al.* demostraron que los defectos de la soldadura se podían reducir desplazando el pin de la herramienta a través del aluminio para minimizar la presencia de partículas de acero en la zona agitada. También se identificó que los diferentes niveles de altura en la sección de la soldadura presentaban distintos comportamientos de flujo, con más partículas de acero en la parte superior y menos flujo de material y mezcla de metales diferentes en la parte inferior.

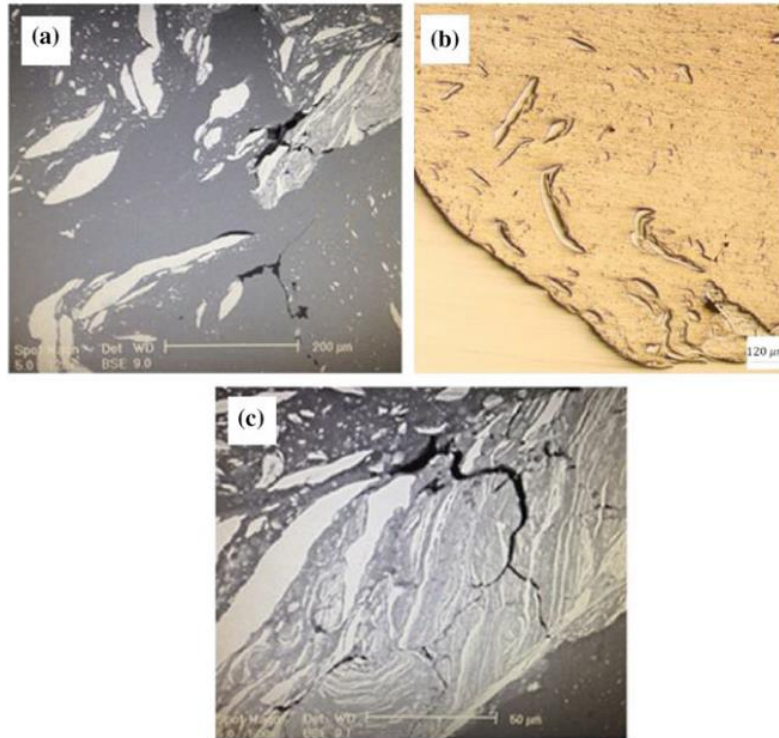


Figura 1.8 a) Micrografía electrónica de barrido (SEM) de partículas de acero en una matriz de aluminio. b) Microscopía óptica de partículas de acero en una matriz de aluminio. c) Propagación de una grieta junto a una partícula de acero [22].

Cunha *et al.* [23] realizaron un estudio para analizar el efecto de la velocidad de soldadura en las propiedades mecánicas y microestructurales del acero GL E36 utilizado en la construcción de barcos y soldado por el proceso FSW. Variaron la velocidad de soldadura entre 1 y 3 mm/s, manteniendo constante la velocidad de rotación de la herramienta en 500 rpm a lo largo de los experimentos. Los resultados revelaron que se logró una soldadura de muy buena calidad, lo que indica una estabilidad en los parámetros del proceso utilizados en el estudio. Las macrofotografías de la soldadura mostraron diferentes patrones de flujo de material según el aporte de calor basado en la velocidad de soldadura empleada. Se observaron granos grandes en la zona agitada y todas las muestras de tracción no se rompieron en la unión de soldadura, sino en el material base, lo que demuestra que las uniones de soldadura tienen una mayor resistencia. Cuando se utilizó una velocidad alta de soldadura, 3 mm/s, se observó falta de penetración, lo que podría mejorarse aumentando la fuerza axial. La Figura 1.9 muestra las microestructuras en el centro de las zonas agitadas de las uniones soldadas. Se observaron microestructuras mixtas complejas que consisten en ferrita (F), martensita (M) y bainita (B), como se indica en la Figura 1.9. Por otro lado, una velocidad de soldadura baja resulta en temperaturas de soldadura más altas, lo que produce un grano de austenita más grande. La microestructura se encontró que consiste en ferrita, martensita y bainita con diferentes niveles de refinamiento del grano. También se realizaron pruebas de resistencia de la soldadura; las fotografías de las probetas dobladas se muestran en la Figura

1.10. Las muestras procesadas a velocidades de soldadura de 1 y 2 mm/s pudieron doblarse completamente debido a la ausencia de defectos en la unión. Las muestras procesadas a una velocidad de soldadura de 3 mm/s muestran un defecto en la raíz de la unión, ésta falla en la raíz de la flexión conducirá a un mal desempeño en fatiga. Estos resultados demostraron que cuando se utilizan velocidades de soldadura más altas, se debe aumentar la carga axial para garantizar una agitación y un enlace adecuados del material.

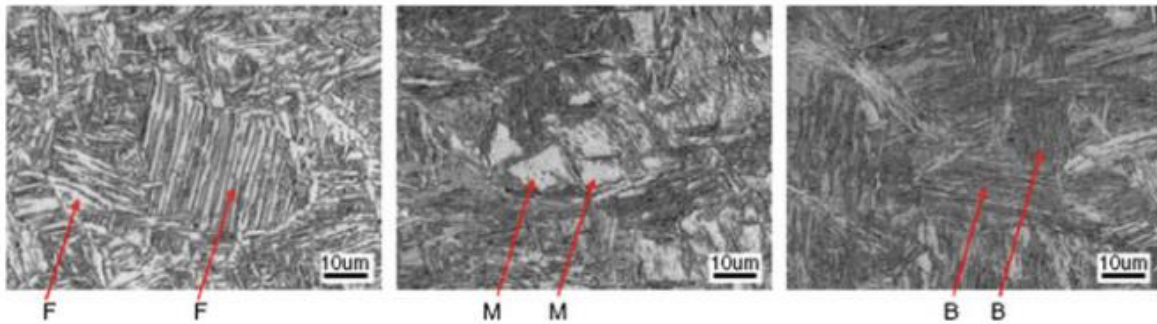


Figura 1.9 Microestructuras complejas y mixtas en la mitad del espesor del centro de la zona agitada, con ferrita resaltada como "F", martensita como "M" y bainita como "B" [23].

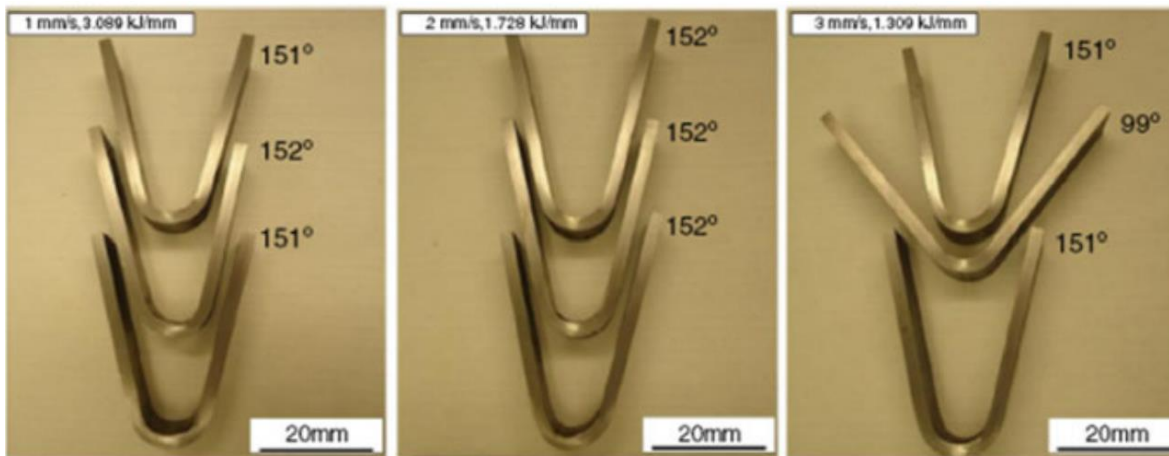


Figura 1.10 Probetas dobladas, entrada de calor y ángulo medido para cada condición de velocidad de soldadura [23].

Kaid *et al.* [24] estudiaron el comportamiento termo-mecánico del proceso de soldadura por fricción-agitación de la aleación de aluminio 6061-T6. Desarrollaron un modelo termo-estructural no lineal transiente en 3D para simular la distribución de temperatura y esfuerzos mecánicos durante el proceso de soldadura por fricción-agitación de la aleación de aluminio. Se compararon los datos experimentales con los resultados simulados de las distribuciones

de temperatura (perfil y temperatura máxima) y los esfuerzos residuales. Finalmente, los autores recomendaron el uso de un modelo de transferencia de calor para predecir la distribución de temperatura en el proceso de soldadura por fricción-agitación.

Por otro lado, Tejonadha Babu *et al.* [25] investigaron la influencia de intercambiar la disposición de los materiales base (es decir, el lado de avance y el lado de retroceso), en las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tensión y el límite de elasticidad, de la unión soldada utilizando una técnica de procesamiento de imágenes. Los resultados de este estudio mostraron que el primer modo de transferencia de metal aumenta a medida que se aumenta la velocidad de avance, lo que, a su vez tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas de la unión. Se lograron propiedades mecánicas mejoradas cuando se colocó el AS5052 en el lado de avance, mientras que el RS6061 se colocó en el lado de retroceso (AS5052RS6061). En ambas condiciones se produjeron soldaduras sin defectos. Las propiedades mejoradas se atribuyeron a la mezcla adecuada de los materiales en las uniones AS5052RS6061.

En [26] se analizó el comportamiento térmico existente en el área cerca de la unión soldada utilizando modelado numérico para tres configuraciones de herramienta: herramienta sin pin, herramienta sin hombro, y herramienta completa con hombro y pin. Las herramientas sin pasador produjeron temperaturas más bajas, con casi el 90% de la temperatura requerida generada únicamente por el hombro. El estudio encontró que la presencia tanto de un hombro como de un pasador en la herramienta causaba deformación en la zona de calor, con menores deformaciones observadas para las herramientas sin pasador y sin hombro. Por su parte, Kumar *et al.* [27] se centraron en investigar el proceso de soldadura por fricción-agitación de la aleación de aluminio AA-7075-T651 con placas de 6 mm de espesor. Se encontró que las uniones soldadas producidas utilizando el proceso FSW no presentaban defectos. Después de la selección de los mejores parámetros del proceso, se obtuvieron soldaduras completamente penetradas. La observación óptica mostró que la unión soldada y el área circundante se pueden dividir en cuatro zonas: SZ, TMAZ, HAZ y BM. El examen microestructural de las diversas zonas mostró que SZ tenía granos muy finos y equiaxiales. También se realizó una medición de microdureza en la unión soldada y el material base, y se encontró que la dureza promedio del material base era mayor en comparación con la de la unión soldada. La menor dureza se observó en la zona afectada por el calor. La resistencia a la tracción del material base y la unión soldada también se evaluaron y se obtuvieron como 574 MPa y 278 MPa, respectivamente.

En [28] analizaron las soldaduras FSW disimilares para placas de AA6082 y AA5456. Los resultados del estudio indican que la velocidad de la herramienta es el parámetro más importante en comparación con otras variables como la velocidad de avance, el perfil de la herramienta, el ángulo de inclinación, y así sucesivamente. El estudio recomendó mejoras en la configuración de ejecución de la FSW, con una velocidad de avance de 200 mm/min, una velocidad de rotación de la herramienta de 1000 rpm, un ángulo de inclinación de la

herramienta de 10° y una profundidad de pasador de 4 mm. Los resultados también revelaron que un pasador recto con las condiciones óptimas superó en rendimiento a los perfiles de pasador roscado y cónico. Battina *et al.* [29] evaluaron las condiciones optimizadas para la implementación del proceso FSW en la unión de materiales disimilares de AA6061 y AA2017 utilizando simulación y un entorno experimental. El estudio observó que una velocidad de rotación de la herramienta de 1300 rpm, una velocidad de avance de 20 mm/min y un ángulo de inclinación de la herramienta de 1° fueron las condiciones optimizadas para unir materiales disimilares mediante el proceso FSW en comparación con cualquier otra condición probada en el estudio.

Matitopanum *et al.* [30] utilizaron el uso de un aprendizaje automático para predecir la resistencia mecánica de una junta soldada por FSW utilizando las aleaciones disímiles AA5083 y AA5061. Se consideraron 11 parámetros de proceso de entrada y utilizó modelos de regresión de proceso gaussiano y máquina de vectores de soporte. Se encontró que el modelo era más preciso que los otros modelos sugeridos. En otro estudio similar se utilizaron los modelos de árbol de decisiones, bosque aleatorio y XGBoost para predecir las propiedades mecánicas de la aleación AA6061-T6 [31]. De todos los modelos probados en el estudio, el modelo XGBoost obtuvo una precisión de más del 95%.

De los trabajos reportados en la literatura se observa que a lo largo de los años se han abordado diversos aspectos clave, como la influencia de los parámetros del proceso, la microestructura de las uniones soldadas, la resistencia mecánica, la distribución de temperatura durante la soldadura y la optimización de parámetros. Estas investigaciones han contribuido a mejorar la comprensión y el control del proceso FSW, permitiendo avances significativos en la tecnología de soldadura por fricción-agitación. Sin embargo, a pesar de los logros alcanzados, aún se identifican áreas de investigación pendientes, como la comprensión más profunda de los mecanismos de formación de defectos, la optimización de la microestructura de las uniones soldadas, y la exploración de nuevas técnicas de caracterización y materiales innovadores para seguir mejorando y ampliando la aplicación del FSW en diversas industrias. Además, si bien se ha abordado la influencia de los parámetros de proceso en las propiedades de las uniones soldadas, es crucial seguir investigando para comprender mejor cómo estos parámetros afectan la calidad de las soldaduras y las propiedades mecánicas resultantes. Explorar en mayor detalle la interacción entre los diferentes parámetros, así como su impacto en la microestructura y resistencia de las uniones soldadas, permitirá avanzar hacia una optimización más precisa y eficiente del proceso FSW. Este enfoque en la optimización paramétrica puede contribuir a mejorar la reproducibilidad, la calidad y la eficiencia del proceso de soldadura por fricción-agitación, así como el desarrollo de modelos analíticos que permitan predecir el comportamiento del proceso FSW.

Capítulo 2

Análisis del proceso de soldadura por fricción-agitación

Las innovaciones en procesos suelen basarse en la experiencia acumulada a través de ensayos de laboratorio. La soldadura por fricción-agitación no es la excepción, con desarrollos iniciales en aleaciones de aluminio y posteriormente extendiéndose a otras aleaciones de ingeniería. Sin embargo, el potencial de los modelos actuales del proceso FSW debe ser aprovechado para respaldar y guiar el trabajo experimental, permitiendo acelerar su adopción en aplicaciones industriales y reducir los costos de desarrollo.

El modelado del proceso FSW se basa en la comprensión científica de los mecanismos y fenómenos físicos involucrados en el proceso, y tiene un gran potencial para influir en el diseño de herramientas, predecir las condiciones operativas en nuevos materiales o configuraciones de uniones y optimizar las condiciones del proceso para lograr su máxima eficiencia.

Existe una gran variedad de trabajos de modelado del proceso de soldadura por fricción-agitación, que varían desde modelos analíticos simples que se centran únicamente en aspectos térmicos hasta modelos numéricos más complejos que abordan las interacciones termomecánicas. Todos estos modelos están basados en ecuaciones de nivel continuo, ofrecen una representación de la mecánica del proceso mediante variables macroscópicas como la temperatura, la velocidad del flujo del material, la tensión, la deformación, la velocidad de deformación, entre otras.

Tanto los modelos analíticos como los numéricos desempeñan un papel importante en el análisis del proceso FSW. En la actualidad predomina el uso de modelos numéricos debido a que son más versátiles, se aplican en programas de cómputo y permiten realizar cambios en las variables del proceso para evaluar su comportamiento. El modelado numérico se basa en representaciones discretas de soldadura específicas, utilizando técnicas de elementos finitos, diferencias finitas o volúmenes finitos. Estos modelos pueden capturar una gran parte de la complejidad en el comportamiento constitutivo del material, las condiciones de contorno y la geometría. Sin embargo, el alto consumo computacional que requieren estos modelos implica que, en la práctica se tienda a estudiar un rango limitado de las condiciones del proceso [2].

Los mecanismos de generación de calor se caracterizan por la disipación de calor debido a la fricción y la deformación plástica, que a su vez están acopladas a la condición de contacto con la interfaz (grado de adherencia/deslizamiento), y al campo de flujo del material. La Figura 2.1. muestra una vista esquemática de la configuración del proceso FSW, donde se identifican los diferentes componentes [18].

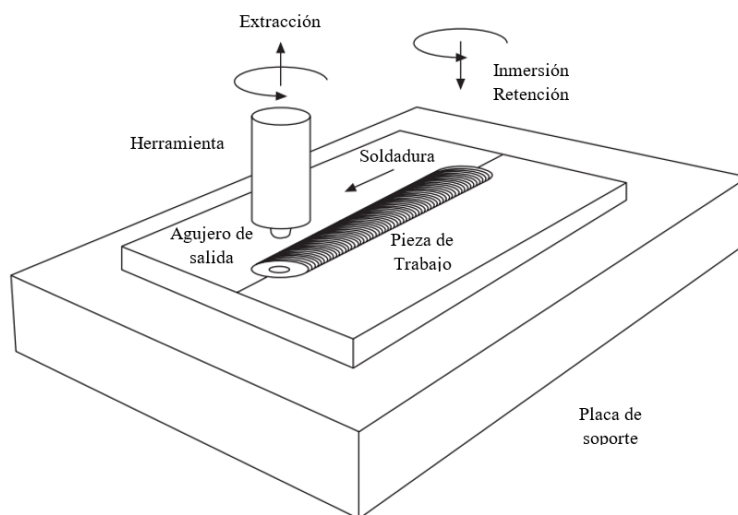


Figura 2.1 Esquema de la configuración de la FSW con la pieza de trabajo, la herramienta y la placa de respaldo, así como el movimiento de la herramienta durante los periodos de inmersión, retención, soldadura y extracción [18].

