

Influencia de los parámetros en las propiedades mecánicas de juntas soldadas de aluminio A6061

por soldadura por fricción agitación

Danilo Ramcess Osorio Plata

Juan Felipe Martínez Portilla

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

PhD en Ingeniería de Materiales

Codirector

Robin Alexis Cristancho Perilla

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Yo, Danilo Osorio a mis padres, Alexander Osorio y Adaluz Plata, por su amor y apoyo incondicional, que han sido el fundamento de cada uno de mis logros. Su dedicación y sacrificio me han inspirado a seguir mis sueños y a enfrentar los desafíos con determinación. A mi hermana, Danna Osorio, por ser mi compañera en esta travesía, siempre dispuesta a compartir risas y momentos especiales. Su presencia y ánimo han hecho de este viaje una experiencia inolvidable. Cada uno de ustedes ocupa un lugar especial en mi corazón, y por ello, les dedico este trabajo con profunda gratitud y amor.

Yo, Juan Felipe Martínez, dedico este trabajo de grado a mis padres que, con su amor, esfuerzo y motivación, me dieron las herramientas para seguir estudiando y no rendirme a pesar de las dificultades. A mi esposa, Ximena Zambrano, por su apoyo incondicional y las largas noches que pasó a mi lado para terminar este proyecto. Y a mi hijo, Oliver Martínez Zambrano, por ser mi motivación para seguir adelante.

Agradecimientos

Agradecemos al Semillero de Manufactura Aplicada (SIMA) y al Grupo de investigación en Energía y Medio Ambiente (GIEMA) por su apoyo y los recursos proporcionados durante el desarrollo del proyecto. Extendemos nuestro especial agradecimiento al Dr. Oscar Bohórquez y al Ing. Robin Cristancho por su confianza, dedicación y conocimientos compartidos. También agradecemos a Juliana Baquero, auxiliar del laboratorio de ensayos mecánicos; Sebastián Casas, auxiliar del laboratorio de metalografía; Cesar Velasco, técnico del taller de manufactura. Finalmente, gracias a todos los que contribuyeron de alguna manera a la culminación de este trabajo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1 Justificación	17
2 Planteamiento del problema.....	18
3 Objetivos	20
3.1 Objetivo general.....	20
3.2 Objetivos específicos	20
4 Marco teórico	21
4.1 Aleación de aluminio 6061	21
4.1.1 Composición química de la aleación 6061	21
4.1.2 Propiedades mecánicas de la aleación 6061	21
4.1.3 Aplicaciones.....	22
4.2 Soldadura por fricción-agitación FSW	23
4.2.1 Aplicaciones de FSW en la industria	25
4.2.2 Uso de fresadoras verticales convencionales en FSW	26
4.2.3 Herramienta utilizada en la soldadura FSW	26
4.3 Parámetros usados en FSW para aluminio 6061.....	28
4.3.1 Ventajas y desventajas de FSW en aluminio 6061	29
4.4 Defectos de soldadura en FSW	29
4.5 Análisis de varianza ANOVA.....	34
5 Metodología	36
5.1 Revisión bibliográfica.....	37

5.1.1	Relación entre los parámetros y las propiedades mecánicas	37
5.1.2	Relación entre los defectos y los parámetros del proceso.....	38
5.1.3	Selección de parámetros y rangos para la soldadura	40
5.2	Pruebas preliminares y diseño del experimento.....	47
5.2.1	Caracterización de la fresadora.....	47
5.2.2	Dimensiones y montaje de las láminas de aluminio	50
5.2.3	Pruebas experimentales con los rangos y parámetros seleccionados.....	53
5.2.4	Diseño del experimento	55
5.3	Fabricación de las juntas soldadas	56
5.4	Ensayos mecánicos	58
5.4.1	Diseño y fabricación de las probetas	58
5.4.2	Ensayo de tracción	60
5.4.3	Ensayo de dureza	62
6	Análisis de resultados	65
6.1	Resultados de las pruebas de tracción.....	65
6.2	Resultados de pruebas de dureza	76
6.3	Correlaciones Matemáticas.....	83
6.4	Resultados del ANOVA para las propiedades mecánicas	88
7	Conclusiones.....	93
8	Recomendaciones	95
	Referencias bibliográficas.....	96

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Composición química (% e.p.) de la aleación A6061</i>	21
Tabla 2	<i>Propiedades físicas y mecánicas de la aleación A6061</i>	22
Tabla 3	<i>Artículos relevantes en la selección de los parámetros</i>	41
Tabla 4	<i>Niveles y factores del experimento</i>	56
Tabla 5	<i>Tabla de combinaciones para el experimento</i>	56
Tabla 6	<i>Propiedades mecánicas promedio obtenidas en los ensayos de tracción</i>	67
Tabla 7	<i>Dureza promedio de la zona de agitación NZ para cada junta soldada</i>	80
Tabla 8	<i>Propiedades mecánicas estimadas con las correlaciones matemáticas</i>	85
Tabla 9	<i>Análisis de varianza del esfuerzo último SUT vs VA, VR</i>	89
Tabla 10	<i>Análisis de varianza del esfuerzo de fluencia SY vs VA, VR</i>	91
Tabla 11	<i>Análisis de varianza del módulo de elasticidad E vs VA, VR</i>	92

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Esquema de una configuración de unión a tope mediante la soldadura</i>	24
Figura 2	<i>Esquema de la herramienta de soldadura para FSW</i>	27
Figura 3	<i>Defectos que ocurren en las soldaduras por fricción agitación</i>	30
Figura 4	<i>Poros de gusano al final del cordón de soldadura</i>	31
Figura 5	<i>Representación del defecto de soldadura Kissing bond</i>	32
Figura 6	<i>Defecto superficial de soldadura Lack of Fill</i>	33
Figura 7	<i>Modelo para la formación de defectos en la soldadura por fricción agitación</i>	34
Figura 8	<i>Diagrama de flujo de la metodología experimental del presente trabajo</i>	36
Figura 9	<i>Fresadora vertical convencional FU 250x1000 - Fritz Heckert</i>	47
Figura 10	<i>Control de velocidad de avance y posicionamiento de la mesa de la fresadora</i>	48
Figura 11	<i>Control de velocidad de rotación de la herramienta de la fresadora</i>	49
Figura 12	<i>Tacómetro digital DT- 2234C+</i>	50
Figura 13	<i>Montaje experimental de las láminas de aluminio en la fresadora</i>	51
Figura 14	<i>Herramienta con pin cónico roscado</i>	52
Figura 15	<i>Alineación de la herramienta sobre las láminas de aluminio</i>	53
Figura 16	<i>Procedimiento de pruebas de parámetros</i>	54
Figura 17	<i>Pruebas de parámetros de soldadura</i>	55
Figura 18	<i>Proceso de soldadura por fricción agitación</i>	57
Figura 19	<i>Soldaduras por fricción agitación de láminas de aluminio A6061</i>	58
Figura 20	<i>Planos del diseño de las probetas de tracción de la junta J6, unidades en (mm)</i>	59
Figura 21	<i>Probetas de tracción e impacto cortadas por chorro de agua para la junta J4</i>	60
Figura 22	<i>Maquina universal de ensayos de tracción</i>	61

Figura 23 *Probetas de tracción después de los ensayos para las juntas J2 y J3* 61

Figura 24 *Durómetro Falcon 400G2* 63

Figura 25 *Procedimiento de indentación Vickers* 64

Figura 26 *Esquema del perfil de micro dureza Vickers de las juntas*..... 64

Figura 27 *Curva de esfuerzo - deformación para la probeta J1.2*..... 66

Figura 28 *Diagrama de barras con intervalos de error para SUT*..... 68

Figura 29 *Diagrama de barras con intervalos de error para SY* 69

Figura 30 *Diagrama de barras con intervalos de error para E* 71

Figura 31 *Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 520 RPM*..... 72

Figura 32 *Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 620 RPM*..... 73

Figura 33 *Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 720 RPM*..... 73

Figura 34 *Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo a la fluencia para 520 RPM* 74

Figura 35 *Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo a la fluencia para 620 RPM* 75

Figura 36 *Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo a la fluencia para 720 RPM* 75

Figura 37 *Perfil de dureza para las juntas J1, J2 y J3* 77

Figura 38 *Perfil de dureza para las juntas J4, J5 y J6* 78

Figura 39 *Perfil de dureza para las juntas J7, J8 y J9* 79

Figura 40 *Diagrama de cajas y bigotes de la dureza del NZ para 620 RPM*..... 81

Figura 41 *Diagrama de cajas y bigotes de la dureza del NZ para 720 RPM*..... 82

Figura 42 *Diagrama de cajas y bigotes de la dureza del NZ para 520 RPM*..... 83

Figura 43 *Curvas de propiedades mecánicas modeladas y experimentales a 520 RPM*..... 86

Figura 44 *Curvas de propiedades mecánicas modeladas y experimentales a 620 RPM*..... 87

Figura 45 *Curvas de propiedades mecánicas modeladas y experimentales a 720 RPM*..... 88

Figura 46 <i>Gráfica de efectos principales para SUT vs VA, VR</i>	90
Figura 47 <i>Gráfica de efectos principales para SY vs VA, VR</i>	91
Figura 48 <i>Gráfica de efectos principales para E vs VA, VR</i>	92

Lista de Apéndices

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

Apéndice A. Ficha técnica de la fresadora.

Apéndice B. WPS de las juntas soldadas.

Apéndice C. Curvas de esfuerzo-deformación para las 45 probetas y las de control.

Glosario

AA6061: aleación de aluminio ampliamente utilizada, compuesta principalmente por aluminio, magnesio y silicio, conocida por su resistencia mecánica, buena maquinabilidad y resistencia a la corrosión.

Defecto de porosidad: pequeñas cavidades o burbujas atrapadas en el material soldado, lo que puede comprometer la resistencia mecánica de la unión.

Ensayo de dureza Vickers: método para medir la dureza de un material mediante la aplicación de una carga sobre una superficie pequeña. En la soldadura FSW, este ensayo se usa para evaluar la dureza en diferentes zonas de la junta soldada.

Ensayo de tracción: prueba mecánica que mide la resistencia de un material cuando se somete a una fuerza de estiramiento. En el contexto de FSW, este ensayo evalúa la calidad de la unión soldada.

Fresadora vertical convencional: máquina utilizada para adaptar el proceso de FSW en configuraciones experimentales, que permite realizar un control adecuado de parámetros como la velocidad de avance y rotación.

FSW (Friction Stir Welding): proceso de soldadura en estado sólido que utiliza una herramienta rotativa no consumible para generar calor por fricción y unir materiales sin fundirlos completamente.

Geometría del pin: forma del pin de la herramienta de FSW, que puede ser cilíndrica, cónica, cuadrada, entre otras, y que influye en el flujo del material y la calidad de la soldadura.

Kissing bond: defecto en las juntas soldadas por FSW que implica una unión incompleta en la raíz de la soldadura, donde el material no se ha mezclado adecuadamente.

Módulo de elasticidad: propiedad mecánica que indica la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida, clave para entender la deformación elástica de las juntas soldadas.

Soldadura a tope: configuración en la que dos piezas de material se colocan en una alineación coplanar y la herramienta las une a lo largo de su borde mediante el proceso FSW.

Velocidad de avance: parámetro que regula la rapidez con la que la herramienta avanza a lo largo de la línea de unión, influyendo en la calidad de la soldadura.

Velocidad de rotación: parámetro clave del FSW que controla la velocidad a la que gira la herramienta, generando calor por fricción para plastificar el material.

Zona afectada por el calor (HAZ): área adyacente a la zona de agitación que ha sido sometida a temperaturas elevadas durante la soldadura, lo que puede modificar sus propiedades mecánicas y microestructurales.

Zona base (BM): parte del material que no ha sido afectada por el calor o la deformación plástica del proceso de soldadura, conservando sus propiedades originales.

Zona de agitación (WN): región central en la soldadura FSW donde ocurre la mezcla y la unión del material plastificado.

Resumen

Título: Influencia de los parámetros en las propiedades mecánicas de juntas soldadas de aluminio A6061 por soldadura por fricción agitación *

Autores: Danilo Ramcess Osorio Plata, Juan Felipe Martínez Portilla **

Palabras Clave: Soldadura por fricción-agitación, aluminio A6061, parámetros de soldadura, propiedades mecánicas, resistencia a la tracción, dureza Vickers

Descripción: Este trabajo de investigación analizó la influencia de los parámetros de soldadura por fricción-agitación FSW sobre las propiedades mecánicas de juntas soldadas de aluminio A6061 de 6 mm de espesor. Se evaluó cómo la velocidad de rotación, la velocidad de avance y la geometría de la herramienta afectan la resistencia a la tracción y la dureza de las juntas soldadas utilizando un diseño factorial de dos factores con tres niveles. Los parámetros fueron seleccionados con base en la literatura existente, adaptados a una fresadora vertical y al material a soldar. Los ensayos de tracción y dureza Vickers se realizaron según las normas ASTM E8/E8M y ASTM E384, respectivamente. Los resultados experimentales indicaron una disminución de las propiedades mecánicas con respecto al material base, especialmente en la zona central de la soldadura, mientras que las variaciones en la dureza se relacionan directamente con la distribución de calor en la zona de agitación (NZ) y la zona afectada por calor (HAZ). Se establecieron correlaciones matemáticas entre los parámetros de soldadura y las propiedades mecánicas obtenidas. El análisis de varianza (ANOVA) reveló que la velocidad de rotación junto con la velocidad de avance y la interacción de los parámetros tienen un efecto significativo en el esfuerzo último, mientras que el esfuerzo de fluencia y el módulo de elasticidad no mostraron significancia estadística.

* Influencia de los parámetros en las propiedades mecánicas de juntas soldadas de aluminio A6061 por soldadura por fricción agitación

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. PhD en Ingeniería de Materiales. Codirector: Robin Alexis Cristancho Perilla. Ingeniero Mecánico.

Abstract

Title: Influence of parameters on the mechanical properties of A6061 aluminum welded joints by Friction Stir Welding*

Author(s): Danilo Ramcess Osorio Plata, Juan Felipe Martínez Portilla**

Key Words: Friction Stir Welding, aluminum A6061, welding parameters, mechanical properties, tensile strength, Vickers hardness

Description: This research work studied the influence of friction stir welding (FSW) parameters on the mechanical properties of 6 mm thick A6061 aluminum welded joints. It evaluates how rotational speed; feed rate and tool geometry affected the tensile strength and hardness of the welded joints using a two-factor factorial design with three levels. The parameters were selected based on existing literature, adapted to a vertical milling machine and the material to be welded. Tensile and Vickers hardness tests were carried out according to ASTM E8/E8M and ASTM E384, respectively. Experimental results indicated a decrease in mechanical properties compared to the base material, especially in the center zone of the weld, while variations in hardness are directly related to the heat distribution in the nugget zone (NZ) and the heat affected zone (HAZ). Mathematical correlations were established between the welding parameters and the mechanical properties obtained. Analysis of variance (ANOVA) revealed that the rotational speed together with the feed rate, and the interaction of the parameters have a significant effect on the ultimate stress, while the yield stress and the modulus of elasticity did not show statistical significance.

* Influence of parameters on the mechanical properties of A6061 aluminum welded joints by Friction Stir Welding

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. PhD in Materials Engineering. Co-director: Robin Alexis Cristancho Perilla. Mechanical Engineer.

Introducción

La soldadura por fricción-agitación, también conocida como Friction Stir Welding (FSW), es un método eficaz para unir materiales ligeros y resistentes. Durante este proceso, como indica Mishra & Ma (2005), se utiliza la fricción y agitación en la zona de unión mediante una herramienta rotativa no consumible diseñada para este fin.

Aunque esta forma de soldadura se presenta como una alternativa innovadora en la industria, especialmente para la unión de materiales como el aluminio y sus aleaciones. Recientemente, Sivakumar et al. (2022) concluyeron que la unión de aleaciones de aluminio de la serie 6xxx, usando FSW es viable para distintas aplicaciones. Sin embargo, Dewangan et al. (2022), observó que la limitada comprensión de los factores que influyen en las propiedades mecánicas de las juntas soldadas causa una restricción para su aplicación y optimización. Esto es especialmente relevante en entornos industriales donde no se emplea maquinaria diseñada para hacer FSW.

Para asegurar un control adecuado de las propiedades mecánicas de estas juntas, es esencial profundizar en la comprensión del impacto de los parámetros de proceso. En un estudio realizado por Sivakumar et al. (2022) encontró una variación en las propiedades mecánicas cuando utilizan diferentes valores para la velocidad de avance y de rotación. Como resultado se obtuvo que al menos el 75% de las juntas coinciden o se acercan a las propiedades del material base.

Otro factor importante que considerar es la geometría del pin para soldar. Su función principal, como menciona Mishra & Ma (2005), es la de generar calor mediante la fricción entre el hombro y el material. Y segundo, hacer fluir el material a lo largo de la línea de unión. De acuerdo con lo anterior, en los últimos años se han hecho avances en los que se usan diferentes geometrías para entender como varían las propiedades de la soldadura. En el estudio hecho por

(Swetha & Padhy, 2023) se concluyó que las juntas soldadas por un pin cuadrado tienen la mayor resistencia a la tracción que con un pin cilíndrico o cónico.

Como consecuencia hay una gran variedad de variables para llevar a cabo un proceso de soldadura por fricción y agitación. Desde el tipo de material y la geometría del pin hasta las diferentes velocidades de avance y rotación de la herramienta. Por lo que esta investigación busca evaluar la influencia de los parámetros en una junta soldada para analizar sus propiedades mecánicas. Enfocándose en la aleación de aluminio 6061. Ya que contribuye a los objetivos de desarrollo social, científico y tecnológico de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

1 Justificación

El proceso de soldadura por fricción-agitación FSW ha ganado reconocimiento en diversas industrias debido a su capacidad para generar uniones resistentes y sin defectos en materiales, como el aluminio A6061 (Mishra & Ma, 2005). Este estudio aborda la necesidad de establecer correlaciones entre los parámetros de soldadura y las propiedades mecánicas de las juntas soldadas de aluminio A6061. La falta de conocimiento sobre cómo estos parámetros influyen en la resistencia a la tracción y dureza han resultado en la generación de defectos en el cordón de soldadura Dewangan et al. (2022). Un entendimiento de estos factores permite no solo mejorar la calidad de las uniones, sino también aumentar la eficiencia en la fabricación de la soldadura (Sivakumar et al., 2022).

Con base en lo académico, este trabajo de investigación ayuda a entender vacíos en la literatura existente con datos experimentales, de cómo la combinación de parámetros afecta el comportamiento mecánico de las juntas de aleación de aluminio 6061. La recopilación y análisis de estos datos permite desarrollar correlaciones matemáticas que pueden ser usados en investigaciones posteriores o en la implementación industrial del proceso (Mishra & Ma, 2005).

Finalmente, este proyecto contribuye con los objetivos de desarrollo científico y tecnológico de la Universidad Industrial de Santander, ya que promueve la investigación en el campo de la soldadura y los materiales, un área de la ingeniería mecánica. El desarrollo de nuevas metodologías para fabricar juntas soldadas por fricción-agitación permite entender el comportamiento de las propiedades mecánicas y mejorar la eficiencia de este proceso productivo.

2 Planteamiento del problema

A pesar de los avances en la implementación de la soldadura por fricción-agitación FSW, aún existe una falta de claridad en cómo los parámetros del proceso, como la velocidad de rotación, velocidad de avance y geometría de la herramienta, influyen en las propiedades mecánicas de las juntas soldadas de aluminio A6061. Esta aleación es utilizada en sectores industriales como la automotriz y aeroespacial por su combinación de ligereza y resistencia a la corrosión. Sin embargo, una parametrización incorrecta del proceso FSW puede dar lugar a defectos que comprometen la calidad y la funcionalidad de las juntas.

Algunos de estos defectos son el resultado de una selección incorrecta de parámetros, que puede causar un sobrecalentamiento del material y provocar cavidades o fusión incompleta, o bien un calentamiento insuficiente, que dificulta la unión adecuada de la junta (Rajakumar et al., 2010). Estos defectos no solo comprometen la integridad de las juntas, sino que debilitan sus propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción y la dureza. Las cavidades internas, al no ser visibles, pueden convertirse en puntos críticos para la iniciación de fracturas. Además, la desalineación o unión incompleta reducen la capacidad de la junta para soportar cargas (Mishra & Ma, 2005).

Para evitar estos problemas, es importante entender cómo los parámetros del proceso de soldadura influyen en la junta soldada de manera que se minimicen estos defectos y se maximicen las propiedades mecánicas (Dewangan, Saurabh et al., 2022). El control simultáneo de los parámetros como la velocidad de rotación y la velocidad de avance representa un desafío técnico, especialmente en configuraciones industriales donde no siempre se dispone de maquinaria diseñada para FSW.

De la misma forma, el uso de fresadoras verticales convencionales adaptadas para FSW, si bien es posible, aumenta la complejidad del proceso ya que no es posible tener un control preciso y constante de los parámetros para evitar la generación de defectos durante toda la soldadura (Reza-E-Rabby et al., 2018).

Por lo tanto, surge la necesidad de investigar y determinar combinaciones de parámetros que aseguren una plastificación adecuada del material, un flujo homogéneo y, una soldadura de calidad sin comprometer las propiedades mecánicas del material base. Esta investigación se centró en determinar cómo estos parámetros influyen en las propiedades mecánicas del aluminio A6061 para establecer límites para llevar a cabo el proceso FSW y minimizar los defectos en las juntas soldadas.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la influencia de los parámetros de soldadura en el proceso FSW sobre las propiedades mecánicas de juntas soldadas de aluminio A6061.

3.2 Objetivos específicos

Revisar la literatura existente para identificar los parámetros de soldadura FSW más adecuados que serán utilizados en el diseño del experimento para el material propuesto.

Fabricar probetas de aluminio A6061 mediante el proceso FSW, cumpliendo con los estándares ASTM E8/E8M:22 y ASTM E384:17, para llevar a cabo ensayos de tracción y dureza.

Establecer correlaciones matemáticas entre los parámetros de soldadura aplicados durante el proceso FSW y las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tracción y dureza.

4 Marco teórico

4.1 Aleación de aluminio 6061

La aleación 6061 es una de las más versátiles dentro de la serie 6000, ampliamente utilizada por su equilibrio entre resistencia mecánica, maquinabilidad y resistencia a la corrosión. Está compuesta principalmente por aluminio, magnesio y silicio, lo que le otorga buenas propiedades mecánicas para aplicaciones estructurales. Sus principales usos incluyen componentes en la industria aeroespacial, la automotriz y la construcción de infraestructuras como puentes y maquinaria pesada (Kaufman et al., 2004). Además, su excelente relación entre resistencia y peso la hace preferida en aplicaciones que requieren durabilidad sin comprometer la ligereza (Davis, 2001).

4.1.1 Composición química de la aleación 6061

La aleación de aluminio 6061 contiene magnesio y silicio. Estos elementos forman Mg_2Si , lo que proporciona propiedades mecánicas como la resistencia a la corrosión. La composición química de la aleación 6061 se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1

Composición química (% e.p.) de la aleación A6061

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros	Al
0.40	0.7	0.15	0.15	0.8	0.04	-	0.25	0.15	0.15	balance
0.8	-	0.4	-	1.2	0.35	-	-	-	-	-

Nota. Tomado de ASM International. (1990). *Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials (Vol. 2, ASM Handbook)*. ASM International. ISBN: 978-0871703781

4.1.2 Propiedades mecánicas de la aleación 6061

La aleación 6061 tiene una resistencia a la tracción de 290-310 MPa y una resistencia a la fluencia de aproximadamente 240 MPa, lo que la hace adecuada para soportar altas cargas sin deformarse permanentemente. La dureza de la aleación oscila entre 60-70 Vickers, lo que le

confiere buena resistencia al desgaste en aplicaciones industriales (Davis, 2001; Sato et al., 2020).

En la Tabla 2 se muestran las propiedades físicas y mecánicas del aluminio 6061.

Tabla 2

Propiedades físicas y mecánicas de la aleación A6061

Densidad (g/cm³)	Límite de resistencia a la tracción (MPa)	Límite de fluencia (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación (%)	Dureza Vickers (HV)
2.7	205	185	69	12	70

Nota. Tomado de ASM International. (1990). *Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials (Vol. 2, ASM Handbook)*. ASM International. ISBN: 978-0871703781

4.1.3 Aplicaciones

Las aleaciones de aluminio tienen una gran variedad de aplicaciones debido a sus propiedades mecánicas, como alta resistencia y baja densidad, combinadas con su resistencia a la corrosión. Se utilizan ampliamente en sectores como el transporte, la construcción, productos eléctricos y bienes de consumo.

En el sector del transporte, son clave en la fabricación de componentes de aeronaves, vehículos espaciales, automóviles y barcos, donde el peso ligero es un factor importante. Las aleaciones de aluminio, especialmente aquellas como la serie 6000 (Al-Mg-Si) y 7000 (Al-Zn-Mg), son preferidas en aplicaciones estructurales que requieren alta resistencia y una buena relación peso-fuerza (Davis, 2001). También, en la industria automotriz, se usan para fabricar piezas como chasis y componentes del motor, optimizando el rendimiento al reducir el peso del vehículo (Sato et al., 2020).

En construcción, las aleaciones de aluminio se utilizan en marcos, fachadas y estructuras arquitectónicas debido a su durabilidad y resistencia a la corrosión, especialmente en condiciones

ambientales adversas. Esto las hace ideales para su uso en estructuras de puentes y edificios que deben soportar grandes cargas mecánicas a lo largo del tiempo.

