

ANÁLISIS DE DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN Y  
AGITACIÓN PARA EL PROCESO DE SOLDADURA DE ALUMINIO EN UNA  
FRESADORA

KEVIN SANTIAGO BURITICA FERNANDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA

2025

ANÁLISIS DE DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN Y  
AGITACIÓN PARA EL PROCESO DE SOLDADURA DE ALUMINIO EN UNA  
FRESADORA

KEVIN SANTIAGO BURITICA FERNANDEZ

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Mecánico

Director

ISNARDO GONZALEZ JAIMES

Ingeniero mecánico

Codirector

ROBIN ALEXIS CRISTANCHO PERILLA

Ingeniero mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA

2025

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1. EL PROBLEMA DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN Y AGITACIÓN .....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. MARCO REFERENCIAL .....	17
4. MARCO TEÓRICO .....	23
4.1. DISEÑO DE EXPERIMENTO .....	23
4.1.1. Elementos del diseño de experimento .....	23
4.1.2. Diseño de experimento factorial.....	25
4.1.2.1. Diseño factorial 2k .....	25
4.1.2.2. Diseño factorial 3k .....	25
4.1.2.3. Diseños factorial fraccionado 2k-p .....	25
4.2. SOLDADURA FSW.....	26
4.2.1. Proceso de soldadura .....	26
4.2.2. Zona de soldadura .....	26
4.3. HERRAMIENTA FSW .....	27
4.3.1. Cuerpo .....	28
4.3.2. Hombro .....	28
4.3.3. Pin.....	28
4.4. FABRICACION HERRAMIENTA.....	29
4.4.1. Mecanizado .....	29
4.4.2. Temple .....	30
4.5. VIDA UTIL HERRAMIENTA .....	31
4.5.1. Falla herramienta .....	31
4.5.2. Modelo de Archard.....	32

4.6. MAQUINA DE TRABAJO .....	32
4.6.1. Fresadora FU250X1000 .....	33
4.7. SOFTWARE DE APOYO .....	34
4.7.1. SolidWorks.....	34
4.7.2. Minitab .....	34
4.8. EQUIPOS DE MEDICIÓN.....	34
4.8.1. Durómetro Falcon 400G2 .....	34
4.9. NORMA ASTM E384-22 .....	35
5. DEFINICIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO.....	36
5.1. VARIABLES CONTROLADAS .....	36
5.2. NIVELES.....	41
5.2.1. Niveles de velocidades .....	41
5.2.2. Niveles de geometría pin .....	43
5.3. VARIABLE DE RESPUESTA .....	44
5.4. FACTORES DE BLOQUE.....	44
5.5. ALTERNATIVAS.....	45
5.6. CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	45
5.7. ELECCIÓN Y DETALLE DE ALTERNATIVA .....	46
6. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA HERRAMIENTA.....	48
6.1. METODOLOGIA DE DISEÑO.....	48
6.2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO .....	48
6.2.1. Criterios del cuerpo.....	48
6.2.2. Criterios del hombro.....	48
6.2.3. Criterios del pin .....	49
6.3. DIMENSIONAMIENTO .....	50
6.4. MATERIAL .....	56
6.5. FABRICACIÓN .....	56
6.6. EVALUACION .....	62

6.7. DISEÑO DE DETALLE .....	64
7. EVALUACIÓN DE DESGASTE DE LA HERRAMIENTA.....	66
7.1. METODOLOGÍA DE DESGASTE .....	66
7.2. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN.....	68
7.3. REGISTRO DE RESULTADOS .....	69
7.4. VOLUMEN DESGASTADO.....	75
7.5. ANÁLISIS FACTORIAL .....	77
7.6. VIDA UTIL HERRAMIENTA .....	82
7.7. COSTOS DEL EXPERIMENTO .....	86
8. CONCLUSIONES .....	87
9. RECOMENDACIONES.....	89
BIBLIOGRAFIA.....	90
ANEXOS	

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Documento investigado uno .....	17
Tabla 2. Documento investigado dos .....	18
Tabla 3. Documento investigado tres .....	18
Tabla 4. Documento investigado cuatro .....	19
Tabla 5. Documento investigado cinco.....	20
Tabla 6. Documento investigado seis .....	21
Tabla 7. Documento investigado siete .....	21
Tabla 8. Conceptos DOE .....	24
Tabla 9. Etapas DOE .....	24
Tabla 10. Mecanismo de falla .....	31
Tabla 11. Artículos analizados.....	36
Tabla 12. Registro de parámetros .....	39
Tabla 13. Revisión de velocidades.....	41
Tabla 14. Registro del perfil del pin.....	44
Tabla 15. Definición de niveles .....	44
Tabla 16. Definición alternativas del DOE.....	45
Tabla 17. Selección del DOE .....	46
Tabla 18. Definición de tratamientos .....	46
Tabla 19. Ecuaciones dimensionamiento de hombro y pin .....	50
Tabla 20. Recopilación de información de diámetros del pin .....	51
Tabla 21. Relación de ángulos para pin cónico.....	52
Tabla 22. Comparación de dimensionamiento hombro y pin .....	53
Tabla 23. Dimensiones de la herramienta.....	55
Tabla 24. Composición química acero 1.2344 EFS .....	56
Tabla 25. Coeficiente expansión térmica acero 1.2344 EFS.....	56
Tabla 26. Hoja de ruta fabricación herramienta pin liso .....	57

Tabla 27. Hoja de ruta fabricación herramienta pin roscado .....	57
Tabla 28. Microdureza temple pin cónico liso .....	60
Tabla 29. Microdureza temple pin cónico roscado .....	60
Tabla 30. Orden realización tratamientos.....	67
Tabla 31. Niveles .....	69
Tabla 32. Tratamientos.....	69
Tabla 33. Resultados .....	70
Tabla 34. Variación dureza herramienta pin liso .....	71
Tabla 35. Variación dureza herramienta pin roscado .....	72
Tabla 36. Recopilación de información de fuerza axial .....	75
Tabla 37. Coeficientes de desgaste .....	76
Tabla 38. Volumen desgastado herramienta pin liso.....	76
Tabla 39. Volumen desgastado herramienta pin roscado .....	77
Tabla 40. Hipótesis del DOE .....	78
Tabla 41. ANOVA .....	79
Tabla 42. Evaluación de hipótesis del DOE .....	81
Tabla 43. Disminución de dureza.....	82
Tabla 44. Costos del experimento.....	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Soldadura por fricción y agitación (FSW) .....	14
Figura 2. Modelo general de un DOE .....	23
Figura 3. Representación plano diseño factorial $2^3$ .....	25
Figura 4. Diagrama de proceso de soldadura FSW .....	26
Figura 5. Corte transversal zona de soldadura .....	27
Figura 6. Herramienta FSW .....	27
Figura 7. Tipos de hombro .....	28
Figura 8. Tipos de pin .....	29
Figura 9. Torno MOMAC .....	30
Figura 10. Diagrama de tratamientos térmicos .....	30
Figura 11. Desgaste de la herramienta .....	32
Figura 12. Fresadora FU250X1000 .....	33
Figura 13. Especificaciones fresadora FU250X1000 .....	33
Figura 14. Componentes fresadora FU250X1000 .....	34
Figura 15. Durómetro Falcon 400G2 .....	35
Figura 16. Relación ángulo y diámetro .....	52
Figura 17. Cono portaherramientas BT40-ER32-70 .....	54
Figura 18. Dimensionamiento de longitud cuerpo.....	55
Figura 19. Herramientas .....	58
Figura 20. Diagrama TTT material herramienta .....	58
Figura 21. Elementos de protección y mufla D8 .....	59
Figura 22. Distribución de muescas para dureza.....	61
Figura 23. Distancia mínima entre muescas.....	61
Figura 24. Muesca desde microscopio (X10).....	61
Figura 25. Herramientas después del temple .....	62
Figura 26. Soldadura FSW con la herramienta.....	63

Figura 27. Plano herramienta pin liso .....	64
Figura 28. Plano herramienta pin roscado .....	65
Figura 29. Plano laminas .....	66
Figura 30. Montaje laminas.....	67
Figura 31. Medición dureza .....	68
Figura 32. Desgaste herramienta pin cónico roscado.....	73
Figura 33. Placas soldadas.....	73
Figura 34. Longitud vs dureza herramienta pin liso DOE.....	74
Figura 35. Longitud vs dureza herramienta pin roscado DOE .....	74
Figura 36. Información del factor .....	78
Figura 37. Resumen del modelo.....	79
Figura 38. Diagrama de Pareto.....	80
Figura 39. Grafica de efectos principales.....	81
Figura 40. Relación de tendencia herramienta pin liso .....	83
Figura 41. Relación de tendencia herramienta pin roscado.....	84

## LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos)

Anexo A. Ficha técnica Fresadora FU250X1000

Anexo B. Certificación material lamina

Anexo C. Ficha técnica cono portaherramientas

Anexo D. Cédula material herramienta

Anexo E. Análisis de esfuerzos de la herramienta

Anexo F. Tabla de diseño

## RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN Y AGITACIÓN PARA EL PROCESO DE SOLDADURA DE ALUMINIO EN UNA FRESADORA\*

AUTOR: KEVIN SANTIAGO BURITICA FERNANDEZ\*\*

PALABRAS CLAVE: SOLDADURA POR FRICCIÓN Y AGITACIÓN, HERRAMIENTA, DESGASTE

DESCRIPCIÓN: El presente proyecto titulado “Análisis de desgaste de la herramienta de soldadura por fricción y agitación para el proceso de soldadura de aluminio en una fresadora” tiene como objetivo principal estudiar el comportamiento del desgaste en herramientas FSW utilizadas para unir láminas de aluminio, específicamente mediante la implementación de un diseño experimental que considere la influencia de distintos parámetros de soldadura y geometrías del pin. Para tal fin, se propone la formulación de un diseño de experimento factorial que contemple las variables críticas del proceso, como la velocidad de avance, la velocidad de rotación de la herramienta y la forma geométrica del pin. Este enfoque permitirá establecer relaciones significativas entre estas variables y el nivel de desgaste observado en cada configuración.

Se procederá al diseño y construcción de herramientas con diferentes geometrías de pin, incluyendo perfiles cónicos, que serán utilizadas bajo condiciones controladas de soldadura. Posteriormente, se evaluará el desgaste acumulado mediante la medición de la dureza del acero H13, material con el que se fabrican las herramientas, aplicando la norma ASTM E384-22. Estas mediciones se relacionarán con la longitud soldada, permitiendo determinar la tasa de desgaste y, en consecuencia, estimar la vida útil de cada configuración de herramienta. Con estos resultados se espera aportar información técnica valiosa para el diseño eficiente de herramientas FSW, controlando su durabilidad y rendimiento en aplicaciones industriales como en el sector automotriz o naval.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Programa académico. Director: Isnardo González Jaimes. Ingeniero mecánico. Robin Alexis Cristancho Perilla. Ingeniero mecánico

## ABSTRACT

TITLE: FRICTION STIR WELDING TOOL WEAR ANALYSIS FOR ALUMINUM WELDING PROCESS ON A MILLING MACHINE\*

AUTHOR: KEVIN SANTIAGO BURITICA FERNANDEZ\*\*

KEY WORDS: FRICTION STIR WELDING, TOOL, WEAR

DESCRIPTION: The main objective of this project, entitled "Wear Analysis of Friction Stir Welding Tools for the Aluminum Welding Process on a Milling Machine," is to study the wear behavior of FSW tools used to join aluminum sheets, specifically by implementing an experimental design that considers the influence of different welding parameters and pin geometries. For this purpose, a factorial experimental design is proposed that considers critical process variables, such as feed rate, tool rotation speed, and pin geometry. This approach will allow for establishing meaningful relationships between these variables and the level of wear observed in each configuration.

Tools with different pin geometries, including tapered profiles, will be designed and built and used under controlled welding conditions. Subsequently, accumulated wear will be assessed by measuring the hardness of H13 steel, the material from which the tools are manufactured, using the ASTM E384-22 standard. These measurements will be related to the welded length, allowing the wear rate to be determined and, consequently, the tool life of each tool configuration to be estimated. These results are expected to provide valuable technical information for the efficient design of Friction Stir Welding tools, monitoring tool durability and performance in industrial applications such as the automotive or naval sectors.

---

\*Degree work

\*\*Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Academic Program. Director: Isnardo González Jaimes. Mechanical Engineer. Robin Alexis Cristancho Perilla. Mechanical Engineer

## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de fabricación de soldadura han experimentado una evolución significativa en las últimas décadas, impulsada por la búsqueda continua de mejoras en la eficiencia, la calidad y la rentabilidad en la industria. Entre estos avances, la soldadura por fricción y agitación (FSW, por sus siglas en inglés) ha surgido como una técnica innovadora que ha ganado popularidad. Su capacidad para unir materiales difíciles de soldar como aleaciones de aluminio y aceros de alta resistencia, junto con menores distorsiones y sin la necesidad de consumibles adicionales, lo convierte en una opción atractiva para diversas aplicaciones, incluyendo su potencial uso en aquellos pequeños talleres, como los del sector automovilístico, donde brindaría considerables beneficios.

El proyecto busca abordar un vacío en términos de conocimiento y datos experimentales en el uso de la tecnología de soldadura FSW. Con este fin, se propone llevar a cabo un desarrollo experimental enfocado en la determinación y comprensión de los parámetros principales y su interacción sobre la herramienta utilizada para dicho proceso. Esto implica no solo la identificación de los parámetros óptimos, sino también la correlación entre ellos para maximizar la vida útil de la herramienta preservando la calidad de la soldadura.

Para ello se da la implementación de un diseño factorial que permita evaluar de manera sistemática la influencia de múltiples variables, contemplando a su vez, el diseño y la fabricación de la herramienta para llevar a cabo estos experimentos. Estos ensayos experimentales se llevan a cabo en las instalaciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS, aprovechando su infraestructura y recursos disponibles como la norma ASTM E384-22. Como resultado de estos estudios, se generan una serie de aplicaciones y recomendaciones prácticas para optimizar la tecnología de soldadura FSW en diversas aplicaciones industriales. Este enfoque integral garantizará no solo la adquisición de nuevos conocimientos, sino también su aplicación directa y beneficiosa en la práctica industrial.

## 1.1. EL PROBLEMA DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN Y AGITACIÓN

La soldadura FSW actualmente está abriéndose paso a través de los diferentes tipos de soldadura de gran manera, un ejemplo destacado se presenta en el Centro Espacial Progress en la ciudad rusa de Samara, que se encuentra en la fase final de los ensayos del próximo cohete Soyuz-5, donde se utiliza la tecnología en mención, “Este cohete dispone de una serie de nuevas tecnologías, la principal claro está, es la soldadura por fricción y agitación, dijo el director general de ese instituto, Dmitri Baránov”<sup>1</sup>. Desde el contexto de fabricación de estructuras metálicas hasta la creación de componentes esenciales en la industria aeroespacial, la soldadura por fricción y agitación (FSW) ha demostrado ser una técnica prometedora en la industria de la manufactura, especialmente para la unión de materiales metálicos, debido a su capacidad para producir juntas sólidas de alta calidad. Sin embargo, uno de los desafíos en la implementación exitosa de esta técnica es el desgaste de la herramienta utilizada en el proceso.

Figura 1. Soldadura por fricción y agitación (FSW)



Fuente: Stirweld. FSW: una tecnología de soldadura ecológica

El desgaste de la herramienta en la soldadura por fricción y agitación es un problema significativo que afecta la eficiencia, la calidad de las uniones soldadas y los costos de producción. Este desgaste puede manifestarse como la pérdida de material de la herramienta, el deterioro de la geometría de la herramienta o la formación de defectos en la junta soldada. Numerosas variables físicas, como la velocidad de rotación, la velocidad de avance o la geometría de la herramienta pueden influir en el desgaste prematuro de la

---

<sup>1</sup> RT. Rusia ultima los ensayos del innovador cohete portador Soyuz-5 para volar al espacio. [sitio web]. Rusia.

misma. Dada la novedad de este proceso, la disponibilidad de bibliografía y datos sobre los parámetros mencionados es limitada. Sin embargo, su potencial para revolucionar ciertas industrias regionales es evidente, ya que su facilidad de uso y costos reducidos pueden facilitar su adaptabilidad. No obstante, el aprovechamiento pleno de este proceso está condicionado a la generación de conocimiento detallado sobre su aplicación y funcionamiento. Por lo tanto, la investigación propuesta no solo cubre un vacío en términos de información, sino que también abre nuevas oportunidades para la implementación de la soldadura FSW en diversos contextos industriales.

Al adaptar el proceso de soldadura FSW a la fresadora ubicada en el taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, es esencial llevar a cabo un análisis para comprender cómo la variación de los parámetros físicos del proceso afecta el desgaste de la herramienta, a partir de un diseño de experimento. Esta comprensión permite adecuar los parámetros del proceso y desarrollar estrategias para prolongar la vida útil de la herramienta y mejorar la calidad de las juntas soldadas.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

- Contribuir a la misión de la universidad industrial de Santander aportando a la formación del estudiante mediante la investigación del análisis de desgaste de la herramienta de soldadura por fricción y agitación aplicada a procesos de unión de aluminio utilizando una fresadora.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir un diseño de experimento factorial que permita evaluar el desgaste con base a las diferentes geometrías del pin y los parámetros de soldadura de velocidad de avance y velocidad de rotación.
- Diseñar y construir la herramienta de soldadura variando la geometría del pin incluyendo perfiles cónicos con el propósito de llevar a cabo mediciones de desgaste en diferentes configuraciones.
- Evaluar el desgaste de la herramienta a partir del diseño factorial generado para definir la vida útil de la herramienta por medio del análisis del comportamiento de la dureza bajo la norma ASTM E384-22 en función de la longitud soldada.

### 3. MARCO REFERENCIAL

El proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) fue desarrollado y patentado en 1991 por El Instituto de Soldadura de Reino Unido. Este método de unión en estado sólido, sin aporte de material, ha dado excelentes resultados en términos de calidad, además de poseer una amplia aplicabilidad en diversos materiales. Su capacidad para unir incluso aquellos considerados previamente insoldables lo posiciona como una tecnología sumamente atractiva para numerosos y significativos sectores industriales.

El marco de referencia pone de manifiesto la trayectoria del proceso de soldadura FSW, analizando aquellos parámetros influyentes en dicho proceso en especial para soldaduras de láminas de aluminio. En el análisis, se exploran investigaciones anteriores para establecer una sólida base que oriente al estudio de desgaste de la herramienta en un proceso de soldadura de aluminio por medio de una fresadora.

Tabla 1. Documento investigado uno

Título:	Investigation on effect of FSW parameters of aluminium alloy using Full Factorial Design
Autor/es:	M. Prakash, A. Daniel Das
Lugar:	Department of Mechanical Engineering, Karpagam Academy of Higher Education, Coimbatore, India
Fecha:	23 de junio de 2020
Referencia:	Prakash, M y Das, Daniel. Investigation on effect of FSW parameters of aluminium alloy using Full Factorial Design. En: Materials Today: Proceedings [ScienceDirect]. Coimbatore: Karpagam Academy of Higher Education, 2021, vol. 37, nro. 2, pp. 608-613.

Síntesis: El artículo aborda el efecto de las variables del proceso de soldadura FSW, incluyendo la velocidad de avance, velocidad de rotación, desplazamiento y tiempo de soldadura. A través de un diseño factorial completo, se lleva a cabo un análisis estadístico, utilizando la resistencia al impacto de láminas de aluminio 7075 y 6061 como la variable de respuesta. Según el diagrama de Pareto, se identifica que la velocidad de avance de la herramienta es el parámetro más influyente. Por otra parte, mediante la tabla media de

datos, se determina que la velocidad de rotación es el parámetro más significativo en el proceso de soldadura.

Tabla 2. Documento investigado dos

Título:	Tool pin profiles effect on mechanical properties of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys
Autor/es:	S Swetha, Chinmaya Padhy
Lugar:	Dept of Mechanical Engineering, GITAM University, India
Fecha:	2023
Referencia:	Swetha, S y Padhy, C. Tool pin profiles effect on mechanical properties of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. En: Materials Today: Proceedings [ScienceDirect]. Hyderabad: GITAM University, 2023.

Síntesis: El trabajo investiga el efecto de diferentes perfiles del pin de la herramienta en el proceso de soldadura FSW, incluyendo perfil cilíndrico, cuadrado y cónico, donde se mantuvieron constantes la velocidad de rotación a 1200RPM, la velocidad de avance a 150mm/min y la fuerza axial de 2kN en soldaduras en láminas de aluminio 6061-T6 y 2021-T4. Del trabajo se concluye que el perfil cuadrado proporciona mayor resistencia a la tracción, seguida del perfil cónico y finalmente el perfil cilíndrico, de igual manera la mayor resistencia Vickers la presenta el perfil cuadrado.

Tabla 3. Documento investigado tres

Título:	A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding
Autor/es:	Michael Hasieber, et al.
Lugar:	Technische Universität Ilmenau, Alemania
Fecha:	17 de noviembre de 2022
Referencia:	Hasieber, M. et al. A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding. En: Welding in the world [Springer]. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2022, vol. 67, pp. 325–339.

Síntesis: El estudio se centra en el análisis de las áreas de mayor desgaste del hombro y el pin de la herramienta, abordando la temperatura del proceso en el rango de 562°C a 602°C, además de considerar la longitud de la soldadura. Evidenciaron que la temperatura

de unión durante la FSW tiene un impacto significativo en la resistencia al desgaste y, por ende, en la vida útil de la herramienta, mostrando que la reducción de la velocidad de rotación en un 50% puede aumentar la vida útil de la herramienta hasta un 150%.

En cuanto a la caracterización del desgaste, comprobaron que tanto el hombro como el pin experimentan un desgaste significativo, aunque las causas del fallo son diferentes. En temperaturas de proceso elevadas, la limitación del desgaste máximo tolerable está asociada al hombro, mientras que, en temperaturas más bajas, el desgaste en la zona de transición entre el hombro y la superficie del palpador es más pronunciado. A pesar del desgaste en el hombro y el pin, no se presencian efectos significativos en la resistencia a la tracción ni irregularidades en la raíz de la soldadura, indicando que se pueden lograr propiedades mecánicas consistentes utilizando herramientas FSW sometidas a cierto nivel de desgaste.

Tabla 4. Documento investigado cuatro

Título:	Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy
Autor/es:	K. Elangovan, V. Balasubramanian
Lugar:	Department of Manufacturing Engineering, Annamalai University, Tamil Nadu, India
Fecha:	2008
Referencia:	Elangovan, K y Balasubramanian, V. Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. En: Materials and Design [ScienceDirect]. Tamil Nadu: Department of Manufacturing Engineering, Annamalai University, 2008, vol. 29, nro. 2, pp. 362-373.

Síntesis: La investigación se enfoca en explorar la influencia del perfil del pasador y el diámetro del hombro de la herramienta en la formación de la zona de soldadura en la aleación de aluminio AA6061. Para ello emplearon cinco perfiles de pin distintos (cilíndrico liso, cilíndrico roscado, cónico, triangular y cuadrado), junto con tres diámetros de hombro variados para la fabricación de las uniones. Los resultados indican que la herramienta con perfil de pasador cuadrado y un diámetro de hombro de 18 mm genera soldaduras

mecánicamente sólidas y sin defectos metalúrgicos, destacándose frente a otras configuraciones de perfil de pasador.