2.1 Modelo analítico de la generación de calor

Para el análisis del proceso de soldadura FSW, es necesario contar con un modelo analítico que pueda estimar la cantidad de generación de calor. Este modelo se basa en algún comportamiento constitutivo para el equilibrio de fuerzas entre la herramienta y la pieza de trabajo, siendo el más clásico la ley de fricción de Coulomb. El modelo analítico de la fuente de calor tiene en cuenta algunos de los parámetros del proceso, que en su forma más simple es la velocidad de rotación. Sin embargo, los modelos analíticos clásicos no incluyen el efecto de la velocidad de soldadura, que es un parámetro del proceso extremadamente importante. Bajo la suposición de deslizamiento, la fuerza de inmersión (fuerza Z) se puede utilizar para estimar la presión bajo la herramienta, que luego se puede utilizar en una ley de fricción tipo Coulomb. Una de las desventajas es que algunas versiones de estos modelos analíticos necesitan datos de entrada medidos experimentalmente, como la fuerza Z . En el caso de una soldadura instrumentada, también se podría monitorear el par necesario para girar la herramienta, lo que permitiría medir directamente la generación total de calor por la herramienta [18].

Durante el proceso FSW, se genera calor cerca de las superficies de contacto, las cuales pueden tener geometrías complejas de acuerdo con la geometría de la herramienta. Sin embargo, en el modelo analítico, se asume que el diseño de la herramienta tiene superficie de hombro cónica o superficie plana en los casos más sencillos. La geometría del pin de la herramienta es cilíndrica y con una punta plana. La superficie de hombro cónica está caracterizada por el ángulo del cono α , que en el caso de un hombro plano se asume que el ángulo es igual a 0° . La Figura 2.2 muestra el diseño simplificado de una herramienta FSW cónica, donde R_h es el radio del hombro, R_p es el radio del pin y H_p es la altura del pin de la herramienta. En esta figura también se identifican las tres principales contribuciones de generación de calor de la herramienta, el hombro, el lateral del pin y la punta del pin de la herramienta, Q_1 , Q_2 , y Q_3 , respectivamente [32].

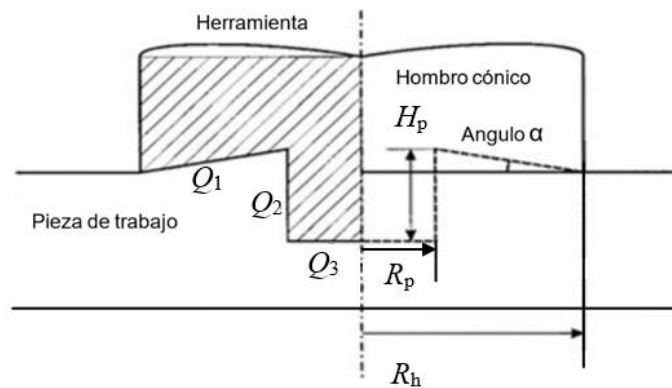


Figura 2.2 Contribuciones de generación de calor desde el hombro, el lado del pin y la punta del pin [32].

El calor se genera debido al movimiento relativo entre la herramienta y la pieza de trabajo. Hay dos contribuciones a la generación de calor: (i) disipación por fricción y (ii) disipación plástica o viscosa. La disipación por fricción está impulsada por el campo de esfuerzo de fricción en la interfaz de contacto. Sin embargo, es importante enfatizar que incluso bajo un alto grado de deslizamiento, debe haber alguna deformación del material presente para acomodar el flujo del material alrededor del pin de la herramienta. Por otro lado, la disipación plástica está impulsada por la deformación del material que ocurre en la capa de corte alrededor de la herramienta. En el siguiente análisis de las expresiones de generación de calor, no se considera si la condición de contacto es de deslizamiento o de adherencia, por lo que se escriben en forma general [18].

2.1.1 Generación de calor por el hombro de la herramienta

La superficie del hombro de una herramienta moderna de FSW es en la mayoría de los casos cóncava o cónica. Las expresiones analíticas para la generación de calor incluyen un hombro circular plano, en algunos casos omitiendo la contribución del pin [33]. Schmidt *et al.* extendieron las expresiones anteriores para incluir la superficie cónica del hombro y la superficie cilíndrica del pin [34]. Este modelo analítico para el fenómeno de generación de calor no incluye la distribución de presión no uniforme, las tensiones cortantes de fluencia dependientes de la velocidad de deformación y el flujo de material impulsado por roscas o estrías.

Al integrar la generación local de calor sobre el área de contacto del hombro, se obtiene la contribución de generación de calor proveniente del hombro:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \int_{R_p}^{R_h} \int_0^{2\pi} \tau_c \omega r^2 d\theta dr \\ &= \int_{R_p}^{R_h} 2\pi \tau_c \omega r^2 dr \\ &= \frac{2}{3} \pi \omega \tau_c (R_h^3 - R_p^3) \end{aligned} \tag{2.1}$$

Donde τ_c es el esfuerzo cortante ubicado en la interfaz de contacto entre la herramienta giratoria y la capa de corte/matriz, ω es la velocidad de rotación angular y r es el radio de la herramienta.

Para herramientas con un hombro cónico, el aumento del área de contacto genera una generación adicional de calor por el término $\tan \alpha$, donde α es el ángulo del hombro cónico. La generación de calor del hombro se modifica a:

$$Q_1 = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_c (R_h^3 - R_p^3) (1 + \tan \alpha) \tag{2.2}$$

2.1.2 Generación de calor por el lateral del pin de la herramienta

La generación de calor en el lado del pin se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} Q_2 &= \int_0^{H_p} \int_0^{2\pi} \tau_c \omega r^2 d\theta dz \\ &= \int_0^{H_p} 2\pi \tau_c \omega r^2 dz = 2\pi \omega \tau_c (R_p^2 H_p) \end{aligned} \tag{2.3}$$

2.1.3 Generación de calor por la base del pin de la herramienta

Considerando que el pin de la herramienta es cilíndrico, la generación de calor en la punta del pin se calcula como:

$$\begin{aligned} Q_3 &= \int_0^{R_p} \int_0^{2\pi} \tau_c \omega r^2 d\theta dr \\ &= \int_0^{R_p} 2\pi \tau_c \omega r^2 dr = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_c R_p^3 \end{aligned} \quad (2.4)$$

La generación total de calor es la suma de las tres contribuciones:

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2.5)$$

Para una herramienta con hombro plano el calor total generado se calcula:

$$Q_{t,p} = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_c (R_h^3 + 3R_p^2 H_p) \quad (2.6)$$

Mientras que para una herramienta de hombro cónico el calor total generado se obtiene:

$$Q_{t,c} = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_c \left((R_h^3 - R_p^3)(1 + \tan \alpha) + R_p^3 + 3R_p^2 H_p \right) \quad (2.7)$$

2.1.4 Influencia del estado de contacto: adherencia y deslizamiento

La ecuación (2.7) se basa en la suposición general de un esfuerzo cortante de contacto constante, pero los mecanismos detrás del esfuerzo cortante de contacto varían dependiendo si el material se encuentra en condición de deslizamiento o de adherencia. Si se asume la condición de interfaz de adherencia, la matriz más cercana a la superficie de la herramienta se adhiere a ella. La capa entre los puntos de material estacionario y el material que se mueve con la herramienta debe acomodar la diferencia de velocidad por corte. El esfuerzo cortante de contacto es entonces [32]:

$$\tau_c = \tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

donde τ_y y σ_y es la resistencia de cedencia al cortante y normal, respectivamente, del material en contacto a la temperatura de la soldadura.

Esto proporciona una expresión modificada de la ecuación (2.7), asumiendo la condición de adherencia:

$$Q_{t,a} = \frac{2}{3} \pi \omega \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \left((R_h^3 - R_p^3)(1 + \tan \alpha) + R_p^3 + 3R_p^2 H_p \right) \quad (2.9)$$

Suponiendo una condición de interfaz de fricción, donde la superficie de la herramienta y el material de soldadura se deslizan entre sí, la elección de la ley de fricción de Coulomb para describir la tensión de corte estima la tensión de fricción crítica necesaria para una condición de deslizamiento:

$$\tau_c = \tau_f = \mu p \quad (2.10)$$

Donde τ_f es el esfuerzo cortante por fricción, μ es el coeficiente de fricción de Coulomb del material de la herramienta y p es la presión de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo.

En condición de deslizamiento, la generación total de calor es:

$$Q_{t,d} = \frac{2}{3} \pi \omega \mu p \left((R_h^3 - R_p^3)(1 + \tan \alpha) + R_p^3 + 3R_p^2 H_p \right) \quad (2.11)$$

La solución analítica para la generación de calor bajo la condición de deslizamiento/adherencia parcial es simplemente una combinación de las dos soluciones respectivas, con una especie de función de ponderación. A partir de la condición de deslizamiento/adherencia parcial se deduce que la velocidad de deslizamiento entre las superficies es una fracción de ωr , lo que reduce la generación de calor por fricción durante el deslizamiento. Esto se compensa con la disipación plástica adicional debida a la deformación del material. De esta manera se permite una combinación lineal de las expresiones para el deslizamiento y la adherencia, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} Q_{t,d/a} &= \delta Q_{t,a} + (1 - \delta) Q_{t,d} = \\ &= \frac{2}{3} \pi \omega (\delta \tau_y + (1 - \delta) \mu p) \left((R_h^3 - R_p^3)(1 + \tan \alpha) + R_p^3 + 3R_p^2 H_p \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

donde δ es la variable de estado de contacto (tasa de deslizamiento adimensional). La ecuación (2.12) permite calcular la generación de calor en condiciones de deslizamiento completo cuando δ es igual a 0, en condición de adherencia completa cuando δ es igual a 1 y en condiciones de deslizamiento/adherencias parciales cuando δ se encuentra en el rango entre 0 a 1.

2.1.5 Proporciones de generación de calor

Para calcular el porcentaje de generación de calor de cada zona de la herramienta se consideraron las dimensiones: $R_h = 9$ mm, $R_p = 3$ mm, $H_p = 4$ mm y $\alpha = 10^\circ$ [2]. las proporciones de generación de calor son las siguientes:

$$f_1 = \frac{Q_1}{Q_t} = \frac{(R_h^3 - R_p^3)(1 + \tan \alpha)}{((R_h^3 - R_p^3)(1 + \tan \alpha) + R_p^3 + 3R_p^2 H_p)} = 0.86 \quad (2.13)$$

$$f_2 = \frac{Q_2}{Q_t} = \frac{3R_p^2 H_p}{((R_h^3 - R_p^3)(1 + \tan \alpha) + R_p^3 + 3R_p^2 H_p)} = 0.11 \quad (2.14)$$

$$f_3 = \frac{Q_3}{Q_t} = \frac{R_p^3}{((R_h^3 - R_p^3)(1 + \tan \alpha) + R_p^3 + 3R_p^2 H_p)} = 0.03 \quad (2.15)$$

Se obtuvo que la generación de calor desde el pin de la herramienta es despreciable para una placa delgada, mientras que para una placa gruesa el porcentaje de calor generado por el pin de la herramienta es de 10% aproximadamente. La Figura 2.3 presenta la evolución de las proporciones de generación de calor del hombro y del pin en función del radio del pin. En esta figura también se destaca la influencia de la proporción R_h/R_p en la generación de calor.

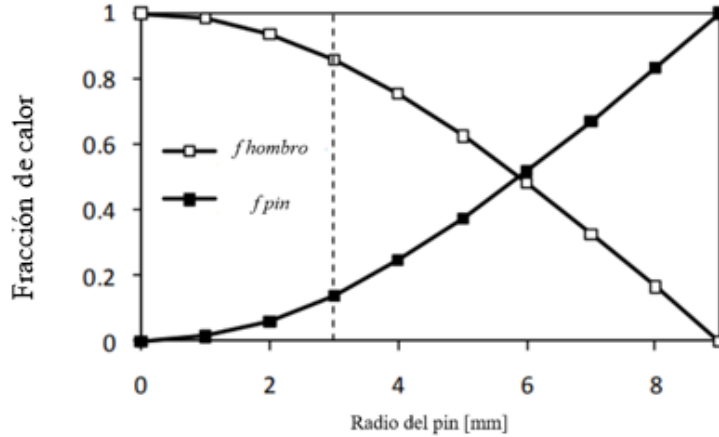


Figura 2.3 La fracción de calor generada por el hombro y el pin ($R_h = 9$ mm, $R_p = 3$ mm, $H_p = 4$ mm y $\alpha = 10^\circ$).

La estimación analítica de generación de calor se correlaciona con la generación de calor experimental, ya sea asumiendo una condición de deslizamiento o una condición de adhesión. Para estimar la generación de calor experimental en la condición de deslizamiento, se utiliza un coeficiente de fricción que se encuentra dentro del rango razonable de valores conocidos de contacto entre metales. Para asumir la condición de adhesión, se utiliza un esfuerzo cortante de cedencia descriptivo del material de la pieza soldada a temperaturas elevadas para correlacionar los valores [34].

Capítulo 3

Modelado por el método de elementos finitos del proceso de soldadura por fricción-agitación

Varios aspectos del proceso FSW todavía presentan incertidumbre en la actualidad y requieren un estudio adicional. Se han llevado a cabo muchas investigaciones experimentales para ajustar los parámetros de entrada del FSW (velocidad de la herramienta, velocidad de avance y profundidad de la herramienta), a diferencia de las investigaciones numéricas que se han utilizado de manera limitada para este propósito específico. La implementación de herramientas computacionales puede ser beneficioso para comprender y visualizar mejor la influencia de los parámetros de entrada en el proceso FSW. La visualización y el análisis del flujo de material, el campo de temperatura, los esfuerzos y las deformaciones involucradas durante el proceso FSW, se pueden obtener fácilmente utilizando resultados de simulación en lugar de experimentales. Las simulaciones pueden ayudar a ajustar y optimizar los parámetros del proceso y el diseño de la herramienta para obtener las mejores propiedades de soldadura [32].

Uno de los principales temas de investigación en FSW es la evaluación del campo de temperatura. Aunque las temperaturas involucradas en el proceso son más bajas que los puntos de fusión de los materiales son lo suficientemente altas como para promover transformaciones de fase. Por lo tanto, es muy importante conocer la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo en la zona de las soldaduras. Normalmente, la temperatura en FSW se mide utilizando termopares. Sin embargo, medir las variaciones de temperatura en la zona de la recristalización utilizando la técnica mencionada anteriormente puede resultar en una tarea compleja y desafiante. Es por esto que los métodos numéricos pueden ser muy eficientes y convenientes para este estudio, y de hecho en los últimos años se han utilizado en el campo del FSW.

El método de elementos finitos (MEF) es una herramienta fundamental en la etapa de discretización y formulación de ecuaciones en un modelo numérico, que permite convertir problemas continuos en sistemas de ecuaciones discretas, las cuales pueden ser solucionadas numéricamente en programas computacionales. El MEF es en una técnica importante en la simulación y análisis del proceso de soldadura por fricción-agitación.

3.1 Método de elementos finitos

En ingeniería y ciencia, muchas veces es posible describir fenómenos físicos utilizando ecuaciones diferenciales parciales. Resolver estas ecuaciones de manera analítica para sistemas avanzados y complejos suele ser demasiado complicado y poco práctico. Anteriormente estos inconvenientes en la resolución de modelos analíticos, obligaba a la realización de prototipos y ensayos experimentales, los cuales tienen altos costos y no siempre resultan de la manera esperada. El MEF permite realizar un modelo numérico del sistema real, mucho más sencillo y económico de modificar que un prototipo. Cabe aclarar que el MEF es un método de cálculo aproximado debido a las hipótesis básicas del método, por lo que aún son necesarios los prototipos para validar el modelo [35].

El MEF se emplea como herramienta numérica que proporciona soluciones aproximadas a las ecuaciones diferenciales parciales con condiciones iniciales y de frontera. Desde la perspectiva de la ingeniería, el MEF se utiliza para resolver problemas de análisis de esfuerzos y deformaciones, de transferencia de calor, de flujo de fluidos y fenómenos electromagnéticos, todo lo anterior por medio de simulaciones computacionales [36].

El MEF consiste en dividir un dominio en subdominios llamados elementos. En cada elemento existen puntos de cálculo llamados nodos, donde se determinan los valores de las variables del modelo. La distribución de los nodos se describe matemáticamente como lineal o cuadrática. A la hora de implementar el MEF es importante considerar los siguientes puntos:

Dominio: representa el espacio geométrico limitado por las fronteras del sistema, que puede ser lineal, bidimensional o tridimensional.

Condiciones de frontera: son las condiciones de entorno que establecen los valores de las variables en los límites del sistema y tienen influencia sobre las variables en el interior del sistema.

Incógnitas: son variables del sistema que se buscan resolver como desplazamientos, esfuerzos, temperaturas, entre otras.

