



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDABILIDAD EN MATERIALES DISÍMILES ALUMINIO (6061) – LATÓN (C38500) MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

ANGAMARCA PUPIALES ANDRÉS PAUL

andres.angamarca@epn.edu.ec

GARCÍA CLAUDIO BRYAN STEVEN

bryan.garcia@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME, M.Sc.

carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, Mayo 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **ANDRÉS PAUL ANGAMARCA PUIALES** y **BRYAN STEVEN GARCÍA CLAUDIO**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **ANDRÉS PAUL ANGAMARCA PUPIALES** y **BRYAN STEVEN GARCÍA CLAUDIO**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Andrés Paul Angamarca Pupiales

Bryan Steven García Claudio

DEDICATORIA

A mis padres y abuelitos Teodoro y Rosita por ser parte de mi vida por medio de sus enseñanzas.

Andrés Angamarca

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi mamá, la mujer que siempre estuvo en cada etapa de mi vida quien con su paciencia, carácter y amor me ha permitido ser una persona de bien.

A ti papá por tu apoyo incondicional en cada decisión que he tomado, siendo un gran ejemplo de dedicación y esfuerzo para superarme cada día, encontrando siempre las palabras correctas para seguir adelante.

A mi ñaña por estar a mi lado en las buenas y en las malas, por tu cariño, por las risas, las peleas, las tristezas, los triunfos, los secretos y la alcahuetería porque sin ti no sería quien soy.

Bryan García

AGRADECIMIENTO

A mi familia por apoyarme en el transcurso de mi vida.

Al Ing. Carlos Díaz por sus paciencia y conocimientos brindados durante el desarrollo
de la tesis.

A mis amigos y compañeros quienes están a mi lado apoyándome a lograr mis metas.

Andrés Angamarca

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios y a la Virgen del Quinche por su bendición y permitir que mis padres me puedan ver culminar esta etapa de mi vida.

Al Ing. Carlos Díaz por su paciencia, por sus conocimientos y su acertada dirección para poder culminar este proyecto.

A mi compañero y amigo Andrés Angamarca por su paciencia, dedicación y apoyo para realizar la tesis.

Al Ing. Gabriel Velastegui, al Ing. Patricio Fuentes, la Ing. Patricia Proaño, a Jorge, a don René y a Lenin Claudio, muchas gracias a todos ustedes por la colaboración en las pruebas y ensayos que forman parte de este trabajo.

A Liliana Bonilla por ser un apoyo para mi padre, para mi hermana y para mí.

A Nicole por ser un soporte en mi vida y por los momentos de felicidad que compartiste a mi lado.

A Gabriela Castro y Daniel Constante por la amistad que iniciamos en primer semestre y se fortaleció a lo largo de toda la carrera y por nuestra caminata la cual es una linda tradición.

A mis amigos, Jimmy, Johnny, Wuasho, David, Josué y Robert por todas las anécdotas que vivimos dentro y fuera de la universidad por las risas, las tristezas, los triunfos, las derrotas y por matemática avanzada que fue la materia que afianzo nuestra amistad.

A todos mis familiares que forman parte importante de mi vida. Por cada consejo y apoyo brindados a lo largo de mi vida.

Bryan García

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
Pregunta de Investigación.....	2
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Soldadura por fricción.....	4
1.1.1. Ventajas.....	4
1.1.2. Desventajas.....	5
1.2. Etapas de la soldadura por fricción.....	5
1.3. Métodos de entrada de energía.....	6
1.3.1. Soldadura por fricción de conducción directa/continua (CDFW).....	6
1.3.1.1. Fase del proceso de soldadura por fricción.....	8
1.3.1.2. Ventajas.....	10
1.3.2. Soldadura por fricción inercial (IFW).....	10
1.3.2.1. Ventajas.....	11
1.4. Tipos de movimientos relativos.....	11
1.5. Aluminio.....	13
1.5.1. Propiedades Físicas.....	14
1.5.2. Propiedades Químicas.....	14
1.5.3. Aplicaciones.....	14
1.6. Latón.....	15
1.6.1. Propiedades Físicas.....	15
1.6.2. Aplicaciones.....	15
1.7. Temperatura de recristalización.....	15
2. METODOLOGÍA.....	17
2.1. Cohesión de materiales soldados por FRW.....	17