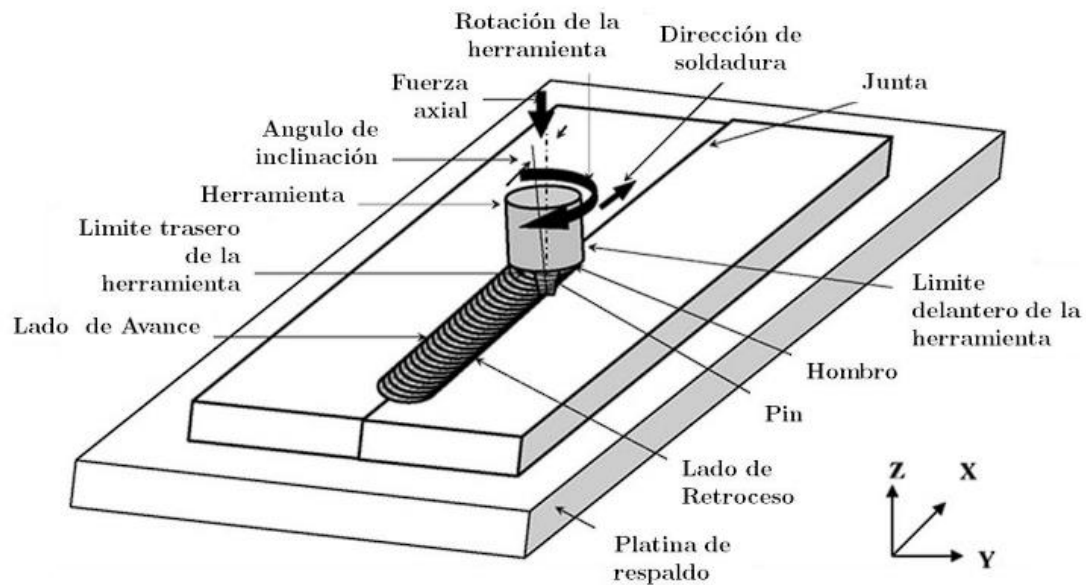
4.2 Soldadura por fricción-agitación FSW

La soldadura por fricción-agitación o por sus siglas en inglés (FSW, *Friction Stir Welding*), cuyo proceso se presenta en la Figura 1, es un proceso de unión innovador que se realiza en estado sólido, lo que significa que no se requiere fundir el material base para lograr la soldadura. Desarrollada por el Instituto de Soldadura de Inglaterra (TWI) en 1991, esta técnica utiliza una herramienta rotativa no consumible que, al desplazarse a lo largo de la línea de unión, genera calor a través de fricción. Este calor provoca la plastificación del material adyacente, permitiendo que se mezcle y se forme una unión sólida sin la aparición de defectos comunes en la soldadura convencional, como la porosidad y la inclusión de óxidos (Mishra & Ma, 2005)

Durante el proceso de FSW, la herramienta está compuesta principalmente por dos partes: el hombro, que aplica presión y genera calor a través de la fricción, y el pin, que penetra en el material para mezclarlo y permitir la unión (Mishra & Ma, 2005). La interacción entre el hombro y el pin es crucial para el éxito del proceso, ya que un diseño adecuado de la herramienta puede mejorar significativamente la calidad de la soldadura (Thomas et al., 1993).

Figura 1

Esquema de una configuración de unión a tope mediante la soldadura



Nota. Adaptado de Kumar, D. & Kumar, J. (2020). *Optimization of Parameters in friction stir welding AA6101 by Taguchi approach.* Advanced Engineering Optimization Through Intelligent Techniques, 949-361-370. (https://doi.org/10.1007/978-981-13-8196-6_32)

Durante el proceso de soldadura FSW, se forman varias zonas en la pieza unida, cada una con características microestructurales y mecánicas específicas. Estas zonas son fundamentales para comprender el comportamiento del material soldado y se clasifican de la siguiente manera:

- Zona Base (BM, Base Material): Esta es la región del material que no ha sido afectada por el proceso de soldadura. Mantiene las propiedades mecánicas y la microestructura originales del material base.
- Zona Afectada por el Calor (HAZ, Heat Affected Zone): Esta zona se encuentra adyacente a la zona de agitación y ha sido expuesta a temperaturas elevadas durante el proceso, lo que puede provocar cambios en su microestructura y propiedades mecánicas. Aunque no

se produce deformación plástica en esta región, los efectos térmicos pueden resultar en un ablandamiento del material y la posible recristalización.

- Zona de Agitación (WN, Weld Nugget): Esta es la zona central donde ocurre la mezcla y la unión del material plastificado. La WN presenta una microestructura de grano fino resultante de la intensa deformación plástica y recristalización que tiene lugar a altas temperaturas durante la soldadura. Esta zona es crucial, ya que sus propiedades mecánicas determinan la calidad de la unión (Mishra & Ma, 2005).
- Zona de Transición (TMAZ, Thermomechanical Affected Zone): La TMAZ se ubica entre la zona de agitación y la zona afectada por el calor. En esta región, se observan gradientes en la microestructura y en las propiedades mecánicas, ya que combina características de ambas zonas. La TMAZ es importante para el análisis de la integridad de la unión, ya que su comportamiento puede influir en la resistencia a la fractura de la soldadura (Dewangan, Satya Kumar et al., 2020; Sato et al., 2020).

4.2.1 Aplicaciones de FSW en la industria

En la industria, la FSW se ha implementado con éxito en la fabricación de componentes aeroespaciales, automotrices y en la construcción de estructuras de aluminio. El uso de FSW en aluminio 6061 ha demostrado ser especialmente eficaz en la producción de componentes ligeros y de alta resistencia, lo que es crucial en sectores como la construcción de ventanas y marcos estructurales (Arbegas, 2008). La capacidad de FSW para producir uniones sólidas y libres de defectos en aluminio 6061 hace que este proceso sea altamente valorado en aplicaciones donde la integridad estructural es esencial.

4.2.2 *Uso de fresadoras verticales convencionales en FSW*

Aunque el equipo especializado para FSW es preferido para la producción a gran escala, las fresadoras verticales convencionales pueden adaptarse para llevar a cabo este proceso de soldadura en aplicaciones de menor escala o en estudios experimentales. La fresadora vertical permite el control de la profundidad y velocidad de avance de la herramienta, lo cual ayuda en el proceso de la soldadura (Kumar, R. et al., 2015). La adaptación de fresadoras convencionales para FSW es una práctica que permite explorar la viabilidad del proceso en escenarios donde el equipamiento específico de FSW no está disponible, lo que resulta en un menor costo de implementación y mayor accesibilidad (Reza-E-Rabby et al., 2018).

4.2.3 *Herramienta utilizada en la soldadura FSW*

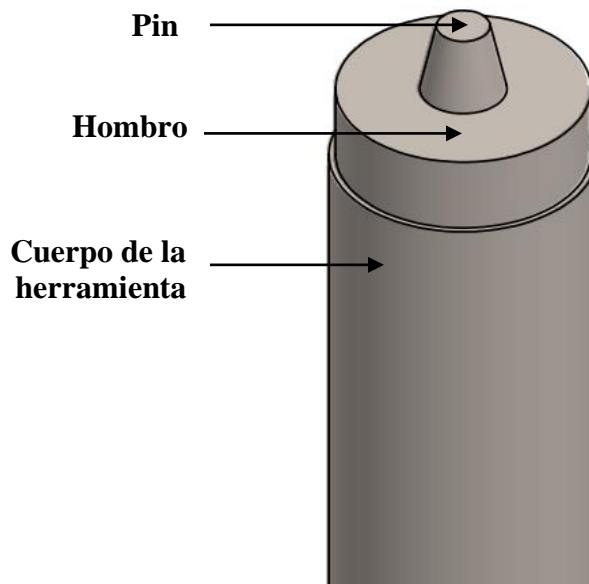
La herramienta utilizada en la soldadura FSW, presentada en la Figura 2, desempeña tres funciones fundamentales: calentar la pieza de trabajo, mover el material para formar la unión y mantener el metal caliente bajo el hombro de la herramienta.

El giro del pin y del hombro genera calor a través de fricción, lo que da lugar a una zona plastificada alrededor del pin, provocando una deformación plástica en la pieza de trabajo. El material plastificado se transporta debido a la combinación del movimiento rotatorio de la herramienta y su avance, llenando el espacio entre las piezas unidas. Al enfriarse, este material forma una fase sólida en la unión, mientras que el hombro de la herramienta evita que el material deformado sea expulsado de la junta.

Debido a las características de la herramienta, el movimiento del material alrededor del pin puede ser complejo, presentando gradientes de tensión, temperatura y velocidad de deformación. Como resultado, la microestructura en la zona de agitación no es homogénea, reflejando los distintos ciclos termomecánicos experimentados durante el proceso.

Figura 2

Esquema de la herramienta de soldadura para FSW



El hombro es responsable de generar calor a través de la fricción directa con la superficie del material, lo que facilita el flujo del material alrededor del pin. El pin, por otro lado, penetra en el material y actúa como un mecanismo de mezcla, permitiendo la unión de los materiales al generar una mezcla homogénea (Mishra & Ma, 2005). La interacción entre el hombro y el pin determina la eficacia del proceso, ya que un buen diseño puede mejorar la calidad de la soldadura y la velocidad del proceso.

La influencia del diseño de la herramienta en el proceso de FSW ha sido objeto de numerosos estudios recientes. Por ejemplo, Wang et al. (2016) investigaron cómo diferentes geometrías de pasador afectan la calidad de la soldadura y el rendimiento del proceso. A su vez, Liu et al. (2018) analizaron el impacto del diseño del hombro en la distribución de la temperatura y la fuerza durante la soldadura. Además, Romero et al. (2020) revisaron los avances recientes en la fabricación de herramientas para FSW, destacando nuevas técnicas de diseño que mejoran la eficiencia y la calidad del proceso.

4.3 Parámetros usados en FSW para aluminio 6061

La soldadura por fricción-agitación involucra parámetros críticos que deben seleccionarse cuidadosamente para obtener una unión sin defectos. Los principales parámetros que influyen en el proceso FSW se incluyen a continuación.

Velocidad de rotación: La velocidad de rotación de la herramienta es fundamental para la generación de calor por fricción. Este calor es esencial para plastificar el material y facilitar la mezcla. Generalmente, se emplean velocidades de rotación que oscilan entre 300 y 1200 revoluciones por minuto (RPM), dependiendo del tipo de material y su espesor. Una velocidad de rotación adecuada garantiza una adecuada plastificación sin provocar un sobrecalentamiento que pueda comprometer la integridad de la unión (Dewangan, Saurabh et al., 2022; Mishra & Ma, 2005).

Velocidad de avance: La velocidad de avance de la herramienta determina el tiempo de interacción entre el material y la herramienta. Una velocidad de avance excesiva puede dar lugar a una soldadura fría, mientras que una velocidad demasiado baja puede resultar en sobrecalentamiento y un crecimiento no deseado de grano en la zona de agitación (Rajakumar et al., 2010).

Profundidad de penetración: Este parámetro se refiere a cuánto penetra el pin de la herramienta en el material. La profundidad de penetración influye en la cantidad de material que se mezcla y se une. Una penetración adecuada permite una mayor plastificación del material, mientras que una penetración insuficiente puede resultar en unión incompleta (Mishra & Ma, 2005).

Geometría de la herramienta: La forma del pin y del hombro de la herramienta tiene un impacto significativo en el flujo del material y en la calidad de la soldadura. Diferentes geometrías

pueden mejorar la mezcla del material plastificado y afectar la distribución del calor en la zona de soldadura. Por ejemplo, pines con roscas o geometrías específicas pueden mejorar el flujo del material y reducir la formación de defectos (Dewangan, Saurabh et al., 2022; Sato et al., 2020).

Material de la herramienta: El material de la herramienta también es un factor crítico. Debe ser lo suficientemente duro y resistente al desgaste para soportar las altas temperaturas y fuerzas generadas durante el proceso de soldadura. Las herramientas suelen fabricarse con materiales como acero rápido, metal duro o compuestos cerámicos (Mishra & Ma, 2005).

Presión de contacto: La presión que se aplica a la herramienta durante el proceso afecta la plastificación del material. Una presión adecuada ayuda a mantener el contacto entre la herramienta y las piezas de trabajo, garantizando una mejor transferencia de calor y una mezcla eficiente del material (Mishra & Ma, 2005).

4.3.1 Ventajas y desventajas de FSW en aluminio 6061

El FSW ofrece varias ventajas al trabajar con aluminio 6061, incluyendo la ausencia de porosidad y defectos relacionados con la solidificación, baja distorsión térmica, y la posibilidad de soldar materiales difíciles de unir mediante técnicas tradicionales (Mishra & Ma, 2005). Sin embargo, las limitaciones incluyen la necesidad de fuerzas de sujeción significativas, el desgaste de la herramienta, y la complejidad en el control de los parámetros de proceso para garantizar una soldadura de alta calidad (Lorrain et al., 2010).

4.4 Defectos de soldadura en FSW

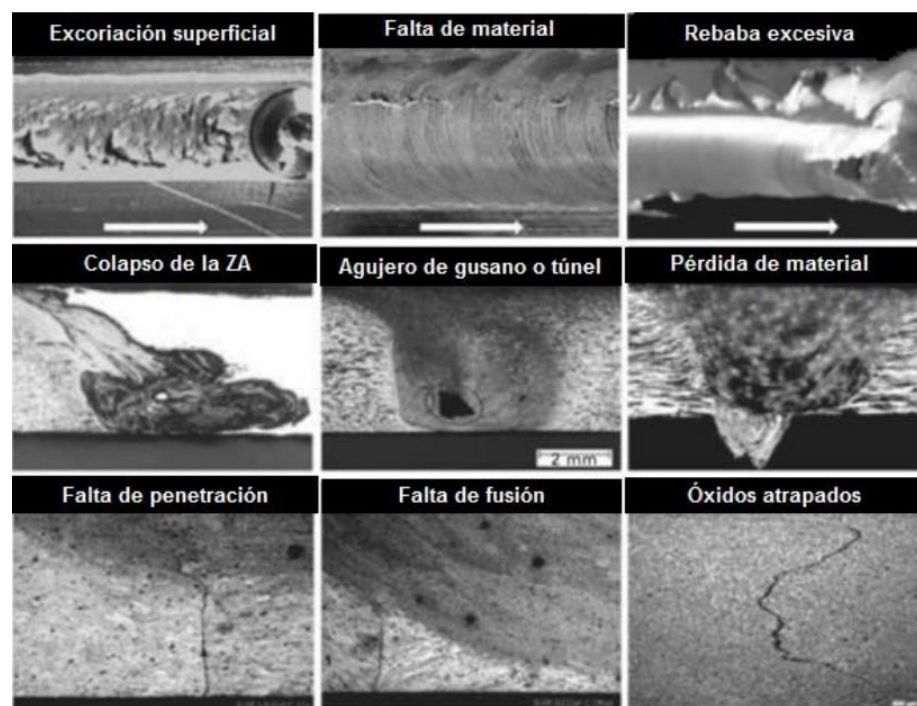
A pesar de las ventajas que ofrece la soldadura por fricción-agitación, este proceso puede presentar defectos que afecten la integridad estructural y las propiedades mecánicas de las uniones. La inspección visual permite detectar defectos superficiales. Sin embargo, los defectos internos,

como cavidades o falta de fusión, requieren técnicas de inspección no destructiva para su detección.

La Figura 3 muestra los defectos más comunes en las soldaduras por fricción-agitación, incluyendo diferentes fallas estructurales. Uno de ellos es la porosidad, que consiste en la presencia de pequeñas burbujas o cavidades dentro de la soldadura. Este defecto puede ser causado por la inclusión de aire durante el proceso o por impurezas en el material base, lo que reduce la resistencia de la unión y afecta su resistencia a la tracción y a la fatiga (Gibson et al., 2014).

Figura 3

Defectos que ocurren en las soldaduras por fricción agitación



Nota. Adaptado de Lohwasser, D., Chen, Z., & Zhan, X. (2010). *Friction Stir Welding: From basics applications*. Woodhead Publishing

Otro defecto importante es la formación de cavidades internas, también conocidas como túneles o poros de gusano, que ocurren cuando hay una falta de llenado en la soldadura, resultando en espacios vacíos dentro de la unión. En la Figura 4 muestra un caso de un poro de gusano visible

en la soldadura, que es una forma de porosidad. Es importante destacar que es especialmente peligroso, ya que es difícil de detectar y puede actuar como punto de inicio para fracturas (Mishra & Ma, 2005).

Figura 4

Porosidad de gusano al final del cordón de soldadura

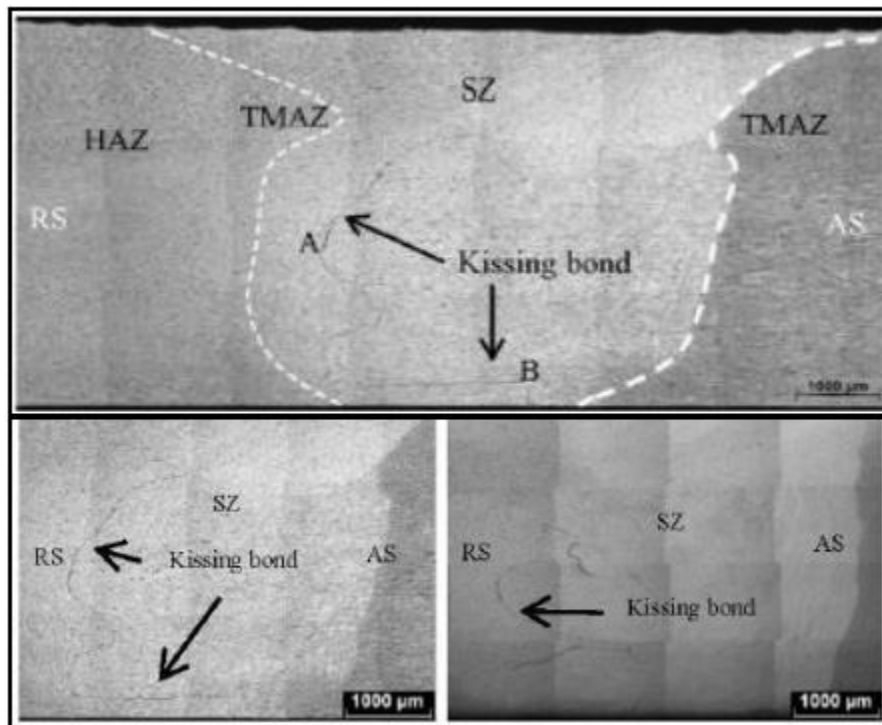


Además, el kissing bond es un defecto que se produce cuando hay una unión incompleta en la raíz de la soldadura, lo que implica que el material no se ha mezclado adecuadamente. Este defecto puede observarse en la Figura 5, donde se muestra una imagen representativa de un defecto de este tipo. A menudo, este defecto no es visible desde el exterior, lo que dificulta su detección y puede comprometer la resistencia de la soldadura (Mishra & Ma, 2005).

La desalineación o desplazamiento de la junta es otro defecto que se presenta cuando la herramienta no está correctamente alineada con la línea de unión, resultando en una soldadura desigual. Este tipo de desalineación puede afectar la integridad estructural de la unión, reduciendo su capacidad para soportar cargas (Schneider & Nunes, 2004).

Figura 5

Representación del defecto de soldadura Kissing bond



Nota. Tomado de Ibrahim, M. H., & Sangeetha, K. (2020). *Review of the common defects in friction stir welding*. International Journal of Scientific & Technology Research, 9(01), 67-71. (<https://www.ijstr.org/research-paper-publishing.php?year=2020&month=01&title=Review-Of-The-Common-Defects-In-Friction-Stir-Welding>)

El flashing excesivo, que se refiere al material que se expulsa hacia los lados de la línea de soldadura durante el proceso, también es un defecto a tener en cuenta. La Figura 6 ilustra un defecto superficial de soldadura, destacando la importancia de una correcta inspección visual en las uniones soldadas. Aunque no siempre compromete la integridad estructural de la unión, puede requerir operaciones adicionales de acabado para cumplir con especificaciones estéticas o dimensionales (Sato et al., 2020).

Por último, la fusión incompleta se presenta cuando no se genera suficiente calor para fundir completamente el material, resultando en una unión débil. Este defecto puede ser causado por velocidades de avance demasiado altas o por una inadecuada penetración de la herramienta en el material (Thomas et al., 1993)

Figura 6

Defecto superficial de soldadura Lack of Fill



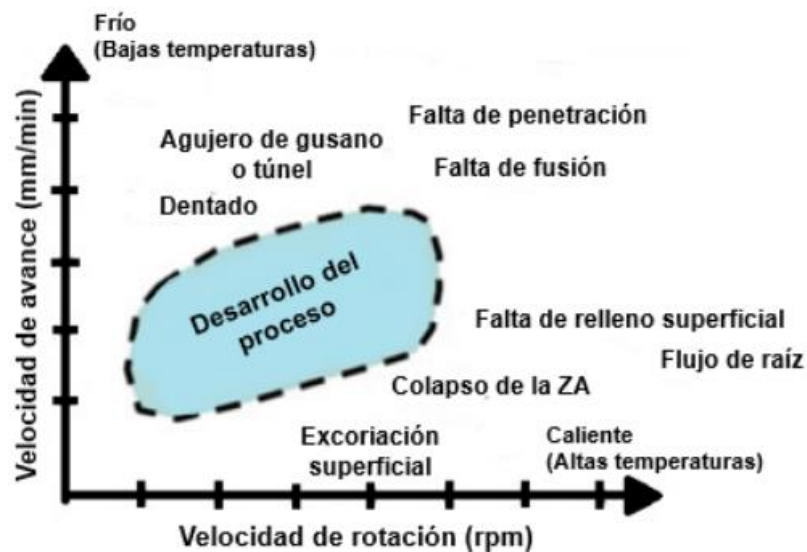
Para minimizar la aparición de estos defectos, es crucial llevar a cabo un control de los parámetros del proceso de soldadura, incluyendo la velocidad de rotación y la velocidad de avance de la herramienta, así como la geometría de la herramienta utilizada (Mishra & Ma, 2005)

Según Arbegast (2008), se pueden utilizar modelos de procesamiento en la soldadura por fricción-agitación FSW para determinar las zonas adecuadas de flujo del material y las áreas donde es más probable que se formen defectos. Estos mapas son herramientas valiosas que permiten a los ingenieros visualizar y comprender las condiciones de soldadura que influyen en la calidad de

la unión. Al analizar el comportamiento del material bajo diferentes parámetros de soldadura, se puede identificar las condiciones críticas que favorecen o inhiben la formación de defectos como se observa en la Figura 7.

Figura 7

Modelo para la formación de defectos en la soldadura por fricción agitación



Nota. Adaptado de Arbegast, W. J. (2008). *A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding.* Scripta Materialia, 58(4), 372–376. (<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.10.014>)

4.5 Análisis de varianza ANOVA

El Análisis de Varianza es una herramienta estadística que permite evaluar la significancia del modelo de regresión, determinando si las relaciones entre las variables independientes y dependientes son estadísticamente significativas (Montgomery, 2013). A continuación, se describen los componentes del análisis ANOVA, que permiten descomponer la variabilidad de los datos en términos explicativos del modelo y de error.

Regresión (Sum of Squares - SS): Este valor refleja la cantidad de variabilidad explicada por el modelo de regresión. Un alto valor de SS de regresión indica que el modelo captura adecuadamente la variabilidad de los datos (Kutner et al., 2005).

Error (Sum of Squares - SS): Representa la variabilidad no explicada por el modelo de regresión, es decir, la variabilidad que se debe a errores aleatorios o a factores no incluidos en el modelo (Montgomery, 2013).

Total (Sum of Squares - SS): Es la suma de la variabilidad explicada por el modelo (regresión) y la variabilidad no explicada (error) (Kutner et al., 2005).

Grados de libertad (df): En el ANOVA, los grados de libertad se refieren al número de parámetros estimados y a la cantidad de datos disponibles (Cohen et al., 2003).

Media Cuadrática (Mean Square - MS): Es el cociente entre la suma de cuadrados (SS) y los grados de libertad (df), tanto para la regresión como para el error. Representa una medida de la variabilidad media explicada por el modelo y la no explicada (Montgomery, 2013).

Estadístico F: El estadístico F se utiliza para determinar si la variabilidad explicada por el modelo es significativamente mayor que la variabilidad no explicada. Un alto valor de F indicaría que el modelo es estadísticamente significativo (Kutner et al., 2005).

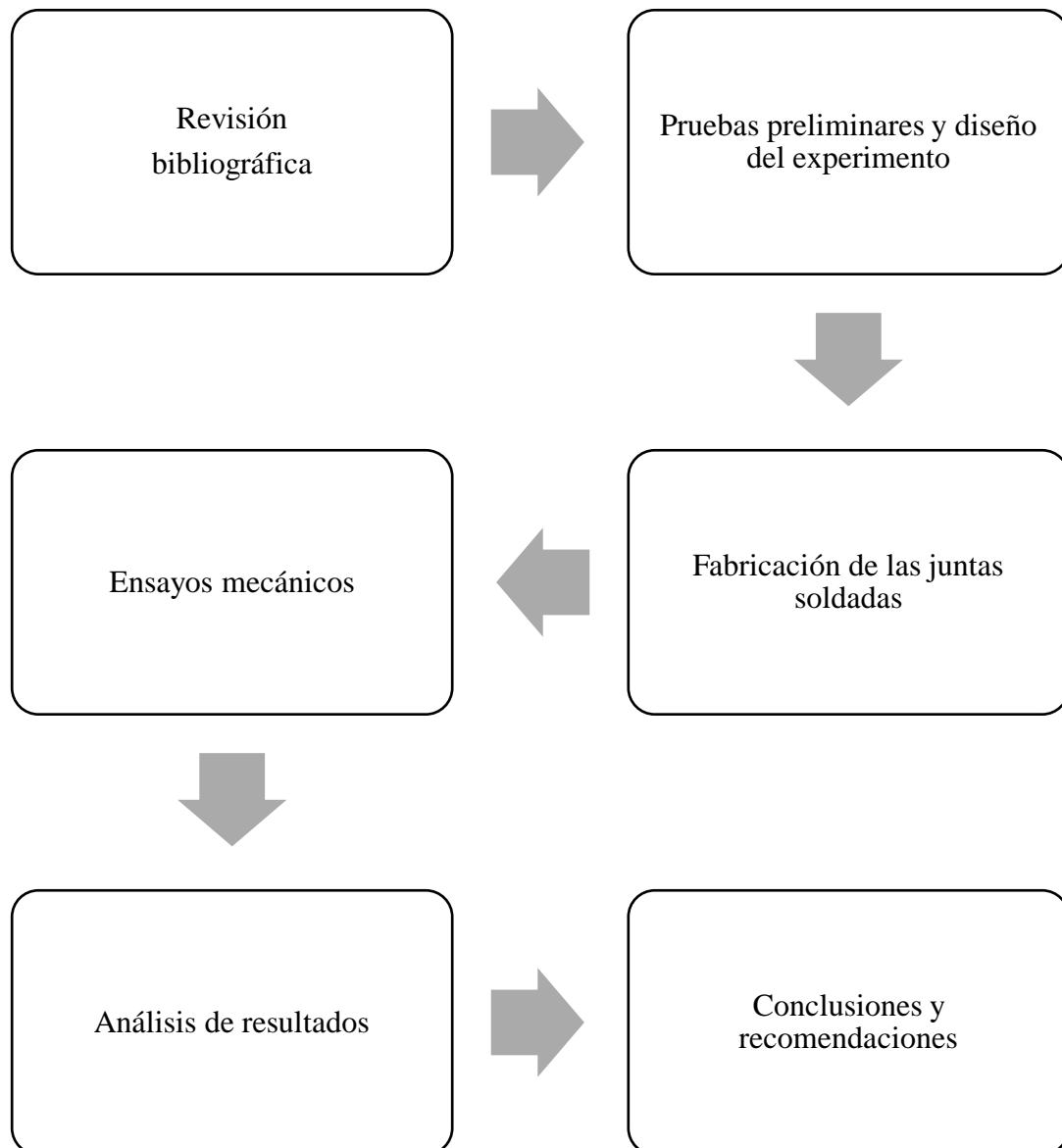
p-valor: El p-valor es la probabilidad de obtener un estadístico F igual o más extremo que el observado bajo la hipótesis nula de que los coeficientes de la regresión no son significativos (Cohen et al., 2003).