Por otra parte, de los tres diámetros de hombro de herramienta evaluados, la herramienta con un diámetro de hombro de 18 mm produce una región de soldadura sin defectos, independientemente de los perfiles de pasador utilizados en la herramienta.

Tabla 5. Documento investigado cinco

Titulo:	Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy
Autor/es:	K. Elangovan, V. Balasubramanian
Lugar:	Department of Manufacturing Engineering, Annamalai University, Tamil Nadu, India
Fecha:	2007
Referencia:	Elangovan, K y Balasubramanian, V. Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. En: Materials Science and Engineering: A [ScienceDirect]. Tamil Nadu: Department of Manufacturing Engineering, Annamalai University, 2007, vol. 459, nro. 1-2, pp. 7-18.

Síntesis: Este estudio se centra en analizar el impacto de la velocidad de rotación y la geometría del pin de la herramienta sobre la conformación de la zona soldada en aleaciones de aluminio 2219. Para ello, se emplearon cinco tipos distintos de pines: cilíndrico liso, cilíndrico con rosca, cónico, de sección triangular y de sección cuadrada, combinados con tres velocidades de rotación distintas. Los resultados indican que el pin de forma cuadrada generó uniones libres de defectos en todas las condiciones de velocidad, mientras que una velocidad de 1600RPM proporcionó las mejores propiedades mecánicas a tracción, independientemente del tipo de pin utilizado.

Tabla 6. Documento investigado seis

Título:	Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys
Autor/es:	Elizabeth Hoyos and María Camila Serna
Lugar:	Department of Mechanical Engineering, Universidad EIA, Envigado, Colombia
Fecha:	16 de diciembre de 2021
Referencia:	Hoyos, E y Serna, M. Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. En: Metals [MDPI]. Envigado: Department of Mechanical Engineering, Universidad EIA, 2021, vol 11.

Síntesis: El trabajo propone ecuaciones guía para el proceso de diseño de la herramienta según la serie de aluminio a soldar y el espesor de la placa, dando dimensiones a la longitud y diámetro del pin además del diámetro del hombro. Para ello realizaron un estudio de más de 80 fuentes y 200 ensayos, teniendo como método de verificación las soldaduras realizadas con éxito por autores ajenos al ámbito de la revisión original. Dentro de sus conclusiones se tiene que la longitud del pin no depende de la serie del aluminio si no del espesor de este, al igual que la diferencia entre estos dos debe mantenerse entre el 5 y 6%. Con respecto a los diseños originales se presentan variaciones en las dimensiones entre 0 y 21,44%, atribuyendo este último valor a las restricciones específicas de espacio de la pieza a soldar. Finalmente, el artículo aclara que se proponen dimensiones para soldaduras de unión a tope.

Tabla 7. Documento investigado siete

Título:	Investigating the role of different components of friction stir welding tools on the generated heat and strain
Autor/es:	M. Akbari, M.R.M. Aliha, F. Berto
Lugar:	Irán y Noruega
Fecha:	2023
Referencia:	Akbari M, Aliha M y Berto F. Investigating the role of different components of friction stir welding tools on the generated heat and strain. En: Forces in Mechanics [ScienceDirect]. Iran. 2023, vol 10.

Síntesis: El estudio comprende el análisis del calor y la deformación generados por la herramienta mediante la aplicación de un modelado 3D. El propósito central de la investigación consiste en examinar el impacto del pin y el hombro de la herramienta en la generación de calor durante el proceso. Para llevar a cabo dicho análisis, diseñaron y modelaron tres configuraciones diferentes de la herramienta: sin pin, sin hombro y completa. Los resultados obtenidos destacan que, en contraste con la deformación plástica, la generación de calor por fricción es el factor principal en el incremento de la temperatura de la pieza. Es relevante señalar que el hombro de la herramienta desempeña un papel más preponderante en la producción de calor en comparación con el pin, debido a que, el hombro contribuye en un 90% al calor total generado durante el proceso, aunque su aporte a la deformación plástica sea mínimo, puesto que este lo realiza mayoritariamente el pin de la herramienta.

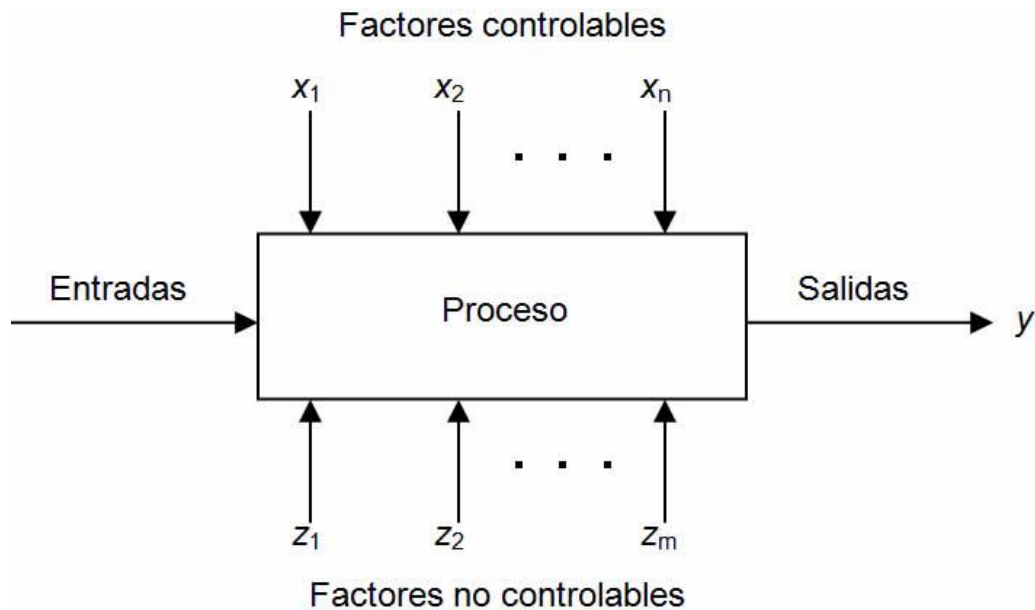
Los artículos estudiados se centran en investigar y optimizar los parámetros del proceso de soldadura para mejorar la calidad de la unión. Sin embargo, ninguno de ellos aborda el desgaste de la herramienta, el presente proyecto tiene como objetivo principal proporcionar un análisis detallado sobre la durabilidad de la herramienta en el proceso de soldadura a partir de la variación de diferentes parámetros.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. DISEÑO DE EXPERIMENTO

El diseño de experimento (DOE) es un enfoque estadístico que se basa en la identificación y planificación meticulosa de pruebas. Su objetivo es recopilar datos para someterlos a un análisis estadístico, proporcionando evidencia objetiva para abordar preguntas específicas.

Figura 2. Modelo general de un DOE



Fuente: GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2 ed. México: McGraw Hill Interamericana, 2008

4.1.1. Elementos del diseño de experimento: Como se evidencia en la Figura 2, un DOE incluye varios tipos de información que se gestionan de maneras diversas. Esto da lugar a una serie de conceptos que son de alta importancia para comprender el correcto manejo de un diseño de experimento. Estos conceptos se presentan en la Tabla 8.

Un DOE se desarrolla en varias etapas: Planeación y realización, análisis, interpretación y conclusiones (control), donde las etapas de planeación y realización son las de mayor importancia y constan de mayor tiempo. Estas fases se presentan en la Tabla 9.

Tabla 8. Conceptos DOE

CONCEPTOS DOE	
CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
Experimento	Cambios planificados en las condiciones de operación de un proceso para evaluar su efecto en una o varias propiedades específicas del resultado
Unidad Experimental	La pieza utilizada para obtener un valor representativo del resultado obtenido en el experimento
VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES INTRODUCIDAS EN UN EXPERIMENTO QUE PUEDEN AFECTAR EL RESULTADO, YA SEAN CONTROLABLES O NO CONTROLABLES
Factores controlables	VARIABLES DE PROCESO QUE SE PUEDEN FIJAR O CONTROLAR EN UN NIVEL ESPECÍFICO DURANTE LA REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO PARA ESTUDIAR SU INFLUENCIA EN LA VARIABLE DE RESPUESTA
Variable de salida	Medida utilizada para evaluar el impacto de las diferentes condiciones experimentales en el resultado
Factores de Ruido	VARIABLES Y MÉTODOS QUE ESCAPAN AL CONTROL DURANTE UN EXPERIMENTO O LA OPERACIÓN NORMAL DE UN PROCESO, INTRODUCIENDO VARIABILIDAD NO DESEADA
Niveles	Valores asignados a cada factor analizado en un diseño experimental para explorar su efecto en la variable de respuesta
Tratamientos	Combinación específica de niveles de los factores investigados que representan una condición experimental única, utilizada para analizar las interacciones entre los factores

Tabla 9. Etapas DOE

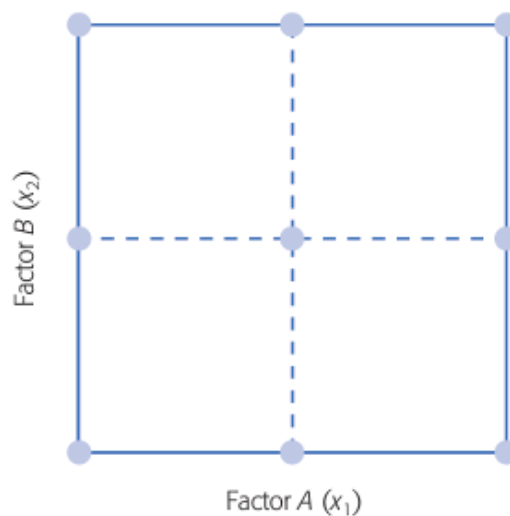
ETAPAS DOE	
ETAPA	DESCRIPCIÓN
Planeación y realización	Definir el problema de estudio, seleccionar variables de respuesta con medición confiable y determinar los factores relevantes. Elegir niveles y un diseño experimental adecuado, planificar el trabajo y ejecutar el experimento según lo previsto
Análisis	Aplicar métodos estadísticos inferenciales, como ANOVA, para evaluar diferencias muestrales y su significancia en relación con poblaciones o procesos
Interpretación	Analizar los resultados en profundidad, comparar con las conjeturas iniciales, validar supuestos y, mediante pruebas estadísticas, identificar el tratamiento más eficaz y los aprendizajes clave del proceso
Conclusiones	Decidir medidas para generalizar resultados y mantener mejoras

4.1.2. Diseño de experimento factorial: Los diseños de experimento factorial permiten investigar el impacto simultáneo de múltiples factores controlables en una o más variables de respuesta. Estos factores pueden tener diferentes niveles, y la combinación de estos niveles en todas las posibles formas proporciona un conjunto completo de tratamientos. Esto facilita la comprensión de las interacciones entre los factores y cómo influyen en las respuestas del sistema.

4.1.2.1. Diseño factorial  $2^k$ : Estos diseños exploran el efecto de  $k$  factores, cada uno con 2 niveles. Permiten evaluar tanto los efectos individuales de los factores como sus interacciones. Por ejemplo, en un diseño  $2^2$ , se analizarían dos factores, cada uno con dos niveles, para un total de cuatro condiciones experimentales.

4.1.2.2. Diseño factorial  $3^k$ : Similar a los diseños  $2^k$ , pero se exploran  $k$  factores, cada uno con 3 niveles. Estos diseños amplían la capacidad para evaluar interacciones entre tres niveles en lugar de dos.

Figura 3. Representación plano diseño factorial  $2^3$



Fuente: GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2 ed. México: McGraw Hill Interamericana, 2008

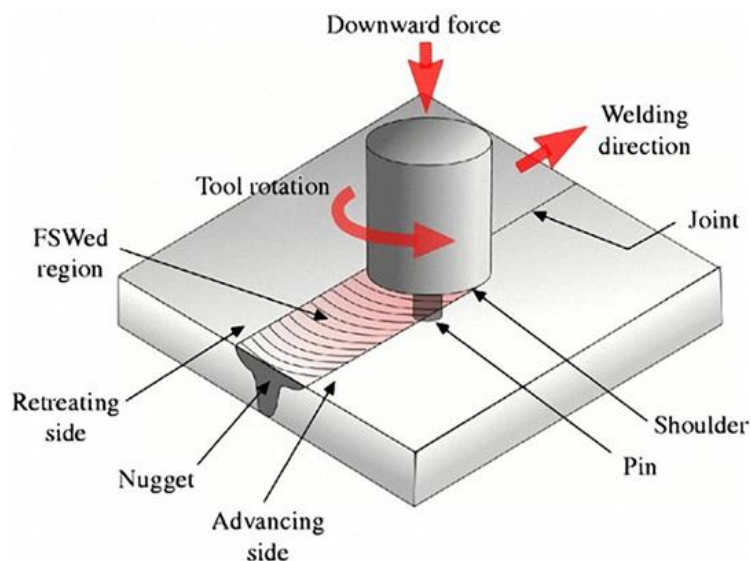
4.1.2.3. Diseños factorial fraccionado  $2^{k-p}$ : Se selecciona un subconjunto de las combinaciones posibles en un diseño factorial completo.

## 4.2. SOLDADURA FSW

La soldadura FSW es un proceso de unión de materiales que implica la aplicación de calor generada por fricción mecánica junto con una agitación mecánica. A diferencia de los métodos convencionales de soldadura, este enfoque no involucra la fusión total de los materiales, lo que lo hace especialmente útil para aleaciones de aluminio.

4.2.1. Proceso de soldadura: El proceso de soldadura FSW se basa en la penetración de una herramienta cilíndrica con un hombro y pin que se encuentra a cierta velocidad de rotación, generando fricción y elevando la temperatura de la zona a un valor entre el 60% y 80% del punto de fusión haciendo que el material se ablande, en este punto la herramienta adquiere velocidad de avance y se desplaza a través de las láminas a soldar, debido a la rotación del pin durante el proceso se presenta agitación mecánica que mezcla y une los materiales creando de esta manera una conexión sólida, cuando el proceso de soldadura llega a su fin se reducen las velocidades de la herramienta hasta valores nulos y se extrae de la unión soldada.

Figura 4. Diagrama de proceso de soldadura FSW



Fuente: Swetha, S y Padhy, C. Tool pin profiles effect on mechanical properties of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys

4.2.2. Zona de soldadura: Es la región afectada por el proceso de soldadura FSW y aunque no se produce la fusión completa de los materiales a soldar, la zona afectada térmicamente alrededor de la junta experimenta cambios en la microestructura y propiedades.

Figura 5. Corte transversal zona de soldadura



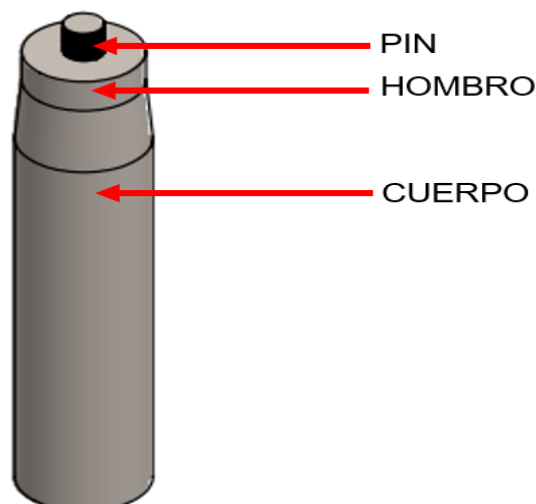
Fuente: Wikipedia. Soldadura por fricción-agitación

La Figura 5 muestra cómo se distribuyen las distintas zonas que conforman una unión soldada, determinadas por los cambios en la microestructura del material. La región A permanece sin alteraciones térmicas, por lo tanto, su estructura interna no se ve afectada. En contraste, el área identificada como HAZ presenta transformaciones en su microestructura y en sus propiedades mecánicas, aunque no ha experimentado deformación plástica. En la zona TMAZ, el material ha sufrido deformación plástica como resultado del proceso de fricción. Finalmente, en el núcleo de la soldadura, conocido como DXZ, tiene lugar la recristalización.

#### 4.3. HERRAMIENTA FSW

La soldadura FSW utiliza una herramienta rotativa que consta de cuerpo, hombro y pin. Esta herramienta genera calor a través de fricción y realiza la mezcla del material por medio de agitación mecánica, estableciendo conexiones sólidas y de alta calidad. Cada una de las partes de la herramienta se encarga de una o más funciones específicas.

Figura 6. Herramienta FSW

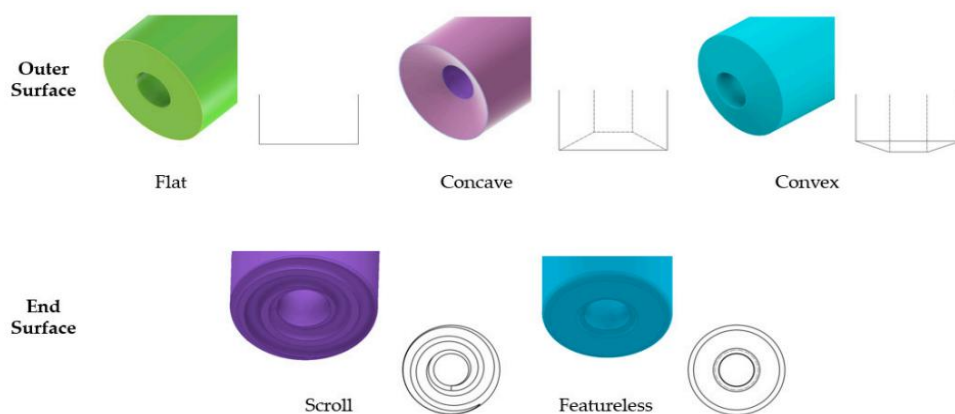


4.3.1. Cuerpo: El cuerpo de la herramienta se encarga de la sujeción de la herramienta por parte de la maquina utilizada para el proceso de soldadura ya sea una maquina FSW, una instalación robotizada o una fresadora vertical, debido a esto puede tener diferentes configuraciones dependiendo de la forma de sujeción, aunque principalmente se encuentra con una configuración cilíndrica.

4.3.2. Hombro: El hombro por su parte posee como función principal la de calentar el material por fricción debido al roce entre la herramienta con el material de la pieza a soldar. El calentamiento se da para una temperatura del 60-80% del punto de fusión del material, en el caso del aluminio la temperatura de soldadura es de 400°C. La otra función que cumple el hombro es la de evitar que el material salga de la zona de soldadura, empujando el flujo de material hacia el centro.

De acuerdo con las dos funciones mencionadas anteriormente, se presentan diversas opciones de geometrías para el hombro, las cuales se clasifican en dos categorías principales. En cuanto a la de superficie externa, se presentan configuraciones de hombro plano, cóncavo y convexo. Por otro lado, en la categoría de superficie interna, las configuraciones se dividen en hombro de desplazamiento y sin relieves. Estas diversas opciones de geometría se ilustran de manera detallada en la Figura 7.

Figura 7. Tipos de hombro

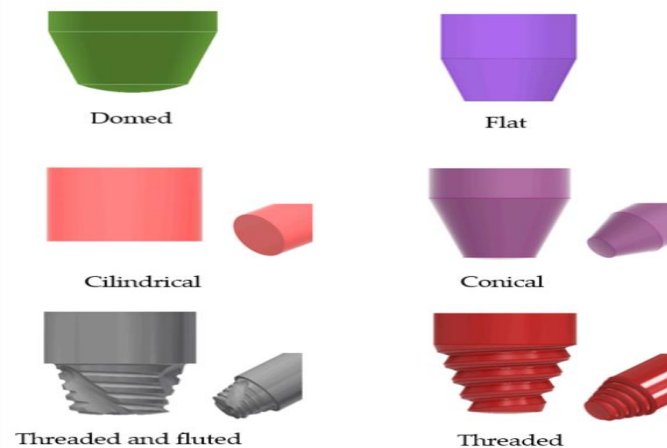


Fuente: Hoyos, E y Serna, M. Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys

4.3.3. Pin: El pin se encarga de mezclar el material durante su rotación. Debido a su forma, deformará plásticamente el material al penetrar en la junta dando una mezcla homogénea.

La acción del pin no solo facilita la agitación del material, sino que también favorece la consolidación del estado plástico. Por otra parte, esta misma agitación aporta calor al material, pero en poca medida en comparación con el hombro. Al igual que con el hombro, existen una amplia variedad de configuraciones para el pin de la herramienta según su forma, tales como cilíndrica lisa, cilíndrica roscada, cónica lisa, cónica roscada, cuadrada, triangular, y en domo.

Figura 8. Tipos de pin



Fuente: Hoyos, E y Serna, M. Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys

#### 4.4. FABRICACION HERRAMIENTA

El proceso de fabricación es el conjunto de operaciones que permiten transformar la materia prima en secuenciales destinadas a transformar materias primas en productos finales, además de procesos posteriores como los tratamientos térmicos que son procesos controlados de calentamiento y enfriamiento, con el objetivo de alterar las propiedades físicas y mecánicas. Este procedimiento se lleva a cabo en condiciones controladas de temperatura y tiempo para lograr cambios específicos en la microestructura del material.

4.4.1. Mecanizado: La herramienta es fabricada generalmente por medio de un proceso de mecanizado, este es un es un proceso de fabricación que implica la eliminación de material de una pieza de trabajo para obtener la forma, dimensiones y acabado deseados. Utiliza una variedad de equipos, como tornos, fresadoras, taladros y rectificadoras. Las aplicaciones del mecanizado son amplias y van desde la producción de componentes

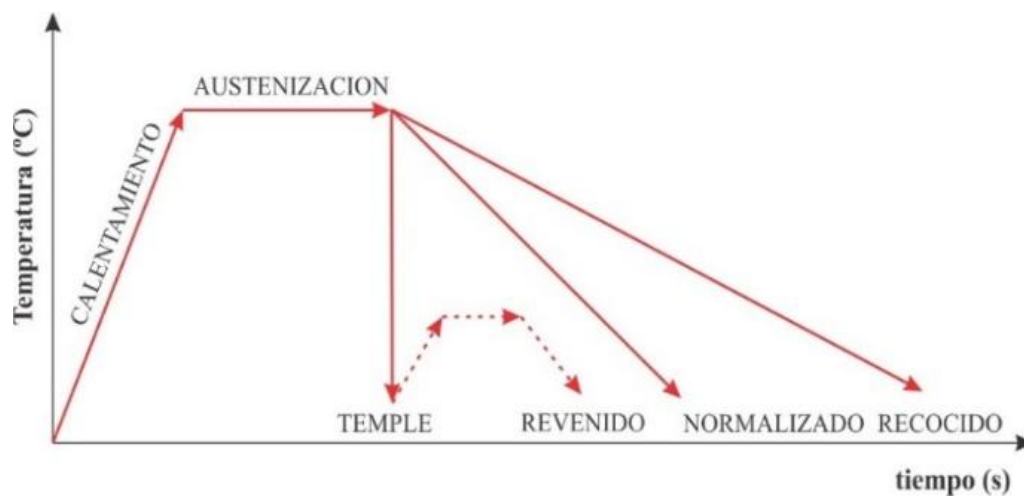
mecánicos para automóviles o maquinaria industrial, hasta la fabricación de piezas personalizadas.