2.2. Probetas de ensayo	18
2.2.1. Dimensiones y disposiciones de las probetas	19
2.2.2. Preparación de las juntas.....	21
2.3. Equipos para el proceso de soldadura	22
2.4. Relación entre los parámetros	23
2.4.1. Torque y energía térmica producida sobre la superficie de la soldadura	24
2.4.2. Parámetros estimados para la soldadura	28
2.5. Ensayo de tracción	29
2.5.1. Evaluación del material base	29
2.5.2. Evaluación de las juntas soldadas	30
2.6. Metalografía.....	31
2.6.1. Selección y preparación de las muestras	31
2.6.2. Desbaste grueso.....	32
2.6.3. Montaje en resina	33
2.6.4. Pulido fino	33
2.6.5. Microscopia metalográfica	34
2.7. Microdureza	37
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
3.1. Resultados.....	39
3.1.1. Tiempo total de soldadura, fuerza de calentamiento - forja y temperatura de calentamiento y precalentamiento.....	39
3.1.2. Pérdida de longitud total (burn-off).....	40
3.1.3. Ensayo de tracción	41
3.1.4. Micrografía de las muestras Aluminio – Latón.....	45
3.1.5. Microdureza	62
3.2. Discusión	65
3.2.1. Encogimiento axial.....	65
3.2.2. Ensayo de tracción	66
3.2.2.1. Ensayo de tracción del material base.....	66
3.2.2.2. Ensayo de tracción de las probetas soldadas	66
3.2.3. Análisis de la zona de unión de las probetas sometidas a tracción	68
3.2.4. Metalografía.....	70
3.2.4.1. Caracterización del latón.....	70
3.2.4.2. Caracterización del aluminio	72
3.2.4.3. Análisis de las muestras por microscopia.....	76
3.2.5. Microdureza	83
3.2.6. Análisis de junta simple frente a la junta de ranura o lengüeta	84

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	96
4.1. Conclusiones	96
4.2. Trabajos futuros	99
Referencias Bibliográficas	100
Anexos	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Secuencia básica de la soldadura por fricción directa.	6
Figura 1.2. Características y parámetros de la soldadura por fricción directa.	7
Figura 1.3. Anillos de plastificación durante la fase de rozamiento.	8
Figura 1.4. Superficies de fricción durante la fase de calentamiento.	9
Figura 1.5. Características y parámetros de la soldadura por fricción inercial.	11
Figura 1.6. Disposiciones típicas de soldadura por fricción.	12
Figura 2.1. Combinaciones de materiales soldables por fricción.	17
Figura 2.2. Probetas de latón (izquierda) y aluminio (derecha).	19
Figura 2.3. Geometría de las probetas de aluminio y latón para la junta de ranura o lengüeta.	21
Figura 2.4. Geometría de las probetas de aluminio y latón para la junta simple.	21
Figura 2.5. Máquina de soldadura por fricción de conducción directa/continua.	22
Figura 2.6. Disposición esquemática de soldadura por fricción de una barra sólida. ...	24
Figura 2.7. Máquina universal de ensayo computarizada.	29
Figura 2.8. Probeta para ensayos de tracción (Todas las dimensiones están en milímetros a excepción de la rosca).	29
Figura 2.9. Probetas para ensayo de tracción: latón C38500 (izquierda) – aluminio 6061 (derecha).	30
Figura 2.10. Partes de la probeta de tracción.	30
Figura 2.11. Eliminación del flash (izquierda) y ensayo de tracción (derecha).	31
Figura 2.12. Selección y corte de las juntas.	32
Figura 2.13. Desbaste grueso.	32
Figura 2.14. Montaje de las muestras en resina.	33
Figura 2.15. Equipos FORCIMAT, FORCIPOL (izquierda) y máquina de pulido (derecha).	33
Figura 2.16. Microscopio metalográfico OLYMPUS GX41.	36
Figura 2.17. Microdurómetro marca Metkon.	38
Figura 3.1. Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 3 (sin precalentamiento).	43
Figura 3.2. Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 8 (con precalentamiento); entre los 7 y 10 segundos la aguja varía entre 0 [kgf] y 100 [kgf].	43
Figura 3.3. Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 3D (sin precalentamiento); a los 2 segundos la aguja varía entre 0 [kgf] y 100 [kgf].	44
Figura 3.4. Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 11D (con precalentamiento).	44
Figura 3.5. Zonas de análisis de la micrografía de la junta de ranura o lengüeta.	52