5 Metodología

La metodología empleada en este trabajo de investigación se presenta en la Figura 8, que detalla el proceso seguido para alcanzar los objetivos establecidos.

Figura 8

Diagrama de flujo de la metodología experimental del presente trabajo



5.1 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica se llevó a cabo para desarrollar el primer objetivo específico del estudio, empleando técnicas de búsqueda avanzada en bases de datos como Scopus, Web of Science y Google Scholar, utilizando ecuaciones de búsqueda con términos clave relacionados con la soldadura por fricción-agitación FSW en AA6061. Los estudios se compilaron mediante el uso de RefWorks y Mendeley para su organización y categorización según parámetros de soldadura y propiedades mecánicas. Además, se tuvo en cuenta que la junta soldada fuera a tope como criterio de selección. A continuación, se presentan las ecuaciones de búsqueda que se usaron para el estado del arte y algunos de los artículos encontrados en el proceso.

5.1.1 *Relación entre los parámetros y las propiedades mecánicas*

En esta sección, se utilizó la siguiente ecuación de búsqueda: (“friction stir welding” OR “FSW”) AND (Welding parameters) AND (“tensile strength” OR “hardness” OR “mechanical properties”). Principalmente se centró en buscar investigaciones que evaluaran el efecto de los parámetros del proceso de soldadura en las propiedades de juntas soldadas.

Un estudio relevante es el de Ghiasvand et al. (2021), en donde investigaron el impacto de varias geometrías del pin en las propiedades mecánicas en juntas de AA6061, manteniendo constantes la velocidad de avance a 60 mm/min y la velocidad de rotación a 1180 rpm. En los ensayos de tracción obtuvieron que dos de las juntas soldadas con geometría diferente conservaron el 92% y 78% de las propiedades del material base.

En el mismo sentido, Li et al. (2024) hicieron combinaciones de geometrías de pin con espesores de placas de aluminio (5, 8, 12 y 16 mm) respectivamente, variando las velocidades de rotación y avance. Para un espesor de 5 mm, encontraron que una velocidad de rotación de 1400

rom y una velocidad de 700 mm/min, junto con un pin roscado obtenían las mejores propiedades mecánicas.

Banik et al. (2018) también realizaron un estudio en el que se variaba el ángulo de inclinación de la herramienta durante el proceso de soldadura para placas de aluminio 6061 de 6 mm de espesor. Aunque los demás parámetros fueron constantes, encontraron que no hubo variación significativa en las propiedades de tracción. Sin embargo, la dureza de las juntas soldadas mostró una variación considerable, siendo la menor dureza obtenida cuando el ángulo de inclinación fue de 0 grados.

Debido a la cantidad de factores que pueden estar involucrados en el proceso de soldadura, Prakash & Daniel Das (2020) utilizaron un diseño factorial completo para evaluar el efecto de cuatro factores (velocidad de rotación, velocidad de avance, tiempo de soldadura y velocidad de penetración de la herramienta) y dos niveles (alto y bajo). A través de este diseño demostraron que el enfoque factorial es eficaz para comprender cómo la interacción de múltiples parámetros afecta las propiedades mecánicas.

5.1.2 Relación entre los defectos y los parámetros del proceso

Se investigó cómo los defectos en la soldadura por fricción-agitación están relacionados con los parámetros del proceso utilizando ecuación de búsqueda: (“friction stir welding” OR “FSW”) AND (“defects” OR “welding defects”) AND (Welding parameters). Debido a la limitada literatura disponible que describa el efecto de los parámetros o defectos en la aleación 6061, se amplió la búsqueda a estudios que incluyeran soldaduras FSW disímiles que involucraran dicha aleación. A continuación, se presentan algunas observaciones de estudios sobre soldaduras en aleaciones de aluminio.

En el estudio de Raturi et al. (2018), la geometría del pin se destaca como uno de los factores determinantes en la calidad de la soldadura. El pin cilíndrico de tres caras planas mostró mejores propiedades mecánicas debido a una mezcla más eficiente del material, lo que contribuyó a la reducción de defectos. Estos resultados coinciden con los observados por Sachinkumar et al. (2021), quienes evidenciaron que el uso de una geometría de pin cuadrado y una velocidad de rotación de 1200 RPM resultó en una mayor resistencia a la tracción, mejorando la distribución del calor y minimizando la presencia de defectos como grietas y porosidades.

De la misma manera, la interacción entre la velocidad de rotación y la velocidad de avance influye en la temperatura generada durante el proceso. Kumar et al. (2021) reportaron que altas velocidades de rotación con bajas velocidades de avance provocaban un aumento en la temperatura, lo que, en algunos casos resultaba en un ablandamiento excesivo del material y una zona afectada por calor (HAZ) de mayor tamaño.

Además, Balamurugan et al. (2021) señalaron que las velocidades más bajas de rotación producen una menor cantidad de energía térmica por la fricción entre el hombro y la pieza de trabajo, lo cual genera rugosidad superficial y defectos en la superficie debido a una rápida solidificación del material. Por otro lado, Cavaliere et al. (2006) observaron que una combinación de la velocidad de rotación de 1100 RPM y velocidad de avance de 60 mm/min daba como resultado soldaduras con mejor resistencia a la tracción y sin defectos.

La mayoría de los estudios revisados se centran en materiales con espesores que varían entre los 5 y 7 mm. El espesor del material influye en la disipación del calor durante la soldadura. En la investigación de Verma & Kumar (2021), se observó que a medida que aumenta el espesor, el control de la velocidad de avance se vuelve más importante para evitar defectos internos. En el trabajo de Azimzadegan & Serajzadeh (2010), se estudiaron placas de AA6061 con espesores de

6 mm, donde se analizó el efecto de los parámetros. Los autores concluyeron que, si bien una alta velocidad de rotación facilita la penetración en placas delgadas, en espesores mayores a los de 6 mm, una combinación inadecuada de velocidad de avance y rotación genera defectos como vacíos y falta de penetración.

5.1.3 Selección de parámetros y rangos para la soldadura

Para la selección de los parámetros se encontraron alrededor de 25 artículos que cumplieron con los requisitos anteriores, pero solo se escogieron 10 para la selección de parámetros a trabajar y los rangos de trabajo, ya que los demás no estaban enfocados en la evaluación de las propiedades mecánicas de las probetas soldadas, o no aportaban información relevante o útil para esta investigación. Los artículos seleccionados se compilaron en la Tabla 3, clasificándose por el título, el material y espesor usados, los parámetros y los resultados obtenidos. Estos enfoques ayudaron a establecer un marco de referencia sobre los parámetros de FSW más relevantes y sus efectos en las propiedades de las juntas soldadas.

Tabla 3*Artículos relevantes en la selección de los parámetros*

Título del artículo	Material	Parámetros de soldadura	Resultados
<p>"Joint strength and failure studies of dissimilar AA6061-AA7075 friction stir welds: Effects of tool pin, process parameters and preheating" (Raturi et al., 2018)</p>	<p>AA6061-AA7075 Espesor: 6,1 mm</p>	<p>Geometría del pin: Cilíndrico liso, cónico liso, trapezoidal cónico, cilíndrico roscado con tres caras planas Vel. rotación: 660, 900, 1200, 1700 RPM Vel. avance: 36, 63, 98, 132 mm/min</p>	<p>1. La geometría del pin y la velocidad de rotación fueron los factores que más influyen en la calidad de la soldadura y la capacidad de soportar cargas a tensión.</p> <p>2. Una alta velocidad de rotación redujo la zona de agitación y generó defectos debido al exceso de calor generado, resultando en una mezcla insuficiente del material. Además, una velocidad de avance elevada disminuyó las propiedades mecánicas de la unión.</p> <p>3. El pin cilíndrico roscado con tres caras planas, junto con parámetros intermedios de velocidad de rotación y avance intermedios obtuvo mejores propiedades mecánicas.</p>
<p>"Analysis of the Effect of Friction Stir Welding Parameters on Characteristics of AA6061 Composites using Response Surface Methodology" (Sachinkumar et al., 2021)</p>	<p>Compuesto de AA6061/SiC/fly ash Espesor: 6 mm</p>	<p>Geometría del pin: Cuadrado liso Vel. rotación: 695, 900, 1200, 1500, 1704 RPM Vel. avance: 26, 40, 60, 80, 93 mm/min Ángulo de inclinación de la herramienta: 0, 1, 2, 3, 4 grados</p>	<p>1. La mejor correlación con mejores propiedades mecánicas fue de 1200 rpm, 60 mm/min y un ángulo de inclinación de 2°, alcanzando un esfuerzo último de 147 MPa y 101 HV.</p> <p>2. Las fracturas de los ensayos de tracción empezaron por la zona afectada por calor (HAZ, <i>heat affected zone</i>) debido a que tiene una menor dureza comparado con las otras zonas.</p>

Título del artículo	Material	Parámetros de soldadura	Resultados
<p>"Effect of friction stir welding parameters on the material flow, mechanical properties and corrosion behavior of dissimilar AA5083-AA6061 joints" (Kumar, K. K. et al., 2021)</p>	<p>AA6061-AA5083 Espesor: 6 mm</p>	<p>Geometría del pin: Cónico roscado Vel. rotación: 800, 1100, 1400, 1700 RPM Vel. avance: 40, 60, 80 mm/min Ángulo de inclinación de la herramienta: 1°</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se observó que el calor producido en la zona de unión se debe a una baja velocidad de avance y alta velocidad de rotación, que produce un aumento en la temperatura haciendo que la zona de unión sea más grande por lo que el material es más blando. El tamaño del nugget en la zona de unión varió en función de los parámetros usados. 2. El aumento del tamaño de grano y la disolución de los precipitados en el AA6061, presentaron una menor dureza en la zona afectada por calor (HAZ, heat affected zone). Se observó una mejor mezcla del material al disminuir la velocidad de avance y aumentar la velocidad de rotación. 3. La mayor resistencia a la tracción se alcanzó con una velocidad de rotación de 1100 rpm y una velocidad de avance de 60 mm/min, logrando una eficiencia de la junta del 67% durante los ensayos de tracción.

Título del artículo	Material	Parámetros de soldadura	Resultados
<p>"Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al 6061 aluminum alloy joints" (Choudhary et al., 2019)</p>	<p>AA6061 T3 Espesor: 7 mm</p>	<p>Geometría del pin: Cilíndrico roscado Vel. rotación: 950, 1100 RPM Vel. avance: 760 mm/min Número de pasos: 1, 2, 3, 4</p>	<p>1. Se observaron defectos y aberturas visibles en el cordón de soldadura con 1 y 2 pasadas de la herramienta. Mientras que no se observaron defectos con 3 y 4 pasadas. Los defectos resultaron por la falta de generación de calor. 2. La dureza aumentó con el número de pasadas y disminuyó con el aumento de la velocidad de rotación. La máxima dureza se obtuvo con 950 rpm y 3 pasos de la herramienta. 3. El aumento del número de pasadas obstruye la disolución de precipitados sólidos en la soldadura por lo que la intensidad máxima se encuentra con 3 pasadas. Cuando se aumenta la velocidad de rotación el tamaño de grano aumenta debido a la mayor generación de calor.</p>
<p>"Friction stir welding parameters and their influence on mechanical properties of welded AA6061 and AA5052 aluminium plates" (Davidson, 2021)</p>	<p>AA6061-AA5052 Espesor: 6 mm</p>	<p>Geometría del pin: Cilíndrico liso Vel. rotación: 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 RPM Vel. avance: 20, 25, 30, 35, 40 mm/min Fuerza axial: 1, 1.5, 2, 2.5, 3 kN Ángulo de inclinación: -2, -1, 0, 1, 2 grados</p>	<p>1. La mayor resistencia a la tracción se obtuvo cuando la velocidad de rotación es de 1800 rpm y la velocidad de avance es 30 mm/min, la fuerza axial es 1.5 kN y el ángulo de inclinación es -2°. 2. Mayor generación de calor se puede obtener al disminuir la velocidad de avance y aumentar la velocidad de rotación de la herramienta. 3. El límite elástico se incrementó con el aumento de la velocidad de rotación de la herramienta porque la resistencia de las uniones soldadas por FSW es sensible a la velocidad de rotación.</p>

Título del artículo	Material	Parámetros de soldadura	Resultados
<p>"Influence of Friction Stir Welding Parameters on Dissimilar Joints AA6061-T6 and AA5052-H32" (Balamurugan et al., 2021)</p>	<p>AA6061 T6-AA5052 H32 Espesor: 5 mm</p>	<p>Geometría del pin: Cilíndrico liso, cuadrado, triangular Vel. rotación: 800, 950, 1100 RPM Vel. avance: 30, 60, 80 mm/min</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Los parámetros con las mejores propiedades mecánicas fueron a 1100 rpm, 60 mm/min y geometría cuadrada del pin, obteniendo una resistencia a la tracción de 181,52 MPa. 2. Se observó una disminución de la dureza en la zona afectada por calor (HAZ, <i>heat affected zone</i>) en ambos lados de las juntas soldadas debido al aumento del tamaño de grano. 3. Se observaron defectos a mayor velocidad de avance debido a la falta de insuficiente tiempo de agitación por parte del pin en la junta.
<p>"Investigation of tool forces, weld bead micro hardness and surface roughness during friction stir welding of Aluminium 6063 alloy" (Chinchanikar et al., 2020)</p>	<p>AA6063 Espesor: 7 mm</p>	<p>Geometría del pin: Cilíndrico liso Vel. rotación: 385, 685, 960 RPM Vel. avance: 18, 29, 45 mm/min</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Las fuerzas disminuyeron al aumentar la velocidad de soldadura, lo cual está relacionado con el incremento de la temperatura en el cordón de soldadura que ablandó el material. 2. A velocidades de rotación más bajas, la rugosidad superficial fue mayor debido a una menor generación de calor, lo que permitió que el material se solidificara más rápido, resultando en una superficie más áspera. 3. La micro dureza no se vio afectada significativamente con los parámetros usados. Sin embargo, se observó que a una mayor generación de calor causa una liberación excesiva del material agitado en la superficie del corcón de soldadura lo que disminuyó la dureza en esas áreas.

Título del artículo	Material	Parámetros de soldadura	Resultados
<p>"Optimization of friction stir welding parameters of dissimilar aluminium alloys 6061 and 5083 by using response surface methodology" (Verma & Kumar, 2021)</p>	<p>AA6061-AA5083 Espesor: 6,35 mm</p>	<p>Geometría del pin: Cilíndrico liso, cilíndrico roscado y cuadrado Vel. rotación: 1200, 1575, 1950 RPM Vel. avance: 30, 40, 50 mm/min Ángulo de inclinación: 0, 1, 2 grados</p>	<ol style="list-style-type: none"> Se obtuvo que a medida que aumentan los parámetros, los valores de esfuerzo último, resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación aumentaron hasta un máximo, y luego disminuyeron conforme aumentaron los parámetros. Con respecto a la geometría de los pines, se obtuvo un mayor porcentaje de alargamiento y un esfuerzo último a la tracción con el pin cilíndrico liso que con las otras configuraciones. Se recomendó una velocidad de rotación entre 1200-1575 rpm con una velocidad de avance entre 30-40 mm/min y perfil cilíndrico recto para lograr un esfuerzo último entre 114,8-134,9 MPa.
<p>"Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by Friction Stir Welding" (Cavaliere et al., 2006)</p>	<p>AA6056 Espesor: 4 mm</p>	<p>Geometría del pin: Cilíndrico liso Vel. rotación: 500, 800, 1000 RPM Vel. avance: 40, 56, 80 mm/min</p>	<ol style="list-style-type: none"> La resistencia máxima a la tracción se alcanzó con las velocidades de rotación más altas de 800 y 1000, junto con la mayor velocidad de avance de 80 mm/min usado en el análisis. Los perfiles de micro dureza en función de la distancia del centro de la soldadura fueron muy uniformes para las velocidades de rotación más bajas y las velocidades de avance más bajas. A velocidades más altas, la dureza del material aumento en todas las condiciones, pero los perfiles se volvieron menos uniformes a lo largo del centro de soldadura.

Título del artículo	Material	Parámetros de soldadura	Resultados
<p>"An Investigation into Microstructures and Mechanical Properties of AA7075-T6 during Friction Stir Welding at Relatively High Rotational Speeds" (Azimzadegan & Serajzadeh, 2010)</p>	<p>AA7075 T6 Espesor: 5 mm</p>	<p>Geometría del pin: Cilíndrico liso Vel. rotación: 1000-1400 RPM Vel. avance: 40-80 mm/min</p>	<p>1. A altas velocidades de rotación, es probable que se formen vacíos y grietas durante el proceso de soldadura. Sin embargo, se encontró que la combinación de velocidad de rotación de 1300 rpm y una velocidad de avance de 40 mm/min puede producir una soldadura sin defectos. 2. Se encontró que a medida que aumenta la velocidad de rotación para una velocidad de avance fija, el tamaño de grano de la zona del nugget disminuye, lo que implica una mayor refinación de grano al tener una mayor temperatura.</p>

Con base en la revisión bibliográfica la presente investigación va a trabajar con los parámetros de velocidad de rotación y velocidad de avance, porque son los parámetros más relevantes en el proceso de soldadura. En cuanto a la geometría del pin, Sachinkumar et al. (2021) reportaron que un pin cuadrado presentó las mejores propiedades mecánicas en las juntas. Sin embargo, por las limitaciones de fabricación se optó por un pin cónico roscado que, también proporciona una buena mezcla del material. Otros parámetros como la fuerza axial y el ángulo de inclinación de la herramienta, se consideraron menos significativos de acuerdo con Verma & Kumar (2021), en comparación con el efecto en las propiedades mecánicas de la velocidad de avance y rotación. Por esa razón no se tomaron en cuenta en este estudio. Los rangos de operación definidos para las velocidades de rotación y velocidad de avance fueron 400-1400 RPM y 20-60 mm/min respectivamente.

5.2 Pruebas preliminares y diseño del experimento

5.2.1 Caracterización de la fresadora

Para la ejecución de esta investigación, se utilizó una fresadora vertical convencional Modelo FU 250x1000 del fabricante Fritz Heckert, ubicada en el taller de máquinas y herramientas (003) de la Escuela de Ingeniería Mecánica. La fresadora empleada se muestra en la Figura 9. La ficha técnica detallada de esta fresadora se encuentra en el Apéndice A del documento.

Figura 9

Fresadora vertical convencional FU 250x1000 - Fritz Heckert



El control de la velocidad de avance se realiza a través de un volante mecánico, como se observa en la Figura 10. Este sistema permite configurar el desplazamiento lineal de la mesa, el

cual es fundamental para ajustar el avance durante el proceso de soldadura. El giro del dial ubicado a la izquierda en esta figura permite medir dicho desplazamiento: una revolución completa del dial corresponde a un desplazamiento lineal de 5 mm. Para calcular la velocidad de avance V_a , se utilizó la siguiente ecuación.

$$V_a = \frac{5 \text{ [mm/rev]}}{t_{rev}} * \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}}$$

Donde t_{rev} es el tiempo en segundos que toma una revolución completa del dial, medido con un cronómetro. Este cálculo permitió ajustar la velocidad de avance antes de realizar las soldaduras.

Figura 10

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



El control de la velocidad de rotación de la herramienta está ilustrado en la Figura 11, donde se muestra el mecanismo de control de cambios que permite seleccionar el rango de velocidades, mientras que una manivela adicional permite ajustar el valor específico de la

velocidad de rotación dentro de ese rango. Para verificar la precisión de la velocidad de rotación, se utilizó un tacómetro digital DT-2234C+, mostrado en la Figura 12, que cuenta con un rango de medición de 2.5 a 99.999 RPM. El tacómetro permitió validar los valores reales de rotación y corregir cualquier desviación respecto a los valores configurados.

Figura 11

Control de velocidad de rotación de la herramienta de la fresadora



Figura 12

Tacómetro digital DT- 2234C+



Durante las mediciones, se observó una discrepancia entre los valores calculados y medidos: la velocidad de avance determinada mediante los controles de la fresadora fue ligeramente inferior a la calculada con la ecuación presentada, mientras que la velocidad de rotación registrada con el tacómetro fue mayor a la indicada en los controles de la máquina. Estos ajustes fueron fundamentales para garantizar que los parámetros de operación fueran precisos antes de proceder con la realización de las juntas soldadas.

5.2.2 Dimensiones y montaje de las láminas de aluminio

Se seleccionaron láminas de AA6061 de espesor de 6 mm con base en la selección de los parámetros escogidos, de dimensiones $102 \times 195 \pm 6$ mm para las pruebas, teniendo en cuenta que se requieren 5 probetas de tracción con un margen de 20 mm y 5 mm entre probetas en la junta soldada para los cortes por chorro por agua. Se usó una placa de respaldo de acero colocada sobre la mesa de la fresadora, la cual sirvió como base de soporte. Estas láminas se fijaron mediante

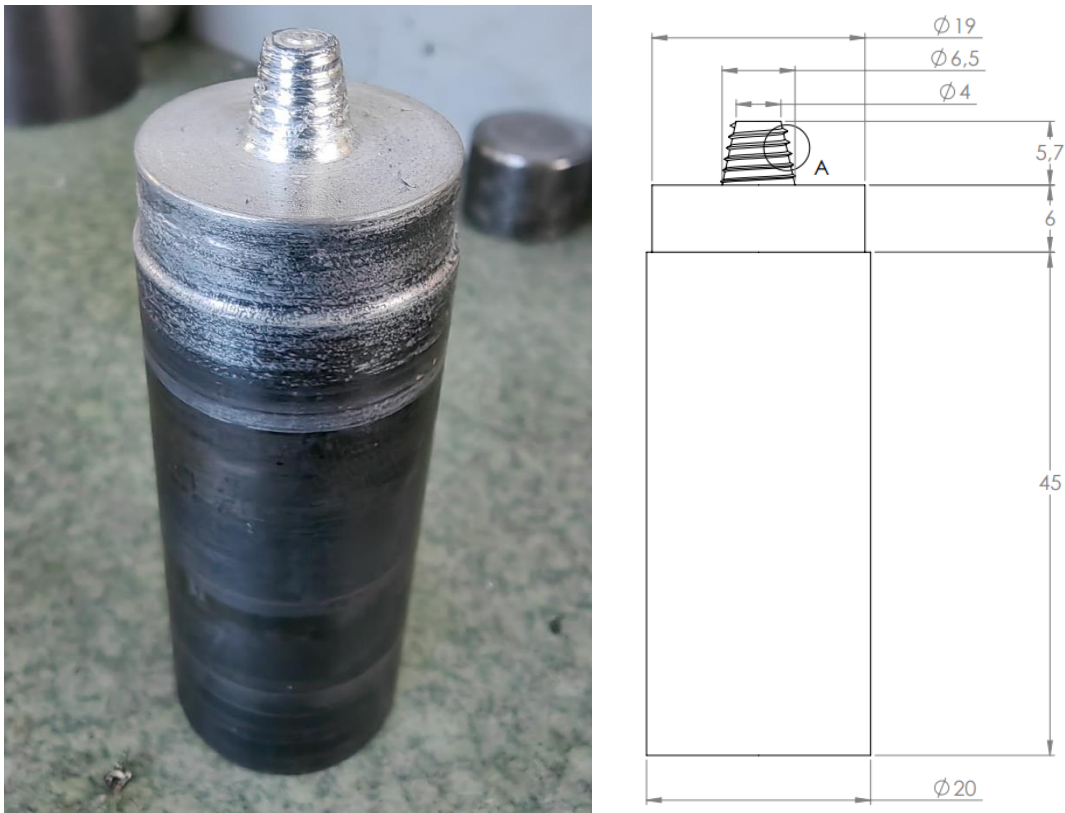
sujeciones bridadas que proporcionaron la estabilidad necesaria durante el proceso de soldadura. El montaje de las láminas de aluminio se presenta en la Figura 13.

