

Diseño de una metodología de adaptación de máquinas de fresado vertical convencional a un
proceso de soldadura por fricción-agitación

Robin Alexis Cristancho Perilla

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Ingeniería Mecánica

Director

Manuel del Jesús Martínez

Ph.D. Mecánica computacional

Codirector

Óscar Rodolfo Bohórquez

Ph.D. Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Maestría en Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mis padres, Carmen y Robinson, por su apoyo incondicional, su sacrificio constante y el amor que siempre me han brindado.

A mis hermanas y sobrinos, por su cariño, paciencia y compañía permanente.

A Laura, por su amor, comprensión y apoyo incondicional durante cada etapa de este proceso.

Y a todas las personas que, de una u otra forma, me acompañaron y apoyaron a lo largo de este proceso, aportando ánimo, confianza y motivación para hacerlo posible.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por ser mi alma mater y contribuir de manera significativa a mi proceso de formación académica y profesional.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindar un entorno académico riguroso y un espacio propicio para el desarrollo integral de este trabajo.

A los docentes de la Universidad Industrial de Santander, por los conocimientos y orientaciones aportados a lo largo del proceso formativo.

Al Semillero de Investigación en Manufactura Aplicada (SIMA), sus miembros actuales y anteriores.

A los profesores **Oscar Bohórquez, Alberto Pertuz y Manuel Martínez**, por su acompañamiento, orientación académica y valiosos aportes en el desarrollo de este trabajo de investigación.

A Danilo, Juan, Kevin, Franger y Linda, por aceptar el reto de aportar con su compromiso, dedicación y disposición a lo largo de este proceso.

A César Velasco, por su apoyo, colaboración y valiosa ayuda durante el desarrollo de las actividades asociadas a este trabajo.

Un agradecimiento especial al profesor **Rodrigo Torres Sáez**, por su apoyo, disposición y acompañamiento, los cuales fueron fundamentales durante el desarrollo de este proceso académico.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	18
1. Planteamiento del problema.....	20
2. Justificación	22
3. Marco Teórico.....	24
3.1 Fresadoras convencionales.....	24
3.1.1 Clasificación de las fresadoras.....	25
3.1.1.3 Clasificación según el esquema de accionamiento:	34
3.1.2 Parámetros de operación de las fresadoras	36
3.2 Soldadura por fricción-agitación (FSW).....	40
3.2.1 Parámetros del proceso FSW	42
3.2.2 Herramienta de FSW.....	44
3.2.3 Regiones y características del material soldado.....	46
3.2.4 Fuerzas características en el proceso FSW	47
3.2.5 Defectos de soldadura en FSW	50
3.2.5.1 Porosidad.....	51
3.2.5.2 Cavidades internas(poro gusano).....	51
3.2.5.3 Kissing bond	52
3.2.5.4 Desalineamiento el.....	53
3.2.5.5 Lack of fill.....	54
3.2.5.6 Fusión incompleta.....	54
4. Objetivos	57

4.1 Objetivo General.....	57
4.2 Objetivos Específicos.....	57
5. Metodología.....	58
5.1 Fase I. Investigación y estructuración técnica del proceso FSW.....	58
5.2 Fase II. Diseño y fabricación de la herramienta FSW.....	59
5.3 Fase III. Definición y ejecución del proceso FSW en fresadora convencional.....	61
5.4 Fase IV. Caracterización de las juntas soldadas por FSW.....	62
5.5 Fase V. Tratamiento y análisis de resultados.....	62
5.6 Fase VI. Generación de la metodología de adaptación.....	63
6. Resultados.....	65
6.1 Resultados de la fase I.....	65
6.1.1 Cálculo de la herramienta FSW.....	65
6.1.2 Relación entre parámetros y defectos del proceso.....	67
6.1.3 Relación entre los parámetros del proceso y las propiedades mecánicas.....	70
6.1.4 Selección de parámetros del proceso.....	71
6.2 Resultados de la fase II.....	73
6.2.1 Diámetro del hombro.....	74
6.2.2 Diámetro del pin.....	74
6.2.3 Longitud del pin.....	75
6.2.4 Material de la herramienta FSW.....	76
6.2.5 Fabricación de la herramienta FSW.....	77
6.3 Resultados de la fase III.....	83
6.3.1 Ejecución inicial del proceso FSW.....	83

6.3.2 Caracterización del equipo y ejecución experimental definitiva	85
6.4 Resultados de la fase IV	94
6.4.1 Diseño y fabricación de las probetas	94
6.4.2 Ensayo de tracción	96
6.4.3 Ensayo de microdureza Vickers.....	98
6.4.4 Ensayo de impacto	101
6.5 Resultados de la fase V	102
6.5.1 Resultados de los ensayos de tracción	103
6.5.2 Resultados de los ensayos de dureza	112
6.5.3 Resultados de los ensayos de impacto	116
6.5.4 Comparación numérica de propiedades mecánicas con otros procesos de soldadura	118
7. Algoritmo de adaptación de fresadoras convencionales para la ejecución del proceso FSW	121
7.1 Sub-algoritmo A: Desacoplamiento del avance en fresadoras con motor único y velocidades discretas.....	126
7.2 Sub-algoritmo B: Conversión a control continuo en fresadoras con motores independientes	127
7.3 Sub-algoritmo C: Independización del avance en fresadoras con rotación continua	128
8. Conclusiones	129
9. Recomendaciones	131
Referencias Bibliográficas	132

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Clasificación de las fresadoras convencionales según la orientación del husillo	28
Tabla 2 Clasificación de las fresadoras según el sistema de transmisión de potencia.....	34
Tabla 3 Clasificación de las fresadoras según el esquema de accionamiento	36
Tabla 4 Energía específica de corte para operaciones de mecanizado	39
Tabla 5 Clasificación general de los parámetros del proceso FSW	43
Tabla 6 Actividades desarrolladas en la Fase I.....	59
Tabla 7 Actividades desarrolladas en la Fase II.....	60
Tabla 8 Actividades desarrolladas en la Fase III	61
Tabla 9 Actividades desarrolladas en la Fase IV	62
Tabla 10 Actividades desarrolladas en la Fase V	63
Tabla 11 Actividades desarrolladas en la Fase VI.....	64
Tabla 12 Artículos analizados sobre diseño de la herramienta FSW.....	66
Tabla 13 Artículos analizados sobre parámetro del proceso FSW y la ocurrencia de defectos ...	68
Tabla 14 Parámetros seleccionados para el proceso FSW	72
Tabla 15 Composición química del acero para la herramienta FSW.....	76
Tabla 17 Hoja de ruta de fabricación de la herramienta FSW con pin cónico liso.....	77
Tabla 18 Hoja de ruta de fabricación de la herramienta FSW con pin cónico roscado	78
Tabla 19 Microdureza antes y después del temple – Herramienta con pin cónico liso	81
Tabla 20 Microdureza antes y después del temple – Herramienta con pin cónico roscado	82
Tabla 21 Parámetros definitivos para las juntas	91
Tabla 22 Tabla de combinaciones de parámetros	92

Tabla 23 Propiedades mecánicas promedio obtenidas en los ensayos de tracción.....	105
Tabla 24 Dureza promedio de la zona de agitación NZ para cada junta soldada	115
Tabla 25 Energía absorbida promedio en el ensayo de impacto para las juntas soldadas	117
Tabla 26 Comparación numérica de la resistencia última a la tracción (Sut) en juntas AA6061 soldadas mediante diferentes técnicas	119

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Fresadora horizontal de codo y columna con árbol portafresas	26
Figura 2 Fresadora vertical de codo y columna	27
Figura 3 Fresadora universal con mesa giratoria	28
Figura 4 Esquema general de la cadena cinemática de una fresadora convencional	30
Figura 5 Esquema general del proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW)	42
Figura 6 Formas típicas del hombro de la herramienta FSW	45
Figura 7 Tipos representativos de pin utilizados en el proceso FSW	46
Figura 8 Regiones características en una junta soldada por FSW	47
Figura 9 Defectos que ocurren en las soldaduras por fricción agitación	51
Figura 10 Poro de gusano al final del cordón de soldadura	52
Figura 11 Representación del defecto de soldadura Kissing bond	53
Figura 12 Defecto superficial de soldadura Lack of Fill	54
Figura 13 Modelo para la formación de defectos en FSW	55
Figura 14 Diagrama TTT para el acero de la herramienta FSW.....	79
Figura 15 Distribución de muescas para dureza	80
Figura 16 Distancia mínima entre muescas	80
Figura 17 Muesca desde microscopio (X10)	81
Figura 18 Herramientas antes y después del temple	82
Figura 19 Fresadora tipo V-AX-DX.....	84
Figura 20 Fresadora vertical convencional FU 250x1000 - Fritz Heckert	86
Figura 21 Control de velocidad de avance y posicionamiento de la mesa de la fresadora.....	87

Figura 22 Control de velocidad de rotación de la herramienta de la fresadora	88
Figura 23 Tacómetro digital DT- 2234C+	88
Figura 24 Montaje experimental de las láminas de aluminio en la fresadora.....	89
Figura 25 Alineación de la herramienta sobre las láminas de aluminio	90
Figura 26 Pruebas de parámetros de soldadura.....	91
Figura 27 Registro de condiciones de junta.....	93
Figura 28 Planos del diseño de las probetas de tracción e impacto	95
Figura 29 Probetas de tracción e impacto cortadas por chorro de agua.....	96
Figura 30 Maquina universal de ensayos de tracción	97
Figura 31 Probetas de tracción después de los ensayos.....	98
Figura 32 Durómetro Falcon 400G2.....	99
Figura 33 Procedimiento de indentación Vickers.....	100
Figura 34 Esquema del perfil de micro dureza Vickers de las juntas.....	100
Figura 35 Registro de datos de impacto.....	102
Figura 36 Curva de esfuerzo - deformación	104
Figura 37 Diagrama de barras con intervalos de error para Sut	106
Figura 38 Diagrama de barras con intervalos de error para Sy.....	107
Figura 39 Diagrama de barras con intervalos de error para E	108
Figura 40 Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 520 RPM.....	109
Figura 41 Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 620 RPM.....	109
Figura 42 Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 720 RPM.....	110
Figura 43 Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo a la fluencia para 520 RPM.....	111
Figura 44 Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo a la fluencia para 620 RPM.....	111

Figura 45 Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo a la fluencia para 720 RPM.....	112
Figura 46 Perfil de dureza para las juntas J1, J2 y J3	113
Figura 47 Perfil de dureza para las juntas J4, J5 y J6	114
Figura 48 Perfil de dureza para las juntas J7, J8 y J9	115
Figura 49 Algoritmo de adaptación de fresadora a FSW	122
Figura 50 Sub-algoritmo A	124
Figura 51 Sub-algoritmo B	125
Figura 52 Sub-algoritmo C	125

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice A. Registro del procedimiento de soldadura (WPS).

Apéndice B. Datos de ensayos mecánicos.

Apéndice C. Procesamiento de datos de ensayos mecánicos.

Glosario

Dureza Vickers (HV): Medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada, obtenida mediante la aplicación de una carga controlada con un indentador piramidal de diamante.

Energía absorbida: Cantidad de energía requerida para fracturar una probeta mediante un impacto pendular, utilizada como indicador de la tenacidad del material.

Fresadora convencional: Máquina-herramienta utilizada principalmente para operaciones de mecanizado, que puede ser adaptada para realizar procesos FSW bajo condiciones controladas.

Herramienta FSW: Elemento no consumible compuesto generalmente por un hombro y un pin, encargado de generar calor, plastificar el material y promover la mezcla del material base durante el proceso de soldadura por fricción-agitación.

Límite elástico (SY): Tensión máxima que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.

Material base (BM): Material original que no ha sido afectado por el proceso de soldadura, utilizado como referencia para la comparación de propiedades mecánicas y microestructurales.

Módulo de elasticidad (E): Parámetro que describe la rigidez del material, definido como la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación en la región elástica.

Profundidad de penetración: Distancia a la que el pin de la herramienta FSW ingresa en el material base, determinante para asegurar la correcta mezcla y consolidación de la junta.

Resistencia última a la tracción (SUT): Esfuerzo máximo de tracción que un material puede soportar al ser estirado antes de fracturarse o romperse.

Soldadura por fricción-agitación (FSW): Proceso de soldadura en estado sólido en el que una herramienta no consumible, mediante rotación y avance controlado, genera calor por fricción y deformación plástica, permitiendo la unión de materiales sin llegar a la fusión.

Transmisión cinemática: Conjunto de elementos mecánicos encargados de transmitir el movimiento y la potencia desde el motor hacia el husillo y los sistemas de avance de la fresadora.

Variador de frecuencia (VFD): Dispositivo electrónico que permite controlar de manera continua la velocidad de un motor eléctrico mediante la variación de la frecuencia de alimentación.

Velocidad de avance (VA): Velocidad lineal con la que la herramienta FSW se desplaza a lo largo de la línea de soldadura, controlando el tiempo de interacción térmica y mecánica con el material.

Velocidad de rotación (VR): Número de revoluciones por minuto del husillo y de la herramienta FSW, parámetro que influye directamente en la generación de calor durante el proceso de soldadura.

Welding Procedure Specification (WPS): Documento técnico en el que se registran y estandarizan las condiciones operativas utilizadas durante la ejecución del proceso de soldadura.

Zona afectada por el calor (HAZ): Área del material base que se ve influenciada únicamente por el ciclo térmico del proceso FSW, sin deformación plástica significativa, y que puede presentar cambios microestructurales.

Zona de agitación (NZ): Región central de la junta soldada sometida a intensa deformación plástica y altas temperaturas, caracterizada por un refinamiento significativo del tamaño de grano.

Zona termo-mecánicamente afectada (TMAZ): Región adyacente a la zona de agitación que experimenta deformación plástica moderada y calentamiento, sin alcanzar la recristalización completa del material.

Resumen

Título: Diseño de una metodología de adaptación de máquinas de fresado vertical convencional a un proceso de soldadura por fricción-agitación*

Autor: Robin Alexis Cristancho Perilla**

Palabras Clave: fresadoras, soldadura por fricción-agitación, propiedades mecánicas, aluminio

Descripción: La soldadura por fricción-agitación (FSW) es una tecnología que permite la unión de materiales en estado sólido. Su implementación ha sido limitada debido al alto costo de los equipos especializados, lo que dificulta su adopción en la industria manufacturera. En este contexto, la adaptación de fresadoras convencionales para ejecutar FSW ha sido explorada en el ámbito académico como una alternativa viable para integrar esta tecnología sin necesidad de adquirir maquinaria específica. Sin embargo, la ausencia de una metodología que facilite dicha adaptación ha limitado su transferencia, generando una brecha entre la investigación académica y su aplicación industrial. Este estudio propuso el desarrollo de una metodología para adaptar fresadoras convencionales al proceso FSW, estableciendo criterios técnicos y operativos. Para ello, se analizaron distintos tipos de fresadoras, evaluando su capacidad de adaptación en función de sus características mecánicas y sistemas de transmisión de potencia. Posteriormente, se seleccionó una fresadora sobre la cual se realizaron adaptaciones operativas orientadas a asegurar su compatibilidad con el proceso, incluyendo ajustes y la medición de variables clave. Finalmente, las uniones obtenidas fueron evaluadas mediante ensayos mecánicos. Los resultados demostraron que, mediante las adaptaciones adecuadas, una fresadora convencional puede ejecutar FSW de manera efectiva, obteniendo uniones con propiedades mecánicas comparables a las logradas con equipos especializados. La metodología desarrollada constituye una alternativa técnicamente viable y económicamente accesible para la industria, facilitando la implementación del proceso FSW en entornos productivos. Estos resultados sirven como base para futuras investigaciones orientadas a la optimización del proceso y la ampliación de su aplicación en diferentes sectores industriales.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Maestría en Ingeniería Mecánica. Director: Manuel del Jesús Martínez. Doctor en Mecánica Computacional. Codirector: Oscar Rodolfo Becerra Bohórquez. Doctor en Ingeniería de Materiales

Abstract

Title: Design of a Methodology for Adapting Conventional Vertical Milling Machines to a Friction Stir Welding Process*

Author(s): Robin Alexis Cristancho Perilla**

Key Words: milling machines, friction stir welding, mechanical properties, aluminum

Description: Friction Stir Welding (FSW) is a solid-state joining technology that enables the production of high-quality joints while avoiding the defects commonly associated with fusion welding processes. However, its industrial implementation has been limited by the high cost of specialized equipment, which restricts its adoption within the manufacturing industry. In this context, the adaptation of conventional milling machines to perform FSW has been explored in the academic domain as a viable alternative for integrating this technology without the need for dedicated machinery. Nevertheless, the lack of a systematic methodology to guide such adaptations has constrained their effective transfer to industrial practice, resulting in a gap between academic research and industrial application. This study proposes the development of a methodology for adapting conventional milling machines to perform FSW, based on well-defined technical and operational criteria. To this end, different types of milling machines were analyzed to evaluate their adaptability according to their mechanical characteristics and power transmission systems. Subsequently, a specific milling machine was selected and subjected to operational adaptations aimed at ensuring compatibility with the FSW process, including adjustments and the measurement of key process variables. The resulting welded joints were evaluated through mechanical testing. The results demonstrated that, with appropriate adaptations, a conventional milling machine can effectively perform FSW, producing joints with mechanical properties comparable to those obtained using specialized equipment. The proposed methodology represents a technically viable and cost-effective solution for industry, facilitating the implementation of FSW in manufacturing environments. These findings provide a basis for future research focused on process optimization and the expansion of FSW applications across different industrial sectors.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Master's Program in Mechanical Engineering. Advisor: Manuel del Jesus Martínez, PhD in Computational Mechanics. Co-advisor: Oscar Rodolfo Becerra Bohórquez, PhD in Materials Engineering.

Introducción

La soldadura por fricción-agitación (FSW, por sus siglas en inglés) es un proceso de unión en estado sólido que ha demostrado ventajas significativas frente a los métodos de soldadura por fusión (Romero Díaz & Rincón Medina, 2020), particularmente en términos de calidad metalúrgica, control de defectos y desempeño mecánico de las juntas. No obstante, su implementación industrial se ha concentrado principalmente en máquinas dedicadas, las cuales presentan elevados costos de adquisición y limitaciones de accesibilidad para entornos académicos, de investigación y de pequeña escala productiva.

En este contexto, el uso de fresadoras convencionales como plataforma para la ejecución del proceso FSW ha surgido como una alternativa viable, siempre que se comprendan y controlen adecuadamente las limitaciones mecánicas, cinemáticas y operativas propias de este tipo de máquinas (Huaracan Pichún, 2018). La adaptación del proceso FSW a fresadoras convencionales requiere un análisis riguroso de la interacción entre la junta, la herramienta, los parámetros del proceso y la capacidad estructural y funcional del equipo, así como una evaluación sistemática de los defectos y propiedades mecánicas resultantes.

El presente trabajo aborda esta problemática desde una perspectiva técnica y estructurada, integrando el diseño y fabricación de una herramienta FSW, la definición y ejecución del proceso sobre una fresadora convencional, y la caracterización mecánica de las juntas obtenidas. A partir del tratamiento y análisis de los resultados experimentales, se establece una metodología de adaptación que permite orientar la implementación del proceso FSW en fresadoras convencionales bajo criterios técnicos reproducibles.

La estructura del documento se presenta de manera progresiva, iniciando con el marco teórico que fundamenta el funcionamiento de las fresadoras convencionales y el proceso FSW, seguido por la metodología empleada, la presentación y análisis de resultados, generación de la metodología de adaptación y, finalmente, la formulación de conclusiones y aportes derivados del estudio.

1. Planteamiento del problema

La industria manufacturera se reconoce como un sector estratégico para el crecimiento económico, el desarrollo social y el avance tecnológico a nivel global. Este sector aporta aproximadamente el 16,7 % del Producto Interno Bruto (PIB) mundial y concentra más del 50 % de la inversión global en Investigación y Desarrollo (I+D), lo que evidencia su elevada capacidad innovadora y su papel central en la generación y adopción de soluciones tecnológicas avanzadas. Asimismo, la manufactura presenta una intensidad de I+D cercana al 5 %, definida como la relación entre el gasto en investigación y desarrollo y el valor agregado del sector. Este indicador supera ampliamente el promedio de la economía global, consolidando a la industria manufacturera como un entorno propicio para el desarrollo de tecnologías industriales orientadas a la transformación productiva y la sostenibilidad (ONUDI, 2022).

En Colombia, la industria manufacturera desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico del país, al aportar a la diversificación productiva, la generación de valor agregado y la innovación tecnológica. Según datos de la Encuesta Anual Manufacturera (EAM) del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), para el año 2022 el sector presentó un crecimiento del 27,6 %, consolidándose como una de las principales actividades productivas del país (DANE, 2024).

Dentro de la industria manufacturera colombiana, el sector metalmecánico destaca por su participación en el valor agregado, el empleo generado y su potencial para incorporar tecnologías que aumenten la eficiencia productiva (Cámara de Comercio de Bucaramanga, 2024). Uno de los procesos clave en la transformación de productos metálicos es la soldadura, técnica ampliamente utilizada en la industria por su capacidad de unión estructural mediante la aplicación de calor, presión o ambos. Sin embargo, los métodos convencionales como la soldadura por arco o gas

presentan limitaciones relacionadas con el alto consumo energético, la generación de residuos y la necesidad de tratamientos previos en las superficies a unir (González Bustos et al., 2020).

Ante estos desafíos, han surgido nuevas tecnologías de soldadura que mejoran el proceso, entre ellas la soldadura por fricción-agitación FSW, la cual opera en estado sólido y aprovecha el calor generado por fricción para unir los materiales sin fundirlos. Esta técnica ha demostrado mayor eficiencia energética, menor distorsión del material y reducción de residuos (Mishra et al., 2014b). Además, una ventaja relevante de FSW es su potencial de adaptación a máquinas herramienta convencionales, lo que permite explorar su implementación sin requerir necesariamente equipos especializados de alto costo.

A pesar de estas ventajas, su aplicación en Colombia es incipiente. No se reportan empresas que presten servicios especializados en FSW, y su adopción ha sido limitada por factores como la falta de conocimiento técnico y la disponibilidad de equipos (TWI-Global, 2021). Esta situación representa una oportunidad para desarrollar estrategias de adaptación tecnológica en el entorno metalmecánico nacional, especialmente en empresas con maquinaria convencional. A partir de este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible desarrollar un proceso de adaptabilidad de fresadoras convencionales para la realización de soldadura por fricción-agitación?

2. Justificación

La soldadura por fricción es una técnica de unión de metales que ofrece numerosos beneficios, lo que la hace muy atractiva para la industria manufacturera. Sin embargo, adaptar una máquina de fresado convencional para utilizarla en este proceso de soldadura sigue siendo un desafío debido a la falta de una metodología adecuada que oriente de manera sistemática el proceso de adaptación, reduzca la incertidumbre técnica y facilite su implementación reproducible en entornos industriales.

La adaptación de las máquinas de fresado convencionales al proceso FSW se ha intentado de diversas maneras, pero en la mayoría de los casos ha requerido la inversión de grandes cantidades de tiempo y recursos. Además, ha sido difícil para muchas empresas encontrar profesionales con los conocimientos necesarios para llevar a cabo la adaptación. Por lo tanto, es esencial desarrollar una metodología adecuada para la adaptación de estas máquinas a la soldadura por fricción.

La presente investigación resulta relevante en la medida en que contribuye a ampliar el campo de aplicación de la soldadura por fricción dentro de los procesos de fabricación industrial. En particular, la adaptación de máquinas de fresado convencionales para su utilización en este proceso, permite incrementar la capacidad productiva y reducir los costos de implementación, favoreciendo así la competitividad de las empresas del sector manufacturero. Adicionalmente, el estudio genera un conjunto estructurado de criterios técnicos, metodologías y conocimientos especializados que facilitan la adopción e implementación efectiva de la soldadura por fricción en entornos productivos reales.

El aporte original de la propuesta, en cuanto a conocimiento, radica en la creación de una metodología innovadora para la adaptación de máquinas de fresado convencionales al proceso

FSW. La metodología propuesta consistió en una evaluación exhaustiva de la maquinaria de fresado y de las características de la soldadura por fricción, y proporcionó un conjunto de herramientas y conocimientos especializados para la implementación de la soldadura por fricción. Adicionalmente se implementaron técnicas de caracterización de materiales producidos a partir de la maquina desarrollada por la metodología implementada, esta metodología contribuirá significativamente a la mejora de la eficiencia y la calidad en la fabricación de piezas soldadas, y proporcionará una solución a un problema importante en la industria manufacturera.

3. Marco Teórico

Las fresadoras convencionales y la soldadura por fricción-agitación constituyen sistemas mecánicos y de proceso cuya interacción depende de variables cinemáticas, estructurales y térmicas. El análisis teórico de estos sistemas permite comprender las capacidades de las máquinas de fresado, el principio de funcionamiento del proceso FSW y los factores que influyen en la formación de una unión soldada mediante fricción y agitación del material en estado sólido.

Se presentan los conceptos fundamentales asociados a las máquinas de fresado, abordando su clasificación, configuración general y parámetros de operación, así como los principios físicos del proceso de soldadura por fricción-agitación, la función de la herramienta, los parámetros de proceso y el comportamiento del material durante la soldadura. De igual forma, se presentan los defectos característicos del proceso FSW y los criterios generales empleados para la evaluación mecánica de juntas soldadas obtenidas mediante este método.

3.1 Fresadoras convencionales

Las fresadoras convencionales son máquinas destinadas al mecanizado de materiales mediante la remoción controlada de material a través de una herramienta de corte rotativa (Groover, 2007). Su principio de funcionamiento se basa en la combinación de un movimiento principal de rotación del husillo y uno o varios movimientos de avance relativos entre la herramienta y la pieza, lo que permite la generación de superficies planas, ranuras y perfiles de diversa geometría (Kalpakjian, 2008).

Desde el punto de vista constructivo, las fresadoras se caracterizan por una estructura rígida diseñada para soportar esfuerzos mecánicos derivados del proceso de corte. Esta estructura integra un sistema motriz, un conjunto de transmisión, un husillo portaherramientas y una mesa de trabajo

con movimientos controlados en uno o más ejes. La disposición y configuración de estos elementos define las capacidades operativas de la máquina y condiciona su desempeño frente a distintos regímenes de carga y operación.

3.1.1 Clasificación de las fresadoras

Las fresadoras convencionales se clasifican según criterios constructivos y funcionales que determinan su cinemática, su esquema de transmisión de potencia y la forma de regulación del movimiento principal (Salas, 2024). Esta clasificación permite distinguir configuraciones de máquina a partir de la orientación del husillo, del tipo de tren motriz empleado y del esquema de accionamiento, todos ellos factores que condicionan el comportamiento mecánico durante la operación. Con base en estos criterios, a continuación, se presentan las principales categorías de clasificación de las fresadoras convencionales.

