

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Soldabilidad de planchas de aleación Plomo-Estaño-
Antimonio mediante la técnica FSW

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en
Ingeniería de Soldadura que presenta:

Randhal Silvera Hernandez

Asesor:

José Luis Hideki Sakihama Uehara


Lima, 2023

Informe de Similitud

Yo, José Luis H. Sakihama Uehara, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada “Soldabilidad de planchas de aleación Plomo-Estaño-Antimonio mediante la técnica FSW” del autor Randhal Silvera Hernandez, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 13 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 21/08/2021.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lima, 20 de octubre de 2023

Apellidos y nombres del asesor: Sakihama Uehara, José Luis H.	
DNI: 40851665	Firma 
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2750-2556	

Resumen

En la última década, la industria Aero espacial y de transporte ha impulsado la implementación del proceso de soldadura por fricción batido o FSW (por sus siglas en inglés), en aleaciones de cobre, manganeso, titanio y aceros, debido a la necesidad de usar materiales de alta resistencia específica que presentan baja soldabilidad. Sin embargo, debido a la baja resistencia específica del plomo, esas aleaciones no son consideradas atractivas por los diferentes sectores industriales que generan desarrollo en la tecnología (FSW). Por esta razón, no existe una literatura suficiente en cuanto a diseños de proceso y perfiles de herramientas que se ajusten a las características termo mecánicas de estas aleaciones. Además, es importante destacar que debido a su baja conducción de calor ($35.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) y el bajo límite de fluencia de las aleaciones de plomo, se presenta un comportamiento plástico elevado, lo que dificulta la generación y tránsito del calor al interior de la junta y genera gran inestabilidad durante el proceso de batido. Ante el vacío de información existente, la investigación desarrollada en este estudio buscó analizar combinaciones de parámetros y diseño de herramientas para desarrollar la implementación del proceso FSW en una aleación de Pb-Sn-Sb, la cual es de gran interés para la industria de procesos de recubrimientos electrolíticos

Los resultados obtenidos demostraron que es posible obtener soldaduras sanas con niveles superiores al 70% de eficiencia en la resistencia mecánica por medio de FSW, al utilizar un estrecho rango de parámetros de velocidad de rotación (1700 y 2000 RPM) y avance lineal (30 y 50 mm/min), se evidencia un afino de grano. Además, se observa que para velocidades entre 1800 y 1950 RPM a mayor velocidad de rotación se genera una reducción en el tamaño de la TMAZ.

Tabla de contenido.

1.	Revisión de literatura.	2
1.1.	Características de proceso de algunos metales soldados por FSW.	4
1.1.1.	Las aleaciones fundidas de Mg.	4
1.1.2.	Las aleaciones de titanio.	4
1.1.3.	El cobre puro.	4
1.1.4.	El acero.	5
1.2.	Defectos Comunes en FSW.	5
2.	Objetivos.	7
2.1.	Objetivo general.	7
2.2.	Objetivos específicos:	8
3.	Materiales y métodos.	8
3.1.	Caracterización del material base.	8
3.2.	Fabricación de las herramientas y pruebas preliminares de soldadura FSW.	9
3.3.	Afino de parámetros dentro del rango de sanidad.	10
4.	Resultados y discusión.	13
4.1.	Caracterización del material base.	13
4.2.	Inspección visual de la junta en pruebas preliminares.	14
4.2.1.	Pin cuadrado.	14
4.2.2.	Pin Cónico roscado.	16
4.2.3.	Pin MX trivex.	16
4.3.	Defectos en proceso.	19
4.4.	Pruebas de afino de parámetros dentro del rango de sanidad.	21
4.5.	Resistencia a la tracción y análisis de superficie de fractura ensayada.	23
4.5.1.	Pin cónico.	23
4.5.2.	Pin MX trivex.	24
4.6.	Metalografía y análisis microestructural.	25
5.	Conclusiones.	28
6.	Recomendaciones para trabajos futuros.	29
7.	Referencias.	30
8.	Anexos.	33

Índice de Figuras.

Figura 1. Ánodo tipo tambor (Alchemy Extrusions Inc.) para proceso de aplicación de recubrimiento electrolítico, fabricado en la aleación de plomo (láminas de 6-12 mm de espesor) con cordones circunferencias [fuente propia].....	2
Figura 2 Trivex (W), MX trivex (X) [15] Three flautes (Y) [8], diámetro de hombro DH, diámetro de pin DP (Z)	3
Figura 3. A) Daño de túnel interno y kissing bond [22], B) Line defect formado en la zona de transición [23]	6
Figura 4. A) defecto por inadecuado calor de aporte [23], B) Defecto debido a insuficiente calor de aporte y baja deformación plástica [23]	6
Figura 5. A) defecto tipo flash [24] B) flash excesivo [25].....	6
Figura 6 A) Tunel o agujero de gusano común[27], B) Tunel superficial debido a parámetros de proceso inadecuado[24]	7
Figura 7. Diseño preliminar de pines A: MX-Trivex (MT) , B:Pin Cuadrado (C) , C: Cónico Roscado (CR), material acero herramienta AISI D3 – K100 BÖHLER, tratamiento térmico a 50 HRC.....	10
Figura 8. Distribución de cupón de soldadura formado por dos laminas soldadas de espesor variante de 6.2 mm- 6.3 mm. Ancho 94 mm y largo 76 mm.....	10
Figura 9 . Flujo grama del proceso de investigación	12
Figura 10. Metalografía de aleación 98% Pb, 1.8% Sn, 0.10% Sb. A: 50X, B: 1000X.13	
Figura 11. A) diagrama terciario Pb-Sn-Sb B) Diagrama binario Pb-Sn [28].....	14
Figura 13. Pruebas preliminares con pin cuadrado inspección superficial de la junta A) C-600/100. B) C-1200/50. C) C-1600/50. D) C-2400/75. E) C-2000/50	16
Figura 14 A) Prueba preliminar # 40: CR-1800/40 hombro de 20 mm de diámetro, B) Prueba preliminar # 38: MT-2000/40 hombro de 12 mm (Tabla2).....	16
Figura 15. A) Esquema de zona de defectos vista superficial del cordón de soldadura B) . Pin MX trivex Posterior soldeo longitud de 95 mm a 1800 RPM x 40 mm/min	19
Figura 17 Variación de la resistencia máxima en función de la velocidad de giro para los pines cónico roscado (CR) [8], Y Pin MX Trivex (MT) con un avance lineal de 40 mm/min, giro Izquierdo, inclinación de pin de 0°, penetración del hombro 0.20 mm y diámetro.....	21
Figura 19. Zonas de fractura de piezas soldadas con pin cónico roscado,6x6 R1 Etapa 1. A: CR-1700/40 B: CR-1850/40 C: CR-2000/40.....	23
Figura 21. Micrografía compuesta material base (BM), zona termo-mecánicamente afectada (TMAZ) ,zona de agitación (SZ) probeta soldada a 1850 RPM x 40 mm/min con pin Mx trivex.....	25
Figura 22. Material base (BM), zona termo-mecánicamente afectada (TMAZ) ,zona de agitación (SZ) probeta soldada a 1850 RPM x 40 mm/min con pin Mx trivex.	26
Figura 23. Micrografía tomada en microscopio óptico transición de TAZ-TMAZ-STIR ZONE soldaduras ejecutadas con pin Mx trivex.....	26
Figura 24. Micrografía tomada en microscopio óptico en la STIR ZONE, soldaduras ejecutadas con pin Mx trivex.	27
Figura 25. Pin MX trivex Previo a labor de soldeo.....	33
Figura 26. Detalle Pin MX trivex Posterior soldeo longitud de 95 mm a 1800 RPM x 40 mm/min	33
Figura 28. Programación de parámetros de soldeo 1850 RPM x 40 mm/min en centro de maquinado CNC (Romi D1500)	33
Figura 29. Cupón soldado a partir de dos planchas de 6.25 mm de espesor por longitud total de soldeo 95 mm	34

Figura 30. Probetas de dobles y tracción extraídas de cupón soldado Soldadura ejecutada en planchas 6.2 mm- 6.3 mm longitud total de soldeo 95 mm	34
Figura 31. Ensayo de tracción realizado en maquina universal de ensayo Zwick/Roell Z250 de la PUCP.....	35
Figura 32. Esquema dimensional de un ánodo de proceso de cromado para cálculo de pesos y esfuerzos en cordón.	35
Figura 33. Diseño preliminar de pin cónico roscado.....	36
Figura 34. Diseño preliminar de pin cuadrado.....	37

Índice de tablas

Tabla 1 Parámetros de operación de algunos metales referentes.....	9
Tabla 2 Pruebas preliminares de identificación de rangos de sanidad.....	11
Tabla 3 Composición química y esfuerzo de tracción del metal base	13
Tabla 4 Resultado de inspección visual de pruebas preliminares (MT) y (CR)	18
Tabla 5 Resultados de resistencia promedio a la tracción y la eficiencia de la junta con avance constante	21
Tabla 6 Resultados de resistencia promedio a la tracción y la eficiencia de la junta en pruebas de soldeo con avance variable	22
Tabla 7 Cálculo de peso para análisis de esfuerzo en el cordón superior de soldadura.	36



Introducción

En la industria de la fabricación de partes para procesos de revestimiento electrolíticos, la soldadura de aleaciones de plomo es un proceso crítico que requiere una buena resistencia mecánica y una excelente conductividad eléctrica y térmica. La soldadura convencional de aleaciones de plomo puede ser desafiante debido a su baja temperatura de fusión y alta viscosidad, lo que puede resultar en defectos en la unión y gases tóxicos para la salud humana. Para abordar estos problemas, se ha desarrollado diferentes técnicas de soldadura de alta mecanización, una de ellas la soldadura por fricción batido (FSW), que ha evolucionado con diferentes configuraciones para obtener soldaduras sanas. En este estudio, se realizaron ensayos preliminares para preseleccionar los rangos de proceso necesarios y se encontraron combinaciones adecuadas de parámetros para generar resistencias mecánicas en la unión soldada por encima del 70% del metal base. El estudio se enfocó en los parámetros de proceso, tipos de herramientas, defectología en la junta y en alcanzar los objetivos de obtener parámetros de proceso que brinden homogeneidad y resistencia en la unión y correlaciones entre parámetros de procesos y cambios microestructurales y de resistencia mecánica.

1. Revisión de literatura.

Los procesos convencionales de unión de aleaciones de plomo son realizados generalmente por procesos oxiacetilénicos, los cuales, permiten alcanzar temperaturas en el charco de soldadura superiores a los 800°C, temperatura suficiente para que se generen vapores tóxicos para la salud [1] alcanzando fácilmente valores de contaminación superiores a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el lugar de trabajo y 0.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la sangre de los operarios [2]. Existen procesos desarrollados en las últimas décadas, los cuales nos permitirían trabajar con este tipo de aleaciones de forma más segura debido al alto grado de mecanización de estos nuevos desarrollos. Uno de estos procesos es el FSW, el cual según Çam, G. & Mistikoglu [3] posee gran potencial para ser implementado en aleaciones de plomo debido a que estas aleaciones cumplen con requisitos básicos: Bajo punto de fusión y baja resistencia mecánica.

El FSW fue desarrollado inicialmente para aleaciones de aluminio por el Instituto de Soldadura del Reino Unido alrededor del año 1990, pero ha sido extendido a aleaciones de manganeso, cobre y titanio, debido a sus excelente resistencia específica y la necesidad de ser usadas en las industrias del transporte como lo son la Aeroespacial y de Trenes [4] [5][6].

Debido a la baja resistencia específica que el plomo y sus aleaciones presentan, este material no es muy atractivo para las industrias anteriormente mencionadas, pero encuentra mucha utilidad en la industria de fabricación de piezas para procesos de recubrimientos electrolíticos (ver figura 1) debido a su resistencia a la corrosión [7].

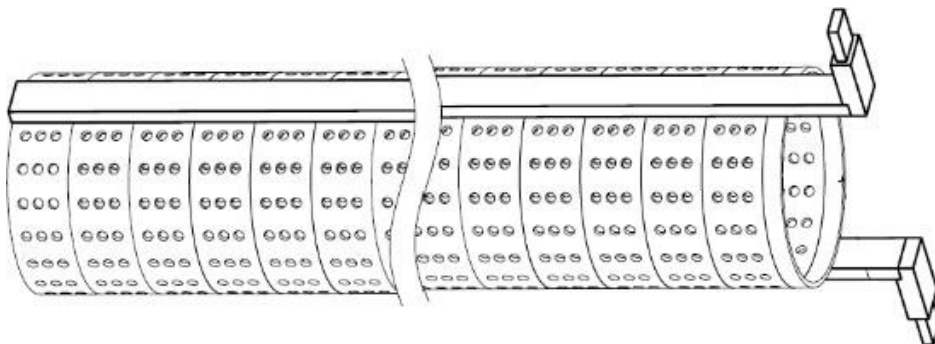


Figura 1. Ánodo tipo tambor (Alchemy Extrusions Inc.) para proceso de aplicación de recubrimiento electrolítico, fabricado en la aleación de plomo (láminas de 6-12 mm de espesor) con cordones circunferenciales [fuente propia].

Estudios realizados se han enfocado en obtener condiciones de proceso que permitieran la adaptabilidad del FSW a las aleaciones de Cu, Ti, Mg, MMC y algunos tipos de aceros [5][8][9] enfocándose en temas como: diseño de herramientas, parámetros de proceso y variaciones micro estructurales atadas a cambios de parámetro de proceso [10][11][12].

Por medio de los parámetros de velocidad de rotación y avance lineal, se puede controlar la cantidad de calor que se ingresa a la junta en las cuales, para la mayoría de los metales, el incremento de temperatura se obtiene al incrementar la velocidad de rotación y la disminución de la temperatura se obtiene al incrementar el avance lineal de soldeo. Dependiendo de la conductividad térmica del metal, se obtendrán afectaciones de mayor o menor grado para cada tipo de material [13][14].