Figura 3.6. Puntos de microindentación en la junta simple (izquierda) y de ranura (derecha).	62
Figura 3.7. Dureza vs. Distancia de junta 2.	63
Figura 3.8. Dureza vs. Distancia de junta 6.	63
Figura 3.9. Dureza vs. Distancia de junta 1D.	64
Figura 3.10. Dureza vs. Distancia de junta 10D.	64
Figura 3.11. Probetas soldadas de junta simple.	66
Figura 3.12. Material plastificado concentrado de la junta 3; probeta de latón (izquierda) y aluminio (derecha).	68
Figura 3.13. Material plastificado concentrado de la junta 9; probeta de latón (izquierda) y aluminio (derecha).	68
Figura 3.14. Material plastificado concentrado de la junta 4D; probeta de latón (izquierda) y aluminio (derecha).	68
Figura 3.15. Material plastificado concentrado de la junta 11D; probeta de latón (izquierda) y aluminio (derecha).	69
Figura 3.16. Forma de las zonas de unión en la soldadura por fricción como una función de la fuerza axial aplicada y la velocidad de rotación.	70
Figura 3.17. Comparación de la microestructura de C38500 de estudio (izquierda) y según OTTO FUCHS Dülken (derecha).	71
Figura 3.18. Diagrama de fases Cu-Zn.	72
Figura 3.19. Comparación de la microestructura de A6061 de estudio (izquierda) y según Wu et al. (derecha).	74
Figura 3.20. Diagrama de fases de la aleación AA6061.	74
Figura 3.21. Defectos y capas intermetálicas de la junta 2.	77
Figura 3.22. Defectos y capas intermetálicas de la junta 5D.	77
Figura 3.23. Defectos y capas intermetálicas de la junta 9D.	77
Figura 3.24. Micrografía de la junta 6, con un aumento de 50X y ataque químico. (A) Zona de unión. (B) Zona afectada termomecánicamente (ZATM). (C) Zona afectada por el calor (ZAC) y (D) material base.	81
Figura 3.25. Longitud de la zona de unión, zona afectada termomecánicamente (ZATM) y zona afectada por el calor (ZAC).	82
Figura 3.26. Zona de intermetálico.	82
Figura 3.27. Pérdida de longitud total de juntas simples y juntas de ranura o lengüeta.	84
Figura 3.28. Resistencia a la tracción del material base, juntas simples y juntas de ranura o lengüeta.	85
Figura 3.29. Deformación del aluminio y latón de las juntas 7, 8, 6D, 7D y 11D.	85

Figura 3.30. Comparación de resultados del ensayo de tracción, microdureza y longitudes ZATM – ZAC con respecto a las juntas simples y de ranura con y sin precalentamiento.	86
Figura 3.31. Comparación de la fuerza de forja, tiempo de soldadura y longitud ZAC con respecto a las juntas simples y de ranura.	88
Figura 3.32. Eficiencia de soldadura.	89
Figura 3.33. Soldadura de junta de ranura o lengüeta; (A) comienzo de la soldadura, (B) desalineación y rotura del pin durante la aplicación de presión, (C) desalineación y aparición de material plastificado, (D) desalineación y comienzo de formación del material plásticamente deformado.	94
Figura 3.34. Variación de la fuerza axial aplicada frente al tiempo; (A) aplicación de la fuerza F_0 (B) aplicación de la fuerza F_1 y ampliación del diámetro hacia el exterior de las regiones de la zona de soldadura y comienzo del acortamiento de las piezas de trabajo (C) formación del material plásticamente deformado (D) final de la soldadura.	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Variaciones de soldadura por fricción.....	13
Tabla 1.2. Propiedades físicas del aluminio.	14
Tabla 1.3. Propiedades físicas del latón.....	15
Tabla 2.1. Código de las juntas.....	20
Tabla 2.2. Dimensiones de las probetas de aluminio y latón para la junta de ranura o lengüeta.....	20
Tabla 2.3. Dimensiones de las probetas de aluminio y latón para la junta simple.	21
Tabla 2.4. Ecuaciones para la superficie de soldadura.	26
Tabla 2.5. Parámetros estimados para la soldadura.	28
Tabla 2.6. Juntas para ensayo de tracción.....	31
Tabla 2.7. Juntas seleccionadas para metalografía.	32
Tabla 2.8. Condiciones de trabajo del proceso de pulido.	34
Tabla 2.9. Muestras para microscopia del material base.	34
Tabla 2.10. Muestras para microscopia de junta simple.....	35
Tabla 2.11. Muestras para microscopia de junta de ranura o lengüeta.	35
Tabla 2.12. Descripción del ataque químico.	37
Tabla 2.13. Muestras para análisis de microdureza.	38
Tabla 3.1. Valores obtenidos en el proceso de soldadura de junta simple.	39
Tabla 3.2. Valores obtenidos en el proceso de soldadura de junta de ranura o lengüeta.	40
Tabla 3.3. Encogimiento axial de junta simple.	40
Tabla 3.4. Encogimiento axial de junta de ranura o lengüeta.	41
Tabla 3.5. Resultado de ensayo de tracción del material base aluminio y latón.	41
Tabla 3.6. Resultado del ensayo de tracción en juntas sin precalentamiento.....	42
Tabla 3.7. Resultado del ensayo de tracción en juntas con precalentamiento.	42
Tabla 3.8. Características del material base.	45
Tabla 3.9. Características de las micrografías de junta simple.....	46
Tabla 3.10. Características de las micrografías de junta de ranura o lengüeta.	52
Tabla 3.11. Porcentaje de eficiencia de la soldadura según su resistencia a la tracción.	67
Tabla 3.12. Composición química de la probeta de latón.....	70
Tabla 3.13. Composición química del latón C38500.	71
Tabla 3.14. Composición química de la probeta de aluminio.	72
Tabla 3.15. Composición química de la aleación de aluminio 6061.	73