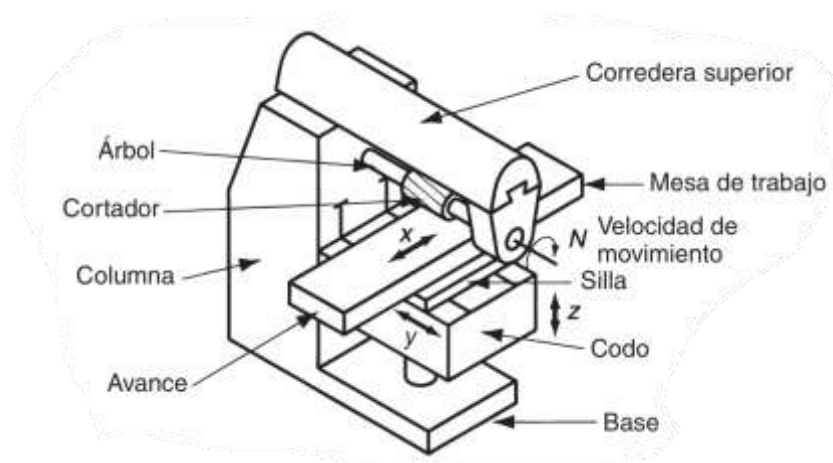
3.1.1.1 Clasificación según la orientación del husillo: Una de las clasificaciones fundamentales de las fresadoras convencionales se establece a partir de la orientación del husillo principal respecto a la mesa de trabajo y de la configuración estructural del conjunto máquina–herramienta, ya que estos factores determinan la dirección de las cargas de corte, la rigidez global del sistema y el tipo de operaciones que pueden ejecutarse de manera eficiente. A partir de la orientación del husillo y de la configuración estructural descrita, las fresadoras convencionales pueden agruparse en los siguientes tipos principales:

Fresadoras horizontales: se caracterizan por disponer el eje del husillo de forma paralela al plano de la mesa como se presenta en la Figura 1. Esta configuración es especialmente adecuada para operaciones de fresado periférico, tales como planeado, ranurado y fresado lateral, en las

cuales la herramienta trabaja predominantemente con su periferia. En este tipo de máquinas, el cortador suele montarse sobre un árbol portafresas soportado por el husillo y, adicionalmente, por un brazo superior que incrementa la rigidez del sistema frente a cargas de flexión inducidas durante el corte. La disposición horizontal favorece la evacuación de viruta y permite el mecanizado eficiente de piezas con geometría aproximadamente prismática o cúbica (Groover, 2007).

Figura 1

Fresadora horizontal de codo y columna con árbol portafresas



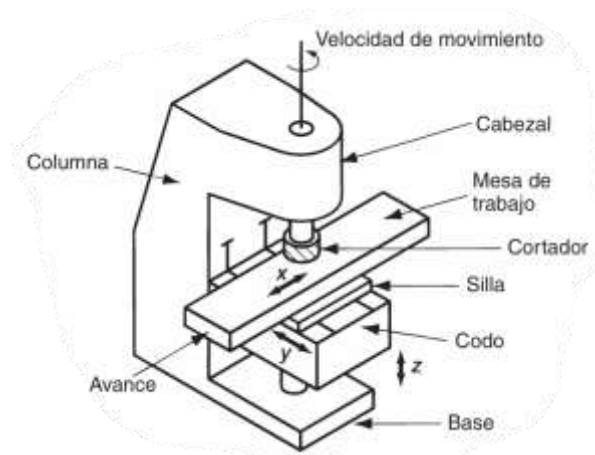
Nota. Esquema representativo de una fresadora horizontal donde se observa la disposición del husillo paralelo a la mesa y el soporte del árbol portaherramientas mediante brazo superior. Tomado de (Groover, 2007) Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas.

Fresadoras verticales: presentan el husillo orientado perpendicularmente al plano, como se presenta en la Figura 2 de la mesa de trabajo. Esta disposición resulta adecuada para operaciones de fresado frontal, fresado terminal, contorneado de superficies y mecanizado de cavidades, en las cuales la herramienta actúa principalmente con su extremo o con la cara frontal. En las configuraciones verticales, el cortador se monta directamente en el husillo principal, lo que

simplifica el sistema de sujeción de herramienta y modifica la distribución de esfuerzos transmitidos a la estructura de la máquina. Este tipo de fresadora es especialmente versátil para el mecanizado de piezas relativamente planas y para operaciones que requieren cambios frecuentes de herramienta o acceso directo a la zona de trabajo (Groover, 2007).

Figura 2

Fresadora vertical de codo y columna

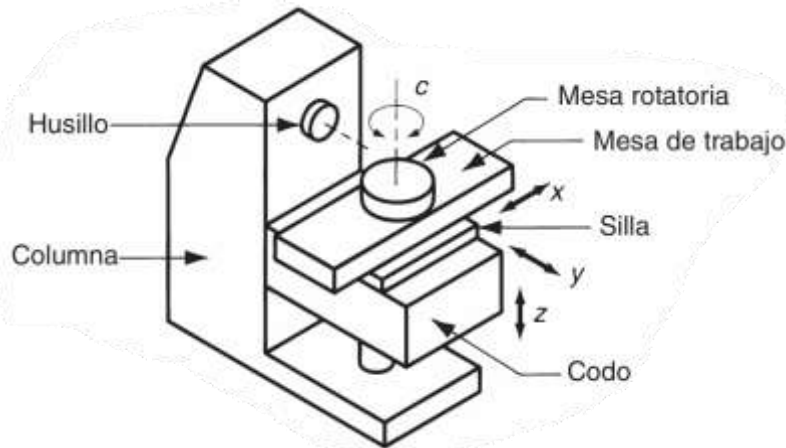


Nota. Configuración típica de una fresadora vertical en la cual el husillo se orienta perpendicularmente a la mesa, permitiendo operaciones de fresado frontal y terminal. Tomado de (Groover, 2007) Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas.

Fresadoras universales: la cual combina una disposición de husillo generalmente horizontal con una mesa giratoria en el plano horizontal, permitiendo su rotación respecto a un eje vertical. Esta característica amplía las capacidades cinemáticas de la máquina y facilita la realización de operaciones de fresado helicoidal, angular y de engranajes, sin modificar sustancialmente la estructura básica del equipo, el cual se presenta en la Figura 3. La fresadora universal representa una solución intermedia entre la simplicidad de las fresadoras convencionales y la flexibilidad de máquinas de mayor complejidad cinemática (Groover, 2007).

Figura 3

Fresadora universal con mesa giratoria



Nota. Fresadora universal que incorpora una mesa con capacidad de giro, lo que permite mecanizados helicoidales y angulares. Tomado de Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas.

Para facilitar la síntesis de los tipos de fresadoras descritos y su identificación a lo largo del desarrollo del presente trabajo, la clasificación según la orientación del husillo y la configuración estructural se resume en la Tabla 1, incorporando una codificación alfanumérica que permite referenciar cada tipo de máquina de forma concisa en secciones posteriores.

Tabla 1

Clasificación de las fresadoras convencionales según la orientación del husillo

Código	Tipo de fresadora	Orientación del husillo	Configuración estructural característica
H	Fresadora horizontal	Paralela al plano de la mesa	Árbol portafresas soportado por husillo y brazo superior; elevada rigidez frente a cargas laterales
V	Fresadora vertical	Perpendicular al plano de la mesa	Herramienta montada directamente en el husillo; acceso directo a la zona de trabajo

U	Fresadora universal	Generalmente horizontal con mesa giratoria	Mesa con capacidad de giro respecto al eje vertical; mayor flexibilidad cinemática
---	---------------------	--------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------

Nota. La clasificación se establece a partir de la orientación del husillo, de acuerdo con la descripción teórica presentada por (Groover, 2007; Kalpakjian, 2008).

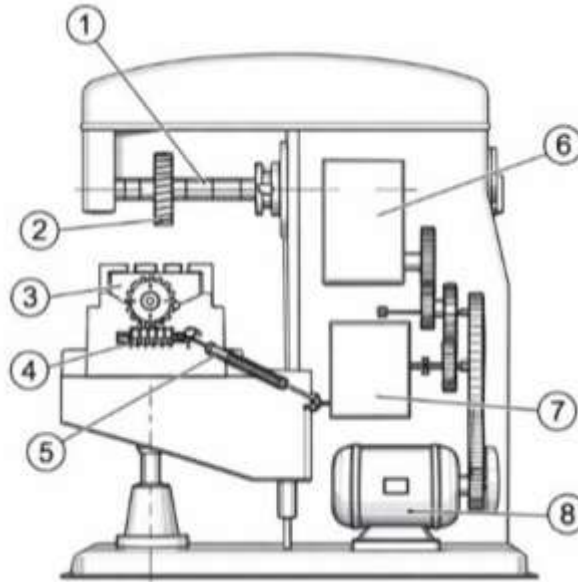
Esta clasificación proporciona una base estructural para el análisis de las capacidades operativas de las fresadoras convencionales; no obstante, el comportamiento dinámico y el régimen de operación de estas máquinas dependen también del sistema de transmisión de potencia, el cual se aborda en el siguiente apartado.

3.1.1.2 Clasificación según el sistema de transmisión de potencia: desde el punto de vista funcional, una fresadora convencional se concibe como un sistema en el cual la potencia suministrada por la fuente motriz principal se transmite y se distribuye a través de una cadena cinemática que alimenta tanto el movimiento principal de rotación del husillo como los movimientos de avance de la mesa o del carro. Esta distribución de potencia define el comportamiento cinemático global de la máquina y constituye un criterio relevante para su clasificación (Kalpakjian, 2008).

El movimiento de la fresadora se organiza mediante una cadena cinemática principal de rotación, asociada al husillo portaherramientas (ver ítem 6) y una cadena cinemática de avance (ver ítem 7), responsable de generar los desplazamientos lineales controlados y automáticos que definen la trayectoria relativa entre herramienta y pieza (Amor Alcón et al., 2018). La configuración general de estas cadenas cinemáticas se esquematiza en la Figura 4.

Figura 4

Esquema general de la cadena cinemática de una fresadora convencional



Nota. 1) Eje portafresas o árbol portafresas; 2) Fresa; 3) Mesa; 4) Mecanismo de avance de la mesa; 5) Eje o tornillo telescópico; 6) Caja de cambios de velocidades; 7) Caja de cambios para avances; 8) Motor. Adaptada de (Amor Alcón et al., 2018) Evolución, Análisis y Estudio Comparativo de las Máquinas Herramienta (Torno y Fresadora) a lo largo de la Historia.

En la cadena principal de rotación, la potencia se transmite desde el sistema motriz hasta el husillo a través de una sucesión de etapas de transmisión mecánica, estableciendo una relación definida entre la velocidad angular del motor y la velocidad angular del husillo. La relación cinemática global de esta cadena puede expresarse como el producto de las relaciones de transmisión individuales de cada etapa, de acuerdo con la **Ecuación 1** (Kalpakjian, 2008).

Ecuación 1. Relación cinemática global de la cadena principal de rotación

$$\omega_s = \omega_m \prod_{k=1}^n \frac{1}{i_k}$$

Donde:

ω_s : Velocidad angular del husillo [rad/s].

ω_m : Velocidad angular del motor [rad/s].

i_k : Relación de transmisión de la etapa k [-].

n : Número de etapas de transmisión [-].

De forma paralela, las cadenas cinemáticas de avance convierten el movimiento rotacional de sus elementos de accionamiento en desplazamientos lineales controlados de la mesa o del carro. Esta conversión rotación–traslación puede representarse, de manera general, mediante la relación indicada en la Ecuación 2 (Kalpakjian, 2008), válida para los distintos mecanismos de avance empleados en fresadoras convencionales.

Ecuación 2. Conversión cinemática rotación–traslación en los mecanismos de avance

$$v = \omega p$$

Donde:

v : Velocidad lineal de avance [m/s].

ω : Velocidad angular del elemento de accionamiento [rad/s].

p : Paso efectivo del mecanismo de conversión [m/rad].

La cadena cinemática contenida tanto en la caja de velocidades del husillo como en la caja de avances puede estar basada en distintos principios de transmisión mecánica. En términos generales, estas cadenas se configuran mediante sistemas de engranajes o mediante sistemas de correas y poleas, los cuales permiten establecer diferentes relaciones de transmisión entre el sistema motriz y los elementos de salida (Amor Alcón et al., 2018).

Independientemente del principio empleado, la selección de una relación dentro de la caja de velocidades o de la caja de avances conduce a cambios discretos de velocidad, ya que las relaciones disponibles están determinadas por combinaciones mecánicas previamente definidas. En este contexto, tanto las transmisiones por engranajes como las transmisiones por poleas de diámetro fijo generan conjuntos discretos de regímenes de operación.

Desde el punto de vista cinemático, cuando la transmisión se basa en engranajes, la relación entre la velocidad angular de entrada y la velocidad angular de salida puede expresarse mediante la Ecuación 3 (Kalpakjian, 2008).

Ecuación 3. Relación de velocidades en transmisiones por engranajes

$$\omega_s = \frac{\omega_m}{i}$$

Donde:

ω_s : Velocidad angular del elemento de salida [rad/s].

ω_m : Velocidad angular del elemento de entrada [rad/s].

i : Relación de transmisión del tren de engranajes [-].

De manera análoga, cuando la cadena cinemática se basa en correas y poleas de diámetro variable o fijo, la relación de velocidades se expresa como el cociente entre los diámetros efectivos de las poleas, tal como se indica en la Ecuación 4 (Kalpakjian, 2008).

Ecuación 4. Relación de velocidades en transmisiones por correas y poleas

$$\omega_s = \omega_m \frac{D_m}{D_s}$$

Donde:

ω_s : Velocidad angular del elemento de salida [rad/s].

ω_m : Velocidad angular del elemento de entrada [rad/s].

D_m : Diámetro efectivo de la polea motriz [m].

D_s : Diámetro efectivo de la polea solidaria al elemento de salida [m].

En ambos casos, las ecuaciones anteriores describen regímenes discretos de velocidad, determinados por las relaciones mecánicas disponibles en la caja de transmisión. No obstante, cuando se incorpora dentro de la misma caja un sistema adicional de poleas de diámetro variable, la relación de transmisión deja de ser fija y permite una variación continua de la velocidad angular dentro de un rango determinado, superpuesta a los valores discretos previamente definidos (Amor Alcón et al., 2018).

Desde el punto de vista energético, la potencia mecánica transmitida al elemento de salida se expresa como función del torque y de la velocidad angular, considerando la eficiencia global de la cadena de transmisión, de acuerdo con la Ecuación 5 (Groover, 2007). Las fresadoras convencionales suelen operar en el rango de 1 a 10 kW (Amor Alcón et al., 2018).

Ecuación 5. Potencia mecánica transmitida

$$P = \eta T \omega$$

Donde:

P : Potencia mecánica disponible en el elemento de salida [W].

T : Torque transmitido [N·m].

ω : Velocidad angular del elemento de salida [rad/s].

η : Eficiencia global de la cadena de transmisión [-].

A partir de los principios de transmisión descritos, la clasificación de las fresadoras convencionales según la cadena cinemática y el sistema de transmisión de potencia se reduce a dos configuraciones funcionales, determinadas por la presencia o no de un mecanismo de regulación continua superpuesto a la caja de cambios. Esta clasificación se sintetiza en la Tabla 2.

Tabla 2*Clasificación de las fresadoras según el sistema de transmisión de potencia*

Código	Configuración de transmisión	Principio de funcionamiento	Régimen de velocidad
DX	Caja de cambios con relaciones fijas	Cadena cinemática basada en engranajes o poleas de diámetro fijo	Discreto
DC	Caja de cambios con regulación continua	Caja de cambios discreta complementada con poleas de diámetro variable	Discreto–continuo

Nota. La clasificación se establece en función del principio de regulación de la velocidad en la cadena cinemática del husillo y de los mecanismos de avance, considerando que los cambios discretos se generan en la caja de transmisión y que la regulación continua se obtiene mediante un sistema adicional de poleas de diámetro variable. (Amor Alcón et al., 2018).

3.1.1.3 Clasificación según el esquema de accionamiento: de manera independiente del sistema de transmisión de potencia empleado en la cadena cinemática, las fresadoras convencionales pueden clasificarse según el esquema de accionamiento de los movimientos, particularmente en lo que respecta a los movimientos de avance y penetración de la mesa y de los carros. Este criterio de clasificación se basa en la forma en que dichos movimientos son generados y controlados, pudiendo realizarse de manera manual, automática o mediante configuraciones combinadas que permiten el desacople entre ambos modos de operación (Salas, 2024).

En el accionamiento manual, los movimientos de avance y penetración se obtienen directamente mediante la intervención del operador, a través de mecanismos mecánicos de conversión rotación–traslación, típicamente basados en sistemas tornillo–tuerca (Amor Alcón et al., 2018). En este esquema, los distintos carros que conforman el grupo portapiezas —carro

vertical, carro transversal y mesa— pueden desplazarse de forma independiente a lo largo de sus respectivas guías, permitiendo posicionar la pieza en cualquier punto del espacio de trabajo. Este tipo de accionamiento se caracteriza por un control directo del movimiento, adecuado para operaciones de ajuste, puesta a punto y mecanizados que requieren intervención continua del operario.

En contraste, en el accionamiento automático, los movimientos de avance son generados mediante un sistema motorizado que transmite el movimiento a los carros a través de una cadena cinemática específica, asociada a la caja de avances de la máquina. En este caso, la velocidad de avance se selecciona a partir de un conjunto de valores predeterminados, permitiendo un desplazamiento uniforme y controlado durante el mecanizado. Este esquema resulta especialmente adecuado para operaciones repetitivas y para garantizar condiciones de corte constantes a lo largo del proceso.

Un aspecto relevante del accionamiento automático en las fresadoras convencionales es la posibilidad de desacoplar el sistema automático, permitiendo que los carros puedan operar nuevamente en modo manual sin interferencia del sistema motorizado (Salas, 2024). Este desacople se logra mediante mecanismos de embrague o inversión de movimiento, los cuales habilitan el paso entre operación manual y automática sin modificar la configuración general de la máquina. De este modo, una misma fresadora puede alternar entre ambos modos de accionamiento según las necesidades operativas.

Adicionalmente, desde el punto de vista del suministro de potencia, el accionamiento automático puede realizarse aprovechando la potencia del motor principal de la máquina o mediante un motor dedicado exclusivamente a los avances. La presencia de un motor independiente para los movimientos de avance no altera el principio cinemático de

funcionamiento, pero sí modifica la forma en que se distribuye la potencia dentro del sistema, permitiendo un control más estable de los avances y una mayor independencia respecto al régimen de operación del husillo.

Desde este enfoque, la clasificación según el esquema de accionamiento permite distinguir las fresadoras convencionales en función de la forma en que se suministra la potencia a los movimientos de avance, particularmente según si estos se accionan a partir del motor principal de la máquina o mediante un motor dedicado exclusivamente a los desplazamientos de la mesa y los carros (ejes X, Y y Z). Esta distinción se sintetiza en la Tabla 3, la cual resume las configuraciones de accionamiento más comunes en fresadoras convencionales.

Tabla 3

Clasificación de las fresadoras según el esquema de accionamiento

Código	Esquema de accionamiento	Fuente de potencia para movimientos X–Y–Z	Características principales
AX	Accionamiento desde el motor principal	Motor principal de la máquina	Los movimientos de avance se obtienen a partir de la potencia del motor principal; permite operación manual y automática mediante desacople del sistema
AD	Accionamiento con motor dedicado	Motor independiente para avances	Los movimientos de la mesa y los carros (ejes X, Y y Z) son accionados por un motor específico, independiente del régimen de operación del husillo

Nota. La clasificación se establece en función de la fuente de potencia que acciona los movimientos de avance y penetración de la mesa y de los carros, independientemente del tipo de transmisión mecánica o de la orientación del husillo.

3.1.2 Parámetros de operación de las fresadoras

Los parámetros de operación de una fresadora convencional definen el régimen de trabajo bajo el cual se desarrolla el proceso de mecanizado y caracterizan la interacción mecánica entre la

herramienta y la pieza. Estos parámetros están asociados al movimiento principal de rotación del husillo y a los movimientos de avance, y permiten describir cuantitativamente las condiciones de corte sin necesidad de recurrir a la arquitectura interna de la máquina.

La velocidad de corte es el parámetro que describe la velocidad tangencial de la herramienta en el punto de contacto con la pieza y constituye la referencia principal para la selección del régimen de rotación del husillo. Esta velocidad se relaciona con el diámetro efectivo de la herramienta y con la velocidad de rotación mediante la Ecuación 6 (Groover, 2007; Kalpakjian, 2008).

Ecuación 6. Relación entre velocidad de corte y velocidad de rotación del husillo

$$V_c = \pi D N$$

Donde:

V_c : Velocidad de corte [m/s].

D : Diámetro efectivo de la herramienta [m].

N : Velocidad de rotación del husillo [rev/s].

El avance describe el desplazamiento relativo entre herramienta y pieza durante el proceso y puede expresarse a partir del avance por diente y del número de filos activos de la herramienta. La velocidad de avance lineal se determina mediante la Ecuación 7 (Kalpakjian, 2008), la cual vincula el movimiento de rotación del husillo con el desplazamiento de la mesa o del carro.

Ecuación 7. Velocidad de avance en el proceso de fresado

$$v_f = f_z z N$$

Donde:

v_f : Velocidad de avance lineal [m/s].

f_z : Avance por diente [m/diente].

z : Número de dientes de la herramienta [-].

N : Velocidad de rotación del husillo [rev/s].

La profundidad de corte define la magnitud de material removido en la dirección normal a la superficie mecanizada y se descompone habitualmente en profundidad axial y profundidad radial. Este parámetro influye directamente en la sección de viruta y, por tanto, en las fuerzas desarrolladas durante el proceso, sin modificar la cinemática básica del movimiento relativo (Groover, 2007; Kalpakjian, 2008).

La tasa de remoción de material permite cuantificar la productividad del proceso y se expresa como el volumen de material removido por unidad de tiempo. Para operaciones de fresado convencional, esta magnitud puede expresarse mediante la Ecuación 8 (Kalpakjian, 2008), a partir de la combinación del avance, la profundidad de corte y el ancho de pasada.

Ecuación 8. Tasa de remoción de material en fresado

$$Q = a_p a_e v_f$$

Donde:

Q : Tasa de remoción de material [m³/s].

a_p : Profundidad axial de corte [m].

a_e : Ancho radial de corte [m].

v_f : Velocidad de avance lineal [m/s].

En conjunto, los parámetros de operación permiten describir el régimen de trabajo de una fresadora convencional de forma cuantitativa, estableciendo relaciones directas entre la cinemática

del movimiento y las condiciones de corte. Su adecuada selección es fundamental para caracterizar el comportamiento del proceso desde una perspectiva mecánica, ya que de ella depende la capacidad del sistema motriz para suministrar la potencia requerida durante el mecanizado. En este sentido, la potencia del sistema motriz puede correlacionarse con las capacidades de mecanizado a través de la energía específica de corte del material, cuyos valores característicos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Energía específica de corte para operaciones de mecanizado

Material	Energía específica (W·s/mm³)	Energía específica (hp·min/pulg³)
Aleaciones de aluminio	0,4 – 1	0,15 – 0,4
Hierros fundidos	1,1 – 5,4	0,4 – 2
Aleaciones de cobre	1,4 – 3,2	0,5 – 1,2
Aleaciones de alta temperatura	3,2 – 8	1,2 – 3
Aleaciones de magnesio	0,3 – 0,6	0,1 – 0,2
Aleaciones de níquel	4,8 – 6,7	1,8 – 2,5
Aleaciones refractarias	3 – 9	1,1 – 3,5
Aceros inoxidable	2 – 5	0,8 – 1,9
Aceros	2 – 9	0,7 – 3,4
Aleaciones de titanio	2 – 5	0,7 – 2

Nota. Adaptado de (Kalpakjian, 2008) Manufactura, ingeniería y tecnología.

Dentro del conjunto de parámetros de operación descritos, algunos adquieren una relevancia particular cuando se analiza la adaptación de una fresadora convencional a procesos

distintos al arranque de viruta, como el proceso FSW. En este contexto, la velocidad de rotación del husillo y la capacidad de control del avance se convierten en parámetros dominantes, ya que gobiernan directamente la generación de calor por fricción y la estabilidad del movimiento relativo durante el proceso. A diferencia del fresado convencional, donde estos parámetros se seleccionan principalmente en función del material y de la herramienta, en FSW su combinación define el balance térmico y mecánico del proceso, esta situación se describe en 6.1.2 Relación entre parámetros y defectos del proceso.

Asimismo, la profundidad de penetración y el control preciso de la trayectoria adquieren un papel crítico, dado que condicionan la interacción entre la herramienta y el material sin que exista remoción de viruta. En este escenario, la magnitud y estabilidad de los parámetros de avance y rotación son más determinantes que la tasa de remoción de material, la cual deja de ser una variable representativa del proceso. Por tanto, el análisis de los parámetros de operación de la fresadora desde una perspectiva mecánica permite identificar cuáles de ellos son directamente transferibles y cuáles requieren ser reinterpretados o ajustados para la implementación de procesos como FSW.

3.2 Soldadura por fricción-agitación (FSW)

La soldadura por fricción-agitación (FSW) es un proceso de unión en estado sólido en el cual la coalescencia del material se logra sin alcanzar la fase líquida. El proceso se basa en la interacción mecánica entre una herramienta rotativa no consumible y el material base, generando calor por fricción y deformación plástica, lo que permite el flujo del material y la formación de la junta soldada (Mishra et al., 2014).

Desde una perspectiva cinemática y mecánica, el proceso FSW se caracteriza por la combinación de un movimiento rotacional de la herramienta, un movimiento de avance a lo largo de la línea de unión y la aplicación de una fuerza axial. Estas acciones inducen un estado de deformación plástica severa acompañado de un incremento local de temperatura, suficiente para reducir la resistencia al flujo del material sin provocar su fusión. En este régimen, el material plastificado fluye alrededor del pin de la herramienta y se consolida en la región posterior, dando lugar al cordón de soldadura (Mishra et al., 2014).

El proceso se desarrolla en distintas etapas. Inicialmente, la herramienta penetra el material en dirección axial hasta alcanzar una profundidad próxima al espesor de las láminas. Durante esta fase, se mantiene una condición estacionaria conocida como tiempo de sostenimiento (*dwell time*), durante la cual se genera calor intenso por fricción y deformación, favoreciendo el ablandamiento del material. Posteriormente, la herramienta avanza a lo largo de la junta con una velocidad definida, manteniendo la rotación y la fuerza axial, como se presenta en la Figura 5. Este desplazamiento puede realizarse con un ángulo de inclinación respecto a la vertical, dependiendo de la configuración del proceso y del equipo utilizado (Threadgill et al., 2009; Cavaliere, 2013). Finalmente, al completar la trayectoria, la herramienta se retira, dejando un orificio residual característico del proceso.

Durante la soldadura, se distinguen dos lados de la junta en función del sentido relativo entre la rotación de la herramienta y el avance. El lado donde ambos movimientos coinciden se denomina *lado de avance*, mientras que el opuesto se conoce como *lado de retroceso*. Esta asimetría influye en el flujo del material y en la distribución de esfuerzos durante el proceso (Mishra et al., 2014).

Figura 5

Esquema general del proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW)



Nota. Se ilustra la rotación y el avance de la herramienta, así como la función del hombro y del pin durante la formación de la junta. Tomado de (Escobar-Muñoz & Hoyos-Pulgarín, 2019) Obtención de juntas disímiles de la aleación de aluminio AA7075-T6 y polietileno de alta densidad (HDPE) empleando el proceso Friction Stir Welding (FSW).