Estudios acompañados de procesos de simulación han impulsado el cambio de los perfiles de las herramientas, partiendo del básico pin circular roscado, pasando por los diseños cónicos roscados, perfil cuadrado, Whorl pin luego con el desarrollo de pines con perfil Trivex (X), MX trivex (Y) y modelos MX triflute (Z) con la finalidad de disminuirle fuerza de arrastre a la herramienta y con ello elevar la vida útil de la misma, aumentando el grado de deformación del material en la línea de soldeo.[15]

Diferentes estudios y desarrollos evidencian la evolución de la geometría de las herramientas (Figura 2) en pro de mejorar la generación puntual del calor y el flujo del material al interior de la junta, con lo cual se puede minimizar defectos como formaciones de túneles por flujos inadecuados en las aleaciones de aluminio entre otras [8][16].

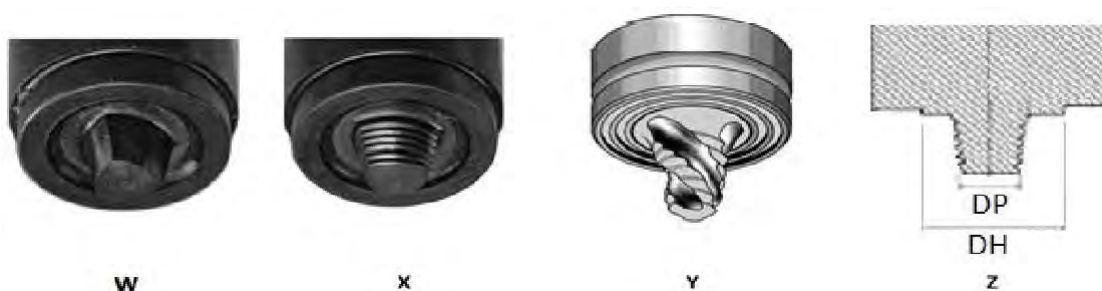


Figura 2. Trivex (W), MX trivex (X) [15] Three flutes (Y) [8], diámetro de hombro DH, diámetro de pin DP (Z)

1.1. Características de proceso de algunos metales soldadas por FSW.

1.1.1. Las aleaciones fundidas de Mg.

Estas aleaciones fundidas presentan una gran sensibilidad en cuanto a los parámetros de velocidad de rotación (RPM) y avance lineal (mm min^{-1}) [17], el rango de parámetros encontrado donde estas aleaciones presentan buenos resultados son alrededor de los 50 mm min^{-1} y velocidades de rotación de 1240–1750 RPM fuera de estos parámetros de velocidad de rotación (mayores o menores) en las aleaciones fundidas como la AZ91D Mg se generan vacíos internos, las imperfecciones encontradas en el proceso de estas aleaciones están atribuidos en muchos casos a algunos defectos originados en el proceso de fundición que pueden afectar significativamente el proceso de FSW de las aleaciones de Mg fundida como la AM50, AM60 y AZ91.72 las cuales también presentan rangos de RPM muy estrechas en las cuales se pueden obtener juntas libres de defectos [18].

1.1.2. Las aleaciones de titanio.

Uno de los mayores problemas al aplicar FSW para este tipo de aleaciones es su baja conductividad térmica ($22.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) [19] lo que hace necesario el diseño de herramientas que permitan un flujo de calor hacia el fondo de la raíz [20], estas mejoras se alcanzan utilizando un diámetro de hombro (DH) más pequeño y un pin cónico con relaciones DH/DP (diámetro de pin) más bajas que para las aleaciones de aluminio, y/o la utilización de hombros estáticos para reducir el aporte de calor desde la superficie y con ello mitigar el impacto de la poca conductividad térmica del metal [18] y así disminuir el gradiente térmico a través de toda la junta soldada. .

1.1.3. El cobre puro.

El cobre en estado de alta pureza, para su procesamiento requiere pinos fabricados de acero para trabajo en caliente, especialmente para las aplicaciones donde se requieren unir placas de más de 3 mm debido a la gran cantidad de calor que debe ser aplicada en el cobre, la alta conductividad térmica del cobre ($385 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) hace necesario usar altas RPM para obtener el calor

suficiente para el proceso, y a su vez genera un efecto adverso ya que se produce un ablandamiento de las herramientas de acero convencional como las utilizadas en FSW en aleaciones de Aluminio, por ello la necesidad de uso de materiales de alta resistencia a altas temperaturas como lo son los carburos cementados, carburos en matriz de cobalto, Nitruro de boro cúbico policristalino, Súper aleaciones a base de Ni, Co, Mo, W y algunas otras aleaciones producidas vía pulvimetalurgia como IN100, PM3030. Las exigencias para las herramientas al procesar aleación de cobre son un poco inferiores ya que al alear el cobre, su conductividad térmica decrece, minimizando el efecto ablandador de la herramienta [18].

1.1.4. El acero.

Una de la mayores desventajas para el procesamiento del acero es el desgaste de la herramienta por lo cual se deben utilizar materiales como el Nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN) [5][9], súper aleaciones a base de Ni o base Co, que tengan resistencia a la abrasión elevada y buena resistencia a la fatiga en condiciones de temperatura superior a los 900°C ya que a diferencia de los procesos de FSW para aleaciones de Al, Cu, Mg, el proceso para aceros requiere temperaturas superiores entre los 700° y 1100°C, lo que hace necesario la implementación de unidades de refrigeración que pueden estar directamente en la herramienta o en la pieza de trabajo, por otro lado al comparar el proceso de soldado convencional de los aceros de alto contenido de carbono con el proceso FSW, se encuentra una gran ventaja para el FSW ya que al utilizar la técnica de optimización de parámetros se pueden alcanzar uniones con temperaturas por debajo de A3 [9] incluso por debajo de A1, lo cual excluye transformaciones de fase en estos aceros de soldabilidad limitada [21].

1.2. Defectos Comunes en FSW.

En las juntas obtenidas por FSW se pueden identificar claramente tres tipos comunes de irregularidades o defectos. Uno de ellos es conocido como “kissing-bond” o “line defect” (Figura 3b) este defecto es generado por el movimiento desequilibrado de la herramienta durante el proceso de soldadura ocasionando

presiones hidrostáticas insuficientes en la junta, lo que resulta en una junta con irregularidades en su interior.

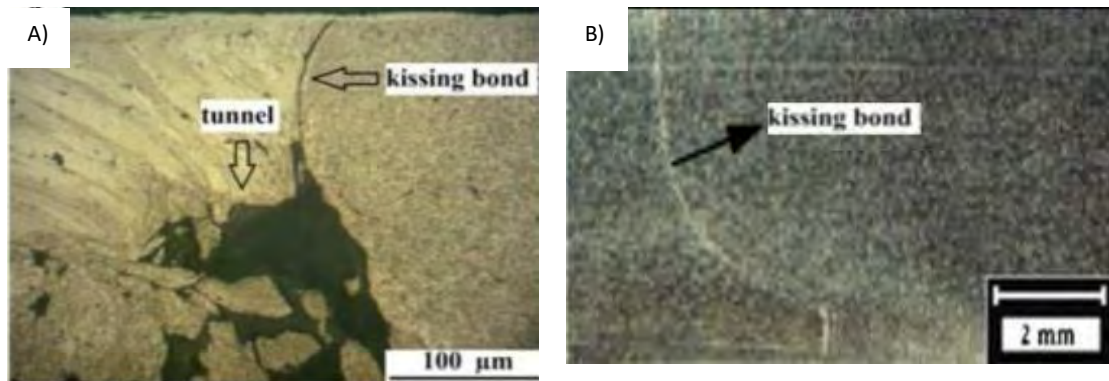


Figura 3. A) Daño de túnel interno y kissing bond [22], B) Line defect formado en la zona de transición [23]

La porosidad en la zona central de la soldadura (Figura 4), se debe en la mayoría de los casos a inadecuado calor de aporte, así como un proceso de deformación plástica insuficiente bajo el cual no se permite el flujo adecuado del material y se generan vacíos al interior de la junta [23].

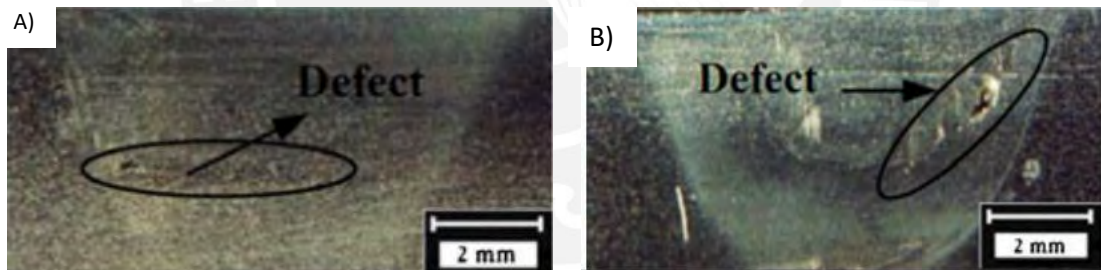


Figura 4. A) defecto por inadecuado calor de aporte [23], B) Defeco debido a insuficiente calor de aporte y baja deformación plástica [23]

Un defecto común es el “excess flash” (Figura 5) generada por un exceso de calor focalizado en la interfaz entre la pieza de trabajo y el hombro de la herramienta, la cual puede ser solucionada realizando variaciones en el tipo y dimensiones del hombro (Figura 2z)

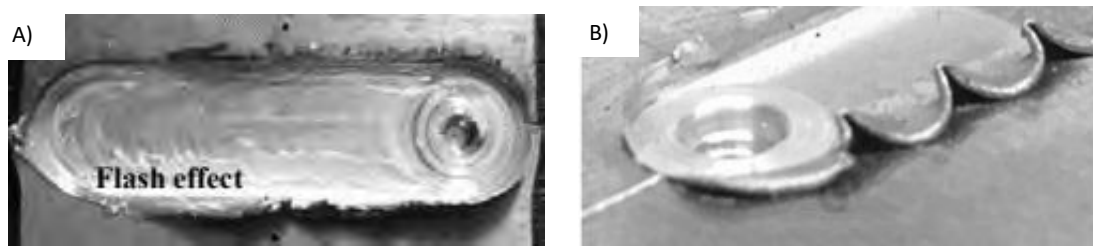


Figura 5. A) defecto tipo flash [24] B) flash excesivo [25]

Otro defecto común es el llamado agujero de gusano o túnel [6] el cual se ubica normalmente en la zona de agitación cerca de la parte inferior de la soldadura, (Figura 6) estos pueden ser generados debido a la alteración del flujo del material plastificado de la zona de agitación debajo del hombro. Esto se puede evitar maquinando formas en la cara del hombro de la herramienta y diseñado cambios de sección del hombro al pin que generen un mejor flujo del material hacia la parte interior de la soldadura y mantenga una penetración constante, la generación del túnel de gusano está muy ligado al uso de altas velocidades de avance lineal, que conllevan a un flujo irregular del material batido y no permiten el llenado de las cavidades internas de la unión [3][26].

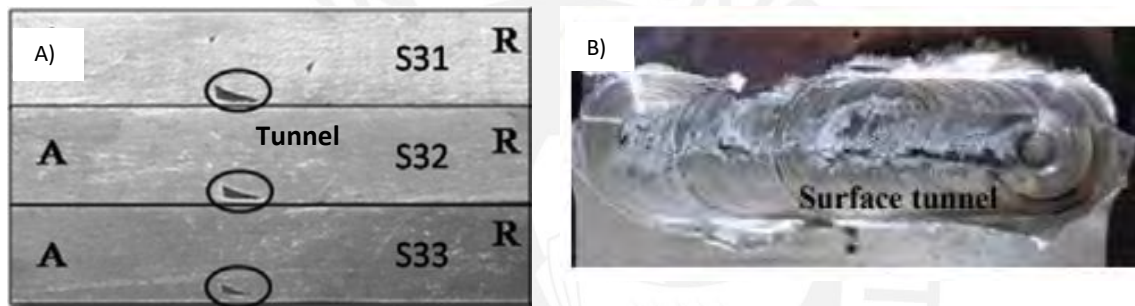


Figura 6. A) Tunnel o agujero de gusano común[27], B) Tunnel superficial debido a parámetros de proceso inadecuado[24]

La investigación evidencia la existencia de estudios y desarrollos de la técnica de fricción batido para metales como el aluminio, titanio, acero, manganeso, cobre entre otros, Sin embargo, no se cuenta con literatura suficiente sobre el proceso FSW para aleaciones de Pb, por lo que se han propuesto los siguientes objetivos:

2. Objetivos

2.1. Objetivo general:

Investigar la adaptabilidad del proceso FSW para generar juntas sanas en aleaciones de Plomo - Estaño - Antimonio

2.2. Objetivos específicos:

1. Obtener parámetros de proceso que brinden homogeneidad y resistencia máxima superior a 40 MPa o eficiencias de la junta superiores al 70% en la unión de piezas soldadas.
 2. Evidenciar la relación de los parámetros de proceso (avance lineal y velocidad de rotación), con la resistencia mecánica alcanzada en la junta soldada por FSW en una aleación de plomo.
 3. Correlacionar la variación de parámetros de proceso con cambios microestructurales en la zona soldada (SZ) y la zona afectada termo mecánicamente (TMAZ).
 4. Analizar la influencia de la geometría del pin en el desempeño mecánico de la junta soldadas por FSW.
3. Materiales y métodos.
- 3.1. Caracterización del material base.

En este estudio se utilizaron platinas de una aleación de plomo (Pb-Sb-Sn) la cual fue caracterizada químicamente, utilizando un equipo Bruker de la compañía Zinc Industrias Nacionales, S.A (Zinsa), y mecánicamente con los equipos del laboratorio de la PUCP, Se realizaron análisis metalográficos con una preparación de la pieza por medio de pulido con lija abrasiva de carburo de silicio usando jabón líquido-agua como lubricante y finalmente, pulido con alúmina de $0.3/\mu\text{m}$ en agua, debido a la baja dureza de la aleación, se presentaron incrustaciones de material abrasivo (carburo de silicio) durante el proceso de pulido, por lo cual se requirieron procesos de limpieza ultrasónica previo al pulido con alúmina. El ataque químico interpolado recomendado por J. R. Sarazin [28], no fue necesario gracias a la baja presencia del Sb permitiendo la visualización de la micro estructura de la aleación con buena nitidez (Figura 10). Estas imágenes se obtuvieron por medio de un microscopio invertido Leica.