Figura 13

Montaje experimental de las láminas de aluminio en la fresadora



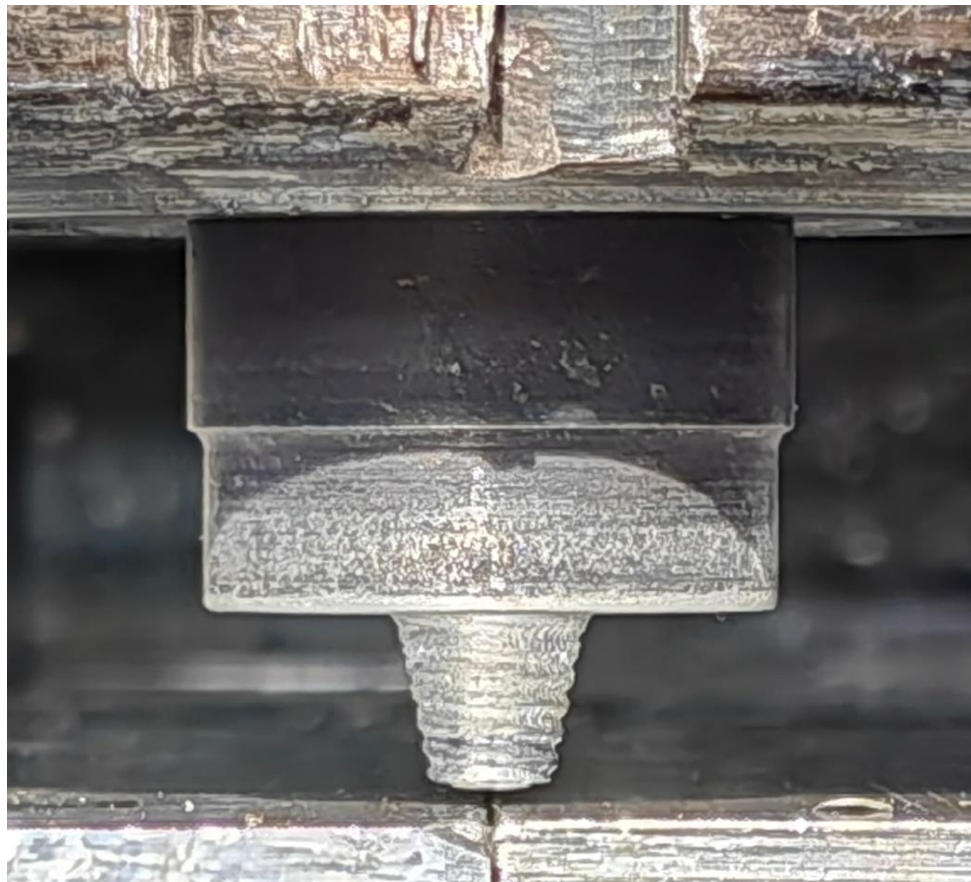
Se seleccionó una herramienta con pin cónico roscado, con una rosca de M6.5 fabricado en acero H13, la cual se muestra en la Figura 14. Esta configuración fue elegida debido a su capacidad para mejorar el flujo del material y minimizar defectos como cavidades internas y desalineación en las juntas soldadas, como se mencionó anteriormente en la revisión bibliográfica.

Figura 14*Herramienta con pin cónico roscado*

Para garantizar la correcta disposición del montaje, se verificó la alineación de las láminas usando un calibrador, tomando como referencia el borde de la mesa de la fresadora para asegurar que las láminas estuvieran correctamente alineadas a lo largo de la línea de soldadura. Igualmente, se verificó que el pin de la herramienta estuviera centrado sobre la línea de unión a soldar. Esta alineación fue ajustada mediante el posicionamiento de la mesa de la fresadora, el cual se controla a través de la manivela conectada a los diales de la Figura 10. El proceso de verificación de la alineación del pin sobre las láminas de aluminio se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Alineación de la herramienta sobre las láminas de aluminio

**5.2.3 Pruebas experimentales con los rangos y parámetros seleccionados**

Se llevaron a cabo pruebas experimentales sobre las láminas de AA6061 que consistieron en la ejecución de soldaduras parciales en distintos tramos de las láminas, lo que permitió evaluar los límites de los rangos de parámetros minimizando el consumo de material. Durante estas pruebas, se pudo determinar el procedimiento de penetración manual de la herramienta sobre las piezas, lo cual resultó importante para evitar una penetración excesiva o insuficiente, lo que ocasionaba que la herramienta barrierá el material generando defectos, mientras que una penetración insuficiente resultaba en un contacto ineficiente entre el hombro de la herramienta y la superficie del material, lo que provocaba defectos como Lack of Fill como se muestra en la

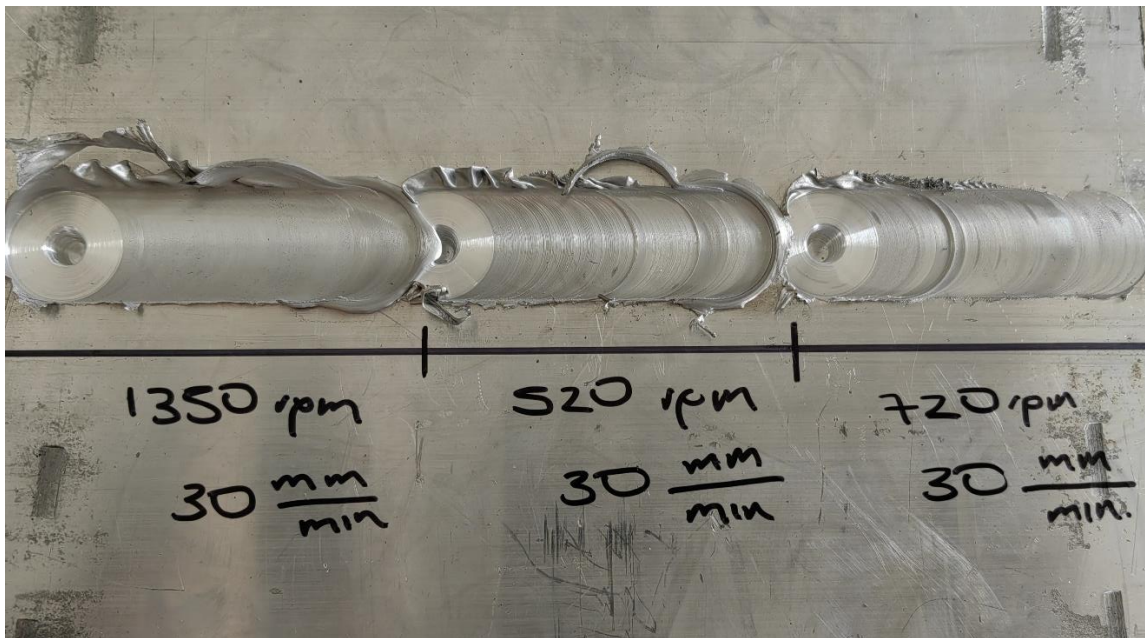
Figura 16. Adicionalmente, se observaron diferentes defectos de soldadura durante las pruebas, como la expulsión excesiva de material y túneles en la unión soldada.

Figura 16

Procedimiento de pruebas de parámetros



Las soldaduras parciales resultantes de estas pruebas se presentan en la Figura 17. La inspección visual de las juntas soldadas fue importante para ajustar los parámetros de operación y evitar una soldadura deficiente.

Figura 17*Pruebas de parámetros de soldadura*

Aunque se hicieron pruebas de soldaduras con velocidades de rotación y de avance por encima de 1000 RPM y de 30 mm/min respectivamente, la fresadora presentó fallas operacionales por lo que se optó por utilizar valores más bajos, pero dentro de los rangos establecidos inicialmente.

5.2.4 Diseño del experimento

Con base en los resultados de las pruebas preliminares, se elaboró un diseño de experimentos factorial de dos factores con tres niveles 3^2 teniendo en cuenta que los factores a variar son las velocidades de rotación (VR) y la velocidad de avance (VA) de la herramienta. Los tres niveles fueron bajo, medio y alto para evaluar los límites con un valor intermedio de cada combinación, para un total de 9 juntas soldadas. Se establecieron las hipótesis nula y alternativa en el diseño del experimento para evaluar la influencia de los parámetros en las propiedades mecánicas.

No se consideraron niveles adicionales debido a la limitada disponibilidad de material para realizar las pruebas. Esto permitió observar las interacciones entre los factores y su impacto sobre las propiedades mecánicas de la soldadura, proporcionando una visión más completa del comportamiento del material bajo distintas combinaciones de parámetros.

Los niveles del experimento, así como los procesos correspondientes a los factores evaluados, se presentan en la Tabla 4. La Tabla 5 ilustra las combinaciones de parámetros seleccionadas para el estudio junto con el indicativo para futuras referencias.

Tabla 4

Niveles y factores del experimento

Parámetros del Proceso	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
VR (RPM)	520	620	720
VA (mm/min)	25	30	35

Tabla 5

Tabla de combinaciones para el experimento

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

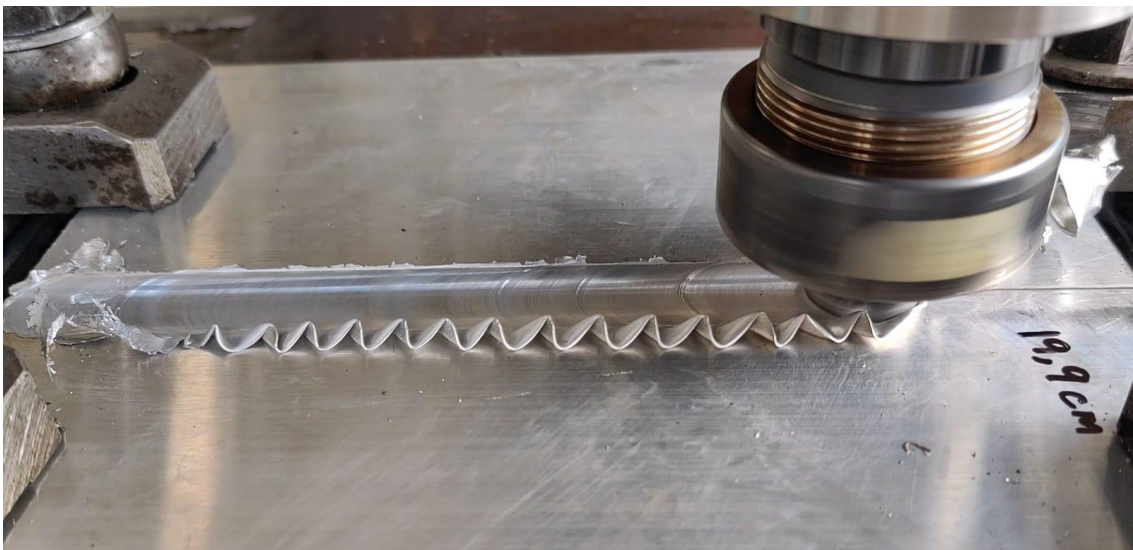
5.3 Fabricación de las juntas soldadas

La fabricación de las juntas soldadas se realizó conforme al diseño experimental establecido. Para cada configuración de parámetros, se procedió con el montaje experimental

descrito en la sección 5.2.2 para garantizar la correcta unión de los materiales durante el proceso de soldadura, así mismo se realizó la configuración de los parámetros en los controles de la fresadora, presentados en las Figura 10 y 11. Durante el proceso, se controlaron las velocidades de rotación y de avance mediante el tacómetro DT- 2234C+ y un cronometro, con el fin de asegurar la consistencia de los parámetros operativos a lo largo de la soldadura. La Figura 18 ilustra el proceso de soldadura por fricción-agitación en detalle, mostrando el equipo y la interacción de la herramienta con los materiales.

Figura 18

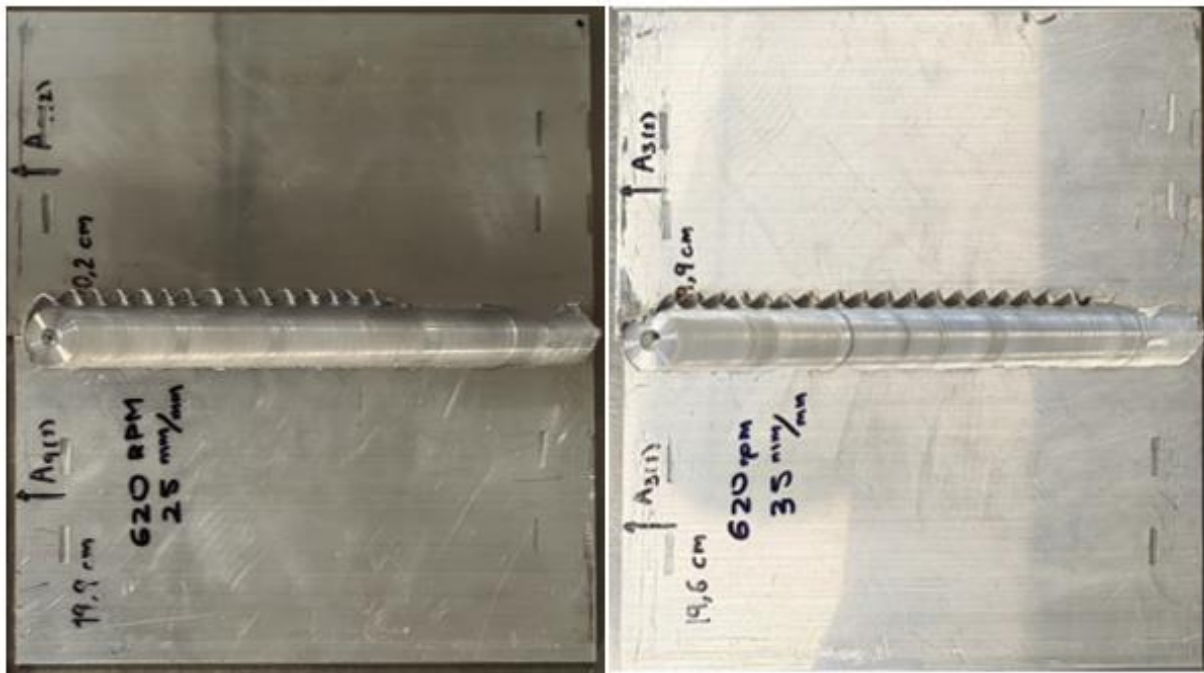
Proceso de soldadura por fricción agitación



Finalmente, las juntas soldadas fueron inspeccionadas visualmente para verificar la ausencia de defectos. La Figura 19 muestra las soldaduras obtenidas en las juntas J2 y J3, destacando las características superficiales de las uniones resultantes. Las hojas de parámetros de soldadura (WPS) para las juntas se encuentran en el Apéndice B.

Figura 19

Soldaduras por fricción agitación de láminas de aluminio A6061



5.4 Ensayos mecánicos

5.4.1 Diseño y fabricación de las probetas

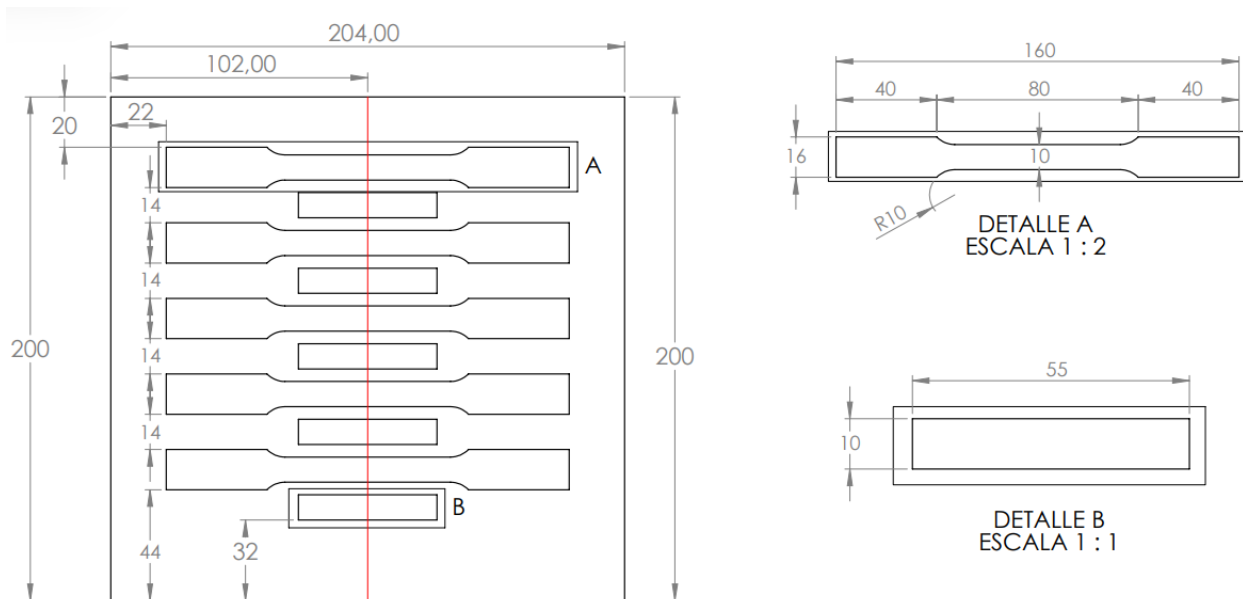
El diseño de las probetas utilizadas en esta investigación se realizó en estricto cumplimiento con los estándares definidos por las normas ASTM E8-22 y ASTM E384-17. La norma ASTM E8-22 establece las pautas necesarias para la fabricación y ensayo de probetas metálicas bajo condiciones de tracción, asegurando una determinación precisa de sus propiedades mecánicas. Asimismo, la norma ASTM E384 regula los procedimientos para los ensayos de microdureza, lineamientos que fueron seguidos rigurosamente en la preparación de las probetas destinadas a la evaluación de dureza Vickers.

Las probetas destinadas a los ensayos de tracción se fabricaron conforme a las dimensiones y geometrías especificadas en la norma ASTM E8-22, garantizando que cumplieran con los requisitos de sección transversal y longitud necesarios para realizar las pruebas. Los planos de las

probetas de tracción se presentan en la Figura 20. De igual manera, las probetas para los ensayos de dureza se prepararon siguiendo las especificaciones de la norma ASTM E384-17, asegurando una superficie completamente pulida y libre de imperfecciones, condición fundamental para la correcta aplicación de las cargas de microindentación en las pruebas de dureza Vickers. Dentro de los planos de corte se incluyeron probetas de impacto para posteriores estudios.

Figura 20

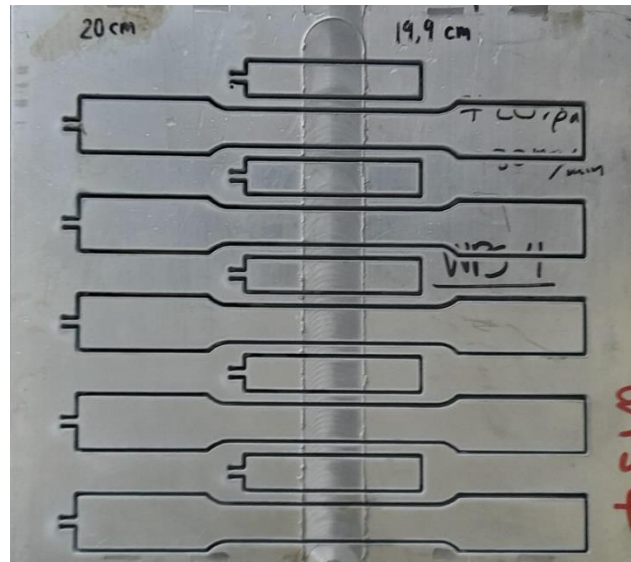
Planos del diseño de las probetas de tracción de la junta J6, unidades en (mm)



Para la fabricación de las probetas, se empleó la técnica de corte por chorro de agua, seleccionada por su capacidad para realizar cortes de alta precisión sin afectar las propiedades mecánicas del material, como se muestra en la Figura 21. Esta técnica es especialmente adecuada, ya que evita la generación de calor excesivo que podría causar deformaciones térmicas, preservando así la integridad de las probetas y asegurando resultados consistentes en los ensayos.

Figura 21

Probetas de tracción e impacto cortadas por chorro de agua para la junta J4

**5.4.2 Ensayo de tracción**

En la Figura 22 se presenta la maquina universal de ensayos de tracción MTS. Los parámetros usados para el ensayo de tracción son la velocidad del experimento que según la norma ASTM E8-22 debe estar en un rango de 0,005 a 0,5 veces la longitud de referencia por minuto. Para las probetas de tracción la longitud de referencia fue de 40 mm, por lo que la velocidad del ensayo fue 1,27 mm/min. La Figura 23 muestra las probetas después del ensayo de tracción para las juntas 2 (J2) y 3 (J3). Por cada junta se hicieron 5 pruebas de tracción para asegurar la repetibilidad de las pruebas según la norma y obtener un conjunto de valores para hacer un análisis estadístico. Se registraron los datos de fuerza y deformación para su análisis posterior, con el objetivo de obtener las gráficas de esfuerzo contra deformación y determinar las propiedades de las juntas soldadas como el esfuerzo último, esfuerzo de fluencia y porcentaje de alargamiento. El análisis y discusión se presentó en el capítulo 6 de este trabajo de investigación.

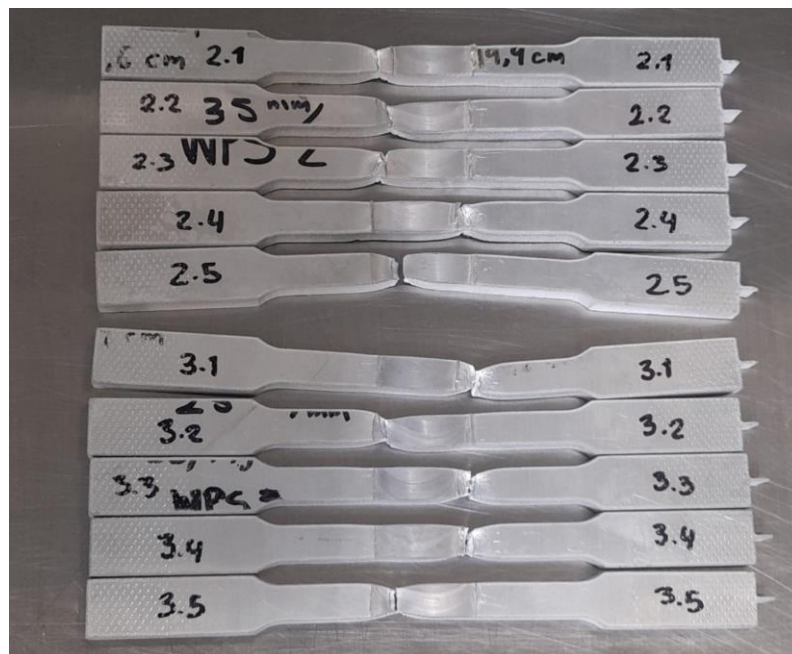
Figura 22

Maquina universal de ensayos de tracción



Figura 23

Probetas de tracción después de los ensayos para las juntas J2 y J3



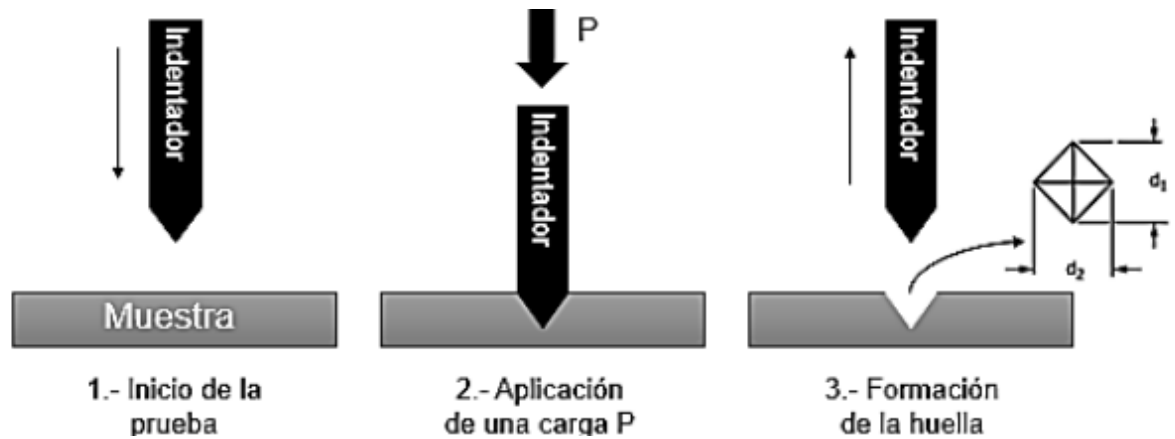
5.4.3 *Ensayo de dureza*

Para llevar a cabo las pruebas de microdureza Vickers se realizaron cortes transversales de las juntas soldadas. Estas secciones fueron preparadas de acuerdo con los requisitos establecidos en la norma ASTM E384-17, garantizando que la superficie estuviera debidamente acondicionada para las pruebas de dureza. El proceso de preparación incluyó un pulido progresivo, comenzando con una lija de grano 200 y continuando hasta una lija de grano 1200, con el fin de obtener una superficie plana y libre de imperfecciones que pudieran influir en la precisión de las mediciones.