3.2 Análisis en el método de elemento finito

El procedimiento general para resolver un problema mediante el método de elementos finitos es el siguiente:

1. Discretización del dominio (estructura) en elementos finitos.
2. Derivar las ecuaciones para cada uno de los elementos de la malla y colocarlos de la forma: $[K^e]\{u^e\} = \{F^e\}$ (Matriz elemental).
3. Ensamblar todas las ecuaciones originadas del paso anterior para tener una ecuación global.
4. Aplicar las condiciones de frontera tales como restricciones, cargas, flujo de calor, etc.
5. Solución de las ecuaciones ensambladas.
6. Postprocesamiento y análisis de los resultados.

La relación entre los desplazamientos desconocidos y las fuerzas conocidas en los nodos puede ser lineal o no lineal de acuerdo a lo siguiente:

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad (3.1)$$

$$\{F\} = [\{u\}K]\{u\} \quad (3.2)$$

donde:

$\{F\}$: vector de cargas aplicadas.

$[K]$: matriz de rigidez.

$\{u\}$: vector de desplazamientos nodales desconocidos.

En un comportamiento lineal, ec. (3.1), la rigidez estructural es independiente del desplazamiento, mientras que, en un comportamiento no lineal, ec. (3.2), la rigidez estructural depende del desplazamiento.

3.2.1 Análisis no lineal

Un análisis no lineal se usa cuando las deformaciones son grandes, el comportamiento del material es no lineal (como endurecimiento por deformación), o cuando hay contacto entre partes. El proceso de soldadura por fricción-agitación generalmente implica grandes deformaciones plásticas y cambios significativos en el comportamiento del material debido al calentamiento y enfriamiento. Además, el análisis debe tener en cuenta las condiciones de contacto entre las piezas que se sueldan. Por lo tanto, en el contexto del proceso FSW, un análisis no lineal es más apropiado y realista.

La no linealidad en la simulación de FSW se debe a varias razones:

- *Variación de temperatura:* Durante el proceso FSW, se generan temperaturas muy altas debido a la fricción y la deformación plástica. Estas altas temperaturas provocan cambios en las propiedades del material, como la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica, que son funciones de la temperatura. La no linealidad térmica se tiene en cuenta en la simulación.
- *Deformación plástica:* La soldadura por fricción-agitación implica una deformación plástica significativa del material. Esto puede llevar a la no linealidad en el comportamiento del material, ya que las propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad pueden cambiar con la deformación.
- *Contacto y fricción:* El proceso FSW implica la interacción entre la herramienta de soldadura y las piezas que se están soldando. Esto requiere considerar la no linealidad en términos de contacto y fricción entre las superficies de la herramienta y el material base.
- *Comportamiento del material a alta temperatura:* A temperaturas elevadas, los materiales pueden mostrar un comportamiento no lineal. Por ejemplo, pueden experimentar endurecimiento o ablandamiento dependiendo de la temperatura y la tasa de deformación.

Para abordar todas estas fuentes de no linealidad, se emplean simulaciones de elementos finitos no lineales en las que se tienen en cuenta las relaciones materiales no lineales, los efectos térmicos no lineales y el contacto/interacción no lineal entre componentes. Estas simulaciones más realistas permiten obtener resultados más precisos y detallados del proceso FSW, y evaluar su efecto en las propiedades de la soldadura y piezas involucradas.

3.3 Programas de cómputo MEF para el análisis y simulación del proceso FSW

En la actualidad el implemento de simulaciones numéricas enfocados a diversos procesos de la industria, han permitido un gran avance en diferentes ramas de la ingeniería, mediante el uso de estas herramientas se ha logrado reducir costos y diferentes procesos industriales.

En cuanto al proceso de soldadura por fricción-agitación, el implemento de una simulación por elementos finitos permitirá analizar el efecto que tendrá el aumento o disminución de los parámetros principales del proceso en el acabado y calidad final de la pieza soldada, permitiendo encontrar un equilibrio de costos y calidad.

Para poder desarrollar un modelo MEF del proceso FSW, es de vital importancia considerar tanto las variables de entrada como las de salida, además de considerar el entorno en el cual se lleva a cabo el proceso a simular.

En cuanto a la modelación por elementos finitos, existen una infinidad de software que permiten simular diversos tipos de procesos. Sin embargo, hay que considerar que para obtener un modelo lo suficientemente aproximado, es necesario tener un amplio conocimiento en el campo y considerar todas las propiedades físicas del proceso que se desea simular.

3.3.1 Software ABAQUS

ABAQUS FEA® [37] es un conjunto de programas informáticos (product suite) de simulación, que aplica el método de los elementos finitos para realizar cálculos estructurales estáticos lineales y no lineales, dinámicos incluyendo simulación de impactos, problemas de contacto de sólidos, térmicos, acoplamiento acústico-estructurales, mecánica de fluidos, piezoeléctricos y otros. El proceso de simulación en ABAQUS se divide en 3 etapas:

- *Preprocesamiento:* En esta etapa se define el modelo, el tipo de elemento a utilizar, las características, la geometría y el material del elemento, componente o pieza que se simulará. En esta etapa también se genera el mallado el cual definirá que tan aproximado será el modelo, entre más fino el mallado el resultado será más aproximado, pero de igual manera tendrá mucho más costo computacional.
- *Procesador:* En esta etapa se definen las condiciones de frontera, tales como cargas, restricciones de rotación o de traslación, temperaturas, etc., ya sean puntuales o distribuidas. Así mismo en esta etapa se resuelve el modelo MEF.
- *Post-procesador:* En esta etapa se visualizan los resultados en forma de gráficas, listas, simulaciones, entre otros, para su análisis correspondiente.

3.3.2 Solución de problemas no lineales en ABAQUS

ABAQUS FEA utilizar el método de “Newton-Raphson” para solucionar problemas no lineales. El método de Newton-Raphson se basa en la linealización de las ecuaciones de equilibrio y actualiza las soluciones en cada paso de carga para converger hacia una solución. Abaqus utiliza variantes del método de Newton-Raphson, como el método Newton-Raphson total o el método Newton-Raphson tangente, según la naturaleza del problema y las condiciones de carga.

La Figura 3.1 muestra el uso del método de “NewtonRaphson” el cual realiza iteraciones en un análisis no lineal.

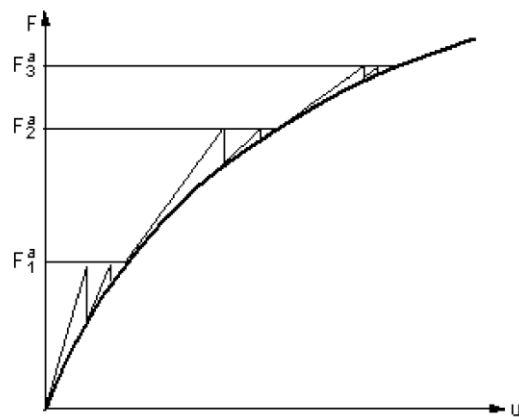


Figura 3.1 Aproximación del método de Newton-Raphson [32].

Antes de cada solución, el algoritmo evalúa el vector de carga, que es la diferencia entre las fuerzas restauradoras y las cargas aplicadas. El programa entonces realiza una solución lineal usando el vector de cargas y verifica la convergencia. Si el criterio de convergencia no se satisface entonces el vector de cargas es re-calculado, la matriz de rigidez es actualizada y se obtiene una solución. Este procedimiento iterativo continúa hasta que la solución converge.

3.4 Modelo numérico MEF del proceso FSW

Como parte del trabajo de tesis, se desarrolló un modelo MEF para simular el proceso de soldadura por fricción de aleaciones de aluminio utilizando el software Abaqus®. La validación de este modelo se realizó utilizando los resultados experimentales obtenidos en el artículo "Temperature and Stress Evaluation during Three Different Phases of Friction Stir Welding of AA 7075-T651 Alloy" [38]. El artículo proporciona información sobre las condiciones de frontera térmica, dimensiones de las piezas, condiciones de frontera mecánica, fuerzas aplicadas y propiedades termo-mecánicas de los materiales utilizados en el proceso FSW. Además, incluye una gráfica de temperatura a lo largo del tiempo del proceso FSW, la cual se utilizó para validar los resultados del modelo desarrollado en este proyecto. La configuración experimental utilizada en este proyecto de tesis se muestra en la Figura 3.2, en donde se propuso el uso de la aleación de aluminio AA7075-T651 como material de trabajo en la soldadura.

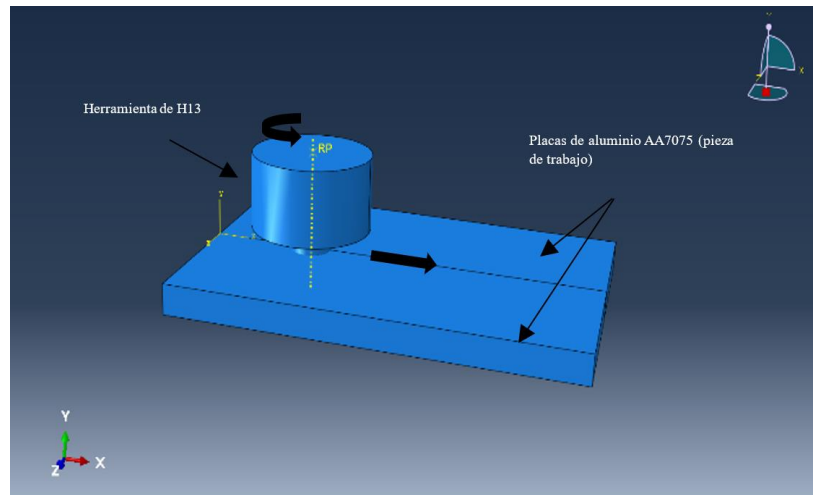


Figura 3.2 Modelo de la pieza de trabajo y la herramienta.

La metodología utilizada en la simulación numérica mediante el método de elementos finitos del proceso de soldadura por fricción-agitación se muestra en la Figura 3.3.

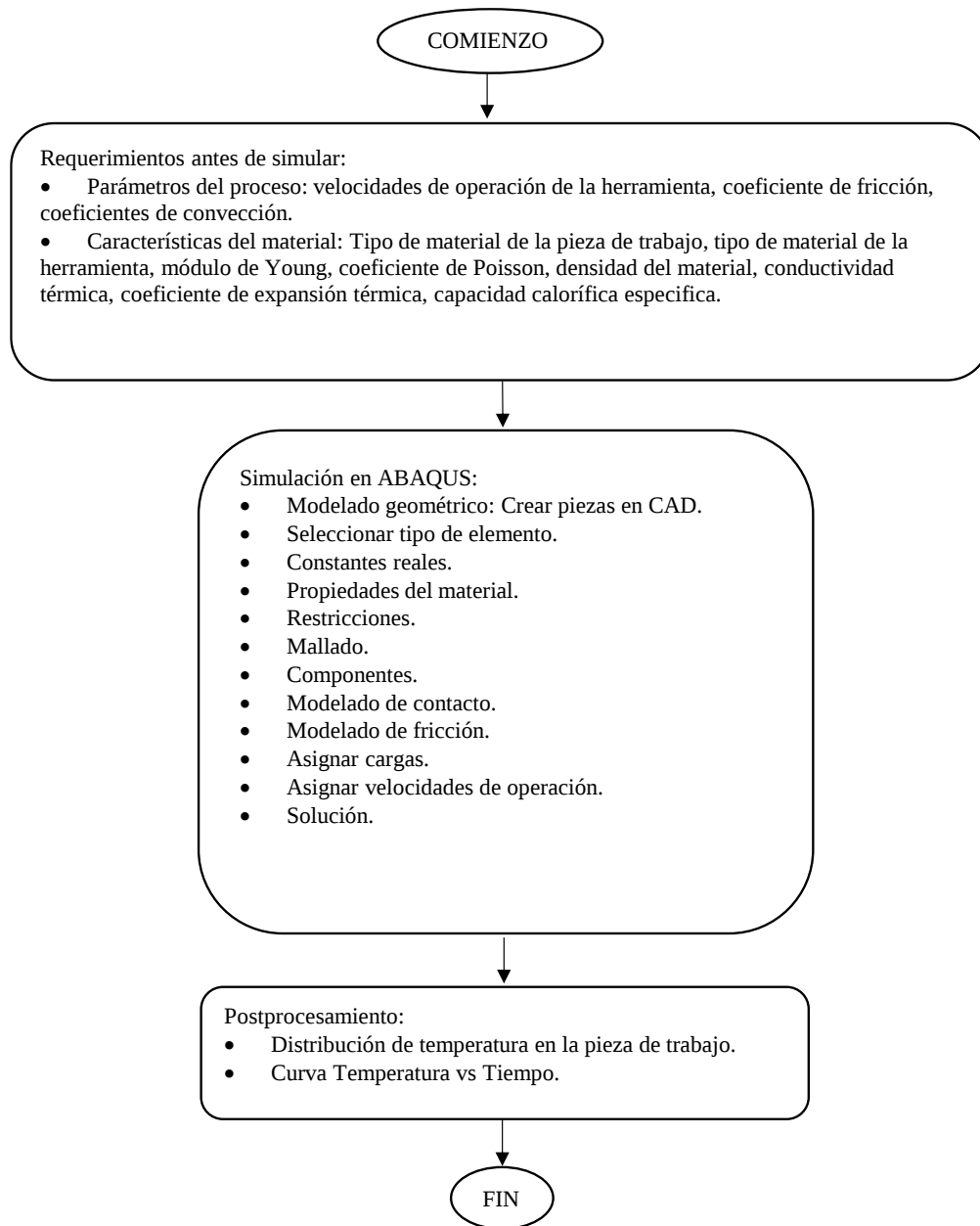


Figura 3.3 Pasos generales para realizar la simulación MEF del proceso FSW.

La soldadura por fricción y agitación es un proceso complejo que implica la interacción de fenómenos térmicos y mecánicos, deformación excesiva del material alrededor de la herramienta y un gran flujo de calor. Durante la simulación del proceso FSW en presencia de deformaciones significativas, los elementos Lagrangianos tradicionales pueden distorsionarse considerablemente, lo que puede afectar la precisión de los resultados. Para evitar esta distorsión de malla, se recurre a diversas técnicas de modelado, como la remallado

adaptativo y el método Lagrangiano-Euleriano Arbitrario (ALE, por sus siglas en inglés). En el desarrollo del modelo MEF-FSW se utilizó el método Euleriano-Lagrangiano acoplado. Esta técnica de análisis combina dos enfoques, Lagrangiano y Euleriano: el acero de la herramienta se modela como un cuerpo Lagrangiano rígido isotérmico, mientras que la pieza de trabajo se modela mediante una formulación Euleriana [39]. El comportamiento de interacción entre ambos se modela mediante la definición de contacto.

3.4.1 Modelado geométrico

La geometría del modelo se compone de la herramienta Figura 3.4 y de la pieza de trabajo Figura 3.5.

La forma y las dimensiones de la herramienta, así como el espesor, el ancho y la longitud de la pieza de trabajo, fueron tomados del trabajo de Kareem N. Salloomi *et al.* [38]. Las dimensiones de la herramienta son:

- El hombro de la herramienta tiene un diámetro de 18 mm y una altura de 10 mm.
- El pin de la herramienta tiene un diámetro de 6.30 mm y una altura de 4 mm.
- La herramienta tiene un ángulo de inclinación de 80°.

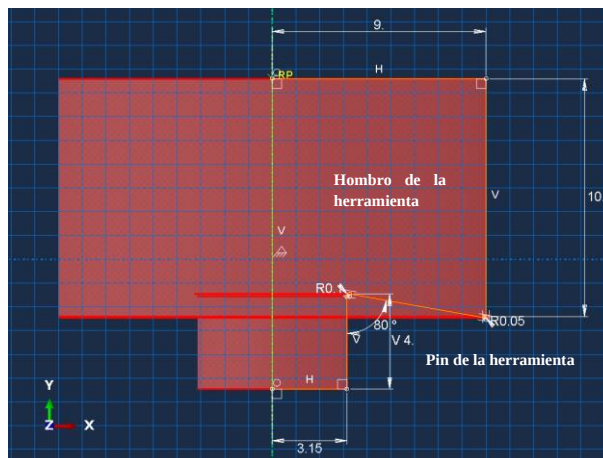


Figura 3.4 Dimensiones de la herramienta.

Las dimensiones de la pieza de trabajo son de 60 mm de longitud, 60 mm de ancho y 4 mm de grosor.

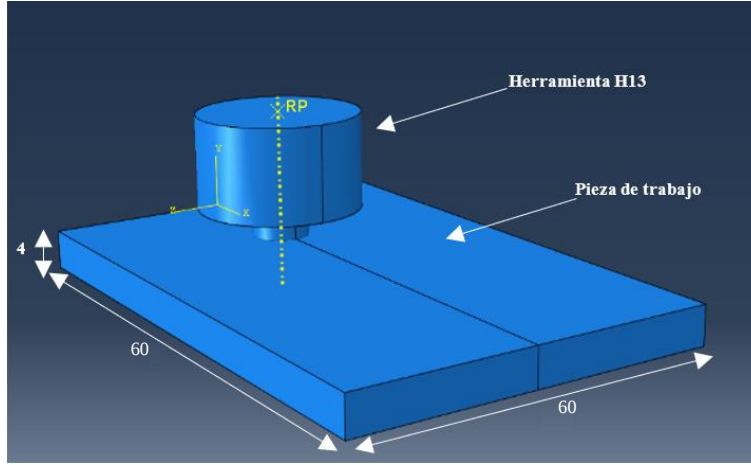


Figura 3.5 Dimensiones pieza de trabajo (Euleriano) y pieza de referencia.