Figura 9. Torno MOMAC



4.4.2. Temple: Es un tratamiento térmico que implica calentar la pieza a una temperatura crítica y luego enfriarla rápidamente en agua, aceite o aire para alterar su estructura cristalina y mejorar sus propiedades mecánicas. En el proceso de templado de aceros, se calienta a una temperatura superior a la de austenización, transformándose en austenita. Al enfriarse rápidamente, se convierte en martensita, elevando al máximo la dureza y resistencia.

Figura 10. Diagrama de tratamientos térmicos



Fuente: Derematerialia. Tratamientos térmicos básicos

#### 4.5. VIDA UTIL HERRAMIENTA

La vida útil de una herramienta FSW hace referencia al tiempo máximo que esta puede ser utilizada sin sufrir un fallo que pueda comprometer su funcionamiento, puesto que, durante el proceso de soldadura la herramienta está sometida a condiciones que causan su desgaste y eventual fallo.

4.5.1. Falla herramienta: Está influenciada por varios mecanismos, como la abrasión mecánica o la fatiga. El desgaste de la herramienta aumenta conforme se incrementa la longitud de la soldadura y se asocia principalmente a la interacción entre las superficies de la herramienta y la lámina.

Los mecanismos de desgaste son complejos y dependen tanto de factores mecánicos como la fricción como de factores térmicos como la temperatura del proceso. Además, la reacción química entre el material de la herramienta y la pieza de trabajo también contribuye al desgaste, dando lugar a reacciones triboquímicas.

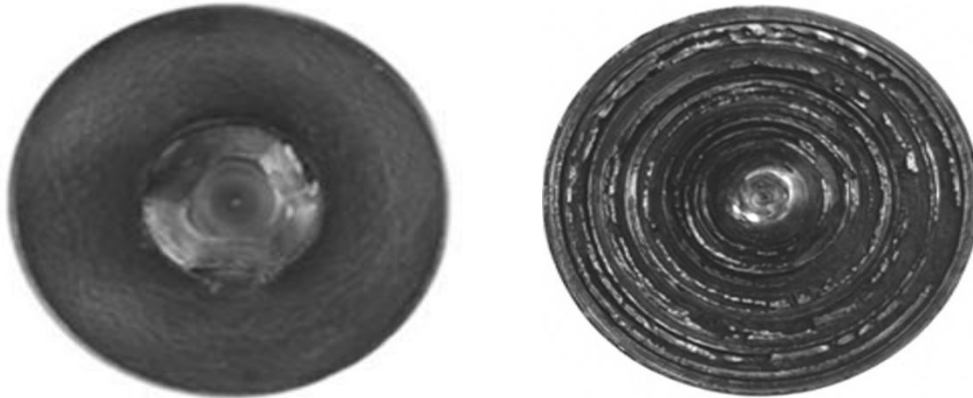
Tabla 10. Mecanismo de falla

MECANISMOS DE FALLA		
Factor	Descripción	Efecto
Abrasión Mecánica	Desgaste por contacto mecánico entre herramienta y pieza	Desgaste superficial, principalmente en el pasador y el hombro de la herramienta
Reacciones triboquímicas	Degradación por interacción química entre ambos materiales	Abrasión o alteración de la superficie de la herramienta
Fatiga Térmica	Ciclos térmicos extremos durante la soldadura (calentamiento y enfriamiento rápidos)	Tensiones térmicas que pueden llevar a grietas o pérdida de resistencia en la herramienta
Fatiga Mecánica	Cargas repetidas y fuerzas dinámicas que actúan sobre la herramienta durante el proceso	Generación de grietas, especialmente en zonas sometidas a fuerzas repetidas
Fractura	Ruptura de la herramienta debido a la acumulación de fatiga o erosión extrema	Fractura de la herramienta por debilitamiento de su estructura interna

La manifestación más pronunciada del desgaste en las herramientas se observa predominantemente en dos áreas específicas: la superficie del pin y la cara del hombro que establece contacto directo con la unión a soldar. Estas zonas, al estar expuestas a

condiciones extremas de fricción y temperatura durante la operación, experimentan una pérdida gradual de material. La Figura 11 muestra cómo se desgasta tanto el pin como la cara del hombro en contacto luego de un tiempo de uso.

Figura 11. Desgaste de la herramienta



Fuente: Hasieber, M. et al. A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding

4.5.2. Modelo de Archard: Es un modelo que describe el desgaste por deslizamiento entre superficies en contacto. Establece que el volumen de material perdido es proporcional a la fuerza normal aplicada y a la distancia recorrida, e inversamente proporcional a la dureza del material.

$$V = \frac{K * L * F}{H}$$

Donde V representa el volumen desgastado en mm<sup>3</sup>, K es un coeficiente adimensional que depende del par de materiales en contacto y de las condiciones tribológicas, F es la carga normal aplicada sobre la superficie y L es la distancia de deslizamiento o el recorrido relativo entre superficies. Por otra parte, H es la dureza del material en el contacto.

#### 4.6. MAQUINA DE TRABAJO

El proceso de soldadura FSW demuestra ser muy adaptable en cuanto a formas de realización, puesto que este es posible realizarlo en diferentes tipos de máquinas tales como maquinas FSW, instalaciones robotizadas, e incluso máquinas de desarrollo propio y maquinas herramientas como las fresadoras verticales debido a su versatilidad, lo cual permite la ejecución eficiente del proceso FSW.

Figura 12. Fresadora FU250X1000



4.6.1. Fresadora FU250X1000: se encuentra ubicada en el taller de máquinas herramientas de la Escuela de Ingeniería Mecánica UIS, es de la marca Fritz Heckert que cuenta con una potencia máxima de 9HP . La Figura 13 detalla las especificaciones de suministro eléctrico y las dimensiones del equipo presentadas en la ficha técnica del mismo.

Figura 13. Especificaciones fresadora FU250X1000

ESPECIFICACIONES		
SUMINISTRO ELÉCTRICO	Tensión	220 V
	Corriente	32 A
	Frecuencia	60 Hz
DIMENSIONES	Alto	1.68 m
	Largo	1.47
	Ancho	1.32
	Peso	1.7 Ton

Fuente: Ficha técnica del equipo

En el apartado de velocidades de la fresadora, se proporciona la información a partir de la ficha técnica del equipo, donde se visualiza que cuenta con un rango de velocidad de rotación nominal de 45 a 3000RPM, mientras que para el avance cuenta con un rango de velocidad nominal de 10 a 630mm/min. La Figura 14 muestra los componentes que posee la fresadora como la mesa de sujeción con sus dimensiones o el cono portaherramientas. Para más detalles, revisar el Anexo A.

Figura 14. Componentes fresadora FU250X1000

COMPONENTES				
N°	Componente	Tipo	Marca	Características
1	Mesa de sujeción	Mecánico		1120x250 mm
2	Cono portaherramientas	Mecánico	SK40	
3	Motor principal	Eléctrico	GENERAL ELECTRIC	8 kw
4	Guía de movimiento eje X	Mecánico		800 mm
5	Guía de movimiento eje Y	Mecánico		200 mm
6	Guía de movimiento eje Z	Mecánico		380 mm

Fuente: Ficha técnica del equipo

#### 4.7. SOFTWARE DE APOYO

Los softwares utilizados para la realización del proyecto son dos principalmente, SolidWorks con el fin de realizar el diseño y planos de la herramienta y Minitab que contribuye con el análisis estadístico del diseño de experimento.

4.7.1. SolidWorks: Se trata de una herramienta de diseño asistido por computadora (CAD) ampliamente adoptada en los sectores de manufactura e ingeniería. Su funcionalidad permite desarrollar modelos 3D detallados de componentes individuales y ensambles.

4.7.2. Minitab: Es un software estadístico utilizado para el análisis de datos y la mejora de procesos. Es especialmente útil en la investigación y desarrollo de proyectos donde se requiere análisis estadístico para tomar decisiones fundamentadas.

#### 4.8. EQUIPOS DE MEDICIÓN

Se realiza la medición de la microdureza de la herramienta, para esto se utilizó el durómetro FALCON 400G2.

4.8.1. Durómetro Falcon 400G2: Es un durómetro de segunda generación de la marca INNOVATEST diseñado para ensayos de Microdureza Vickers, dureza Vickers y Brinell. Su actuador de carga de celdas de carga múltiples permite aplicar fuerzas de 1gf a 62,5kgf, ampliando su versatilidad en diversos materiales. El equipo se encuentra ubicado en el laboratorio de metalografía 312 de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS.

Figura 15. Durómetro Falcon 400G2



#### 4.9. NORMA ASTM E384-22

Establece los procedimientos estándar para la medición de la microdureza Vickers de materiales metálicos, cerámicos y materiales compuestos. La norma describe los procedimientos detallados para la preparación de la muestra, la aplicación de la carga de prueba, la medición del indentor, y el cálculo y la expresión de los resultados de microdureza Vickers.

El cálculo de la microdureza Vickers es dado por medio de la fórmula que se denota a continuación donde los valores de fuerza se introducen en kgf y se plantea un diámetro medio entre las dos diagonales en medidas de mm.

$$HV = \frac{1.8544 * F}{D_m^2}$$

El ensayo Vickers cuenta con varios matices a cumplir para su correcto desarrollo, entre ellos se tiene que la fuerza aplicada debe ser entre 1 a 1000gf, el tiempo de indentación debe estar entre los 10 a 15 segundos, que el espesor mínimo de la pieza o del tratamiento térmico debe ser 10 veces la profundidad de la huella de la penetración, además, en el caso del acero, la distancia entre la muesca y el borde de la cara donde se realiza la indentación, así como entre indentaciones sucesivas, debe ser de 2,5 veces la longitud diagonal media de la muesca.<sup>2</sup> Para más información se recomienda revisar la norma.

---

<sup>2</sup> ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. E384 – 22. Pensilvania: ASTM, 2022, pp. 1-9.

## 5. DEFINICIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO

Se definió la necesidad de un tipo de diseño de experimento que contara con la capacidad para estudiar el efecto de diferentes variables controladas sobre una o más variables de respuesta, a partir de esto se determinó que la categoría de diseños de experimentos factoriales era la indicada, sin embargo, para la selección del diseño de experimento factorial apropiado, primeramente, se definieron las variables controladas, niveles, factores de bloque y variables de respuesta.

### 5.1. VARIABLES CONTROLADAS

Las variables controladas en cuestión son la velocidad de rotación, la velocidad de avance y la configuración del pin de la herramienta. Estas variables se establecieron a través de un análisis de artículos relacionados con el proceso de soldadura FSW para aluminio cual se basó en dos criterios. La Tabla 11 muestra los 25 artículos trabajados con su respectivo título, material de soldadura, variables tratadas y la referencia de los autores. Esta información se extrae de la base de datos SCOPUS.

Primer criterio: Se identificaron las variables controladas del proceso que se exploran con mayor frecuencia debido a su impacto en el proceso de soldadura y, por ende, en la calidad de la soldadura.

Segundo criterio: Por su parte, el segundo criterio se centró en comparar las diferentes variables del proceso de soldadura, analizando en qué medida dichas variables afectan el proceso de soldadura y la calidad de la soldadura.

Tabla 11. Artículos analizados

ARTÍCULOS				
N°	TITULO	MATERIAL	VARIABLES CONTROLADAS	AUTORES
1	Investigation on effect of FSW parameters of aluminium alloy using Full Factorial Design	Al7075 Al6061	Velocidad rotación [RPM] Velocidad avance [mm/min] Desplazamiento [mm] Tiempo de soldadura [min]	M. Prakash, A. Daniel Das
2	Optimization of FSW parameters for enhancing dissimilar joint strength of AA7050 and AA6061 using Response Surface Methodology (RSM)	AA7050 AA6061	Velocidad rotación [RPM] Velocidad avance [mm/min] Ángulo de inclinación [°]	Shaurya Bhatnagar, Gaurav Kumar, et al

N°	TITULO	MATERIAL	VARIABLES CONTROLADAS	AUTORES
3	Tool pin profiles effect on mechanical properties of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys	AA6061-T6 AA2014-T4	Geometría herramienta [cónica, cuadrada, cilíndrica]	S Swetha, Chinmaya Padhy
4	Effect of the parameters affecting the properties during friction stir welding	AA5083	Velocidad rotación [RPM] Velocidad avance [mm/min]	M. Merzoug, et al
5	Investigation of effect of tool offset position on mechanical properties of dissimilar aluminium alloy sheets joined by friction stir welding	AA2024 AA7075 AA6063 AA6069	Desplazamiento [mm]	M. Prakash, et al
6	Through thickness property variations in friction stir welded AA6061 joint fatigued in very high cycle fatigue regime	AA6061	Velocidad rotación [RPM] Velocidad avance [mm/min]	Chao He, et al
7	Optimization of FSW Process Parameters for AISiCp PRMMC Using ANOVA	AISiCp	Geometría herramienta [cilíndrica, cónica, cónica roscada] Velocidad avance [mm/min] Velocidad rotación [RPM]	Chinmay Shaha, Bhupesh Goyalb, Vijay Patela
8	A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding	AA6060-T66	Velocidad rotación [RPM] Longitud soldadura [m] Temperatura [°C]	Michael Hasieber, et al
9	Influence of friction stir welding process parameters and statistical behaviour of the novel interlock aluminum alloys joint with SiCp reinforcement	AA7075 AA7475	Velocidad rotación [RPM] Velocidad avance [mm/min] Refuerzo [%]	R. Anand, R. Padmanabhan
10	Experimental investigation of friction stir welding of aluminium alloy	AA6351	Velocidad rotación [RPM]	M. Dilip Kumar, et al
11	Development of bobbin tool and influence of its design parameters on FSW joint	AA6063	Velocidad rotación [RPM] Velocidad avance [mm/min]	Lingaraju Dumpala, P. Harsha Chandra, N. Sriram
12	Experimental investigation on aluminium alloy AA6061 and AA8011 using friction stir welding	AA6061 AA8011	Velocidad rotación [RPM] Velocidad de avance [mm/min] Ángulo de inclinación [°]	S. Sandeep Kumar Rao, et al

N°	TITULO	MATERIAL	VARIABLES CONTROLADAS	AUTORES
13	Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al–Cu joints	AA1060 Cobre puro	Velocidad rotación [RPM] Desplazamiento [mm]	P. Xue, et al
14	Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy	AA6061	Geometría herramienta [cilíndrico, cilíndrico roscado, cónico, cuadrado, triangular] Diámetro del hombro [mm]	K. Elangovan, V. Balasubramanian
15	Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy	AA2219	Geometría herramienta [cilíndrico, cilíndrico roscado, cónico, cuadrado, triangular] Velocidad de rotación [RPM]	K. Elangovan, V. Balasubramanian
16	Investigations on the effects of friction stir welding parameters on intermetallic and defect formation in joining aluminum alloy to mild steel	Al5186 acero	Velocidad avance [mm/min] Profundidad [mm]	M. Dehghani, A. Amadeh, S.A.A. Akbari Mousavi
17	Fatigue life simulation of AA7075-T651 FSW joints using experimental data	AA7075-T651	Velocidad rotación [RPM]	Jafar Langari, Karim Aliakbari, Farhad Kolahan
18	Effect of Tool Pin Positioning Factors on the Strength Behavior of Dissimilar Joints of AA5754-H111 and AA6101-T6 by Using Friction Stir Welding	A5754-H111 AA6101-T6	Velocidad rotación [RPM] Velocidad avance [mm/min] Excentricidad pin [mm]	Premraj Yogaraj, et al
19	Influences of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy	AA6061	Geometría herramienta [cilíndrico, cilíndrico roscado, cónico, cuadrado, triangular] Fuerza axial [kN]	K. Elangovan, V. Balasubramanian, M. Valliappan
20	Effect of welding parameters on weld formation and mechanical properties in dissimilar al alloy joints by FSW	AA5052 AA5J32	Velocidad rotación [RPM] Velocidad avance [mm/min]	Sang-Woo Song, et al
21	Numerical Simulation on the Effect of Friction Stir Welding Parameters on the Peak Temperature, Von Mises Stress, and Residual Stresses of 6061-T6 Aluminum Alloy	AA6061-T6	Velocidad rotación [RPM] Velocidad avance [mm/min]	Noureddine Zina, et al
22	Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy	AA5083	Velocidad rotación [RPM] Velocidad avance [mm/min]	Tomotake Hirata, et al

N°	TITULO	MATERIAL	VARIABLES CONTROLADAS	AUTORES
23	Modelling and pareto optimization of mechanical properties of friction stir welded AA7075/AA5083 butt joints using neural network and particle swarm algorithm	AA7075 AA5083	Velocidad rotación [RPM] Velocidad avance [mm/min]	Mohammad Hasan Shojaeefard, et al
24	Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure	AA6181-T4 HC260LA	Velocidad de rotación [RPM] Velocidad de avance [mm/min] Fuerza axial [kN]	R.S. Coelho, et al
25	Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AA7039 aluminum alloy	AA7039	Velocidad de avance [mm/min] Velocidad de rotación [RPM]	Chaitanya Sharma, Dheerendra Kumar Dwivedi, Pradeep Kumar

Tras la recolección de datos, se llevó a cabo el análisis propuesto en el primer criterio basado en la frecuencia de repetición de cada variable. La tabla 12 de registro de parámetros, proporciona una perspectiva sobre cuáles son los tres parámetros que han sido predominantemente investigados en los 25 artículos tratados. Estos parámetros como son la velocidad de rotación, la velocidad de avance y la geometría de la herramienta.

Tabla 12. Registro de parámetros

REGISTROS DE PARÁMETROS	
PARÁMETRO	CANTIDAD DE REPETICIONES
Velocidad rotación [RPM]	20
Velocidad avance [mm/min]	16
Geometría herramienta [sin especificar]	5
Desplazamiento [mm]	3
Ángulo de inclinación [°]	2
Fuerza axial [kN]	2
Tiempo de soldadura [min]	1
Longitud de soldadura [m]	1
Temperatura [°C]	1
Refuerzo [%]	1
Diámetro del hombro [mm]	1
Profundidad [mm]	1
Excentricidad pin [mm]	1

Para el segundo criterio se utilizó la información recopilada en el marco referencial sobre que variable controlada afecta en mayor medida el proceso de soldadura, de ello se destacaron informes como el artículo “Investigation on effect of FSW parameters of aluminium alloy using Full Factorial Design” el cual estudió las variables controladas de velocidad de rotación, velocidad de avance, desplazamiento y tiempo de soldadura a partir de un diseño factorial completo, determinó a partir del diagrama de Pareto que el parámetro más influyente es la velocidad de avance y a partir de la tabla media de datos que la variable más relevante es la velocidad de rotación.<sup>3</sup>

Por otra parte, el informe de investigación “A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding” señaló que al reducir un 50% la velocidad de rotación de 4000rpm a 2000rpm se conduce a temperaturas de proceso menores y por tanto un menor desgaste que permite aumentar la vida útil de la herramienta hasta en un 150%.<sup>4</sup> Así mismo el artículo “Optimization of FSW parameters for enhancing dissimilar joint strength of AA7050 and AA6061 using Response Surface Methodology (RSM)” definió a partir de los ensayos de tracción realizados que tanto la velocidad de rotación como la velocidad de avance son elementos cruciales en la resistencia a la tracción última de la unión soldada.<sup>5</sup> Finalmente el trabajo de investigación “Tool pin profiles effect on mechanical properties of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys” que evaluó diferentes perfiles para el pin de la herramienta ilustró que la resistencia a la tracción de la soldadura varía dependiendo del tipo de perfil utilizado.<sup>6</sup>

A partir de la revisión de los dos criterios definidos para la selección de las variables controladas se decidió que las variables controladas del proceso serían la velocidad de rotación, velocidad de avance y geometría de la herramienta en base al pin.

---

<sup>3</sup> Prakash, M y Das, Daniel. Investigation on effect of FSW parameters of aluminium alloy using Full Factorial Design. En: Materials Today: Proceedings [ScienceDirect]. Coimbatore: Karpagam Academy of Higher Education, 2021, vol. 37, nro. 2, pp. 608-613.

<sup>4</sup> Hasieber, M, et al. A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding En: Welding in the world [Springer]. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2022, vol, 67, pp. 325-329.

<sup>5</sup> Bhatnagar, S, et al. Optimization of FSW parameters for enhancing dissimilar joint strength of AA7050 and AA6061 using Response Surface Methodology (RSM). En: Materials Today: Proceedings [ScienceDirect]. Meerut: Department of Mechanical Engineering, Vidya College of Engineering, 2013.

<sup>6</sup> Swetha, S y Padhy, C. Tool pin profiles effect on mechanical properties of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. En: Materials Today: Proceedings [ScienceDirect]. Hyderabad: GITAM University, 2023.

## 5.2. NIVELES

Para definir la cantidad de niveles para cada variable controlada y sus respectivos valores se llevó a cabo un análisis con el propósito de encontrar una configuración que permita una mayor vida útil de la herramienta.

5.2.1. Niveles de velocidades: Se determinó que las velocidades contaran con 3 niveles para tener una mayor robustez en determinar cómo estos parámetros afectan la vida útil de la herramienta y con el fin de determinar los valores de los niveles se utilizaron de base dos criterios.

Primer criterio: El primero consideró el rango de velocidades de la fresadora utilizada en el proceso de soldadura.

Segundo criterio: El segundo criterio se fundamentó en la revisión de los artículos investigados, identificando las velocidades más comúnmente utilizadas y aquellas que proporcionan mayores beneficios.

Por el apartado de la Fresadora FU250X1000, se tiene que esta maneja unos rangos de velocidades nominales dados por la ficha técnica, pero, al momento de revisar los valores reales que dictamina la maquina al realizar el proceso de soldadura se tiene un rango de velocidad de rotación de 500RPM a 800RPM y de velocidad de avance de 15mm/min a 30mm/min.