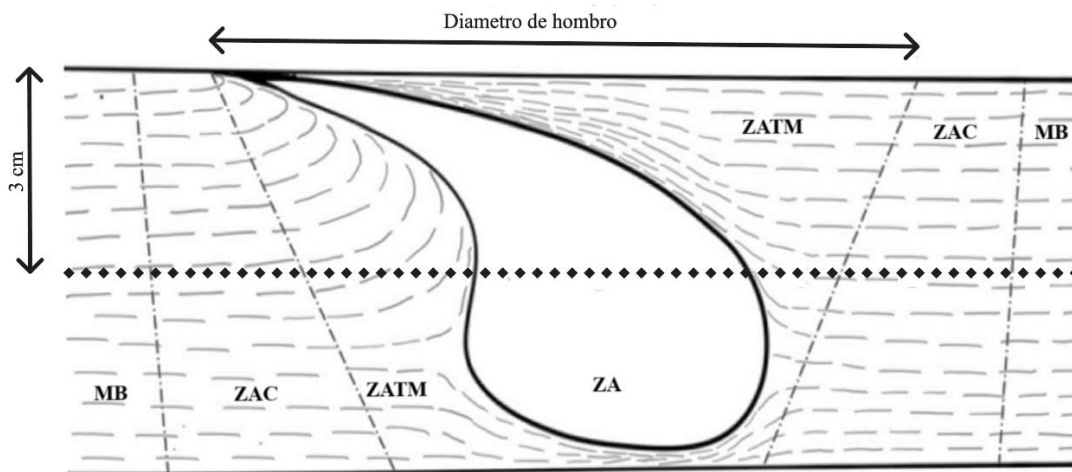
Las mediciones de dureza se realizaron utilizando el durómetro Falcon 400G2, representado en la Figura 24. Para cada indentación, se aplicó una carga de 500 gramos durante 15 segundos, empleando el indentador UPI/8105 de diamante, que tiene forma de pirámide con un ángulo de 136° . Este indentador se aplicó perpendicularmente a la superficie del material bajo ensayo, generando una huella en la muestra. Posteriormente, se midieron las diagonales de la huella para determinar la dureza del material.

Figura 24*Durómetro Falcon 400G2*

El perfil de indentación constó de 60 puntos distribuidos uniformemente en la zona de la soldadura, a 3 mm por debajo del borde de esta. Los puntos estaban separados por 1 mm y se distribuyeron de manera simétrica, con 30 puntos a cada lado del centro de la junta. Este procedimiento, representado en las Figuras 25 y 26, permitió obtener un perfil de dureza a lo largo de la zona soldada, proporcionando información sobre la dureza de cada zona generada por el proceso de soldadura. Los resultados se graficaron y tabularon en el siguiente capítulo de este trabajo de investigación.

Figura 25*Procedimiento de indentación Vickers*

Nota. Tomado de ASTM International. (2011). *E384 – 11, Standard test method for knoop and Vickers harness of materials.* (<https://doi.org/10.1520/E0384-11>)

Figura 26*Esquema del perfil de micro dureza Vickers de las juntas*

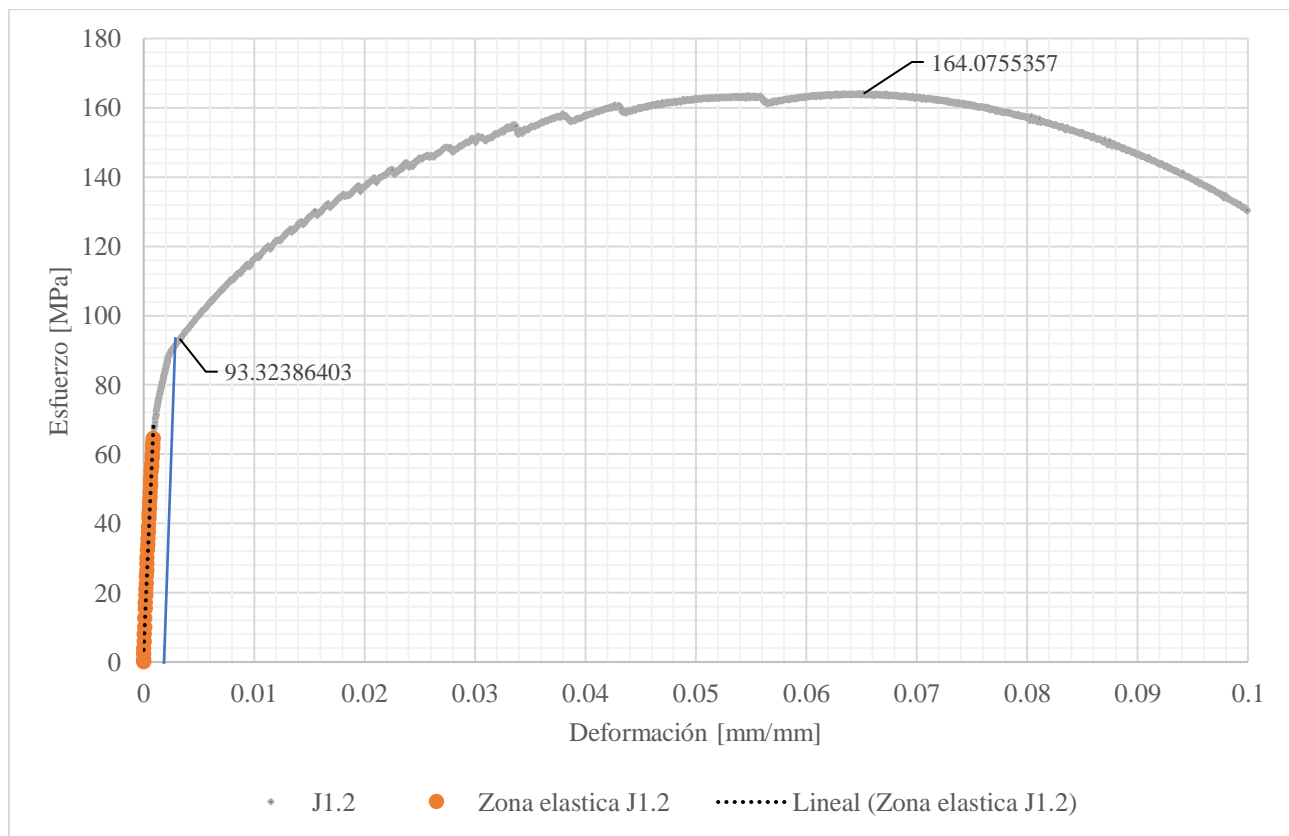
Nota. Adaptado de Saxena, A., Kaur, A., & Kumar, A. (2018). *Design of experiment study on hardness variations in friction stir welding of AM60 Mg alloy.* ResearchGate. (https://www.researchgate.net/publication/328067710_Design_of_experiment_study_on_hardness_variations_in_friction_stir_welding_of_AM60_Mg_alloy.)

6 Análisis de resultados

En la presente sección se exponen los resultados obtenidos a partir de los ensayos de tracción y dureza realizados sobre las juntas soldadas de AA6061 mediante el proceso de FSW. El análisis se centró en determinar la influencia de los parámetros de soldadura, como la velocidad de rotación y la velocidad de avance, en las propiedades mecánicas de las juntas. Se establecieron correlaciones entre los parámetros utilizados y los resultados obtenidos, al igual que un análisis de varianza ANOVA, con el fin de identificar las condiciones favorables que permitieron evaluar la influencia de los parámetros seleccionados en las propiedades mecánicas de las juntas soldadas.

6.1 Resultados de las pruebas de tracción

A partir de los ensayos de tracción se determinaron las propiedades mecánicas de material, tales como el límite elástico, la resistencia máxima, el módulo de elasticidad y el porcentaje de alargamiento. El Apéndice C contiene los cálculos de las propiedades anteriores para las 45 probetas de las juntas soldadas y las 5 probetas ensayadas para el material base. La Figura 27 muestra la curva de esfuerzo-deformación correspondiente para la probeta 2 de la junta 1 (J1.2), que representa la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación del material.

Figura 27*Curva de esfuerzo - deformación para la probeta J1.2*

El límite elástico se calculó utilizando el método de compensación al 2%, el cual es comúnmente empleado cuando no se puede observar claramente un punto de transición entre la fase elástica y la fase plástica en la curva esfuerzo-deformación. Este método consiste en trazar una línea paralela a la porción inicial lineal (elástica) de la curva, desplazada un 2% en el eje de la deformación. El punto donde esta línea interseca la curva esfuerzo-deformación define el esfuerzo a partir del cual comienza la deformación plástica permanente. Para el caso de la probeta J1.2 el esfuerzo correspondiente al límite elástico se encontró en 93,32 MPa.

La resistencia máxima a la tracción para probeta J1.2 alcanzó a un esfuerzo de 164,08 MPa, que corresponde al valor más alto registrado en la curva. Este valor, representado en el pico de la curva, define la capacidad máxima del material en aplicaciones donde se requieren altas

resistencias. Después de este punto, el material entra en una fase de falla, donde la deformación continúa aumentando, pero el esfuerzo comienza a reducirse.

El módulo de elasticidad fue determinado a partir de la pendiente de la región lineal de la curva esfuerzo-deformación, correspondiente a la fase elástica del material. Este parámetro describe la rigidez del material, y su cálculo se basa en la relación esfuerzo-deformación en esta región lineal, que representa el comportamiento reversible del material ante cargas.

En la Tabla 6 se registraron las propiedades mecánicas obtenidas durante el ensayo de tracción de las juntas soldadas. Se calcularon los promedios y la desviación estándar para las nueve juntas evaluadas designadas de J1 a J9. También se hicieron ensayos de tracción para el material base para comparar sus propiedades con las de las juntas. Esta tabla incluye la resistencia máxima a la tracción (SUT, en MPa), el límite elástico (SY, en MPa), el módulo de elasticidad (E, en GPa) y el porcentaje de alargamiento, respectivamente.

Tabla 6

Propiedades mecánicas promedio obtenidas en los ensayos de tracción

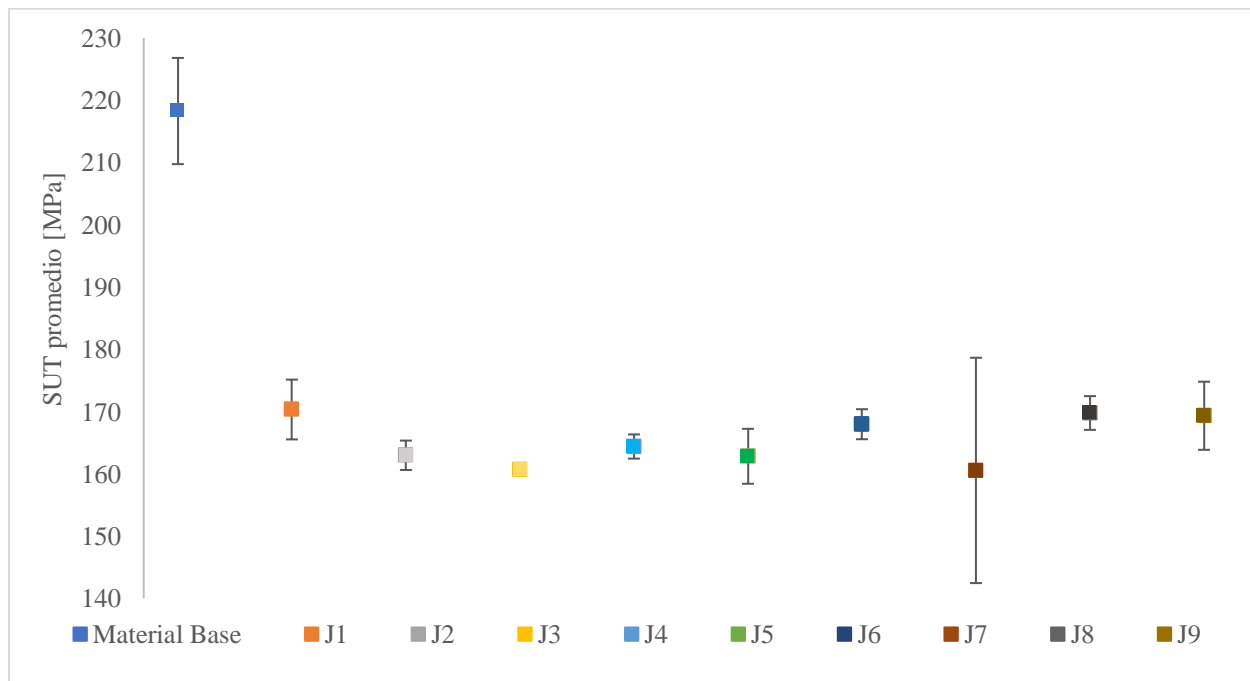
VR [RPM]	VA [mm/min]	S _{ut} [MPa]	S _y [MPa]	E [GPa]	%Alargamiento
Material base	Material base	218,28 ± 8,53	175,46 ± 9,24	74,89 ± 6,83	18,19 ± 2,94
620	30	170,34 ± 4,81	105,07 ± 9,71	78,88 ± 5,05	9,47 ± 1,10
620	35	162,99 ± 2,36	96,10 ± 5,19	65,33 ± 1,39	11,56 ± 0,47
620	25	160,68 ± 0,77	95,45 ± 4,03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

Comparando los resultados con el material base, este exhibe las propiedades más altas en términos de resistencia a la tracción ($218,28 \pm 8,53$ MPa) y límite elástico ($175,46 \pm 9,24$ MPa), superando notablemente las propiedades de todas las juntas soldadas. Además, el módulo de elasticidad del material base ($74,89 \pm 6,83$ GPa) es ligeramente inferior al de algunas juntas soldadas, mientras que el porcentaje de alargamiento es considerablemente mayor ($18,19 \pm 2,94$ %), indicando una superior capacidad de deformación antes de la fractura.

En la Figura 28 se observa que las juntas J1, J6 y J8 presentan los valores de resistencia a la tracción más altos entre las probetas soldadas, alcanzando aproximadamente los 170 MPa, aunque permanecen por debajo de los valores registrados en el material base. Esto sugiere que la elección de parámetros específicos, como la velocidad de rotación y la velocidad de avance, disminuye las propiedades mecánicas en comparación con el material soldado.

Figura 28

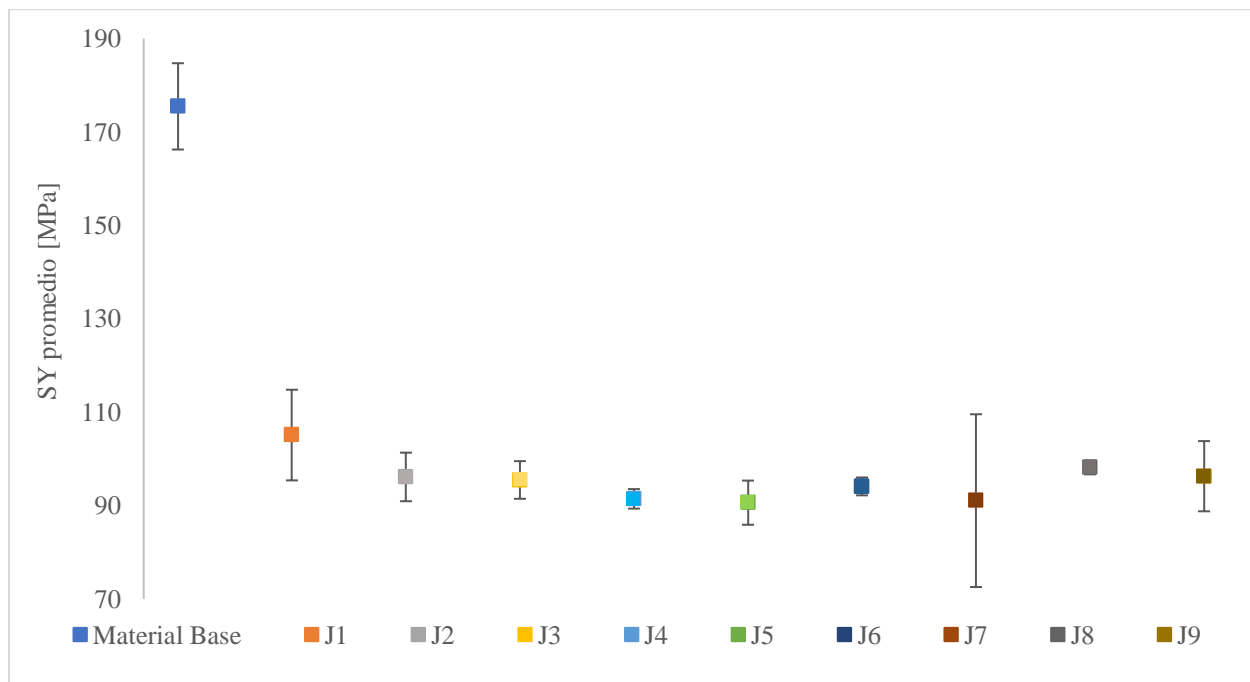
Diagrama de barras con intervalos de error para SUT



En cuanto al límite elástico, la Figura 29 muestra una disminución generalizada en las juntas soldadas en comparación con el material base. La junta J1 presenta el límite elástico más alto con $105,07 \pm 9,71$ MPa, mientras que la junta J5 muestra el más bajo con $90,59 \pm 4,73$ MPa. Estos resultados pueden estar relacionados con alteraciones microestructurales reportadas en estudios previos sobre soldadura FSW, donde el calor generado durante el proceso afecta la capacidad del material para soportar deformaciones elásticas sin sufrir deformación permanente. En particular, estudios como los de Raturi et al. (2019) y Kumar et al. (2021) destacan que la combinación de altas velocidades de rotación y bajas velocidades de avance genera un incremento en la temperatura, lo que puede provocar ablandamiento excesivo del material y alteraciones en la zona afectada por calor.

Figura 29

Diagrama de barras con intervalos de error para SY

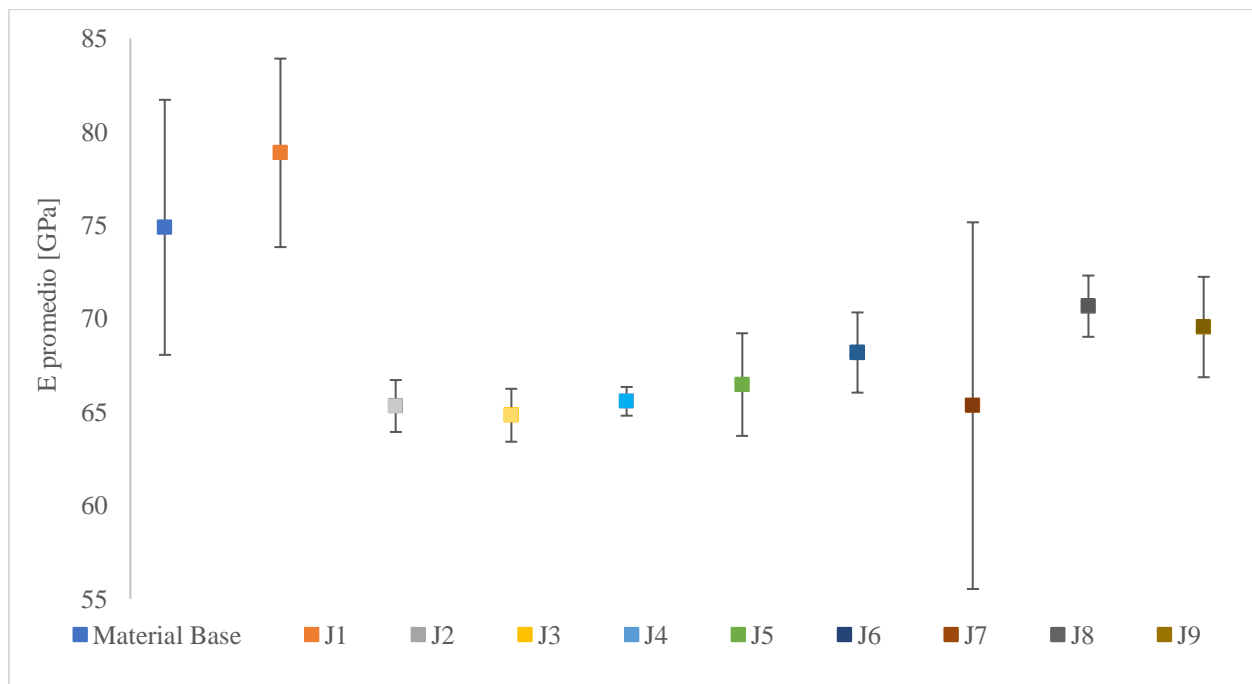


En la Figura 30, los valores del módulo de elasticidad muestran una variabilidad menor entre las diferentes juntas soldadas, oscilando entre $64,83 \pm 1,42$ GPa y $78,88 \pm 5,05$ GPa. Estas

variaciones son relativamente pequeñas, lo que indica que la rigidez global del material no se ve tan influenciada por los parámetros de soldadura, a diferencia de la resistencia a la tracción y el límite elástico. Sin embargo, el porcentaje de alargamiento revela una notable disminución en comparación con el material base, con valores que fluctúan entre $9,47 \pm 1,10$ % y $12,46 \pm 0,46$ %. Esto señala una reducción significativa en la ductilidad de las juntas soldadas. La baja ductilidad observada podría deberse a defectos microestructurales o a la distribución no uniforme del calor durante el proceso de soldadura. Investigaciones como las de Kumar et al. (2021) han demostrado que combinaciones de altas velocidades de rotación y bajas velocidades de avance pueden ocasionar un aumento excesivo de la temperatura en la HAZ, provocando ablandamiento del material y reducciones en la ductilidad. Por otra parte, Balamurugan et al. (2021) concluyeron que distribuciones desiguales del calor en el proceso de soldadura contribuyen al crecimiento del tamaño de grano en la HAZ, lo que afecta negativamente propiedades mecánicas como la ductilidad.

Figura 30

Diagrama de barras con intervalos de error para E



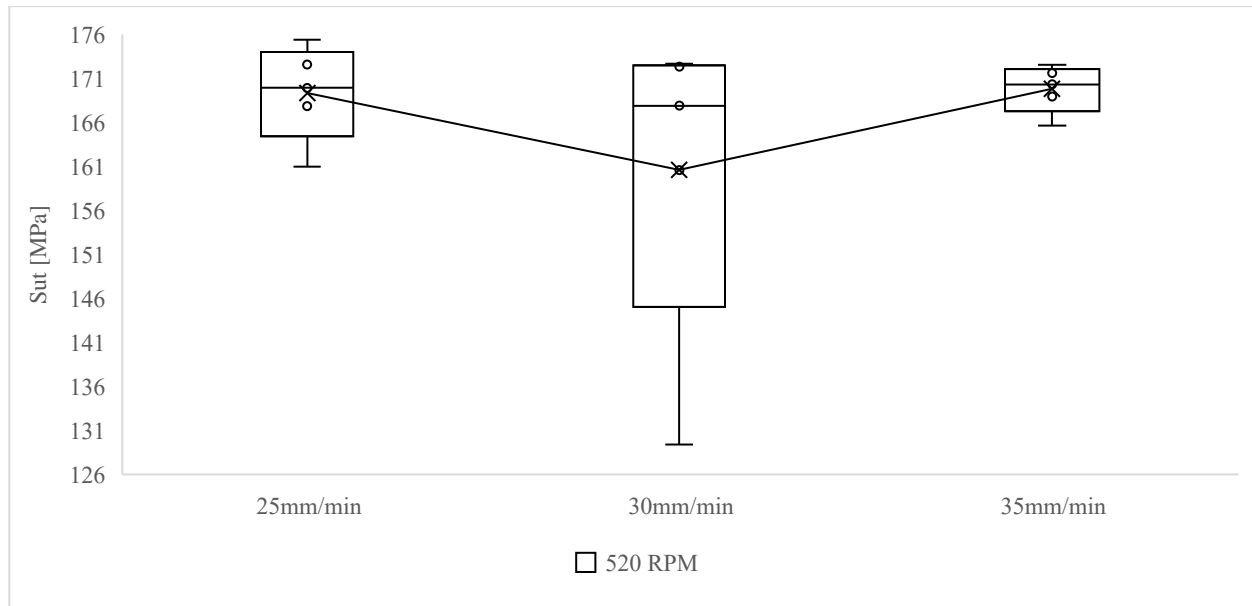
Las Figuras 31 a 36 presentan el análisis de la variabilidad en las propiedades mecánicas de las juntas soldadas de aluminio A6061, específicamente en términos de resistencia última a la tracción (SUT) y esfuerzo de fluencia (SY), evaluadas a tres velocidades de rotación diferentes: 520, 620 y 720 revoluciones por minuto (RPM). En este análisis se utilizó el método gráfico de cajas y bigotes, el cual permite visualizar la dispersión de los datos, identificar posibles valores atípicos y comparar la tendencia central de los resultados para cada conjunto de pruebas.

Las Figuras 31, 32 y 33 corresponden a la resistencia última a la tracción para cada una de las velocidades de rotación mencionadas. A una velocidad de 520 RPM, tal como se muestra en la Figura 32, la dispersión de los datos es reducida, lo que sugiere un comportamiento homogéneo de las propiedades mecánicas de las juntas soldadas bajo estas condiciones. La mediana se encuentra en la parte superior del intervalo intercuartil, indicando una resistencia a la tracción

elevada y consistente, con un rango intercuartil estrecho que evidencia poca variabilidad en los resultados.

Figura 31

Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 520 RPM



En cambio, en la Figura 32, correspondiente a una velocidad de 620 RPM, se observa un aumento en la dispersión de los datos, reflejado en un rango intercuartil más amplio y en la aparición de valores atípicos. Este incremento en la variabilidad sugiere que, a esta velocidad, las condiciones de soldadura pueden generar resultados menos consistentes, posiblemente debido a variaciones en la transferencia de calor y el flujo de material en la zona de agitación.

La Figura 33, que corresponde a una velocidad de 720 RPM, muestra una mayor amplitud del intervalo intercuartil y la presencia de valores extremos. Estos resultados indican que un incremento excesivo en la velocidad de rotación afecta negativamente la uniformidad de la soldadura, incrementando la probabilidad de formación de defectos que puedan comprometer la resistencia a la tracción de las juntas.