Los resultados obtenidos permitieron realizar un comparativo de características mecánicas con algunos materiales ya usados anteriormente en procesos exitosos de FSW y con ello se seleccionaron un conjunto de parámetros de proceso preliminares, partiendo de datos conocidos para aleaciones de Magnesio [12][29], Aluminio [17], Cobre [18] y Titanio [19] estudiados ampliamente (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros de operación de algunos metales referentes.

<i>Material</i>	<i>Velocidad de rotación (RPM)</i>	<i>Velocidad de soldeo $mm\ min^{-1}$</i>	
<i>Al puro</i>	640	150	[30]
<i>Cobre</i>	800	120	[31]
<i>Titanio</i>	200	60	[32]
<i>Magnesio AZ91D</i>	1750	50	[18]

3.2. Fabricación de las herramientas y pruebas preliminares de soldadura FSW.

Se realizaron pruebas preliminares de soldadura a tope, en un Centro de maquinado CNC, Romi D1500 (Brasil), perteneciente a la empresa Hydraulic Systems SAC, con diferentes tipos de pines para identificar el rango de parámetros asociados a sanidad en las pruebas. Los perfiles usados fueron pin cuadrado (C) [10], pin cónico roscado (CR) [33] y MX-trivex (MT) [34] (Figura 7), estas herramientas fueron fabricadas en acero de herramienta D3(2080), en estado de suministro a 24 HRC, al cual se le aplicó un tratamiento térmico de temple y revenido en la compañía BOHLER Perú, para obtener una dureza de 50 HRC. Con estas herramientas y variando algunos parámetros de proceso como la velocidad de avance, RPM y penetración, se pudieron soldar cupones de 94 mm de largo, 76 mm de ancho y 6,3 mm de espesor (Figura 8). Se realizó una inspección visual a las juntas de estas pruebas preliminares (Tabla 2) buscando identificar y minimizar defectos como túneles de gusano, excess flash y faltas de fusión y con ello seleccionar un rango de parámetros y herramientas que podrían brindar la sanidad necesaria (Figura 9, flujo grama de proceso), para realizar un desarrollo más fino en cuanto a selección de parámetros y rediseño de herramientas.

3.3. Afino de parámetros dentro del rango de sanidad.

Posterior al proceso de rediseño de herramientas, se realizaron pruebas fijando un valor de avance y realizando variaciones en las RPM, con el fin de determinar el RPM óptimo, estos cupones soldados fueron ensayados mecánicamente con el fin de evidenciar un rango de valores de alta resistencia, (mayor al 70% del metal base), posterior a ello se realizaron pruebas fijando las RPM y variando el avance para determinar el avance óptimo dentro del rango de alta resistencia, las probetas fueron ensayadas en una maquina universal de ensayo Zwick/Roell Z250 y se les realizaron análisis metalográficos con obtención de imágenes en microscopios invertidos y ópticos Leica pertenecientes al laboratorio de la PUCP.

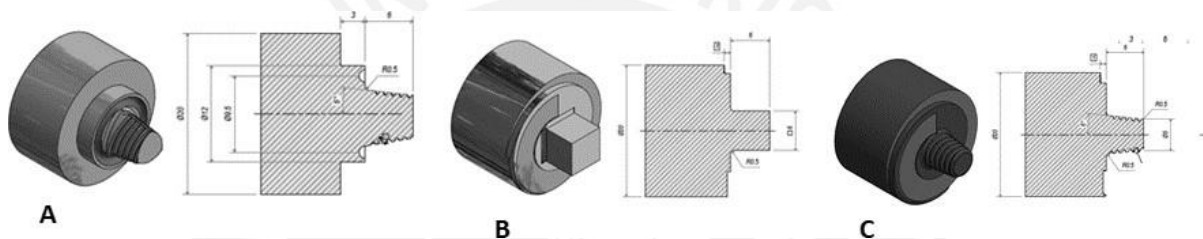


Figura 7. Diseño preliminar de pines A: MX-Trivex (MT) , B: Pin Cuadrado (C) , C: Cónico Roscado (CR), material acero herramienta AISI D3 – K100 BÖHLER, tratamiento térmico a 50 HRC.

Se soldaron cupones de 94 mm de longitud y 6.3 mm de espesor, de estas se extrajeron probetas para ensayos de tracción y dobles distribuidos según la Figura 8.

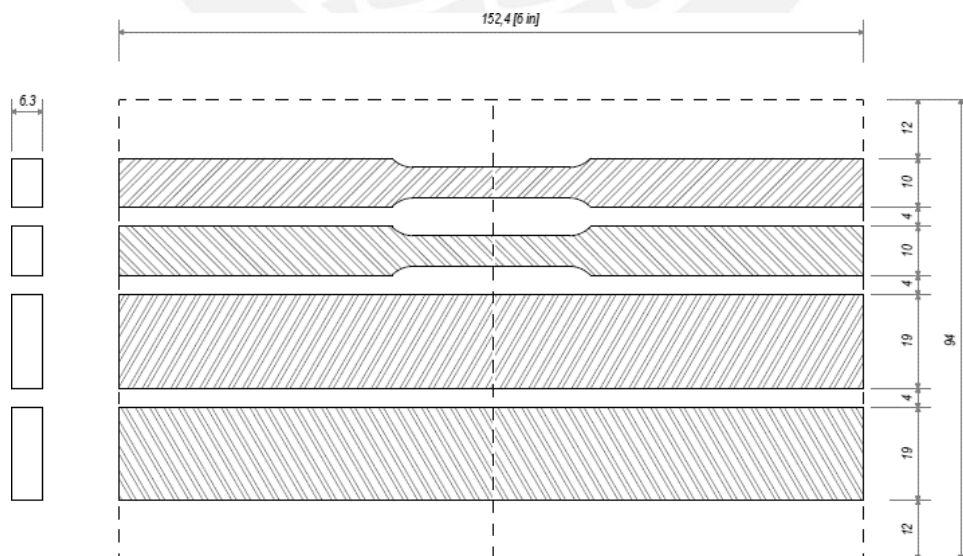


Figura 8. Distribución de cupón de soldadura formado por dos laminas soldadas de espesor variante de 6.2 mm- 6.3 mm. Ancho 94 mm y largo 76 mm

Tabla 2. Pruebas preliminares de identificación de rangos de sanidad.

# Prueba preliminar	Avance mm/min	RPM	Tipo de pin	Descripción corta	Diametro del hombro (mm)	Penetración del hombro (mm)	Giro de la herramienta	Espesor de placas (mm)
1	100	650	PIN CUADRADO	C-650/100	20	0.05	Horario	6.9
2	60	900	PIN CUADRADO	C-900/60	20	0.05	Horario	7.0
3	700	1000	CONICO ROSCADO	CR-1000/700	20	0.05	Horario	6.8
4	120	800	CONICO ROSCADO	CR-800/120	20	0.05	Horario	6.8
5	60	800	CONICO ROSCADO	CR-800/60	20	0.05	Horario	6.9
6	50	1200	CONICO ROSCADO	CR-1200/50	20	0.05	Horario	7.4
7	50	1400	CONICO ROSCADO	CR-1400/50	20	0.05	Horario	7.4
8	50	1800	CONICO ROSCADO	CR-1800/50	20	0.05	Horario	7.4
9	100	800	PIN CUADRADO	C-800/100	20	0.05	Horario	7.1
10	50	1400	PIN CUADRADO	C-1400/50	20	0.05	Horario	6.5
11	30	1200	PIN CUADRADO	C-1200/30	20	0.05	Horario	6.5
12	75	2400	PIN CUADRADO	C-2400/75	20	0.05	Horario	6.5
13	700	1400	CONICO ROSCADO	CR-1400/700	20	0.05	Horario	6.8
14	50	800	CONICO ROSCADO	CR-800/50	20	0.05	Horario	5.7
15	60	600	CONICO ROSCADO	CR-600/60	20	0.05	Horario	5.7
16	40	800	CONICO ROSCADO	CR-800/40	20	0.05	Horario	5.7
17	40	800	CONICO ROSCADO	CR-800/40	20	0	Horario	5.7
18	40	800	CONICO ROSCADO	CR-800/40	20	0.25	Anti Horario	5.7
19	40	800	CONICO ROSCADO	CR-800/40	20	0.25	Horario	5.7
20	40	1800	MX TRIVEX	MT-1400/700	20	0.25	Horario	6.3
21	40	800	PIN CUADRADO	C-800/40	20	0.25	Horario	6.3
22	40	800	PIN CUADRADO	C-800/40	20	0.25	Horario	6.3
23	40	1700	PIN CUADRADO	C-1700/40	20	0.25	Horario	6.3
24	40	800	MX TRIVEX	MT-800/40	20	0.25	Horario	6.3
25	40	800	MX TRIVEX	MT-800/40	20	0.25	Anti Horario	6.3
26	40	800	MX TRIVEX	MT-800/40	20	0.25	Anti Horario	6.3
27	40	800	MX TRIVEX	MT-800/40	20	0.25	Horario	6.3
28	40	300	MX TRIVEX	MT-300/40	20	0.25	Horario	6.3
29	40	300	MX TRIVEX	MT-300/40	20	0.25	Horario	6.3
30	40	800	PIN CUADRADO	C-800/40	20	0.25	Horario	6.3
31	40	1800	PIN CUADRADO	C-1800/40	20	0.25	Horario	6.3
32	40	1800	MX TRIVEX	MT-1800/40	12	0.25	Horario	6.4
33	40	2000	MX TRIVEX	MT-2000/40	12	0.25	Horario	6.4
34	30	2000	MX TRIVEX	MT-2000/30	12	0.25	Horario	6.4
35	20	2000	MX TRIVEX	MT-2000/20	12	0.25	Horario	6.4
36	40	1800	MX TRIVEX	MT-1800/40	12	0.25	Anti Horario	6.3
37	40	2000	MX TRIVEX	MT-2000/40	12	0.25	Horario	6.3
38	40	1800	MX TRIVEX	MT-1800/40	12	0.25	Horario	6.3
39	40	1600	CONICO ROSCADO	CR-1600/40	20	0.25	Horario	6.3
40	40	1800	CONICO ROSCADO	CR-1800/40	20	0.25	Horario	6.3
41	40	1800	CONICO ROSCADO	CR-1800/40	12	0.25	Horario	6.3

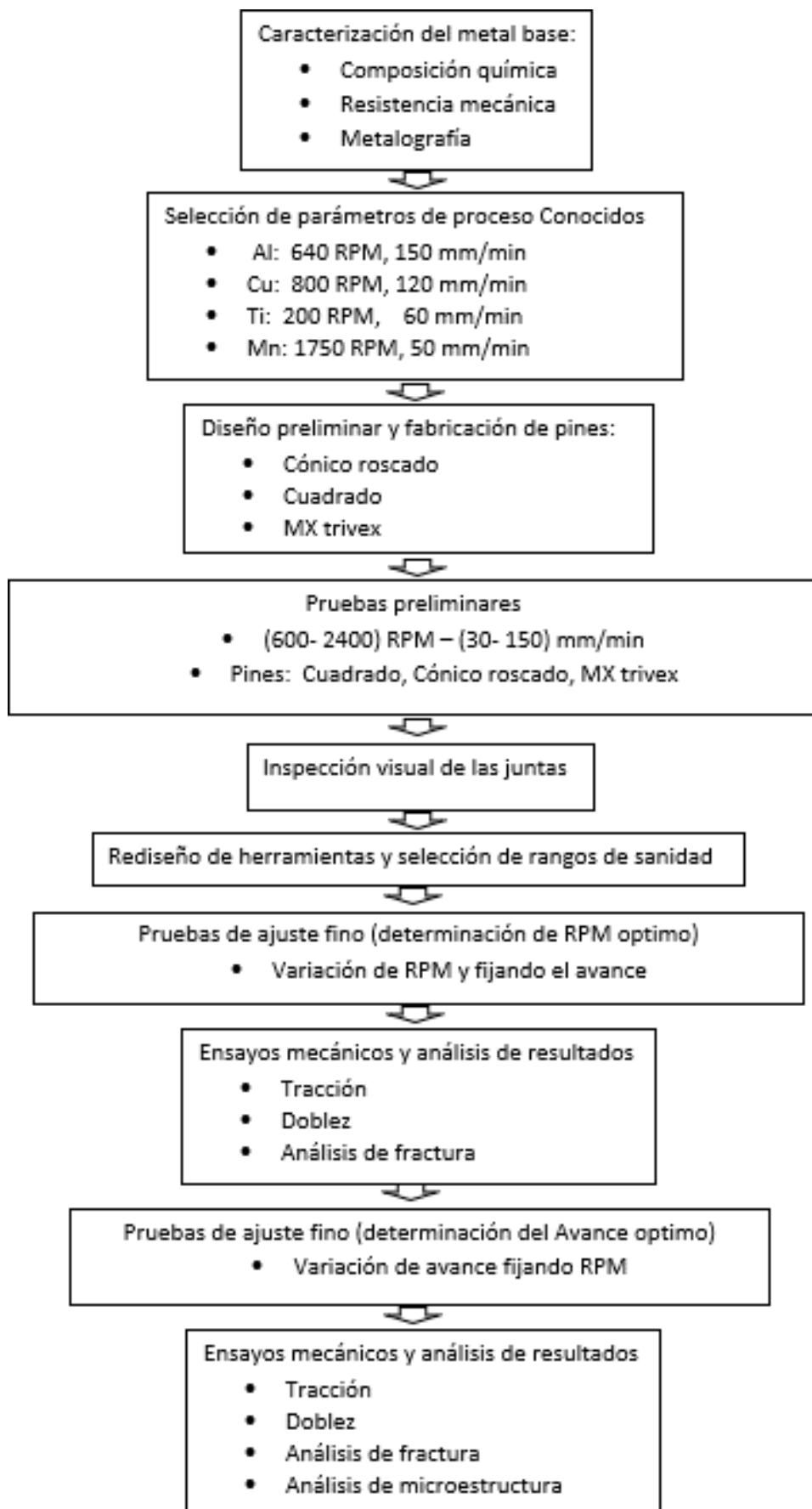


Figura 9. Flujo grama del proceso de investigación

4. Resultados y discusión.

4.1. Caracterización del material base.

A continuación se presentan los resultados del ensayo de absorción atómica [28], y del ensayo de tracción [35].

Tabla 3. Composición química y esfuerzo de tracción del metal base.