3.2.1 Parámetros del proceso FSW

El comportamiento del proceso FSW está fuertemente condicionado por la selección de sus parámetros operativos, los cuales gobiernan las interacciones térmicas y mecánicas responsables de la calidad de la junta soldada. A diferencia de los procesos de soldadura por fusión, en FSW estos parámetros controlan simultáneamente la generación de calor, el flujo plástico del material y la estabilidad del proceso (Mishra et al., 2014).

Desde un punto de vista teórico, los parámetros del proceso pueden agruparse en tres categorías principales, en función de su naturaleza y de su influencia sobre el comportamiento del material, como se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5

Clasificación general de los parámetros del proceso FSW

Categoría	Parámetros principales	Rol físico dominante
Geometría de la herramienta	Tipo de hombro, tipo de pin, dimensiones	Flujo de material y generación de calor
VARIABLES DE SOLDADURA	Velocidad de rotación, velocidad de avance, fuerza axial, ángulo de inclinación, tiempo de sostenimiento	Balance térmico y estabilidad del proceso
VARIABLES DE MONTAJE	Tipo de junta, espesor del material, configuración del equipo	Restricciones mecánicas y cinemáticas

Nota. Adaptado de (Mishra et al., 2014) Friction stir processing.

Las variables asociadas a la geometría de la herramienta comprenden aquellos parámetros relacionados con el diseño del hombro y del pin, tales como su diámetro, forma, longitud, perfil y presencia de características adicionales (roscas, ranuras o facetas). Estos elementos controlan de manera directa el flujo del material plastificado, la distribución de la deformación y la generación de calor por fricción durante el proceso FSW. En consecuencia, la geometría de la herramienta influye significativamente en la mezcla del material, la consolidación de la junta y la aparición de defectos, constituyéndose en un factor crítico para la estabilidad del proceso y la calidad metalúrgica de la soldadura.

Las variables de soldadura incluyen aquellas que pueden ser controladas directamente durante el proceso, como la velocidad de rotación de la herramienta, la velocidad de avance, la profundidad de penetración, la fuerza axial aplicada y el ángulo de inclinación. Estas variables

determinan el nivel de calor generado y la intensidad de la deformación plástica, influyendo de manera directa en la formación de defectos y en la calidad final de la junta.

Las variables de montaje corresponden a las características físicas del sistema, tales como el tipo de junta, el espesor de las láminas y el tipo de máquina empleada. Estas variables establecen restricciones geométricas y mecánicas que condicionan el rango operativo del proceso, siendo posible tener máquinas especializadas o adaptar máquinas adicionales como es el propósito de este trabajo.

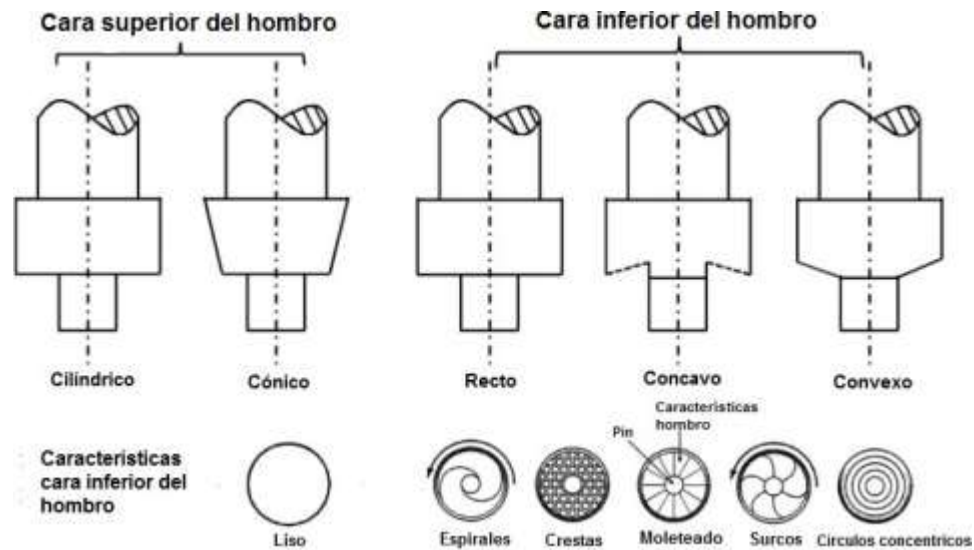
3.2.2 Herramienta de FSW

La herramienta constituye el elemento central del proceso FSW y es responsable de la generación de calor, la inducción de deformación plástica y el control del flujo de material (Mishra et al., 2018). Desde el punto de vista mecánico, la herramienta está compuesta por dos partes principales: el hombro y el pin.

El hombro tiene como función principal generar calor por fricción en la superficie del material que contribuye a la consolidación de la junta. Además, actúa como elemento de contención del material plastificado, limitando su expulsión fuera de la zona de soldadura. La geometría de la superficie del hombro influye en la eficiencia térmica del proceso y en la estabilidad del flujo de material. En la Figura 6 se presentan geometrías típicas del hombro.

Figura 6

Formas típicas del hombro de la herramienta FSW

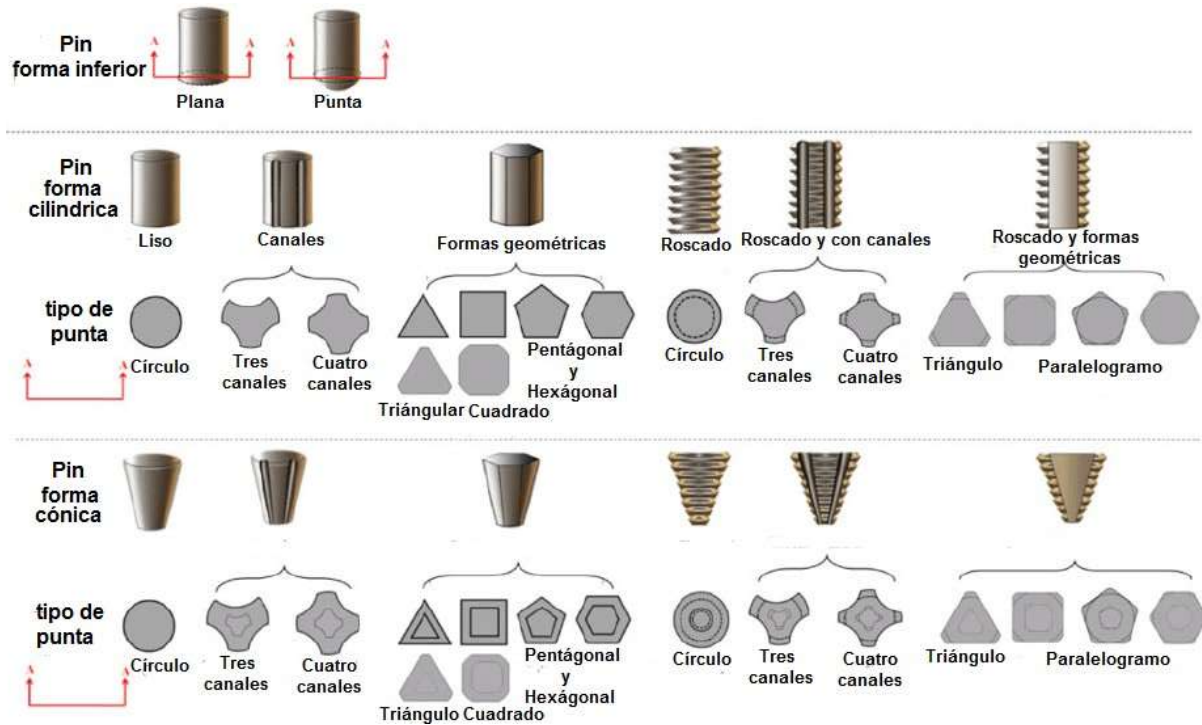


Nota. Se muestran configuraciones comunes de superficies del hombro y su influencia en el contacto con el material. Tomado de (Mishra et al., 2018) Analysis of tools used in friction stir welding process.

El pin es el responsable de inducir la deformación plástica en el interior del material y de promover la mezcla entre las láminas a unir. Su geometría determina el patrón de flujo del material y la magnitud de las fuerzas desarrolladas durante el proceso. Existen diferentes configuraciones de pin, como se presentan en la Figura 7, como pines lisos, cónicos o con perfiles especiales, cada uno asociado a distintos compromisos entre capacidad de penetración, vida útil de la herramienta y calidad de la junta (Mishra et al., 2014).

Figura 7

Tipos representativos de pin utilizados en el proceso FSW



Nota. Se ilustran diferentes geometrías de pin y su efecto sobre el flujo del material. Tomado de (Parkhe & Dhende, 2020) To study the effect of different tool profiles on aluminium AA3103 by friction stir welding.

3.2.3 Regiones y características del material soldado

Como resultado del campo térmico y mecánico generado durante el proceso FSW, la sección transversal de la junta presenta regiones con características microestructurales diferenciadas, como las que se presentan en la Figura 8. Estas regiones se clasifican comúnmente en zona agitada (*Nugget*), zona termo-mecánicamente afectada (ZTMA), zona afectada por el calor (ZTA) y metal base.

Figura 8

Regiones características en una junta soldada por FSW



Nota. Se identifican las distintas zonas generadas como consecuencia del campo térmico y mecánico del proceso. Tomado de (Zettler et al., 2005) Effect of tool geometry and process parameters on material flow in FSW of an AA 2024-T351 alloy.

La zona agitada corresponde a la región sometida a deformación plástica severa y altas temperaturas, donde se produce una mezcla intensa del material y un refinamiento de grano asociado a procesos de recristalización dinámica. La ZTMA se caracteriza por deformaciones moderadas y un aporte térmico significativo, mientras que la ZTA experimenta cambios microestructurales debidos principalmente al calentamiento. El metal base conserva las propiedades originales del material (Parkhe & Dhende, 2020; Zettler et al., 2005).

3.2.4 Fuerzas características en el proceso FSW

Durante el proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) actúan fuerzas mecánicas significativas que pueden descomponerse en fuerza axial, fuerza longitudinal (o de avance), fuerza transversal y torque aplicado al husillo. La magnitud y estabilidad de estas variables influyen directamente en la generación de calor, el flujo plástico del material y la calidad final de la unión soldada (Choi et al., 2018; Mishra et al., 2014).

La fuerza axial actúa en la dirección normal a la superficie de las placas y está asociada al empuje necesario para mantener el contacto íntimo entre la herramienta y el material. Esta fuerza desempeña un papel dominante en el proceso, ya que controla la presión de contacto en la interfaz herramienta–material, condicionando la fricción, la generación de calor y el grado de consolidación del cordón soldado. Valores insuficientes de fuerza axial pueden conducir a defectos por falta de penetración o consolidación incompleta, mientras que valores excesivos pueden generar desgaste acelerado de la herramienta o deformaciones indeseadas en la pieza (Su et al., 2013).

La fuerza longitudinal, también denominada fuerza de avance, actúa en la dirección del desplazamiento de la herramienta a lo largo de la línea de soldadura. Esta fuerza está relacionada con la resistencia del material plastificado al movimiento de la herramienta y depende de parámetros como la velocidad de avance, la temperatura del material y la geometría del pin. Desde el punto de vista energético, su contribución a la potencia total del proceso es generalmente menor que la asociada a la rotación del husillo, aunque resulta relevante para la estabilidad del proceso y la carga transmitida a la estructura de la máquina (Choi et al., 2018).

La fuerza transversal actúa perpendicularmente a la dirección de avance y se origina por asimetrías en el flujo del material entre los lados de avance y retroceso de la herramienta. Si bien su magnitud suele ser inferior a la de la fuerza axial y longitudinal, esta componente es indicativa de desequilibrios en el proceso y puede contribuir a la aparición de defectos geométricos o desviaciones en la trayectoria de soldadura.

Adicionalmente, el proceso FSW se caracteriza por el torque aplicado al husillo, el cual representa la resistencia del material al movimiento rotacional de la herramienta. El torque está directamente vinculado a la fricción en la interfaz herramienta–material, relacionado directamente

con la fuerza axial del proceso y al esfuerzo requerido para deformar plásticamente el material circundante (Choi et al., 2018; R. S. Mishra et al., 2014). Desde una perspectiva mecánica, el torque constituye una de las variables fundamentales para describir la carga del proceso y su demanda energética.

La potencia mecánica asociada al proceso FSW puede expresarse como la suma de la potencia debida a la rotación del husillo y la potencia asociada al movimiento lineal de avance, de acuerdo con la Ecuación 9 (Choi et al., 2018).

Ecuación 9. Potencia del proceso FSW

$$P = T \omega + F v$$

Donde:

P : Potencia del proceso FSW [W].

T : Torque del proceso FSW [N-m].

ω : Velocidad de rotación del husillo [rev/s].

v : Velocidad de avance (soldadura) [m/s].

F : Fuerza longitudinal [N].

Diversos estudios experimentales han demostrado que, en condiciones típicas de FSW, la mayor parte de la potencia mecánica del proceso está asociada al término rotacional, siendo la contribución del avance lineal comparativamente pequeña (Choi et al., 2018). Adicionalmente, la cantidad de potencia que no es convertida en calor, ni en movimiento, es cedida a las fuerzas transversales que aparecen en el proceso por las inestabilidades del flujo de material.

En conjunto, el análisis de la fuerza axial, las fuerzas de avance y transversal, y el torque del husillo proporciona una descripción integral del estado mecánico del proceso FSW. Estas variables no solo determinan la estabilidad del proceso y la calidad de la unión soldada, sino que

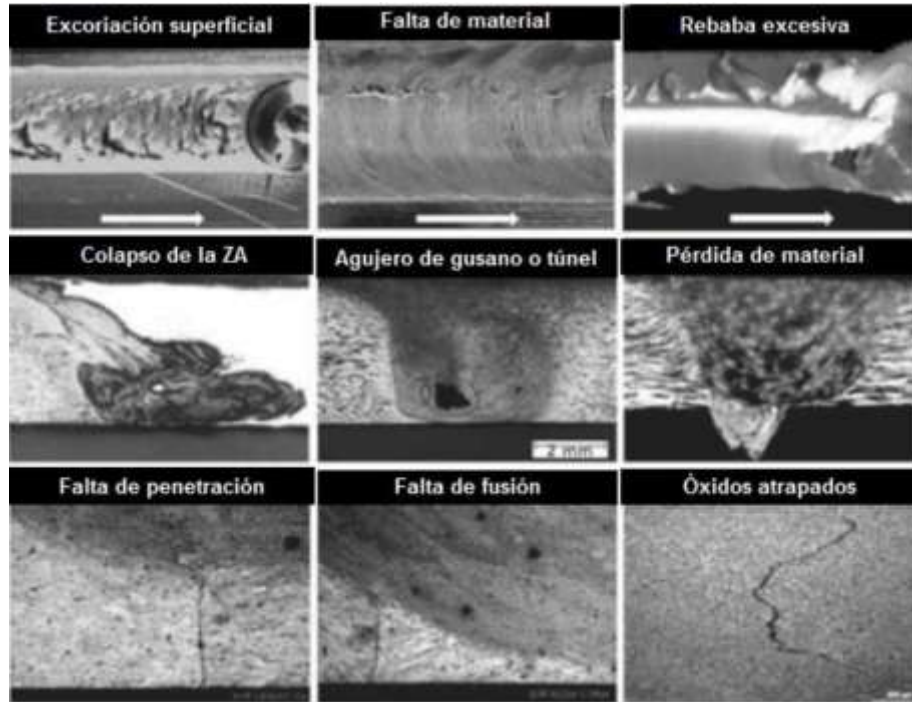
también permiten establecer vínculos directos entre los parámetros de operación, la demanda energética del sistema y las limitaciones impuestas por la capacidad mecánica de la máquina herramienta empleada.

3.2.5 Defectos de soldadura en FSW

A pesar de que la soldadura por fricción-agitación se caracteriza por producir uniones en estado sólido con menor incidencia de discontinuidades asociadas a procesos de fusión, el proceso puede dar lugar a distintos defectos que comprometen la integridad estructural y el desempeño mecánico de la junta. Estos defectos se originan principalmente por desequilibrios en el flujo del material, en la generación de calor o en la aplicación de las cargas mecánicas durante el proceso (Albannai, 2020). Algunos de ellos pueden ser identificados mediante inspección visual, mientras que otros, de naturaleza interna, requieren técnicas de inspección no destructiva para su detección. En la Figura 9 se ilustran distintos defectos típicos observados en soldaduras por fricción-agitación, incluyendo manifestaciones de porosidad asociadas a fallas estructurales del cordón.

Figura 9

Defectos que ocurren en las soldaduras por fricción agitación



Nota. Adaptado de (Lohwasser & Chen, 2009) Friction stir welding: From basics to applications.

Entre los defectos más comunes se encuentran:

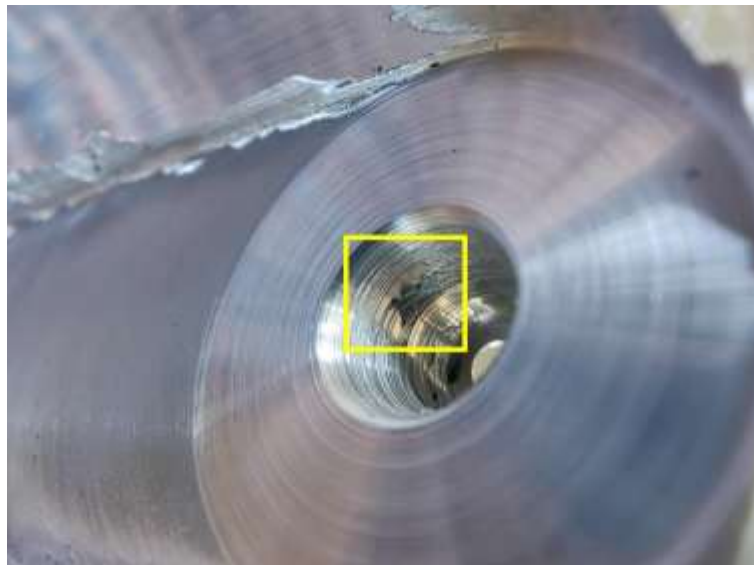
3.2.5.1 Porosidad la cual se manifiesta como cavidades o vacíos de pequeño tamaño dentro del material soldado. Este tipo de defecto se asocia a una inadecuada plastificación del material o a la presencia de impurezas en el material base, lo que interfiere con el flujo homogéneo durante el proceso. La presencia de porosidad reduce la sección resistente efectiva de la junta y afecta negativamente su comportamiento frente a cargas de tracción y fatiga (Lohwasser & Chen, 2009).

3.2.5.2 Cavidades internas (poro gusano) las cuales se producen cuando el material plastificado no logra llenar completamente la región posterior al avance de la herramienta. Este defecto está directamente relacionado con un flujo insuficiente del material, generalmente

asociado a una combinación inadecuada de cualquiera de los siguientes criterios velocidad de rotación, velocidad de avance o geometría del pin (Albannai, 2020). En la Figura 10 se muestra un ejemplo de un poro de gusano localizado al final del cordón de soldadura, evidenciando la presencia de un vacío interno continuo, el cual resulta particularmente crítico debido a su dificultad de detección y a su potencial para actuar como sitio de iniciación de grietas bajo carga.

Figura 10

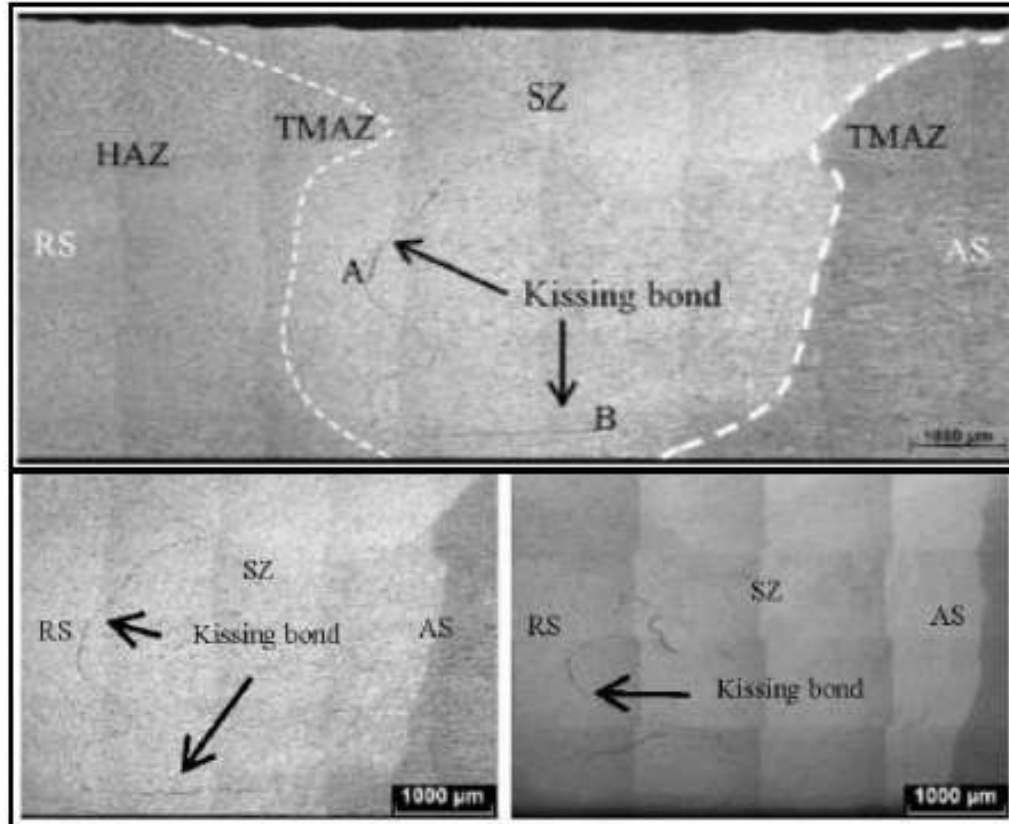
Poro de gusano al final del cordón de soldadura



3.2.5.3 Kissing bond el cual corresponde a una unión incompleta en la raíz de la soldadura, donde las superficies en contacto no llegan a mezclarse adecuadamente a pesar de encontrarse en aparente contacto (Albannai, 2020). Este defecto se asocia a una plastificación insuficiente del material en la región inferior de la junta y suele no ser detectable mediante inspección visual superficial. En la Figura 11 se muestra una representación de este tipo de defecto, destacando su naturaleza interna y la dificultad asociada a su identificación, así como su impacto negativo en la resistencia mecánica de la unión.

Figura 11

Representación del defecto de soldadura Kissing bond



Nota. Tomado de (Albannai, 2020) Review the common defects in friction stir welding.

3.5.2.4 Desalineamiento el cual constituye otro tipo de defecto que puede presentarse cuando la herramienta no sigue correctamente la línea de unión durante el proceso. Esta condición genera una distribución no uniforme del material plastificado, lo que se traduce en una geometría irregular del cordón y en una reducción de la capacidad de la unión para transmitir cargas. Este defecto está relacionado con desviaciones geométricas del sistema herramienta-pieza y con un control inadecuado del posicionamiento durante el proceso.

3.2.5.5 Lack of fill corresponde al material expulsado hacia los laterales de la línea de soldadura como resultado de una plastificación excesiva o de una presión axial elevada. Aunque este defecto no siempre compromete directamente la integridad estructural de la junta, sí puede afectar el cumplimiento de tolerancias geométricas y requerir operaciones posteriores de acabado. En la Figura 12 se ilustra un defecto superficial asociado al fenómeno de *lack of fill*, evidenciando la importancia del balance entre generación de calor, presión y flujo del material durante el proceso.

Figura 12

Defecto superficial de soldadura Lack of Fill



3.5.2.6 Fusión incompleta entendida en el contexto del FSW como una consolidación insuficiente del material plastificado, se presenta cuando el calor generado y la deformación inducida no son suficientes para promover un flujo adecuado del material a lo largo de la junta. Este defecto se asocia comúnmente a velocidades de avance elevadas, bajas velocidades de rotación o a una penetración insuficiente de la herramienta en el material base.

La formación de defectos en el proceso FSW puede analizarse mediante modelos que describen el flujo del material y las zonas de deformación durante la soldadura. En este contexto, (Arbegast, 2008) propuso modelos de procesamiento que permiten identificar regiones críticas de

flujo y condiciones bajo las cuales es más probable la aparición de defectos. En la Figura 13 se presenta un modelo conceptual para la formación de defectos en la soldadura por fricción-agitación, el cual ilustra la relación entre las condiciones de proceso y la estabilidad del flujo del material.

Figura 13

Modelo para la formación de defectos en FSW



Nota. Adaptado de (Arbegast, 2008) A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding.

El conjunto de conceptos desarrollados en este capítulo describe los fundamentos mecánicos y físicos que gobiernan tanto el funcionamiento de las fresadoras convencionales como el comportamiento del proceso de soldadura por fricción-agitación. La caracterización de los movimientos, las cargas, los mecanismos de generación de calor, el flujo del material y los defectos asociados al proceso permite establecer un marco conceptual consistente para el estudio de la interacción entre herramienta, máquina y material. Desde esta base teórica, resulta posible abordar

de manera estructurada la identificación de variables, condiciones operativas y criterios técnicos que guían el desarrollo del trabajo.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología de adaptación de máquinas de fresado convencional para realizar juntas soldadas por medio del modelo de soldadura fricción-agitación, con el propósito de mejorar los procesos de la industria metalmecánica

4.2 Objetivos Específicos

Determinar los parámetros del proceso de soldadura fricción-agitación a partir de las características técnicas de las máquinas de fabricación que se adapten con el proceso de fresado.

Adaptar un prototipo funcional desde una fresadora convencional con la finalidad de utilizarlo en un proceso de soldadura por fricción-agitación.

Evaluar las juntas soldadas, obtenidas con el prototipo, por medio de ensayos de caracterización mecánica para validar la funcionalidad de la metodología del proceso de adaptación desarrollado.

Realizar un estudio comparativo entre las propiedades obtenidas con el proceso de soldadura por fricción-agitación y las disponibles en la literatura de los procesos de soldadura actuales para determinar el grado de mejora.

5. Metodología

En este capítulo se describe la metodología empleada para el desarrollo del trabajo, estructurada en fases consecutivas que abarcan desde la investigación técnica del proceso de soldadura por fricción-agitación hasta la formulación de una metodología de adaptación del proceso a fresadoras convencionales. La metodología integró el diseño y fabricación de la herramienta, la ejecución del proceso FSW, la caracterización de las juntas soldadas y el tratamiento y análisis de los resultados, incluyendo el análisis estadístico y la comparación con resultados reportados para otros procesos de soldadura. Cada fase se presenta de manera sistemática, indicando las actividades desarrolladas y los criterios técnicos considerados.