Tabla 13. Revisión de velocidades

REVISIÓN VELOCIDADES			
Nº	VELOCIDAD AVANCE [mm/min]	VELOCIDAD ROTACIÓN [rpm]	CONCLUSIONES RELEVANTES
1	20-40	700-900	Máxima resistencia al impacto a 900 RPM y 20mm/min
2	120-150	1100-1500	El UTS máximo (255,83 MPa) se da a 1500 rpm y 150 mm/min El UTS mínimo (148,58 MPa) se da a 1100 rpm y 120 mm/min
3	150	1200	A 1200 rpm y 150 mm/min se logra una microestructura de grano fino
4	40-200	710-2000	La resistencia a la tracción aumenta con el incremento de la velocidad de rotación de la herramienta
5	120	1600	Sin observaciones relevantes
6	400	600	Sin observaciones relevantes
7	3-14	1110-1750	Sin observaciones relevantes

N°	VELOCIDAD AVANCE [mm/min]	VELOCIDAD ROTACIÓN [RPM]	CONCLUSIONES RELEVANTES
8	500	2000-4000	Al reducir la velocidad de rotación de 4000 RPM a 2000 RPM se disminuyó la temperatura del proceso y se aumentó la vida útil de la herramienta hasta un 150%
9	1440-1800	1000-1400	La UTS máxima se da a una velocidad de rotación de 1400 RPM y 1800mm/min
10	13-15	750-1000	A medida que la velocidad de avance aumenta, se observa una leve reducción en la resistencia a la tracción final, manteniéndose constante el valor de la dureza
11	50-100	600-1000	El máximo UTS de 189MPa se da a 800 RPM y 80 mm/min, además a bajas velocidades de avance y bajas velocidades de rotación, la resistencia a la tracción es baja aumentando hasta un pico y volviendo a reducirse a altas velocidades de avance y altas velocidades de rotación
12	20-40	500-1100	Sin observaciones relevantes
13	100	400-1000	Las propiedades de tracción fueron deficientes a velocidades de rotación bajas, mientras que, a velocidades de rotación más altas, se logró una reacción suficiente, resultando en buenas propiedades de tracción en las uniones
14	75	1200	Sin observaciones relevantes
15	45,6	1500-1700	Las uniones realizadas con una velocidad de rotación de 1600 RPM produjeron mejores propiedades de tracción
16	14-56	355	Al aumentar la velocidad de avance de 14 y 28 mm/min a 40 mm/min redujo la cantidad de compuestos Inter metálicos haciendo que la resistencia a la tracción aumentara de 0 y 29 MPa a 121 MPa
17	20-60	630-1250	El UTS incrementa hasta 1000 rpm, pero decrece más allá de este punto. La mayor dureza se logra con baja velocidad de rotación de la herramienta y alta velocidad de avance
18	20-60	600-1200	Los resultados indican que los parámetros óptimos de soldadura incluyen una velocidad de rotación de la herramienta de 900 RPM y una velocidad de avance de 40 mm/min. El valor máximo de dureza registrado fue de 116 HV bajo estas mismas condiciones.
19	75	1200	Sin observaciones relevantes
20	100-400	1000-1500	Sin observaciones relevantes
21	80-140	600-1400	Las tensiones residuales en el proceso FSW se ven influidas principalmente por la temperatura generada a través de la velocidad de rotación, avance y la mezcla. En particular, se observa que un incremento en la velocidad de avance se correlaciona con un aumento en las tensiones residuales
22	100-200	500-1000	Sin observaciones relevantes

N°	VELOCIDAD AVANCE [mm/min]	VELOCIDAD ROTACIÓN [rpm]	CONCLUSIONES RELEVANTES
23	20-96	500-1600	La unión fabricada con 1400 RPM y 20 mm/min presenta mayores propiedades de resistencia en comparación con otras uniones
24	480	1600	Sin observaciones relevantes
25	75-190	410-635	El incremento de la velocidad de rotación y la disminución de la velocidad de avance reducen la formación de líneas en zigzag. La reducción de la velocidad de rotación y el aumento de la velocidad de avance disminuyen el tamaño medio del grano de aluminio en la pepita de soldadura. Por otro lado, la resistencia a la tracción, el % de alargamiento, la energía absorbida y la eficiencia de la unión disminuyen con la velocidad de soldadura aumentada. En contraste, todos los parámetros de rendimiento de la unión aumentan con la velocidad de rotación incrementada

La Tabla 13 denota el rango de velocidades tanto de rotación como de avance de cada artículo investigado, además presenta aquellas conclusiones relevantes que permitieron determinar los valores de los niveles. Como parámetros para el análisis se tuvieron la dureza y el esfuerzo último a la tracción (UTS). A partir de la revisión de los artículos se definió que, para la velocidad de rotación se diera un rango óptimo entre 500RPM y 800RPM y, por otra parte, la velocidad de avance un rango de 20mm/min a 35mm/min. A partir de los rangos anteriores y las restricciones de velocidades de la fresadora se obtuvieron los valores de los niveles para las velocidades.

5.2.2. Niveles de geometría pin: Se dispuso a limitar el perfil del pin de la herramienta a solo dos niveles para el diseño de experimento, esto debido a la necesidad de simplificar la complejidad experimental. Esta decisión se tomó para facilitar la planificación y ejecución del experimento. Además de simplificar el análisis estadístico, se permite una interpretación más clara de los efectos de los factores de interés en la variable o variables de respuesta. Para definir los valores de los dos niveles de la geometría del pin se dispuso como criterio el determinar cuál es el tipo de perfil más utilizado en temas de investigación y su semejante de perfil roscado o liso dependiendo del caso, con el fin de trabajar un solo tipo de perfil en sus configuraciones posibles, para ello se hizo uso de la información recopilada de los 25 artículos investigados.

Tabla 14. Registro del perfil del pin

TIPOS DE PERFIL EN LA LITERATURA	
PERFIL	CANTIDAD
Cónico liso	19
Cilíndrico liso	11
Cónico roscado	6
Cilíndrico roscado	5
Cuadrado	5
Triangular	3

La Tabla 14 muestra que la configuración de perfil más utilizada en temas de investigación es el pin cónico liso, a partir de este, se decidió utilizar esta configuración en perfil roscado como el segundo tipo de perfil. Finalmente, la Tabla 15 muestra el resumen de la definición para los niveles de las variables controladas de geometría del pin, velocidad de rotación y velocidad de avance.

Tabla 15. Definición de niveles

DEFINICIÓN NIVELES			
NIVEL	PÁRAMETRO		
	Velocidad de avance [mm/min]	Velocidad de rotación [RPM]	Geometría del pin
Nivel 1	25	520	Cónico liso
Nivel 2	30	625	Cónico roscado
Nivel 3	35	720	N/A

### 5.3. VARIABLE DE RESPUESTA

Se determinó que el volumen desgastado medido a partir de la dureza de la herramienta por medio del modelo de Archard sería la variable de respuesta. Lo anterior para definir como el proceso de soldadura afecta al desgaste de la herramienta y además al comprender cómo la dureza actúa como un indicador predictivo, se pueden tomar decisiones informadas sobre mantenimiento preventivo, identificar posibles puntos de debilidad en el proceso y mejorar la calidad general de las soldaduras.

### 5.4. FACTORES DE BLOQUE

En última instancia, se determinaron los factores de bloques o variables constantes que han sido seleccionados para mantener la consistencia y reducir la variabilidad experimental

del proyecto. Estos factores son la longitud de la soldadura y el material de la pieza a soldar. Ambos elementos se han establecido como constantes para cada tratamiento, con el fin de eliminar posibles variaciones relacionadas con ellos.

Por otra parte, la estrategia de mantener constantes ciertos factores no se limitó únicamente a la longitud de soldadura y al material de la pieza. Otros parámetros, como el ángulo de inclinación de la herramienta, también se identificaron como variables de menor relevancia y, por lo tanto, se mantuvieron constantes a lo largo de cada tratamiento experimental.

## 5.5. ALTERNATIVAS

Con la información previa se plantearon diferentes diseños de experimento factorial que incluyan las combinaciones posibles de las variables y niveles anteriormente definidos.

Tabla 16. Definición alternativas del DOE

DEFINICIÓN DOE			
ALTERNATIVAS	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
DISEÑO EXPERIMENTO	Diseño factorial completo 3x3x2	Diseño factorial anidado 3x2	Diseño factorial fraccionado $2^{3-1}$
TRATAMIENTOS	18	6	7
REPLICAS	2	4	4
VARIABLES CONTROLADAS Y NIVELES		FACTORES DE BLOQUE	
Velocidad rotación	3	Longitud de soldadura y material a soldar	
Velocidad avance	3	VARIABLE DE RESPUESTA	
Geometría pin	2	Volumen desgastado en función de dureza	

## 5.6. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Para la disposición de los criterios de selección se plantearon aquellos de mayor relevancia para la realización de un experimento detallado y factible. Los criterios de la factibilidad económica, interacción entre factores y complejidad experimental se utilizan para evaluar cada alternativa de diseño de experimento.

**Factibilidad Económica:** Es la viabilidad financiera y disponibilidad de recursos necesarios para llevar a cabo el experimento, en este caso se reduce al material para la fabricación de la herramienta y en mayor medida al material a soldar, previendo que sus costos se encuentren dentro de los límites del presupuesto establecido. A mayor valor de criterio menor costo económico.

Profundidad de Investigación: Es el nivel de detalle y exhaustividad con el cual se aborda el problema de investigación, teniendo la mayor capacidad de tratamientos posibles entre las tres variables controladas con sus respectivos niveles. A mayor valor de criterio mayor profundidad y capacidad de análisis.

Complejidad experimental: Es el nivel de intrincación y dificultad asociado con la planificación, ejecución y análisis del diseño de experimento factorial. A mayor valor de criterio menor su complejidad y por ende dificultad.

## 5.7. ELECCIÓN Y DETALLE DE ALTERNATIVA

Tabla 17. Selección del DOE

SELECCIÓN DE ALTERNATIVA				
CRITERIO	VALOR CRITERIO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
Factibilidad económica	0,35	3,9	4,2	4,2
Profundidad de investigación	0,45	4,8	3,5	3,6
Complejidad experimental	0,2	3,8	4,1	4,3
Total	1	4,285	3,865	3,950

A partir de la Tabla 17 se definió como diseño de experimento factorial para la investigación, el diseño factorial completo 3x3x2 que brinda mayor profundidad a la investigación, aunque su factibilidad económica sea menor que las otras alternativas y su complejidad experimental tenga mayor dificultad, la Tabla 18 muestra todos los tratamientos del diseño de experimento elegido según los niveles de las variables controladas definidas, con la aclaración que cada tratamiento cuenta con dos replicas.

Tabla 18. Definición de tratamientos

DEFINICIÓN TRATAMIENTOS			
Tratamiento	Nivel de velocidad avance	Nivel de velocidad rotación	Nivel de geometría pin
Tr.1	1	1	1
Tr.2	1	1	2
Tr.3	1	2	1
Tr.4	1	2	2

Tratamiento	Nivel de velocidad rotación	Nivel de velocidad avance	Nivel de geometría pin
Tr.5	1	3	1
Tr.6	1	3	2
Tr.7	2	1	1
Tr.8	2	1	2
Tr.9	2	2	1
Tr.10	2	2	2
Tr.11	2	3	1
Tr.12	2	3	2
Tr.13	3	1	1
Tr.14	3	1	2
Tr.15	3	2	1
Tr.16	3	2	2
Tr.17	3	3	1
Tr.18	3	3	2

## 6. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA HERRAMIENTA

### 6.1. METODOLOGIA DE DISEÑO

La herramienta se dividió en tres secciones según su función como se explicó en el marco teórico; cuerpo, hombro y pin. El dimensionamiento de la herramienta se apoyó en dos criterios de diseño principales.

Primer criterio principal: El primer criterio son las delimitaciones geométricas que presenta la fresadora y el cono portaherramientas, el cual es una de las maneras que se utiliza comúnmente para realizar el dimensionamiento de dicha herramienta.

Segundo criterio principal: Como segundo criterio se definió el artículo “Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys” que propone ecuaciones para diseñar el hombro y el pin para herramientas FSW a partir del tipo de aluminio a soldar y el espesor de la lámina, el cual posee una base de más de 80 fuentes y 200 ensayos, lo que brinda una base sólida para el dimensionamiento de la herramienta basándose en investigaciones anteriores.<sup>7</sup> Es importante aclarar que el segundo criterio de diseño se centra en expresiones que únicamente abarcan las dimensiones básicas de la herramienta: longitud del hombro, diámetro y longitud del pin. En consecuencia, aspectos adicionales como las características del hombro se determinaron mediante las tendencias identificadas en la revisión de la literatura.

### 6.2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Antes de dimensionar la herramienta se tuvieron en disposición una serie de restricciones y criterios asociados, los cuales se utilizaron para el adecuado diseño de la herramienta.

6.2.1. Criterios del cuerpo: El cuerpo de la herramienta debía ser superior a 40mm de longitud para que la pinza del cono pudiera sujetarlo firmemente. Además de lo anterior para su dimensionamiento se utilizó el primer criterio principal o de manera más específica las dimensiones del cono portaherramientas y la versatilidad del banco en el eje vertical.

6.2.2. Criterios del hombro: Con respecto al hombro, se tiene que existen diferentes configuraciones como se evidencia en el marco teórico, sin embargo, en la revisión del

---

<sup>7</sup> Hoyos, E y Serna, M. Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. En: Metals [MDPI]. Envigado: Department of Mechanical Engineering, Universidad EIA, 2021, vol 11.

marco referencial se observó que para soldadura de unión a tope se utiliza generalmente el hombro plano puesto que permite una adecuada área de contacto entre la herramienta y la lámina a soldar, permitiendo una favorable generación de fricción y por ende, aumento de temperatura sin incurrir en un diseño complejo para la herramienta; por otra parte, el perfil cóncavo que permite almacenar el material plastificado introducido entre los hombros, hace obligatorio la inclinación de la herramienta en un valor alrededor de los 2°, lo cual limita el control de penetración y puede generar un canal en la junta, por ende se decidió prescindir de esta configuración.

Así mismo, el perfil convexo que elimina la necesidad de inclinar la herramienta y ayuda a mantener un contacto continuo con la superficie de la placa, es utilizado para casos donde el espesor de la lámina varía continuamente, pero como en este caso la soldadura se realizó para láminas de espesor constante se descartó este tipo de perfil. Es así como se decidió la configuración del hombro plano, finalmente, para su diseño se empleó el segundo criterio principal definido en la metodología.

6.2.3. Criterios del pin: Para el proyecto se da la utilización de dos configuraciones distintas para la geometría de la herramienta, específicamente en el diseño del pin de soldadura. Estas configuraciones comprenden un pin de tipo cónico liso y cónico roscado. En este punto se descartó la implementación de un diseño que permita la intercambiabilidad de los pines para una sola herramienta. Esta decisión se basó en la consideración de que la adopción de tal enfoque incrementaría de gran manera la complejidad del diseño, la fabricación de la herramienta y, en última instancia, los costos asociados.

En consecuencia, la estrategia que se adoptó consiste en diseñar dos herramientas de igual cuerpo y hombro, diferenciándolas únicamente mediante la variación de la configuración del pin, de acuerdo con las configuraciones anteriores. Este método, se eligió para hacer el diseño y la fabricación más efectivo. Al mismo tiempo, asegura que la herramienta se adapte de manera precisa a los requerimientos sin incurrir en una complejidad innecesaria. Al igual que el hombro, el pin se diseñó a partir de del segundo criterio principal de la metodología con ciertas salvedades.

### 6.3. DIMENSIONAMIENTO

El dimensionamiento de la herramienta se realizó iniciando por el hombro y el pin, a su vez, como se determinó en las consideraciones de diseño, se diseñaron dos herramientas a partir de los criterios especificados anteriormente. Para esto se debió tener presente que, el material de la lámina a soldar es aluminio 6063-T5 donde el magnesio y el silicio son las principales aleaciones y que el espesor de la lámina a soldar es de 6mm. Mas información del material de la lámina en el Anexo B.

Tabla 19. Ecuaciones dimensionamiento de hombro y pin

Series	Tool Feature	Equation
2XXX	Shoulder diameter	$y = 1.0449x + 13.156$
	Pin diameter	$y = 0.3945x + 6.1592$
	Pin length	$y = 0.9663x + 0.0602$
5XXX	Shoulder diameter	$y = 1.9129x + 7.5079$
	Pin diameter	$y = 0.1811x + 5.5237$
	Pin length	$y = 0.9894x - 0.1755$
6XXX	Shoulder diameter	$y = 1.3412x + 10.726$
	Pin diameter	$y = 0.6837x + 2.5443$
	Pin length	$y = 0.9732x - 0.2093$
7XXX	Shoulder diameter	$y = 1.1311x + 11.291$
	Pin diameter	$y = 0.6231x + 2.1772$
	Pin length	$y = 0.9464x - 0.0566$

Fuente: Hoyos, E y Serna, M. Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys

A partir de la Tabla 19, se seleccionaron las ecuaciones para dimensionar el diámetro del hombro, el diámetro del pin y la longitud del pin. Estas ecuaciones específicas se disponen en función de la serie de aluminio seleccionado para el proceso de soldadura, para este caso la serie 6XXX. Una vez se establecieron las ecuaciones, se procedió al cálculo de las dimensiones de la herramienta, donde la variable 'x' es el espesor de la lámina a soldar.

Las ecuaciones no arrojan un valor determinado para la longitud del hombro, puesto que este parámetro no cuenta con mayor relevancia para la aplicación principal del hombro de calentar las láminas a soldar, ya que este proceso es realizado por la cara en contacto, debido a esto se determinó que la longitud del hombro para cuestiones de diseño presente la misma longitud que el espesor de las láminas a soldar de 6mm.

$$\text{Longitud del hombro} = \text{Espesor lamina a soldar [mm]}$$

$$\text{Longitud del hombro} = 6 \text{ [mm]}$$

Así mismo, las ecuaciones arrojan un valor único para el diámetro del pin que, aunque es suficiente para pines cilíndricos, no cumple con los requisitos para pines cónicos que necesitan de un diámetro mayor y menor. Al buscar otra metodología de dimensionamiento para esta configuración del pin se denotó la falta de información en la literatura con respecto a métodos para dimensionar por completo dicho elemento, un ejemplo es el artículo “Optimización del diseño y fabricación de herramienta con pin cónico roscado para soldadura por fricción-agitación” que es lo más cercano encontrado para dimensionar el pin cónico, este artículo propone un modelo de dimensionamiento para pines cónicos y aunque propone un modelo para determinar el diámetro del pin, solo especifica el cálculo para el diámetro mayor<sup>8</sup>.

Debido a esto se decidió optar por un modelo en el cual el diámetro del pin dado por el segundo criterio principal fuera el diámetro mayor de los pines cónicos, lo anterior con el fin de guardar la coherencia en el diseño, puesto que, caso contrario, se daría que el pin se sobredimensione y no cumpla con su función de agitación del material. Respecto al diámetro menor del pin se realizó una revisión de los artículos investigados donde se utilicen pines cónicos con el fin de encontrar una relación de diámetros con respecto al ángulo con el fin de determinar el diámetro menor.

Tabla 20. Recopilación de información de diámetros del pin

RELACION DE DIAMETROS		
N° ARTICULO	DIAMETRO MAYOR PIN CÓNICO [mm]	DIAMETRO MENO PIN CÓNICO MENOR [mm]
1	Sin información	Sin información
3	6	3,6
6	10	7
7	6	Sin información
8	6	Sin información
10	Sin información	Sin información
12	6	3
14	6	Sin información
15	6	Sin información
17	8	6
19	6	Sin información
23	10	5
25	6	4

<sup>8</sup> Carrasco, J, et al. Optimización del diseño y fabricación de herramienta con pin cónico roscado para soldadura por fricción-agitación. En: Revisas Udistrital [En línea]. Bogotá, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2013.

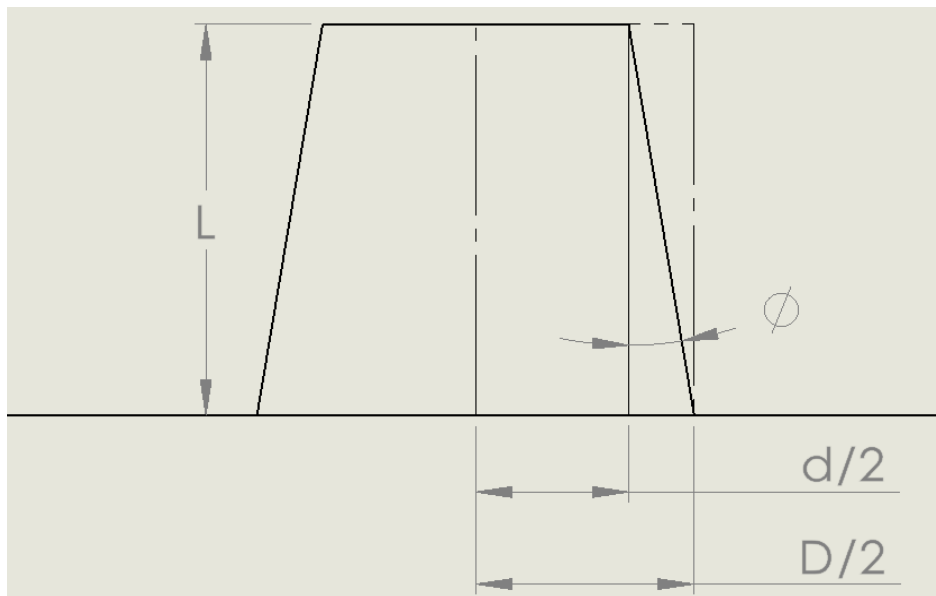
Tabla 21. Relación de ángulos para pin cónico

RELACION DE ÁNGULOS				
N° ARTICULO	D [mm]	d [mm]	L [mm]	φ [°]
3	6	3,6	4,6	14,621
6	10	7	9,2	9,260
12	6	3	5,8	14,500
17	8	6	6	9,462
23	10	5	5,85	23,139
25	6	4	4,7	12,011
Relación de ángulos promedio				13,832
Desviación estándar de ángulo [°]				5,119

A partir de la Tabla 21 se determinó la relación en ángulo de los diámetros mayor y menor para los pines cónicos. Donde se denota que la relación de ángulos es de 13,832° con una desviación estándar de 5,119°. A partir de esta relación es posible determinar el diámetro menor del pin.

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

Figura 16. Relación ángulo y diámetro



Con lo anterior definido se realizó el cálculo preliminar matemático de las dimensiones de la herramienta para hombro y pin, partiendo de las ecuaciones de la Tabla 19 y la relación de diámetros del pin determinada, contando con parámetros de espesor de 6mm y material a soldar aluminio 6063-T5.

$$\text{Diámetro hombro preliminar} = 1,3412(x) + 10,726 \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro hombro preliminar} = 1,3412(6) + 10,726 \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro hombro preliminar} = 18,7732 \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro mayor pin preliminar} = 0,6837(x) + 2,5443 \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro mayor pin preliminar} = 0,6837(6) + 2,5443 \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro mayor pin preliminar} = 6,6465 \text{ [mm]}$$

$$\text{Longitud pin preliminar} = 0,9732(x) - 0,2093 \text{ [mm]}$$

$$\text{Longitud pin preliminar} = 0,9732(6) - 0,2093 \text{ [mm]}$$

$$\text{Longitud pin preliminar} = 5,6299 \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro menor pin preliminar} = D - 2L * \text{Tan}(\varnothing) \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro menor pin preliminar} = 6,6465 - 2 * 5,6299 * \text{Tan}(13,832) \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro menor pin preliminar} = 3,9678 \text{ [mm]}$$

Tabla 22. Comparación de dimensionamiento hombro y pin

Tool Feature	Equation	Objective	Real	Error
Shoulder diameter	$y = 1.3412x + 10.726$	19.43	16	21.44%
Pin diameter	$y = 0.6837x + 2.5443$	6.99	8	12.65%
Pin length	$y = 0.9732x - 0.2093$	6.12	5.8	5.46%

Fuente: Hoyos, E y Serna, M. Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys

La Tabla 22 presenta un análisis del porcentaje de error en las dimensiones de la herramienta, comparando las directrices de diseño con los resultados experimentales obtenidos por otros investigadores específicamente para la serie 6XXX. El mayor porcentaje de error o de discrepancia se observa en las dimensiones del hombro de la herramienta, alcanzando un valor del 21,44%. En contraste, los porcentajes de error para la longitud y el diámetro del pin son inferiores al 13%.