Pb	Sn	Sb	Bi	Cu	As	Esfuerzo de tracción
98,08%	1,87%	0,100%	0,015%	0,012%	0,0028%	56.28 MPa

La micro estructura de la aleación Pb-Sb-Sn (Figura 10), muestra una estructura de granos gruesos esto debido a la baja velocidad de nucleación que presenta el plomo y es congruente con la micro estructura de una aleación que no cuenta con la concentración suficiente para generar una estructura dendrítica uniforme rodeada de eutécticos que se puede alcanzar con un 26.1% de Sn o para el Pb-Sb se forma con solución de 11.2% de Sb, MAO, G.W [36][28] por ello al solo contar con 1,8%Sn y 0,1% Sb, la formación de eutécticos, aciculares solo se evidencia en los límites de grano (Figura 10B) como los descrito por para los diagramas ternarios de Pb-Sb-Sn. Por MAO, G.W (Figura 11)

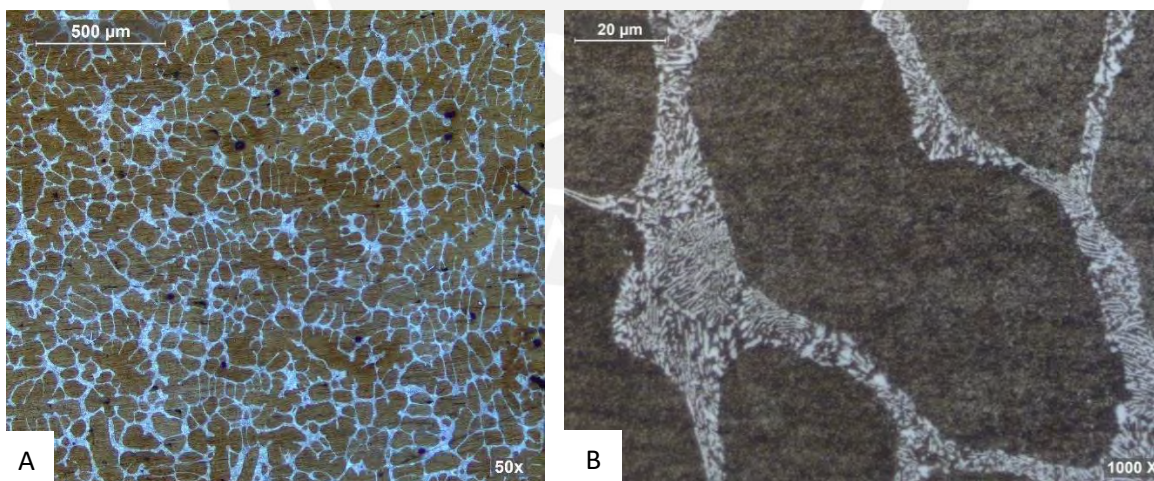


Figura 10. Metalografía de aleación 98% Pb, 1.8% Sn, 0.10% Sb. A: 50X, B: 1000X.

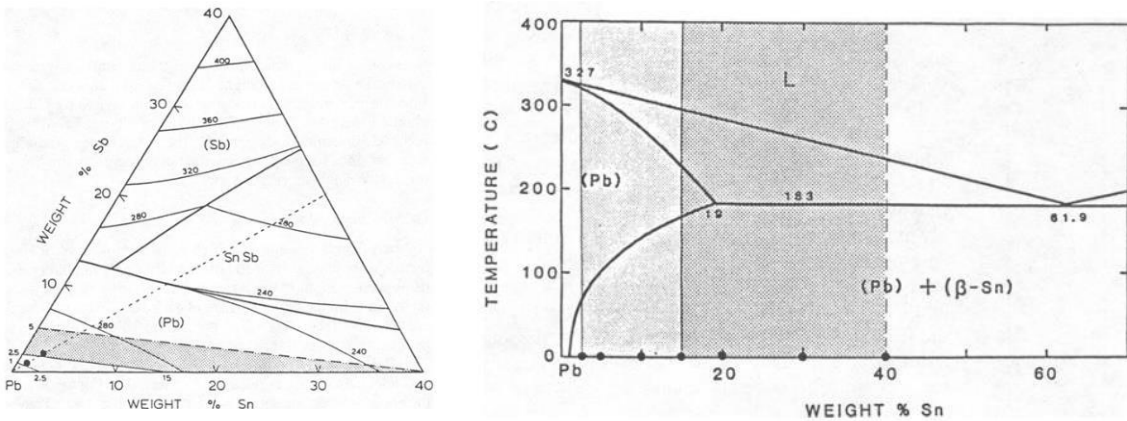


Figura 11. A) diagrama terciario Pb-Sn-Sb B) Diagrama binario Pb-Sn [28]

4.2. Inspección visual de la junta en pruebas preliminares.

4.2.1. Pin cuadrado.

En las pruebas realizadas con el pin de perfil cuadrado, en el rango de velocidad de rotación entre los 500 RPM y 1200 RPM se observó una apariencia de láminas entrelazada al interior de la junta C-650/50 y C-1200/50 (figura 12), sin evidencia de batido al interior de la misma, al generar variaciones de RPM entre los 1600 y 2400 con C-1600/50 y C-2000/50 (figuras 12) se observó que estos incrementos generaron una mayor deformación al interior del cordón pero el calor total generado no fue suficiente para obtener batido [37], aun cuando el hombro de la herramienta alcanza a batir la superficie en contacto con la herramienta C-1600/50 (figura 13), no se alcanzó el batido característico del FSW.

Al comparar los resultados de los ensayos con C-2000/50 y C-2400/75 (figura 12), se observó que el perfil de las láminas entrelazados presentan gran similitud, los parámetros de proceso con los que se obtuvieron los resultados de la C-2400/75 (figura 12), tienen una relación velocidad de rotación/Avance lineal de 32, mientras que los parámetros de la C-2000/50 (figura 12) cuentan con una relación de 40, esto muestra que el efecto de calentamiento por incremento de la RPM y enfriamiento por incremento del avance lineal mantiene una relación en la cual cambios de bajas magnitudes en el avance lineal, son equiparados con cambios de gran magnitud en las RPM del proceso.

El calor generado y el flujo de material observado durante estas pruebas (Figuras 12-13) con el pin cuadrado, evidencian que el movimiento pulsante [16] y el calor

sectorizado en la zona cercana al hombro, genera un deficiente movimiento del material hacia la zona inferior de la junta y no proporciona un direccionamiento del calor hacia el interior de la unión lo cual sumado a la baja conductividad térmica [19][38][39] del plomo ocasionan que no se obtenga el batido característico de FSW, razón por la cual se descartó el uso de perfil cuadrado en esta etapa preliminar de pruebas.

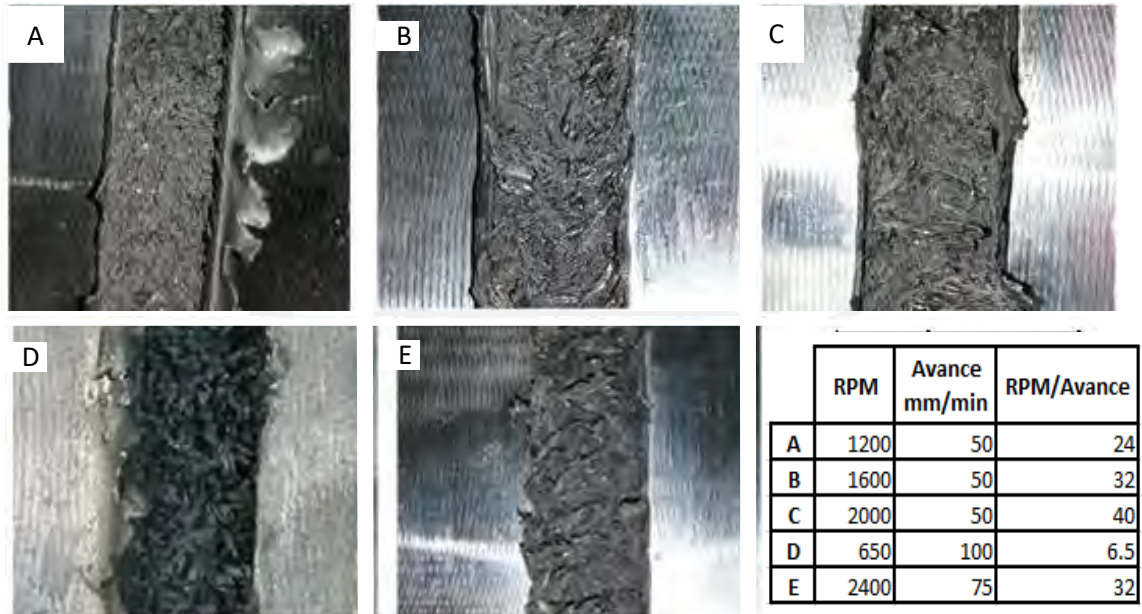


Figura 12. Pruebas preliminares con pin cuadrado (C) , inspección raíz, forma de enlazado de láminas al interior de la junta.

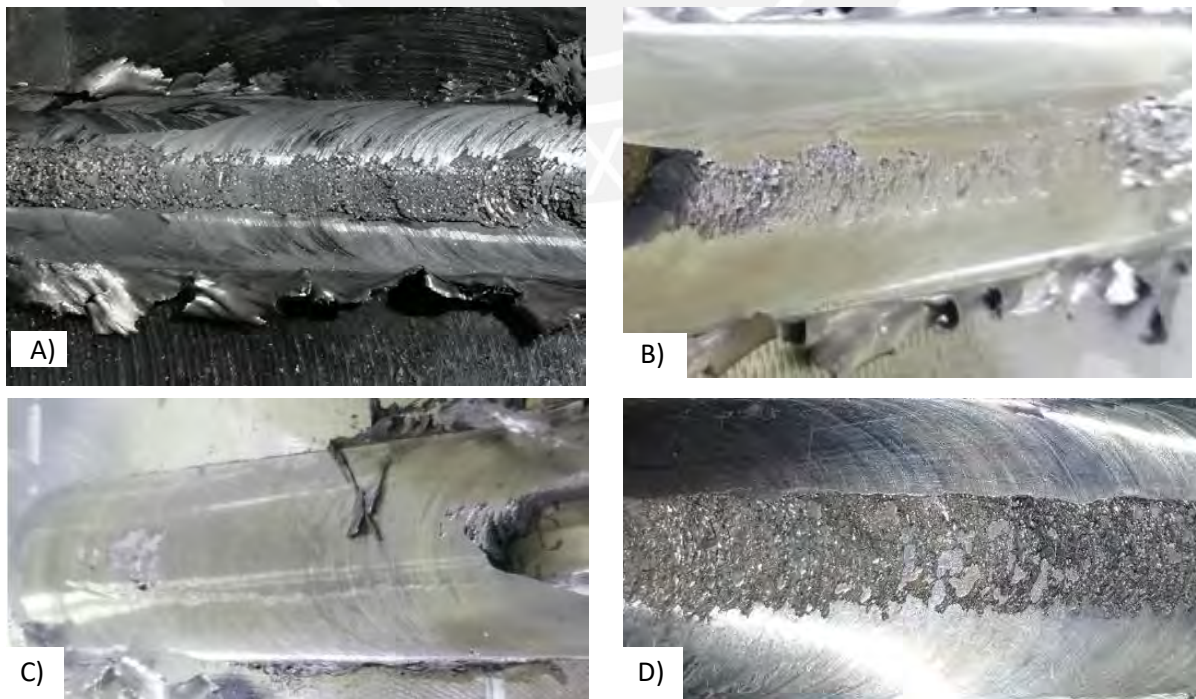




Figura 13. Pruebas preliminares con pin cuadrado inspección superficial de la junta A) C-600/100. B) C-1200/50. C) C-1600/50. D) C-2400/75. E) C-2000/50.

4.2.2. Pin Cónico roscado.

Con el perfil cónico roscado se pudo obtener sanidad superficial con parámetros de soldeo de: Velocidad de rotación entre 1700 RPM - 2000 Rpm y avance lineal de 40 mm min^{-1} .

Al realizar un cambio en el diseño preliminar del hombro de la herramienta variando el diámetro del hombro (DH) de 20 a 12 mm, se redujo significativamente el “excess flash” (Figura 14) al minimizar el área de contacto y con ello la generación de calor en la superficie de contacto [40], esto al igual que para el Titanio en el cual tomando en cuenta su baja conductividad térmica se tiene que usar una relación DH:DP (Diámetro de Pin) inferiores a las 2.5:1 al igual que para materiales con conductividad térmica inferiores a las del aluminio [8].

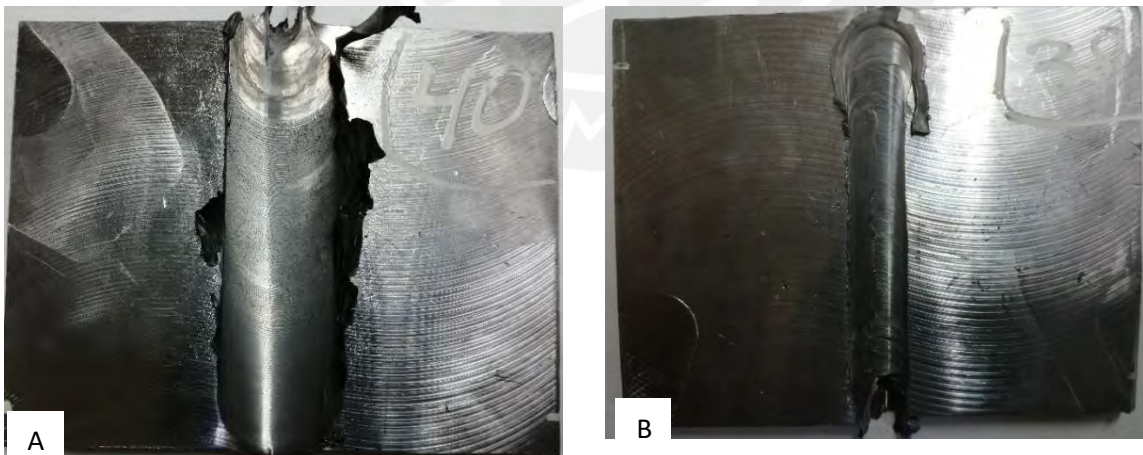


Figura 14. A) Prueba preliminar # 40: CR-1800/40 hombro de 20 mm de diámetro, B) Prueba preliminar # 38: MT-2000/40 hombro de 12 mm (Tabla2).