5.1 Fase I. Investigación y estructuración técnica del proceso FSW

Para el desarrollo de esta fase se ejecutaron actividades de revisión y análisis de bibliografía especializada en soldadura por fricción-agitación. El trabajo se centró en el estudio de la herramienta FSW, los parámetros operativos del proceso y su influencia sobre la formación de defectos y el comportamiento mecánico de las juntas soldadas. A partir de este análisis se establecieron los lineamientos técnicos que sirvieron de base para el diseño de la herramienta FSW y para la definición de los rangos de operación de los parámetros del proceso utilizados en las fases posteriores del estudio. Las actividades desarrolladas en esta fase se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6*Actividades desarrolladas en la Fase I*

Actividades	Normas / Artículos	Alcance/Enfoque	Medios de verificación
Revisión de los fundamentos del proceso FSW	Los autores y artículos se mencionan dentro del marco teórico	Análisis de los principios físicos que gobiernan el proceso FSW	Planteamiento en el marco teórico Sección 3.2 Soldadura por fricción-agitación (FSW)
Análisis de la herramienta FSW	Los artículos se relacionan en la Tabla 12	Definir las geometrías de hombro y pin para el proceso FSW y cómo se diseñan	Descripción de los resultados en la sección 6.1.1 Cálculo de la herramienta FSW
Relación entre parámetros y defectos del proceso	Los artículos se relacionan en la Tabla 13	Estudiar las condiciones de operación que se asocian a la aparición de defectos típicos del proceso FSW	Descripción de los resultados en la sección 6.1.2 Relación entre parámetros y defectos del proceso
Relación entre parámetros y propiedades mecánicas	Los artículos se describen y citan en la sección 6.1.3 Relación entre los parámetros del proceso y las propiedades mecánicas	Estudiar las condiciones de operación que se asocian a las mejores propiedades mecánicas post-soldadura	Descripción de los resultados en la sección 6.1.3 Relación entre los parámetros del proceso y las propiedades mecánicas
Definición de lineamientos para fases posteriores	Artículos relacionados en las Tabla 12 y Tabla 13	Definición de los rangos de las variables a trabajar en el estudio del comportamiento del material soldado	Tabla 14 <i>Parámetros seleccionados para el proceso FSW</i>

5.2 Fase II. Diseño y fabricación de la herramienta FSW

Para el desarrollo de esta fase se realizó el diseño geométrico de la herramienta FSW a partir de los lineamientos técnicos establecidos en la fase anterior. El diseño consideró la configuración del hombro y del pin, sus dimensiones principales y el material de fabricación, en

función de los parámetros del proceso y de las restricciones impuestas por la fresadora convencional utilizada.

Posteriormente, se llevó a cabo la fabricación de la herramienta mediante procesos de mecanizado, asegurando el cumplimiento de las dimensiones definidas en el diseño. Una vez fabricada, la herramienta fue inspeccionada dimensionalmente y evaluada en términos de su acoplamiento con el sistema de sujeción del husillo, con el fin de verificar su correcta integración al equipo de trabajo. Las actividades desarrolladas en esta fase se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7

Actividades desarrolladas en la Fase II

Actividades	Normas / Artículos	Alcance/Enfoque	Medios de verificación
Definición de la geometría del hombro	(Hoyos & Serna, 2021) Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys (Mastanaiah et al., 2021) Evolution and current practices in friction stir welding tool design (Choi et al., 2013) Behavior of β phase (Al ₃ Mg ₂) in AA 5083 during friction stir welding	Diámetro y forma del hombro	Sección 6.2.1 Diámetro del hombro
Definición de la geometría del pin	(Hoyos & Serna, 2021) Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys (Mastanaiah et al., 2021) Evolution and current practices in friction stir welding tool design (Choi et al., 2013) Behavior of β phase (Al ₃ Mg ₂) in AA 5083 during friction stir welding	Forma del pin y longitud	Sección 6.2.2 Diámetro del piny 6.2.3 Longitud del pin
Fabricación de la herramienta FSW	—	Generar las herramientas para obtener juntas FSW	Sección 6.2.4 Material de la herramienta FSWy 6.2.5 Fabricación

Actividades	Normas / Artículos	Alcance/Enfoque	Medios de verificación
			de la herramienta FSW

5.3 Fase III. Definición y ejecución del proceso FSW en fresadora convencional

Para el desarrollo de esta fase se definieron y ejecutaron las condiciones operativas del proceso FSW sobre dos fresadoras convencionales seleccionadas, utilizando la herramienta diseñada y fabricada en la fase anterior. Se establecieron los valores de velocidad de rotación y velocidad de avance, considerando las capacidades operativas de la máquina, los rangos identificados previamente y la gráfica presentada en la Figura 13. Con estos parámetros se realizaron las soldaduras por FSW, con combinaciones de tres velocidades de rotación y tres velocidades de avance, descartando variaciones adicionales y el control del recorrido de la herramienta. Las actividades desarrolladas en esta fase se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8

Actividades desarrolladas en la Fase III

Actividades	Normas / Artículos	Alcance/Enfoque	Medios de verificación
Ejecución exploratoria del proceso FSW	—	Evaluación inicial de la viabilidad del proceso FSW en fresadoras convencionales	Probetas soldadas, registro WPS(Apéndice A)
Preparación y montaje de probetas	—	Aseguramiento de la estabilidad geométrica del conjunto láminas-placa de respaldo durante la ejecución del proceso FSW	Registro de montaje (Figura 24 y Figura 25)

Actividades	Normas / Artículos	Alcance/Enfoque	Medios de verificación
Ejecución de cordones de soldadura por FSW	—	Ejecución experimental del proceso FSW bajo diferentes configuraciones de máquina y espesores de material, así como nueve diferentes combinaciones de velocidad de avance y rotación	Secciones 6.3.1 Ejecución inicial del proceso FSW y 6.3.2 Caracterización del equipo y ejecución experimental definitiva Apéndice A
Registro de condiciones de operación	—	Documentación sistemática de las condiciones reales de operación durante la ejecución de cada junta soldada	

5.4 Fase IV. Caracterización de las juntas soldadas por FSW

En esta fase se realizó la caracterización de las juntas obtenidas en la fase anterior con el fin de evaluar su comportamiento mecánico. La caracterización incluyó inspección macroscópica y la aplicación de ensayos mecánicos comúnmente utilizados para evaluar juntas FSW, considerando la información que cada ensayo aporta sobre la integridad estructural y el desempeño del material soldado. Las actividades desarrolladas durante esta etapa se describen en la Tabla 9.

Tabla 9

Actividades desarrolladas en la Fase IV

Actividades	Normas / Artículos	Alcance/Enfoque	Medios de verificación
Ensayo de tracción	ASTM E8	Ejecutar los ensayos de tracción a cinco probetas por cada combinación de parámetros (nueve combinaciones en total)	Sección 6.4.2
Ensayo de dureza	ASTM E384	Ejecutar los ensayos de dureza a una probeta por cada combinación de parámetros (nueve combinaciones en total)	Sección 6.4.3

Actividades	Normas / Artículos	Alcance/Enfoque	Medios de verificación
Ensayo de impacto	ASTM E23	Ejecutar los ensayos de impacto a cinco probetas por cada combinación de parámetros (nueve combinaciones en total)	Sección 6.4.4

5.5 Fase V. Tratamiento y análisis de resultados

En esta fase se realizó el tratamiento y el análisis de los resultados obtenidos durante la caracterización de las juntas soldadas. Los datos experimentales fueron organizados y evaluados con el fin de identificar las propiedades mecánicas post-soldadura. Adicionalmente, los resultados obtenidos se compararon con valores reportados en la bibliografía mediante procesos de soldadura convencionales, con el propósito de contextualizar el desempeño del proceso ejecutado sobre la fresadora convencional. Las actividades desarrolladas en esta fase se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10

Actividades desarrolladas en la Fase V

Actividades	Normas / Artículos	Alcance/Enfoque	Medios de verificación
Organización y depuración de datos experimentales	—	Generar conjunto de datos depurados para su tratamiento	Apéndice B
Determinación de propiedades mecánicas	—	Determinar el valor de esfuerzo de fluencia (S_y), esfuerzo último (S_{ut}), módulo de elasticidad (E), porcentaje de elongación (%), dureza en las diferentes zonas de soldadura y energía absorbida.	Sección 6.5
Comparación con otros procesos de soldadura	—	Comparación de las propiedades obtenidas en FSW con los procesos convencionales	Sección 6.5.4

5.6 Fase VI. Generación de la metodología de adaptación

En la fase final se desarrolló una metodología técnica para la adaptación del proceso de soldadura por fricción-agitación a fresadoras convencionales, a partir de los resultados obtenidos y del análisis realizado en las fases previas. La metodología integró los criterios asociados al diseño de la herramienta, la selección de parámetros operativos, las condiciones de montaje y las limitaciones propias de la máquina, estableciendo un procedimiento sistemático para la implementación del proceso FSW en este tipo de equipos. Las actividades desarrolladas en esta fase se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11

Actividades desarrolladas en la Fase VI

Actividades	Normas / Artículos	Alcance/Enfoque	Medios de verificación
Estructuración de la metodología de adaptación	—	Generar algoritmos que definan el paso a paso para la adaptación de la fresadora	Capítulo 7
Validación conceptual de la metodología	—	Aplicar metodología al ejemplo validado	Sección 7.4

6. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología propuesta. Los resultados se organizaron de acuerdo con las fases metodológicas definidas, mostrando de manera ordenada los productos y hallazgos derivados de cada una de ellas.

6.1 Resultados de la fase I

En esta fase se establecieron relaciones entre la geometría de la herramienta y los parámetros del proceso, entre los parámetros operativos y la aparición de defectos y entre dichos parámetros y las propiedades mecánicas obtenidas en las juntas soldadas. Finalmente, a partir del análisis conjunto de estos resultados, se definieron los lineamientos técnicos que orientaron el desarrollo de las fases metodológicas posteriores.

6.1.1 Cálculo de la herramienta FSW

El análisis de los artículos revisados permitió identificar los enfoques utilizados para el cálculo y diseño de la herramienta FSW, particularmente en lo relacionado con la geometría del hombro y del pin. Para esta etapa se realizaron búsquedas bibliográficas empleando palabras clave como “Tool” y “FSW”, a partir de las cuales se seleccionaron estudios que abordaron de manera explícita el dimensionamiento y la función mecánica de la herramienta. Los trabajos analizados evaluaron distintas configuraciones geométricas con el fin de establecer su efecto sobre el flujo del material, la generación de calor y la estabilidad del proceso, como se resume en la Tabla 12.

Tabla 12*Artículos analizados sobre diseño de la herramienta FSW*

Artículo	Geometría de hombro	Geometría de pin	Aspecto evaluado del diseño
(Swetha & Pathy, 2023) Tool pin profiles effect on mechanical properties of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys	Plano	Cilíndrico, cónico, cuadrado	Influencia del perfil del pin en propiedades mecánicas, los autores resaltan las geometrías cónicas y cuadradas
(Hasieber & others, 2022) A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding	Plano	Pin y hombro analizados por desgaste	Desgaste máximo tolerable de la herramienta, este estudio describe que desviaciones superiores al 20% de la dureza original ocasionan problemas de desgaste, promoviendo defectos en la junta
(Elangovan & Balasubramanian, 2008) Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy	Plano, cóncavo	Cilíndrico liso, roscado, cónico, cuadrado, triangular	Formación de la zona de soldadura, se prefieren geometrías no circulares y la presencia de un doble pin para garantizar la formación del <i>nugget</i>
(Elangovan & Balasubramanian, 2007) Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy	Plano	Cilíndrico liso, roscado, cónico, cuadrado, triangular	Efecto de velocidad de rotación y geometría del pin, destacan geometrías roscadas porque favorecen el flujo de material
(Hoyos & Serna, 2021) Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys	Plano, cóncavo	Dimensiones definidas por espesor de lámina	Lineamientos de diseño geométrico de herramienta, plantean ecuaciones de dimensionamiento del hombro y pin mediante la revisión de diferentes autores

Artículo	Geometría de hombro	Geometría de pin	Aspecto evaluado del diseño
(Akbari et al., 2023) Investigating the role of different components of friction stir welding tools on the generated heat and strain	Plano	Herramienta completa, sin pin y sin hombro	Aporte del hombro y del pin al calor y la deformación, el autor menciona la influencia en la generación de calor y la forma del hombro de la herramienta

Los trabajos reportaron el uso predominante de hombros planos y cóncavos, mientras que el pin fue diseñado con geometrías cilíndricas, cónicas y no circulares. Asimismo, los resultados mostraron que la selección de la geometría de la herramienta respondió a criterios funcionales asociados al control del material plastificado y a la obtención de juntas soldadas libres de defectos.

6.1.2 Relación entre parámetros y defectos del proceso

Con el propósito de identificar cómo los parámetros de operación del proceso FSW se relacionan con la aparición de defectos típicos de la soldadura, se llevó a cabo una revisión bibliográfica empleando la ecuación de búsqueda: (“friction stir welding” OR “FSW”) AND (“defects” OR “welding defects”) AND (“welding parameters”). Los artículos con mayor relevancia y aporte se describen en la Tabla 13.

Tabla 13*Artículos analizados sobre parámetro del proceso FSW y la ocurrencia de defectos*

Artículo	Material y espesor	Rangos de operación reportados	Aporte principal
(Raturi et al., 2019) Joint strength and failure studies of dissimilar AA6061-AA7075 friction stir welds: Effects of tool pin, process parameters and preheating	AA6061–AA7075 disímiles, espesor \approx 6.1 mm	Rotación: 660–1700 RPM; Avance: 36–132 mm/min	La combinación de parámetros y geometría del pin influyó en la calidad de la soldadura; un pin cilíndrico roscado de tres caras con parámetros intermedios produjo mejores propiedades y menor defectología.
(Kumar & Ghost, 2014) Emerging friction stir welding for aluminium and its applications	AA5083–AA6061 disímiles, espesor \approx 6 mm	Rotación: 800–1700 RPM; Avance: 40–80 mm/min; Inclinación: \approx 1°	Se demostró que altas velocidades de rotación con avances moderados favorecieron la mezcla del material y redujeron defectos asociados a falta de consolidación.
(Sachinkumar et al., 2021) Analysis of the effect of friction stir welding parameters on characteristics of AA6061 composites using response surface methodology	Revisión general de aleaciones de aluminio	Artículo de revisión	Identificó que la velocidad de rotación y la velocidad de avance son los parámetros clave que controlan la generación de calor y el flujo del material plastificado durante FSW.
(Balamurugan et al., 2021) Influence of friction stir welding parameters on dissimilar joints AA6061-T6 and AA5052-H32	AA6061-T6 / AA5052-H32, espesor \approx 5 mm	Rotación: 800–1100 RPM; Avance: 30–80 mm/min	Reportó que perfiles de pin no circulares junto con parámetros intermedios redujeron defectos y produjeron mejores propiedades mecánicas.
(Cavaliere et al., 2008) Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding	AA6082, espesor \approx 4 mm	Rotación: 500–1000 RPM; Avance: 40–80 mm/min	Condiciones específicas de parámetros generaron soldaduras sin defectos visibles y microestructura homogénea.

Artículo	Material y espesor	Rangos de operación reportados	Aporte principal
(Verma & Kumar, 2021) Optimization of friction stir welding parameters of dissimilar aluminium alloys 6061 and 5083 by using response surface methodology	AA6061–AA5083 disímiles, espesor \approx 6.35 mm	Rotación: 1200–1950 RPM; Avance: 30–50 mm/min	Combinaciones óptimas de parámetros redujeron defectos internos y mejoraron la eficiencia de la junta soldada.
(Azimzadegan & Serajzadeh, 2010) An investigation into microstructures and mechanical properties of AA7075-T6 during friction stir welding at relatively high rotational speeds	AA7075-T6, espesor \approx 5 mm	Rotación: 1000–1400 RPM; Avance: 40–80 mm/min	Determinó que combinaciones inadecuadas de parámetros incentivaron vacíos y grietas, mientras que condiciones intermedias evitaron defectos.

A partir de los trabajos revisados, se observó que la configuración geométrica del pin influye de manera significativa en la calidad de la soldadura. En particular, se reportó que pines con geometrías no circulares favorecieron una mezcla más eficiente del material plastificado, lo que se tradujo en una menor incidencia de defectos internos. En este sentido, algunos estudios evidenciaron que geometrías con caras planas mejoraron el flujo del material dentro de la zona de agitación, reduciendo la formación de vacíos y discontinuidades.

De igual forma, los resultados mostraron que la combinación entre la velocidad de rotación y la velocidad de avance tuvo un efecto directo sobre la generación de calor y, por ende, sobre la aparición de defectos. Condiciones caracterizadas por velocidades de rotación elevadas junto con velocidades de avance reducidas produjeron incrementos térmicos significativos, asociados en algunos casos con ablandamiento excesivo del material y un aumento de la zona afectada por calor. En contraste, velocidades de rotación bajas, especialmente cuando se emplearon velocidades de avance altas, condujeron a una generación térmica insuficiente, favoreciendo defectos superficiales y una mezcla deficiente del material.

Adicionalmente, el espesor del material base se identificó como un factor relevante en la formación de defectos, ya que espesores mayores demandaron un control más preciso de los parámetros de operación para asegurar una adecuada penetración y consolidación de la junta. En conjunto, los resultados de los estudios analizados permitieron establecer tendencias claras entre los parámetros del proceso y los defectos observados, las cuales sirvieron como referencia para la definición de criterios operativos en este trabajo y que se presentan en la Tabla 14.

6.1.3 Relación entre los parámetros del proceso y las propiedades mecánicas

En esta sección se realizó una revisión bibliográfica orientada a identificar estudios que analizaron la influencia de los parámetros del proceso de soldadura por fricción-agitación sobre las propiedades mecánicas de las juntas soldadas. Para ello, se empleó la ecuación de búsqueda (“friction stir welding” OR “FSW”) AND (“welding parameters”) AND (“tensile strength” OR “hardness” OR “mechanical properties”), priorizando investigaciones experimentales que reportaron resultados de resistencia mecánica y dureza bajo distintas condiciones de operación.

Los trabajos revisados evidenciaron que la geometría de la herramienta y los parámetros cinemáticos del proceso influyeron de manera directa en el desempeño mecánico de las juntas. En particular, el trabajo de Ghiasvand (Ghiasvand et al., 2021) analizaron el efecto de distintas geometrías del pin en juntas de AA6061, manteniendo constantes la velocidad de avance y la velocidad de rotación, y reportaron que las juntas soldadas conservaron entre el 78 % y el 92 % de las propiedades mecánicas del material base, dependiendo de la geometría empleada.

De manera complementaria, (Li et al., 2014) evaluaron combinaciones de geometrías de pin en placas de aluminio con diferentes espesores (5, 8, 12 y 16 mm), variando simultáneamente la velocidad de rotación y la velocidad de avance. Sus resultados mostraron que, para un espesor

de 5 mm, una velocidad de rotación de 1400 rpm y una velocidad de avance de 700 mm/min, junto con un pin roscado, permitieron obtener las mejores propiedades mecánicas entre las condiciones evaluadas.

Asimismo, (Banik et al., 2018) estudiaron el efecto del ángulo de inclinación de la herramienta durante la soldadura de placas de AA6061 con 6 mm de espesor. Aunque no se observaron variaciones significativas en la resistencia a la tracción al modificar dicho ángulo, los autores reportaron cambios relevantes en la dureza de las juntas, siendo el menor valor registrado cuando la herramienta operó con un ángulo de inclinación de 0°.

Dado el carácter multivariable del proceso FSW, Prakash y Daniel Das en (Akbari et al., 2023; Raturi et al., 2019) emplearon un diseño factorial completo para evaluar el efecto combinado de cuatro factores —velocidad de rotación, velocidad de avance, tiempo de soldadura y velocidad de penetración de la herramienta— en dos niveles de operación. A partir de este enfoque, los autores demostraron que el análisis factorial permitió comprender de forma más efectiva cómo la interacción entre múltiples parámetros influyó en las propiedades mecánicas de las juntas soldadas.

6.1.4 Selección de parámetros del proceso

A partir del análisis conjunto de los resultados obtenidos en las Secciones 6.1.1, 6.1.2 y 6.1.3, se consolidaron los criterios técnicos para la selección de los parámetros operativos y de diseño de la herramienta a emplear en el presente estudio. La revisión bibliográfica mostró de manera consistente que la velocidad de rotación de la herramienta y la velocidad de avance fueron los parámetros con mayor influencia sobre el flujo del material, la generación de calor, la aparición de defectos y el comportamiento mecánico de las juntas soldadas.

En relación con la geometría del pin, los estudios analizados evidenciaron que configuraciones no circulares, particularmente el pin cuadrado, produjeron mejores propiedades mecánicas debido a una mayor eficiencia en la mezcla del material. No obstante, considerando las limitaciones asociadas al proceso de fabricación de la herramienta, se seleccionó un pin cónico roscado, el cual también fue reportado en los artículos como una geometría capaz de promover una adecuada agitación del material y estabilidad del proceso.

Otros parámetros del proceso, como la fuerza axial y el ángulo de inclinación de la herramienta, fueron considerados de menor relevancia relativa frente al efecto de la velocidad de rotación y la velocidad de avance sobre las propiedades mecánicas de las juntas soldadas. En consecuencia, estos parámetros no fueron incluidos dentro del alcance experimental del presente estudio.

Con base en los rangos de operación reportados en los artículos analizados, se definieron como condiciones de trabajo para la investigación velocidades de rotación comprendidas entre 400 y 1400 RPM y velocidades de avance entre 20 y 60 mm/min. Los parámetros seleccionados y sus rangos de operación se resumen en la Tabla 14, la cual sirvió como referencia para el diseño experimental desarrollado en las fases metodológicas posteriores.

Tabla 14

Parámetros seleccionados para el proceso FSW

Parámetro	Condición seleccionada	Rango de operación definido	Justificación técnica
Velocidad de rotación	Variable principal	400 – 1400 RPM	Parámetro con mayor influencia sobre la generación de calor, flujo del material y propiedades mecánicas

Velocidad de avance	Variable principal	20 – 60 mm/min	Controla el tiempo de interacción herramienta–material y la estabilidad de la junta
Geometría del pin	Cónico roscado	—	Proporciona buena mezcla del material y es compatible con las limitaciones de fabricación
Fuerza axial	No considerada	—	Influencia secundaria frente a la velocidad de rotación y avance
Ángulo de inclinación	No considerado	—	Efecto menos significativo sobre las propiedades mecánicas según la bibliografía revisada
Material para soldar	Aluminio AA6061-T6	6 – 10 mm	Material mayormente utilizado en aplicaciones de FSW y con bibliografía disponible para validar mediante comparaciones

6.2 Resultados de la fase II

Como resultado de la Fase II se obtuvo el dimensionamiento completo y la definición geométrica de las herramientas FSW desarrolladas para la soldadura de láminas de aluminio AA6061-T6. A partir de los lineamientos establecidos en la fase anterior y de la aplicación directa de modelos matemáticos reportados en los artículos, se definieron las dimensiones del hombro, del pin y del cuerpo de la herramienta, dando como resultado configuraciones funcionales diferenciadas por la geometría del pin (pin cónico liso y pin cónico roscado) y tamaños (espesores 600 y espesores 10 mm). El dimensionamiento se realizó considerando que el espesor de la lámina a soldar constituye una variable del proceso, y que las expresiones matemáticas empleadas dependen directamente de dicho espesor. En este contexto, los resultados obtenidos se presentan a continuación organizados según los parámetros geométricos fundamentales de la herramienta.

6.2.1 Diámetro del hombro

El diámetro del hombro se determinó a partir del modelo propuesto en (Hoyos & Serna, 2021) para herramientas FSW aplicadas a aleaciones de aluminio de la serie 6000. La relación empleada para el cálculo del diámetro del hombro se expresa mediante la Ecuación 10 .

Ecuación 10. Diámetro del hombro para aleaciones serie 6000

$$D_s = 1,3412 x + 10,726$$

Donde:

D_s : Diámetro del hombro [mm].

x : Espesor de la lámina a soldar [mm].

Al sustituir el espesor por el de una de las láminas empleadas en este trabajo ($x = 6$ mm), se obtuvo un diámetro de hombro de 19 mm, valor que fue adoptado para ambas configuraciones de herramienta (cónico roscado y cónico liso).

6.2.2 Diámetro del pin

El diámetro mayor del pin se calculó inicialmente a partir del modelo empírico propuesto por (Hoyos & Serna, 2021) para la serie de aluminio 6000. La expresión empleada se presenta en la Ecuación 11.

Ecuación 11. Diámetro del pin para aleaciones serie 6000

$$D_p = 0,6837 x + 2,5443$$

Donde:

D_p : Diámetro del pin [mm].

x : Espesor de la lámina a soldar [mm].

Para un espesor de lámina de 6 mm, se obtuvo un diámetro del pin de 6,5 mm, el cual fue adoptado como diámetro mayor para ambas configuraciones de pin cónico. A partir de la recopilación de información bibliográfica se determinó una relación promedio de ángulo para pines cónicos (Akbari et al., 2023; Elangovan & Balasubramanian, 2007, 2008). La relación geométrica empleada para determinar el diámetro menor del pin se expresa mediante la Ecuación 12.

Ecuación 12. Relación geométrica para el cálculo del diámetro menor del pin

$$\tan(\phi) = \frac{D - d}{2L}$$

Donde:

ϕ : Ángulo del pin cónico [°].

D : Diámetro mayor del pin [mm].

d : Diámetro menor del pin [mm].

L : Longitud del pin [mm].

A partir de esta relación y del ángulo promedio obtenido ($\phi = 13,832^\circ$), se determinó un diámetro menor del pin de 4 mm.

6.2.3 Longitud del pin

La longitud del pin se determinó utilizando la relación correspondiente a la serie 6000, la cual se expresa mediante la Ecuación 13 (Hoyos & Serna, 2021).

Ecuación 13. Longitud del pin para aleaciones serie 6000

$$L_p = 0,9732 x - 0,2093$$

Donde:

L_p : Longitud del pin [mm].

x : Espesor de la lámina a soldar [mm].

Al sustituir el espesor de la lámina de 6 mm, se obtuvo una longitud del pin de 5,7 mm.

6.2.4 Material de la herramienta FSW

Para la fabricación de la herramienta FSW se seleccionó un acero para herramientas de trabajo en caliente correspondiente a la designación DIN 1.2344 (AISI H13). La selección de este material se realizó considerando su uso habitual en aplicaciones sometidas a altas temperaturas y esfuerzos mecánicos, condiciones propias del proceso de soldadura por fricción-agitación.

La composición química del material seleccionado se presenta en la Tabla 15. En esta se observa un acero aleado con cromo, molibdeno y vanadio, elementos característicos de los aceros para trabajo en caliente y asociados a un adecuado comportamiento mecánico y estabilidad a temperaturas elevadas.

Tabla 15

Composición química del acero para la herramienta FSW

C [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]
0,40	1,00	5,30	1,40	1,00

Nota. La composición química corresponde a un acero para herramientas de trabajo en caliente conforme a la designación DIN 1.2344 (AISI H13). Elaboración propia a partir de la ficha técnica del material.

6.2.5 Fabricación de la herramienta FSW

La fabricación de las herramientas FSW se realizó a partir de barras cilíndricas del material seleccionado, de las cuales se extrajeron las secciones necesarias según la longitud total definida de 50 mm. El proceso de mecanizado se desarrolló principalmente mediante operaciones de torneado, con el objetivo de conformar el cuerpo, el hombro y el pin de cada herramienta conforme a las dimensiones establecidas.

Las operaciones de fabricación se organizaron mediante hojas de ruta, en las que se definió la secuencia de procesos, las condiciones de corte y los tiempos asociados para cada operación. Como resultado, se obtuvieron dos herramientas geoméricamente equivalentes en cuerpo y hombro, diferenciadas únicamente por la configuración del pin (cónico liso y cónico roscado). Las hojas de ruta correspondientes a cada herramienta se presentan en las Tabla 16 y Tabla 17.