Figura 32

Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 620 RPM

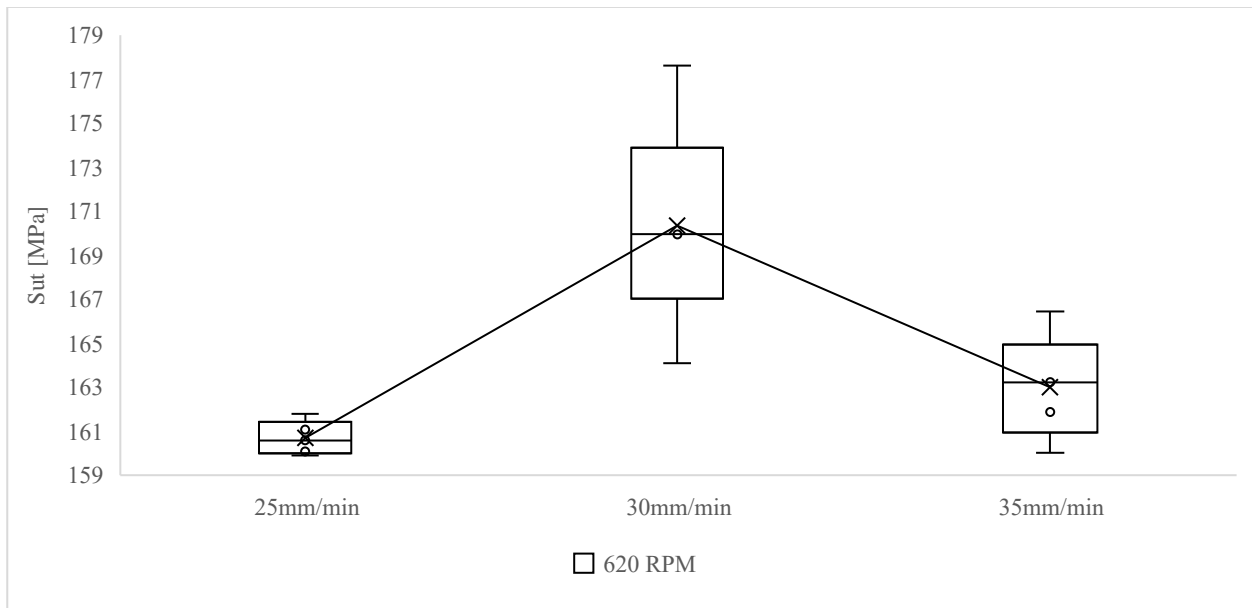
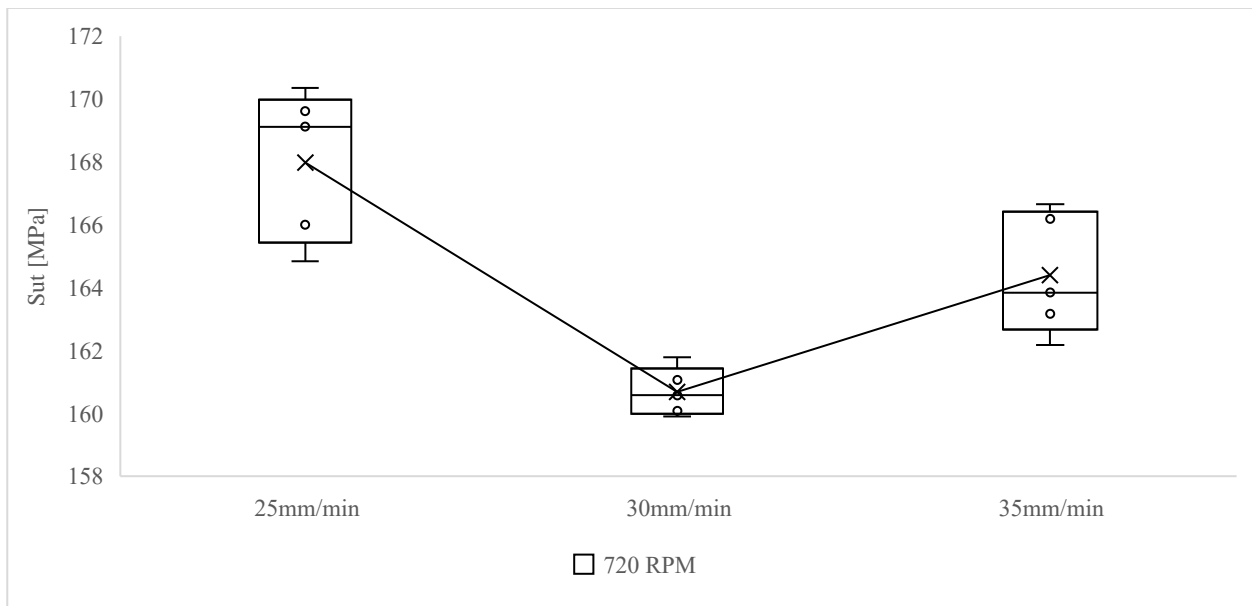


Figura 33

Diagrama de cajas y bigotes del esfuerzo último para 720 RPM

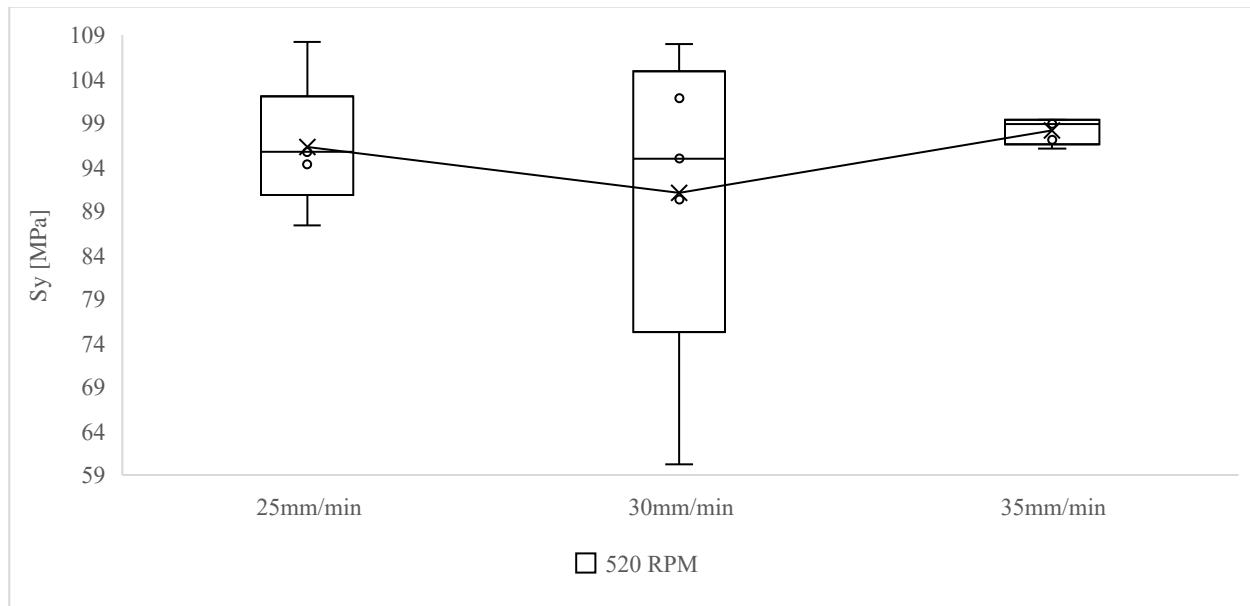


En cuanto al esfuerzo de fluencia, las Figuras 34, 35 y 36 presentan la distribución de los valores obtenidos para cada velocidad de rotación. En la Figura 34, que corresponde a 520 RPM,

se observa un comportamiento similar al de la resistencia a la tracción, con una baja dispersión de datos y una mediana elevada, lo que sugiere que la soldadura se mantuvo controlada y estable bajo estas condiciones.

Figura 34

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



En la Figura 35, correspondiente a 620 RPM, se evidencia una mayor variabilidad en los resultados, con un aumento en la dispersión del intervalo intercuartil y la aparición de valores atípicos, lo que indica una pérdida de homogeneidad en las propiedades mecánicas de la junta a medida que se incrementa la velocidad de rotación. La Figura 37, que presenta los resultados para 720 RPM, exhibe la mayor dispersión de todos los conjuntos evaluados, con un intervalo intercuartil amplio y varios valores extremos. Los resultados obtenidos sugieren que, a velocidades de rotación elevadas, el sobrecalentamiento del material durante el proceso de soldadura podría inducir heterogeneidades en la microestructura de la junta, reduciendo su resistencia a la deformación plástica inicial. Por ejemplo, Kumar et al. (2021), reportaron que el incremento excesivo de temperatura en la zona afectada por calor (HAZ), derivado de altas velocidades de

rotación, genera un ablandamiento significativo del material, lo cual impacta negativamente sus propiedades mecánicas.

Figura 35

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

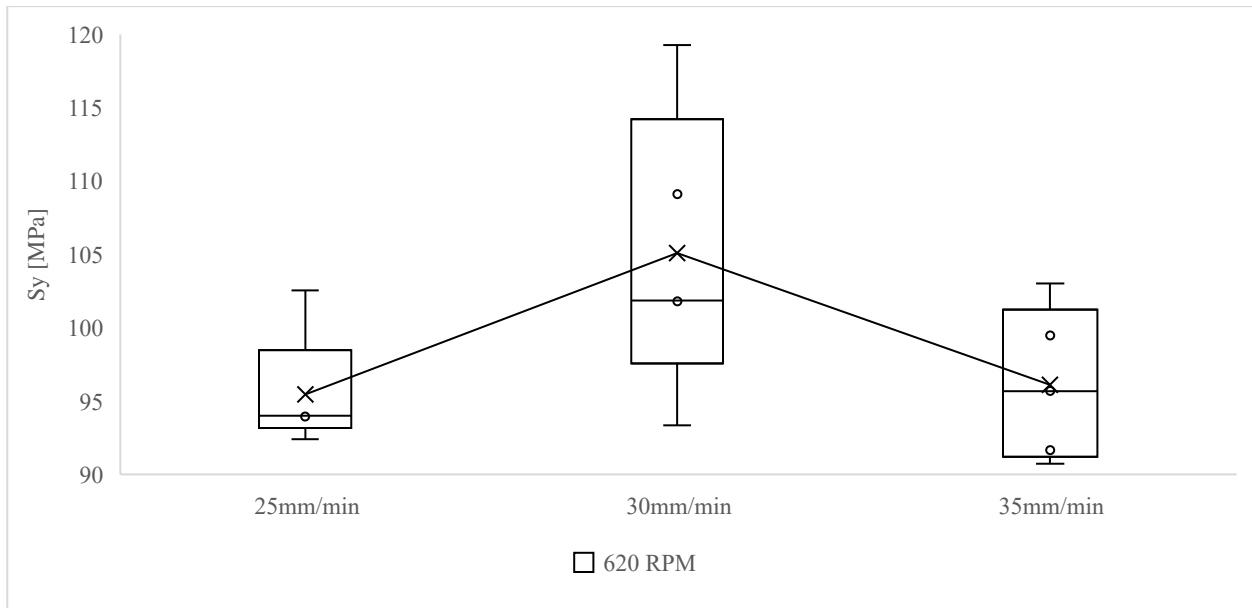
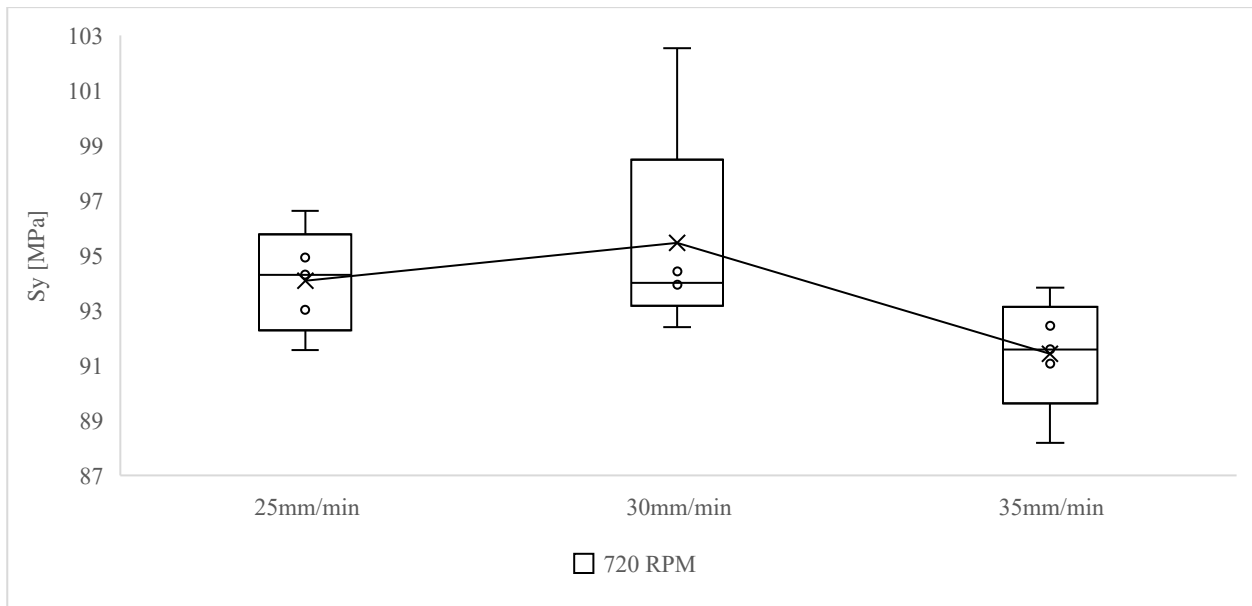


Figura 36

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

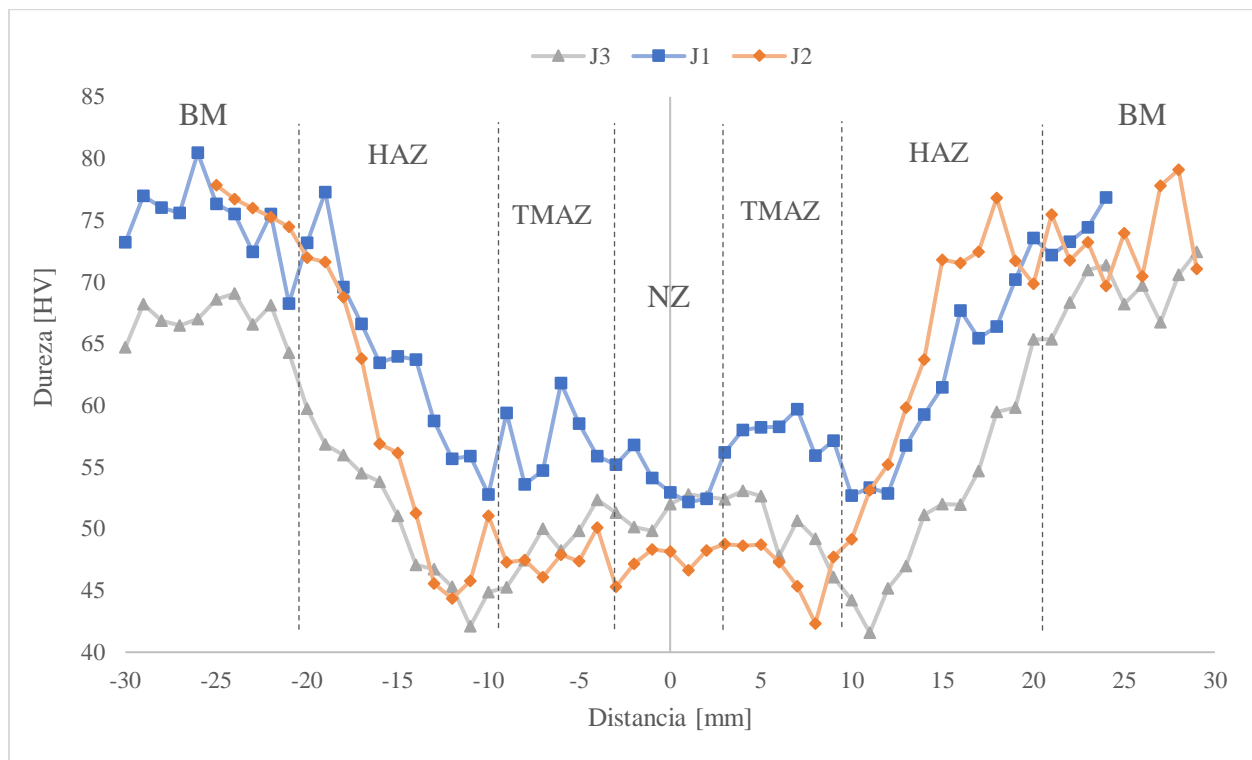


El análisis de las gráficas de cajas y bigotes confirma que la velocidad de rotación es un parámetro determinante en las juntas soldadas de aluminio A6061 mediante el proceso de soldadura por fricción-agitación. Las velocidades de rotación más bajas, como 520 RPM, tienden a producir resultados más homogéneos y consistentes en términos de propiedades mecánicas, lo que sugiere un mejor control del proceso de soldadura bajo estas condiciones. Sin embargo, a medida que la velocidad de rotación aumenta, se observa una tendencia creciente hacia la dispersión de los resultados, especialmente a 720 RPM, donde la aparición de valores atípicos y la amplitud del rango intercuartil indican una disminución en la uniformidad de la soldadura. Este comportamiento podría asociarse con variaciones térmicas en la zona de agitación, que afectan la distribución del calor debido a la interacción de parámetros como la velocidad de rotación y avance, influyendo directamente en las propiedades finales de la soldadura. Como Verma & Kumar (2021) indicaron que la falta de uniformidad térmica también puede contribuir a la formación de defectos microestructurales, lo que afecta negativamente las propiedades finales de la soldadura.

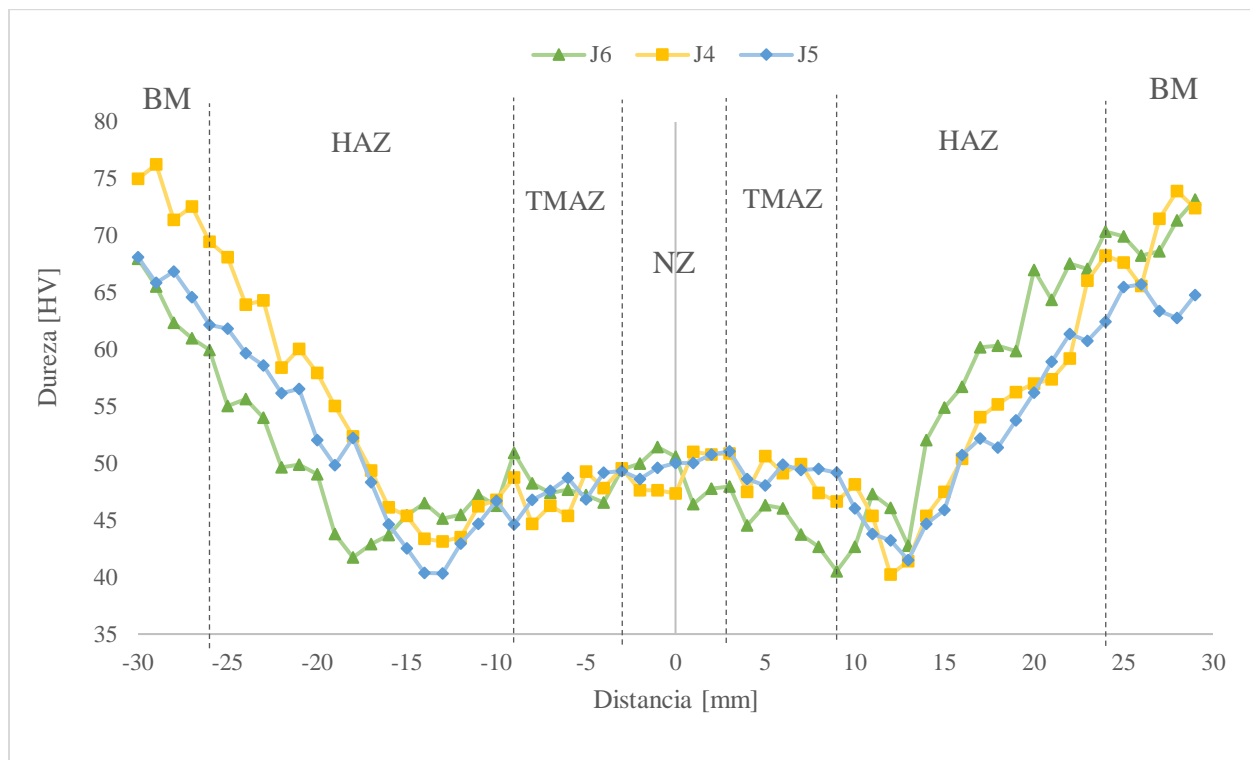
6.2 Resultados de pruebas de dureza

En esta sección se presentan los perfiles de dureza Vickers a lo largo de la sección transversal de cada junta soldada según los parámetros definidos. Las zonas marcadas incluyen el material base BM, la zona afectada por calor HAZ, la zona afectada termo-mecánicamente TMAZ y la zona de agitación NZ.

En la Figura 37, se muestran los valores de dureza para una velocidad de rotación de 620 RPM con diferentes velocidades de avance. En general, la velocidad de avance de J1 mantiene una mejor dureza en la zona NZ comparada con J2 y J3 que presentan un ablandamiento más notable en el centro de la soldadura.

Figura 37*Perfil de dureza para las juntas J1, J2 y J3*

La Figura 38 representa el comportamiento de la dureza en las juntas soldadas J4, J5 y J6, correspondientes a una velocidad de rotación de 720 RPM con diferentes velocidades de avance. El aumento del calor generado por la velocidad de rotación se refleja en un perfil de dureza más bajo en la afectada por calor HAZ, sin embargo, la distribución es más uniforme en la zona de la soldadura en comparación con 520 RPM.

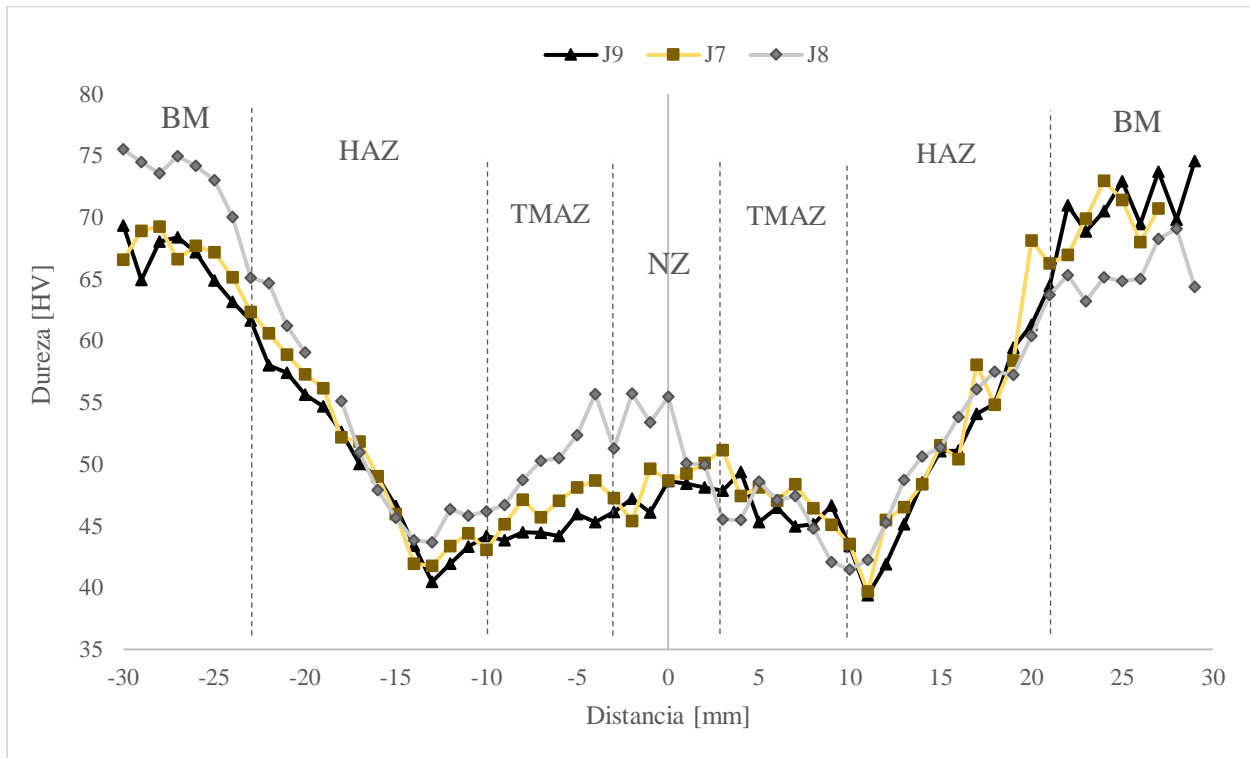
Figura 38*Perfil de dureza para las juntas J4, J5 y J6*

La Figura 39 muestra la dureza de las juntas J7, J8 y J9 que corresponden a una velocidad de rotación de 520 RPM con diferentes velocidades de avance. Se observa una disminución en los perfiles de dureza mayormente en las zonas afectadas por calor HAZ con una ligera recuperación en la zona central debido a la intensa plastificación y mezcla del material. Estudios previos, como los de Kumar et al. (2021) y Azimzadegan & Serajzadeh (2010), reportaron que la zona de agitación (WN) presenta una dureza ligeramente superior a la de las regiones adyacentes debido al refinamiento de grano inducido por las altas temperaturas y deformaciones experimentadas en esta área durante la soldadura. Por otro lado, no se observa una variación significativa en los perfiles de dureza al variar la velocidad de avance, lo que coincide con lo reportado por Balamurugan et al. (2021), quienes identificaron que, en ciertos rangos de velocidad de rotación,

la velocidad de avance tiene un impacto limitado sobre la distribución de la dureza en las zonas soldadas.

Figura 39

Perfil de dureza para las juntas J7, J8 y J9



La Tabla 7 presenta los valores promedio de dureza Vickers obtenidos en la zona de agitación NZ para distintas juntas soldadas de aluminio A6061, utilizando el proceso de soldadura por fricción-agitación FSW. La dureza promedio se muestra acompañada de su desviación estándar, lo cual proporciona una medida de la variabilidad en las mediciones de dureza para cada condición de soldadura específica.