La construcción del modelo geométrico en 3D para la simulación del proceso FSW se presenta utilizando el software Abaqus. La herramienta se modela como una parte rígida y se le asigna un punto de referencia, mientras que las piezas se modelan como partes deformables. Además, se asume que las superficies del cuerpo rígido son isotérmicas.

3.4.2 Modelado del material

El material utilizado en este estudio es la aleación de aluminio 7075-T651, la cual generalmente presenta baja soldabilidad mediante el proceso tradicional de soldadura por fusión. En este trabajo, la plasticidad del material se rige por el modelo de Johnson-Cook [40]:

$$\bar{\sigma} = [A + B \cdot (\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{fun} - T_{ref}} \right)^m \right] \quad (3.3)$$

donde:

- $\bar{\epsilon}^{pl}$ es la deformación plástica efectiva.
- $\dot{\bar{\epsilon}}_{pl}$ es la velocidad de deformación plástica efectiva.
- $\dot{\epsilon}_0$ es la tasa de deformación de normalización.
- n y m son constantes del material.
- C representa la sensibilidad a la tasa de deformación.
- T_{ref} es la temperatura a la cual determinamos los parámetros A , B y n .
- T_{solid} es la temperatura de solidificación del material.

Los parámetros térmicos y mecánicos del AA7075-T651 que se utilizaron en este análisis se muestran en la Tabla 3.1 y fueron obtenidos de la referencia [38].

Tabla 3.1 Propiedades aluminio AA7075-T651.

PROPIEDADES ALUMINIO AA7075-T651							
Temperatura °C	25	100	200	300	400	500	532
Modulo de Young (Gpa)	71.1	65.2	56.3	38	31.5	25	24
Coeficiente de Poisson	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Conductividad térmica (W/m°C)	130	186	197	194	196	196	193
Calor específico (J/kg°C)	870	910	960	980	1040	1100	1110
Densidad (kg/m ³)	2810	2800	2770	2750	2730	2700	2690

Las propiedades del material AA7075-T651 para el modelo Johnson-Cook son las indicadas en la Tabla 3.2 [38].

Tabla 3.2 Propiedades aluminio AA7075-T651 modelo Johnson-Cook.

A (MPa)	B (MPa)	n	m	C	Temperatura de fundido (°C)	Temperatura de referencia (°C)
520	420	0.52	1.61	0.001	620	25

Para el material de la herramienta se utilizó H13 (acero para herramientas de trabajo) con las propiedades indicadas en la Tabla 3.3 [41]. El acero GGD H13 es un acero para herramientas de trabajo en caliente con una excelente combinación de dureza y resistencia a la fractura, manteniendo estas propiedades a temperaturas de hasta 600 °C.

Tabla 3.3 Propiedades H13.

PROPIEDADES H13	
Modulo de Young (GPa)	211
Coeficiente de Poisson	0.28
Conductividad térmica (W/m°C)	37
Calor específico (J/kg°C)	560
Densidad (kg/m ³)	7800

3.4.3 Condición de contacto

La interacción entre los elementos en contacto se describe mediante la ley de fricción de Coulomb, dada por:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad (3.4)$$

donde τ es la tensión tangencial; σ_n es la tensión normal en la superficie, y μ representa el coeficiente de fricción. Se considera un coeficiente de fricción dependiente de la temperatura. Debido a la falta de datos suficientes sobre el coeficiente de fricción de la aleación AA 7075-T651, se adoptaron los valores del coeficiente de fricción utilizados para el AA 6061. Los valores de μ se obtuvieron de la referencia [42] y se muestran en la Figura 3.6.

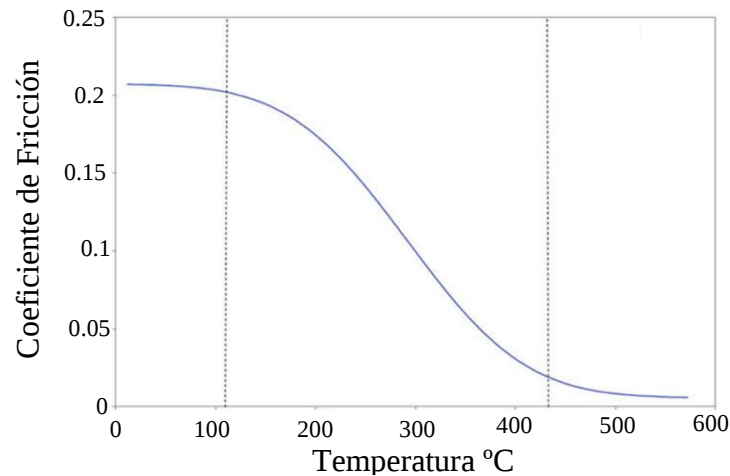


Figura 3.6 Coeficiente de fricción dependiente de la temperatura AA 6061 [42].

El contacto entre el pin y las partes deformables es un "contacto general", en el cual el comportamiento tangencial se describe mediante una ley de fricción y el comportamiento normal se describe mediante un "contacto rígido", permitiendo que las partes se separen después del contacto. Este tipo de contacto está asociado con el análisis dinámico explícito en la Formulación método Euleriano-Lagrangiano acoplada. La formulación acoplada Euleriana-Lagrangiana es una técnica en simulaciones numéricas que permite modelar la interacción entre cuerpos Eulerianos y Lagrangianos mediante la implementación de contacto. En este enfoque, el marco Lagrangiano sigue el movimiento y la deformación de la herramienta, mientras que el marco Euleriano describe el comportamiento de las piezas de trabajo. Estas simulaciones conocidas como análisis acoplados Euleriano-Lagrangiano (CEL) por sus siglas en inglés, utilizan una malla Lagrangiana conectada a los puntos de material que se deforma, mientras que la malla Euleriana actúa como fondo y permanece constante mientras el material fluye o se deforma dentro de ella.

El método Euleriano-Lagrangiano resulta eficaz en aplicaciones que involucran deformaciones extremas, como el flujo de fluidos. Durante el proceso de soldadura, donde los materiales adquieren propiedades viscosas, este enfoque Euleriano ofrece una descripción eficiente. La implementación Euleriana en Abaqus/Explicit se basa en el método de volumen de fluido, rastreando el material a medida que fluye mediante el cálculo de su fracción de volumen Euleriano (EVF) en cada elemento. En este análisis se emplea un tipo de elemento térmicamente acoplado de varios materiales EC3D8RT. En la formulación Euleriana-Lagrangiana acoplada, la herramienta de fracción de volumen utiliza las piezas a soldar como referencia de volumen en el dominio Euleriano. Es esencial destacar que las piezas a soldar no necesitan tener una malla, ya que solo se requiere en el dominio Euleriano. La Figura 3.7 representa la formulación Euleriana-Lagrangiana acoplada que se implementa en la simulación del proceso FSW.

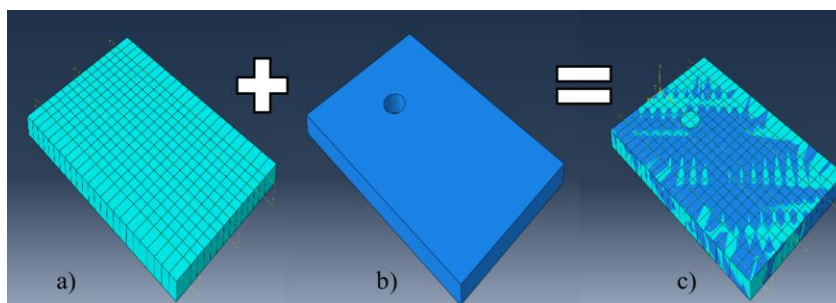


Figura 3.7 Formulación acoplada Euleriana-Lagrangiana: a) Cuerpo Euleriano; b) Cuerpo Lagrangiano; c) Formulación acoplada Euleriana-Lagrangiana

3.4.4 Condiciones de frontera térmicas

Durante el proceso de soldadura por fricción-agitación, el calor generado por la fricción y la deformación plástica se disipa rápidamente en todas las regiones de las piezas soldadas. Para asegurar que los resultados de la simulación sean lo más cercanos posible a los resultados experimentales, es esencial tener en cuenta las pérdidas de calor experimentadas por las piezas de trabajo debido a las condiciones de frontera térmica. En este contexto, es crucial considerar que, en la parte superior y los lados de las placas, hay pérdida de calor debido a la convección y la radiación hacia el entorno, mientras que en la parte inferior de las placas se produce pérdida de calor por conducción hacia la placa de soporte de la máquina, como se ilustra en la Figura 3.8.

La temperatura ambiente que rodea todo el modelo se estableció en 20 °C al inicio del análisis. Se aplicaron condiciones de convección en las superficies superior y laterales de la placa de aluminio AA 7075, con un coeficiente convectivo ($h_f \approx 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). El coeficiente de convección y la temperatura inicial del modelo se extrajeron del artículo de referencia [38]. Dado que la pérdida de calor por radiación es insignificante, se omitió en el modelo.

La superficie inferior de la pieza de trabajo tiene pérdida de calor por conducción debido al contacto que tiene con la placa de soporte. En el artículo de referencia [38], se modela esta

condición asumiendo un valor más alto del coeficiente convectivo del AA 7075 ($h_f \approx 1000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). La razón detrás de esta suposición es la alta complejidad para obtener un valor preciso de la conductividad térmica del espacio que existe entre la pieza de trabajo y la placa de soporte.

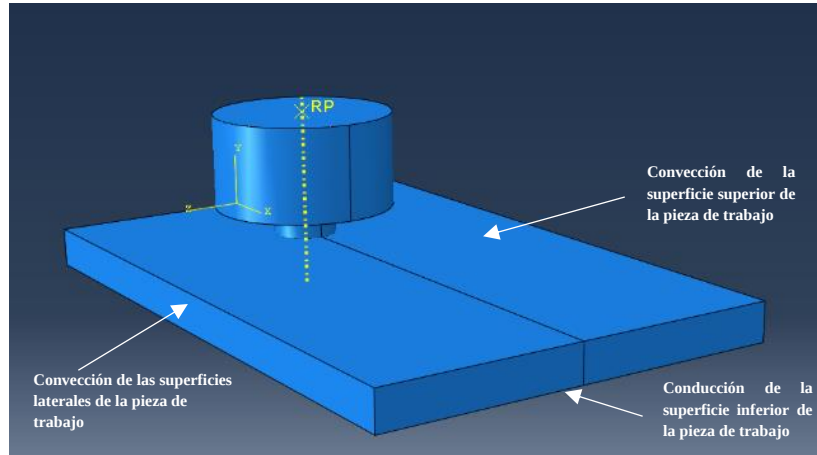


Figura 3.8 Esquema de representación de las condiciones de contorno térmico del análisis

3.4.5 Condiciones de frontera mecánicas

Se implementaron condiciones de frontera estructurales para limitar el movimiento de las placas de aluminio AA 7075 a soldar. Para ello, es importante considerar que la placa de respaldo que sostiene a las piezas de trabajo restringe el movimiento de la superficie inferior de las placas en cualquier dirección. Además, los bordes de la placa de AA 7075, que son paralelos al camino de soldadura, son fijados completamente para prevenir cualquier tipo de movimiento de cuerpo rígido; como se representa en la Figura 3.9.

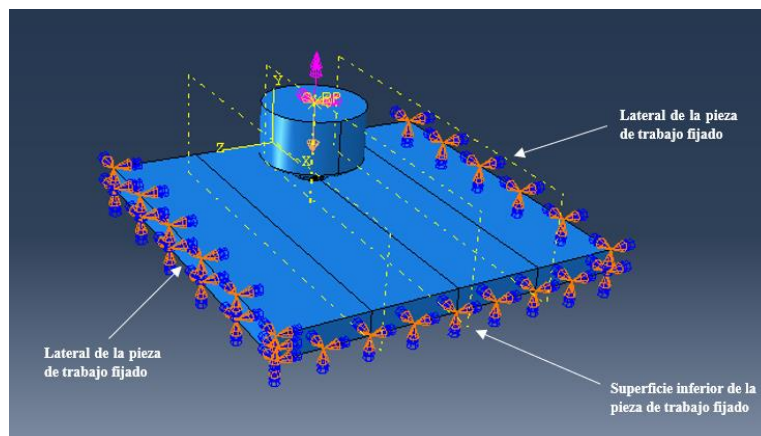


Figura 3.9 Esquema de representación de las condiciones de contorno mecánicas de la pieza de trabajo.

3.4.6 Asignación de cargas de la herramienta

El proceso FSW consta de tres etapas:

- Etapa de penetración de la herramienta: Durante esta etapa la herramienta penetra lentamente la pieza de trabajo mediante una carga normal.
- Etapa de precalentamiento: La fricción entre la herramienta giratoria y la pieza de trabajo genera calor en la posición inicial de la herramienta hasta que la temperatura de la pieza de trabajo alcanza el valor requerido para la soldadura.
- Etapa de soldadura: La herramienta giratoria se mueve a lo largo de la línea de soldadura.

Para llevar a cabo una simulación precisa del proceso de soldadura por fricción-agitación, es esencial considerar las tres etapas del proceso, teniendo en cuenta las duraciones de cada etapa y las cargas que afectan a la herramienta en cada momento:

- En la primera etapa, se aplica a la herramienta una carga rotacional de 1200 rpm y una condición de desplazamiento que representa la velocidad con la que penetra la herramienta en la pieza de trabajo, establecida en 0.256 mm/s en dirección Y. Esta etapa tendrá una duración de 12.1 segundos.
- Durante la segunda etapa, se mantiene la carga rotacional sobre la herramienta en el eje Y a 1200 rpm. Esta etapa tendrá una duración de 0.2 segundos.
- En la tercera etapa, se aplica un desplazamiento a la herramienta en dirección X de 2 mm/s, manteniendo la rotación en Y a 1200 rpm. Esta etapa tendrá una duración de 15.2 segundos.

Los detalles de la duración de las etapas y de las condiciones de cargas de la herramienta se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Etapas del modelo y condiciones de cargas de la herramienta.

Etapa	Tiempo de duracion etapa (s)	Condicion de cargas
Penetrado	12.1	Desplazamiento en Y - Rotacion en Y
Precalentamiento	0.2	Rotacion en Y
Soldadura	15.2	Rotacion en Y - Movimiento en X

3.5 Validación térmica del modelo numérico

Para validar el modelo MEF propuesto y desarrollado en Abaqus, se utilizó como referencia los resultados experimentales reportados en el trabajo "Temperature and Stress Evaluation during Three Different Phases of Friction Stir Welding of AA 7075-T651 Alloy" [38]. En la Figura 3.10 se observa la ubicación del termopar usado para medir la temperatura en la prueba experimental reportada en la literatura.

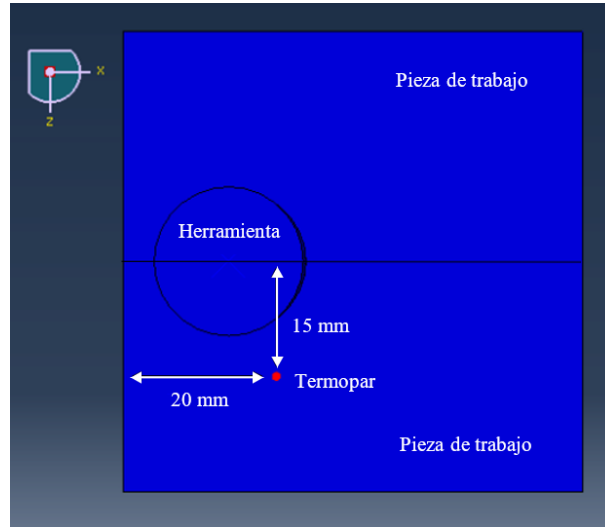


Figura 3.10 Ubicación del termopar en la pieza de trabajo.

La Figura 3.11 muestra la comparación entre los comportamientos térmicos durante el desarrollo del proceso FSW en la posición del termopar. Al contrastar los resultados experimentales reportados en [38] con los datos generados por el modelo MEF propuesto, se observa que los resultados numéricos siguen la tendencia de los resultados experimentales del proceso de soldadura por fricción-agitación. Se determinó que los datos del modelo MEF son, en general, un 11.8% inferiores a la curva obtenida mediante el método experimental. Este porcentaje se obtiene aplicando la ecuación (3.5) en cada instante t de la curva:

$$\%_{error} = \left(\frac{|T_{exp}(t) - T_{MEF}(t)|}{T_{exp}(t)} \right) * 100 \quad (3.5)$$

donde $T_{exp}(t)$ es el valor experimental de la temperatura en el instante t , y $T_{MEF}(t)$ es el valor de la temperatura generado por el modelo MEF para el mismo instante x . Una vez calculado el porcentaje de error de cada punto de la curva se promedian los valores para obtener el porcentaje de error promedio general entre las dos curvas. Esta diferencia puede atribuirse a la dificultad de seleccionar un valor preciso del coeficiente de fricción de la aleación AA 7075-T651 para modelar la generación de calor. La adopción de valores de

coeficiente de fricción de una aleación diferente (AA 6061 en lugar de AA 7075-T651) puede influir significativamente en los resultados, ya que el coeficiente de fricción es un parámetro crítico en la soldadura por fricción-agitación y puede afectar la generación de calor y por ende la distribución de temperatura. Es crucial destacar que la temperatura máxima durante el proceso FSW no excedió la temperatura de fusión para AA 7075-T651, lo que respalda el gran potencial del método de elementos finitos para obtener resultados precisos en este tipo de análisis.