Tabla 3.16. Nomenclatura estándar para describir el tratamiento térmico del aluminio 6061.	73
Tabla 3.17. Solubilidad del Mg_2Si en función de la temperatura y del exceso del magnesio en la matriz.	75
Tabla 3.18. Descripción de las observaciones de las juntas simples y de ranura.	90
Tabla 3.19. Descripción de los valores obtenidos de las juntas simples y de ranura. ...	92
Tabla 3.20. Comparación de la resistencia a la tracción promedio con otros estudios.	92

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I. Resultado de la espectrometría por chispa.....	108
ANEXO II. Gráficas fuerza aplica vs. tiempo de junta simple y de ranura.	110
ANEXO III. Resultado del ensayo de tracción realizado a las probetas y juntas soldadas.	118
ANEXO IV. Resultado del ensayo metalográfico.....	120
ANEXO V. Microdureza del material base, juntas simples y de ranura o lengüeta	128

RESUMEN

La soldadura por fricción de conducción directa es un proceso poco aplicado a nivel industrial, especialmente para la unión de materiales disímiles como el caso de aluminio-latón. En el caso del latón C38500 es utilizado principalmente para la fabricación de condensadores, accesorios para instalaciones sanitarias y placas tubulares para intercambiadores de calor, mientras que el aluminio 6061 por su fácil manipulación y buena resistencia a la corrosión permite la construcción de latas para envase de comidas, bebidas y griferías sanitarias. Este proyecto tiene como finalidad el estudio y caracterización de la soldabilidad del aluminio 6061 – latón C38500 sustentado bajo normas y estudios previamente realizados de trabajos similares. Mediante el uso de ensayos de tracción, microdurezas y análisis metalográfico se obtuvieron resultados que permitieron conocer el comportamiento mecánico de la soldadura, la microestructura y las diferentes zonas presentes en la unión. Las probetas se dividieron en 4 grupos, variando el diseño de la junta y la temperatura de precalentamiento, después de realizar los ensayos correspondientes a las juntas soldadas se determinó que los resultados más óptimos presentan las juntas simples sin precalentamiento, teniendo un valor porcentual de 95,18% en su resistencia a la tracción promedio comparado con la resistencia del aluminio (233 [MPa]), mientras que los valores más bajos se presentan en las probetas con junta de ranura y con precalentamiento. Bajo los criterios mencionados anteriormente, la unión de dichos materiales puede ser implementada en las industrias de griferías sanitarias, generando una nueva opción para la fabricación de productos sanitarios sin preocuparse de la corrosión galvánica, ya que se utiliza para el transporte de agua potable mas no de agua salada.

Palabras clave: Caracterización, soldadura por fricción convencional, precalentamiento.