Tabla 16

Hoja de ruta de fabricación de la herramienta FSW con pin cónico liso

Orden	Operación	Máquina	Herramienta de corte	Vc [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	Tiempo [min]
1	Tronzado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de tronzado	70	0,25	12,70	5
2	Refrentado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de refrentado	120	0,05	2,00	1
3	Cilindrado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de cilindrado	120	0,40	2,70	4
4	Cilindrado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de cilindrado	110	0,40	0,50	3
5	Cilindrado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de cilindrado	100	0,40	6,25	5
6	Torneado cónico	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de cilindrado	20	0,05	1,25	10

Nota. Hoja de ruta correspondiente al mecanizado de la herramienta FSW con pin cónico liso.

Tabla 17*Hoja de ruta de fabricación de la herramienta FSW con pin cónico roscado*

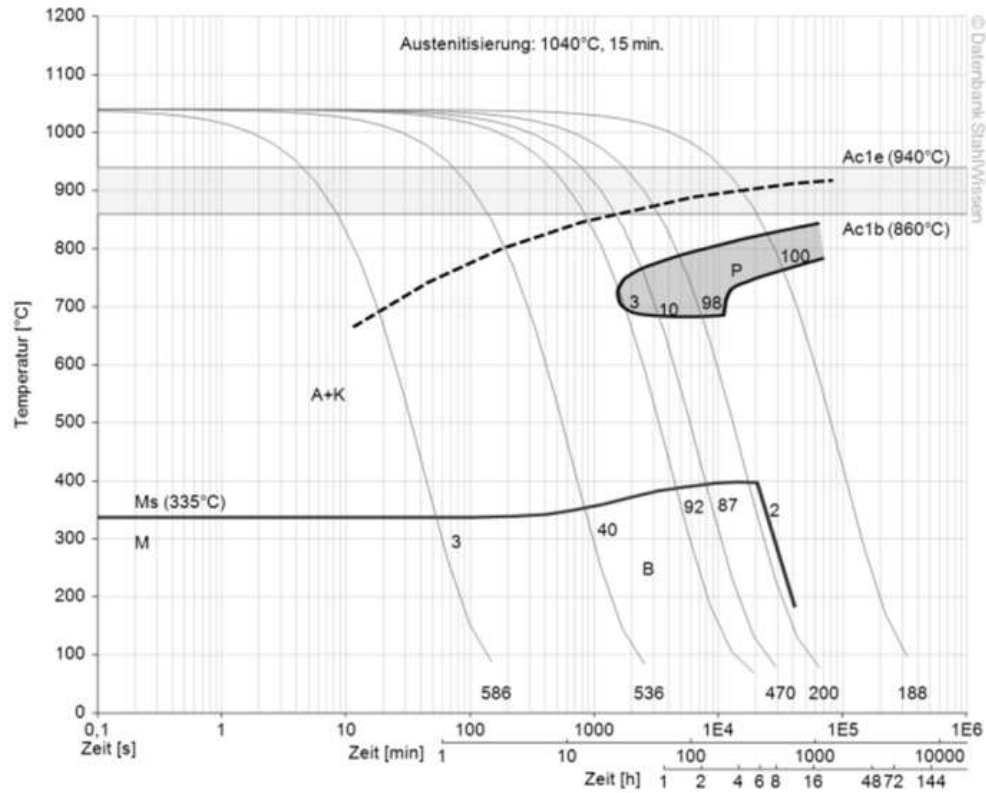
Orden	Operación	Máquina	Herramienta de corte	Vc [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	Tiempo [min]
1	Tronzado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de tronzado	70	0.25	12.7	5
2	Refrentado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de refrentado	120	0.05	2.0	1
3	Cilindrado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de cilindrado	120	0.40	2.7	4
4	Cilindrado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de cilindrado	110	0.40	0.5	3
5	Cilindrado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de cilindrado	100	0.40	6.25	5
6	Torneado cónico	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de cilindrado	20	0.05	1.25	10
7	Roscado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de roscado	20	1.00	0.05	15

Nota. Hoja de ruta correspondiente al mecanizado de la herramienta FSW con pin cónico roscado.

Posterior al mecanizado, ambas herramientas fueron sometidas a un tratamiento térmico de temple con el fin de incrementar su dureza superficial y mejorar su resistencia al desgaste durante el proceso de soldadura por fricción-agitación. El tratamiento se realizó mediante calentamiento controlado hasta la temperatura de temple definida para el material, 1035°C por un tiempo de sostenimiento de 15 minutos, seguido de un enfriamiento rápido en aceite por inmersión. El ciclo térmico aplicado se analizó con base en el diagrama TTT del material, presentado en la Figura 14.

Figura 14

Diagrama TTT para el acero de la herramienta FSW

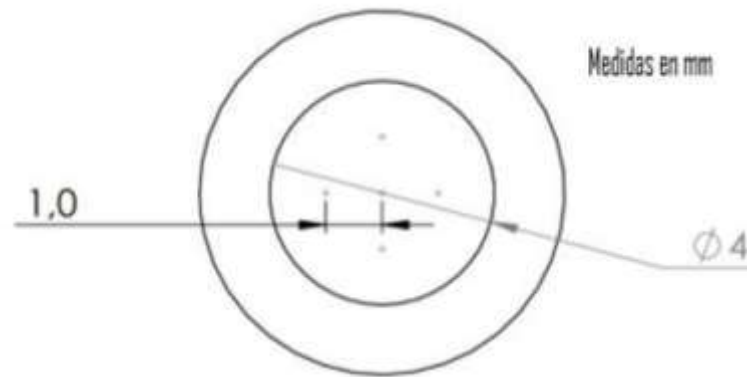


Nota. Tomada de Abrams Industries

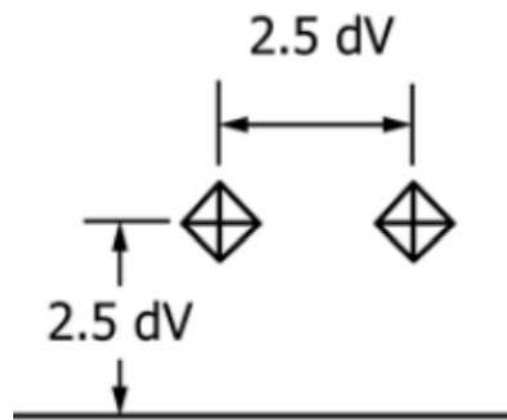
Con el objetivo de verificar la efectividad del tratamiento térmico, se realizó una evaluación de microdureza antes y después del temple en ambas herramientas. Las mediciones se efectuaron en la cara plana del pin, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E384. La distribución de las muescas y la distancia mínima entre ellas se definieron conforme a la norma, como se muestra en las Figura 15 y Figura 16, mientras que un ejemplo de la huella obtenida se presenta en la Figura 17.

Figura 15

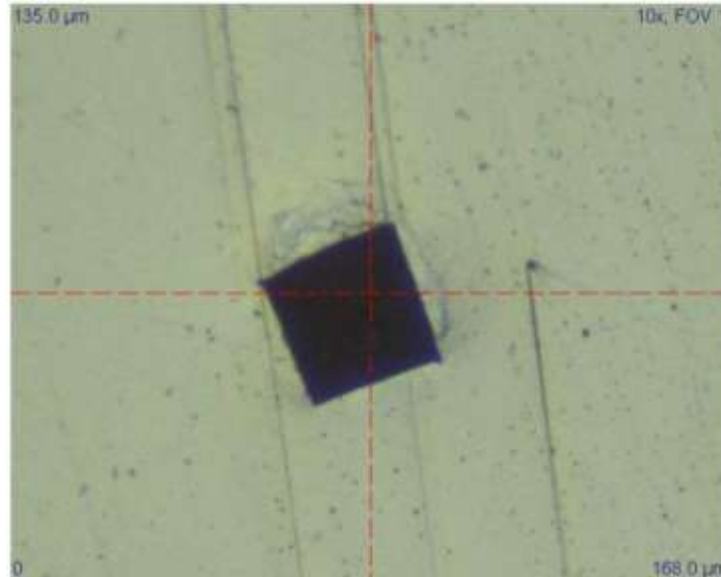
Distribución de muescas para dureza

**Figura 16**

Distancia mínima entre muescas



Nota. Tomado de ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Micro-indentation Hardness of Materials. E384

Figura 17*Muesca desde microscopio (X10)*

Los resultados de microdureza obtenidos antes y después del tratamiento térmico para cada herramienta se resumen en las Tabla 18 y Tabla 19. Finalmente, la Figura 18 muestra el estado final de las herramientas una vez completado el proceso de fabricación y tratamiento térmico.

Tabla 18*Microdureza antes y después del temple – Herramienta con pin cónico liso*

Condición	Carga [kgf]	Tiempo [s]	Nº de muescas	D promedio [mm]	Dureza HV
Antes del temple	1	15	5	0,147	175,900
Después del temple	1	15	5	0,058	544,100

Nota. Valores obtenidos mediante ensayo de microdureza Vickers conforme a ASTM E384.

Tabla 19*Microdureza antes y después del temple – Herramienta con pin cónico roscado*

Condición	Carga [kgf]	Tiempo [s]	Nº de muescas	D promedio [mm]	Dureza HV
Antes del temple	1	15	5	0,147	176,100
Después del temple	1	15	5	0,0582	546,600

Nota. Valores obtenidos mediante ensayo de microdureza Vickers conforme a ASTM E384.

Figura 18*Herramientas antes y después del temple*

Nota. A la izquierda se presentan las herramientas FSW antes del tratamiento térmico, mientras que a la derecha se muestran las herramientas después del proceso de temple, evidenciándose el cambio superficial asociado al ciclo térmico aplicado.

El procedimiento de fabricación, tratamiento térmico y verificación descrito en esta sección fue equivalente para las herramientas FSW diseñadas para la soldadura de láminas de mayor espesor. En el caso de las herramientas destinadas a la soldadura de láminas de 10 mm de espesor, se mantuvo la misma secuencia de operaciones de mecanizado, se aplicó el mismo ciclo de temple

y se empleó el mismo método de evaluación de microdureza, variando únicamente las dimensiones geométricas de la herramienta de acuerdo con el espesor de la lámina, conforme a los criterios de diseño establecidos previamente.

En conjunto, los resultados de la Fase II permitieron consolidar el diseño, dimensionamiento, fabricación y tratamiento térmico de las herramientas FSW desarrolladas, garantizando su coherencia geométrica, estabilidad dimensional y propiedades mecánicas adecuadas para su aplicación en el proceso FSW. Estos resultados constituyeron la base para la fase siguiente, en la cual se fabricaron las juntas para su posterior caracterización mecánica.

6.3 Resultados de la fase III

En la Fase III se obtuvieron los resultados asociados a la ejecución del proceso FSW en fresadoras convencionales, así como a la definición de la condición final de trabajo empleada para la fabricación de las juntas soldadas. La fase se desarrolló de manera progresiva, iniciando con pruebas exploratorias sobre placas de mayor espesor y continuando con ajustes en el equipo y en el espesor del material base, hasta consolidar una configuración operativa estable.

6.3.1 Ejecución inicial del proceso FSW

La ejecución inicial del proceso FSW se realizó sobre placas de aluminio de 10 mm de espesor, utilizando una fresadora convencional vertical (V) equipada con un único motor principal (AX) y un sistema de transmisión con velocidades de rotación fijas (DX). Bajo esta configuración se aplicaron condiciones operativas compatibles con el espesor y material de la junta y la capacidad nominal del equipo, que se presenta en la Figura 19, y se ejecutaron cordones de soldadura exploratorios.

Figura 19

Fresadora tipo V-AX-DX



Nota. Fresadora utilizada en la exploración inicial del proceso FSW, presenta en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS.

Durante esta etapa fue posible generar un cordón de soldadura visible, evidenciando la plastificación del material y la interacción efectiva entre la herramienta FSW y el material base. Sin embargo, a medida que avanzaba el recorrido de soldadura, se observó una disminución progresiva de la velocidad del husillo asociada a la limitada capacidad de potencia disponible, lo que condujo al frenado del sistema antes de completar el cordón. Estos resultados evidenciaron que la fresadora utilizada inicialmente no permitía sostener el proceso FSW de manera continua para placas de 10 mm de espesor.

Posteriormente, el proceso FSW se ejecutó en una segunda fresadora convencional vertical (V), caracterizada por una configuración mecánica más robusta y por disponer de un sistema de avances independiente del motor principal (AD) y con velocidades variables (DC). En esta etapa

el proceso se aplicó nuevamente sobre placas de 10 mm de espesor, manteniendo el objetivo de evaluar la viabilidad del proceso bajo mejores condiciones de accionamiento.

Bajo esta configuración se obtuvo una mejora significativa en la estabilidad del proceso respecto a la etapa anterior, lográndose la formación de cordones de soldadura continuos y un mejor control del recorrido de la herramienta. No obstante, durante la ejecución prolongada del proceso se evidenció un incremento en la demanda mecánica del sistema, manifestado en signos de fatiga de la máquina. Aunque estos efectos fueron menos críticos que los observados en la fresadora inicial, indicaron que la soldadura de placas de 10 mm continuaba representando una condición exigente para una operación sostenida del proceso FSW.

Como resultado del comportamiento observado en las etapas anteriores, la ejecución del proceso FSW se continuó en la misma segunda fresadora, ajustando el espesor del material base a 6 mm. Bajo esta configuración se logró una operación estable del proceso, sin evidencias de frenado del husillo ni manifestaciones críticas de fatiga mecánica durante la ejecución de los cordones.

Los cordones de soldadura obtenidos sobre placas de 6 mm presentaron continuidad y uniformidad superficial, permitiendo mantener condiciones operativas repetibles durante el proceso. Estos resultados consolidaron el uso de placas de 6 mm de espesor como la condición final de trabajo para la fabricación de las juntas soldadas analizadas en las fases posteriores del estudio.

6.3.2 Caracterización del equipo y ejecución experimental definitiva

Una vez establecida la condición final de trabajo, la ejecución experimental se desarrolló utilizando la segunda fresadora convencional, que es presentada en la Figura 20, como equipo

definitivo. En esta etapa se realizaron los ajustes necesarios para garantizar la correcta configuración de los parámetros de operación antes de la fabricación de las juntas soldadas.

Figura 20

Fresadora vertical convencional FU 250x1000 - Fritz Heckert



Nota. Fresadora del tipo V-AD-DC, presente en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS.

El control de la velocidad de avance se realizó mediante el sistema mecánico de desplazamiento de la mesa de la fresadora. A partir del desplazamiento correspondiente a una revolución completa del dial de control, que se presenta en la Figura 21, se calculó la velocidad de avance V_a midiendo el tiempo requerido para una revolución completa mediante un cronómetro, lo que permitió ajustar el avance antes de realizar las soldaduras.

Figura 21

Control de velocidad de avance y posicionamiento de la mesa de la fresadora



El control de la velocidad de rotación de la herramienta se efectuó mediante el sistema de selección de rangos y ajuste intermedio disponible en la fresadora, así como lo presenta la Figura 22. Para verificar los valores reales de rotación, se utilizó un tacómetro digital presentado en la Figura 23, con el cual se identificaron discrepancias entre los valores configurados y los valores medidos. Estos ajustes permitieron garantizar la precisión de los parámetros de operación antes de la ejecución de las juntas soldadas.

Figura 22

Control de velocidad de rotación de la herramienta de la fresadora

**Figura 23**

Tacómetro digital DT- 2234C+



Para las pruebas experimentales se seleccionaron láminas de aleación de aluminio AA6061 con un espesor de 6 mm, de dimensiones adecuadas ($102 \times 195 \pm 6$ mm) para la posterior obtención de probetas de tracción, impacto y dureza. Las láminas se montaron sobre una placa de respaldo

de acero ubicada en la mesa de la fresadora y se fijaron mediante sistemas de sujeción bridados, garantizando la estabilidad del conjunto durante el proceso de soldadura. Ver Figura 24.

Figura 24

Montaje experimental de las láminas de aluminio en la fresadora



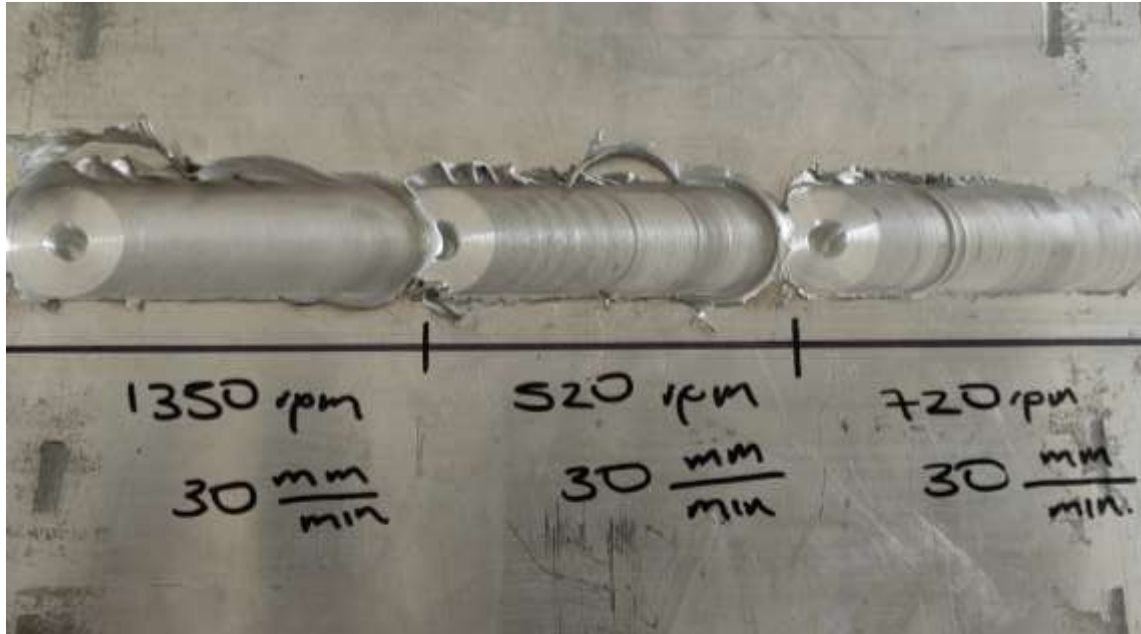
La herramienta empleada correspondió a una configuración con pin cónico roscado fabricada en acero H13. Antes de la ejecución de cada soldadura se verificó la alineación de las láminas y la correcta posición del pin sobre la línea de unión mediante el ajuste del posicionamiento de la mesa de la fresadora. Ver Figura 25

Figura 25

Alineación de la herramienta sobre las láminas de aluminio



Previo a la ejecución de las juntas completas, se realizaron soldaduras parciales sobre las láminas con el fin de evaluar los rangos de parámetros seleccionados y ajustar el procedimiento de penetración manual de la herramienta, estas soldaduras parciales se presentan en la Figura 26. Estas pruebas permitieron identificar defectos asociados a penetración excesiva o insuficiente, así como expulsión de material y defectos internos. A partir de la inspección visual de los cordones obtenidos, se ajustaron los parámetros de operación y se definieron las condiciones finales de soldadura.

Figura 26*Pruebas de parámetros de soldadura*

Aunque se evaluaron velocidades de rotación y de avance superiores a las finalmente adoptadas, la fresadora presentó fallas operacionales bajo estas condiciones, por lo que se seleccionaron valores más bajos dentro de los rangos establecidos, garantizando una ejecución estable del proceso y la repetibilidad de las juntas soldadas. La lista definitiva de parámetros se presenta en la Tabla 20.

Tabla 20

Parámetros definitivos para las juntas

Parámetros del Proceso	Baja	Media	Alta
VR (RPM)	520	620	720
VA (mm/min)	25	30	35

Para la evaluación de las propiedades de las juntas soldadas se realizaron nueve diferentes combinaciones de los parámetros definidos en la Tabla 21. Durante la ejecución del proceso se registraron de manera sistemática todas las condiciones operativas asociadas a cada soldadura, las cuales fueron consignadas en el correspondiente *Welding Procedure Specification* (WPS), incluido en el Apéndice A. en la Figura 27, se presenta un ejemplo del registro de las juntas obtenidas y en la Tabla 21 se presentan las combinaciones de parámetros.



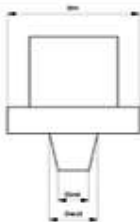

Tabla 21

Tabla de combinaciones de parámetros

PARAMETRO	VR [RPM]	VA [mm/min]
J1	620	30
J2	620	35
J3	620	25
J4	720	30
J5	720	35
J6	720	25
J7	520	30
J8	520	35
J9	520	25

Figura 27

Registro de condiciones de junta

		Universidad Industrial de Santander Escuela de Ingeniería Mecánica			
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)					
Nombre Compañía:		UIS		Fecha: 28-ago-24	
Según norma:		ISO 25239		Realizado por: Juan F. Martinez	
WPS No.		3			
JUNTA UTILIZADA			METAL BASE		
Tipo de junta:		Butt joint		Especificación: Aluminio A6061	
Placa de respaldo:		<input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No		Medidas (mm): 102 x 199	
Preparar bisel:		<input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/> No		Espesor (mm): 6,35	
GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA			NOTAS		
Tipo:		<input checked="" type="checkbox"/> Cónico DH: 19 mm Dint: 4 mm Dext: 6,5 mm		 <p>Se observa defecto lack of fill por falta de penetración 30 mm después de empezar el proceso de soldadura. Posible poro de gusano al final de la soldadura justo después de remover la herramienta. Longitud efectiva para el corte de 154 mm.</p>	
Tipo de hombro:		Plano			
Rosca:		<input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No			
Tipo de rosca:		M6,5x1			
Fotografía de la Junta					
					

En conjunto, los resultados de la Fase III permitieron establecer de manera progresiva la viabilidad del proceso FSW en fresadoras convencionales, evidenciando las limitaciones asociadas a la soldadura de placas de 10 mm de espesor y consolidando una condición final de trabajo basada en el uso de la segunda fresadora y placas de 6 mm de espesor. Esta configuración constituyó la base experimental para el desarrollo de las fases posteriores de caracterización de las juntas soldadas.

6.4 Resultados de la fase IV

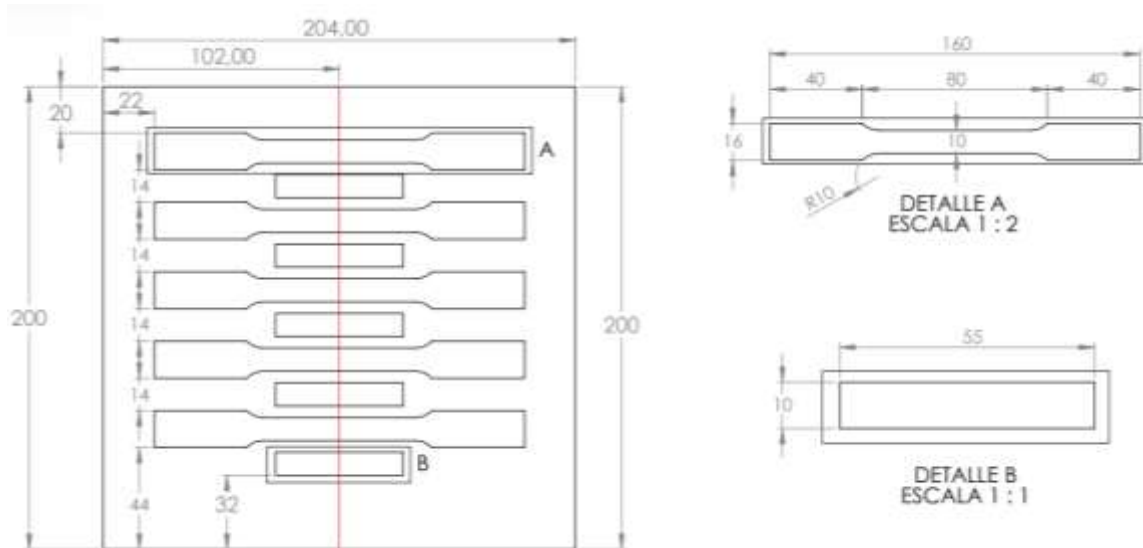
En esta fase se llevó a cabo la caracterización de las juntas soldadas obtenidas en la Fase III, con el objetivo de evaluar su comportamiento mecánico y su integridad estructural. La caracterización incluyó la preparación de probetas normalizadas, la aplicación de ensayos mecánicos comúnmente empleados en la evaluación de juntas soldadas por FSW y el análisis de la información aportada por cada ensayo en relación con el desempeño del material soldado.

6.4.1 Diseño y fabricación de las probetas

El diseño de las probetas utilizadas en esta investigación se realizó de acuerdo con los lineamientos establecidos en las normas ASTM E8 para ensayos de tracción, ASTM E384 para ensayos de microdureza Vickers y la norma ASTM E23 para ensayos de impacto. Estas normas definen las geometrías, dimensiones y condiciones necesarias para garantizar resultados confiables y reproducibles en la evaluación de propiedades mecánicas de materiales metálicos y juntas soldadas. Los planos de diseño de estas probetas se presentan en la Figura 28.

Figura 28

Planos del diseño de las probetas de tracción e impacto

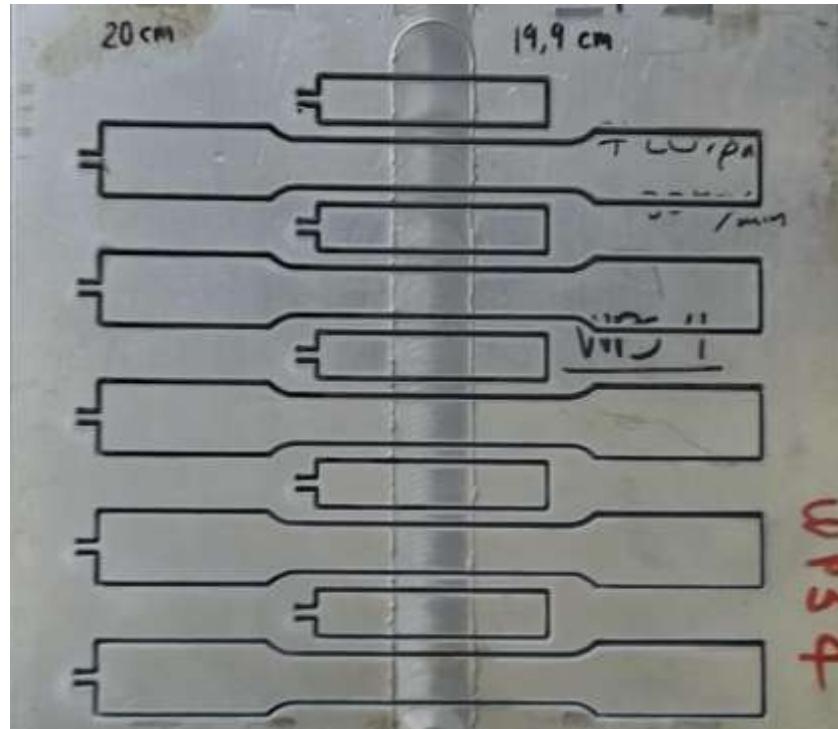


Para los ensayos de microdureza, se consideraron secciones transversales de las juntas soldadas, las cuales permitieron evaluar el perfil de dureza a través de las distintas zonas generadas por el proceso FSW.