4.2.3. Pin MX trivex.

Las pruebas de soldeo preliminares con el pin Mx trivex mostraron sanidad superficial en los siguientes rangos de operación: Velocidad de rotación ente

1800 RPM y 2000 RPM y Avance lineal de la herramienta de alrededor de los 40 mm min⁻¹, por lo cual se tomó este punto inicial para realizar análisis de microestructura y variación fina de los parámetros de soldeo.

Los resultados de las pruebas preliminares ejecutadas con pines Cónico roscado y MX trivex, evidencian un estrecho rango de parámetros de proceso para esta aleación (fundición de plomo), en los cuales se puede obtener sanidad superficial (Tabla 4) al igual que con las fundiciones de Magnesio AZ91D [18].



Tabla 4. Resultado de inspección visual de pruebas preliminares (MT) y (CR).

#	Descripción corta	Inspeccion visual	OK
3	CR-1000/700	Batido grueso solo a un lado de la junta, se evidencia socavación lateral del otro lado a través de todo el espesor del material.	No
4	CR-800/120	Batido fino sectorizado, cerca de la línea media del cordón, no existe raíz.	No
5	CR-800/60	Unión parcial, 3.5 mm de profundidad de batido y unión, no existe raíz.	No
6	CR-1200/50	Batido total, sobre monta inferior en raíz, el batido del material presenta formación grumosa de espesor grueso sin fusión.	No
7	CR-1400/50	Batido total, sobre monta inferior en raíz, el batido del material presenta formación grumosa de espeso mas fino que el CR-1200/50 pero sin fusión.	No
8	CR-1800/50	Batido total, sobre monta inferior en raíz, el batido del material es menos grumoso que el CR-1400/50 presenta aparente fusión.	Si
13	CR-1400/700	Evidencia corte del material y zona de fusión y batido en una de las piernas del cordón.	No
14	CR-800/50	Evidencia corte del material, material base se adhirió a la superficie de la herramienta.	No
15	CR-600/60	No se evidencia batido, mal acabado el pin corto el material, evidencia adhesión de material base en la superficie del pin	No
16	CR-800/40	No se evidencia batido, mal acabado, el pin corto el material, evidencia adhesión de material base en la superficie del pin.	No
17	CR-800/40	El giro horario de la Herramienta unida con un hélice derecha en pin y cara de hombro género que el material de la junta se desplazara a la parte superior sacándolo de la junta en forma de hilos de plomo.	No
18	CR-800/40	El giro de la Herramienta antihorario-combinada con una hélice derecha en pin y hombro genera que el material de la junta se mueva hacia la parte de la raíz del cordón dejando un túnel en la zona de batido y con una sobre monta excesiva en la raíz del cordón.	No
19	CR-800/40	El giro de la Herramienta antihorario-combinada con una hélice en pin derecha y el hombro con hélice Izquierda, genera que el material de la junta se mueva hacia la parte de la raíz del cordón y un excess flash en a la superficie de la junta.	No
20	MT-1400/700	No se evidencia batido, mal acabado pin corto el material.	No
24	MT-800/40	Evidencia batido en el material, parte del material de la junta sale de esta en forma de extrusión laminar, la configuración genero un movimiento a los extremos superficie interna y externa.	No
25	MT-800/40	Evidencia socavación en el material, parte del material de la junta sale de esta en forma de hilos extruidos.	No
26	MT-800/40	Evidencia socavación profunda en el material, gran parte del material de la junta sale de esta en forma de hilo a la superficie, probablemente por el efecto de la espiral del hombro, la sobre monta en la raíz poco pronunciada.	No
27	MT-800/40	Se corta la parte superior del material, se genera una sobre monta en la zoan de raiz mucho mas pronunceada que la de la prueba 27, todo el material se posiciona en esa zona, no hay excess flash en la superficie de la junta.	No
28	MT-300/40	Se inicia prueba con pin rotando fuera del material, evidencia socavación y falta de llenado debido a la perdida de material en zona de inicio de proceso, el material base fue removido de la junta, mejorar la recolección del material en la hélice.	No
29	MT-300/40	Inicio dentro del material, junta más homogénea no se pierde material, el material se mueve más a una zona lado derecho en sentido del movimiento, mejorar la recolección del material en la hélice.	Si
32	MT-1800/40	Soldado con respaldo de raíz, evidencia batido, presenta buena fusion en la raíz.	Si
33	MT-2000/40	Soldado con respaldo de raíz, evidencia batido, presenta mejor fusión en la raíz.	Si
34	MT-2000/30	Soldado con respaldo de raíz, evidencia batido pero no evidencia buena fusión en la raíz.	No
35	MT-2000/20	Soldado con respaldo de raíz, evidencia batido y mejor fusión en la raíz.	Si
36	MT-1800/40	Giro antihorario del pin, evidencia una batido no uniforme y socavación en la línea central, en la zona de inicio de soldado el material se salió de la junta.	No
37	MT-1800/40	Giro horario del pin, evidencia un batido uniforme sin socavación y zona de inicio sin pérdida de material, (la prueba 37 cuenta con mejor acabado).	Si
38	MT-2000/40	Evidencia un muy buen acabado.	Si
39	CR-1600/40	Muy buen acabado superficial, pero inspección lateral muestra un túnel al interior de la junta.	Si
40	CR-1800/40	Acabado superficial aceptable, pero con túnel al interior de la juna.	Si
41	CR-1800/40	Acabado superficial aceptable, pero con túnel al interior de la juna.	Si

4.3. Defectos en proceso.

Durante los ensayos metalográficos se tomaron muestras para análisis de los extremos de los cupones soldados, en puntos ubicados a 80 mm del punto de inicio del proceso (figura 15A), en ellos se observó que, en las 3 probetas de ensayos finales utilizando parámetros de soldeo dentro de los rangos de sanidad superficial, se generaron porosidades agrupadas (figura 15) al interior de la junta por encima de la línea media de soldadura, al revisar el pin se observó material adherido a la herramienta (figura 15B).

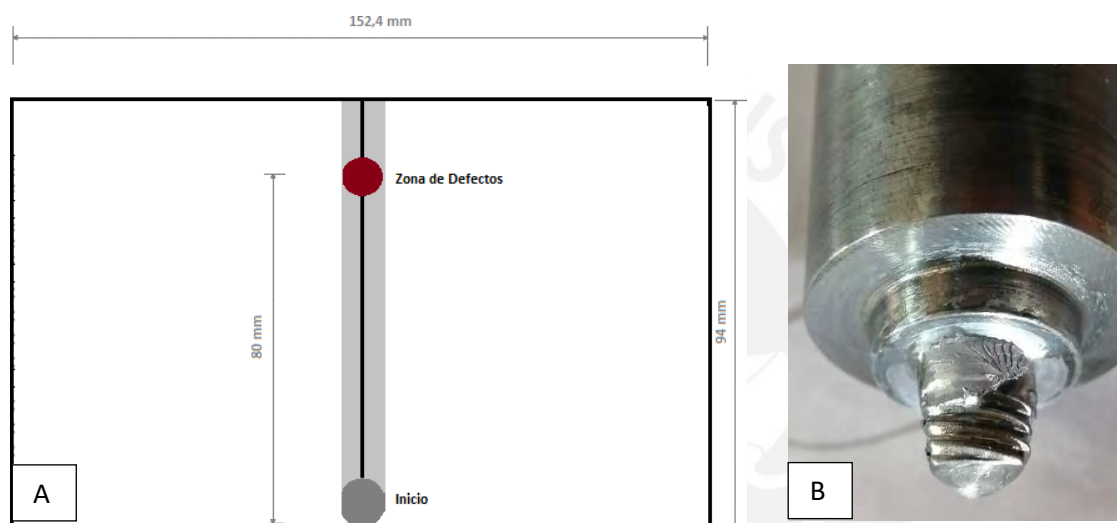


Figura 15. A) Esquema de zona de defectos vista superficial del cordón de soldadura B) . Pin MX trivex Posterior soldeo longitud de 95 mm a 1800 RPM x 40 mm/min.

La porosidad en la zona central de la soldadura se debe en la mayoría de los casos a inadecuado flujo de calor de aporte, así como un proceso de deformación plástica insuficiente bajo el cual no se permite el flujo adecuado del material y se generan vacíos al interior de la junta.

La adhesión de material en el pin ocurrió en la zona de la mitad cercana al hombro de la herramienta (ver figura 15B). En los procesos de FSW la zona superior a la línea media del cordón, cerca de la superficie de contacto con el hombro, es la zona de mayor temperatura, por ende, al generar un incremento de RPM se obtiene un mayor input térmico, que sumado a la baja conductividad térmica del plomo, ocasionó un sobrecalentamiento en el pin posterior a 80 mm de soldeo, debido a esta adhesión por sobrecalentamiento del pin, se generó la

perdida parcial del perfil de la rosca de la herramienta, ocasionado cambios en el flujo al interior de la junta y con ellos zonas con insuficiente deformación plástica y un flujo inadecuado de material [23] y con ello defectos al interior de la junta (Figura 16).

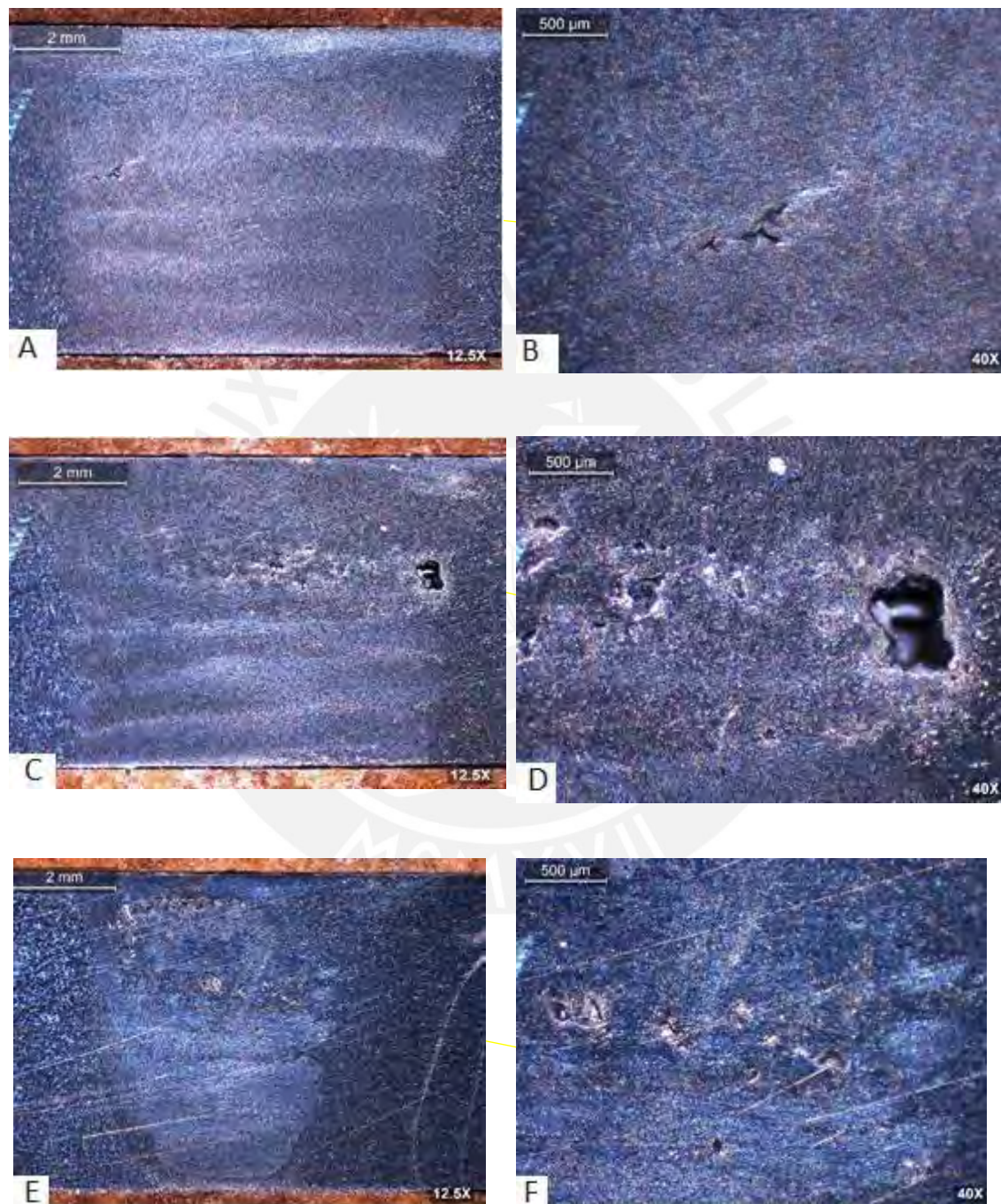


Figura 16. Macrografía muestras de defectos en zona soldada ejecutadas con pin Mx Trivex A-B : probeta soldada 1850/40, C-D: probeta soldada 1900/40, E-F: probeta soldada 1950/40.

4.4. Pruebas de afino de parámetros dentro del rango de sanidad

Debido a que, durante las pruebas preliminares, utilizando un avance lineal de 40 mm min^{-1} se obtuvieron juntas aparentemente sanas, se iniciaron las pruebas de afino de parámetros fijando el avance lineal en 40 mm min^{-1} y ensayando valores de velocidad de giro, en el rango de 1700 RPM a 2000 RPM con lo cual se generó la figura 17, evidenciándose un comportamiento de mayor resistencia promedio con el juego de parámetros de 1850 RPM para los pines Cónico roscado y MX Trivex.

Se realiza un comparativo de la eficiencia de la junta tomando como patrón de referencia el valor de resistencia máxima obtenido durante el ensayo del material base (56.28 MPa)

Tabla 5. Resultados de resistencia promedio a la tracción y la eficiencia de la junta con avance constante.