Tabla 7*Dureza promedio de la zona de agitación NZ para cada junta soldada*

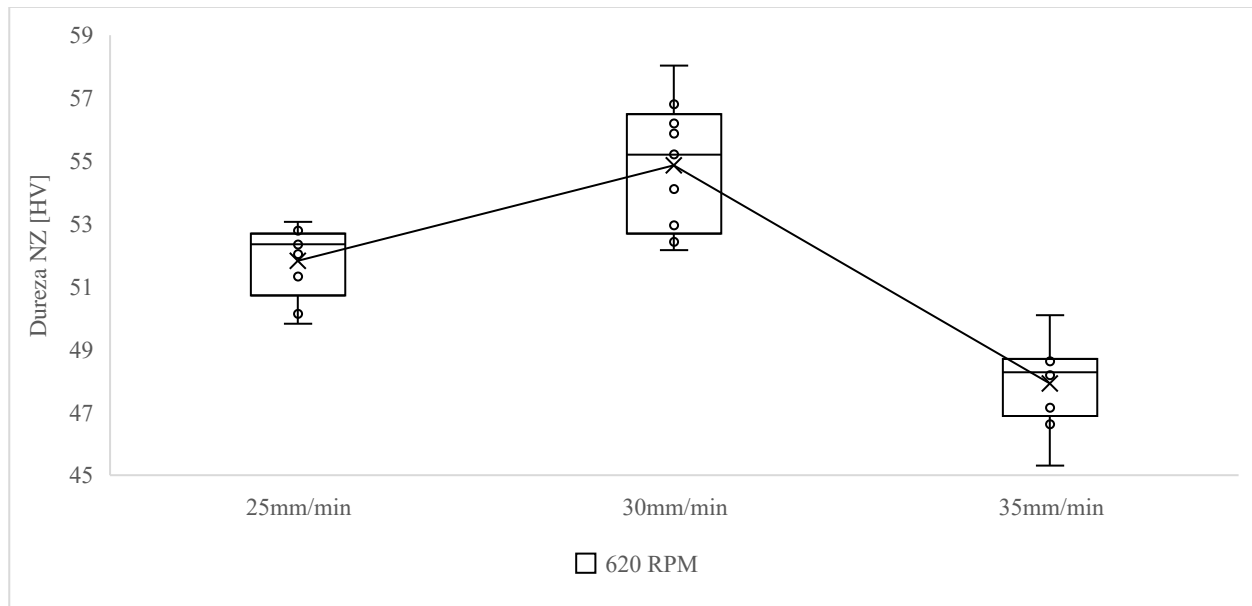
Junta	VR [RPM]	VA [^{mm}/min]	Dureza NZ [HV]
J1	620	30	54,85 ± 2,06
J2	620	35	47,92 ± 1,38
J3	620	25	51,82 ± 1,16
J4	720	30	48,90 ± 1,61
J5	720	35	49,69 ± 0,85
J6	720	25	48,31 ± 2,24
J7	520	30	48,61 ± 1,72
J8	520	35	51,39 ± 4,04
J9	520	25	47,46 ± 1,36

Posteriormente se graficaron diagramas de cajas y bigotes para visualizar la varianza de los perfiles de dureza en la zona de agitación NZ, variando la velocidad de avance a una velocidad de rotación constante.

La Figura 40 muestra una tendencia general a la disminución de la dureza en la zona de agitación NZ y la zona afectada por el calor HAZ. Esta disminución se debe a la recristalización y crecimiento de granos que ocurre durante el proceso de soldadura. En particular, las probetas soldadas a 620 RPM presentaron un perfil de dureza más homogéneo a lo largo de la soldadura, con una menor variabilidad en los valores de dureza en comparación con las probetas soldadas a mayores velocidades de rotación.

Figura 40

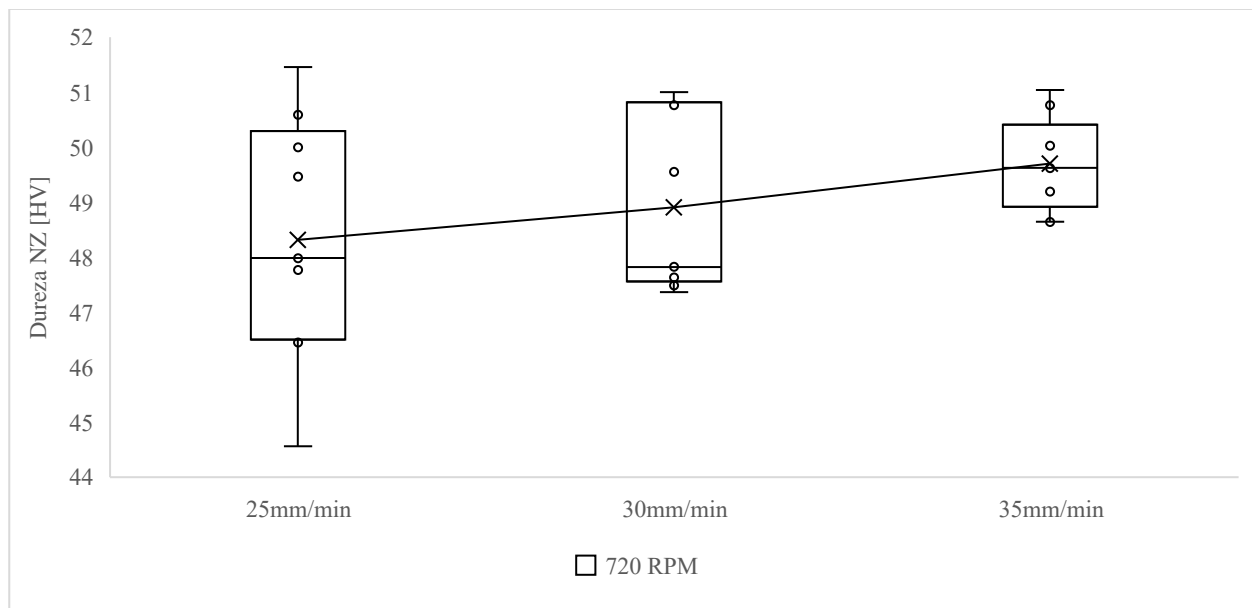
Diagrama de cajas y bigotes de la dureza del NZ para 620 RPM



Para las juntas soldadas a 720 RPM con diferentes velocidades de avance, la Figura 41 muestra una mayor disminución de la dureza en la zona afectada por el calor HAZ, lo que sugiere un sobrecalentamiento durante el proceso. Este sobrecalentamiento provocó un ablandamiento en la zona NZ, afectando negativamente las propiedades mecánicas de la soldadura. Sin embargo, la distribución de dureza en las juntas soldadas a 720 RPM fue más uniforme, lo que puede estar relacionado con un mejor control del flujo de material en esta condición.

Figura 41

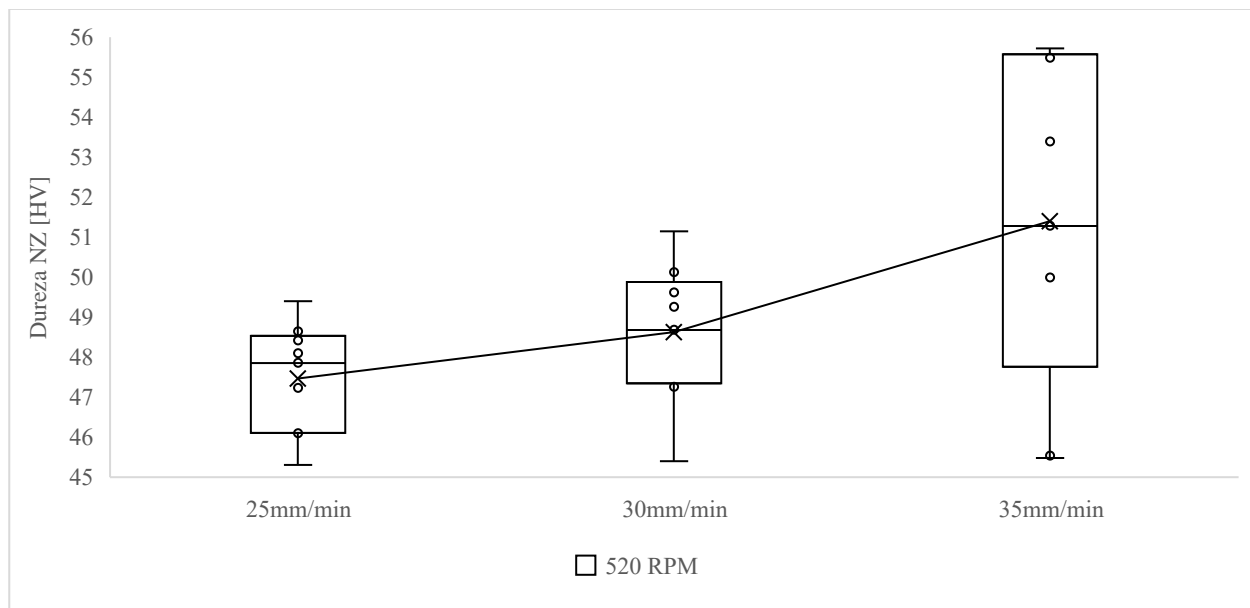
Diagrama de cajas y bigotes de la dureza del NZ para 720 RPM



En contraste, las juntas soldadas a 520 RPM mostraron un perfil de dureza más bajo en la zona HAZ, con una tendencia al ablandamiento en el centro de la soldadura. Esto sugiere que, a velocidades de rotación más bajas, la generación de calor no es suficiente para plastificar adecuadamente el material, lo que resulta en soldaduras con menores propiedades mecánicas, como se observa en la Figura 42.

Figura 42

Diagrama de cajas y bigotes de la dureza del NZ para 520 RPM



Así mismo la fractura de las probetas durante los ensayos de tracción se produjo predominantemente en la zona afectada por calor HAZ, donde el material muestra una menor resistencia en comparación con la zona de agitación NZ o la zona termo-mecánicamente afectada TMAZ. La disminución de la dureza en la HAZ se atribuye a la recristalización y al crecimiento del tamaño de grano debido al calor generado durante el proceso de soldadura.

6.3 Correlaciones Matemáticas

Para capturar las relaciones no lineales entre los parámetros de soldadura, como la velocidad de rotación (VR) y la velocidad de avance (VA), se emplearon modelos de regresión polinomial de cuarto grado.

El análisis de correlaciones matemáticas fue realizado en el entorno de desarrollo Spyder, utilizando Python como lenguaje principal, en conjunto con las bibliotecas numpy y sky learn. Estas herramientas permitieron generar modelos de regresión que describen la variación de las propiedades mecánicas en función de los parámetros clave, como la velocidad de rotación VR y la

velocidad de avance VA , proporcionando ecuaciones que representan la relación entre estos parámetros y el comportamiento mecánico de las juntas soldadas. El ajuste del modelo se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2), una métrica en el análisis de regresión, que indica la proporción de la variabilidad de los datos experimentales respecto al modelo encontrado en la regresión. Un valor de R^2 cercano a 1 refleja que el modelo captura casi la totalidad de la variación en las propiedades mecánicas, sugiriendo un buen ajuste con los datos.

El modelo de regresión se ajustó utilizando un polinomio de cuarto grado, lo que permitió encontrar la correlación entre las variables independientes VR y VA , y las propiedades mecánicas de interés como la resistencia a la tracción SUT , el límite elástico SY y el módulo de elasticidad E . A continuación, se presentan las ecuaciones resultantes para cada propiedad mecánica con su respectivo R^2 .

Para la resistencia última a la tracción SUT el R^2 fue de 0,997.

$$\begin{aligned} Sut = & 1,5186e + 02 + (-4,4537e - 11) * 1 + (-2,1806e - 11) * VR + \\ & (-5,7616e - 07) * VA + (-1,7950e - 08) * VR^2 + (-1,1642e - 04) * VR * VA + \\ & (-2,2052e - 05) * VA^2 + (-8,2931e - 06) * VR^3 + (3,4830e - 04) * VR^2 * VA + \\ & (-3,4684e - 03) * VR * VA^2 + (-4,4341e - 04) * VA^3 + (2,7922e - 08) * VR^4 + \\ & (-1,9557e - 06) * VR^3 * VA + (5,4043e - 05) * VR^2 * VA^2 + (-7,2383e - 04) * \\ & VR * VA^3 + (3,9568e - 03) * VA^4 \end{aligned}$$

Para el límite elástico SY el R^2 fue de 0,998.

$$\begin{aligned} Sy = & 3,3994e + 01 + (-3,1341e - 11) * 1 + (-1,1760e - 11) * VR + (-3,3563e - \\ & 07) * VA + (-9,6821e - 09) * VR^2 + (-6,7798e - 05) * VR * VA + (-1,2589e - \\ & 05) * VA^2 + (-4,4732e - 06) * VR^3 + (2,1592e - 04) * VR^2 * VA + (-2,0229e - \\ & 03) * VR * VA^2 + (-2,3524e - 04) * VA^3 + (2,3139e - 08) * VR^4 + (-1,7808e - \end{aligned}$$

$$06) * VR^3 * VA + (5,1364e - 05) * VR^2 * VA^2 + (-6,9688e - 04) * VR * VA^3 + (3,6950e - 03) * VA^4$$

Para el módulo de elasticidad E el R² fue de 0,994.

$$E = 1,0034e + 01 + (-3,1733e - 11) * 1 + (-1,0910e - 11) * VR + (-2,5819e - 07) * VA + (-8,9667e - 09) * VR^2 + (-5,2124e - 05) * VR * VA + (-9,3228e - 06) * VA^2 + (-4,1427e - 06) * VR^3 + (1,8504e - 04) * VR^2 * VA + (-1,5596e - 03) * VR * VA^2 + (-1,4840e - 04) * VA^3 + (2,9365e - 08) * VR^4 + (-2,3052e - 06) * VR^3 * VA + (6,8244e - 05) * VR^2 * VA^2 + (-9,2962e - 04) * VR * VA^3 + (4,8051e - 03) * VA^4$$

En la Tabla 8 se presenta un resumen de las propiedades mecánicas estimadas con las correlaciones matemáticas para cada conjunto de parámetros experimentados.

Tabla 8

Propiedades mecánicas estimadas con las correlaciones matemáticos

JUNTA	VR (RPM)	VA (mm/min)	Sut (MPa)	Sy (MPa)	E (GPa)
J1	620	30	170,16	105,22	78,59
J2	620	35	162,78	96,30	64,95
J3	620	25	160,54	95,55	64,61
J4	720	30	164,14	91,63	65,16
J5	720	35	162,51	90,88	65,95
J6	720	25	167,78	94,23	67,86
J7	520	30	160,45	91,12	65,15
J8	520	35	169,65	98,27	70,41
J9	520	25	169,25	96,33	69,42

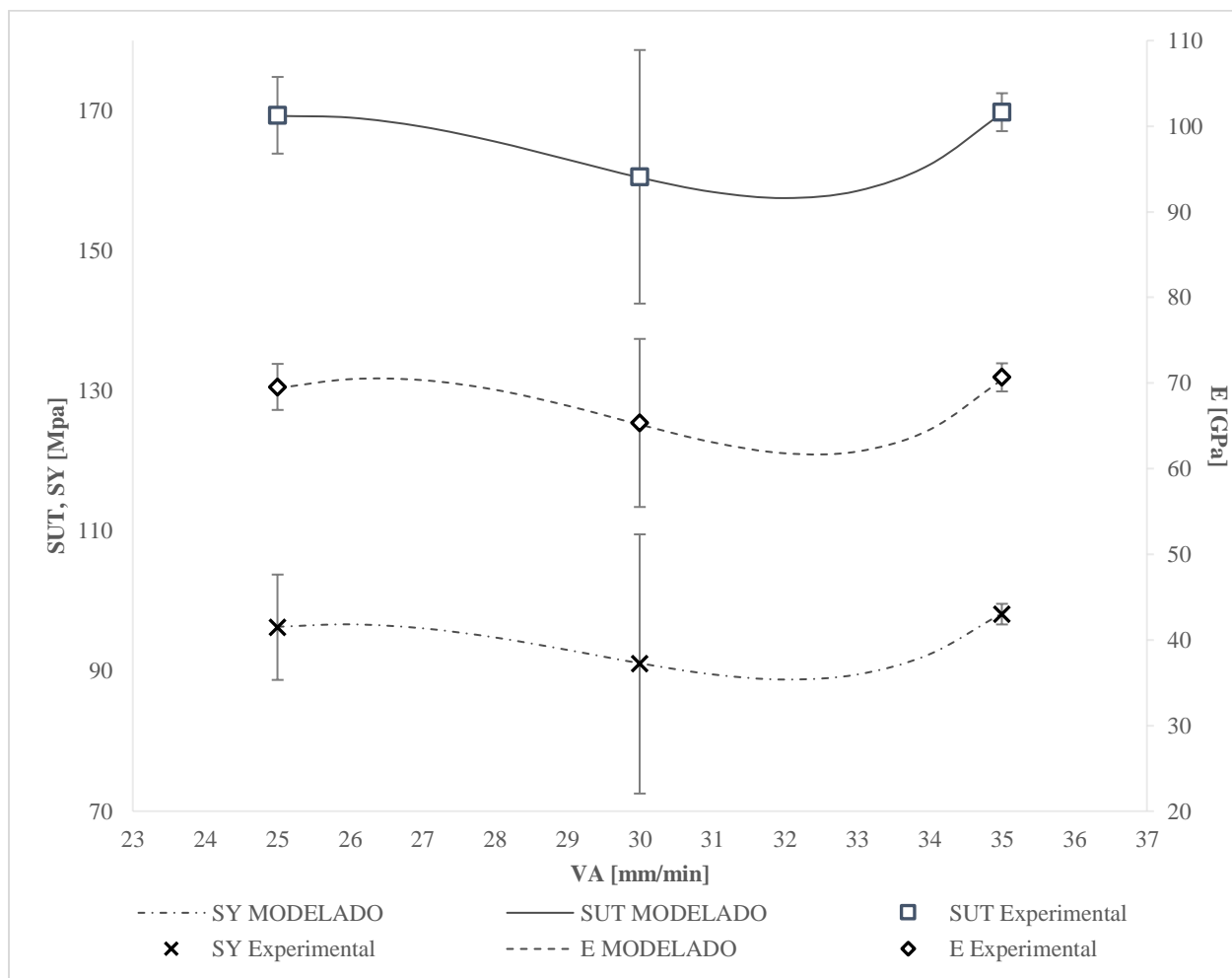
Para visualizar el ajuste grafico de las correlaciones matemáticas con las propiedades mecánicas se graficaron manteniendo constante la velocidad de rotación y variando la velocidad de avance. Las Figuras 43, 44 y 45 muestran los resultados para cada velocidad de rotación evaluada, con tres curvas que representan las tres propiedades mecánicas evaluadas: SUT, SY y

E, respectivamente. Los datos experimentales se incluyeron en las gráficas para observar el ajuste con las correlaciones matemáticas.

En la Figura 43 las propiedades obtenidas en los ensayos de tracción, se superponen a las curvas modeladas, acompañados de sus respectivos intervalos de confianza. Los valores estimados de las propiedades mecánicas se ajustan bien a los resultados experimentales, mostrando una tendencia coherente con las correlaciones matemáticas.

Figura 43

Curvas de propiedades mecánicas modeladas y experimentales a 520 RPM

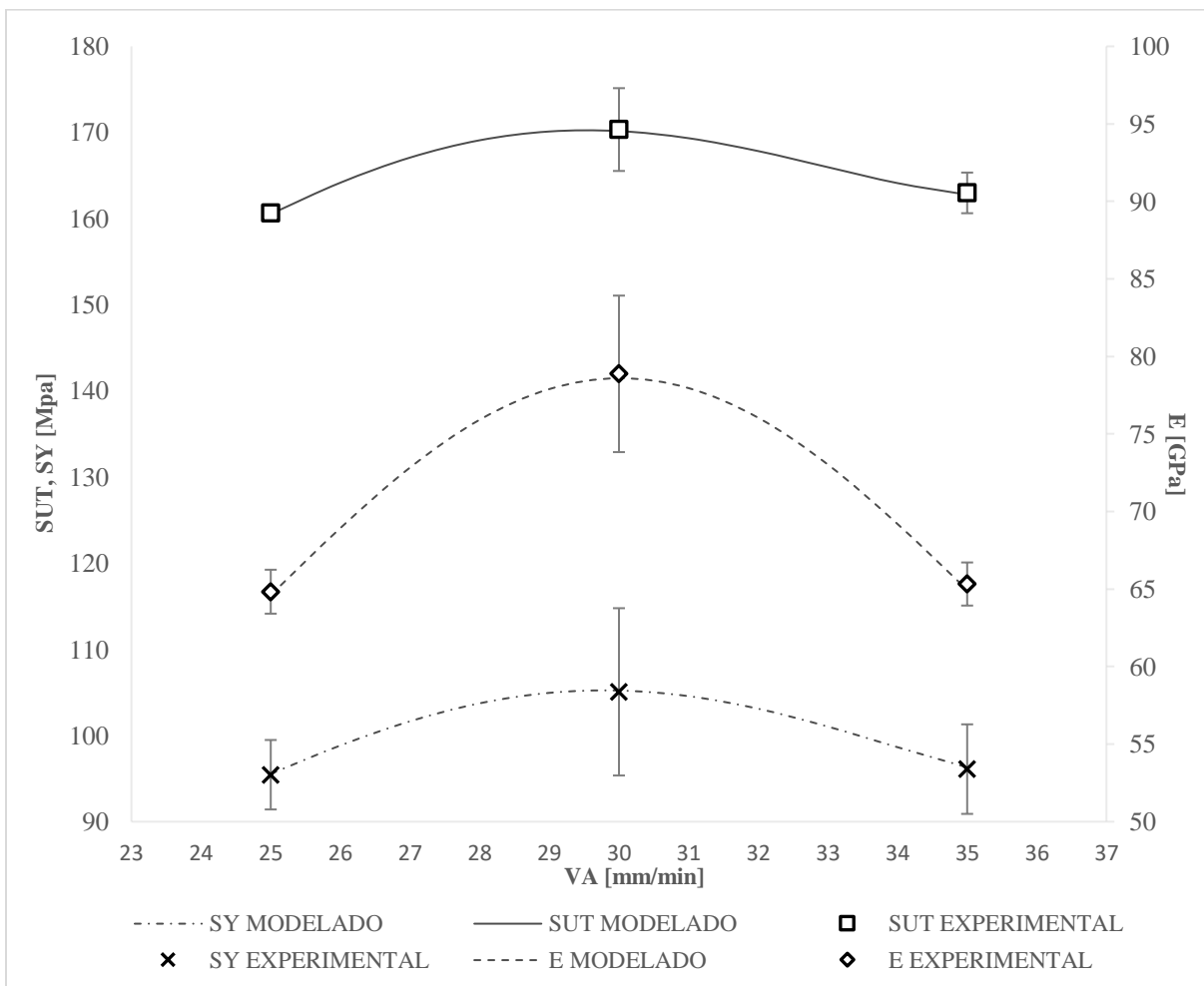


En la Figura 44, se observan las curvas de correlaciones matemáticas para SUT, SY y E, a una velocidad de rotación de 620 RPM. Los puntos experimentales también se derivan de los

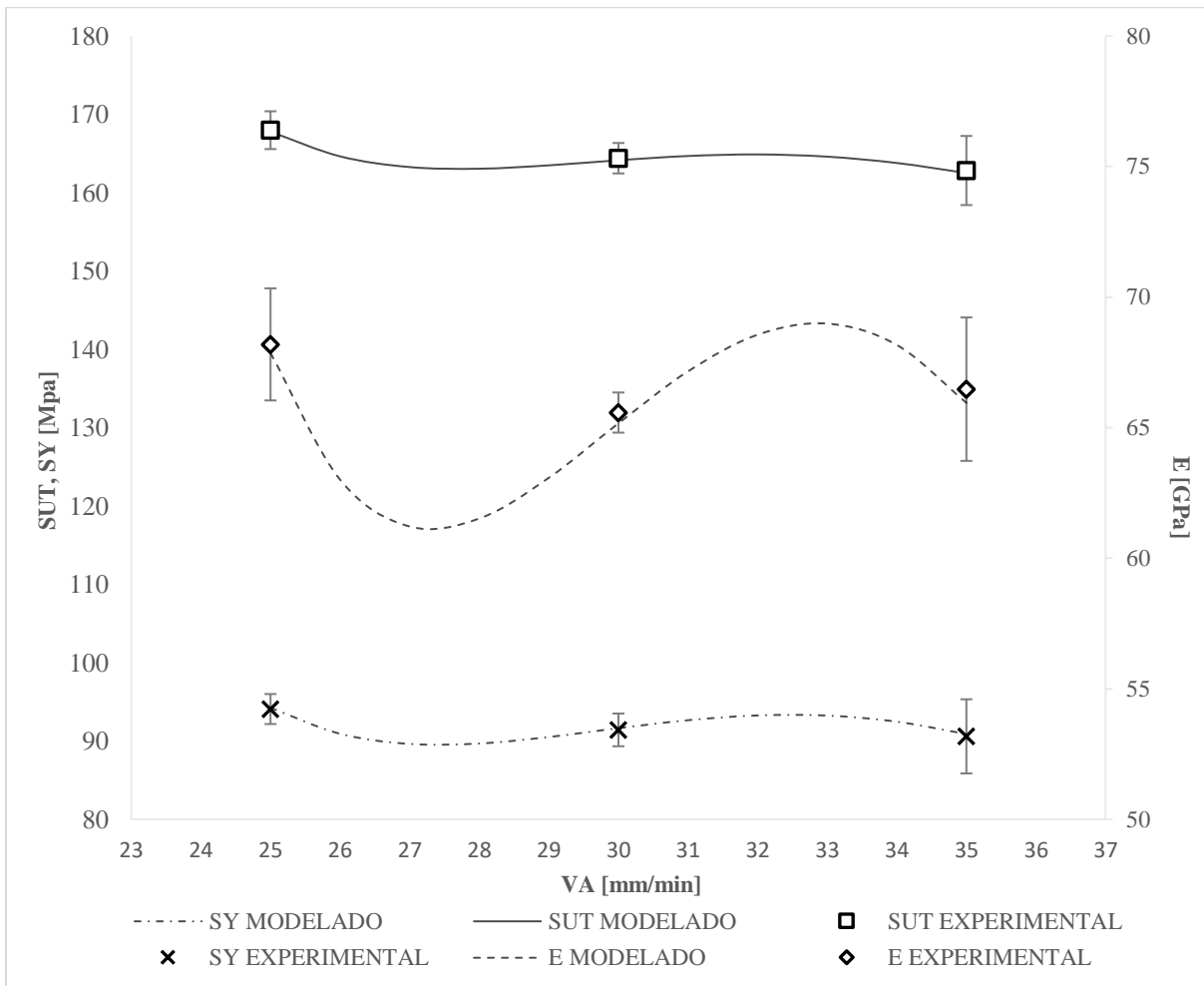
ensayos de tracción, y las propiedades mecánicas estimadas se muestran sobre las curvas. A 620 RPM, los intervalos de confianza son más amplios, lo que sugiere una mayor variabilidad en las mediciones experimentales, aunque las correlaciones matemáticas aún siguen de manera general las tendencias observadas.