ABSTRACT

The direct drive friction welding is a little applied process to industrial level, especially for the union of dissimilar materials as the case of aluminum-brass. In the case of the C38500 brass is used mainly for the manufacture of capacitors, accessories for sanitary installations and tubular plates for heat exchangers, while the 6061 aluminum for its easy handling and good corrosion resistance allows the construction of cans for packaging of food, beverages and sanitary fittings. This project aims at the study and characterization of the weldability of 6061 aluminum - C38500 brass supported under standards and studies previously conducted in similar jobs. Through tensile tests, microhardness and metallographic analysis, the obtained results allowed to know the mechanical behavior of the weld, the microstructure and the different zones present in the joint. The specimens were divided into 4 groups, varying the design of the joint and the preheating temperature, after performing the tests corresponding to the welded joints, it was determined that the most optimal results are simple joints without preheating, having a percentage value of 95,18% in its average tensile strength compared to the strength of aluminum (233 [MPa]), while the lowest values occur in the specimens with groove joint and preheating. Under the above criteria, the union of these materials can be implemented in sanitary fittings industries, generating a new option for the manufacture of sanitary products without worrying about the galvanic corrosion, as it is used for the transport of water but not of salt water.

Keywords: Characterization, conventional friction welding, preheating.

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDABILIDAD EN MATERIALES DISÍMILES ALUMINIO (6061) – LATÓN (C38500) MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN

INTRODUCCIÓN

La soldadura por fricción se realiza en cualquier material que pueda ser forjado en caliente y no es para aplicaciones donde exista deslizamiento en seco (lubricación seca), además es empleado para la producción en serie, cuando la unión en estado sólido es una preferencia, o cuando la geometría de las piezas de trabajo (los componentes) no permite que otro proceso de soldadura sea aplicable [1]. Entonces, con el fin de garantizar la unión de materiales disímiles se busca determinar rangos de temperatura de precalentamiento que faciliten la soldabilidad de materiales diferentes, mejorando las propiedades físicas y mecánicas posteriores a la soldadura, cumpliendo con los requerimientos establecidos por las normativas referidas a las soldaduras.

Debido a la carencia de información de la soldadura por fricción en frío, la unión de materiales disímiles es compleja por la diferencia de propiedades y características del material, en consecuencia, genera juntas que incluyen combinaciones de materiales con puntos de fusión diferentes y que forman fases incompatibles como en el caso de los procesos de soldadura por fusión [2]. Por tal motivo, surge la necesidad de realizar ensayos de tensión, microdureza, además de un estudio sobre el comportamiento a nivel microestructural con la finalidad de identificar las causas como: desalineación axial, grietas en la zona afectada por el calor cerca de la línea de soldadura debido al hidrógeno, grietas próximas al material plásticamente deformado (flash), uniones incompletas, inclusiones y la presencia de zonas no coalescentes en la soldadura [3].

En la actualidad, los métodos tradicionales de soldadura presentan varios defectos en las uniones, en los cuales es necesario aplicar ensayos adicionales, y tratamientos posteriores con la finalidad de optimizar las propiedades en el cordón de soldadura.

Por lo tanto, el presente estudio, permitirá mejorar la calidad de la soldadura de los materiales disímiles aluminio (6061) - latón (C38500) mediante el proceso de soldadura por fricción en frío. Además, las industrias dedicadas a la unión de

materiales disímiles por medio de este proceso, podrán beneficiarse mediante este proyecto, debido a que se pondrán sentar bases adecuadas para investigaciones a futuro.

Se establece de forma experimental los parámetros en los cuales es factible la unión de los materiales aluminio-latón por medio de la soldadura en frío, además se diseña una disposición diferente a la junta a tope simple.

Para evaluar la efectividad de la soldadura se realiza ensayos de tracción, donde la falla o la fractura de la probeta debe ocurrir en el material base. Además, gracias a la caracterización realizada en las probetas se podrá identificar las causas de los defectos ocasionados durante la soldadura mediante un análisis metalográfico.

Finalmente, se obtiene los parámetros de soldadura adecuados y el tipo de junta, donde las propiedades de la unión son factibles y permita repetir el proceso.

Pregunta de Investigación

¿Es posible mejorar la soldadura por fricción en frío de materiales disímiles aluminio - latón por medio del estudio experimental y cambio de disposición de la junta a tope simple?

Objetivo general

Estudiar y caracterizar la soldabilidad en materiales disímiles aluminio (6061) - latón (C38500) mediante el proceso de soldadura por fricción.