	Resistencia tracción MPa	Eficiencia %
MT-1800/40	42.8	76%
MT-1850/40	43.9	78%
MT-1900/40	43.3	77%
MT-1950/40	41.7	74%
MT-2000/40	41.0	73%
CR-1700/40	32.3	57%
CR-1850/40	35.5	63%
CR-2000/40	32.5	58%

Nota: Pruebas realizadas con avance lineal fijo a 40 mm/min para los pines cónico roscado (CR), Y Pin MX Trivex (MT) giro Izquierdo, inclinación de pin de 0° , penetración del hombro 0.20 mm y diámetro de

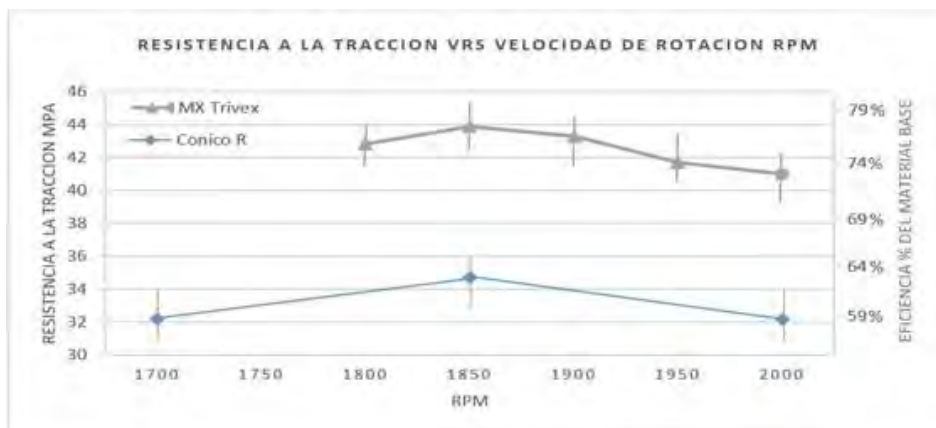


Figura 17. Variación de la resistencia máxima en función de la velocidad de giro para los pines cónico roscado (CR) [8], Y Pin MX Trivex (MT) con un avance lineal de 40 mm/min , giro Izquierdo, inclinación de pin de 0° , penetración del hombro 0.20 mm y diámetro

Debido a los defectos internos en las juntas soldadas con pin cónico roscado, se seleccionó el pin MX trivex como mejor opción y con éste se ensayaron las velocidades de 1850 y 1900 RPM que evidenciaron los valores de resistencia máximas, se continuó el proceso de optimización de parámetros ensayando parámetros de avance lineal de la herramienta superiores e inferiores a los 40 mm min⁻¹ (50 y 30 mm min⁻¹) (Figura 18) (Tabla 5).

Tabla 6. Resultados de resistencia promedio a la tracción y la eficiencia de la junta en pruebas de soldeo con avance variable-

	Resistencia tracción MPa	Eficiencia %
MT-1850/30	40.5	71.9%
MT-1850/40	43.9	78.0%
MT-1850/50	43.1	76,5%
MT-1900/30	39.7	70.5%
MT-1900/40	43.3	76.9%
MT-1900/50	40.8	72.4%

Nota: Pruebas realizadas con variaciones de avance lineal y RPM en valores de 1850 y 1900 con MX Trivex giro Izquierdo, inclinación de pin de 0°, penetración del hombro 0.20 mm y diámetro de hombro de 12 mm.

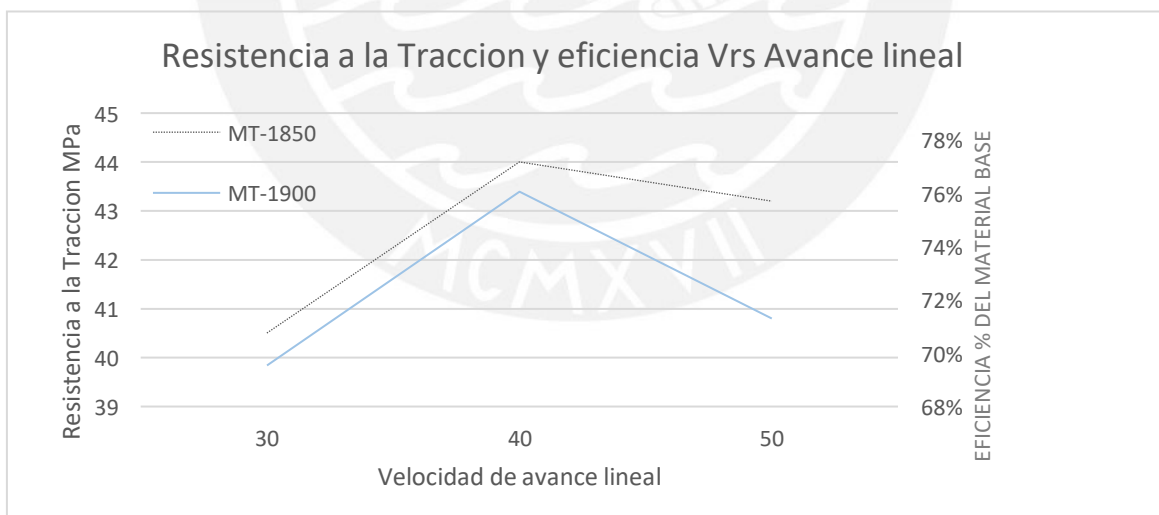


Figura 18. Resistencia a la tracción promedio de pruebas finales fijando RPM en 1850 y 1900 y variando avance lineal por encima y por debajo de 40 mm/min, giro Izquierdo, inclinación del pin de 0° [8] penetración del hombro 0.20 mm diámetro del hombro 12 mm.

4.5. Resistencia a la tracción y análisis de superficie de fractura ensayada.

4.5.1. Pin cónico.

Con el perfil cónico roscado, se observó que en todos los casos donde se alcanzó sanidad superficial, existía un agujero de gusano al interior de la junta, de aproximadamente 1.5 mm en la zona de agitación cerca de la parte inferior de la raíz, esto se evidenció para los juegos de parámetros manteniendo el avance lineal de la herramienta en 40 mm min^{-1} y utilizando la relación de RPM/Avance: 2.5, 46.5 y 50 (Figura 19), en todos los casos se generó el mismo tipo de defecto con dimensiones similares en la totalidad del espesor de la junta ensayada, lo que actuó como concentrador de esfuerzo y zona de inicio de fractura de la probeta. Estos defectos están relacionados con la alteración del flujo del material plastificado de la zona de agitación debajo del hombro, que no permiten mantener una penetración constante mejorando el flujo de material, por consiguiente no se obtuvo un adecuado llenado de las cavidades internas de la unión [3][12][33].

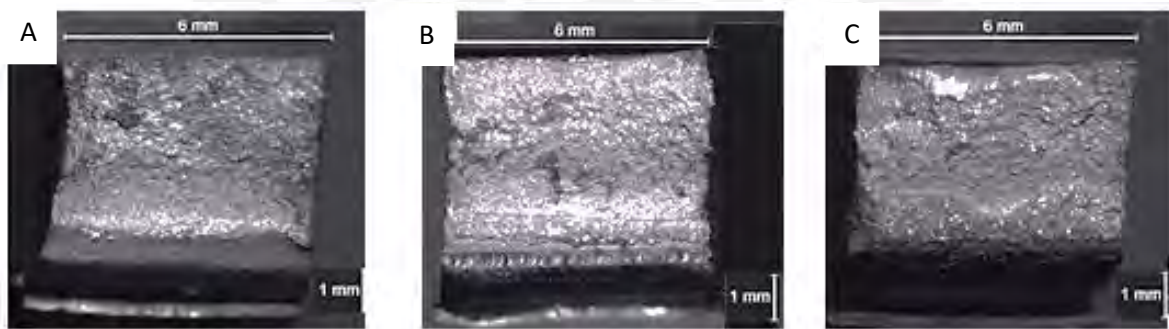


Figura 19. Zonas de fractura de piezas soldadas con pin cónico roscado, 6x6 R1 Etapa 1. A: CR-1700/40 B: CR-1850/40 C: CR-2000/40.

La existencia de discontinuidades al interior de la junta equivalentes a la pérdida de un área resistente del 16%, generó como resultado que para las pruebas ejecutadas con el pin cónico roscado, se alcanzara un valor máximo de eficiencia de la junta de 63%, en este rango de parámetros utilizados se observa un comportamiento de crecimiento de la resistencia de la junta con la velocidad de rotación de la herramienta, al igual que pasa para algunas aleaciones fundidas de Mg [8]. (Figura 18).

4.5.2. Pin MX trivex.

Las pruebas de soldeo dentro de los parámetros de sanidad de la junta específicamente en 1850 Rpm y 40 mm min^{-1} mostraron valores de fluencia promedio de 33 MPa y una eficiencia máxima del 78%, lo cual es aceptable debido a que estos valores superan en gran proporción los requerimientos mecánicos que tiene un ánodo para este tipo de procesos electrolíticos (33 MPa ver tabla 6), por otro lado como punto de referencia para esta primera aproximación al afino de parámetros de proceso se tiene como referente el rango de eficiencias alcanzadas con algunas aleaciones de aluminio tratables térmicamente donde se alcanzan eficiencias del 65% a 96%. [8][16].

Para el rango de parámetros de sanidad superficial se evidencia que la resistencia de la junta tiene un comportamiento de crecimiento con la velocidad de giro hasta alcanzar su punto más alto en 1850 RPM, valor a partir del cual empieza su descenso al incrementar la velocidad de giro (ver figura 16), comportamiento observado en algunas aleaciones de Mg [8][5][41][17] y las aleación AA2524 [16] adicional a esto se observó que en dicho rango de parámetros, la velocidad de soldeo tiene un efecto similar al generar un incremento de la resistencia con pico máximo en los 40 mm/min y a partir de ese valor inicia un proceso de reducción de la resistencia con el incremento del avance lineal condición parecida al comportamiento de los aceros bajo carbono y algunas aleaciones de Mg [5][17] (ver figura 18) .

Al comparar las superficies de fractura, se observa una fractura frágil con una reducción de área inferior al 16% en el material base (Figura 20A), mientras que en las probetas soldadas con pin MX-Trivex, se evidencia un patrón de fractura más escarpado con irrigaciones y deformación visibles propias de una fractura dúctil, las cuales pudieron alcanzar valores de reducción de área de hasta un 50% (figura 20B).

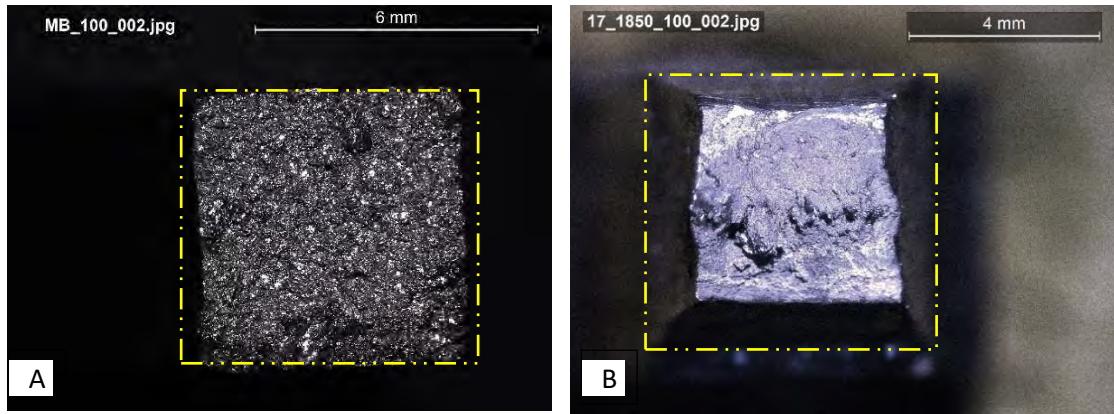


Figura 20. A) Macrografía 10X, zona de fractura probeta a tracción Material base, B) Macrografía 10X, zona de fractura probeta a tracción #17 (MT-1850/ 40).

4.6. Metalografía y análisis microestructural.

La imagen unificada (Figura 21) de las probetas MT-1850/40 evidencia las 3 zonas características de un proceso FSW, la zona del material base (BM), una zona de material termo mecánicamente afectado (TMAZ) y una zona de batido (SZ) evidenciando los cambios dimensionales y de forma de grano característicos del proceso.

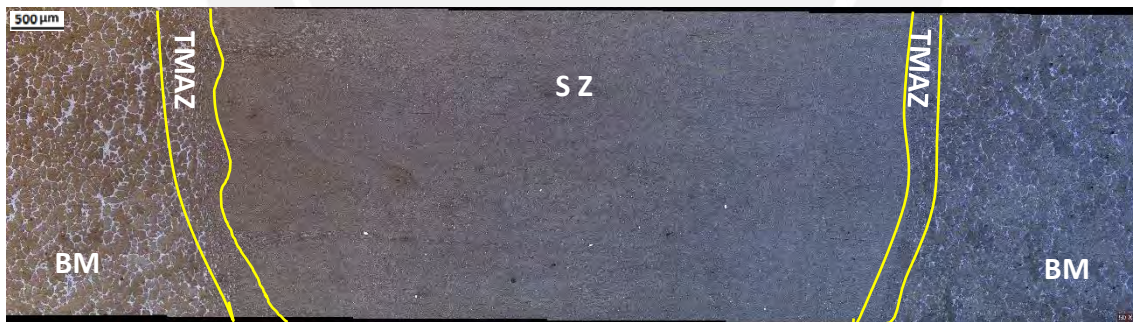


Figura 21. Micrografía compuesta material base (BM), zona termo-mecánicamente afectada (TMAZ), zona de agitación (SZ) probeta soldada a 1850 RPM x 40 mm/min con pin Mx trivex.

Al comparar la microestructura desde el material base hasta la SZ en las figuras 21 y 22 es evidente que existe un refinamiento de grano al igual que pasa para las aleaciones de magnesio [42][6]. Al fijar el avance lineal se observó modificaciones en el tamaño de la TMAZ, al incrementar las RPM de 1800 a 1950 se observó una reducción en el tamaño de la TMAZ (Figura 23) esto generado por el incremento del input térmico.