Figura 44

Curvas de propiedades mecánicas modeladas y experimentales a 620 RPM



La Figura 45 presenta las curvas modeladas y los puntos experimentales para 720 RPM. Los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de tracción se ajustan bien a los valores estimados en la Tabla 8, reflejando un alto nivel de consistencia entre los modelos y los datos reales. Se observa una menor dispersión de los datos y mayor estabilidad en los resultados.

Figura 45*Curvas de propiedades mecánicas modeladas y experimentales a 720 RPM*

6.4 Resultados del ANOVA para las propiedades mecánicas

Después de determinar las correlaciones matemáticas para cada propiedad obtenida en los ensayos de tracción, se hicieron análisis de varianza para SUT, SY y E. Se plantearon dos hipótesis: la nula que indica que los parámetros de soldadura no influyen en las propiedades mecánicas de las juntas, y la alternativa, que sostiene que los parámetros si tienen influencia. El criterio de evaluación fue el valor-p; si este era menor a 0,05 se descartaba la hipótesis nula, indicando que los parámetros si tienen influencia en las propiedades mecánicas. En cada análisis de varianza se calculó el valor-p para cada parámetro y la interacción entre estos.

En la Tabla 9, se estableció el análisis de varianza para el esfuerzo de último SUT que incluye datos como los grados de libertad (GL), la suma de cuadrados ajustada (SC Ajust.), la media cuadrática ajustada (MC Ajust.), el valor de F y el valor de p para determinar la significancia estadística de los factores estudiados.

Tabla 9

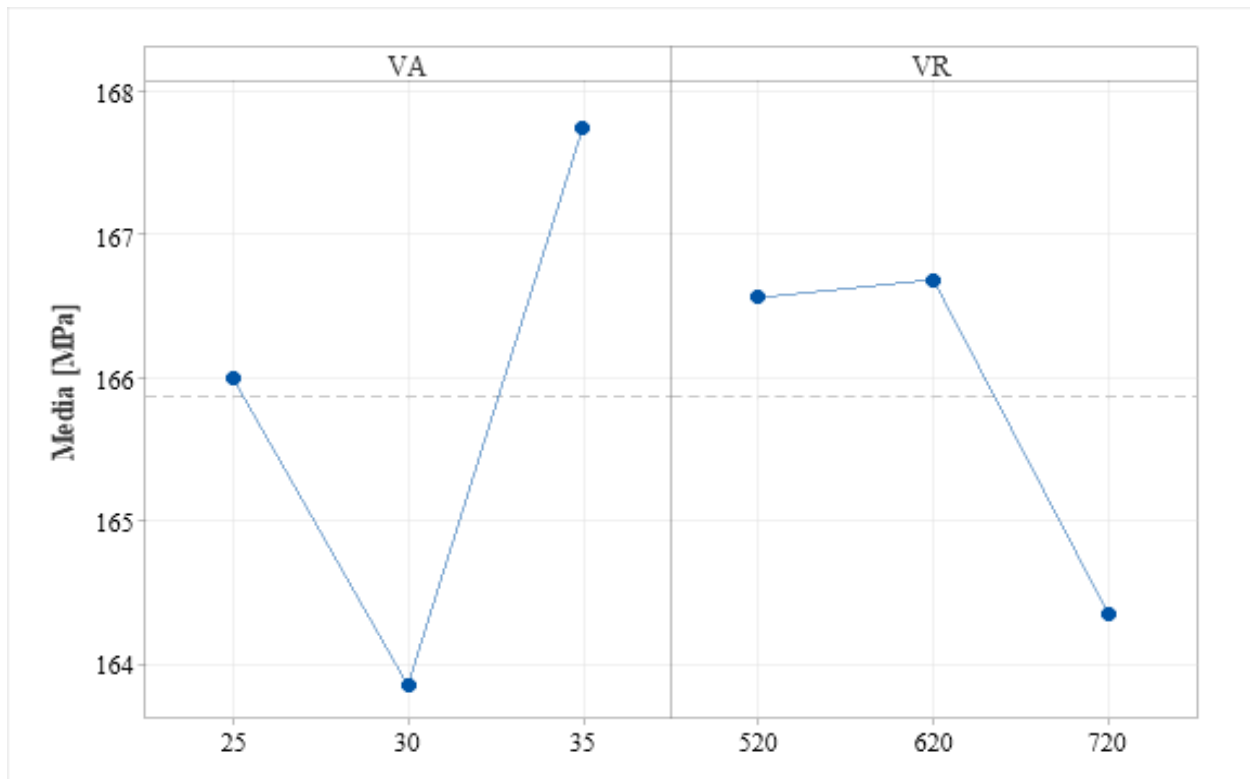
Análisis de varianza del esfuerzo último SUT vs VA, VR

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	730,56	91,32	1,90	0,08962
Lineal	4	164,97	41,24	0,86	0,49709
VA	2	113,33	56,66	1,18	0,31835
VR	2	51,64	25,82	0,54	0,58823
Interacciones de 2 términos	4	565,59	141,40	2,95	0,033
VA*VR	4	565,59	141,40	2,95	0,033
Error	36	1726,11	47,95		
Total	44	2456,67			

Así mismo, se observa que ninguno de los factores individuales VR y VA tiene un impacto estadísticamente significativo sobre el esfuerzo último, ya que los valores de p superan el umbral de 0,05 indicando la ausencia de diferencias significativas entre los niveles de estos parámetros. Sin embargo, la interacción de los términos VR*VA tiene un efecto estadísticamente significativo. La Figura 46 representa el efecto de los parámetros sobre el esfuerzo último.

Figura 46

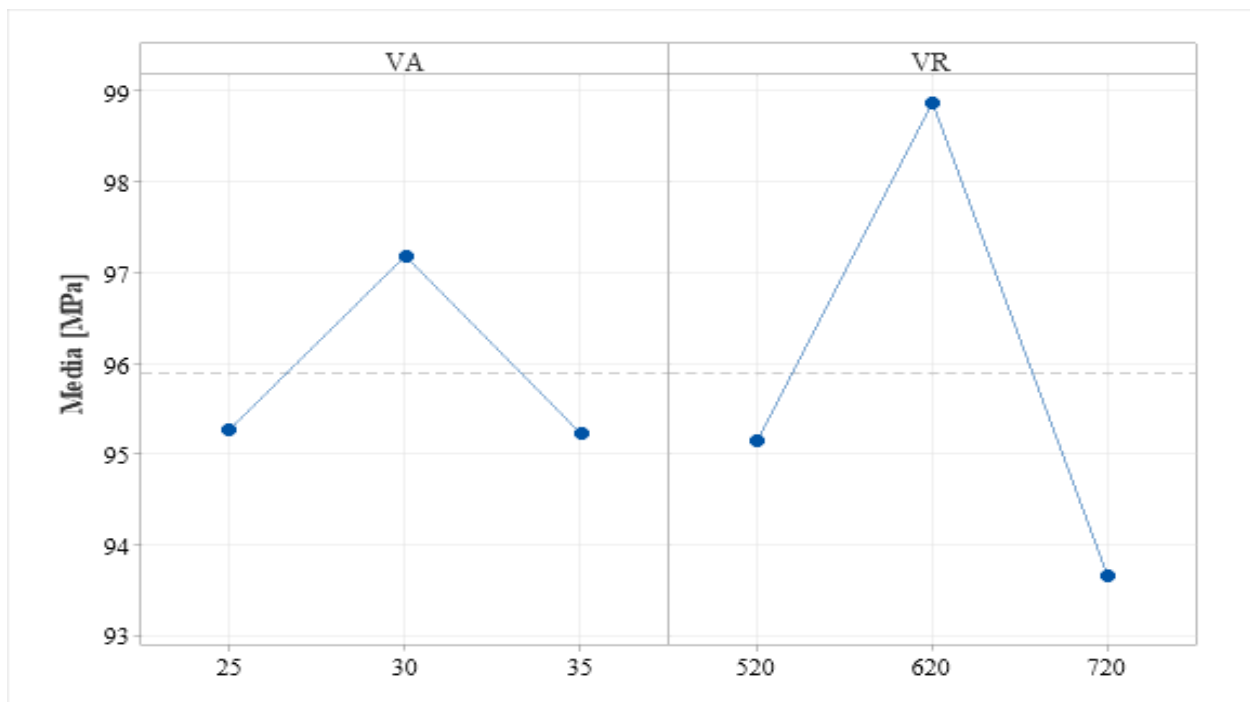
Gráfica de efectos principales para SUT vs VA, VR



En la Tabla 10 se muestra el análisis de varianza para el esfuerzo de fluencia. Los resultados indican que los parámetros de soldadura no tienen un efecto significativo, ya que el valor-p es mayor que el umbral establecido. Por lo tanto, la variación de estos parámetros no influye de manera estadística en el esfuerzo de fluencia. Esto sugiere que en aplicaciones de diseño en donde se requiere esta propiedad, los cambios en los parámetros no afectan su valor. La Figura 47 ilustra el comportamiento individual del esfuerzo al variar los parámetros.

Tabla 10*Análisis de varianza del esfuerzo de fluencia SY vs VA, VR*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	684,41	85,55	1,37	0,2434
Lineal	4	255,24	63,81	1,02	0,4098
VA	2	37,75	18,88	0,30	0,7413
VR	2	217,49	108,74	1,74	0,1901
Interacciones de 2 términos	4	429,17	107,29	1,72	0,1679
VA*VR	4	429,17	107,29	1,72	0,1679
Error	36	2251,00	62,53		
Total	44	2935,41			

Figura 47*Gráfica de efectos principales para SY vs VA, VR*

En la Tabla 11, el análisis ANOVA indica que la velocidad de rotación VR tiene un efecto significativo sobre el módulo de elasticidad E, con un valor p inferior a 0,05 lo que implica que cambios en VR afectan directamente la elasticidad del material soldado.

Tabla 11

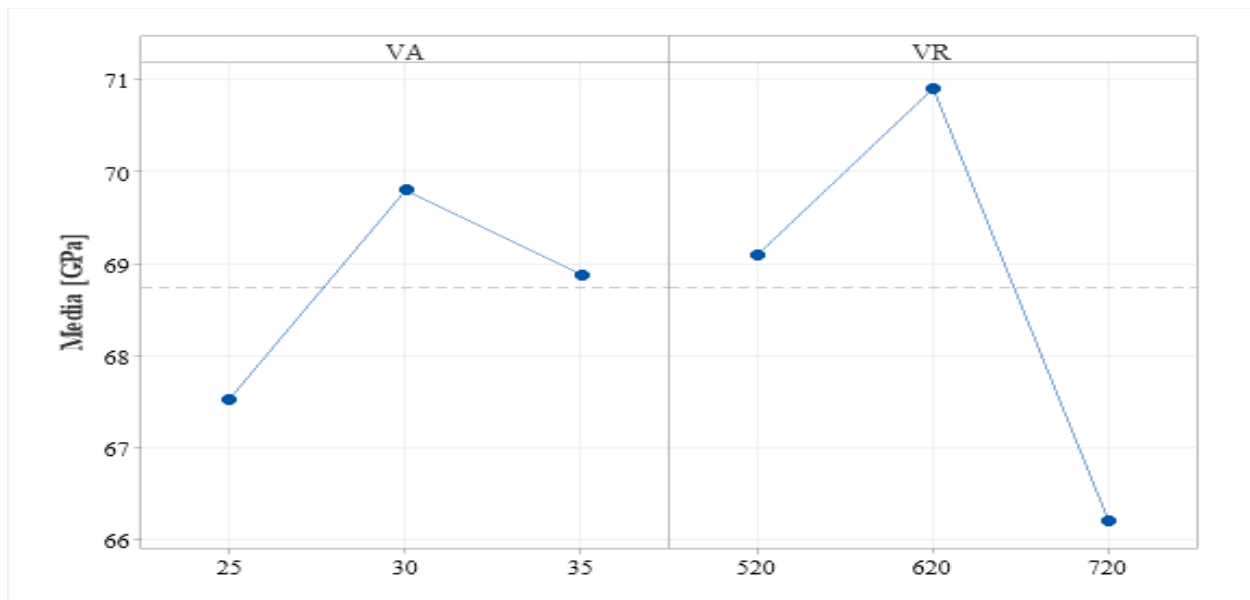
Análisis de varianza del módulo de elasticidad E vs VA, VR

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	880,48	110,06	6,51	0,0000311
Lineal	4	208,16	52,04	3,08	0,0280133
VA	2	39,19	19,59	1,16	0,3252094
VR	2	168,97	84,49	5,00	0,0121480
Interacciones de 2 términos	4	672,33	168,08	9,94	0,0000159
VA*VR	4	672,33	168,08	9,94	0,0000159
Error	36	608,54	16,90		
Total	44	1489,02			

La Figura 48 muestra que el módulo de elasticidad E aumenta con la velocidad de rotación VR, mientras que la velocidad de avance VA tiene un impacto menor. Esto sugiere que VR juega un papel crucial en la rigidez del material final, afectando la densidad y distribución del material durante la soldadura.

Figura 48

Gráfica de efectos principales para E vs VA, VR



7 Conclusiones

De la investigación realizada sobre la influencia de los parámetros de soldadura por fricción-agitación FSW en las propiedades mecánicas de juntas soldadas de AA6061 se obtuvieron las siguientes conclusiones.

La revisión bibliográfica identificó que los principales parámetros que afectan las propiedades mecánicas en el proceso FSW son la velocidad de rotación, la velocidad de avance, la geometría de la herramienta, el ángulo de inclinación y la fuerza axial de la herramienta. Sin embargo, en esta investigación solo se trabajó con la velocidad de rotación, la velocidad de avance y un pin cónico roscado, ya que se consideró que estos parámetros tienen una mayor influencia en las propiedades mecánicas.

Se establecieron rangos de operación basados en los parámetros obtenidos y se realizaron pruebas para definir los valores adecuados en el diseño experimental. Fue necesario hacer ajustes en los rangos de los parámetros debido a fallas operacionales de la fresadora utilizada, pero se obtuvieron soldaduras sanas y sin defectos.

Los ensayos de tracción mostraron que el esfuerzo último SUT alcanzó valores entre el 57% y el 72% de la resistencia a la tracción del material base. Los parámetros intermedios presentaron mejores resultados en términos de resistencia, mientras que valores extremos de velocidad de rotación y avance provocaron una disminución en el SUT, indicando una relación no lineal entre los parámetros de FSW y las propiedades mecánicas de las juntas.

Los ensayos de dureza revelaron que la zona de agitación NZ presentó valores de dureza inferiores a los del material base. La dureza Vickers HV en la zona de agitación osciló entre 60 y 65, en comparación con los aproximadamente 70 HV del material sin soldar. Esta disminución se

atribuye a los efectos térmicos en la zona de agitación y en la zona afectada por el calor HAZ, cuya magnitud depende de los valores de velocidad de rotación y avance utilizados.

Se establecieron correlaciones matemáticas entre la velocidad de rotación, la velocidad de avance y las propiedades de dureza y resistencia a la tracción. Los modelos indicaron que un aumento de la velocidad de rotación hasta un rango intermedio mejora la resistencia de las juntas, mientras que valores excesivamente altos de rotación o avance disminuyen las propiedades mecánicas debido al sobrecalentamiento y al ablandamiento en la zona de agitación.

El análisis de varianza (ANOVA) mostró una influencia estadísticamente significativa de la velocidad de rotación y avance sobre el esfuerzo último, con valores de F superiores a 15 y un p-valor inferior a 0,05. Por otro lado, tanto el módulo de elasticidad como el esfuerzo de fluencia mostraron valores consistentes con los del material base en todas las combinaciones de parámetros, sugiriendo que la resistencia máxima es la propiedad más sensible a las variaciones en el proceso FSW, mientras que la rigidez y el límite de fluencia no se ven afectados de manera estadísticamente significativa.

8 Recomendaciones

Para fortalecer la aplicabilidad de este estudio, el cual se centró en evaluar la influencia de los parámetros de soldadura FSW en juntas soldadas de AA6061, debido a las limitaciones de tiempo y recursos se recomienda lo siguiente.

Realizar ensayos adicionales de tracción y dureza bajo un rango ampliado de parámetros de velocidad de rotación y velocidad de avance para asegurar la precisión y confiabilidad de los modelos desarrollados. Además, es aconsejable utilizar una fresadora más robusta y de mayor potencia para ampliar los rangos de los parámetros estudiados.

Implementar sistemas de fijación diseñados para minimizar las vibraciones y asegurar una mejor alineación de las láminas de aluminio durante el proceso de soldadura. Se recomienda el uso de dispositivos modulares con capacidad de ajuste fino de sujeción, similares a los utilizados en procesos industriales.

Incluir galgas de medición que faciliten el montaje y la precisión de las placas sobre el banco de la fresadora para mejorar la exactitud y consistencia del proceso.

Usar sensores de posición para la velocidad de avance y un tacómetro que registren datos en tiempo real mediante un software, para mejorar la calidad y la cantidad de información disponible para análisis posteriores. Adicionalmente, el uso de celdas de carga que permitan monitorear la fuerza axial aplicada por la herramienta contra el material.

Utilizar láminas de AA6061 de distintos espesores para validar los modelos matemáticos y las curvas que relacionan los parámetros con propiedades mecánicas como el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia. Para ello, se sugiere diseñar un plan experimental basado en metodologías factoriales que considere un rango de espesores representativos de aplicaciones industriales comunes.

Referencias bibliográficas

- Arbegast, W. J. (2008). A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding. *Scripta Materialia*, 58(5), 372. 10.1016/j.scriptamat.2007.10.031
- Azimzadegan, T., & Serajzadeh, S. (2010). An Investigation into Microstructures and Mechanical Properties of AA7075-T6 during Friction Stir Welding at Relatively High Rotational Speeds. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(9), 1256. 10.1007/s11665-010-9625-1
- Balamurugan, S., Jayakumar, K., & Subbaiah, K. (2021). Influence of Friction Stir Welding Parameters on Dissimilar Joints AA6061-T6 and AA5052-H32. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(12), 11985. 10.1007/s13369-021-05773-7
- Cavaliere, P., Campanile, G., Panella, F., & Squillace, A. (2006). Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by Friction Stir Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 180(1-3), 263. 10.1016/j.jmatprotec.2006.06.015
- Chinchanikar, S., Gharde, S., & Gadge, M. (2020). Investigation of tool forces, weld bead micro-hardness and surface roughness during friction stir welding of Aluminium 6063 alloy. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(sup1), 231. 10.1080/2374068x.2020.1815134
- Choudhary, S., Choudhary, S., Vaish, S., Upadhyay, A. K., Singla, A., & Singh, Y. (2019). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al 6061 aluminum alloy joints. *Materials Today: Proceedings*, 25, 563. 10.1016/j.matpr.2019.05.466

- Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., & Aiken, L. S. (2003). *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences* (Third edition ed.). Routledge.
- Davidson, B. S. (2021). Friction stir welding parameters and their influence on mechanical properties of welded AA6061 and AA5052 aluminium plates. *Materials Research Express*, 8(10)10.1088/2053-1591/ac2daf
- Davis, J. R. (2001). *Alloying* (1st ed. ed.). ASM International.
- Dewangan, S. K., Tripathi, M. K., & Manoj, M. K. (2020). Effect of welding speeds on microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welding of AA7075 and AA5083 alloy. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2713. 10.1016/j.matpr.2019.12.190
- Dewangan, S., Yadav, R., Sharma, A., & Vohra, S. (2022). *Analysis into Mechanical Properties and Microstructural Behavior of Friction Stir Welded Al 6061-T6 Alloy Joints*. Springer Nature Singapore. 10.1007/978-981-19-7146-4_16
- Ghiasvand, A., Hassanifard, S., Saadi, S., & Varvani-Farahani, A. (2021). Tensile properties and microstructural features of friction stir welded Al 6061 joints fabricated by various dual-pin tool shapes. *Science and Technology of Welding and Joining*, 26(6), 493. 10.1080/13621718.2021.1950500
- Gibson, B. T., Lammlein, D. H., Prater, T. J., Longhurst, W. R., Cox, C. D., Ballun, M. C., Dharmaraj, K. J., Cook, G. E., & Strauss, A. M. (2014). Friction stir welding: Process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(1), 56–73. 10.1016/j.jmapro.2013.04.002
- Kaufman, J. G. (. G., Rooy, E., & American Foundry Society. (2004). *Aluminum alloy castings* (1st ed. ed.). ASM International.

- Kumar, K. K., Kumar, A., & Satyanarayana, M. (2021). Effect of friction stir welding parameters on the material flow, mechanical properties and corrosion behavior of dissimilar AA5083-AA6061 joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(6), 2901. 10.1177/09544062211036102
- Kumar, R., Ghosh, A., & Chattopadhyaya, S. (2015). Emerging Friction Stir Welding for Aluminium and its Applications. *Manufacturing and Industrial Engineering*, 14(1-2)10.12776/mie.v14i1-2.460
- Kumar, R., Singh Dhama, S., & Mishra, R. S. (2021). Optimization of friction stir welding process parameters during joining of aluminum alloys of AA6061 and AA6082. *Materials Today : Proceedings*, 45, 5368–5376. 10.1016/j.matpr.2021.01.958
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied linear statistical models* (Fifth edition ed.). McGrawHill Education.
- Li, B., He, P., Wang, J., Pan, X., Wang, Y., Wang, Z., & Baniotopoulos, C. C. (2024). Mechanical characteristic and stress-strain modelling of friction stir welded 6061-T6 aluminium alloy butt joints. *Thin-Walled Structures*, 19810.1016/j.tws.2024.111645
- Liu, Z., Zhao, X., & Yang, H. (2018). Effects of tool shoulder design on temperature distribution and weld strength in friction stir welding of aluminum alloys. *Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructures and Processing (Materials Science and Engineering A)*, 732, 242–250.
- Lorrain, O., Favier, V., Zahrouni, H., & Lawrjaniec, D. (2010). Understanding the material flow in FSW of aluminum alloy 6061-T6 with different welding parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(4), 603–609.

- Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1-2), 1. 10.1016/j.mser.2005.07.001
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (8. ed., internat. student version ed.). Wiley.
- Prakash, M., & Daniel Das, A. (2020). Investigation on effect of FSW parameters of aluminium alloy using Full Factorial Design. *Materials Today: Proceedings*, 37, 608. 10.1016/j.matpr.2020.05.622
- Rajakumar, S., Muralidharan, C., & Balasubramanian, V. (2010). Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints. *Materials & Design*, 32(2), 535. 10.1016/j.matdes.2010.08.025
- Raturi, M., Garg, A., & Bhattacharya, A. (2018). Joint strength and failure studies of dissimilar AA6061-AA7075 friction stir welds: Effects of tool pin, process parameters and preheating. *Engineering Failure Analysis*, 96, 570. 10.1016/j.engfailanal.2018.12.003
- Raturi, M., Garg, A., & Bhattacharya, A. (2019). Joint strength and failure studies of dissimilar AA6061-AA7075 friction stir welds: Effects of tool pin, process parameters and preheating. *Engineering Failure Analysis*, 96, 570–588. 10.1016/j.engfailanal.2018.12.003
- Reza-E-Rabby, M., Roy, M. J., & Carlson, B. E. (2018). Effect of tool pin profile on friction stir welding of dissimilar materials: An experimental and numerical approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 1215–1228.
- Romero, C., Yang, F., Zhang, S., & Bolzoni, L. (2020). Effect of thermomechanical microstructural modification and resulting crystallographic texture on the crack initiation mechanism and fatigue behaviour of PM Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A*, 79210.1016/j.msea.2020.139836

- Sachinkumar, Chakradhar, D., & Narendranath, S. (2021). Analysis of the Effect of Friction Stir Welding Parameters on Characteristics of AA6061 Composites using Response Surface Methodology. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(6), 1303. 10.1007/s12666-021-02214-9
- Sato, Y. S., Ikeda, K., Kokawa, H., & Nelson, T. W. (2020). Microstructural factors governing fracture location in friction stir welds of aluminium alloy 7075-T651. *Science and Technology of Welding and Joining*, 25(5), 395–402.
- Schneider, J. A., & Nunes, A. C. &. (2004). Friction stir welding of aluminum alloys. *Properties of aluminum alloys* (pp. 156–170). ASM International.
- Sivakumar, C. K., Robinson, Y., Prema, P., Joe Patrick Gnanaraj, S., & Appadurai, M. (2022). Mechanical characteristics of aluminium alloy joints produced by friction stir welding. *Materials Today: Proceedings*, 62, 5620. 10.1016/j.matpr.2022.04.831
- Swetha, S., & Padhy, C. (2023). Tool pin profiles effect on mechanical properties of friction stir welding of dissimilar aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 92, 1092. 10.1016/j.matpr.2023.05.132
- Thomas, W., Nicholas, E., Needham, J., Murch, M., Temple-Smith, P., & Dawes, C. (1993). *IMPROVEMENTS RELATED TO FRICTION STIR WELDING*
- Verma, S., & Kumar, V. (2021). Optimization of friction stir welding parameters of dissimilar aluminium alloys 6061 and 5083 by using response surface methodology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(23), 7009. 10.1177/09544062211005804

Wang, X., Chen, M., & Li, Y. (2016). Influence of tool pin geometry on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 161–170.