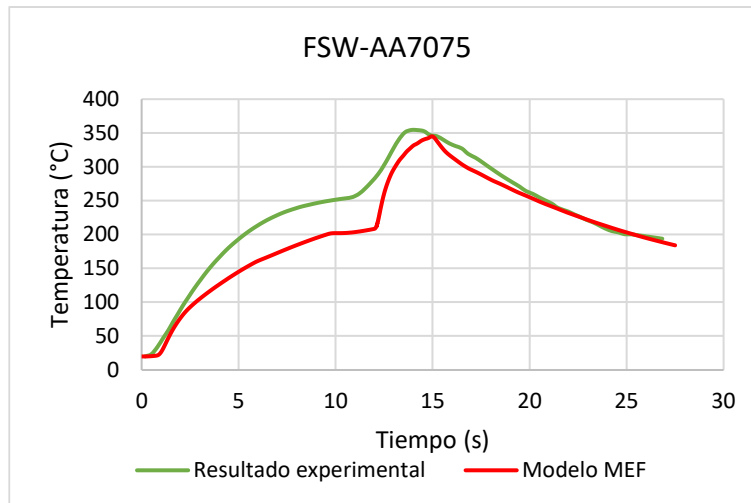


Figura 3.11 Comportamientos de la temperatura durante el desarrollo del proceso FSW en la ubicación del termopar resultado experimental y resultado obtenido modelo MEF.

La Figura 3.12 muestra los resultados de la simulación de la temperatura en la superficie superior de la placa de AA 7075, donde se observa el flujo de calor a alta temperatura generado por el contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo. En la Figura 3.13 se puede observar cómo se distribuye la temperatura en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura en la sección A-A que es donde se ubica el termopar.

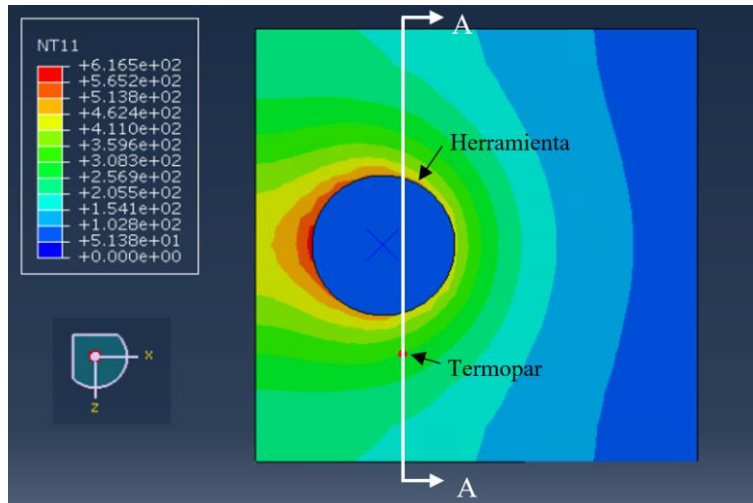


Figura 3.12 Distribuciones de temperatura transitorias en la superficie de la pieza de trabajo y ubicación de la sección A-A.

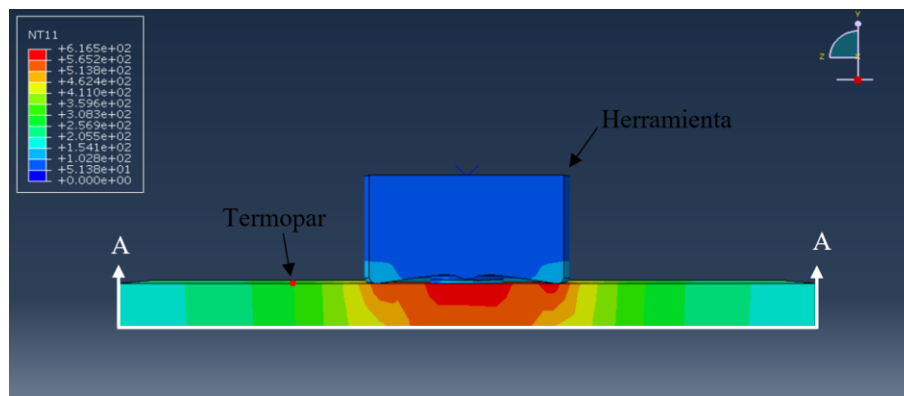


Figura 3.13 Distribución térmica en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura en sección A-A.

La Figura 3.14 muestra la distribución de temperatura en seis puntos de tiempo distintos durante el período de proceso de 27.5 segundos. Los resultados de la simulación muestran que cuando el pin de la herramienta entra en contacto con la placa de AA 7075 para comenzar la penetración, la temperatura ha alcanzado un valor máximo en la zona localmente debajo de la superficie inferior del pin, y los contornos de temperatura semicirculares se propagan a través de la superficie de la placa (Figura 3.14.a y Figura 3.14.b). La temperatura sigue aumentando en el mismo lugar hasta que el hombro entra en contacto con la placa de AA 7075. Posteriormente, la temperatura máxima salta a la zona de esquina entre las superficies interfaciales del pin y el hombro. A los 12.1 segundos (Figura 3.14.c), el contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo aumentó, lo que provocó que la temperatura aumentara hasta su valor máximo de 608 °C alrededor de la interfaz entre el hombro y la pieza de trabajo. Más tarde, la temperatura disminuyó ligeramente y tendió a ser más estable en las etapas de

precalentamiento (Figura 3.14.d) y soldadura (Figura 3.14.e y Figura 3.14.f). También es evidente una variación de alta temperatura con un patrón de "V" en la superficie superior de la placa de AA 7075; esto indica la ocurrencia de flujo de calor de alta temperatura en la capa de contacto entre el hombro de la herramienta y la pieza de trabajo.

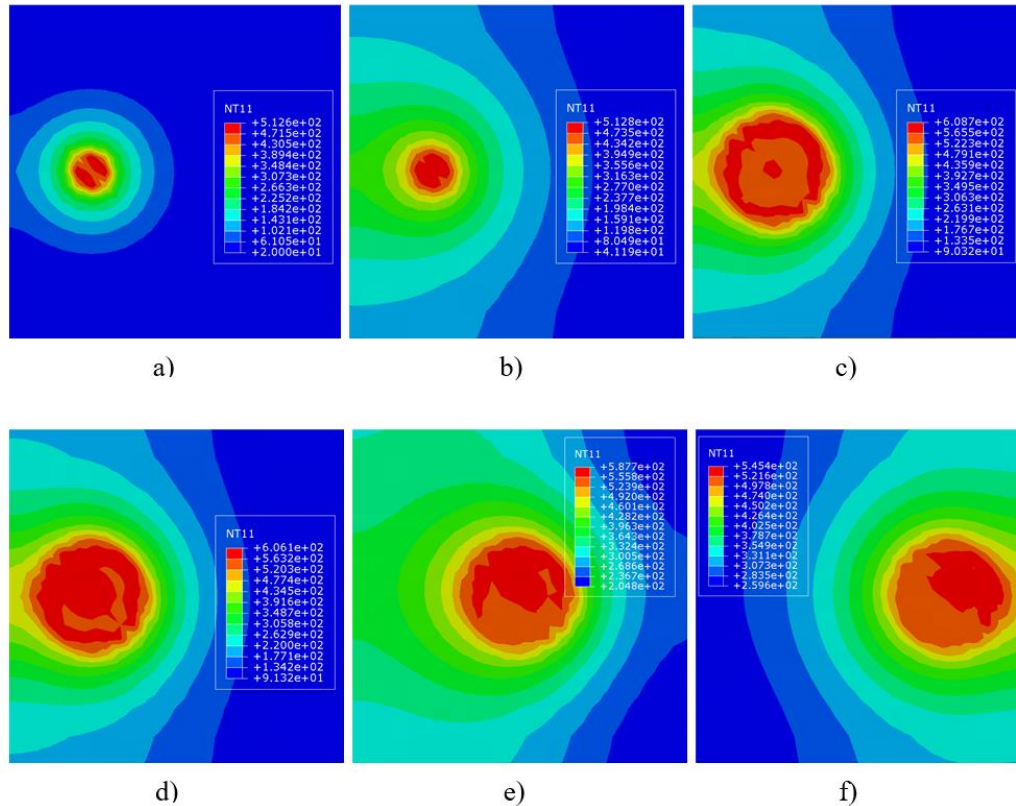


Figura 3.14 Distribuciones transitorias de temperatura en la superficie de la pieza de trabajo en los tiempos (a) 0.9 segundos, (b) 6.05 segundos, (c) 12.1 segundos, (d) 12.3 segundos, (e) 19.8 segundos (mitad del largo), y (f) 27.5 segundos (final de la soldadura FSW).

Se desarrolló un modelo termo-mecánico tridimensional dependiente del tiempo del proceso de soldadura por fricción-agitación con el fin de analizar y comprender el efecto de los diferentes parámetros del proceso en el desempeño final de la soldadura. El modelo incluyó varios aspectos primarios del proceso FSW, como la velocidad de rotación, la velocidad de soldadura, la geometría de la herramienta, el coeficiente de fricción, las propiedades de la herramienta y de la pieza de trabajo, generación de calor, la transferencia por convección y conducción, y la distribución de la temperatura en la ubicación del termopar, la cual se comparó con los valores experimentales reportados en la literatura para validar el modelo.

El modelo MEF simuló las etapas de penetración, precalentamiento y soldadura involucradas durante el proceso de soldadura por fricción-agitación. El estudio demostró que a medida que la herramienta penetra la pieza de trabajo, se forma un gradiente de temperatura en la región

que está en contacto con el pin de la herramienta, y una vez que el hombro de la herramienta entra en contacto con la superficie de la pieza de trabajo, el punto de temperatura máxima se transfiere a la región que está debajo del borde del hombro de la herramienta. Además, se observó un pico de temperatura máxima de 608 °C en el origen de la soldadura, el cual es inferior al punto de fusión de la aleación AA 7075-T6, lo que confirma que el modelo MEF cumple con la característica del proceso FSW de ser una soldadura de estado sólido.

Capítulo 4

Análisis y discusión de resultados

En el presente capítulo se realizará un estudio paramétrico del efecto que tienen los diferentes parámetros involucrados en el proceso de soldadura por fricción-agitación en el desempeño y la calidad del proceso de soldadura FSW. Este estudio está basado en el análisis numérico utilizando el modelo MEF desarrollado y presentado en el capítulo anterior.

4.1 Análisis paramétrico en el proceso FSW

Para analizar la influencia que tienen los parámetros en la calidad final del proceso de soldadura por fricción-agitación, se tendrá en cuenta el comportamiento de la temperatura y la distribución térmica sobre la zona de la soldadura. La distribución térmica juega un papel muy importante durante el proceso de soldadura FSW debido a que tiene un impacto directo en las propiedades del material, la integridad de la soldadura y la calidad del resultado final.

4.1.1 Metodología

Se consideraron los siguientes parámetros del proceso en el análisis paramétrico:

- Velocidad rotacional de la herramienta.
- Velocidad de soldadura de la herramienta.
- Radio del hombro de la herramienta.

La influencia de cada parámetro se analizó variando su valor y manteniendo fijo los demás parámetros para observar cómo se afecta la temperatura y distribución térmica a lo largo del proceso FSW con dicha variación. Los resultados de cada variación se comparan con la curva de temperatura de referencia en la posición del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm), Figura 4.1, con el perfil de temperatura de referencia del ancho de la placa en la sección A-A, Figura 4.2, y con la distribución térmica de referencia en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura en la sección A-A, que es donde se ubica el termopar, Figura 4.3, Estos datos fueron obtenidas en la simulación de referencia la cual tiene los parámetros iniciales sin ninguna alteración.

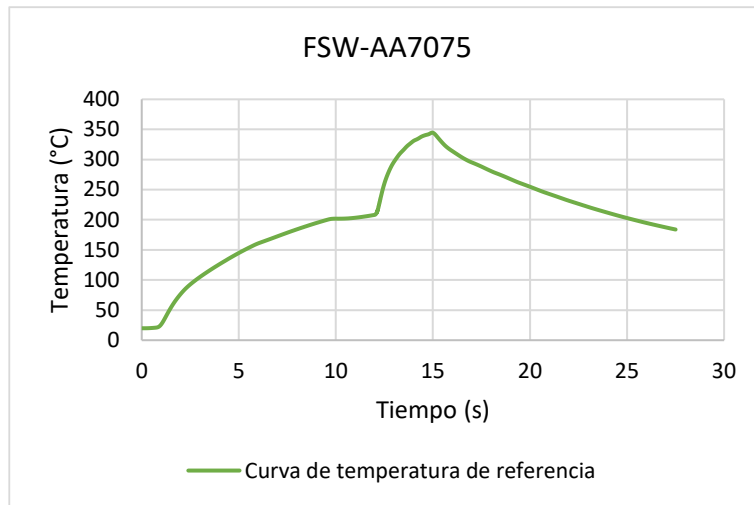


Figura 4.1 Curva de temperatura de referencia en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm), resultado obtenido mediante modelo MEF.

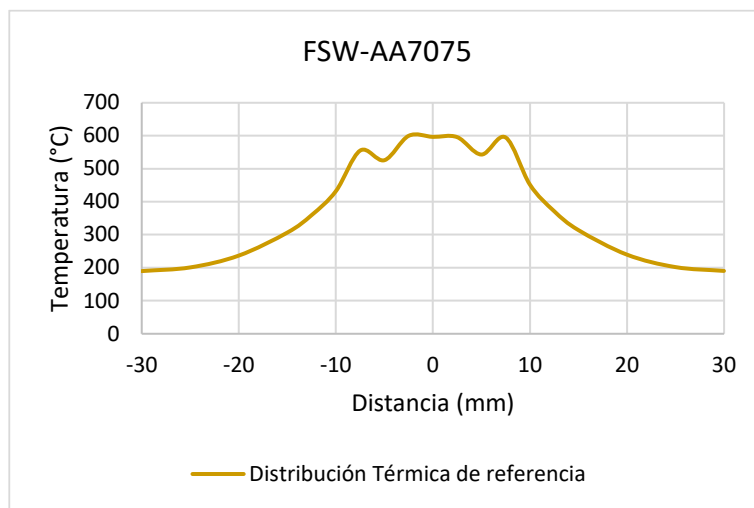


Figura 4.2 Perfil de temperatura de referencia del ancho de la placa en la sección A-A.

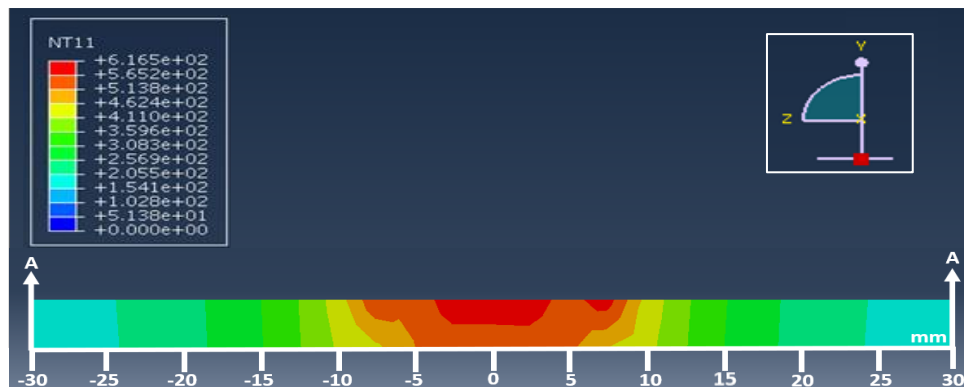


Figura 4.3 Distribución térmica de referencia en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura Sección A-A.

4.1.2 Análisis de la velocidad rotacional de la herramienta

Para observar cómo influyen el cambio de la velocidad rotacional de la herramienta sobre la distribución térmica en la zona de la soldadura. Se consideraron tres velocidades de rotación diferentes para realizar el análisis paramétrico, 600, 1200 y 2400 rpm. Se tomó una velocidad de soldadura constante de $v = 2 \text{ mm/s}$ y un radio de 9 mm para el hombro de la herramienta en cada uno de los análisis.

El efecto que tiene la velocidad rotacional de la herramienta sobre la variación de temperatura en la posición del termopar ($x = 20 \text{ mm}$, $z = 15 \text{ mm}$) se muestra en la Figura 4.4 en donde se pueden observar tres curvas, cada una correspondiente a una velocidad de rotación. En esta figura se puede apreciar que la variación de la temperatura es directamente proporcional a la velocidad de rotación con la que gira la herramienta, esto se debe a que a medida que aumenta esta velocidad la herramienta genera más fricción en contacto con la pieza de trabajo dando como resultado mayor generación de calor, lo mismo ocurre en caso contrario si se disminuye la velocidad de rotación la herramienta generará menos fricción y la generación de calor será inferior. Al duplicar la velocidad rotacional de referencia a 2400 rpm se aumentó 8.7% la temperatura en la posición del termopar durante la simulación del proceso FSW, cuando se disminuyó la velocidad de rotación de la herramienta a 600 rpm la temperatura en la ubicación del termopar se redujo 11.4%.

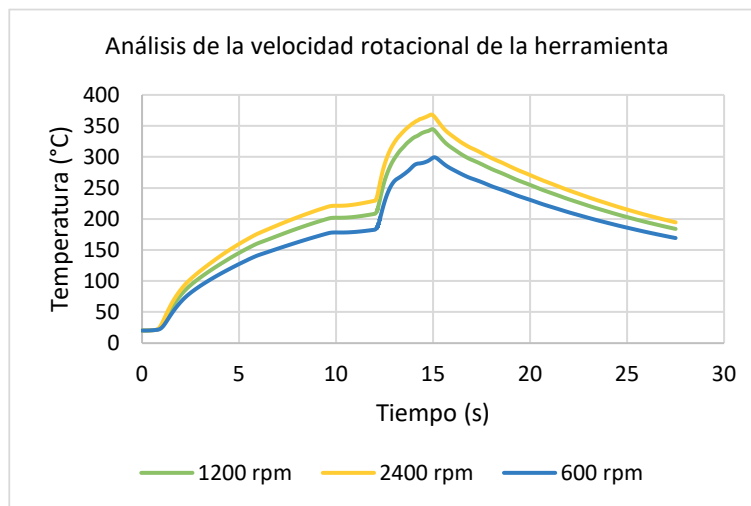


Figura 4.4 Curva de temperatura del análisis de la velocidad rotacional de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20 \text{ mm}$, $z = 15 \text{ mm}$).