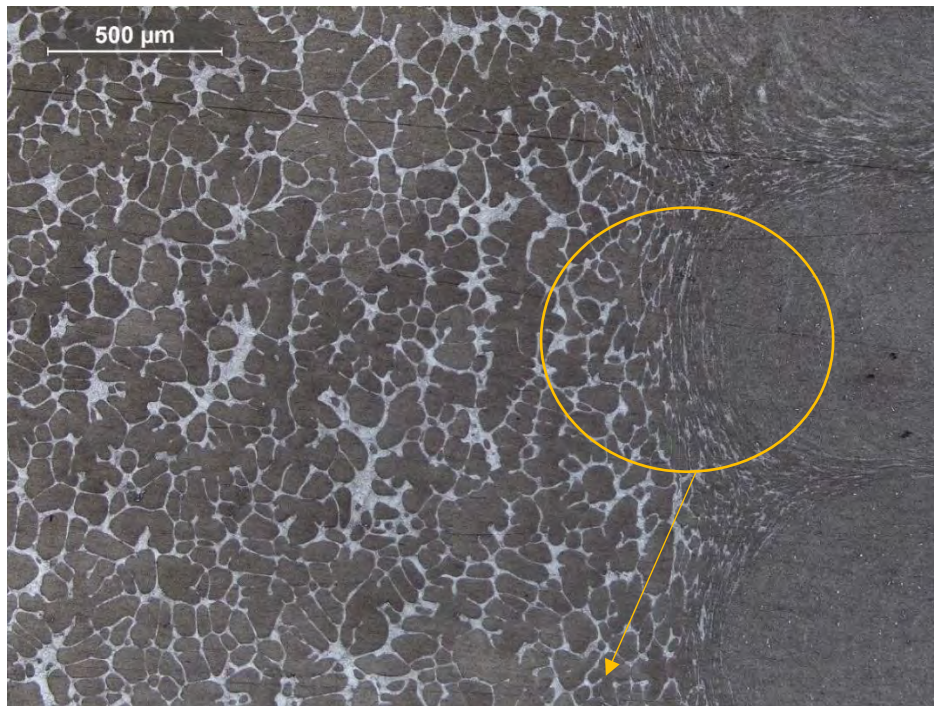


Figura 22. Material base (BM), zona termo-mecánicamente afectada (TMAZ), zona de agitación (SZ) probeta soldada a 1850 RPM x 40 mm/min con pin Mx trivex.

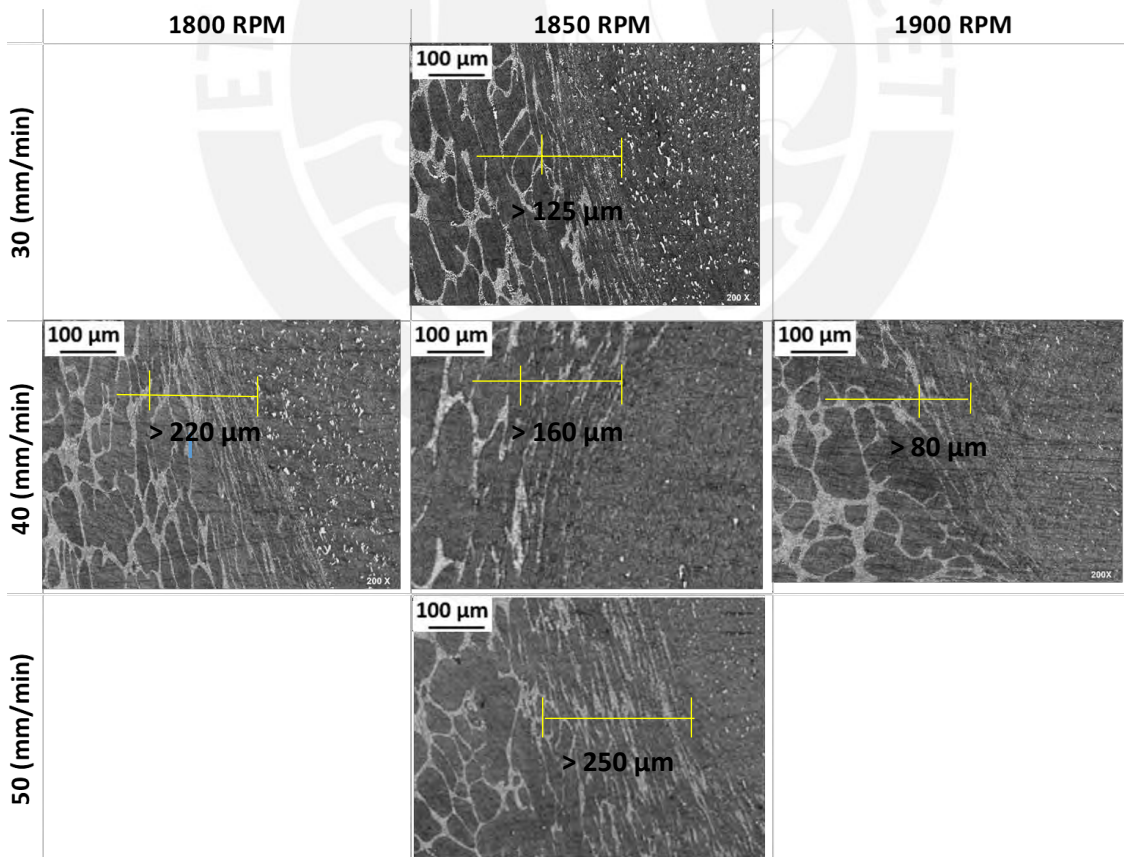


Figura 23. Micrografía tomada en microscopio óptico transición de TAZ-TMAZ-STIR ZONE soldaduras ejecutadas con pin Mx trivex.

La zona de batido (SZ) de las uniones soldadas con el MX trivex (figura 24), evidencian una variación en la microestructura, presentando un afino de grano y un grado de recristalización más uniforme con el juego de parámetros de MT-1850/40. A diferencia de las aleaciones de Magnesio [42][41] y cobre [5] en las cuales debido al incremento del input térmico se evidencian variaciones del tamaño de grano en la SZ, en esta aleación de plomo no se evidencia un claro patrón de crecimiento de grano con las variaciones de RPM y avance, dentro del rango de analizado.

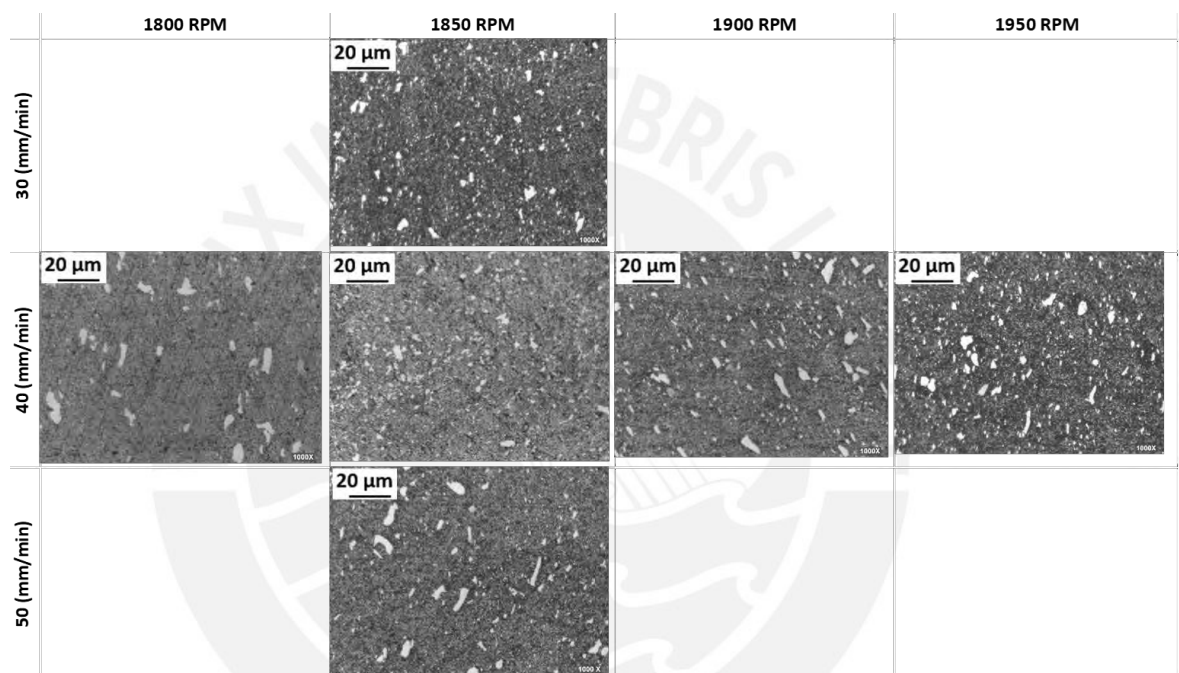


Figura 24. Micrografía tomada en microscopio óptico en la STIR ZONE, soldaduras ejecutadas con pin Mx trivex.

5. Conclusiones.

Es posible adaptar el FSW para alcanzar uniones sanas con resistencia mecánica superior a 40 MPa (más del 70% de eficiencia) en la aleación 98% Pb, 1.8% Sn, 0.10% Sb.

La aleación de plomo estudiada, presenta un rango estrecho de parámetros, en el cual exhibe soldaduras sanas: velocidad de rotación (1700 RPM - 2000 RPM); avance lineal entre 30 y 50 mm/min dentro del cual la combinación de parámetros de soldeo de 1850 RPM y 40 mm/min de velocidad lineal, presentan los mayores valores de resistencia mecánica (44 MPa), muy por encima del requerimiento mínimo de los ánodos para procesos de recubrimiento electrolítico.

Debido a la baja conducción de calor de las aleaciones de plomo, su baja resistencia a la deformación, el pin que genera la mejor relación calor batido de los ensayados es el MX Trivex, los demás pines no alcanzan la relación calor batido suficiente para obtener juntas homogéneas y de resistencias superiores al 70% de la resistencia del metal base.

En el estrecho rango de parámetros de sanidad, esta aleación tiene un comportamiento de crecimiento de la resistencia mecánica conforme aumenta la velocidad de rotación hasta alcanzar su punto más alto (1850 RPM) para luego disminuir. Un comportamiento similar se presenta con el parámetro de avance lineal al generar un incremento de la resistencia mecánica alcanzando un pico máximo en 40 mm/min y a partir de ese punto, se genera una disminución de la resistencia mecánica al incrementar el avance lineal.

La aleación en estudio presenta un afino de grano al ser procesada por FSW el cual se rige por cambios en las RPM y velocidad de avance, al incrementar las RPM de 1800 a 1950 se genera una reducción en el tamaño de la TMAZ, mientras que la SZ no evidencia una tendencia definida ante cambios de la RPM y avance lineal dentro del rango de sanidad.

6. Recomendaciones para trabajos futuros.

Debido a la baja conducción de calor de las aleaciones de plomo, su baja resistencia a la deformación y la falta de literatura al respecto de los diseños de proceso y perfiles de herramientas que se ajusten a las características termo mecánicas de este material, se debe trabajar en futuras investigaciones en el desarrollo de herramientas con geometrías que optimicen el flujo de calor y materia, al interior de la junta, para poder conseguir soldaduras de mayor longitud y mayor resistencia en este tipo de aleaciones.



7. Referencias.

- [1] R. E. LANE, "The care of the lead worker.," *Br. J. Ind. Med.*, vol. 6, no. 3, pp. 125–143, 1949.
- [2] P. A Poma, "Intoxicación por plomo en humanos," *An. la Fac. Med.*, vol. 69, no. 2, p. 120, 2013, doi: 10.15381/anales.v69i2.1155.
- [3] G. Çam and S. Mistikoglu, "Recent developments in friction stir welding of al-Alloys," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 6, pp. 1936–1953, 2014, doi: 10.1007/s11665-014-0968-x.
- [4] M. S. Sidhu and S. S. Chatha, "Friction Stir Welding – Process and its Variables : A Review," *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, 2012, [Online]. Available: <http://www.mendeley.com/research/friction-stir-welding-process-variables-review>.
- [5] S. Verma and J. P. Misra, "A Critical Review of Friction Stir Welding Process," pp. 249–266, 2015, doi: 10.2507/daaam.scibook.2015.22.
- [6] L. Yajie, Q. Fengming, L. Cuirong, and W. Zhisheng, "A review: Effect of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of magnesium alloys," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 12, 2017, doi: 10.3390/met7120524.
- [7] V. M. GRAU, *CROMADO DURO (La practica y aplicaciones del mismo)*, PRIMERA ED. BARCELONA, 1957.
- [8] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, Y. Sato, and Y. Hovanski, "Friction stir welding and processing VIII," *Frict. Stir Weld. Process. VIII*, vol. 50, pp. 1–300, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-48173-9.
- [9] K. M. Venkatesh, M. Arivarsu, M. Manikandan, and N. Arivazhagan, "Review on friction stir welding of steels," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 13227–13235, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.313.
- [10] R. S. Mishra and M. W. Mahoney, *Friction stir welding and processing*. 2007.
- [11] R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia, and T. DebRoy, "Review: friction stir welding tools," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 16, no. 4, pp. 325–342, 2011, doi: 10.1179/1362171811Y.0000000023.
- [12] A. Esmaeili, M. K. Besharati Givi, and H. R. Zareie Rajani, "Experimental investigation of material flow and welding defects in friction stir welding of aluminum to brass," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 27, no. 12, pp. 1402–1408, 2012, doi: 10.1080/10426914.2012.663239.
- [13] H. Mehdi and R. S. Mishra, "Influences of Process Parameter and Microstructural Studies in Friction Stir Welding of Different Alloys: A Review," *Int. J. Adv. Prod. Ind. Eng. IJAPIE-SI-MM*, vol. 509, pp. 55–62, 2017, [Online]. Available: www.ijapie.org.
- [14] R. Bauri and D. Yadav, "Introduction to Friction Stir Processing (FSP)," *Met. Matrix Compos. by Frict. Stir Process.*, pp. 17–29, 2017, doi: 10.1016/b978-0-12-813729-1.00002-4.
- [15] P. A. Colegrove and H. R. Shercliff, "Development of Trivex friction stir welding tool Part 2 – three-dimensional flow modelling," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 9, no. 4, pp. 352–361, 2004, doi: 10.1179/136217104225021661.
- [16] D. Trimble, G. E. O'Donnell, and J. Monaghan, "Characterisation of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of AA2024-T3," *J. Manuf. Process.*, vol. 17, pp. 141–150, 2015, doi: 10.1016/j.jmapro.2014.08.007.