Objetivos específicos

- Recopilar y desarrollar especificaciones técnicas, características o prestaciones para la soldadura de materiales disímiles.
- Establecer los parámetros en los cuales se obtiene una unión aceptable para la soldadura de las probetas de prueba.
- Cuantificar las propiedades de la resistencia de soldadura mediante un ensayo de tracción.
- Analizar las características de la microestructura resultante en la junta.
- Comprobar la eficiencia de la soldadura ante la aplicación de precalentamiento frente a la soldadura sin precalentamiento.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Soldadura por fricción

El proceso de soldadura por fricción (FRW, por sus siglas en inglés Friction Welding) fue inventado y desarrollado en 1836 por Trevor Irving Rolt, produce una unión soldada (por debajo de la temperatura de fusión) bajo la fuerza compresiva de contacto entre dos superficies de deslizamiento/rotación, generando calor suficiente para alcanzar una temperatura de unión en unos pocos segundos. En esta etapa, la rotación se detiene y la presión se mantiene o aumenta para completar la soldadura. Con este método no se requiere metal de aporte, fundente ni gas protector [4], [5].

La zona de unión entre los materiales se caracteriza por una estrecha zona afectada por el calor (ZAC), la presencia de material deformado plásticamente alrededor de la soldadura y la ausencia de una zona de fusión [1].

1.1.1. Ventajas

- No se requiere metal de aporte para juntas de materiales disímiles.
- El fundente y el gas protector normalmente no son necesarios.
- Los defectos de solidificación y la porosidad no es una preocupación.
- El proceso es limpio debido a la minimización de chispas, humo y escoria.
- La limpieza de la superficie no es tan crítica a diferencia de otros procesos de soldadura.
- Presencia de estrechas zonas afectadas por el calor.
- La mayoría de los materiales de ingeniería y sus diferentes combinaciones son adecuadas para unirse.
- En la mayoría de los casos, la soldadura es al menos tan fuerte como el más débil de los dos materiales que se unen (alta eficiencia conjunta).
- No se requiere que los operadores tengan habilidades de soldadura.
- El proceso es fácilmente automatizado para producción.
- Los tiempos de ciclo de soldadura son cortos.
- Se pueden unir metales disímiles, incluso algunos considerados incompatibles o no [1], [6], [7].

1.1.2. Desventajas

- En general, una pieza debe tener un eje de simetría y ser capaz de rotar alrededor de su eje.
- La alineación de las piezas de trabajo tiene que ser la adecuada para alcanzar un calor uniforme.
- La preparación de la geometría de la interfaz puede ser crítica para lograr un equilibrio térmico adecuado.
- Los costos de equipo y herramientas son altos en bajos volúmenes de producción [1].

1.2. Etapas de la soldadura por fricción

La soldadura por fricción se desarrolla en dos etapas: la etapa de fricción y la etapa de forjado. El calor para la soldadura se desarrolla durante la etapa de la fricción, y la soldadura normalmente se consolida con la forja o la etapa de pérdida de longitud axial.

- La etapa de fricción ocurre cuando una de las piezas de trabajo gira y la otra se mantiene estacionaria como se muestra en la Figura 1.1. (A). Cuando se alcanza la velocidad de rotación apropiada, las superficies de las probetas entran en contacto con un alto torque ejercido, por lo tanto, se debe reducir al mínimo el pico de par de torsión (primer pico de par de torsión) al subdividir en “primer” y “segundo” nivel de fricción. En el primer nivel de fricción existe un rozamiento entre las superficies a soldar con una presión axial ligeramente menor a la segunda para minimizar el torque sobre las piezas de trabajo, Figura 1.1. (B). Como la generación de calor aumenta, la presión axial se incrementa para desplazar de manera más eficiente el material plastificado (segundo nivel de fricción) [1].

Debido al calor de los metales, hay una fuerte adhesión en diversos puntos de contacto, y se transfiere metal de una superficie a otra. El tamaño de los fragmentos transferidos crece hasta que éstos se convierten en una capa continua de metal plastificado, Figura 1.1. (C) [1].

- En la etapa de forjado a medida que la velocidad disminuye se aplica una presión de forja (después del proceso de calentamiento) entre las superficies, produciendo un segundo pico de par de torsión, cuando la interfaz establece un enlace y comienza a enfriarse, ocasionando una reducción de la longitud axial

de los elementos de trabajo, además de desplazar rápidamente el material plastificado restante. Para finalizar, el par de torsión que se produce disminuye y la soldadura llega a su fin, Figura 1.1. (D) [1].