Este análisis sugiere que las directrices propuestas de diseño basadas en el criterio de investigación no son específicamente estrictas, permitiendo la consideración de un rango

de valores que se adaptaron con el fin de obtener una facilidad de fabricación. El diámetro del hombro y los diámetros del pin se aproximaron a su entero más cercano.

$$\text{Diámetro hombro} = 19 \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro mayor pin} = 6,5 \text{ [mm]}$$

$$\text{Diámetro menor pin} = 4 \text{ [mm]}$$

Por otra parte, la longitud del pin se había establecido en  $5,5\text{mm}$  en base a facilidad para el proceso de fabricación. Sin embargo, se consideró necesario agregar una longitud adicional de  $0,2\text{mm}$  para compensar la pérdida de material dada durante el proceso de pulido para las mediciones de microdureza.

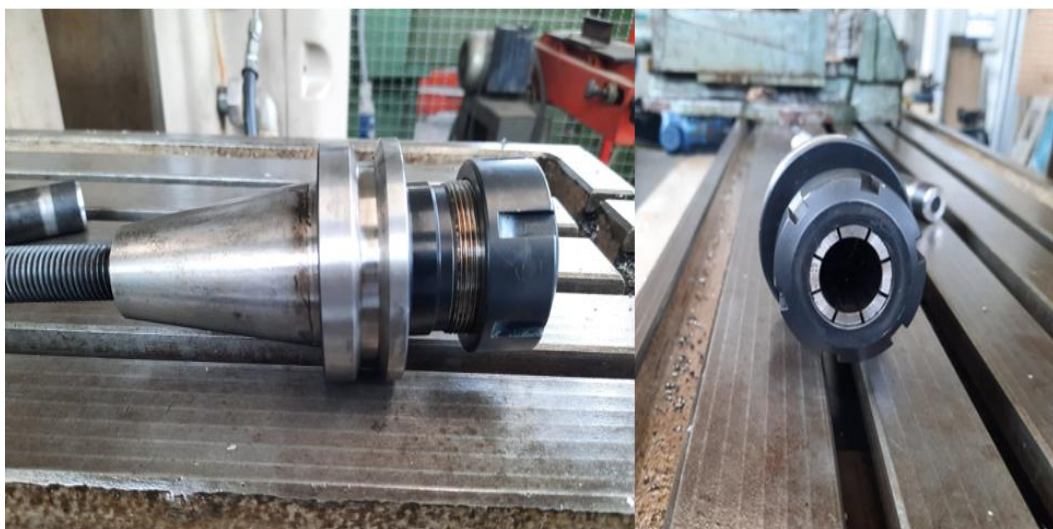
$$\text{Longitud pin sin adicional} = 5,5 \text{ [mm]}$$

$$\text{Longitud pin} = \text{Longitud sin adicional} + \text{longitud adicional [mm]}$$

$$\text{Longitud pin} = 5,7 \text{ [mm]}$$

Así mismo, para el dimensionamiento del cuerpo se resolvió que el diámetro se diera en función del cono portaherramientas puesto que este alberga internamente al cuerpo para su respectiva sujeción. En la Figura 17 se observa el cono portaherramientas de referencia BT40-ER32-70 el cual cuenta con un diámetro de sujeción adaptable de  $2\text{mm}$  a  $20\text{mm}$  lo que determinó el diámetro del cuerpo en un valor de  $20\text{mm}$ . Para información adicional del cono portaherramientas, dirigirse al Anexo C.

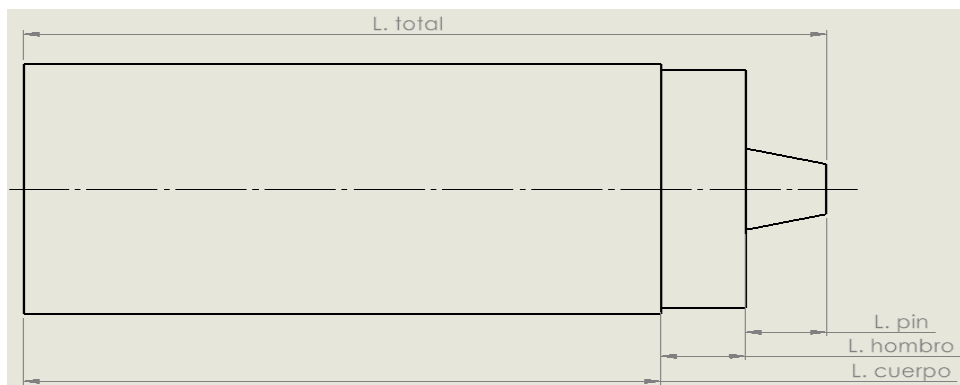
Figura 17. Cono portaherramientas BT40-ER32-70



$$\text{Diámetro cuerpo} = 20 \text{ [mm]}$$

La determinación de la longitud del cuerpo se basó en la variación de altura del banco, que se estableció en 200 mm según indica la ficha técnica de la fresadora en la guía de movimiento del eje Y. Este valor impuso una restricción superior para la longitud del cuerpo, considerando además la necesidad de restar la longitud del hombro y del pin. Por otra parte, las restricciones generales disponen de un mínimo de cuerpo de 40mm, a partir de esto se decidió tomar un valor de 45mm con el fin de tener un margen para que la herramienta quedara bien asegurada dentro del cono portaherramientas.

Figura 18. Dimensionamiento de longitud cuerpo



$$L. \text{ cuerpo} = 45 \text{ [mm]}$$

$$L. \text{ Total} = L. \text{ cuerpo} + L. \text{ hombro} + L. \text{ pin [mm]}$$

$$L. \text{ Total} = 45 + 6 + 5,7 \text{ [mm]}$$

$$L. \text{ Total} = 56,7 \text{ [mm]}$$

Tabla 23. Dimensiones de la herramienta

DIMENSIONES DE LA HERRAMIENTA		
Medidas [mm]	Pin cónico liso	Pin cónico roscado
Diámetro mayor pin	6,5	6,5
Diámetro menor pin	4	4
Longitud pin	5,7	5,7
Diámetro hombro	19	19
Longitud hombro	6	6
Diámetro cuerpo	20	20
Longitud cuerpo	45	45
Longitud herramienta	56,7	56,7
Rosca	N/A	M6,5X1

#### 6.4. MATERIAL

Para el material de la herramienta se utilizó acero para herramienta de trabajo en caliente, este tipo de acero es diseñado para resistir condiciones de trabajo a altas temperaturas, haciendo de este un material conveniente para el proceso de soldadura FSW.

Se trabajó con acero para herramienta de trabajo en caliente DIN 1.2344 EFS (AISI H13) de la empresa Cia. General de Aceros S.A. Este acero aleado con cromo, molibdeno y un 1% de vanadio, tiene buena resistencia y tenacidad a altas temperaturas, haciéndolo que sea ideal para enfrentar esfuerzos térmicos intensos, además la preservación eficaz de propiedades mecánicas a temperaturas elevadas lo convierte en una clara opción para prevenir fallas prematuras y prolongar la durabilidad de la herramienta. la Tabla 24 muestra la composición del material, mientras que la Tabla 25 describe el coeficiente de expansión térmica. Para ver la ficha técnica del material de la herramienta dirigirse al anexo D.

Tabla 24. Composición química acero 1.2344 EFS

COMPOSICIÓN QUÍMICA				
C%	Si%	Cr%	Mo%	V%
0.4	1.0	5.3	1.4	1.0

Fuente: Cía. General de aceros. Cédula material DIN 1.2344 EFS

Tabla 25. Coeficiente expansión térmica acero 1.2344 EFS

COEFICIENTE EXPANSIÓN TÉRMICA $10^{-6}$ [m/m-K]						
20-100°C	20-200°C	20-300°C	20-400°C	20-500°C	20-600°C	20-700°C
10,9	11,9	12,3	12,7	13	13,3	13,5

Fuente: Cía. General de aceros. Cédula material DIN 1.2344 EFS

#### 6.5. FABRICACIÓN

El proceso de fabricación de la herramienta partió de una barra del material de dimensiones iniciales de 50cm metro de largo y un diámetro de 1in, de donde se separó la sección a mecanizar en base a la longitud de la herramienta anteriormente definida, luego se siguió con el torneado para el dimensionamiento. Este proceso de mecanizado implica la rotación de la barra a alta velocidad mientras que una herramienta de corte se desplaza longitudinalmente a lo largo de su superficie, eliminando material para dar forma al cuerpo de la herramienta. La fabricación de la herramienta se realizó en el taller de máquinas herramientas de la Escuela de Ingeniería Mecánica UIS. Las Tablas 26 y 27 muestran las hojas de rutas para la fabricación de cada herramienta respectivamente.

Tabla 26. Hoja de ruta fabricación herramienta pin liso

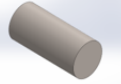
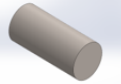
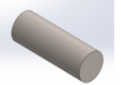
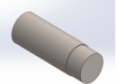
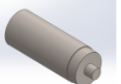
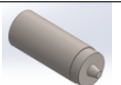
HOJA DE RUTA								
Proceso	Fabricación de herramienta FSW de pin liso							
Material	Acero 1.2344 EFS							
Dimensiones iniciales			Longitud	50	Unidad	cm		
			Diámetro	1	Unidad	in		
Orden	Operación	Maquina	Herramienta	Vc [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	Tiempo total [min]	Referencia
1	Tronzado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de tronzado	70	0,25	12,7	5	
2	Refrentado		Herramienta de refrentado	120	0,05	2	1	
3	Cilindrado uno		Herramienta de cilindrado	120	0,4	2,7	4	
4	Cilindrado dos		Herramienta de cilindrado	110	0,4	0,5	3	
5	Cilindrado tres		Herramienta de cilindrado	100	0,4	6,25	5	
6	Torneado cónico		Herramienta de cilindrado	20	0,05	1,25	10	

Tabla 27. Hoja de ruta fabricación herramienta pin roscado

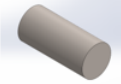
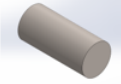
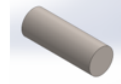
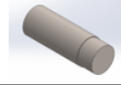
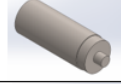
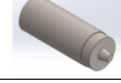
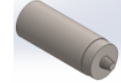
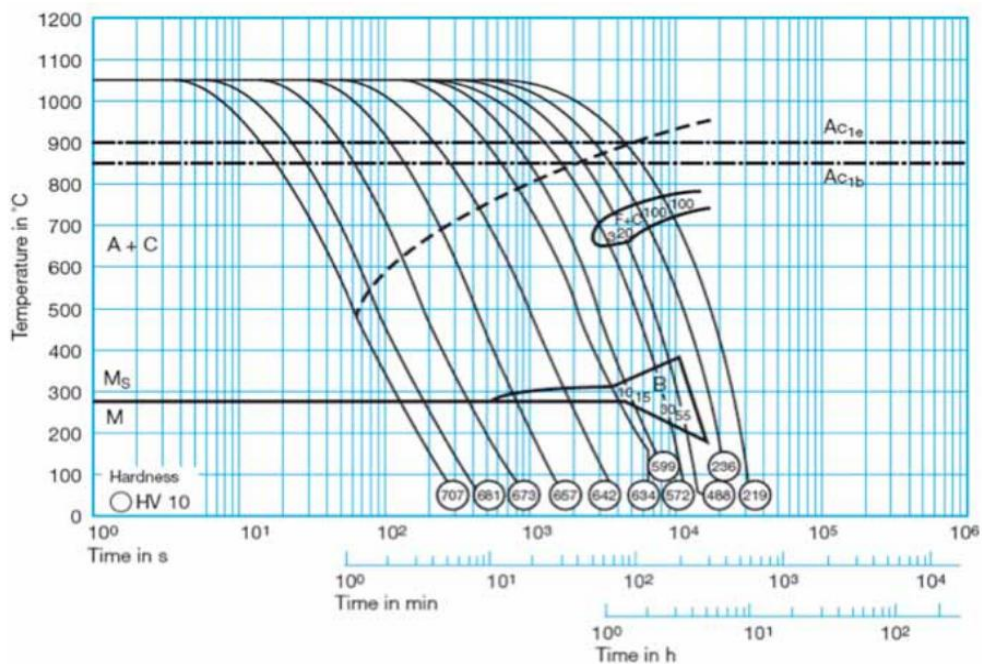
HOJA DE RUTA								
Proceso	Fabricación de herramienta FSW de pin roscado							
Material	Acero 1.2344 EFS							
Dimensiones iniciales			Longitud	44	Unidad	cm		
			Diámetro	1	Unidad	in		
Orden	Operación	Maquina	Herramienta	Vc [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	Tiempo [min]	Referencia
1	Tronzado	Torno universal MOMAC 200	Herramienta de tronzado	70	0,25	12,7	5	
2	Refrentado		Herramienta de refrentado	120	0,05	2	1	
3	Cilindrado uno		Herramienta de cilindrado	120	0,4	2,7	4	
4	Cilindrado dos		Herramienta de cilindrado	110	0,4	0,5	3	
5	Cilindrado tres		Herramienta de cilindrado	100	0,4	6,25	5	
6	Torneado cónico		Herramienta de cilindrado	20	0,05	1,25	10	
7	Roscado		Herramienta de roscado	20	1	0,05	15	

Figura 19. Herramientas



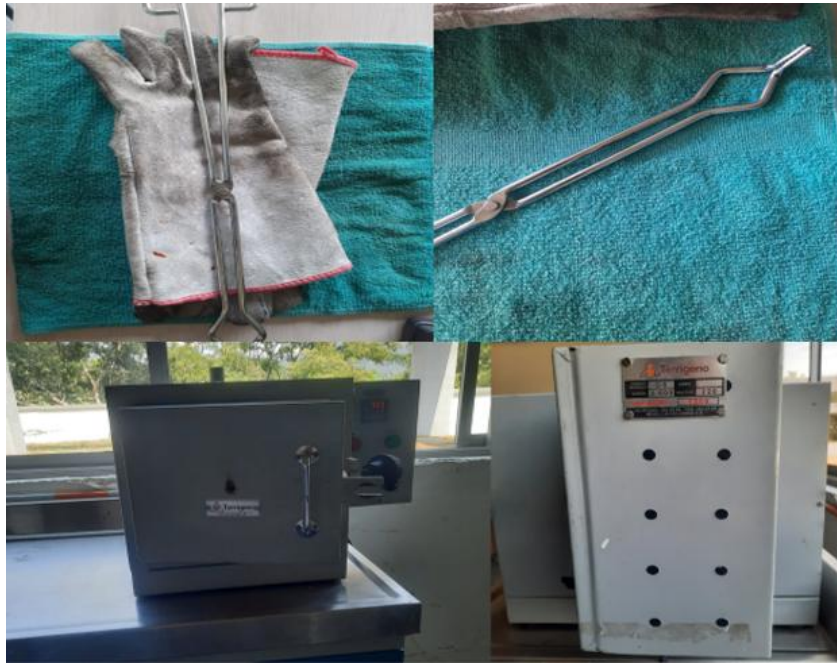
Se aplicó un tratamiento térmico de temple a las dos herramientas FSW. El temple comprende un proceso controlado de calentamiento y enfriamiento con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas en especial la dureza obteniendo microestructura de martensita. El tratamiento se realizó en el laboratorio 314 de la Escuela de Ingeniería Mecánica por medio de la mufla D8 de la marca Terrigeno que posee una temperatura máxima de 1200°C.

Figura 20. Diagrama TTT material herramienta



Fuente: Cédula acero herramientas 1.2344 EFS

Figura 21. Elementos de protección y mufla D8



Los parámetros para el proceso fueron una temperatura de temple de  $1035^{\circ}\text{C}$  con un tiempo de temple de 15 minutos y otros 15 minutos para su enfriamiento en aceite. Para el proceso de temple se hizo necesario la utilización de guantes térmicos, gafas y de una pinza, con el fin de manipular la herramienta al ingresarla y extraerla del horno. Se inició con la configuración de la mufla para alcanzar la temperatura deseada, la cedula del material presenta una temperatura de temple de  $1020^{\circ}\text{C}$  a  $1050^{\circ}\text{C}$ , en este caso se tomó  $1035^{\circ}\text{C}$  que se encuentra en el centro del rango dispuesto. Luego de que la mufla alcanzaba la temperatura deseada se daba un tiempo de 5 minutos para que la cámara se estabilizara, procedente a esto se ingresaba la herramienta y se ubicaba por el tiempo de temple especificado. Después de este período, la herramienta se retiraba de la mufla y se sumergía en aceite para su enfriamiento, asegurándose de que la herramienta no permaneciera estática dentro del fluido durante el tiempo de enfriamiento. El mismo proceso se realizó para ambas herramientas.

Se procedió a realizar una verificación del proceso de temple mediante la medición de la microdureza a cada herramienta antes y después del proceso de temple. Para ello se utilizó la norma ASTM E384-22 y las medidas se realizaron en la cara plana del pin. Se utilizó un indentador piramidal con forma de base rómbica y ángulo de  $136^{\circ}$  para generar impresiones en forma de pirámide. Se midieron las diagonales de estas impresiones y se calculó la microdureza Vickers utilizando la ecuación de la sección 3.9 del marco teórico.

Tabla 28. Microdureza temple pin cónico liso

HERRAMIENTA PIN CÓNICO LISO			
ANTES DEL TEMPLE		POSTERIOR AL TEMPLE	
Carga [kgf]	1	Carga [kgf]	1
Tiempo [s]	15	Tiempo [s]	15
Cantidad de muescas	5	Cantidad de muescas	5
RESULTADOS			
$\Sigma D_m$ [mm]	0,1466	$\Sigma D_m$ [mm]	0,0584
$\sigma D_m$ [mm]	0,0009	$\sigma D_m$ [mm]	0,0009
$\Sigma HV$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	175,9363	$\Sigma HV$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	544,08
$\sigma HV$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	2,1541	$\sigma HV$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	9,3836
175,9363 HV		544,08 HV	

Tabla 29. Microdureza temple pin cónico roscado

HERRAMIENTA PIN CÓNICO ROSCADO			
ANTES DEL TEMPLE		POSTERIOR AL TEMPLE	
Carga [kgf]	1	Carga [kgf]	1
Tiempo [s]	15	Tiempo [s]	15
Cantidad de muescas	5	Cantidad de muescas	5
RESULTADOS			
$\Sigma D_m$ [mm]	0,1466	$\Sigma D_m$ [mm]	0,0582
$\sigma D_m$ [mm]	0,0008	$\sigma D_m$ [mm]	0,0008
$\Sigma HV$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	176,0052	$\Sigma HV$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	546,63
$\sigma HV$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	1,9248	$\sigma HV$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	8,2101
176,0052 HV		546,63 HV	

La norma indica que la fuerza máxima es de 1kgf y que el tiempo máximo es de 15 segundos, por otra parte. Se distribuyeron las muescas como se denota en la Figura 22 para cumplir con la distancia requerida entre dos muescas y la distancia de la muesca con el borde. Con el fin de verificar lo anterior se calculó la distancia mínima recomendada por la norma que es 2.5 la diagonal media de la muesca como se muestra en la Figura 23.

Para ello se tomó la diagonal media de mayor valor, dada en ambas herramientas antes del temple y se definió que la distancia de la diagonal media máxima es menor a la distancia definida de separación 1mm. La Figura 24 muestra la muesca desde el microscopio.

$$D_m = 0,1466mm$$

$$D_m = 0,1466mm * 2,5 = 0,3665mm$$

Figura 22. Distribución de muescas para dureza

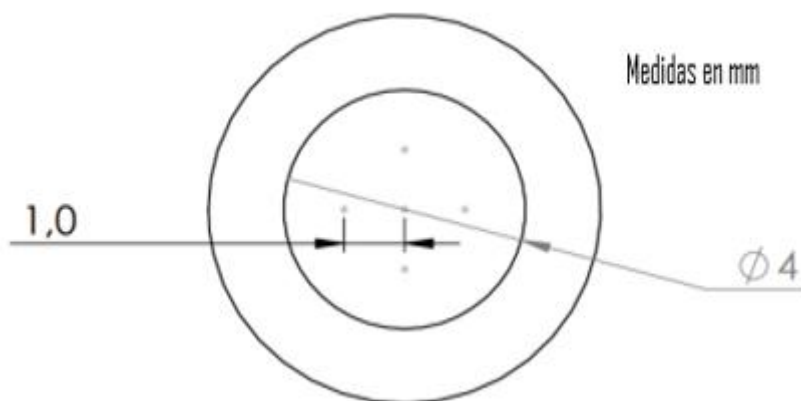
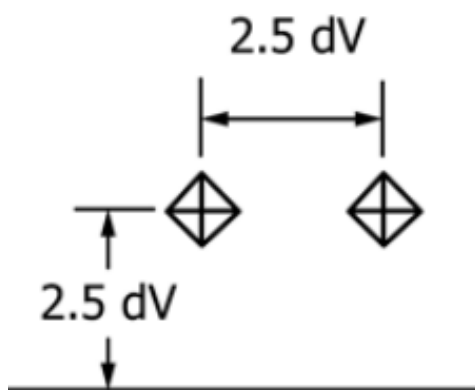
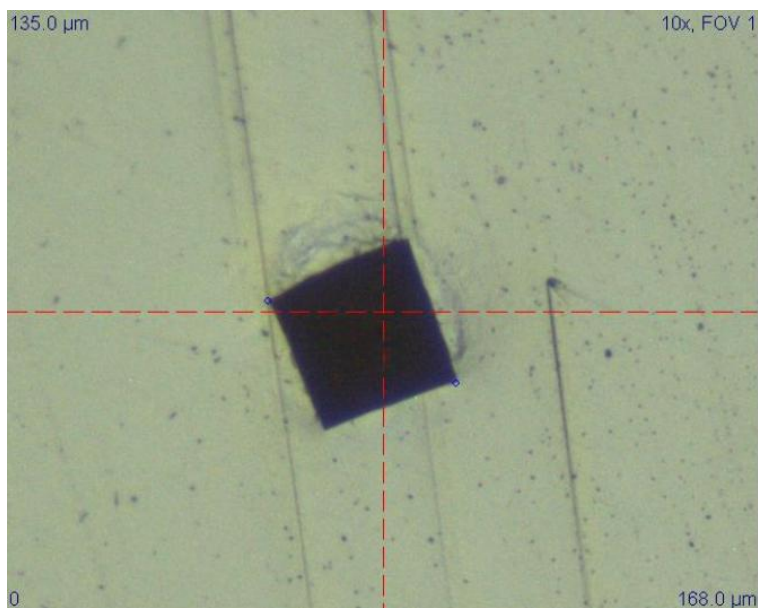


Figura 23. Distancia mínima entre muescas



Fuente: ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. E384 – 22

Figura 24. Muesca desde microscopio (X10)



La comparación entre los valores de dureza obtenidos y los pronosticados por el diagrama TTT del material muestran una diferencia, puesto que la dureza observada es inferior a la proyectada por el diagrama, esto se podría deber a diferentes factores como por ejemplo que la mufla no mantenía la temperatura de temple estable y durante el proceso descendió a valores inferiores del necesario o efectos del error humano, sin embargo, los valores obtenidos presentan un aumento de la dureza que permite su mayor durabilidad al realizar el proceso de soldadura FSW.