En la Figura 4.5 se observa el perfil de temperatura del ancho de la placa en la sección A-A, en donde se observa que, al incrementar la velocidad de rotación de la herramienta, la temperatura tiende a aumentar considerablemente en la zona donde hace contacto la herramienta con la pieza de trabajo. Se obtuvo en el análisis que, al duplicar la velocidad de

la herramienta de 1200 a 2400 rpm, el perfil de temperatura en el ancho de la pieza de trabajo incremento 7.2%, mientras que al realizar el proceso FSW con una velocidad rotacional de 600 rpm se redujo la temperatura en el ancho de la pieza de trabajo un 11.6%.

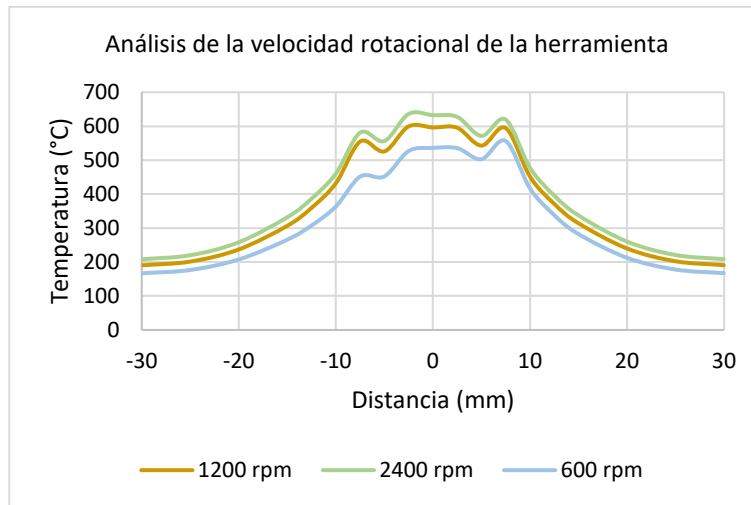


Figura 4.5 Perfil de temperatura del ancho de la placa en la sección A-A del análisis de la velocidad rotacional de la herramienta.

El ancho de la soldadura depende directamente del diámetro del hombro de la herramienta, en la Figura 4.6 se observa cómo se distribuyen las zonas microestructurales en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura durante el proceso FSW. En cuanto a la distribución térmica en la Figura 4.7 se puede observar cómo se distribuye la temperatura en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura en la sección A-A, que es donde se ubica el termopar. A medida que aumenta la velocidad rotacional de la herramienta se tiene un incremento del aporte de calor, haciendo que la zona de soldadura o zona de recrystalización se expanda. Esta zona se ubica en el área que anteriormente ocupaba el pin de la herramienta durante el proceso de soldadura de fricción-agitación. En esta región, se produce el fenómeno de recrystalización dinámica, que da como resultado una microestructura con granos finos equiaxiales recrystalizados lo que resulta en una soldadura de alta calidad. Es importante destacar que la zona de recrystalización se distingue de la zona termo-mecánicamente afectada (TMAZ) porque experimenta temperaturas más altas, a menudo superiores a los 500 °C para el caso de la aleación AA 7075-T651 que es la usada en el caso de estudio. Esta temperatura elevada es la que facilita el proceso de recrystalización dinámica. Del análisis se obtuvo que al duplicar la velocidad rotacional de la herramienta a 2400 rpm la temperatura de la zona de recrystalización (zona roja-naranja) en el plano de la sección A-A incrementó 4.3%, mientras que al disminuir la velocidad rotacional a 600 rpm durante el proceso FSW se obtuvo que la temperatura se redujo 7.6% en la zona de recrystalización.

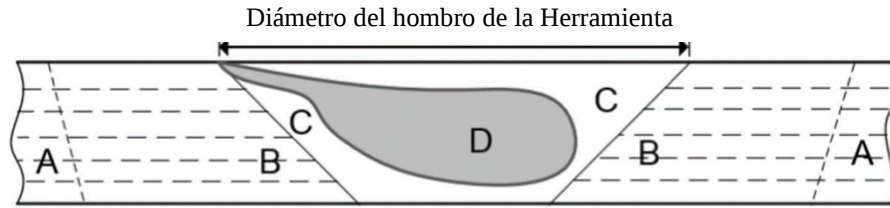
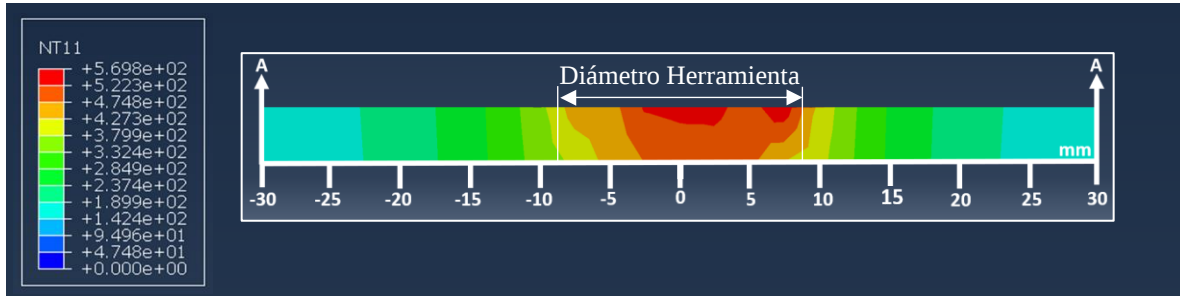
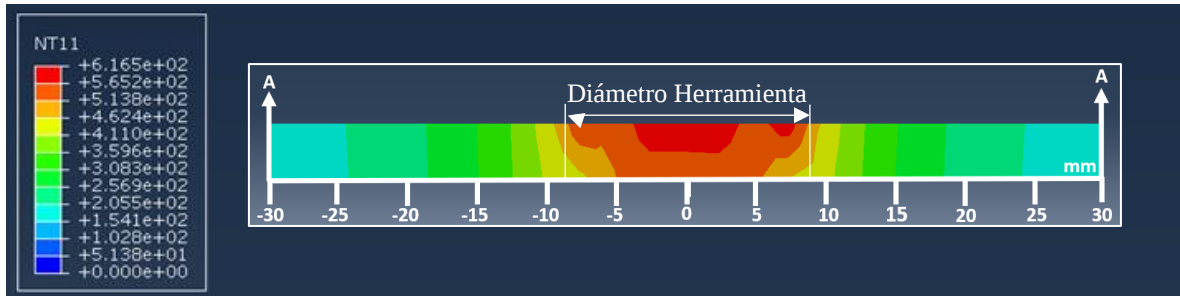


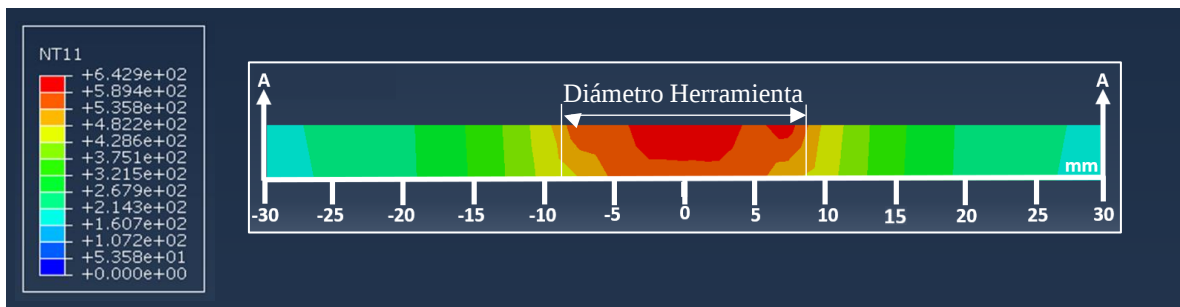
Figura 4.6 Microestructura en la sección transversal del material de la pieza después del proceso de FSW: A, metal base; B, Zona afectada por el calor (HAZ); C, Zona termo-mecánicamente afectada (TMAZ); D, cordón de soldadura (zona de recristalización).



a)



b)



c)

Figura 4.7 Distribución térmica en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura sección A-A: a) 600 rpm, b) 1200 rpm y c) 2400 rpm.

En la Figura 4.8 se observa la temperatura máxima que se registra en la ubicación del termopar durante el proceso de soldadura FSW, confirmando que la temperatura es directamente proporcional a la velocidad rotacional de la herramienta. La temperatura

máxima aumenta 6.9% al duplicar la velocidad rotacional de la herramienta y disminuye 13.1% al reducir la velocidad rotacional a la mitad.

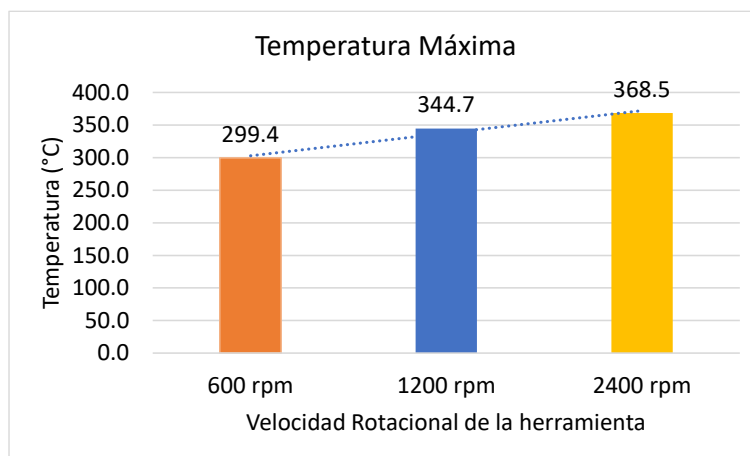


Figura 4.8 Temperatura máxima del análisis de la velocidad rotacional de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm).

4.1.3 Análisis de la velocidad de soldadura de la herramienta

Para examinar el impacto de la velocidad de soldadura sobre la distribución térmica dentro de la zona de la soldadura, se analizaron tres velocidades de soldadura diferentes 2, 4 y 8 mm/s. Se mantuvo constante para en cada análisis la velocidad de rotación de 1200 rpm y el radio del hombro de la herramienta de 9 mm. La influencia de la velocidad de soldadura de la herramienta en la variación de temperatura en la posición del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm) se presenta en la Figura 4.9, en donde se pueden observar tres curvas, cada una correspondiente a una velocidad de soldadura. De estos resultados se observa que la temperatura máxima obtenida aumenta al disminuir la velocidad de avance de la herramienta. Esto se explica porque cuando la velocidad de avance se reduce, se prolonga el tiempo durante el cual se proporciona entrada de calor a un punto específico en la pieza de trabajo, lo que resulta en un aumento de la temperatura en la zona de la soldadura. Del análisis se obtuvo que al duplicar la velocidad de soldadura de 2 mm/s a 4 mm/s se redujo la temperatura 6.9% en la posición del termopar durante la simulación del proceso FSW. Al aumentar la velocidad de soldadura a 8 mm/s la temperatura se redujo 13.1%

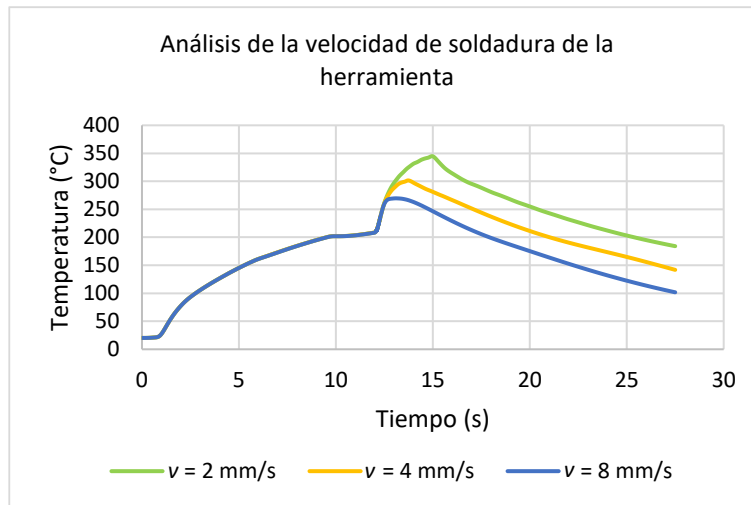


Figura 4.9 Curva de temperatura del análisis de la velocidad de soldadura de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm).

En la Figura 4.10 se puede observar el perfil de temperatura del ancho de la placa en la sección A-A, al incrementar la velocidad de soldadura de la herramienta la temperatura tiende a disminuir considerablemente en el área donde la herramienta hace contacto con la placa de aluminio. Del análisis de los resultados se obtuvo que al duplicar la velocidad de soldadura de la herramienta a 4 mm/s, el perfil de temperatura en el ancho de la pieza de trabajo disminuyó 6.5%, mientras que al realizar el proceso FSW con una velocidad de soldadura de 8 mm/s la temperatura se redujo en 10.9%.

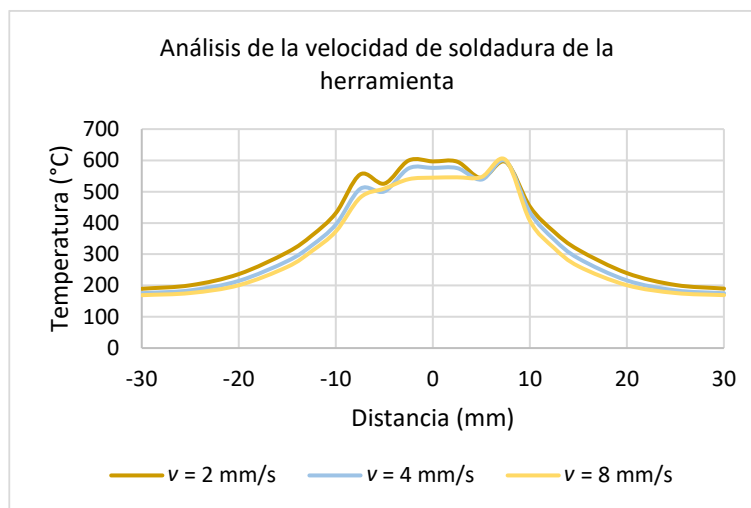
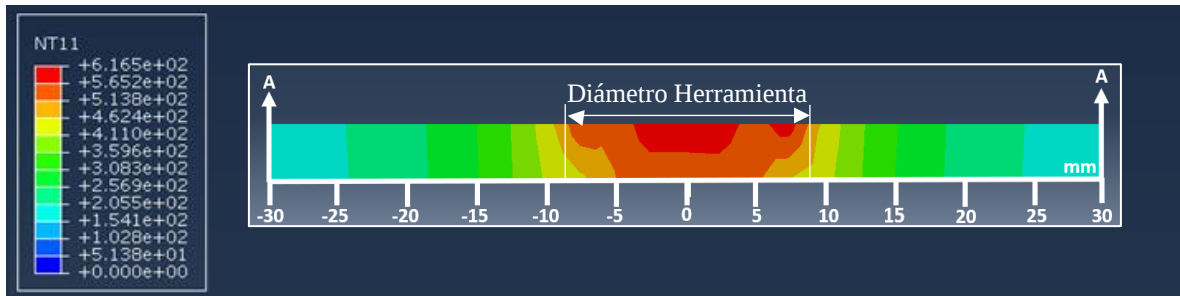


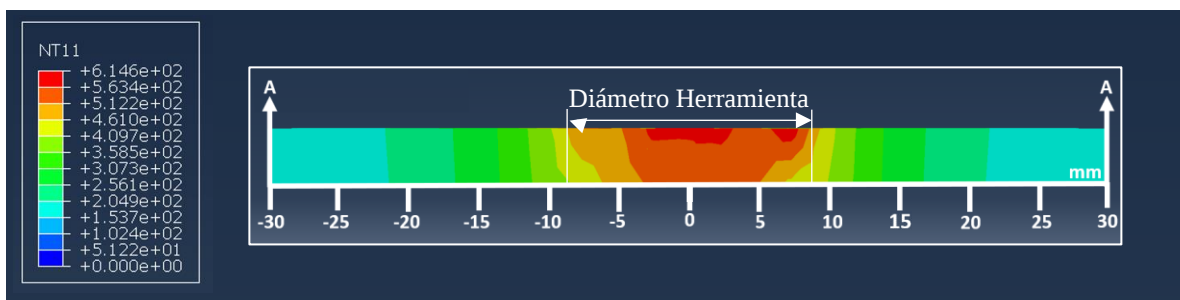
Figura 4.10 Perfil de temperatura del ancho de la placa en la sección A-A del análisis de la velocidad de soldadura de la herramienta.