La fabricación de todas las probetas se realizó mediante corte por chorro de agua, técnica seleccionada por su alta precisión dimensional y por evitar la generación de calor durante el proceso de corte. Esta condición permitió preservar las propiedades mecánicas del material y la integridad microestructural de las juntas soldadas, asegurando la confiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos. Las probetas obtenidas mediante este procedimiento se muestran en la Figura 29.

Figura 29

Probetas de tracción e impacto cortadas por chorro de agua



6.4.2 Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción se llevaron a cabo utilizando una máquina universal de ensayos, presentada en la Figura 30. Las condiciones del ensayo se definieron de acuerdo con la norma ASTM E8, la cual establece rangos específicos para la velocidad de deformación en función de la longitud de referencia de la probeta. Para las probetas ensayadas, la longitud de referencia fue de 40 mm, por lo que se seleccionó una velocidad de ensayo de 1,27 mm/min, valor que se encuentra dentro del rango permitido por la norma. Para cada tipo de junta se realizaron cinco ensayos de tracción, con el fin de asegurar la repetibilidad de los resultados y disponer de un conjunto de datos adecuado para el análisis estadístico.

Figura 30

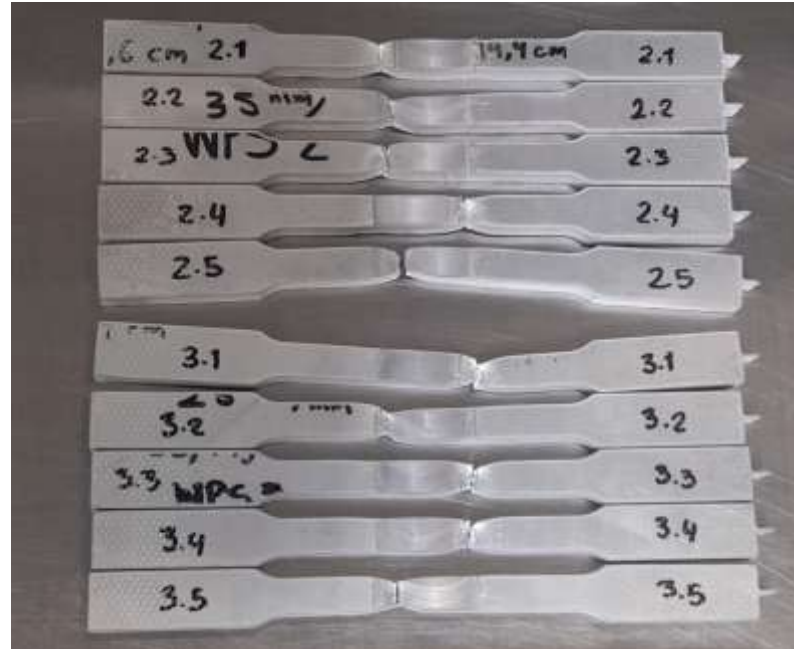
Maquina universal de ensayos de tracción



Durante los ensayos se registraron de manera continua los valores de fuerza y deformación (incluidos en el Apéndice B), los cuales se utilizaron posteriormente para obtener las curvas esfuerzo-deformación. A partir de estas curvas se determinaron las propiedades mecánicas características de las juntas soldadas, tales como el esfuerzo último, el esfuerzo de fluencia y el porcentaje de alargamiento. Las probetas después del ensayo de tracción se presentan en la Figura 31, mientras que el análisis detallado de los resultados se desarrolla en la sección 6.5 Resultados de la fase V.

Figura 31

Probetas de tracción después de los ensayos



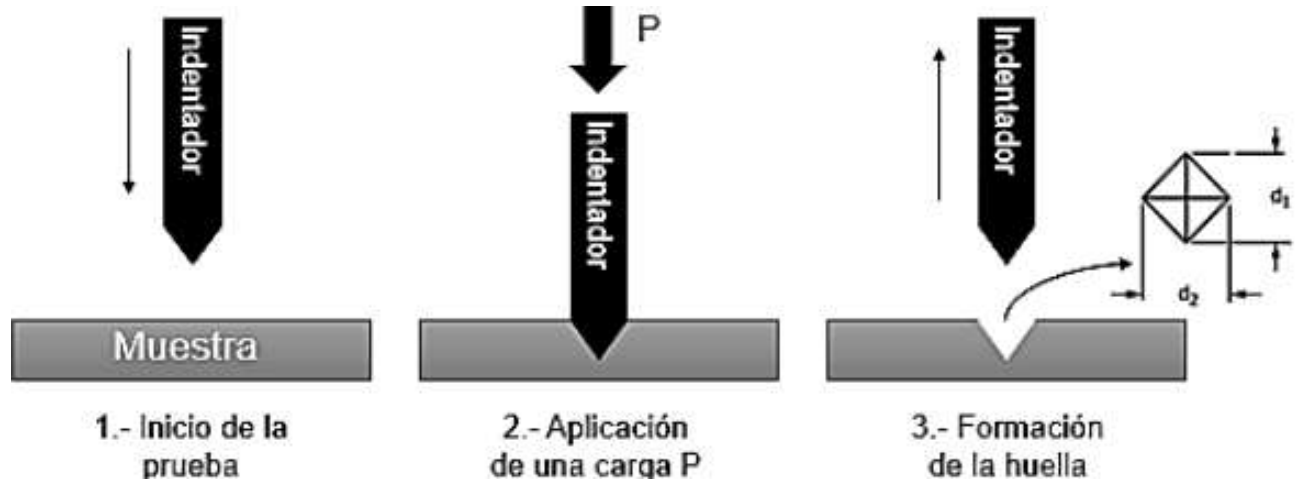
6.4.3 Ensayo de microdureza Vickers

Para la evaluación de la microdureza Vickers se realizaron cortes transversales de las juntas soldadas, los cuales se prepararon siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E384. La preparación superficial incluyó un proceso de pulido progresivo, iniciando con lija de grano 200 y finalizando con lija de grano 1200, con el fin de obtener una superficie plana y libre de imperfecciones que pudieran afectar la precisión de las mediciones.

Las mediciones de dureza se realizaron utilizando un durómetro Falcon 400G2, mostrado en la Figura 32. En cada indentación se aplicó una carga de 500 g durante 15 s, empleando un indentador de diamante tipo Vickers con geometría piramidal y un ángulo de 136°. Las diagonales de cada huella se midieron para el cálculo del valor de dureza correspondiente.

Figura 32*Durómetro Falcon 400G2*

El perfil de microdureza se conformó por 60 indentaciones distribuidas uniformemente a lo largo de la sección transversal de la junta, ubicadas a 3 mm por debajo de la superficie soldada y separadas 1 mm entre sí. Las mediciones se distribuyeron de manera simétrica respecto al centro de la junta, con 30 puntos a cada lado, permitiendo caracterizar las distintas zonas afectadas por el proceso FSW. El procedimiento seguido se ilustra en las Figura 33 y Figura 34. Los resultados obtenidos se presentan y analizan en la sección 6.5 Resultados de la fase V.

Figura 33*Procedimiento de indentación Vickers*

Nota. Tomado de ASTM International. (2011). E38, Standard test method for knoop and Vickers harness of materials.

Figura 34*Esquema del perfil de micro dureza Vickers de las juntas*

Nota. Adaptado de (Kumar, et al., 2018). Design of experiment study on hardness variations in friction stir welding of AM60 Mg alloy.

6.4.4 Ensayo de impacto

El comportamiento de las juntas soldadas frente a sollicitaciones dinámicas se evaluó mediante ensayos de impacto tipo Charpy, realizados de acuerdo con la norma ASTM E23. Este ensayo permitió determinar la energía absorbida por las juntas durante la fractura, proporcionando información relevante sobre la tenacidad del material soldado y el efecto del proceso FSW sobre su respuesta mecánica bajo cargas de impacto.

Las probetas de impacto se diseñaron y fabricaron conforme a las dimensiones establecidas por la norma, asegurando que la entalla quedara correctamente posicionada con respecto a la zona soldada, de manera que el ensayo evaluara directamente el comportamiento de la junta. Las probetas se obtuvieron a partir de las placas soldadas mediante corte por chorro de agua, garantizando la integridad del material y evitando alteraciones térmicas durante el proceso de fabricación.

El ensayo se llevó a cabo utilizando un péndulo Charpy, en el cual la probeta se colocó sobre apoyos rígidos y fue impactada por un martillo oscilante liberado desde una altura inicial conocida. Durante el ensayo, el martillo impactó la probeta en la zona de la entalla, provocando su fractura. La energía absorbida por la probeta se determinó a partir de la diferencia entre la altura inicial del péndulo antes del impacto y la altura alcanzada después de la fractura, de acuerdo con el principio de conservación de la energía establecido en la norma ASTM E23. En la Figura 35 se presenta la medición ejemplo del ensayo de impacto,

Figura 35

Registro de datos de impacto



Este procedimiento permitió cuantificar la energía absorbida por cada junta soldada, asociándola directamente con la capacidad del material para resistir cargas de impacto. Los valores obtenidos se utilizaron posteriormente para comparar el comportamiento de las diferentes combinaciones de parámetros de soldadura y analizar la influencia del proceso FSW sobre la tenacidad de las juntas. Los resultados se presentan en la siguiente sección.

6.5 Resultados de la fase V

En esta fase se realizó el tratamiento y análisis de los datos obtenidos en la fase anterior. El procesamiento de la información experimental permitió organizar los resultados provenientes de los ensayos mecánicos, determinar las propiedades mecánicas relevantes de las juntas soldadas y establecer comparaciones con el material base y con resultados reportados para otros procesos de soldadura. El desarrollo de esta fase se centró en la depuración de los datos experimentales, el

cálculo de parámetros mecánicos representativos y el análisis estadístico de los resultados, con el fin de evaluar el desempeño mecánico de las juntas soldadas.

Los resultados se presentan de manera estructurada, abordando inicialmente los ensayos de tracción, seguidos por el análisis de dureza y el comportamiento a impacto, para finalmente integrar una comparación global con procesos de soldadura convencionales y una síntesis técnica de los resultados obtenidos.

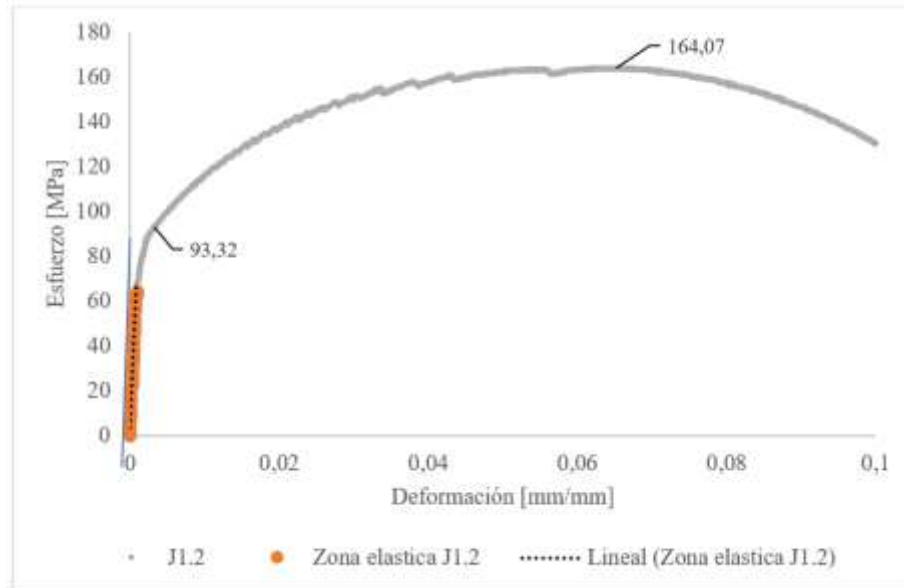
6.5.1 Resultados de los ensayos de tracción

A partir de los ensayos de tracción realizados se determinaron las propiedades mecánicas de las juntas soldadas y del material base, específicamente el límite elástico, la resistencia última a la tracción, el módulo de elasticidad y el porcentaje de alargamiento. Los cálculos correspondientes a estas propiedades se presentan en el Apéndice C, donde se incluyen los resultados obtenidos para las 45 probetas extraídas de las juntas soldadas y para las 5 probetas ensayadas del material base.

En la Figura 27 se presenta la curva esfuerzo–deformación correspondiente a la probeta 2 de la junta 1, la cual se utilizó como referencia para describir el comportamiento mecánico típico observado durante los ensayos. Esta curva permitió identificar las distintas etapas del comportamiento del material bajo carga, desde la región elástica inicial hasta la fractura.

Figura 36

Curva de esfuerzo - deformación



El límite elástico se determinó mediante el método de offset de compensación al 0,2 %, dado que en las curvas esfuerzo–deformación no se evidenció de forma clara un punto de transición definido entre los regímenes elástico y plástico. Para la probeta 2 de la junta 1(J2.1), el esfuerzo correspondiente al inicio de la deformación plástica permanente se estableció en 93,32 MPa.

La resistencia última a la tracción para la probeta J1.2 alcanzó un valor de 164,08 MPa, correspondiente al máximo esfuerzo registrado durante el ensayo. A partir de este punto se observó la disminución progresiva del esfuerzo asociada al inicio del proceso de fractura del material. El módulo de elasticidad se calculó a partir de la pendiente de la región lineal de la curva esfuerzo–deformación, correspondiente al comportamiento elástico del material. Este parámetro permitió caracterizar la rigidez de las juntas soldadas y compararla con la del material base.

En la Tabla 22 se resumen las propiedades mecánicas promedio obtenidas a partir de los ensayos de tracción para las nueve juntas soldadas, identificadas como J1 a J9, así como para el material base. En dicha tabla se reportan los valores promedio y la desviación estándar de la resistencia última a la tracción (S_{ut}), el límite elástico (S_y), el módulo de elasticidad (E) y el porcentaje de alargamiento. Los resultados muestran que el material base presentó los valores más altos de resistencia última a la tracción ($218,28 \pm 8,53$ MPa) y límite elástico ($175,46 \pm 9,24$ MPa), superando los valores obtenidos para todas las juntas soldadas. Asimismo, el material base exhibió un mayor porcentaje de alargamiento ($18,19 \pm 2,94$ %), lo que indica una mayor capacidad de deformación plástica antes de la fractura en comparación con las juntas soldadas.

Tabla 22

Propiedades mecánicas promedio obtenidas en los ensayos de tracción

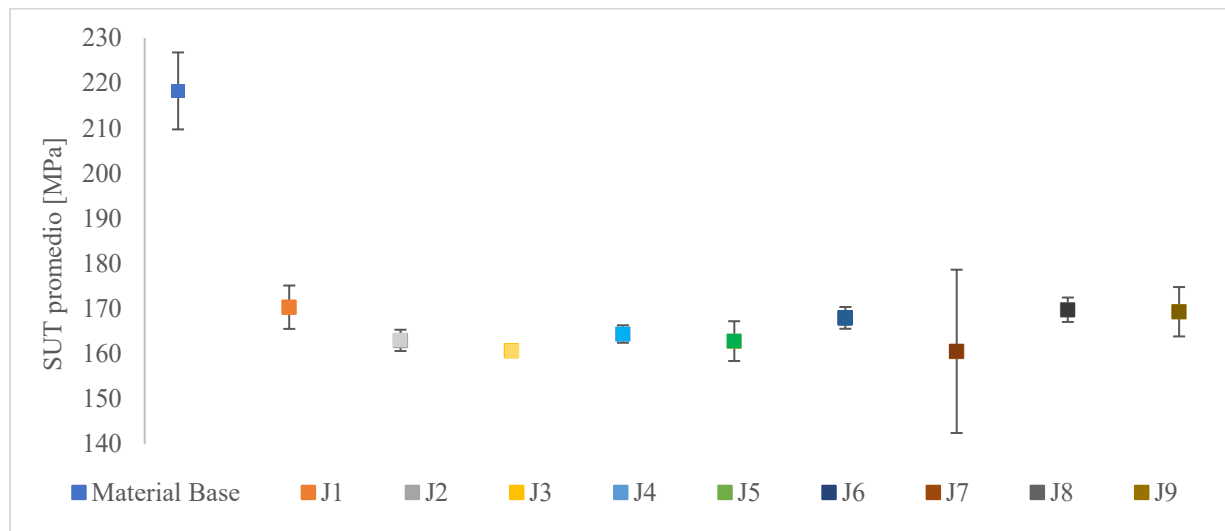
VR [RPM]	VA [mm/min]	S_{ut} [MPa]	S_y [MPa]	E [GPa]	%Alargamiento
Material base	Material base	$218,28 \pm 8,53$	$175,46 \pm 9,24$	$74,89 \pm 6,83$	$18,19 \pm 2,94$
620	30	$170,34 \pm 4,81$	$105,07 \pm 9,71$	$78,88 \pm 5,05$	$9,47 \pm 1,10$
620	35	$162,99 \pm 2,36$	$96,10 \pm 5,19$	$65,33 \pm 1,39$	$11,56 \pm 0,47$
620	25	$160,68 \pm 0,77$	$95,45 \pm 4,03$	$64,83 \pm 1,42$	$11,88 \pm 0,49$
720	30	$164,40 \pm 1,94$	$91,41 \pm 2,09$	$65,58 \pm 0,77$	$12,46 \pm 0,46$
720	35	$162,83 \pm 4,41$	$90,59 \pm 4,72$	$66,47 \pm 2,75$	$12,34 \pm 0,39$
720	25	$167,98 \pm 2,41$	$94,07 \pm 1,91$	$68,19 \pm 2,15$	$12,36 \pm 0,32$
520	30	$160,56 \pm 18,1$	$91,02 \pm 18,5$	$65,35 \pm 9,82$	$12,25 \pm 0,29$
520	35	$169,78 \pm 2,71$	$98,13 \pm 1,47$	$70,67 \pm 1,64$	$11,95 \pm 0,71$
520	25	$169,34 \pm 5,47$	$96,26 \pm 7,52$	$69,55 \pm 2,69$	$12,31 \pm 0,29$

Entre las juntas evaluadas, las configuraciones J1, J6 y J8 presentaron los valores más elevados de resistencia última a la tracción, alcanzando aproximadamente 170 MPa, aunque

permanecieron por debajo de los valores correspondientes al material base, como se observa en la Figura 37. Estos resultados evidencian que, si bien el proceso FSW permitió obtener juntas con una resistencia considerable, las propiedades mecánicas no alcanzaron las del material sin soldar.

Figura 37

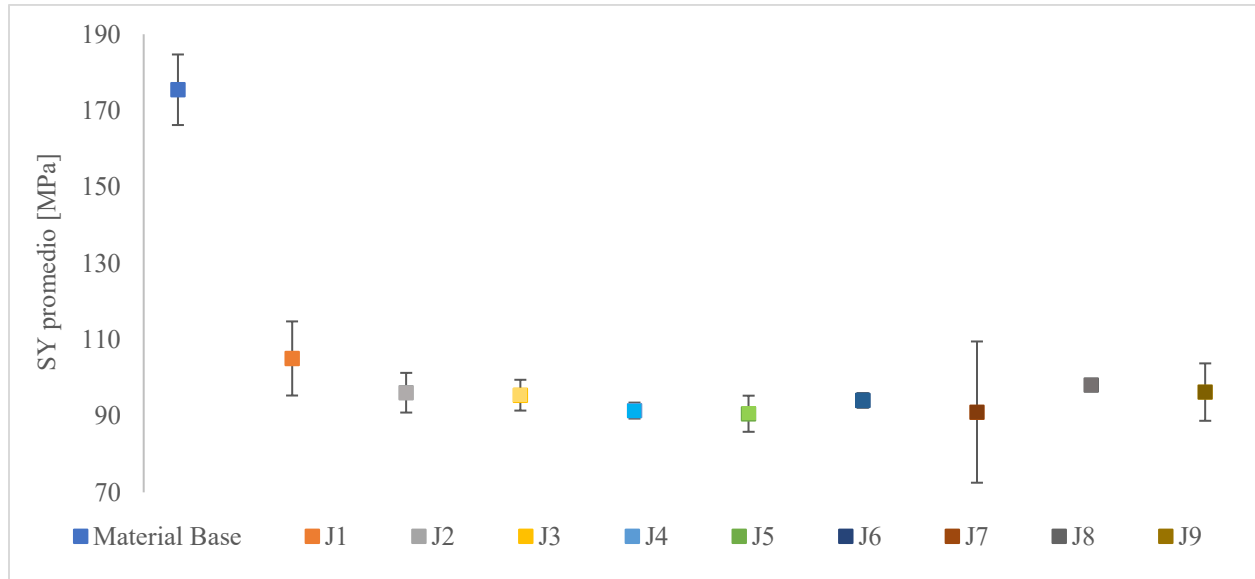
Diagrama de barras con intervalos de error para Sut



En cuanto al límite elástico, la Figura 38 muestra una reducción generalizada en las juntas soldadas respecto al material base. La junta J1 presentó el valor más alto de límite elástico ($105,07 \pm 9,71$ MPa), mientras que la junta J5 registró el valor más bajo ($90,59 \pm 4,73$ MPa). Este comportamiento se asocia a las modificaciones microestructurales inducidas por el ciclo térmico del proceso FSW, las cuales afectan la capacidad del material para resistir deformaciones elásticas.

Figura 38

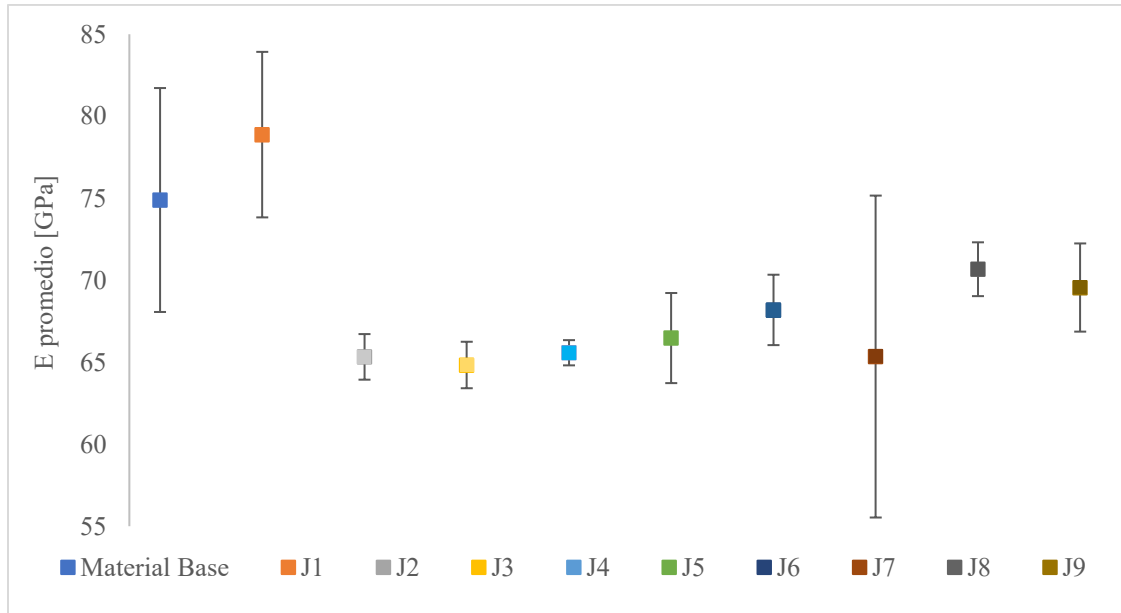
Diagrama de barras con intervalos de error para S_y



El módulo de elasticidad mostró una variación relativamente limitada entre las diferentes juntas soldadas, con valores comprendidos entre $64,83 \pm 1,42$ GPa y $78,88 \pm 5,05$ GPa, como se presenta en la Figura 39. Esta menor dispersión indica que la rigidez global del material se vio menos afectada por las condiciones de soldadura en comparación con la resistencia y el límite elástico. No obstante, el porcentaje de alargamiento evidenció una disminución significativa respecto al material base, con valores entre $9,47 \pm 1,10$ % y $12,46 \pm 0,46$ %, lo que refleja una reducción en la ductilidad de las juntas soldadas.

Figura 39

Diagrama de barras con intervalos de error para E



El análisis mediante diagramas de cajas y bigotes permitió evaluar la variabilidad de la resistencia última a la tracción y del límite elástico para las diferentes velocidades de rotación empleadas. En las Figura 40, Figura 41 y Figura 42 se observa que, a 520 RPM, los valores de resistencia última presentaron una dispersión reducida, indicando un comportamiento más homogéneo de las juntas soldadas. En contraste, a 620 RPM y 720 RPM se evidenció un incremento en la dispersión de los resultados y la presencia de valores atípicos, lo que sugiere una mayor variabilidad en las propiedades mecánicas bajo estas condiciones.