Figura 25. Herramientas después del temple



## 6.6. EVALUACION

Con el propósito de verificar la eficacia del diseño de la herramienta, se llevó a cabo un análisis de esfuerzos por medio de simulación, donde se validó que la herramienta presenta un comportamiento adecuado al no sufrir deformaciones que comprometieran su uso en el proceso de soldadura. Los resultados de este análisis pueden consultarse en el Anexo E. Además, se realizaron pruebas físicas para cada una de las herramientas con el fin de evaluar su capacidad para ejecutar correctamente el proceso de soldadura. La Figura 26 muestra una de las soldaduras realizadas con el pin roscado, la cual muestra una adecuada ejecución al evidenciar la correcta unión de ambas láminas, estas pruebas se realizaron con los parámetros de velocidades que se seleccionaron en el capítulo anterior.

Figura 26. Soldadura FSW con la herramienta



El proyecto “Influencia de los parámetros en las propiedades mecánicas de juntas soldadas de aluminio A6061 por soldadura por fricción-agitación” evidenció, mediante ensayos de tracción y dureza, que la herramienta diseñada permite obtener soldaduras mecánicamente confiables.<sup>9</sup> Por otra, parte, la investigación “A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding” determinó que una herramienta de acero AISI H13 fue capaz de producir cordones de soldadura de calidad en láminas A6060-T66 de 5 mm de espesor, manteniendo propiedades mecánicas favorables en la soldadura hasta más de 50m de longitud. Los resultados respaldan que herramientas semejantes, bajo condiciones análogas, pueden producir cordones de soldadura similares con buen comportamiento mecánico.<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> Martínez, Juan y Osorio, Danilo. Influencia de los parámetros en las propiedades mecánicas de juntas soldadas de aluminio a6061 por soldadura por fricción-agitación. Universidad Industrial de Santander.

<sup>10</sup> Hasieber, M. et al. Op. Cit.

## 6.7. DISEÑO DE DETALLE

Figura 27. Plano herramienta pin liso

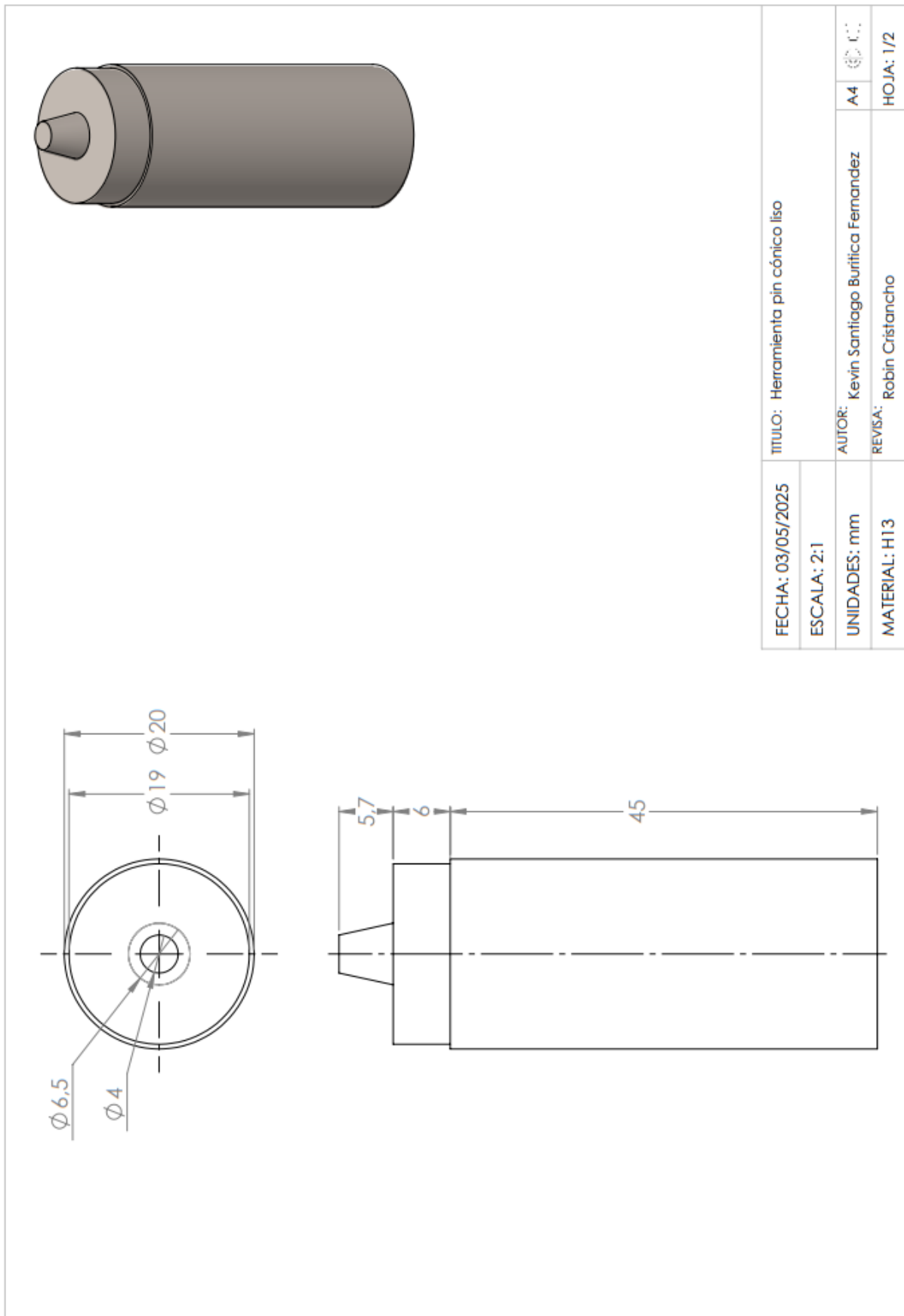
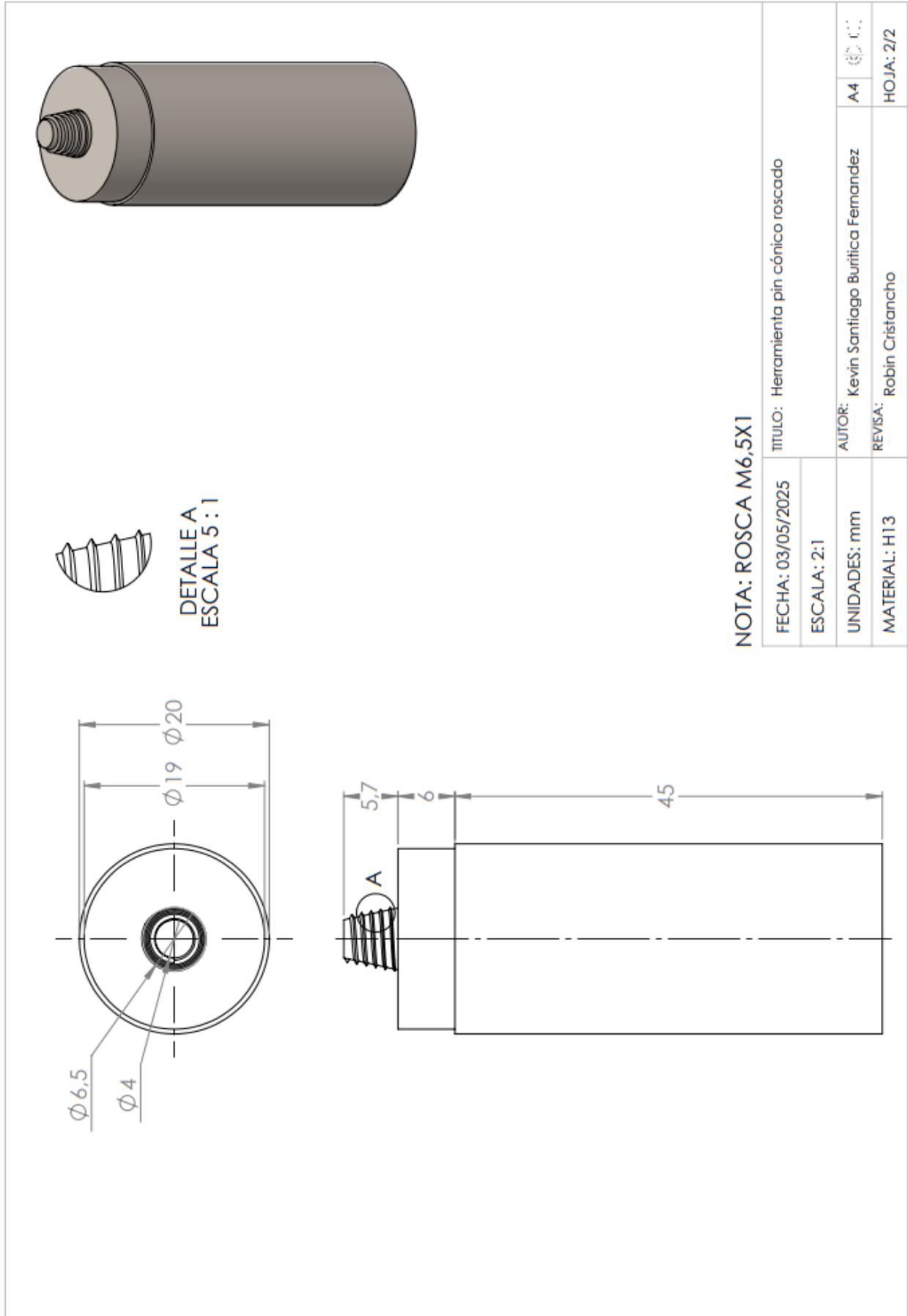


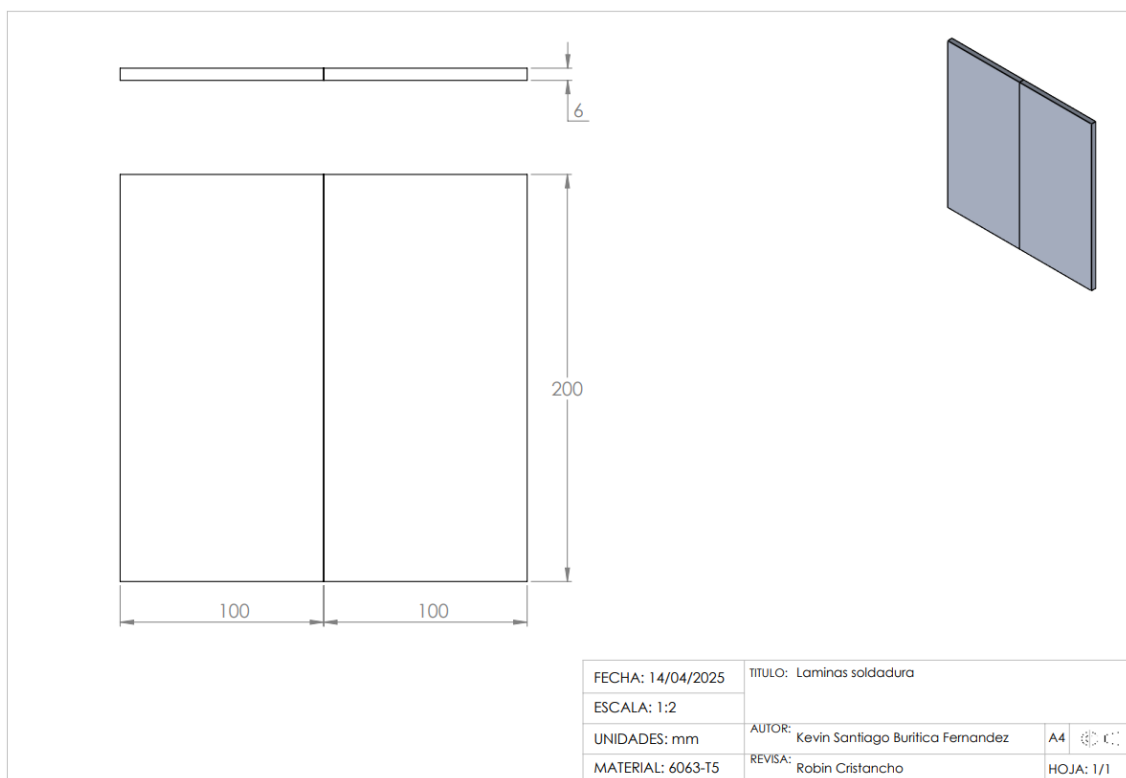
Figura 28. Plano herramienta pin roscado



## 7. EVALUACIÓN DE DESGASTE DE LA HERRAMIENTA

La herramienta se desgastó por medio de la realización de la soldadura a láminas de aluminio 6063-T5 de 200mm de largo, 100mm de ancho y 6mm de espesor dadas a partir de una lámina de 6m de largo y 1m de ancho.

Figura 29. Plano laminas



### 7.1. METODOLOGÍA DE DESGASTE

La metodología de evaluación del desgaste de las herramientas se basó en la disminución de la dureza para el cálculo del volumen desgastado en función de la longitud soldada. Este fue un procedimiento metódico que incluyó la preparación y ejecución del proceso de soldadura. El procedimiento comenzó con el montaje de láminas de aluminio de 6 mm de espesor como se muestra en la Figura 29 y el ajuste de los parámetros según el tratamiento. Posteriormente, se realizó la soldadura a lo largo de 200mm, repitiéndose el proceso para completar una longitud total de 400 mm por tratamiento. Los tratamientos experimentales se ejecutaron en orden aleatorio, con el fin de minimizar la influencia de factores no controlados. La Tabla 30 muestra el orden en que se llevaron a cabo los tratamientos experimentales.

Figura 30. Montaje laminas



Tabla 30. Orden realización tratamientos

ORDEN REALIZACION TRATAMIENTOS				
Tratamiento	Replica	Nivel de velocidad avance	Nivel de velocidad rotación	Nivel de geometría pin
Tr.9	1	2	2	1
Tr.10	1	2	2	2
Tr.9	2	2	2	1
Tr.10	2	2	2	2
Tr.15	1	3	2	1
Tr.16	1	3	2	2
Tr.15	2	3	2	1
Tr.16	2	3	2	2
Tr.3	1	1	2	1
Tr.4	1	1	2	2
Tr.3	2	1	2	1
Tr.4	2	1	2	2
Tr.1	1	1	1	1
Tr.2	1	1	1	2
Tr.1	2	1	1	1
Tr.2	2	1	1	2
Tr.5	1	1	3	1
Tr.6	1	1	3	2
Tr.5	2	1	3	1
Tr.6	2	1	3	2
Tr.11	1	2	3	1
Tr.12	1	2	3	2
Tr.11	2	2	3	1
Tr.12	2	2	3	2

Tratamiento	Replica	Nivel de velocidad avance	Nivel de velocidad rotación	Nivel de geometría pin
Tr.7	1	2	1	1
Tr.8	1	2	1	2
Tr.7	2	2	1	1
Tr.8	2	2	1	2
Tr.13	1	3	1	1
Tr.14	1	3	1	2
Tr.13	2	3	1	1
Tr.14	2	3	1	2
Tr.17	1	3	3	1
Tr.18	1	3	3	2
Tr.17	2	3	3	1
Tr.18	2	3	3	2

## 7.2. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

La medición de dureza se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM E384-22, utilizando el durómetro FALCON 400G2. Las mediciones se realizaron en la cara plana del pin, en la cual se hicieron 5 muescas con el objetivo de obtener un valor promedio y calcular la desviación estándar. La medición se realizó para cada tratamiento.

Figura 31. Medición dureza



Se utilizó la misma distribución de las muescas que en el proceso de temple de las herramientas, puesto que ya se definió que la distancia entre puntos de 1mm cumple con la recomendación de la norma. Se aplicó una fuerza de indentación de 1kgf y se mantuvo un tiempo de indentación de 15 segundos en cada medición. La Figura 31 ilustra el uso del durómetro.

### 7.3. REGISTRO DE RESULTADOS

Para el registro de los resultados se utilizó la Tabla 31 que muestra los niveles de las diferentes variables tratadas y la Tabla 32 muestra los tratamientos dados a partir de los diferentes niveles. Se realizaron las 36 corridas experimentales en base a los 18 tratamientos definidos con 2 réplicas y en el orden definido en la Tabla 30. Los resultados se presentan en la Tabla 33.

Tabla 31. Niveles

NIVELES			
NIVEL	VARIABLE		
	Velocidad de avance [mm/min]	Velocidad de rotación [RPM]	Geometría del pin
1	25	520	Cónico liso
2	30	625	Cónico roscado
3	35	720	N/A

Tabla 32. Tratamientos

TRATAMIENTOS			
Tratamiento	Nivel de velocidad avance	Nivel de velocidad rotación	Nivel de geometría pin
Tr.1	1	1	1
Tr.2	1	1	2
Tr.3	1	2	1
Tr.4	1	2	2
Tr.5	1	3	1
Tr.6	1	3	2
Tr.7	2	1	1
Tr.8	2	1	2
Tr.9	2	2	1
Tr.10	2	2	2
Tr.11	2	3	1
Tr.12	2	3	2
Tr.13	3	1	1
Tr.14	3	1	2

Tratamiento	Nivel de velocidad avance	Nivel de velocidad rotación	Nivel de geometría pin
Tr.15	3	2	1
Tr.16	3	2	2
Tr.17	3	3	1
Tr.18	3	3	2

Tabla 33. Resultados

RECOLECCIÓN DE DATOS				
Tratamiento	Replica	Dureza anterior [HV]	Dureza posterior [HV]	Variación de dureza [HV]
Tr.1	1	587,66	585,14	2,52
Tr.2	1	583,26	586,42	3,16
Tr.3	1	595,34	591,40	3,94
Tr.4	1	593,42	588,26	5,16
Tr.5	1	582,74	587,72	4,98
Tr.6	1	583,10	576,38	6,72
Tr.7	1	579,42	577,84	1,58
Tr.8	1	567,98	566,08	1,90
Tr.9	1	597,88	597,72	0,16
Tr.10	1	598,80	596,64	2,16
Tr.11	1	582,48	579,18	3,30
Tr.12	1	569,74	565,10	4,64
Tr.13	1	579,74	579,26	0,48
Tr.14	1	568,82	568,14	0,68
Tr.15	1	595,08	593,62	1,46
Tr.16	1	593,44	595,58	2,14
Tr.17	1	578,74	581,24	2,50
Tr.18	1	567,46	570,76	3,30
Tr.1	2	585,14	582,74	2,40
Tr.2	2	586,42	583,10	3,32
Tr.3	2	591,40	587,66	3,74
Tr.4	2	588,26	583,26	5,00
Tr.5	2	587,72	582,48	5,24
Tr.6	2	576,38	569,74	6,64
Tr.7	2	577,84	579,74	1,90
Tr.8	2	566,08	568,82	2,74
Tr.9	2	597,72	595,08	2,64
Tr.10	2	596,64	593,44	3,20
Tr.11	2	579,18	579,42	0,24
Tr.12	2	565,10	567,98	2,88
Tr.13	2	579,26	578,74	0,52
Tr.14	2	568,14	567,46	0,68
Tr.15	2	593,62	595,34	1,72
Tr.16	2	595,58	593,42	2,16

Tratamiento	Replica	Dureza anterior [HV]	Dureza posterior [HV]	Variación de dureza [HV]
Tr.17	2	581,24	579,20	2,04
Tr.18	2	570,76	567,48	3,28

Con los resultados obtenidos se procedió a separar la información para cada herramienta incluyendo las medidas de dureza del proceso de fabricación y prueba de soldadura. La Tabla 34 y 35 muestran los cambios de la dureza en las herramientas de pin cónico liso y pin cónico roscado respectivamente en función de la longitud soldada.

Tabla 34. Variación dureza herramienta pin liso

HERRAMIENTA PIN LISO					
Descripción		Longitud [mm]	HV [kg/mm <sup>2</sup> ]		
Previo al temple		0	175,94		
Posterior al temple		0	544,08		
Prueba soldadura		600	587,88		
Tratamiento	Replica	Longitud [mm]	HV previo [kg/mm <sup>2</sup> ]	HV posterior [kg/mm <sup>2</sup> ]	Variación HV [kg/mm <sup>2</sup> ]
9	1	1000	597,88	597,72	0,16
9	2	1400	597,72	595,08	2,64
15	1	1800	595,08	593,62	1,46
15	2	2200	593,62	595,34	1,72
3	1	2600	595,34	591,40	3,94
3	2	3000	591,4	587,66	3,74
1	1	3400	587,66	585,14	2,52
1	2	3800	585,14	582,74	2,4
5	1	4200	582,74	587,72	4,98
5	2	4600	587,72	582,48	5,24
11	1	5000	582,48	579,18	3,3
11	2	5400	579,18	579,42	0,24
7	1	5800	579,42	577,84	1,58
7	2	6200	577,84	579,74	1,90
13	1	6600	579,74	579,26	0,48
13	2	7000	579,26	578,74	0,52
17	1	7400	578,74	581,24	2,50
17	2	7800	581,24	579,20	2,04

Tabla 35. Variación dureza herramienta pin roscado

HERRAMIENTA PIN ROSCADO					
Descripción		Longitud [mm]	HV [kg/mm <sup>2</sup> ]		
Previo al temple		0	176,01		
Posterior al temple		0	546,63		
Prueba soldadura		600	598,80		
Tratamiento	Replica	Longitud [mm]	HV previo [kg/mm <sup>2</sup> ]	HV posterior [kg/mm <sup>2</sup> ]	Variación HV [kg/mm <sup>2</sup> ]
10	1	1000	598,80	596,64	2,16
10	2	1400	596,64	593,44	3,20
16	1	1800	593,44	595,58	2,14
16	2	2200	595,58	593,42	2,16
4	1	2600	593,42	588,26	5,16
4	2	3000	588,26	583,26	5,00
2	1	3400	583,26	586,42	3,16
2	2	3800	586,42	583,10	3,32
6	1	4200	583,10	576,38	6,72
6	2	4600	576,38	569,74	6,64
12	1	5000	569,74	565,10	4,64
12	2	5400	565,10	567,98	2,88
8	1	5800	567,98	566,08	1,90
8	2	6200	566,08	568,82	2,74
14	1	6600	568,82	568,14	0,68
14	2	7000	568,14	567,46	0,68
18	1	7400	567,46	570,76	3,30
18	2	7800	570,76	567,48	3,28

Un punto a tener en cuenta es que al realizar la prueba de soldadura (de 0mm a 600mm) se presentó un aumento en la dureza en la herramienta de pin liso de 53,80HV y en la herramienta de pin roscado de 52,17HV. Esto se pudo deber a que en el proceso de temple hubieran quedado zonas con retención de austenita que las pruebas de soldadura podrían haber transformado en martensita generando el aumento de dureza.