- [17] K. Singh, G. Singh, and H. Singh, "Review on friction stir welding of magnesium alloys," *J. Magnes. Alloy.*, vol. 6, no. 4, pp. 399–416, 2018, doi: 10.1016/j.jma.2018.06.001.
- [18] G. Çam, "Friction stir welded structural materials: beyond Al-alloys," *Int. Mater. Rev.*, vol. 56, no. 1, pp. 1–48, 2011, doi: 10.1179/095066010x12777205875750.
- [19] C. C. Bidwell, "Thermal conductivity of metals," in *Physical Review*, vol. 58, no. 6, 1940, pp. 561–564.
- [20] K. Gangwar and M. Ramulu, "Friction stir welding of titanium alloys: A review," *Mater. Des.*, vol. 141, pp. 230–255, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.12.033.
- [21] F. C. Liu, Y. Hovanski, M. P. Miles, C. D. Sorensen, and T. W. Nelson, "A review of friction stir welding of steels: Tool, material flow, microstructure, and properties," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 39–57, 2018, doi: 10.1016/j.jmst.2017.10.024.
- [22] S. M. Bayazid, H. Farhangi, and A. Ghahramani, "Effect of Pin Profile on Defects of Friction Stir Welded 7075 Aluminum Alloy," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 11, pp. 12–16, 2015, doi: 10.1016/j.mspro.2015.11.013.
- [23] P. J. Ramulu, R. G. Narayanan, S. V. Kailas, and J. Reddy, "Internal defect and process parameter analysis during friction stir welding of Al 6061 sheets," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 9–12, pp. 1515–1528, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4276-z.
- [24] K. P. Mehta and V. J. Badheka, "Effects of Tool Pin Design on Formation of Defects in Dissimilar Friction Stir Welding," *Procedia Technol.*, vol. 23, no. April, pp. 513–518, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.03.057.
- [25] A. Ajri and Y. C. Shin, "Investigation on the Effects of Process Parameters on Defect Formation in Friction Stir Welded Samples Via Predictive Numerical Modeling and Experiments," *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 139, no. 11, 2017, doi: 10.1115/1.4037240.
- [26] H. Amini, N. Ab, and M. Hopour, "The Effect of the tool rotational speed , plunging speed and tool progressive speed on the Defects during Friction Stir Processing on AZ91," *Univ. Tehran*, no. February, p. 5, 2020, doi: 10.20944/preprints202002.0121.v1.
- [27] N. Z. Khan, A. N. Siddiquee, Z. A. Khan, and S. K. Shihab, "Investigations on tunneling and kissing bond defects in FSW joints for dissimilar aluminum alloys," *J. Alloys Compd.*, vol. 648, pp. 360–367, 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.06.246.
- [28] J. R. Sarazin and A. Hellawell, "Channel formation in Pb-Sn, Pb-Sb, and Pb-Sn-Sb alloy ingots and comparison with the system NH₄Cl-H₂O," *Metall. Trans. A*, vol. 19, no. 7, pp. 1861–1871, 1988, doi: 10.1007/BF02645156.
- [29] S. Mironov, T. Onuma, Y. S. Sato, S. Yoneyama, and H. Kokawa, "Tensile behavior of friction-stir welded AZ31 magnesium alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 679, no. July 2016, pp. 272–281, 2017, doi: 10.1016/j.msea.2016.10.036.
- [30] D. Yadav and R. Bauri, "Effect of friction stir processing on microstructure and mechanical properties of aluminium," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 539, pp. 85–92, 2012, doi: 10.1016/j.msea.2012.01.055.
- [31] J. Q. Su, T. W. Nelson, T. R. McNelley, and R. S. Mishra, "Development of nanocrystalline structure in Cu during friction stir processing (FSP)," *Mater.*

- Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 16–17, pp. 5458–5464, 2011, doi: 10.1016/j.msea.2011.03.043.
- [32] S. Mironov, Y. S. Sato, and H. Kokawa, “Development of grain structure during friction stir welding of pure titanium,” *Acta Mater.*, vol. 57, no. 15, pp. 4519–4528, 2009, doi: 10.1016/j.actamat.2009.06.020.
- [33] B. A. Çevik, Y. Ozcatalbas, and B. GÜLENÇ, “Effect of welding speed on the mechanical properties and weld defects of 7075 Al alloy joined by FSW,” *Met. Mater.*, vol. 54, no. 2, p. 7, 2016, doi: 10.4149/km_2016_3_241.
- [34] G. Padmanaban and V. Balasubramanian, “Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy - An experimental approach,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 7, pp. 2647–2656, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.10.021.
- [35] ASTM Standards, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials E8/E8M – 16a,” *Annual Book of ASTM Standards*, vol. ASTM Stds., no. Designation: E8/E8M-13a. pp. 1–28, 2013, doi: 10.1520/E0008.
- [36] G. . MAO, J. . . Larson, and P. RAO, “The microstructure of lead-base alloys,” *ELSEVIER*, vol. 1, pp. 399–423, 1969, doi: doi:10.1016/0026-0800(69)90048-2.
- [37] K. Kumar and S. V. Kailas, “The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 485, no. 1–2, pp. 367–374, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.08.013.
- [38] P. De Mezcla, “Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela Propiedades de Mezcla,” no. 1982, pp. 1–11, 2005.
- [39] S. I. Abu-Eishah, “Correlations for the Thermal Conductivity of Metals as,” *Int. J. Thermophys.*, vol. 22, no. 6, pp. 1855–1868, 2001.
- [40] K. Kumar, S. V. Kailas, and T. S. Srivatsan, “Influence of tool geometry in friction stir welding,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 23, no. 2, pp. 188–194, 2008, doi: 10.1080/10426910701774734.
- [41] W. Wang, D. Deng, Z. Mao, Y. Tong, and Y. Ran, “Influence of tool rotation rates on temperature profiles and mechanical properties of friction stir welded AZ31 magnesium alloy,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 5–8, pp. 2191–2200, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8918-4.
- [42] X. Cao and M. Jahazi, “Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 1, pp. 1–11, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.06.048.

8. Anexos.



Figura 25. Pin MX trivex Previo a labor de soldeo.



Figura 26. Detalle Pin MX trivex Posterior soldeo longitud de 95 mm a 1800 RPM x 40 mm/min.

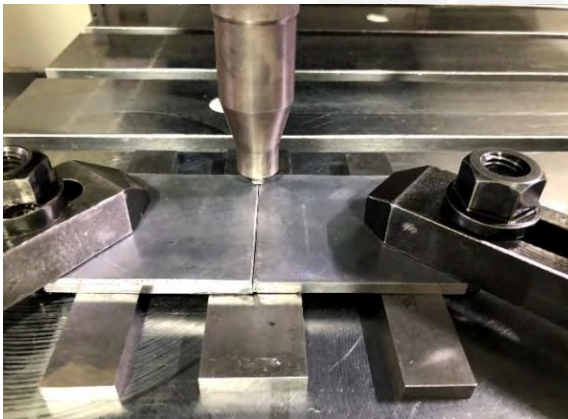


Figura 27. Montaje de cupones a soldar con Pin MX trivex Montaje en maquina.



Figura 28. Programación de parámetros de soldeo 1850 RPM x 40 mm/min en centro de maquinado CNC (Romi D1500).



Figura 29. Cupón soldado a partir de dos planchas de 6.25 mm de espesor por longitud total de soldeo 95 mm.



Figura 30. Probetas de dobles y tracción extraídas de cupón soldado Soldadura ejecutada en planchas 6.2 mm- 6.3 mm longitud total de soldeo 95 mm.



Figura 31. Ensayo de tracción realizado en maquina universal de ensayo Zwick/Roell Z250 de la PUCP.

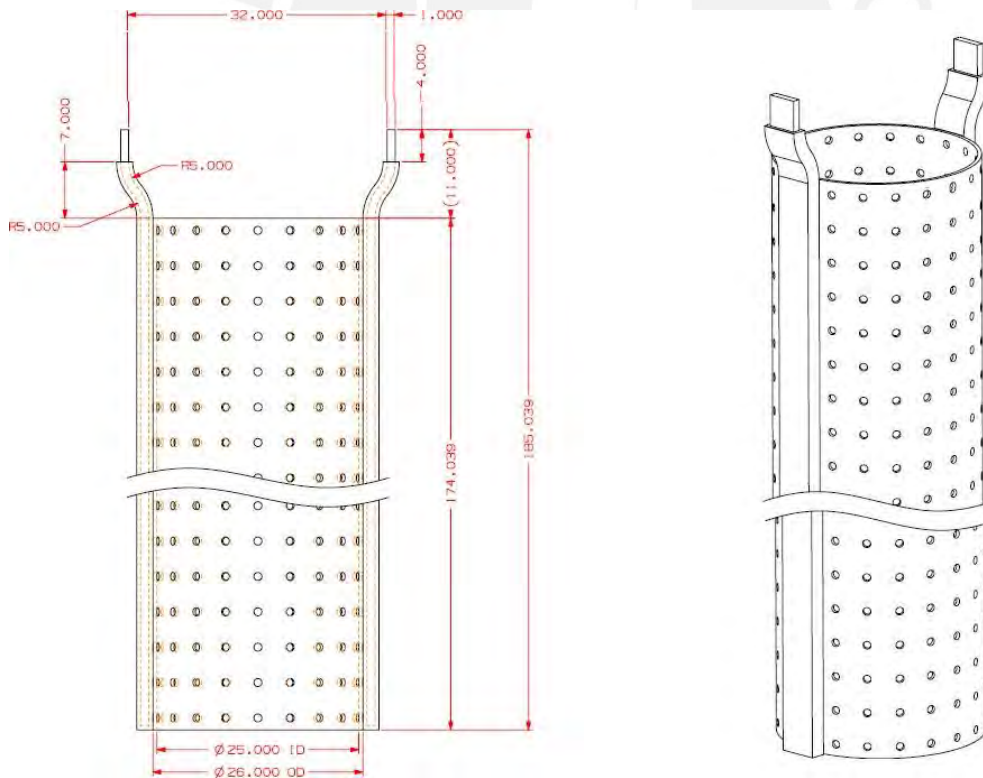


Figura 32. Esquema dimensional de un ánodo de proceso de cromado para cálculo de pesos y esfuerzos en cordón.

Tabla 7 Cálculo de peso para análisis de esfuerzo en el cordón superior de soldadura.

	Pulg	Metros
ID ánodo	25	0.635
OD ánodo	26	0.6604
L ánodo	175	4.445
Densidad del plomo	11340.0	kg/ m ³
Área transversal ánodo	0.026	m ²
Volumen ideal plomo (ánodo)	0,115	m ³
Peso Teórico final (con agujeros)	1.303	KG

W total del Ánodo	12.779	N
Esfuerzo en el 1° Cordón	0,50	MPa

Esfuerzo Fluencia máximo obtenido	33.0	MPa
40 mm/ min	1850 RPM	MX Trives

Factor de seguridad	89
----------------------------	-----------

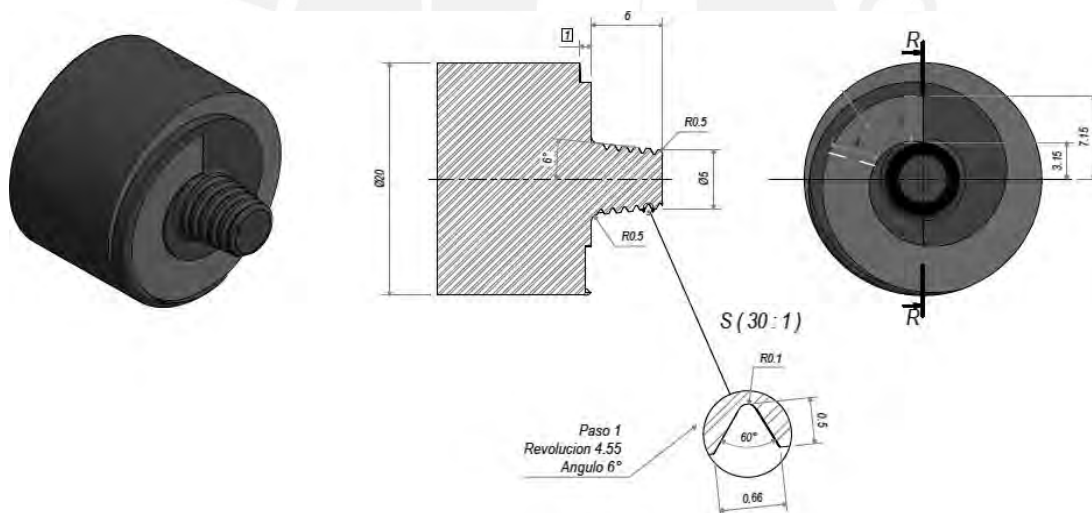


Figura 33. Diseño preliminar de pin cónico roscado.

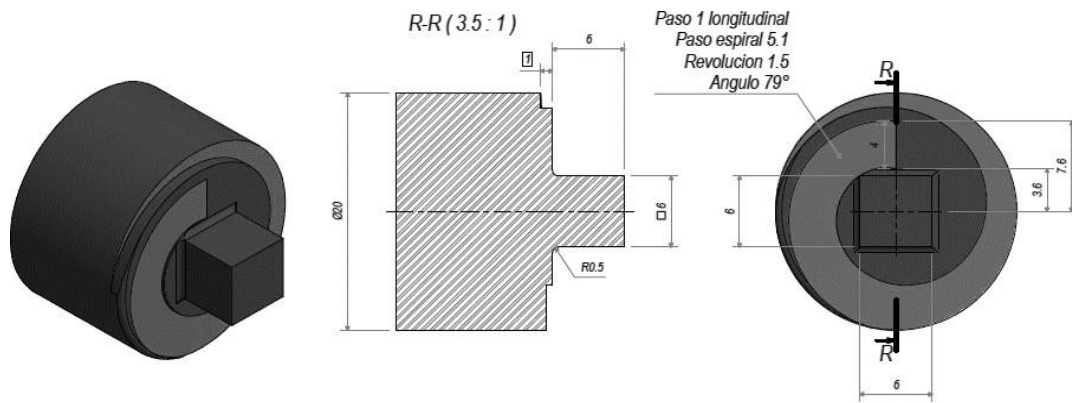


Figura 34. Diseño preliminar de pin cuadrado.