En relación con la distribución térmica, la Figura 4.11 muestra cómo se distribuye la temperatura en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura en la sección A-A, que es donde se encuentra el termopar. Se observa que la temperatura de la sección disminuye a medida que aumenta la velocidad de soldadura de la herramienta. Además, se observa

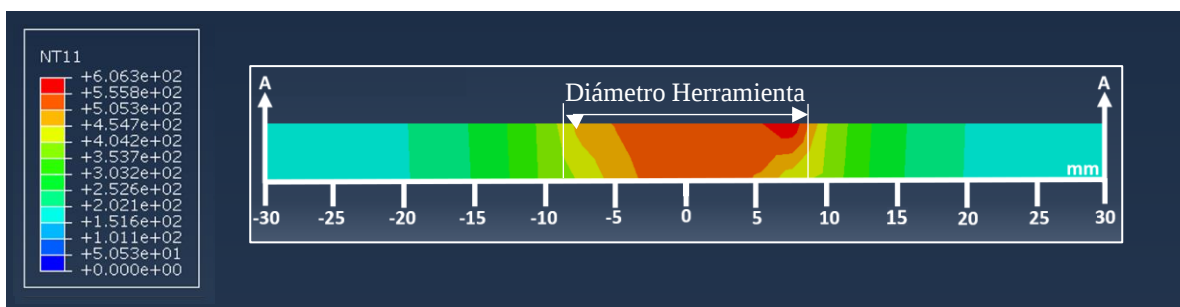
claramente que la zona de recrystalización (zona roja-naranja) se retrae al eje de rotación de la herramienta al aumentar la velocidad de soldadura. La zona de afectada por el calor y la zona de soldadura incrementa de tamaño cuando la velocidad de soldadura disminuye, debido a que existe más tiempo para conducir el calor generado por la herramienta alrededor del área en contacto. Al duplicar la velocidad de soldadura de la herramienta a 4 mm/s, la temperatura de la zona de recrystalización en el plano de la sección A-A disminuyó 8.6%, y al aumentar la velocidad de soldadura a 8 mm/s la temperatura en la zona de recrystalización se redujo en 9.8%.



a)



b)



c)

Figura 4.11 Distribución térmica en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura a) $v = 2$ mm/s, b) $v = 4$ mm/s y c) $v = 8$ mm/s.

En la Figura 4.12 se observa la temperatura máxima que se registra en la ubicación del termopar durante el proceso de soldadura FSW, confirmando que la temperatura es inversamente proporcional a la velocidad de soldadura de la herramienta. La temperatura máxima disminuye 12.5% al duplicar la velocidad de soldadura de la herramienta, y disminuye 21.7% al aumentar la velocidad de soldadura a 8 mm/s.

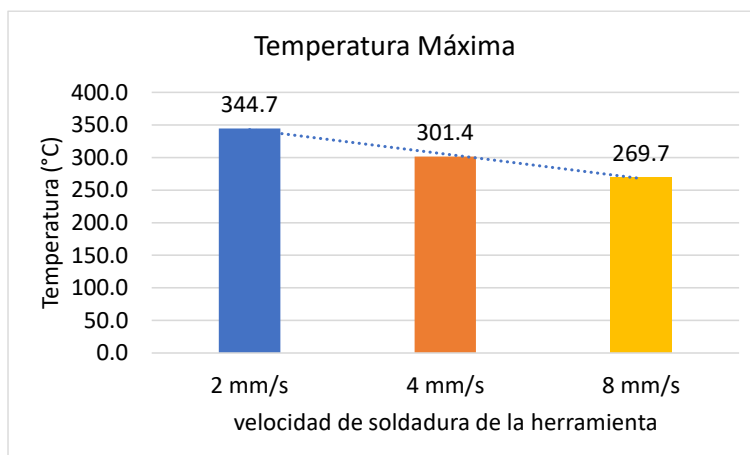


Figura 4.12 Temperatura máxima del análisis de la velocidad de soldadura de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm).

4.1.4 Análisis del radio del hombro de la herramienta

Para evaluar la influencia que tiene el tamaño del hombro de la herramienta sobre la distribución térmica en la zona de la soldadura, se consideraron tres dimensiones diferentes de radio del hombro 7, 9 y 12 mm. En cada uno de los análisis se mantuvo una velocidad de soldadura constante de 2 mm/s y una velocidad rotacional de la herramienta de 1200 rpm. Los resultados de la influencia del tamaño del hombro de la herramienta en la variación de temperatura en la posición del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm), se muestran en la Figura 4.13, en donde se pueden observar tres curvas, cada una correspondiente a un radio diferente.

El tamaño del hombro de la herramienta en el proceso de soldadura FSW juega un papel importante, debido a que tiene un impacto significativo en el comportamiento de la temperatura. Un hombro de herramienta más grande aumenta la generación de calor, esto como resultado del aumento del área de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo. Un diámetro óptimo del hombro de la herramienta proporciona una soldadura sin defectos, es por esto por lo que un correcto diseño del hombro de la herramienta es vital para obtener resultados óptimos. Un diámetro de hombro más pequeño en la herramienta FSW conlleva a una reducción del calentamiento y de la deformación plástica de la pieza de trabajo, afectando al resultado final de la soldadura. Además, cuando el diámetro del hombro de la herramienta es más pequeño de lo adecuado, puede limitar la capacidad de la herramienta de recolectar y empujar eficazmente el material durante la fase de desplazamiento de la soldadura. Esto

afecta la mezcla y la agitación del material, lo que puede influir en las propiedades mecánicas de la unión.

Del análisis de los resultados se obtuvo que al aumentar el radio del hombro la herramienta a 12 mm, la temperatura incrementó 72.2% en promedio en la posición del termopar durante la simulación del proceso FSW. Por el contrario, al disminuir el radio del hombro a 7 mm, la temperatura se redujo 15.4% debido a que existe menos área de contacto.

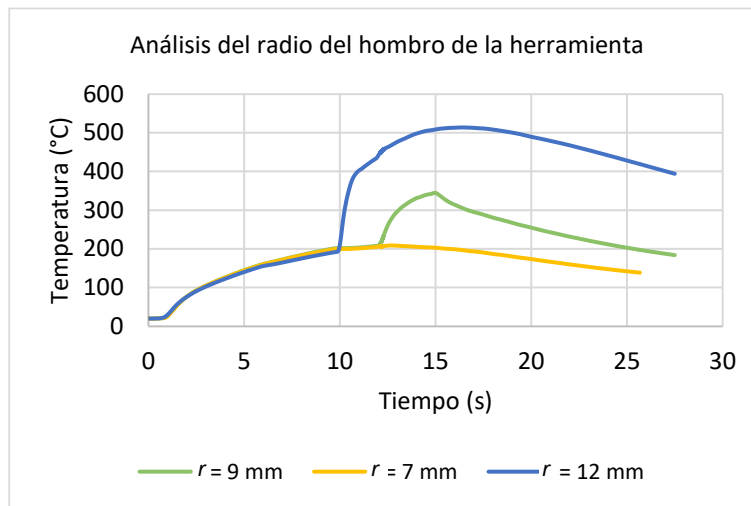


Figura 4.13 Curva de temperatura del análisis del radio del hombro de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm).

En la Figura 4.14 se puede observar el perfil de temperatura del ancho de la placa en la sección A-A, en donde se observa que, al incrementar el radio del hombro de la herramienta la temperatura tiende a aumentar considerablemente en el área donde la herramienta hace contacto con la pieza de trabajo. El tener mayor área de contacto incrementa la generación de calor y temperatura, así como el ancho de la soldadura. Al utilizar un radio de 12 mm en el hombro de la herramienta, el perfil de temperatura en el ancho de la pieza de trabajo aumento 77.4% en promedio, mientras que con un radio de hombro de 7 mm se redujo la temperatura un 33.7% en el ancho de la pieza de trabajo.

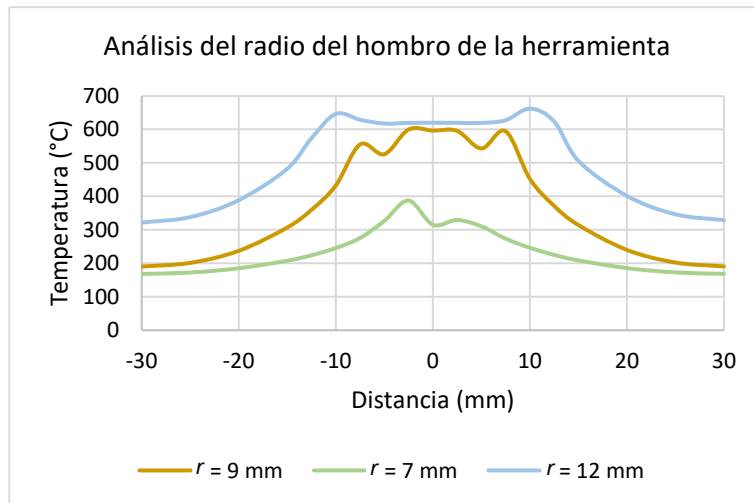
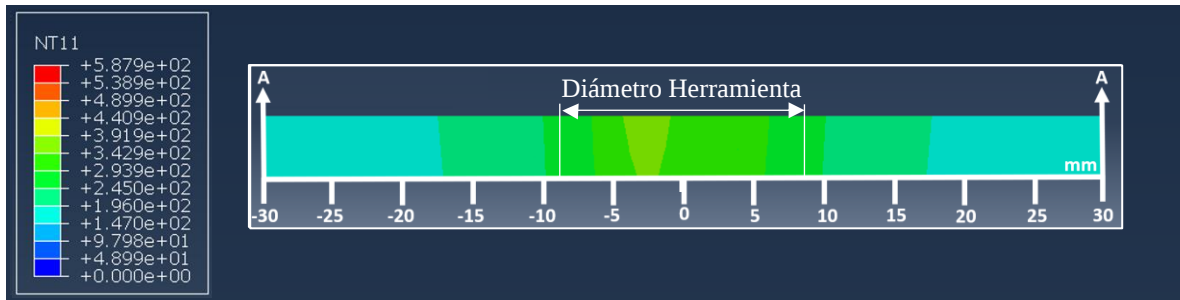


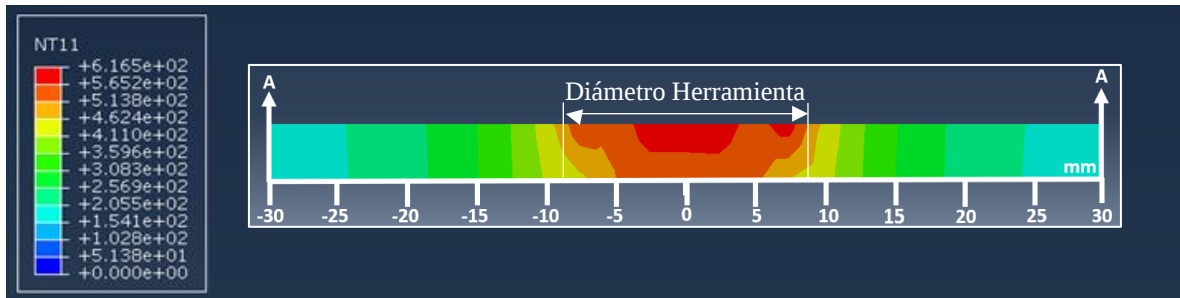
Figura 4.14 Perfil de temperatura del ancho de la placa en la sección A-A del análisis del radio del hombro de la herramienta.

Respecto a la distribución térmica, la Figura 4.15 muestra la manera en que la temperatura se distribuye en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura en la sección A-A, que es donde se ubica el termopar. Se evidencia que la temperatura de la sección incrementa conforme aumenta el tamaño del hombro de la herramienta. Asimismo, se aprecia que, al existir un incremento en la generación de calor, la zona de recristalización y la zona afectada térmicamente incrementan, lo cual garantiza que la soldadura tenga mejores propiedades y sea más resistente. Cuando el hombro de la herramienta es reducido, existe un área de contacto más pequeña entre la herramienta y la pieza de trabajo. Esto conlleva a la disminución de la fricción, generando menos calor durante el proceso FSW. Además, la deformación plástica del material se ve afectada al haber menos arrastre por parte de la herramienta, lo que resulta en una zona de recristalización más pequeña. Esta variación en la configuración puede ocasionar como resultado una soldadura potencialmente más frágil.

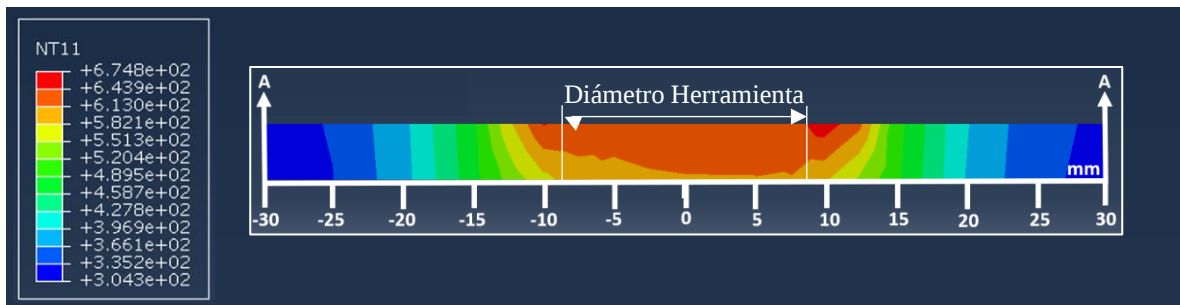
Del análisis de los resultados se obtuvo que al incrementar el radio del hombro de la herramienta a 12 mm la temperatura de la zona de recristalización (zona roja-naranja) en el plano de la sección A-A aumentó 17.2%, mientras que al disminuir el radio del hombro a 7 mm la temperatura se redujo 32.2% en la zona de recristalización.



a)



b)



c)

Figura 4.15 Distribución térmica en el plano perpendicular a la dirección de la soldadura: a) Radio hombro herramienta 7 mm, b) Radio hombro herramienta 9 mm y c) Radio hombro herramienta 12 mm.

En la Figura 4.16 se observa la temperatura máxima que se registra en la ubicación del termopar durante el proceso de soldadura FSW, se confirma que la temperatura es directamente proporcional al radio del hombro de la herramienta. La temperatura máxima aumentó 48.9% al aumentar el radio del hombro de la herramienta a 12 mm, y disminuyó 39.4% al reducir el radio del hombro a 7 mm.

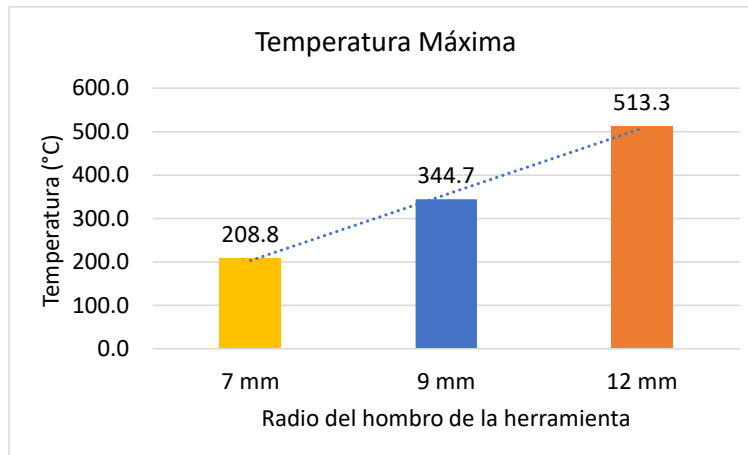


Figura 4.16 Temperatura máxima del análisis del radio del hombro de la herramienta en la ubicación del termopar ($x = 20$ mm, $z = 15$ mm).

4.2 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos demuestran que la velocidad de rotación de la herramienta, la velocidad de soldadura de la herramienta y el radio del hombro de la herramienta son parámetros críticos que influyen significativamente en el desempeño del proceso de soldadura FSW y en la calidad de la soldadura final.

4.2.1 Velocidad de rotación de la herramienta

La velocidad de rotación de la herramienta afecta la generación de calor, la mezcla de material y la deformación plástica de la pieza de trabajo durante el proceso de soldadura por fricción-agitación debido a su influencia directa en la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo.

La velocidad de rotación de la herramienta determina la velocidad a la que la herramienta fricciona y agita el material de trabajo, lo que a su vez influye en la cantidad de calor generada en la interfaz herramienta-material. Un aumento en la velocidad de rotación de la herramienta conlleva a una mayor fricción y agitación, lo que resulta en una mayor generación de calor en la zona de trabajo.

La velocidad de rotación de la herramienta afecta la capacidad de la herramienta para mezclar el material de trabajo a nivel microestructural, lo que es fundamental para la formación de una junta soldada de alta calidad. Una velocidad de rotación de la herramienta óptima garantiza una mezcla adecuada del material, lo que contribuye a la uniformidad de la microestructura en la zona afectada por la soldadura.

La velocidad de rotación de la herramienta influye en la cantidad de deformación plástica experimentada por el material de trabajo, ya que determina la cantidad de calor generada y la intensidad de la agitación. Una velocidad de rotación de la herramienta adecuada permite una deformación plástica controlada, lo que es esencial para la formación de una junta soldada sin defectos y con propiedades mecánicas óptimas.

Como conclusión un aumento en la velocidad de rotación de la herramienta conlleva a una mayor agitación y mezcla debido a que se genera mucho más calor, esto incide en que la zona de recrystalización aumente impactando positivamente en la microestructura y las propiedades metálicas de la unión soldada. A partir del análisis paramétrico se calculó que al duplicar la velocidad rotacional de la herramienta se aumentaba la temperatura de la zona de recrystalización 4.3%, mientras que al reducir la velocidad rotacional a la mitad se reduce la temperatura 7.6% en la zona de recrystalización.