Figura 40

Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 520 RPM

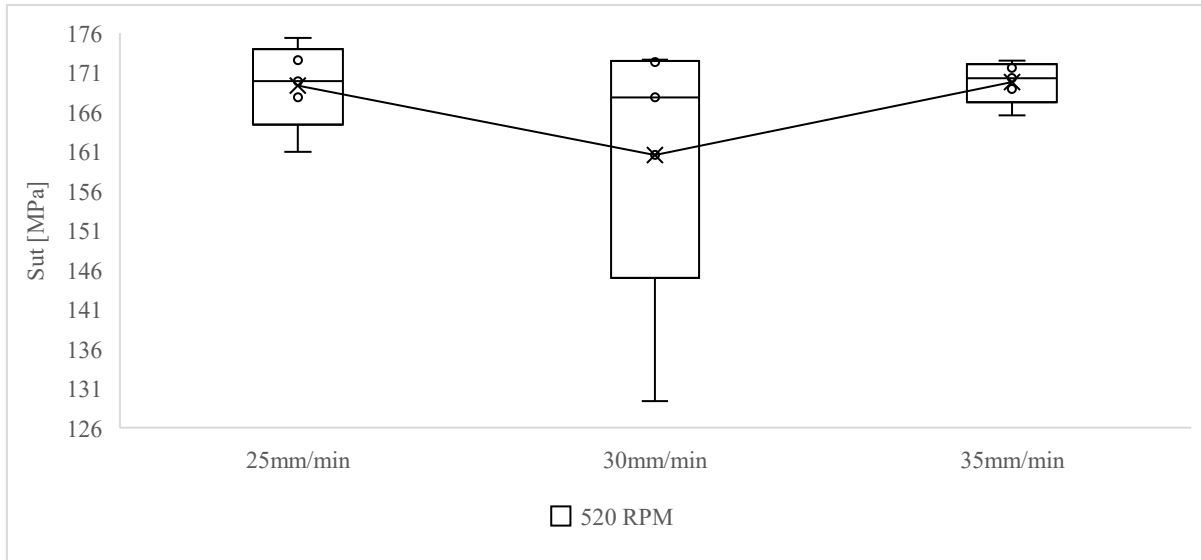


Figura 41

Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 620 RPM

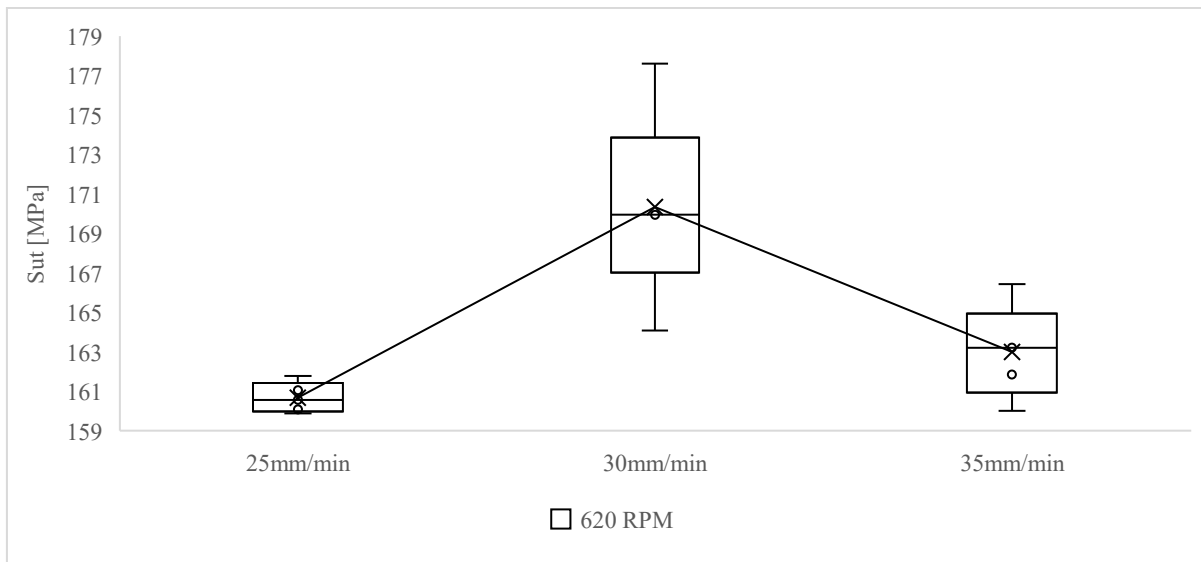
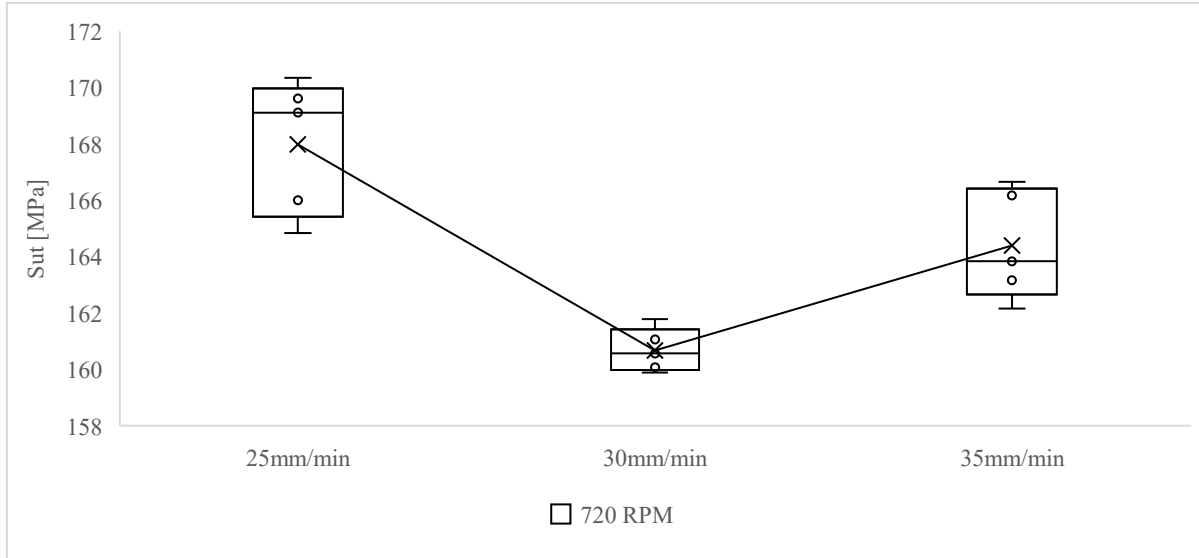


Figura 42

Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 720 RPM



De manera similar, las Figura 43 a Figura 45 muestran que el esfuerzo de fluencia presentó una menor variabilidad a 520 RPM, mientras que a velocidades de rotación más elevadas se observó un aumento progresivo de la dispersión. Estos resultados indican que el incremento de la velocidad de rotación influye de forma directa en la uniformidad de las propiedades mecánicas de las juntas soldadas, posiblemente asociado a variaciones térmicas en la zona de agitación y en la zona afectada por el calor. Como se menciona previamente, la velocidad de rotación determina la potencia consumida y por ende la cantidad de calor generado.

Figura 43

Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo a la fluencia para 520 RPM

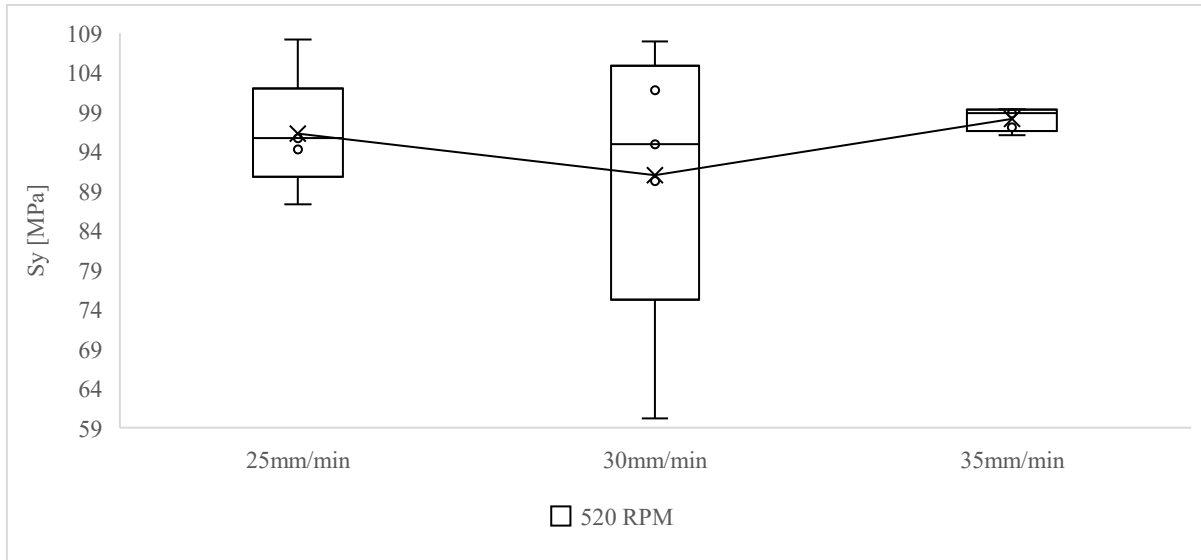


Figura 44

Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo a la fluencia para 620 RPM

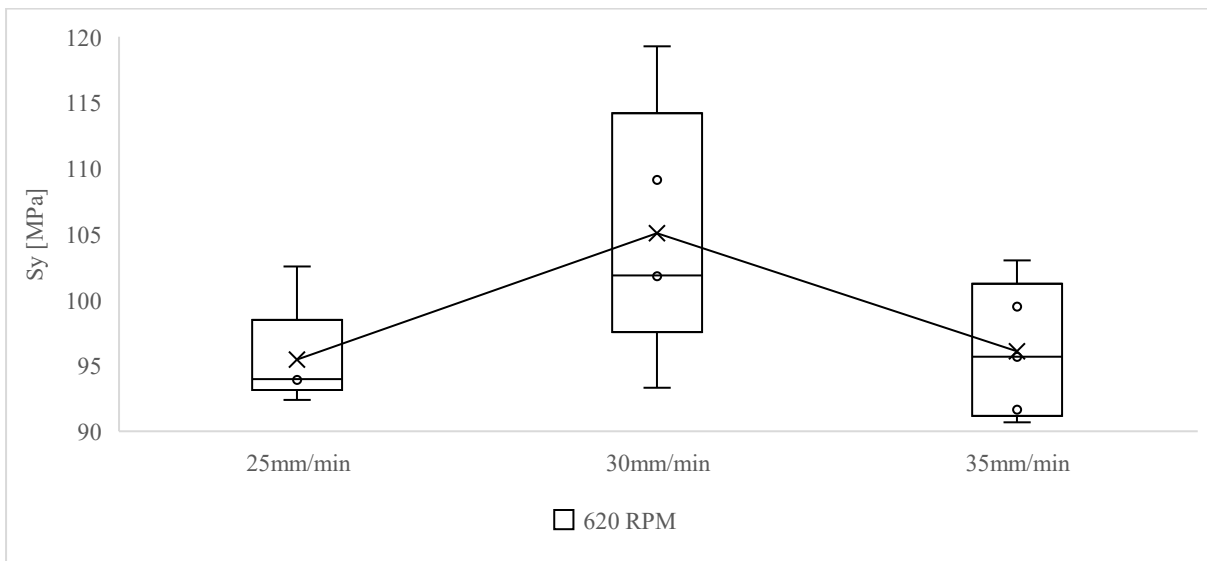
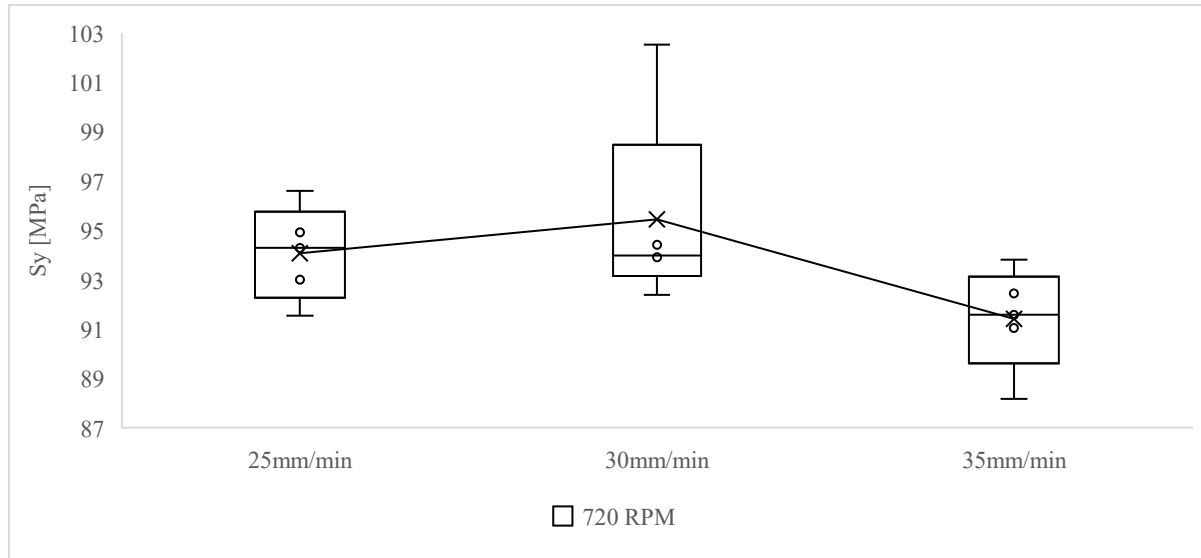


Figura 45

Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo a la fluencia para 720 RPM



En conjunto, los resultados de los ensayos de tracción evidencian que la velocidad de rotación constituye un parámetro determinante en el comportamiento mecánico de las juntas soldadas por FSW. Las condiciones de menor velocidad de rotación tendieron a generar resultados más consistentes y homogéneos, mientras que velocidades más altas incrementaron la variabilidad de las propiedades mecánicas, afectando principalmente la resistencia y el límite elástico de las juntas.

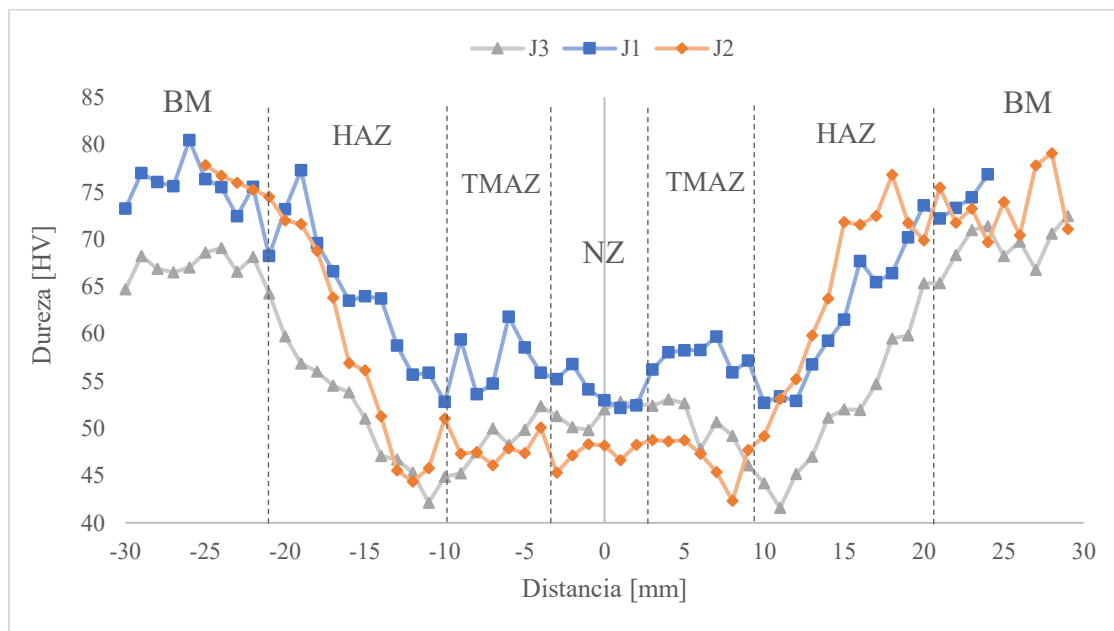
6.5.2 Resultados de los ensayos de dureza

En esta subsección se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de microdureza Vickers realizados sobre las secciones transversales de las juntas soldadas. Los perfiles de dureza se analizaron considerando las distintas zonas características del proceso FSW, identificadas como material base (BM), zona afectada por el calor (HAZ), zona termomecánicamente afectada (TMAZ) y zona de agitación (NZ).

Los perfiles de dureza correspondientes a una velocidad de rotación de 620 RPM y diferentes velocidades de avance se presentan en la Figura 46. En estas condiciones, la junta J1 exhibió valores de dureza más elevados y una mejor conservación de la dureza en la zona de agitación en comparación con las juntas J2 y J3, en las cuales se evidenció un mayor ablandamiento en la región central de la soldadura. Este comportamiento sugiere que, para esta velocidad de rotación, la velocidad de avance influyó en la magnitud del calor aportado y en la respuesta mecánica de la zona soldada.

Figura 46

Perfil de dureza para las juntas J1, J2 y J3

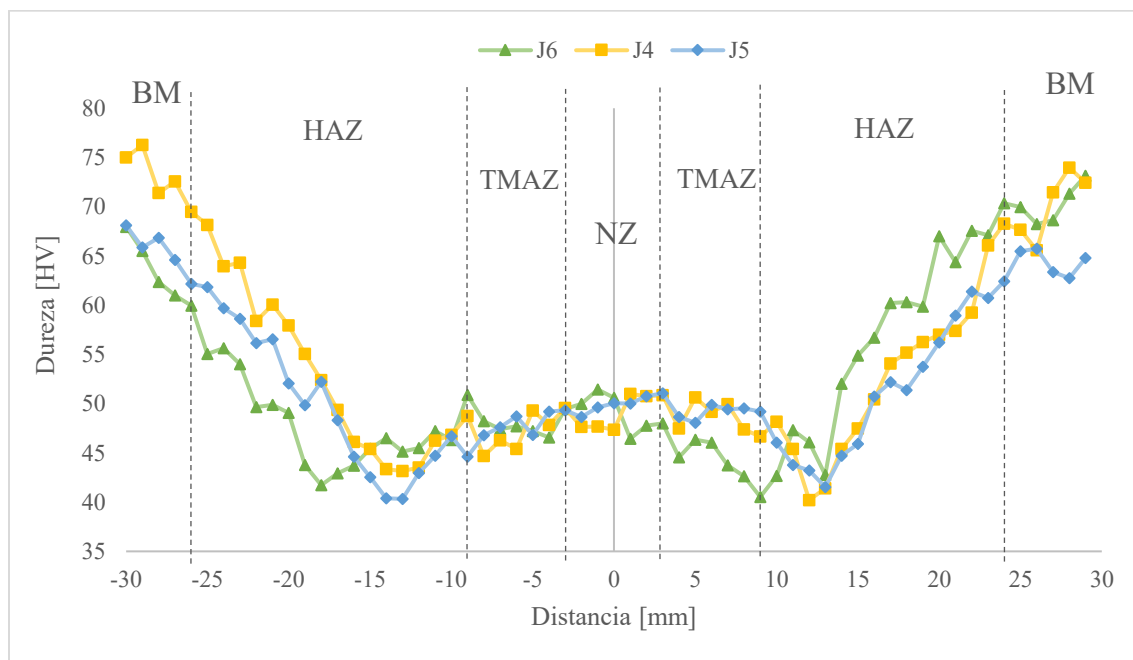


En la Figura 47 se muestran los perfiles de dureza correspondientes a las juntas J4, J5 y J6, soldadas a una velocidad de rotación de 720 RPM con diferentes velocidades de avance. En este caso, el incremento del calor generado por la mayor velocidad de rotación se reflejó en una disminución más pronunciada de la dureza en la zona afectada por el calor (HAZ). No obstante, la

distribución de dureza a lo largo de la zona soldada fue más uniforme en comparación con las condiciones evaluadas a menores velocidades de rotación, lo que indica un comportamiento más homogéneo del material en la región de la junta.

Figura 47

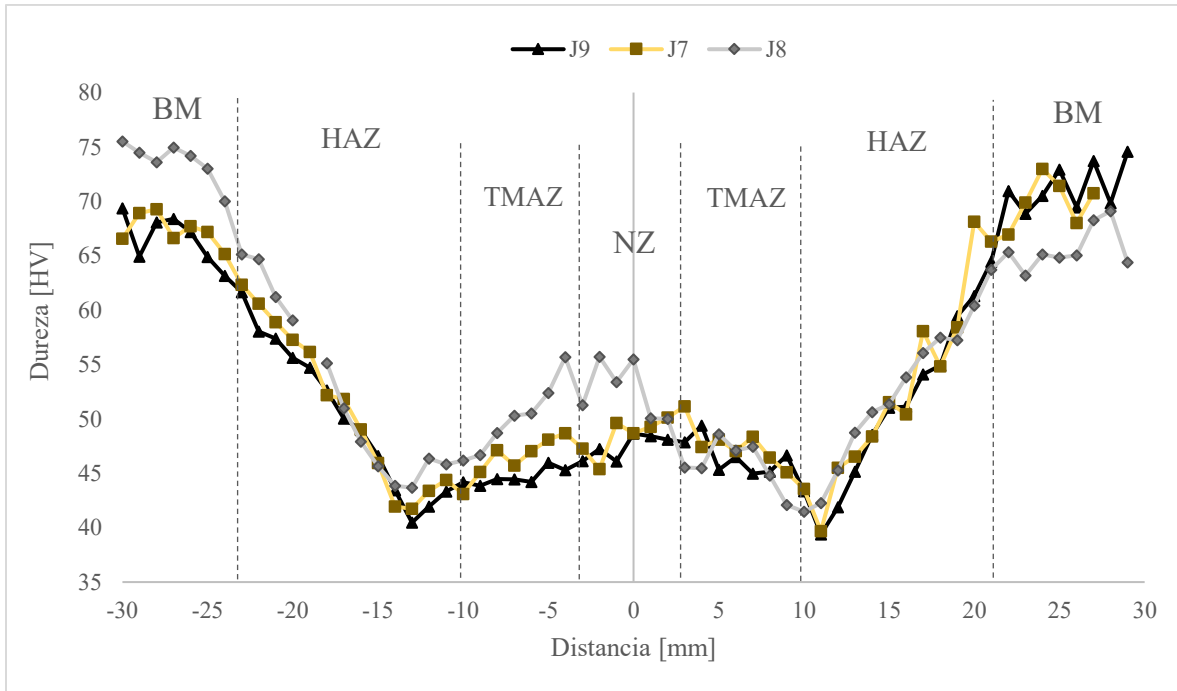
Perfil de dureza para las juntas J4, J5 y J6



Los perfiles de dureza correspondientes a las juntas J7, J8 y J9, soldadas a una velocidad de rotación de 520 RPM, se presentan en la Figura 48. En estas condiciones se observó una disminución de la dureza principalmente en la zona afectada por el calor, acompañada de una ligera recuperación en la zona central de la soldadura. Este comportamiento se asocia con la intensa deformación plástica y mezcla del material en la zona de agitación. Resultados similares han sido reportados en la bibliografía, donde se indica que la zona de agitación puede presentar valores de dureza ligeramente superiores a los de las regiones adyacentes debido al refinamiento de grano inducido por las altas deformaciones y temperaturas experimentadas durante el proceso FSW.

Figura 48

Perfil de dureza para las juntas J7, J8 y J9



En la Tabla 23 se presentan los valores promedio de dureza Vickers obtenidos en la zona de agitación (NZ) para cada una de las juntas soldadas, acompañados de su respectiva desviación estándar. Estos valores permiten cuantificar la variabilidad de la dureza bajo cada condición de soldadura y facilitan la comparación entre las diferentes combinaciones de velocidad de rotación y velocidad de avance empleadas.

Tabla 23

Dureza promedio de la zona de agitación NZ para cada junta soldada

Junta	VR [RPM]	VA [mm/min]	Dureza NZ [HV]
J1	620	30	54,85 ± 2,06
J2	620	35	47,92 ± 1,38
J3	620	25	51,82 ± 1,16
J4	720	30	48,90 ± 1,61
J5	720	35	49,69 ± 0,85

J6	720	25	48,31 ± 2,24
J7	520	30	48,61 ± 1,72
J8	520	35	51,39 ± 4,04
J9	520	25	47,46 ± 1,36

Finalmente, se observó que la fractura de las probetas durante los ensayos de tracción ocurrió predominantemente en la zona afectada por el calor (HAZ), región que presentó los valores más bajos de dureza en comparación con la zona de agitación y la zona termo-mecánicamente afectada. Esta disminución de la dureza en la HAZ se atribuye a los fenómenos de recristalización y crecimiento de grano inducidos por el ciclo térmico del proceso FSW.

6.5.3 Resultados de los ensayos de impacto

Los ensayos de impacto se realizaron con el propósito de evaluar la capacidad de absorción de energía de las juntas soldadas bajo condiciones de carga dinámica, mediante un péndulo Charpy conforme a la norma ASTM E-23. La energía absorbida durante el impacto se determinó a partir de la diferencia de altura alcanzada por el péndulo antes y después de la fractura de la probeta, y los valores obtenidos se expresaron en Joules (J).

Para cada junta soldada se ensayaron cinco probetas, registrándose la energía absorbida en cada impacto. A partir de estos resultados se calcularon los valores promedio y las desviaciones estándar, con el fin de analizar tanto la magnitud de la energía absorbida como la dispersión de los datos bajo cada condición de soldadura.

Los resultados evidenciaron que, en términos generales, las juntas soldadas presentaron un comportamiento predominantemente dúctil durante el ensayo de impacto, lo cual concuerda con los modos de fractura observados. No obstante, se identificaron diferencias apreciables en la

energía absorbida entre las distintas juntas, reflejando la influencia de los parámetros del proceso FSW sobre la respuesta mecánica frente a cargas dinámicas.

Las juntas J1 y J2 registraron valores promedio de energía absorbida de 37,56 J y 35,07 J, respectivamente, con desviaciones estándar cercanas a 8,54 J, lo que indica una variabilidad moderada en el comportamiento al impacto. En el caso de la junta J3 se observó una mayor dispersión de los resultados, con una desviación estándar de 14,91 J, asociada a un comportamiento menos homogéneo y a la presencia puntual de fractura frágil en una de las probetas ensayadas.

Las juntas J4, J5 y J6 presentaron valores promedio de energía absorbida comprendidos entre 29,23 J y 36,97 J. En particular, la junta J5 exhibió la menor dispersión de resultados, con una desviación estándar de 2,35 J, lo que evidencia un comportamiento más uniforme frente al impacto bajo esta condición de soldadura.

Por otra parte, la junta J7 alcanzó el mayor valor promedio de energía absorbida, con 42,97 J, lo que indica una mayor capacidad de absorción de energía antes de la fractura. Sin embargo, esta junta también presentó una desviación estándar relativamente elevada (8,93 J), lo que sugiere una mayor variabilidad entre probetas. Las juntas J8 y J9 registraron valores promedio de 30,51 J y 36,42 J, respectivamente, con dispersiones intermedias en comparación con las demás condiciones evaluadas. En la Tabla 24 se resumen los resultados promedios para cada junta.

Tabla 24

Energía absorbida promedio en el ensayo de impacto para las juntas soldadas

Junta	Energía absorbida promedio [J]	Desviación estándar [J]	Tipo de fractura predominante
J1	37,56	8,54	Dúctil
J2	35,07	8,54	Dúctil
J3	32,07	14,91	Dúctil / frágil puntual
J4	36,97	6,57	Dúctil

J5	29,23	2,35	Dúctil
J6	31,39	4,51	Dúctil
J7	42,97	8,93	Dúctil
J8	30,51	12,56	Dúctil (ruptura casi total)
J9	36,42	9,52	Dúctil

En conjunto, los resultados del ensayo de impacto indican que las juntas soldadas por FSW conservaron un comportamiento mayoritariamente dúctil, aunque con diferencias significativas en la energía absorbida y en la homogeneidad de los resultados. Estas variaciones se atribuyen a las condiciones térmicas y mecánicas impuestas por los parámetros del proceso de soldadura, los cuales influyen directamente en la microestructura y en la respuesta del material frente a cargas dinámica

6.5.4 Comparación numérica de propiedades mecánicas con otros procesos de soldadura

Los resultados de resistencia última a la tracción (Sut) obtenidos en esta investigación para juntas AA6061 soldadas por FSW se ubicaron en el rango aproximado de 160–170 MPa, valores inferiores al material base, pero consistentes con lo esperado para un proceso en estado sólido sin tratamiento térmico posterior. Estos resultados se compararon con estudios previos en AA6061 soldados mediante procesos por fusión y alta densidad de energía, en los cuales el aporte térmico y las transformaciones microestructurales difieren significativamente del FSW.

En soldadura por arco TIG (GTAW), (Bansal et al., 2021) reportaron valores de resistencia última que oscilan entre ≈ 105 MPa y ≈ 190 MPa, dependiendo de los parámetros de soldadura empleados. Este rango muestra que, bajo ciertas condiciones, las juntas TIG pueden alcanzar resistencias similares o ligeramente superiores a las obtenidas en este trabajo; sin embargo, también presentan valores claramente inferiores cuando el aporte térmico induce un ablandamiento

severo de la zona afectada por calor. En este sentido, los valores FSW obtenidos se sitúan en la parte media–alta del rango reportado para TIG, con la ventaja de una menor extensión de la HAZ.