El desgaste de las herramientas es observable en las zonas de contacto con las placas, se observó que tanto la cara del hombro como la superficie del pin fueron cambiando a lo largo de la longitud soldada. La Figura 32 muestra el desgaste en las dos zonas de contacto en la herramienta de pin roscado luego de 3800mm de soldadura, mientras que, la Figura 33 muestra varias de las placas soldadas.

Figura 32. Desgaste herramienta pin cónico roscado

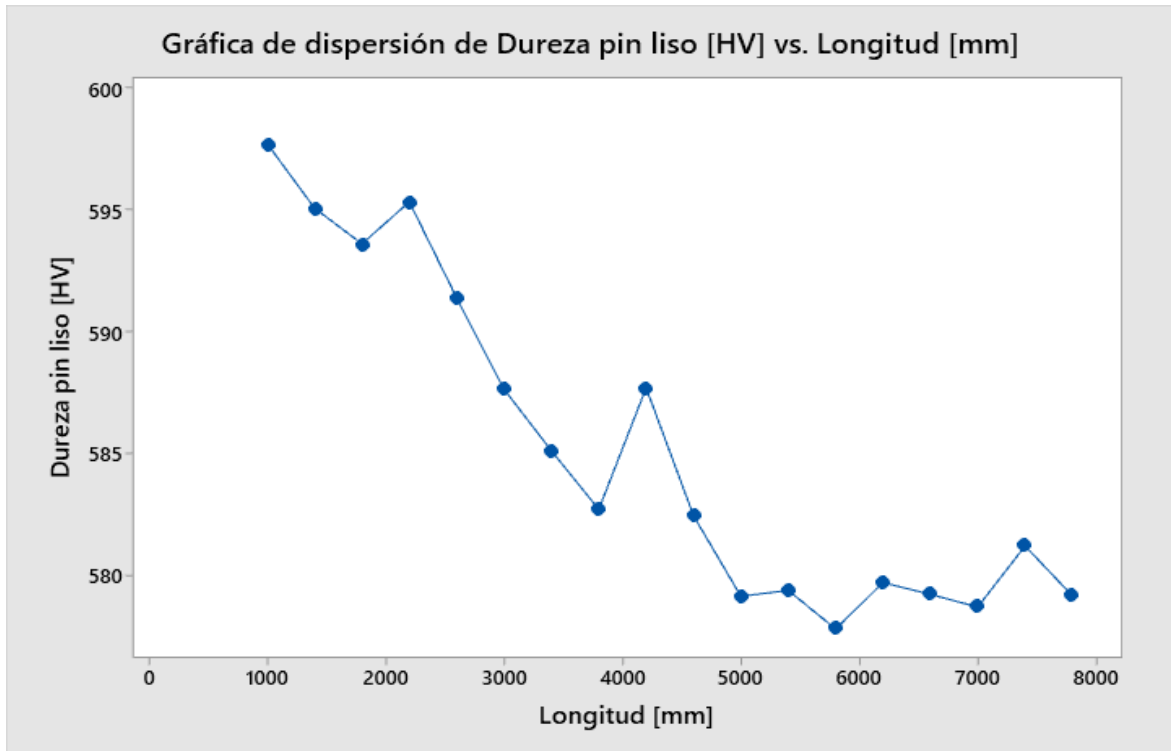


Figura 33. Placas soldadas



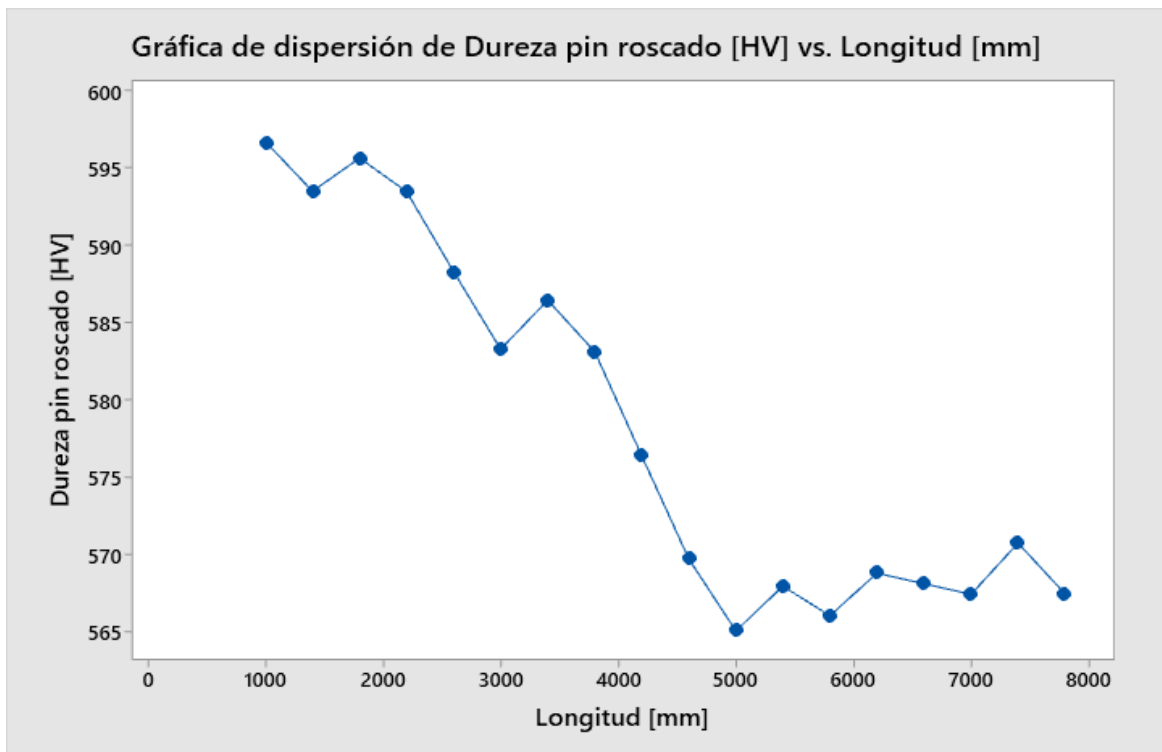
Con el fin de observar el cambio en la dureza de las herramientas respecto al diseño de experimento se procedieron a tomar en cuenta solo las mediciones procedentes de los tratamientos. La Figura 34 y 35 muestran el cambio de dureza para la herramienta de pin liso y pin roscado respectivamente.

Figura 34. Longitud vs dureza herramienta pin liso DOE



Fuente: Minitab

Figura 35. Longitud vs dureza herramienta pin roscado DOE



Fuente: Minitab

Ambas herramientas muestran una disminución progresiva de la dureza conforme aumenta la longitud soldada. No obstante, se observaron picos puntuales de incremento en la dureza, los cuales se atribuyeron a errores de medición.

La disminución progresiva anteriormente mencionada se relaciona con el estudio “A Systematic Analysis of Maximum Tolerable Tool Wear in Friction Stir Welding” el cual presenta que la disminución de la dureza de la herramienta está directamente relacionada con el revenido inducido por las altas temperaturas generadas durante el proceso de soldadura.<sup>11</sup> Este fenómeno de aumento de temperatura por un prolongado periodo de tiempo y en un proceso cíclico explicaría la disminución de la dureza.

De igual manera el artículo “Durability Map for The Friction Stir Welding Tools with Flat Faced Pins” presenta que, la disminución significativa de la dureza en la herramienta se debe a que la soldadura repetida genera un revenido. Este proceso provoca el crecimiento de carburos de cromo y vanadio a partir del carbono disuelto en la microestructura de martensita primaria. Como consecuencia, la transformación microestructural de martensita a ferrita reduce la dureza en el pin y el hombro.<sup>12</sup> Los dos artículos concluyen que la disminución de la dureza presentada se debe al revenido inducido en el proceso de soldadura que coincide con la disminución con los datos mostrados en la Figura 34 y 35.

#### 7.4. VOLUMEN DESGASTADO

Por otra parte, con el fin de relacionar la dureza de la herramienta con la pérdida de material se definió utilizar el modelo de Archard para definir el volumen desgastado, para cada tratamiento. Para ello se utilizó la longitud soldada de cada tratamiento de 400mm, y una fuerza normal promedio de 8,45kN o 861,366kgf que se definió a partir de la recopilación de información, observada en la Tabla 36.

Tabla 36. Recopilación de información de fuerza axial

RELACION DE FUERZA	
N° ARTICULO	FUERZA AXIAL [kN]
3	2
4	4
8	5,5

<sup>11</sup> Hasieber, M, et al. Op. cit.

<sup>12</sup> Leon, S, G, Bharathiraja y V, Jayakumar. Durability Map for The Friction Stir Welding Tools with Flat Faced Pins. En: International Journal of Integrated Engineering [Penerbit UTHM]. Tamilnadu: Department of Mechanical Engineering, Saveetha School of Engineering, 2020, vol, 12, nro, 8, pp. 83-96.

N° ARTICULO	FUERZA AXIAL [kN]
9	30
12	5
14	7
15	12
19	6
19	8
24	5

Simultáneamente se definió un coeficiente de desgaste de 0,00013 a partir del material de la herramienta y sus condiciones por medio de la investigación “The Wear of Metals under Unlubricated Conditions” este valor de coeficientes se observa en la Tabla 37. por último, se realizó el cálculo en base a la ecuación vista en el marco teórico. La Tabla 38 y 39 muestran el volumen desgastado para cada tratamiento a partir de su medición de volumen previo y posterior en función de las mediciones de dureza.

Tabla 37. Coeficientes de desgaste

Material	K
Mild steel (on mild steel)	$7 \times 10^{-3}$
$\alpha/\beta$ brass	$6 \times 10^{-4}$
PTFE	$2.5 \times 10^{-5}$
Copper-beryllium	$3.7 \times 10^{-5}$
Hard tool steel	$1.3 \times 10^{-4}$
Ferritic stainless steel	$1.7 \times 10^{-5}$
Polythene	$1.3 \times 10^{-7}$
PMMA	$7 \times 10^{-6}$

Fuente: Archard, J y Hirst, W. The Wear of Metals under Unlubricated Conditions.

Tabla 38. Volumen desgastado herramienta pin liso

HERRAMIENTA PIN LISO					
Tratamiento	Replica	Longitud [mm]	V previo [mm <sup>3</sup> ]	V posterior [mm <sup>3</sup> ]	Variación V [mm <sup>3</sup> ]
9	1	1000	0,074916	0,074936	0,000020
9	2	1400	0,074936	0,074936	0,000000
15	1	1800	0,075269	0,075269	0,000332
15	2	2200	0,075454	0,075454	0,000185
3	1	2600	0,075236	0,075236	0,000218
3	2	3000	0,075737	0,075737	0,000501
1	1	3400	0,076219	0,076219	0,000482

Tratamiento	Replica	Longitud [mm]	V previo [mm <sup>3</sup> ]	V posterior [mm <sup>3</sup> ]	Variación V [mm <sup>3</sup> ]
1	2	3800	0,076548	0,076548	0,000328
5	1	4200	0,076863	0,076863	0,000315
5	2	4600	0,076212	0,076212	0,000651
11	1	5000	0,076897	0,076897	0,000686
11	2	5400	0,077335	0,077335	0,000438
7	1	5800	0,077303	0,077303	0,000032
7	2	6200	0,077515	0,077515	0,000211
13	1	6600	0,077261	0,077261	0,000254
13	2	7000	0,077325	0,077325	0,000064
17	1	7400	0,077394	0,077394	0,000069
17	2	7800	0,077061	0,077061	0,000333

Tabla 39. Volumen desgastado herramienta pin roscado

HERRAMIENTA PIN ROSCADO					
Tratamiento	Replica	Longitud [mm]	V previo [mm <sup>3</sup> ]	V posterior [mm <sup>3</sup> ]	Variación V [mm <sup>3</sup> ]
10	1	1000	0,074801	0,075072	0,000271
10	2	1400	0,075072	0,075477	0,000405
16	1	1800	0,075477	0,075206	0,000271
16	2	2200	0,075206	0,075479	0,000274
4	1	2600	0,075479	0,076142	0,000662
4	2	3000	0,076142	0,076794	0,000653
2	1	3400	0,076794	0,076380	0,000414
2	2	3800	0,076380	0,076815	0,000435
6	1	4200	0,076815	0,077711	0,000896
6	2	4600	0,077711	0,078617	0,000906
12	1	5000	0,078617	0,079262	0,000646
12	2	5400	0,079262	0,078860	0,000402
8	1	5800	0,078860	0,079125	0,000265
8	2	6200	0,079125	0,078744	0,000381
14	1	6600	0,078744	0,078838	0,000094
14	2	7000	0,078838	0,078932	0,000094
18	1	7400	0,078932	0,078476	0,000456
18	2	7800	0,078476	0,078930	0,000454

## 7.5. ANÁLISIS FACTORIAL

Con los resultados obtenidos se realizó el análisis factorial del experimento por medio del software Minitab, donde en primera medida se buscó definir que variables e interacciones contribuían a un mayor desgaste de la herramienta, para esto se utilizaron las variables controladas y el volumen desgastado de cada tratamiento. Inicialmente, se definieron las hipótesis para el diseño de experimento, en donde se utilizó un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ . La tabla 40 muestra las diferentes hipótesis realizadas.

Tabla 40. Hipótesis del DOE

HIPOTESIS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO		
Factor / Interacción	Hipótesis nula ( $H_0$ )	Hipótesis alternativa ( $H_1$ )
A: Velocidad de avance	El desgaste no varía con A	El desgaste sí varía con A
B: Velocidad de rotación	El desgaste no depende de B	El desgaste sí depende de B
C: Geometría de la herramienta	El desgaste no se ve afectado por C	El desgaste sí se ve afectado por C
A x B	No existe interacción entre A y B	Existe interacción entre A y B
A x C	No se presenta interacción entre A y C	Se presenta interacción entre A y C
B x C	No hay interacción entre B y C	Hay interacción entre B y C
A x B x C	No existe interacción combinada entre A, B y C	Existe interacción combinada entre A, B y C

Figura 36. Información del factor

### Información del factor

Factor	Niveles Valores
Velocidad avance	3 25; 30; 35
Velocidad rotación	3 520; 625; 720
Geometría pin	2 Pin liso; Pin roscado

Fuente: Minitab

La Figura 36 denota la información del factor dado por el software estadístico respecto al diseño de experimento, mientras que la Figura 37 muestra el resumen del modelo, donde se encontró que la desviación estándar promedio fue de 0,000124 y que el coeficiente de determinación fue del 86,17% indicando que la variabilidad en el volumen desgastado es mayormente explicada por el modelo. Para conocer la tabla de diseño dirigirse al anexo F.

Figura 37. Resumen del modelo

<b>Resumen del modelo</b>		
S	R-cuad. (ajustado)	R-cuad.
0,0001240	86,17%	71,53%

Fuente: Minitab

La Tabla 41 presenta el ANOVA realizado a partir de los datos obtenidos, donde se describen, en resumen, los grados de libertad, la suma de cuadrados, los cuadrados medios, el valor F y finalmente el valor P. Las variables principales: velocidad de avance, velocidad de rotación y geometría del pin, presentan valores P menores a 0,05, lo que indicó que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la respuesta. En contraste, las interacciones entre estas variables no resultaron significativas, puesto que sus valores P fueron mayores a 0,05, lo que sugirió que, aunque cada variable por sí sola influye fuertemente, sus combinaciones no aportaron una variabilidad adicional relevante al modelo. Esto puede deberse a que los efectos individuales ya explican la mayor parte de la variación, o a que simplemente no existen interacciones reales importantes en el sistema analizado.

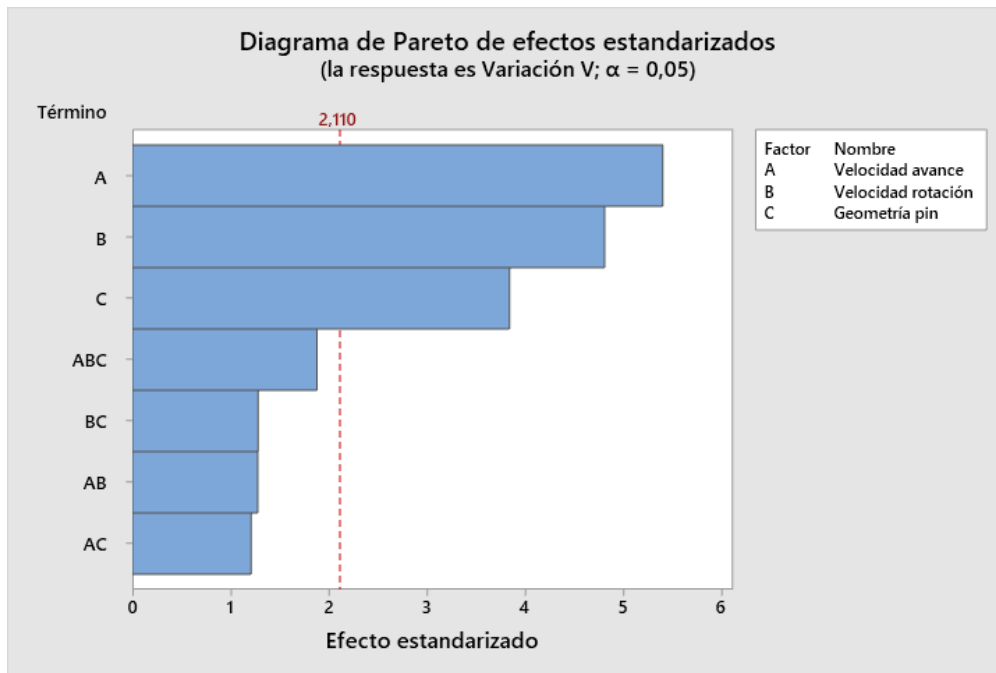
Tabla 41. ANOVA

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	18	0,0000016303	0,0000000906	5,89	0,000
Bloques	1	0,0000000031	0,0000000031	0,20	0,661
Lineal	5	0,0000012737	0,0000002547	16,56	0,000
Velocidad avance	2	0,0000005803	0,0000002902	18,86	0,000
Velocidad rotación	2	0,0000004669	0,0000002334	15,17	0,000
Geometría pin	1	0,0000002266	0,0000002266	14,73	0,001
Interacciones de 2 términos	8	0,0000001972	0,0000000246	1,60	0,197
Velocidad avance*Velocidad rotación	4	0,0000000987	0,0000000247	1,60	0,219
Velocidad avance*Geometría pin	2	0,0000000472	0,0000000236	1,53	0,244
Velocidad rotación*Geometría pin	2	0,0000000513	0,0000000256	1,67	0,218
Interacciones de 3 términos	4	0,0000001563	0,0000000391	2,54	0,078
Velocidad avance*Velocidad rotación*Geometría pin	4	0,0000001563	0,0000000391	2,54	0,078
Error	17	0,0000002616	0,0000000154		
Total	35	0,0000018919			

Fuente: Minitab

Figura 38. Diagrama de Pareto



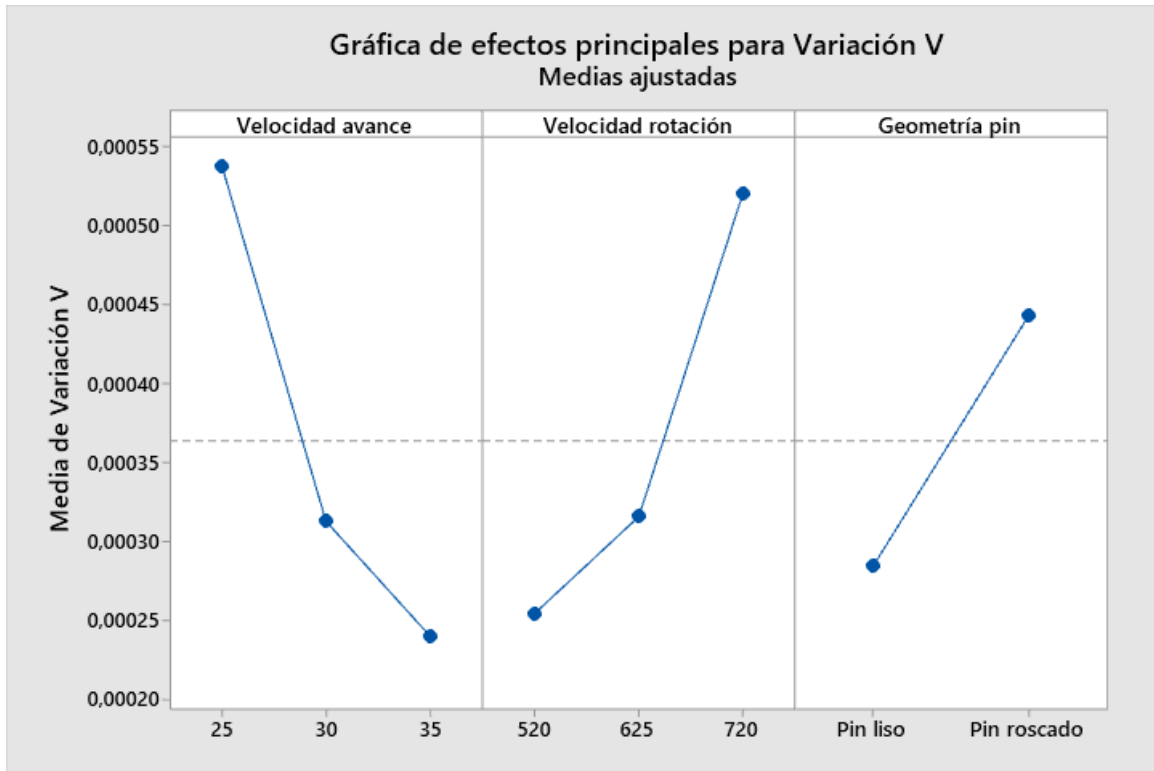
Fuente: Minitab

El artículo “Investigation on effect of FSW parameters of aluminium alloy using Full Factorial Design” definió que la velocidad de avance fue la variable que más afectó la calidad de las láminas<sup>13</sup>. El diagrama de Pareto que se muestra en la Figura 38 permitió identificar que dicha variable también es la que más afecta el desgaste de la herramienta, permitiendo inferir que la velocidad de avance es una de las variables más relevantes de este proceso.

Las Figuras 39 presenta las gráficas de efectos principales. Dentro de los efectos principales se denotó que la variable que influye en mayor medida en el volumen desgastado es la velocidad de avance, donde a menor velocidad de avance mayor disminución de volumen, esto se explica debido a que a menor velocidad de avance mayor tiempo de soldadura y exposición de la herramienta a esfuerzo mecánicos y altas temperaturas. Por otra parte, la velocidad de rotación presenta mayor disminución de volumen a una en su nivel superior, puesto que a una velocidad más alta se presenta mayor fricción y mayor temperatura del proceso. Finalmente se observó que se presentó mayor disminución de volumen en la herramienta de pin roscado.