4.2.2 Velocidad de soldadura de la herramienta

La velocidad de soldadura de la herramienta controla el patrón de flujo del material y la distribución de la temperatura durante el proceso de soldadura por fricción-agitación. Cuando la velocidad de soldadura de la herramienta es alta, el material se desplaza a una velocidad mayor, lo que puede influir en la distribución de la temperatura y en el patrón de flujo del material. Por otro lado, si la velocidad de soldadura de la herramienta es baja, el material se desplaza más lentamente, lo que también afecta la distribución de la temperatura y el patrón de flujo del material. El control preciso de la velocidad de soldadura de la herramienta es crucial para asegurar que el material se caliente y se deforme plásticamente de manera uniforme a lo largo de la junta de soldadura, lo que contribuye a la formación de una junta soldada de alta calidad. Además, la velocidad de soldadura de la herramienta también influye en la generación de calor y en la mezcla del material, lo que impacta directamente en la integridad de la junta soldada.

Además, la velocidad de soldadura de la herramienta influye en la calidad de la junta soldada al controlar la cantidad de calor aportado y la velocidad de deformación plástica del material debido a que la velocidad de soldadura de la herramienta controla la cantidad de material que se está procesando en un momento dado. Si la velocidad de soldadura es demasiado alta, el material no tendrá suficiente tiempo para ablandarse y deformarse plásticamente, lo que puede resultar en una junta soldada defectuosa. Por otro lado, si la velocidad de soldadura es demasiado baja, el material puede sobrecalentarse y sufrir una deformación excesiva, lo que también puede resultar en una junta soldada defectuosa. Por lo tanto, es importante optimizar la velocidad de soldadura para garantizar que el material se ablande y se deforme plásticamente de manera adecuada, lo que resultará en una junta soldada de alta calidad y libre de defectos.

Mediante el análisis paramétrico se logró cuantificar que al duplicar la velocidad de soldadura de la herramienta se disminuyó la temperatura de la zona de recristalización 8.6% y al cuadruplicar velocidad de soldadura se reduce la temperatura 9.8% en la zona de recristalización.

4.2.3 Radio del hombro de la herramienta

El radio del hombro de la herramienta afecta la entrada de calor, lo que a su vez influye en la calidad de la junta soldada. El radio del hombro de la herramienta determina la superficie de contacto entre el hombro de la herramienta y la pieza de trabajo durante el proceso de soldadura FSW. Un radio del hombro más grande resulta en una mayor área de contacto, lo que facilita una mayor transferencia de calor desde la herramienta hacia la pieza de trabajo.

La cantidad de calor introducida en la zona de trabajo afecta directamente la microestructura y las propiedades mecánicas de la junta soldada. Un radio del hombro de la herramienta óptimo puede garantizar una distribución uniforme del calor, lo que contribuye a la formación de una junta soldada de alta calidad y libre de defectos.

Un radio del hombro de la herramienta adecuado puede ayudar a controlar la temperatura en la zona de trabajo, evitando posibles problemas como el recocido o la sobretemperatura que podrían afectar la integridad de la junta soldada. La entrada controlada de calor permite una soldadura más eficiente y precisa, resultando en una junta soldada con propiedades mecánicas óptimas.

En conclusión, el tamaño del hombro de la herramienta desempeña un papel crucial en la entrada de calor durante el proceso de FSW, lo que impacta significativamente en la calidad y la integridad de la junta soldada final. Un radio del hombro de la herramienta adecuado puede garantizar una transferencia de calor controlada y uniforme, contribuyendo a la formación de una junta soldada de alta calidad.

Del análisis paramétrico se obtuvo que al aumentar el radio del hombro de la herramienta de 9 mm a 12 mm se aumentaba la temperatura de la zona de recristalización 17.2%, mientras que al reducir el radio del hombro de la herramienta de 9 mm a 7 mm se reduce la temperatura 32.2% en la zona de recristalización.

Conclusiones

Con el desarrollo de este proyecto se logró analizar, modelar y evaluar el efecto de diversos parámetros en el rendimiento del proceso de soldadura por fricción-agitación. El enfoque principal se centró en comprender la influencia de los parámetros en la calidad y eficiencia de las uniones resultantes. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes obtenidas con el desarrollo de este estudio:

a) Simulación por Elementos Finitos (MEF)

Se desarrolló un modelo de simulación por Elementos Finitos para el proceso de FSW, el cual se validó utilizando datos experimentales de la literatura. Este modelo permitió analizar la influencia de los diferentes parámetros en el proceso de soldadura y calidad de las uniones soldadas. Los resultados obtenidos fueron consistentes con los modelos teóricos y experimentales previamente establecidos, lo que confirma la validez y utilidad del modelo MEF propuesto para evaluar los efectos de los parámetros en el proceso de soldadura.

b) Análisis paramétrico

Al realizar un análisis paramétrico para evaluar la influencia de diversos parámetros en la calidad de las uniones soldadas por FSW, se llegó a las siguientes conclusiones:

Los parámetros clave en el proceso de soldadura por fricción-agitación son la velocidad de rotación de la herramienta, la velocidad de avance de la herramienta y el radio del hombro de la herramienta. Estos parámetros tienen una influencia significativa en la calidad de las uniones soldadas y en el rendimiento general del proceso. A continuación, se detalla cómo cada uno de estos parámetros afecta el proceso de FSW:

1. Velocidad de rotación de la herramienta (ω rpm):

- La velocidad de rotación de la herramienta es crucial para generar la agitación y mezcla del material alrededor del pin durante el proceso de FSW.
- Un aumento en la velocidad de rotación resulta en una mayor generación de calor, lo cual es esencial para lograr una soldadura exitosa al alcanzar la plasticidad del material.
- Una disminución en la velocidad de rotación puede afectar la calidad de la unión al no generar suficiente calor para la plastificación del material, lo que puede resultar en defectos en la soldadura.

2. Velocidad de avance de la herramienta (v mm/min):

- La velocidad de avance de la herramienta determina la velocidad a la cual se desplaza a lo largo de la línea de unión durante el proceso de FSW.

- Una velocidad de avance adecuada es crucial para mover el material agitado desde la parte frontal hacia la parte trasera del pin, finalizando así el proceso de soldadura.
- Un aumento en la velocidad de avance puede influir en la distribución térmica y en la calidad de la unión, mientras que una disminución puede afectar la eficiencia del proceso.

3. Radio del hombro de la herramienta:

- El radio del hombro de la herramienta afecta la presión ejercida sobre el material durante el proceso de FSW.
- Un radio más grande puede distribuir la carga de manera más uniforme, reduciendo las posibles deformaciones y tensiones en la zona de unión.
- Un radio más pequeño puede concentrar la presión en un área más reducida, lo que puede resultar en defectos en la soldadura y una menor resistencia de la unión.

En conjunto, la interacción entre estos parámetros es fundamental para lograr una soldadura de alta calidad en el proceso de FSW. Ajustar y optimizar estos parámetros de manera adecuada mediante simulaciones por el método de elementos finitos puede ayudar a mejorar la eficiencia del proceso, reducir defectos en las uniones soldadas y garantizar la integridad estructural de las piezas soldadas. Variando estos parámetros y manteniendo otros constantes, se pudo observar cómo afectan la temperatura y la distribución térmica a lo largo del proceso de FSW. Los resultados obtenidos proporcionaron información valiosa para optimizar el proceso y mejorar la calidad de las uniones soldadas.

En resumen, este estudio ha demostrado la importancia de utilizar herramientas de simulación como el MEF para comprender mejor los procesos de soldadura por fricción-agitación y optimizar los parámetros involucrados. Los resultados obtenidos contribuyen al avance en la eficiencia y calidad de las uniones soldadas mediante FSW, y sientan las bases para futuras investigaciones en este campo.

Contribuciones

Las principales contribuciones del proyecto de tesis son las siguientes:

- Se ha creado un modelo de simulación por elementos finitos para el proceso de soldadura por fricción-agitación.
- Se ha realizado un análisis paramétrico detallado para evaluar los parámetros como la velocidad de soldadura de la herramienta, la velocidad rotacional de la herramienta y el radio del hombro de la herramienta impactan en la calidad de las uniones soldadas.
- Se ha contribuido al avance en el conocimiento sobre los procesos de soldadura por fricción-agitación.

- Se han identificado y analizado los factores clave que influyen en la calidad de las uniones soldadas, lo que puede servir de base para futuras investigaciones en el campo de la soldadura por FSW.

En resumen, las contribuciones de este proyecto de tesis incluyen el desarrollo de un modelo de simulación avanzado, el análisis detallado de los parámetros del proceso y la generación de conocimiento significativo sobre el proceso de soldadura por fricción-agitación. Estas contribuciones son fundamentales para mejorar la eficiencia, calidad y comprensión de las uniones soldadas mediante FSW.

Trabajo futuro

Como trabajo a futuro se visualizan los siguientes puntos:

- **Análisis con diferentes materiales:** Seleccionar una variedad de materiales representativos, incluyendo diferentes aleaciones y espesores, para realizar simulaciones con el modelo MEF del proceso de soldadura por fricción-agitación. Esto permitirá evaluar cómo diferentes materiales afectan la calidad de las uniones soldadas y la resistencia de estas.
- **Comportamiento de la fricción:** Evaluar el efecto del comportamiento del coeficiente de fricción en función de la temperatura, en el desempeño de la soldadura por fricción. Esto permitirá reducir el error entre las pruebas experimentales y la simulación numérica.
- **Pruebas experimentales:** Realizar pruebas experimentales para obtener los parámetros de operación del proceso FSW para cada material seleccionado. Esto incluye la velocidad de rotación, la velocidad de avance, la presión de contacto y la temperatura inicial. Estos datos serán fundamentales para la mejora del modelo MEF.
- **Modelo analítico:** Desarrollar un modelo analítico que permita predecir el comportamiento del proceso FSW en función de los parámetros del proceso y materiales.

Referencias

- [1] Akinlabi, E. T., & Mahamood, R. M. (2020). Solid-state welding: friction and friction stir welding processes. Cham, Switzerland: Springer.
- [2] Mishra, R. S., Mahoney, M. W., Sato, Y., & Hovanski, Y. (Eds.). (2015). Friction stir welding and processing VIII. John Wiley & Sons.
- [3] Küçükömeroğlu, T., Aktarer, S. M., İpekoğlu, G., & Çam, G. (2018). Microstructure and mechanical properties of friction-stir welded St52 steel joints. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 25, 1457-1464.
- [4] Beygi, R., Kazeminezhad, M., Mehrizi, M. Z., & Loureiro, A. (2017). Friction stir butt welding of Al-Cu bilayer laminated composites: analysis of force, torque, and temperature. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 393-400.
- [5] Mubiayi, M. P., Akinlabi, E. T., & Makhatha, M. E. (2019). Current trends in friction stir welding (FSW) and friction stir spot welding (FSSW) (Vol. 6). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- [6] Kumar, V., & Kumar, S. (2016). A review report on mechanical properties of Al 6106 T6 alloy joined by friction stir welding and TIG welding. *Int J Appl Sci Technol Res Excell*, 6(2).
- [7] Rizvi, S. A. (2010). Advanced welding technology. SK Kataria and Sons.
- [8] Phillips, D. H. (2023). Welding engineering: an introduction. John Wiley & Sons.
- [9] Chaudhary, K. (2017). A review on advance welding processes. *Int. J. Eng. Tech*, 3, 86-96.
- [10] Thomas, W. M. (1991). Friction stir butt welding, international patent application No. PCT/GB92. GB Patent Application No. 9125978.8.
- [11] Nandan, R., DebRoy, T., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties. *Progress in materials science*, 53(6), 980-1023.
- [12] Hattingh, D. G., Van Niekerk, T. I., Blignault, C., Kruger, G., & James, M. N. (2004). Analysis of the FSW force footprint and its relationship with process parameters to optimise weld performance and tool design. *Welding in the World*, 48, 50-58.
- [13] Lombard, H. (2007). Optimized fatigue and fracture performance of friction stir welded aluminium plate: a study of the inter-relationship between process parameters, TMAZ, microstructure, defect population and performance (Doctoral dissertation, University of Plymouth).
- [14] Mashinini, P. M. (2010). Process window for friction stir welding of 3 mm titanium (Ti-6Al-4V).
- [15] Nelson, T. W., Sorensen, C. D., & Packer, S. M. (2004). U.S. Patent No. 6,732,901. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [16] Merino Hernández, D. (2019). Soldadura de ejes por fricción (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

- [17] Lombard, H. (2007). Optimized fatigue and fracture performance of friction stir welded aluminium plate: a study of the inter-relationship between process parameters, TMAZ, microstructure, defect population and performance (Doctoral dissertation, University of Plymouth).
- [18] [18] Lohwasser, D., & Chen, Z. (Eds.). (2009). Friction stir welding: From basics to applications. Elsevier.
- [19] Dong, P., Lu, F., Hong, J. K., & Cao, Z. (2001). Coupled thermomechanical analysis of friction stir welding process using simplified models. *Science and Technology of Welding and Joining*, 6(5), 281-287.
- [20] Chao, Y. J., Qi, X., & Tang, W. (2003). Heat transfer in friction stir welding—experimental and numerical studies. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 125(1), 138-145.
- [21] Jain, R., Pal, S. K., & Singh, S. B. (2017). Finite element simulation of temperature and strain distribution during friction stir welding of AA2024 aluminum alloy. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 98, 37-43.
- [22] Sadeghian, B., Taherizadeh, A., & Atapour, M. (2018). Simulation of weld morphology during friction stir welding of aluminum-stainless steel joint. *Journal of Materials Processing Technology*, 259, 96-108.
- [23] da Cunha, P. H. C. P., Lemos, G. V. B., Bergmann, L., Reguly, A., dos Santos, J. F., Marinho, R. R., & Paes, M. T. P. (2019). Effect of welding speed on friction stir welds of GL E36 shipbuilding steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1041-1051.
- [24] Kaid, M., Zemri, M., Brahmi, A., & Zahaf, S. (2019). Effect of friction stir welding (FSW) parameters on the peak temperature and the residual stresses of aluminum alloy 6061-T6: Numerical modelisation. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 13, 797-807.
- [25] Babu, K. T., Muthukumaran, S., & Kumar, C. B. (2019). The role of material location on the first mode of metal transfer and weld formation in dissimilar friction stir welded thin sheets. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 72, 1589-1592.
- [26] Akbari, M., Aliha, M. R. M., & Berto, F. (2023). Investigating the role of different components of friction stir welding tools on the generated heat and strain. *Forces in Mechanics*, 10, 100166.
- [27] Kumar, R., Bhadauria, S. S., Sharma, V., & Kumar, M. (2023). Effect on microstructure and mechanical properties of single pass friction stir welded aluminium alloy AA-7075-T651 joint. *Materials Today: Proceedings*, 80, 40-47.
- [28] Karumuri, S., Halder, B., Pradeep, A., Karanam, S. A. K., Sri, M. N. S., Anusha, P. & Vijayakumar, S. (2023). Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis in friction stir welding for dissimilar aluminium alloy. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-18.
- [29] Battina, N. M., Chirala, H. K., Vanthala, V. S. P., Javvadi, E. M., Nukathoti, R. S., & Mohammed, A. (2023). Experimental and finite element investigations on formability

- of friction stir welded tailor welded blanks of AA6061 and AA2017. *Materials Today: Proceedings*.
- [30] Matitopanum, S., Pitakaso, R., Sethanan, K., Srichok, T., & Chokanat, P. (2023). Prediction of the ultimate tensile strength (UTS) of asymmetric friction stir welding using ensemble machine learning methods. *Processes*, 11(2), 391.
 - [31] Kumar, A. K., Surya, M. S., & Venkataramaiah, P. (2023). Performance evaluation of machine learning based-classifiers in friction stir welding of Aa6061-T6 alloy. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(1), 469-472.
 - [32] Neto, D. M., & Neto, P. (2013). Numerical modeling of friction stir welding process: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 115-126.
 - [33] Chao, Y. J., & Qi, X. (1999, June). Heat transfer and thermo-mechanical analysis of friction stir joining of AA6061-T6 plates. In *1st International Symposium on Friction Stir Welding* (Vol. 6, pp. 14-16). California: Thousand Oaks.
 - [34] Schmidt, H., & Hattel, J. (2005). Modelling heat flow around tool probe in friction stir welding. *Science and Technology of Welding and joining*, 10(2), 176-186.
 - [35] Fonseca, Z. D. (2011). *El método de los elementos finitos: una introducción*. Venezuela: Fondo Editorial Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta.
 - [36] Fish, J., & Belytschko, T. (2007). *A first course in finite elements* (Vol. 1). New York: Wiley.
 - [37] Abaqus Finite Element Analysis <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus>. Consultado 2024.
 - [38] Salloomi, K. N., Hussein, F. I., & Al-Sumaidae, S. N. (2020). Temperature and stress evaluation during three different phases of friction stir welding of AA 7075-T651 alloy. *Modelling and simulation in engineering*, 2020, 1-11.
 - [39] Al-Badour, F., Merah, N., Shuaib, A., & Bazoune, A. (2014). Thermo-mechanical finite element model of friction stir welding of dissimilar alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72, 607-617.
 - [40] Johnson, G. R. (1983). A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, Netherlands, 1983.
 - [41] Yan, H., Hua, J., & Shivpuri, R. (2007). Flow stress of AISI H13 die steel in hard machining. *Materials & design*, 28(1), 272-277.
 - [42] Salloomi, K. N. (2019). Fully coupled thermomechanical simulation of friction stir welding of aluminum 6061-T6 alloy T-joint. *Journal of Manufacturing Processes*, 45, 746-754.