Por otro lado, los procesos de soldadura láser (LBW) reportan valores significativamente más altos de resistencia mecánica. Estudios como los de (Ambriz et al., 2011) y trabajos posteriores sobre soldadura láser en AA6061 indican resistencias últimas comprendidas entre ≈ 270 MPa y ≈ 334 MPa, asociadas a un control preciso del aporte térmico y, en algunos casos, a la aplicación de tratamientos térmicos posteriores. En comparación directa, los valores obtenidos por FSW en este trabajo son inferiores a los alcanzados por soldadura láser optimizada; no obstante, deben interpretarse considerando que el proceso FSW no involucra fusión, no requiere metal de aporte ni etapas adicionales de posprocesamiento, lo cual representa una diferencia importante en términos de complejidad y costo del proceso. En la Tabla 25 se resume un ejemplo de comparación realizada frente a la propiedad de esfuerzo último.

Tabla 25

Comparación numérica de la resistencia última a la tracción (S_{ut}) en juntas AA6061 soldadas mediante diferentes técnicas

Técnica de soldadura	S_{ut} reportada [MPa]	Comparación	Porcentaje de variación
FSW (este trabajo)	160–170	Referencia base	-
TIG (GTAW)	≈ 105 –190	Comparable en rango medio–alto; mayor dispersión	- 11%
Soldadura láser (LBW)	≈ 270 –334	Significativamente superior; requiere mayor control térmico	83%
Soldadura láser (AA6061-T4/T6)	≈ 246 –333	Superior; usualmente con control energético avanzado	75%

Nota. Elaboración propia a partir de datos reportados en bibliografía

De la comparación numérica realizada se observa que las técnicas de soldadura que alcanzan mayores valores de resistencia mecánica en juntas de AA6061 corresponden, en general, a procesos con mayor densidad de energía o mayor aporte térmico efectivo, como la soldadura láser o procesos por fusión combinados con tratamientos térmicos posteriores. En estos casos, el incremento de la resistencia última a la tracción se asocia a un control más preciso de la solidificación y, en algunos estudios, a la recuperación parcial o total del estado de endurecimiento del material base. Sin embargo, este aumento en las propiedades mecánicas implica una mayor complejidad energética y operativa, así como la necesidad de equipos especializados y etapas adicionales de procesamiento.

En contraste, el proceso FSW empleado en esta investigación presentó valores de resistencia mecánica inferiores a los reportados para soldadura láser optimizada, pero comparables con los obtenidos mediante soldadura TIG bajo condiciones convencionales. Esta relación evidencia que el FSW permite alcanzar un compromiso adecuado entre desempeño mecánico y eficiencia del proceso, al conservar una fracción significativa de las propiedades del material base sin recurrir a la fusión del material ni a tratamientos térmicos posteriores.

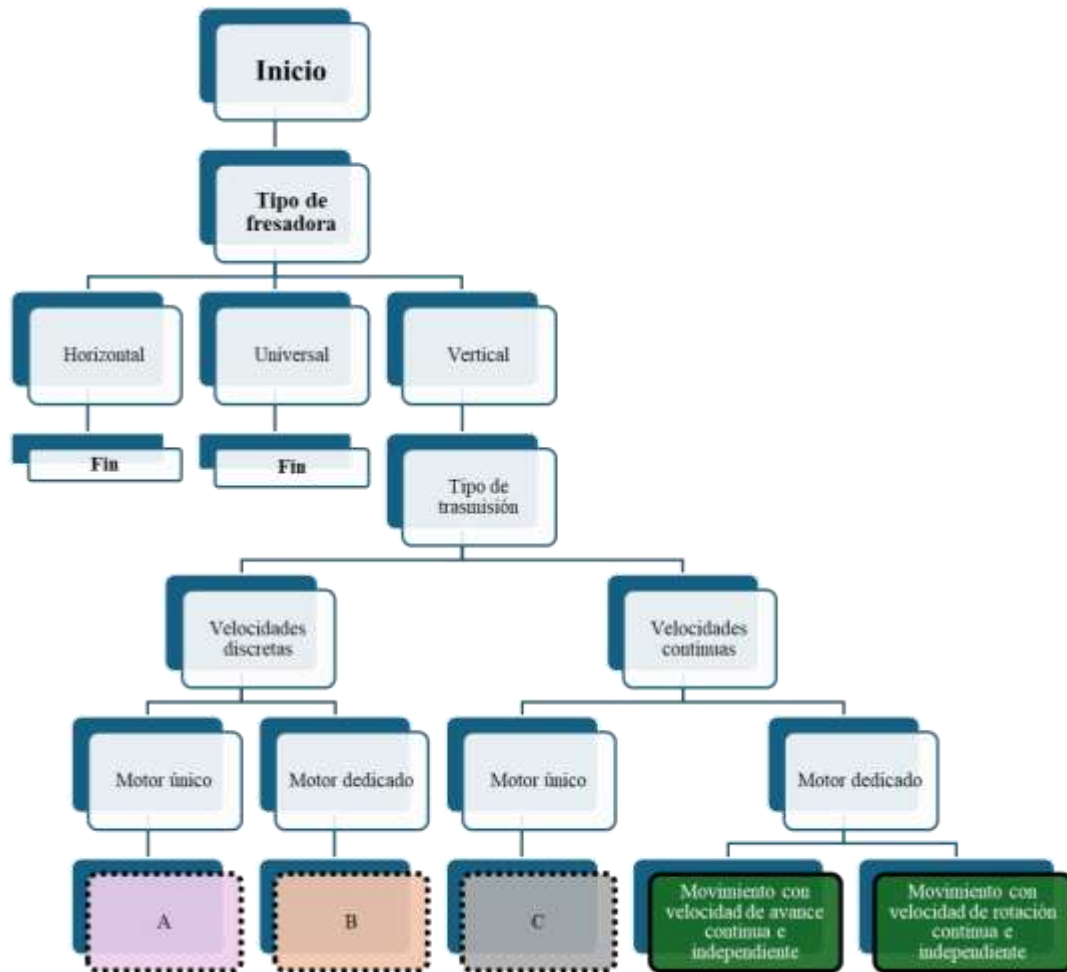
Por tanto, desde una perspectiva ingenieril, el incremento de las propiedades mecánicas reportado en la bibliografía para procesos de mayor aporte energético no puede interpretarse de forma aislada, sino en conjunto con el costo energético, la complejidad del proceso y la estabilidad operativa. Bajo este enfoque, los resultados obtenidos mediante FSW demuestran que el proceso constituye una alternativa técnicamente viable y competitiva para la unión de AA6061, especialmente cuando se prioriza la estabilidad del proceso, la reducción del aporte térmico y la simplicidad operativa frente a incrementos marginales en las propiedades mecánicas.

7. Algoritmo de adaptación de fresadoras convencionales para la ejecución del proceso

FSW

El objetivo del algoritmo de adaptación presentado en la Figura 49 es identificar si una fresadora convencional posee, de manera nativa o mediante modificaciones, la capacidad de operar el proceso FSW en configuración 1G (La herramienta suelda de forma perpendicular al cordón) bajo un rango suficientemente amplio de combinaciones de velocidad de rotación y velocidad de avance. Este rango operativo es un requisito fundamental, no solo para la formación inicial del cordón de soldadura, sino también para permitir ajustes posteriores orientados a la estabilización del proceso, la mitigación de defectos y la optimización de las propiedades mecánicas de la junta, así como se describió en la sección 3.2 Soldadura por fricción-agitación (FSW) de este documento.

En este sentido, el estado deseado del sistema, representado en color verde en la Figura 49, corresponde a una condición en la cual la fresadora dispone de movimiento con velocidad de avance continua e independiente y movimiento con velocidad de rotación continua e independiente. Esta configuración garantiza que ambos parámetros puedan ajustarse de forma desacoplada, permitiendo explorar combinaciones de operación sin que la modificación de uno de ellos limite directamente al otro. Desde el punto de vista del proceso FSW, este estado es el que ofrece mayor flexibilidad operativa y control térmico, al posibilitar la regulación fina de la generación de calor y del flujo de material durante la soldadura.

Figura 49*Algoritmo de adaptación de fresadora a FSW*

El algoritmo inicia con la identificación del tipo de fresadora (horizontal, universal o vertical). Para el alcance de esta investigación, únicamente las fresadoras verticales se consideran directamente compatibles con la ejecución del proceso FSW en configuración 1G, debido a su accesibilidad geométrica, facilidad de sujeción de las probetas y control de la penetración de la herramienta. Las fresadoras horizontales y universales quedan fuera del estado de aceptación inicial y requieren adaptaciones adicionales que no se incluyen dentro del presente estudio.

Una vez identificada una fresadora vertical, el algoritmo evalúa el tipo de transmisión, distinguiendo entre sistemas de velocidades discretas y velocidades continuas, ya que esta característica condiciona la forma en que se regulan los movimientos fundamentales del proceso FSW, particularmente la rotación del husillo y el avance de la mesa. En configuraciones con transmisión discreta, estos movimientos quedan determinados por relaciones cinemáticas fijas propias de trenes de engranajes o sistemas de correas y poleas de diámetro constante, mientras que en configuraciones de velocidad continua la regulación se logra mediante mecanismos de variación progresiva, como poleas de diámetro variable, de acuerdo con las relaciones de velocidad previamente descritas en la Ecuación 3 y Ecuación 4. Esta clasificación define el grado de libertad disponible para combinar velocidades de rotación y avance durante la soldadura y, en consecuencia, la capacidad de la fresadora para adaptarse al proceso FSW.

Las condiciones identificadas como A, B y C en la Figura 49 representan estados intermedios que no cumplen inicialmente con el estado aceptable de adaptación. Estas condiciones corresponden a combinaciones de transmisión y accionamiento en las que la variación de la velocidad de avance y de rotación se encuentra limitada, ya sea por la naturaleza discreta del sistema o por la distribución de potencia en un esquema de motor único. En estos casos, el algoritmo no descarta la fresadora, sino que define estas configuraciones como puntos de partida para la adaptación.

De esta manera, el propósito de las condiciones A, B y C no es describir estados finales de operación, sino establecer las rutas de transformación necesarias para alcanzar el estado aceptable de adaptación. Estas rutas de adaptación incluyen, según el caso, el desacoplamiento del avance del motor principal mediante la incorporación de un motor dedicado, la ampliación del rango de rotación a través de sistemas de regulación continua, o la combinación de ambas estrategias. Al

alcanzar el estado aceptado de adaptación, la fresadora queda habilitada para ejecutar el proceso FSW con la flexibilidad necesaria para ajustar parámetros, corregir defectos y optimizar el desempeño mecánico de las juntas soldadas.

Las Figura 50, Figura 51 y Figura 52 presentan el detalle de los sub-algoritmos de adaptación A, B y C, los cuales corresponden a diferentes configuraciones iniciales de fresadoras convencionales que no cumplen, de manera directa, con el estado objetivo de operación requerido para la ejecución del proceso FSW. Cada sub-algoritmo define una ruta de intervención mecánica y de control orientada a alcanzar el estado en el cual se dispone de velocidad de avance continua e independiente y velocidad de rotación continua e independiente, condición necesaria para garantizar flexibilidad operativa y control del proceso.

Figura 50

Sub-algoritmo A

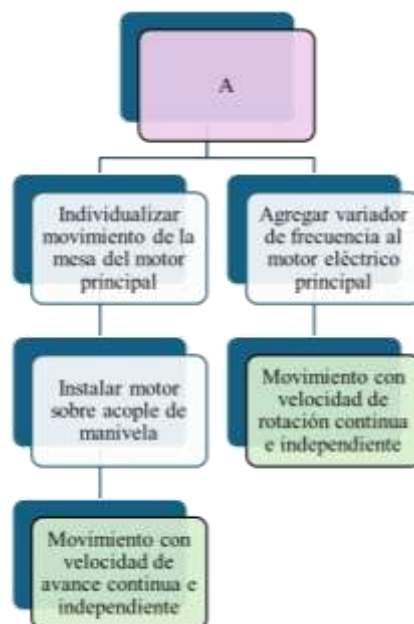


Figura 51

Sub-algoritmo B

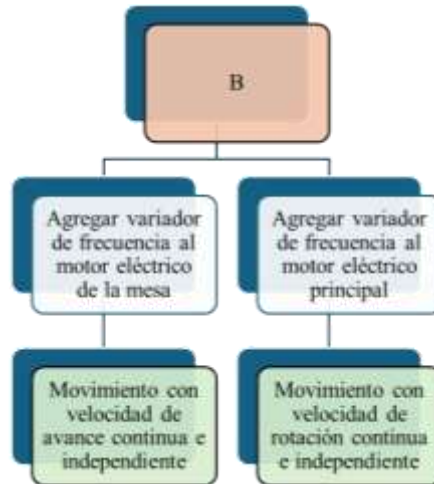
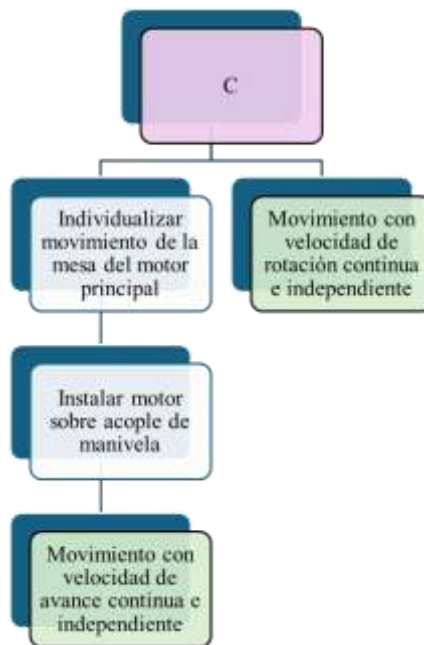


Figura 52

Sub-algoritmo C



Es importante resaltar que los sub-algoritmos descritos a continuación no modifican la geometría de la herramienta FSW ni los rangos de parámetros del proceso, los cuales fueron definidos previamente en los capítulos correspondientes al diseño de herramienta, definición de parámetros y ejecución experimental. En este sentido, los sub-algoritmos actúan exclusivamente sobre la capacidad cinemática y de accionamiento de la fresadora, permitiendo que los parámetros ya establecidos puedan ser aplicados, ajustados y optimizados de manera efectiva.

7.1 Sub-algoritmo A: Desacoplamiento del avance en fresadoras con motor único y velocidades discretas

El sub-algoritmo A corresponde a fresadoras verticales cuya configuración inicial presenta un motor único encargado simultáneamente de la rotación del husillo y del movimiento de avance de la mesa, junto con un sistema de velocidades discretas para la rotación. En esta condición, toda la potencia del motor principal se distribuye entre ambos movimientos, lo que limita la generación de calor y restringe la posibilidad de combinar parámetros de rotación y avance de forma independiente durante el proceso FSW.

La adaptación planteada en este sub-algoritmo consiste, en primer lugar, en individualizar el movimiento de la mesa respecto al motor principal. Para ello, se propone la instalación de un motor eléctrico sobre el acople de la manivela de avance, lo que permite accionar el desplazamiento de la mesa de forma independiente. Con esta intervención, el movimiento de avance pasa de ser dependiente y discreto a continuo e independiente, habilitando el ajuste fino de la velocidad de avance.

Adicionalmente, para superar la limitación impuesta por la rotación discreta del husillo, se incorpora un variador de frecuencia al motor eléctrico principal, lo que permite transformar la

velocidad de rotación en una variable continua. Como resultado de estas dos acciones, el sub-algoritmo A conduce al estado verde, en el cual la fresadora dispone de avance y rotación continuos e independientes, permitiendo aplicar los parámetros FSW definidos y realizar ajustes progresivos para estabilizar el cordón de soldadura.

7.2 Sub-algoritmo B: Conversión a control continuo en fresadoras con motores independientes

El sub-algoritmo B aplica a fresadoras verticales que, desde su configuración inicial, disponen de motor dedicado para el avance y motor principal para la rotación, pero que operan con velocidades discretas en uno o ambos movimientos. En este caso, aunque existe un desacoplamiento funcional entre avance y rotación, la capacidad de ajuste continuo de los parámetros se encuentra limitada por la naturaleza discreta del sistema de transmisión.

La estrategia de adaptación en este sub-algoritmo se basa en la incorporación de variadores de frecuencia tanto en el motor de avance como en el motor principal. La adición de estos dispositivos permite convertir ambos movimientos en variables continuas, manteniendo su independencia funcional. De esta forma, no se requiere intervenir mecánicamente el sistema de transmisión de la mesa, sino únicamente ampliar la capacidad de control de los motores existentes.

El resultado del sub-algoritmo B es una configuración plenamente compatible con el proceso FSW, en la cual la fresadora puede operar con combinaciones amplias de velocidad de rotación y velocidad de avance. Esta condición facilita la adaptación progresiva de los parámetros durante la ejecución del proceso, sin alterar la herramienta ni los criterios de selección de parámetros establecidos en los capítulos previos.

7.3 Sub-algoritmo C: Independización del avance en fresadoras con rotación continua

El sub-algoritmo C corresponde a fresadoras verticales que ya disponen de velocidad de rotación continua e independiente, pero cuyo movimiento de avance permanece acoplado al motor principal. En esta configuración, aunque la rotación del husillo puede ajustarse libremente, el avance de la mesa sigue estando condicionado por la cadena cinemática del motor principal, limitando la capacidad de optimización del proceso.

La adaptación definida en este sub-algoritmo consiste en individualizar el movimiento de la mesa mediante la instalación de un motor eléctrico sobre el acople de la manivela, de manera similar a lo planteado en el sub-algoritmo A. Esta intervención permite que el avance de la mesa se convierta en una variable continua e independiente, sin necesidad de modificar el sistema de rotación ya existente.

Con esta acción, la fresadora alcanza el estado favorable mostrado en la Figura 49, disponiendo de ambos movimientos —avance y rotación— con control continuo e independiente. Esta configuración resulta especialmente favorable para la ejecución del proceso FSW, ya que permite realizar ajustes finos del avance sin afectar la estabilidad térmica asociada a la rotación.

8. Conclusiones

Se desarrolló una metodología estructurada para la adaptación de fresadoras convencionales al proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW), demostrando que, mediante criterios mecánicos, cinemáticos y operativos claramente definidos, es posible ejecutar juntas soldadas de manera estable y reproducible sin recurrir a equipos dedicados. La metodología propuesta constituye una alternativa viable para la implementación del proceso FSW en entornos académicos e industriales con infraestructura convencional.

Se logró establecer un conjunto de parámetros de velocidad de rotación y velocidad de avance compatibles con las capacidades reales de las fresadoras convencionales analizadas, identificando las limitaciones impuestas por los sistemas de transmisión y accionamiento. La relación entre estos parámetros y la aparición de defectos permitió definir rangos operativos seguros que garantizan la generación de calor adecuada y la estabilidad del proceso.

Se implementó exitosamente un prototipo funcional basado en una fresadora convencional vertical, mediante adaptaciones orientadas a independizar los movimientos de rotación y avance, condición necesaria para la ejecución controlada del proceso FSW. Permitiendo desarrollar un proceso experimental de nueve combinaciones de velocidades con rangos entre 500 a 700 RPM de velocidad de rotación y 20 a 35 mm/min en velocidad de avance.

Las juntas soldadas obtenidas mediante el prototipo adaptado fueron caracterizadas a través de ensayos de tracción, dureza e impacto, evidenciando un comportamiento mecánico coherente con la bibliografía para procesos FSW en aleaciones de aluminio. Los resultados confirmaron que las adaptaciones realizadas permiten obtener uniones funcionales, con propiedades mecánicas consistentes y una distribución típica de zonas metalúrgicas del proceso.

El análisis comparativo mostró que las propiedades mecánicas obtenidas mediante el proceso FSW ejecutado en una fresadora convencional refleja ventajas del 11% frente al proceso GTAW y una disminución del 75 y 83% frente a procesos de soldadura laser y LBW respectivamente.

9. Recomendaciones

Se recomienda ampliar la metodología de adaptación propuesta a otros tipos de juntas y posiciones de soldadura, diferentes a la configuración 1G, con el fin de evaluar las adaptaciones adicionales requeridas en términos de rigidez estructural, control de carga axial y estabilidad del proceso FSW.

Se sugiere evaluar el desempeño de la metodología en otros materiales y aleaciones, particularmente aquellas con mayores requerimientos térmicos y mecánicos, con el objetivo de validar los límites operativos del prototipo adaptado y del algoritmo de selección de fresadora.

Se propone desarrollar un modelo predictivo de selección de parámetros, apoyado en técnicas de diseño de experimentos o aprendizaje automático, que permita optimizar la combinación de velocidad de rotación y velocidad de avance en función del material, espesor y configuración de la fresadora.

Referencias Bibliográficas

- 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*.
- Albannai, A. I. (2020). Review the common defects in friction stir welding. *Int. J. Sci. Technol. Res, 9*(11), 318–329.
- Amor Alcón, G., & others. (2018). *Evolución, Análisis y Estudio Comparativo de las Máquinas Herramienta (Torno y Fresadora) a lo largo de la Historia*.
- Arbegast, W. J. (2008). A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding. *Scripta Materialia, 58*(5), 372–376.
- Azimzadegan, T., & Serajzadeh, S. (2010). An investigation into microstructures and mechanical properties of AA7075-T6 during friction stir welding at relatively high rotational speeds. *Journal of Materials Engineering and Performance, 19*(9), 1256–1263.
- Balamurugan, S., Jayakumar, K., & Subbaiah, K. (2021). Influence of friction stir welding parameters on dissimilar joints AA6061-T6 and AA5052-H32. *Arabian Journal for Science and Engineering, 46*(12), 11985–11998.
- Banik, A., Saha Roy, B., Deb Barma, J., & Saha, S. C. (2018). An experimental investigation of torque and force generation for varying tool tilt angles and their effects on microstructure and mechanical properties: Friction stir welding of AA 6061-T6. *Journal of Manufacturing Processes, 31*, 395–404. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.030>
- Cámara de Comercio de Bucaramanga. (2024). *Actividad empresarial del sector industria manufacturera en Santander 2024*. https://www.camaradirecta.com/imagenes/vdo_conexion/cone_8bffb5e3ec2860f491140f5217738caf55c8989b.pdf

- Cavaliere, P., Squillace, A., & Panella, F. (2008). Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 200(1–3), 364–372.
- Choi, D.-H., Ahn, B.-W., Quesnel, D. J., & Jung, S.-B. (2013). Behavior of β phase (Al₃Mg₂) in AA 5083 during friction stir welding. *Intermetallics*, 35, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.12.004>
- Choi, W., Morrow, J. D., Pfefferkorn, F. E., & Zinn, M. R. (2018). Welding parameter maps to help select power and energy consumption of friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 33, 35–42.
- DANE. (2024). *Boletín técnico: Encuesta Anual Manufacturera EAM 2022*. <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/EAM/bol-EAM-2022.pdf>
- Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2007). Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 459(1–2), 7–18.
- Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Materials & Design*, 29(2), 362–373.
- Escobar-Muñoz, S., & Hoyos-Pulgarín, E. (2019). Obtención de juntas disímiles de la aleación de aluminio AA7075-T6 y polietileno de alta densidad (HDPE) empleando el proceso Friction Stir Welding (FSW). *Revista UIS Ingenierías*, 18(2), 103–111.
- Ghiasvand, A., Yavari, M. M., Tomków, J., Grimaldo Guerrero, J. W., Kheradmandan, H., Dorofeev, A., Memon, S., & Derazkola, H. A. (2021). Investigation of Mechanical and Microstructural Properties of Welded Specimens of AA6061-T6 Alloy with Friction Stir

- Welding and Parallel-Friction Stir Welding Methods. *Materials*, 14(20).
<https://doi.org/10.3390/ma14206003>
- González Bustos, M., Trespacios Fritz, G., & Walteros Rodríguez, O. (2020). *Estudio descriptivo de los diferentes procesos de soldadura utilizados en Colombia y el manejo de sus residuos*. <http://hdl.handle.net/10882/9899>
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas* (3rd ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Hasieber, M., & others. (2022). A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding. *Welding in the World*, 67, 325–339.
- Hoyos, E., & Serna, M. C. (2021). Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. *Metals*, 11.
- Huaracán Pichún, C. A. (2018). *Factibilidad técnica de realizar soldadura por fricción-agitación (FSW) en cobre puro, para centro de mecanizado CNC, CCHEN*.
- Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (5th ed.). Pearson Educación.
- Kumar, R., & Ghosh, A. (2014). Emerging friction stir welding for aluminium and its applications. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, 14(1–2), 1–5.
- Li, dan W. Y., Fu, T., & Yang, X. W. (2014). Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro-and Microstructure, Property, and Process Modelling. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014(1), 697170.
- Lohwasser, D., & Chen, Z. (2009). *Friction stir welding: From basics to applications*. Elsevier.
- Mastanaiah, P., Madhusudhan Reddy, G., & Sharma, A. (2021). Chapter 6 - Evolution and current practices in friction stir welding tool design. In J. Paulo Davim, K. Gupta, K. Gupta, & J.

- Paulo Davim (Eds.), *Advanced Welding and Deforming* (pp. 151–177). Elsevier.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822049-8.00006-2>
- Mishra, A., Tiwari, A., Shukla, M. K., & Rose, A. R. (2018). Analysis of tools used in friction stir welding process. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 8(6), 1519–1524.
- Mishra, R. S., De, P. S., & Kumar, N. (2014a). Friction stir processing. In *Friction stir welding and processing: science and engineering* (pp. 259–296). Springer.
- Mishra, R. S., De, P. S., & Kumar, N. (2014b). *Friction Stir Welding and Processing Science and Engineering* (1st ed.). Springer. <https://doi.org/https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1007/978-3-319-07043-8>
- ONU DI. (2022). *Informe Anual de la ONU DI 2021*. https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2023-02/UNIDO_AR2021_SP.pdf
- Parkhe, M. S. S., & Dhende, G. S. (2020). *To study the effect of different tool profiles on aluminium AA3103 by friction stir welding*.
- Raturi, M., Garg, A., & Bhattacharya, A. (2019). Joint strength and failure studies of dissimilar AA6061-AA7075 friction stir welds: Effects of tool pin, process parameters and preheating. *Engineering Failure Analysis*, 96, 570–588.
- Romero Díaz, Á. S., & Rincón Medina, J. S. (2020). *Inspección visual de uniones soldadas de aluminio 6063-t6 mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación (fsw)*.
- Sachinkumar, Chakradhar, D., & Narendranath, S. (2021). Analysis of the effect of friction stir welding parameters on characteristics of AA6061 composites using response surface methodology. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(6), 1303–1319.

- Salas, C. J. O. (2024). *Diseño De Una Maquina Fresadora De 3 Ejes Para Uso Particular*. Escuela de Ingenier^ía y Arquitectura, Universidad de Zaragoza.
- Swetha, S., & Padhy, C. (2023). Tool pin profiles effect on mechanical properties of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*.
- TWI-Global. (2021, January 21). *TWI supports first industrial application of FSW in Colombia*. <https://www.twi-global.com/media-and-events/press-releases/2021/twi-supports-first-industrial-application-of-fsw-in-colombia>.
- Verma, S., & Kumar, V. (2021). Optimization of friction stir welding parameters of dissimilar aluminium alloys 6061 and 5083 by using response surface methodology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(23), 7009–7020.
- Zettler, R., Lomolino, S., Dos Santos, J. F., Donath, T., Beckmann, F., Lippman, T., & Lohwasser, D. (2005). Effect of tool geometry and process parameters on material flow in FSW of an AA 2024-T351 alloy. *Welding in the World*, 49(3), 41–46.