<sup>13</sup> Prakash, M y Das, Daniel. Investigation on effect of FSW parameters of aluminium alloy using Full Factorial Design. En: Materials Today: Proceedings [ScienceDirect]. Coimbatore: Karpagam Academy of Higher Education, 2021, vol. 37, nro. 2, pp. 608-613.

Figura 39. Grafica de efectos principales



Fuente: Minitab

A partir de la información proporcionada por el software estadístico se anularon las hipótesis nulas para los factores estudiados sin embargo no se rechaza la hipótesis nula para las interacciones, la Tabla 42 resume lo mencionado anteriormente.

Tabla 42. Evaluación de hipótesis del DOE

HIPOTESIS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO				
Factor / Interacción	Hipótesis Nula ( $H_0$ )	Hipótesis Alternativa ( $H_1$ )	Valor P	Rechazo hipótesis nula ( $H_0$ )
A: Velocidad de avance	El desgaste no varía con A	El desgaste sí varía con A	0,000	Si
B: Velocidad de rotación	El desgaste no depende de B	El desgaste sí depende de B	0,000	Si
C: Geometría herramienta	El desgaste no se ve afectado por C	El desgaste sí se ve afectado por C	0,001	Si
A × B	No existe interacción entre A y B	Existe interacción entre A y B	0,219	No

Factor / Interacción	Hipótesis Nula ( $H_0$ )	Hipótesis Alternativa ( $H_1$ )	Valor P	Rechazo hipótesis nula ( $H_0$ )
A × C	No se presenta interacción entre A y C	Se presenta interacción entre A y C	0,244	No
B × C	No hay interacción entre B y C	Hay interacción entre B y C	0,218	No
A × B × C	No existe interacción combinada entre A, B y C	Existe interacción combinada entre A, B y C	0,078	No

## 7.6. VIDA UTIL HERRAMIENTA

Para determinar la vida útil de la herramienta, se analizó cómo disminuye la dureza según la longitud de material soldado. La Tabla 43 relaciona la disminución de dureza respecto a la longitud soldada, para esto se tomaron los valores máximos y mínimos de dureza medidos para cada herramienta respecto a los tratamientos. La herramienta de pin roscado tuvo una disminución de dureza de 31,54HV siendo mayor en comparación con la herramienta de pin liso de 19,88HV.

Tabla 43. Disminución de dureza

DISMINUCIÓN DE DUREZA				
Herramienta	Dureza máxima [HV]	Dureza mínima [HV]	Disminución dureza [HV]	Longitud soldada [mm]
Pin liso	597,72	577,84	19,88	7800
Pin roscado	596,64	565,1	31,54	7800

Debido a la falta de literatura específica sobre la vida útil de la herramienta se procedió a extrapolar el conocimiento disponible en la literatura sobre herramientas de corte, donde se ha establecido que la herramienta debe ser significativamente más dura que el material de trabajo para evitar un desgaste acelerado y asegurar la calidad del proceso. En este contexto, estudios como "Introduction to Hard Materials and Machining Methods" indican que el mecanizado depende de que la dureza de la herramienta sea mucho mayor que la del material de la pieza de trabajo.<sup>14</sup> De manera complementaria, Según el capítulo "Cutting Tool Materials" del *Metals Handbook Desk Edition* de ASM International, los materiales de las herramientas de corte deben poseer una dureza considerablemente

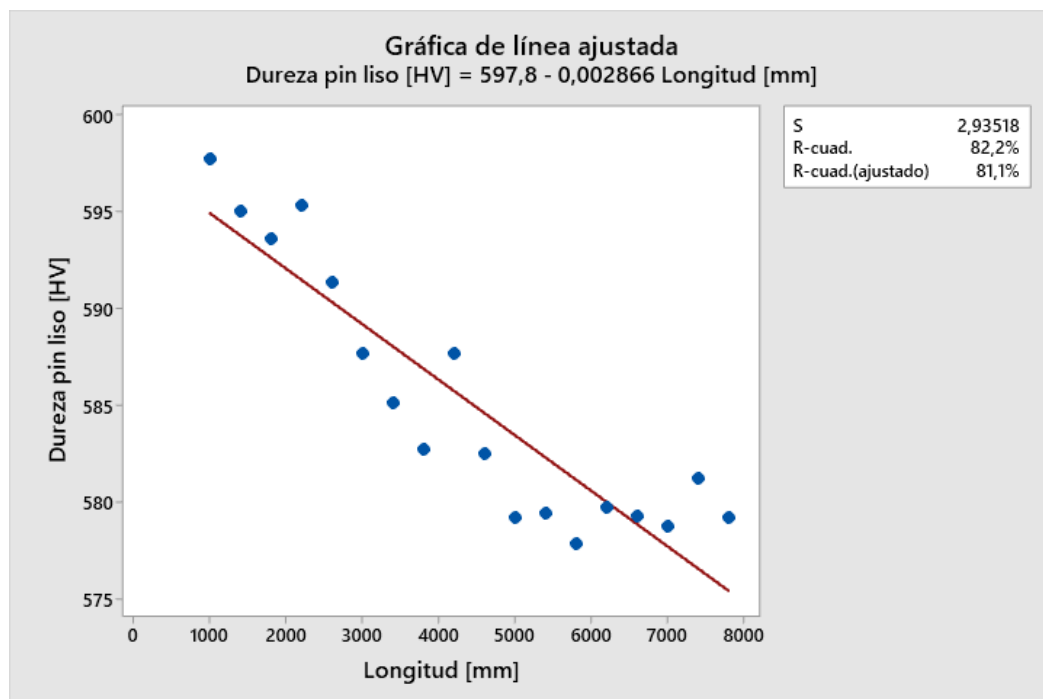
<sup>14</sup> Patel, G, et al. Introduction to Hard Materials and Machining Methods. En: Machining of Hard Materials. [Springer]. 2020, pp. 1-24.

mayor que la del material de la pieza de trabajo para resistir el desgaste y mantener la eficiencia del corte.<sup>15</sup> Esta diferencia en dureza es esencial para minimizar el desgaste de la herramienta y asegurar la calidad del proceso. Esta información se basa en principios de tribología y resistencia al desgaste por contacto prolongado que son aspectos similares a los sentidos por la herramienta en el proceso de soldadura. A partir de lo anterior y con el fin de definir un límite para el desgaste de la herramienta en función de la dureza se determinó que la dureza de la herramienta debía ser al menos 2 veces la dureza de la lámina de aluminio.

$$HV_{min,herr} \geq 2HV_{lamina}$$

Se realizó la medición de la dureza de la lámina bajo la norma ASTM384-22 con mismo procedimiento que se había trabajado para las herramientas. El resultado de la dureza fue de 67,02HV con una desviación estándar de 1,062HV. A partir de las gráficas de relación de dureza vs longitud soldada se obtuvieron las ecuaciones de tendencia, donde el coeficiente de determinación fue del 82,2% para la herramienta de pin liso y de 83,5% para la herramienta de pin roscado. Las ecuaciones de tendencia se denotan en las Figuras 40 y 41.

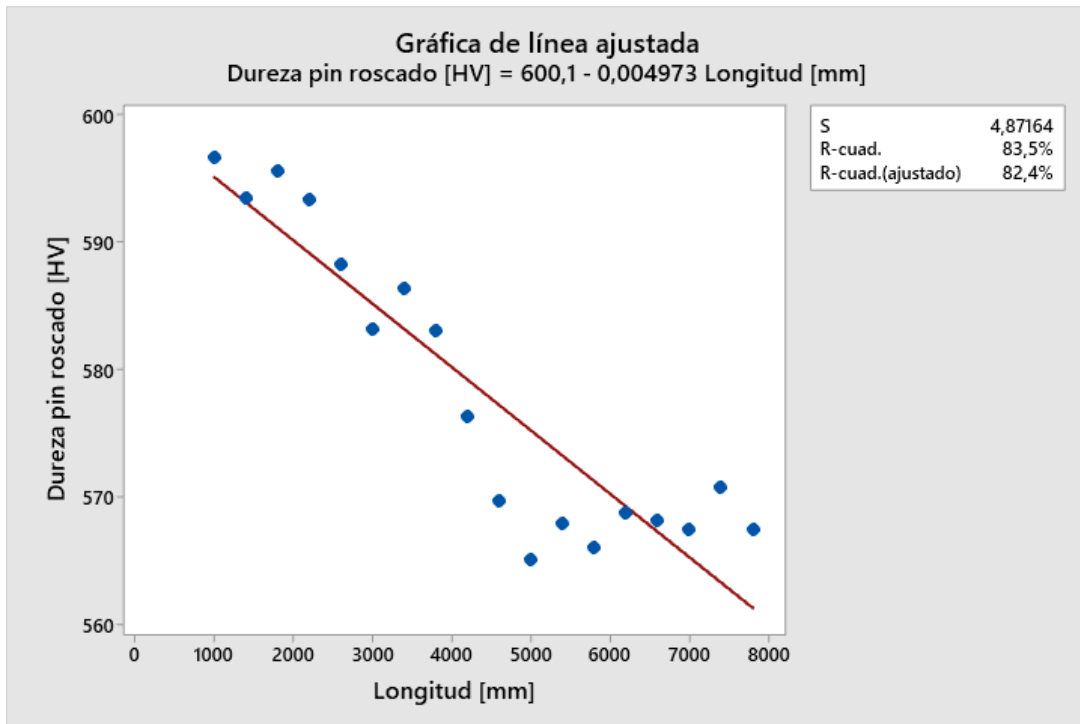
Figura 40. Relación de tendencia herramienta pin liso



Fuente: Minitab

<sup>15</sup> Joseph R. Cutting Tool Materials. En: ASM International eBook [en línea]. 1998, pp. 901-904.

Figura 41. Relación de tendencia herramienta pin roscado



Fuente: Minitab

Con las ecuaciones establecidas se procedió a realizar el cálculo de la longitud máxima de soldadura para ambas herramientas, teniendo como variable independiente la longitud soldada y la variable dependiente la dureza de la herramienta.

Ecuación para la herramienta de pin liso:

$$y [HV] = 597,8 [HV] - 0,002866 \left[ \frac{HV}{mm} \right] * x [mm]$$

$$x [mm] = \frac{597,8 [HV] - y [HV]}{0,002866 \left[ \frac{HV}{mm} \right]}$$

Ecuación para la herramienta de pin roscado:

$$y [HV] = 600,1 [HV] - 0,004973 \left[ \frac{HV}{mm} \right] * x [mm]$$

$$x [mm] = \frac{600,1 [HV] - y [HV]}{0,004973 \left[ \frac{HV}{mm} \right]}$$

Teniendo en cuenta el valor mínimo de dureza estipulado anteriormente se procedió a realizar el cálculo de la vida útil para ambas herramientas:

$$HV_{min,herr} \geq 2 * 67,02 [HV]$$

$$HV_{min,herr} = 134,04 [HV]$$

Vida útil para la herramienta de pin liso en base a la dureza:

$$x [mm] = \frac{597,8 [HV] - 134,04 [HV]}{0,002866 \left[ \frac{HV}{mm} \right]}$$

$$x = 161814,375 [mm] = 161,814 [m]$$

Vida útil para la herramienta de pin roscado en base a la dureza:

$$x [mm] = \frac{600,1 [HV] - 134,04 [HV]}{0,004973 \left[ \frac{HV}{mm} \right]}$$

$$x = 93718,078 [mm] = 93,718 [m]$$

Esta vida útil definida se encuentra sujeta a restricciones de láminas de 6mm de espesor de aluminio 6063-T5 y velocidades de avance entre 25mm/min y 35mm/min y velocidades de rotación entre 520RPM y 720RPM. De igual manera es posible que se presenten variaciones por diferentes factores de ruido no controlados en el experimento, sin embargo, esta estimación de la vida útil permite ampliar la manera en que se define la vida útil de este tipo de herramientas. Finalmente, con el fin de determinar la vida útil de la herramienta en base al tiempo de soldadura se definió utilizar la velocidad promedio de avance de los niveles estudiados de 30mm/min y relacionarlo con la longitud soldada en condiciones similares al experimento.

Vida útil para herramienta de pin liso en base al tiempo:

$$t = \frac{d[mm]}{v \left[ \frac{mm}{min} \right]} = \frac{161814,375[mm]}{30 \left[ \frac{mm}{min} \right]}$$

$$t = 5393,813 [min]$$

Vida útil para herramienta de pin roscado en base al tiempo:

$$t = \frac{d[mm]}{v \left[ \frac{mm}{min} \right]} = \frac{93718,078 [mm]}{30 \left[ \frac{mm}{min} \right]}$$

$$t = 3123,936 [min]$$

## 7.7. COSTOS DEL EXPERIMENTO

A partir del desarrollo del experimento se realizó un análisis económico con el fin de determinar los costos asociados a su realización. Para ello se dividieron los costos en las diferentes etapas relacionadas al desarrollo del experimento desde su investigación inicial hasta el análisis de resultados. Los costos del experimento son visibles en la Tabla 44.

Tabla 44. Costos del experimento

COSTOS DEL EXPERIMENTO		
CATEGORIA	CONCEPTO	VALOR (COP)
Investigación	Computador portátil	1.849.000
	Recursos bibliográficos, documentación y normativas	500.000
	Papelería	100.000
Desarrollo de la herramienta	Licencia software de diseño	443.609
	Material acero para herramienta 1.2344 EFS	215.000
	Mecanizado herramienta	66.000
Realización de tratamientos	Material láminas de aluminio	580.000
	Personal técnico especializado (hora de trabajo)	352.000
	Máquina fresadora (hora de trabajo)	352.000
Análisis de resultados	Licencia software estadístico	147.824
	Instrumentos de medición	1.280.000
Total		5.885.433

## 8. CONCLUSIONES

Como resultado del trabajo desarrollado, se generó conocimiento alineado con la misión de la Universidad Industrial de Santander, mediante un estudio enfocado en el análisis de desgaste de la herramienta utilizada en el proceso de soldadura por fricción y agitación para laminas aluminio por medio de una fresadora. Esta investigación ofrece aportes relevantes que fortalecen las capacidades técnicas tanto del sector industrial como del ámbito académico.

Se definió un diseño de experimento factorial  $3 \times 3 \times 2$  con un total de 18 tratamientos con 2 réplicas que permitió evaluar el desgaste de la herramienta en función de las variables que afectan en mayor medida el proceso de soldadura y que, además, son las de mayor interés a nivel internacional en base a los artículos analizados: velocidad de avance, velocidad de rotación y geometría del pin. Los niveles de velocidad de avance y velocidad de rotación se establecieron con base en la bibliografía disponible, considerando los rangos que han demostrado ofrecer una mejor calidad de soldadura, específicamente en términos de dureza y esfuerzo último a la tracción (UTS), además de ajustarse a las capacidades operativas de la fresadora disponible en la Escuela.

Por su parte, la elección del perfil del pin se fundamentó en la geometría más comúnmente estudiada en la literatura. A partir de estos criterios, se definieron los siguientes niveles experimentales: una velocidad de avance entre 25 mm/min y 35 mm/min, una velocidad de rotación entre 520 RPM y 720 RPM, y dos configuraciones de geometría del pin: cónica lisa y cónica roscada.

Se diseñó la herramienta de soldadura considerando la fabricación de dos unidades con dimensiones iguales, diferenciadas únicamente por la configuración del pin, una con geometría cónica lisa y la otra cónica roscada. Para el dimensionamiento, se utilizó una guía de directrices básicas con base en 80 fuentes y 200 ensayos, el cual permitió calcular las dimensiones básicas de la herramienta en función del tipo de aleación de aluminio 6063-T5 y del espesor de las láminas de 6mm. Asimismo, se consideraron las limitaciones geométricas impuestas por el cono portaherramientas y la capacidad de movimiento de la fresadora. Las herramientas contaron una longitud total de 56,7mm, con un diámetro de hombro de 19mm, un pin cónico con diámetros de 6,5mm en la base y 4mm en la punta, y una longitud de pin de 5,7mm.

La fabricación de las herramientas se realizó siguiendo hojas de ruta previamente definidas, además se incluyó la aplicación de un tratamiento térmico de temple con el cual aumento la dureza de la herramienta de pin cónico liso hasta 544,08HV y la herramienta de pin cónico roscado a 546,83HV, mejorando así su durabilidad. Posteriormente, se realizaron pruebas de soldadura preliminares para verificar la calidad funcional de ambas configuraciones. Finalmente, se elaboraron planos técnicos de cada herramienta.

A partir de las herramientas diseñadas se evaluó su desgaste a partir del diseño factorial generado, donde se midió la dureza y posteriormente el volumen desgastado de las herramientas para cada tratamiento definido a lo largo de una longitud de 400mm. Las mediciones de dureza se realizaron cumpliendo los parámetros establecidos por la norma ASTM E384-22, la herramienta de pin cónico roscado presentó una disminución de dureza de 31,54HV con un volumen desgastado de 0,004461mm<sup>3</sup> mientras que la herramienta de pin cónico liso registró una variación de dureza de 19,88HV con un volumen desgastado de 0,002598 mm<sup>3</sup>, ambas para una longitud soldada de 7,8m. A partir del análisis ANOVA, se determinó que la velocidad de avance es la variable que más influye en el desgaste de la herramienta, seguida por la velocidad de rotación, y en último, la geometría del pin. Se identificó que una menor velocidad de avance genera un mayor desgaste, debido al mayor tiempo de exposición durante la soldadura, mientras que una mayor velocidad de rotación incrementa la temperatura y las tensiones mecánicas, lo que también contribuye al desgaste herramienta.

La vida útil de la herramienta, evaluada en función de la pérdida de dureza, disminuye progresivamente debido a que el proceso de soldadura, al realizarse de manera cíclica, genera condiciones térmicas que inducen un revenido en la herramienta, lo que conlleva una disminución gradual de la dureza y, por tanto, una reducción en la resistencia al desgaste y en la durabilidad funcional de la herramienta. Se establecieron ecuaciones de tendencia para cada herramienta, relacionando la dureza de la herramienta [HV] con la distancia soldada [mm]. La vida útil de la herramienta de pin cónico liso bajo las variables definidas en el diseño de experimento fue de 161,814 [m] mientras que para la herramienta de pin cónico roscado fue de 93,718 [m]. Esta vida útil definida se encuentra limitada a los rangos de las variables definidas en el diseño de experimento y al material y espesor de las láminas, además esto no excluye que la herramienta no pueda fallar por otro mecanismo.

## 9. RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar el cambio del material de la herramienta de acero para trabajado en caliente a otros materiales como el metal duro. El metal duro es conocido por su mayor dureza y resistencia al desgaste, aunque su costo es superior. Para ello se propone investigar y comparar la vida útil de ambos materiales bajo condiciones operativas similares determinando si la inversión se justifica por la prolongación de la vida útil de la herramienta.

Con el fin de mejorar la calidad de la soldadura y mantener la vida útil de la herramienta, es conveniente implementar un sistema de medición de la temperatura durante el proceso de soldadura. Para establecer los parámetros de operación que mantengan una temperatura de proceso adecuada.

## BIBLIOGRAFIA

Archard, J y Hirst, W. The Wear of Metals under Unlubricated Conditions. En: JSTOR [en línea]. Aldermaston: Associated Electrical Industries Limited, 1956, vol 236, pp. 397-410. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/99967>

Akbari, M, Aliha, M y Berto, F. Investigating the role of different components of friction stir welding tools on the generated heat and strain, En: Forces in Mechanics [ScienceDirect]. Tehran: Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), 2023, vol. 10, pp. 2-7. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266635972300001X>

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. E384 – 22. Pensilvania: ASTM, 2022, pp. 1-9.

Bhatnagar, S, et al. Optimization of FSW parameters for enhancing dissimilar joint strength of AA7050 and AA6061 using Response Surface Methodology (RSM). En: Materials Today: Proceedings [ScienceDirect]. Meerut: Department of Mechanical Engineering, Vidya College of Engineering, 2013. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785323020400>

Carrasco, J, et al. Optimización del diseño y fabricación de herramienta con pin cónico roscado para soldadura por fricción-agitación. En: Revistas Udistrital [En línea]. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2013. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/5519/8101>

Elangovan, K y Balasubramanian, V. Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. En: Materials Science and Engineering: A [ScienceDirect]. Tamil Nadu: Department of Manufacturing Engineering, Annamalai University, 2007, vol. 459, nro. 1-2 pp. 7-18. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092150930700010X>

Elangovan, K y Balasubramanian, V. Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. En: Materials

and Design [ScienceDirect]. Tamil Nadu: Department of Manufacturing Engineering, Annamalai University, 2008, vol. 29, nro. 2, pp. 362-373. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306907000404>

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2 ed. México: McGraw Hill Interamericana, 2008. p 60-91, 126-265. N-10: 970-10-6526-3

Martinez, Juan y Osorio, Danilo. Influencia de los parámetros en las propiedades mecánicas de juntas soldadas de aluminio A6061 por soldadura por fricción agitacion. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2025.

Hasieber, M. et al. A systematic analysis of maximum tolerable tool wear in friction stir welding. En: Welding in the world [Springer]. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2022, vol. 67, pp. 325–339. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-022-01407-0>

Hoyos, E y Serna, M. Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. En: Metals [MDPI]. Envigado: Department of Mechanical Engineering, Universidad EIA, 2021, vol 11. Disponible en: [Metals | Free Full-Text | Basic Tool Design Guidelines for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys \(mdpi.com\)](https://www.mdpi.com/2075-5432/11/1/1)

Joseph R. Cutting Tool Materials. En: ASM International eBook [en línea]. 1998, pp. 901-904. Disponible en: <https://dl.asminternational.org/handbooks/edited-volume/49/chapter-abstract/600411/Cutting-Tool-Materials?redirectedFrom=fulltext>

Leon, S, G, Bharathiraja y V, Jayakumar. Durability Map for The Friction Stir Welding Tools with Flat Faced Pins. En: International Journal of Integrated Engineering [Penerbit UTHM]. Tamilnadu: Department of Mechanical Engineering, Saveetha School of Engineering, 2020, vol, 12, nro, 8, pp. 83-96. Disponible en:

<https://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/5767/3746>

Patel, G, et al. Introduction to Hard Materials and Machining Methods. En: Machining of Hard Materials. [Springer]. 2020, pp. 1-24. Disponible en: <https://www.springerprofessional.de/en/machining-of-hard-materials/17711752>

Prakash, M y Das, Daniel. Investigation on effect of FSW parameters of aluminium alloy using Full Factorial Design. En: Materials Today: Proceedings [ScienceDirect]. Coimbatore: Karpagam Academy of Higher Education, 2021, vol. 37, nro. 2, pp. 608-613. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320342255>

RODRÍGUEZ PÉREZ, Osmundo Héctor. Metalurgia de la soldadura. La Habana: Editorial Universitaria, 2013. p 21-30. ISBN 978-959-16-2101-6.

RT. Rusia ultima los ensayos del innovador cohete portador Soyuz-5 para volar al espacio. [sitio web]. Rusia. Disponible en: <https://actualidad.rt.com/actualidad/407988-rusia-ultima-ensayos-cohete-soyuz5>

Swetha, S y Padhy, C. Tool pin profiles effect on mechanical properties of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. En: Materials Today: Proceedings [ScienceDirect]. Hyderabad: GITAM University, 2023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785323027578>