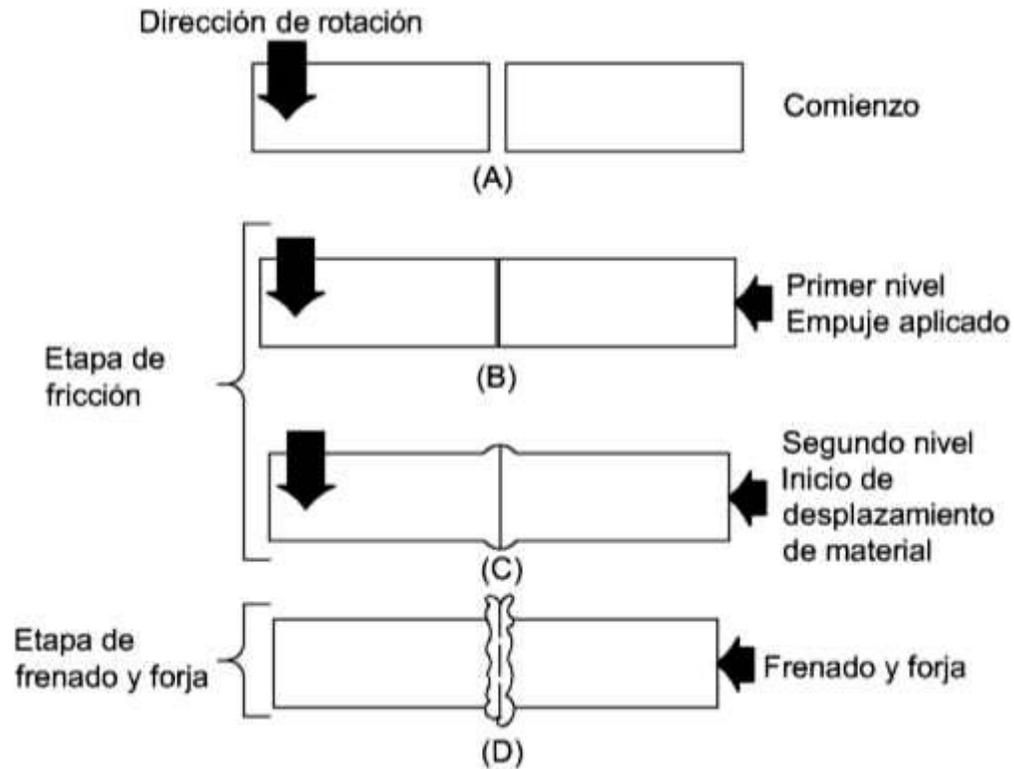


Figura 1.1. Secuencia básica de la soldadura por fricción directa.
(Fuente: Propia)

1.3. Métodos de entrada de energía

Existen dos métodos de entrada de energía en la soldadura por fricción.

- La soldadura por fricción de conducción directa/continua (soldadura por fricción convencional) que utiliza la entrada de energía continua a partir de un motor.
- La soldadura de fricción inercial (soldadura por fricción de volante) utiliza la energía almacenada en un volante de inercia [1].

1.3.1. Soldadura por fricción de conducción directa/continua (CDFW)

La soldadura CDFW consiste en mantener una de las probetas fija (sin rotación), mientras una segunda probeta la cual tiene una velocidad de rotación constante se acerca con una fuerza de contacto inicial a la primera probeta, generando calor debido a la fricción en las superficies, cuando se alcanza la temperatura de trabajo adecuada, se detiene la rotación mediante la aplicación de una fuerza de frenado (mecánico o eléctrico, o ambos). La fuerza en la soldadura por fricción (fuerza de forja) se mantiene

o incrementa por un determinado tiempo o distancia después de cesar la rotación para obtener la soldadura (ver Figura 1.2.) [1].

Los principales parámetros de soldadura por fricción directa son los siguientes:

- Velocidad de rotación.
- Fuerza de fricción predeterminada.
- Tiempo de fricción.
- Fuerza de forja predeterminada.
- Tiempo de forja.
- Acortamiento de las piezas de trabajo (Burn-off) [3].

La soldadura CDFW tiene una mejor aplicación en barra o eje sólido de hasta 250 [mm] de diámetro. Para mejorar la calidad de la soldadura, el husillo puede girar durante la fase de la forja [8].

Bajo las características y parámetros de la soldadura CDFW según la American Welding Society (2007) y Meyer (2003) se desarrolló la Figura 1.2.

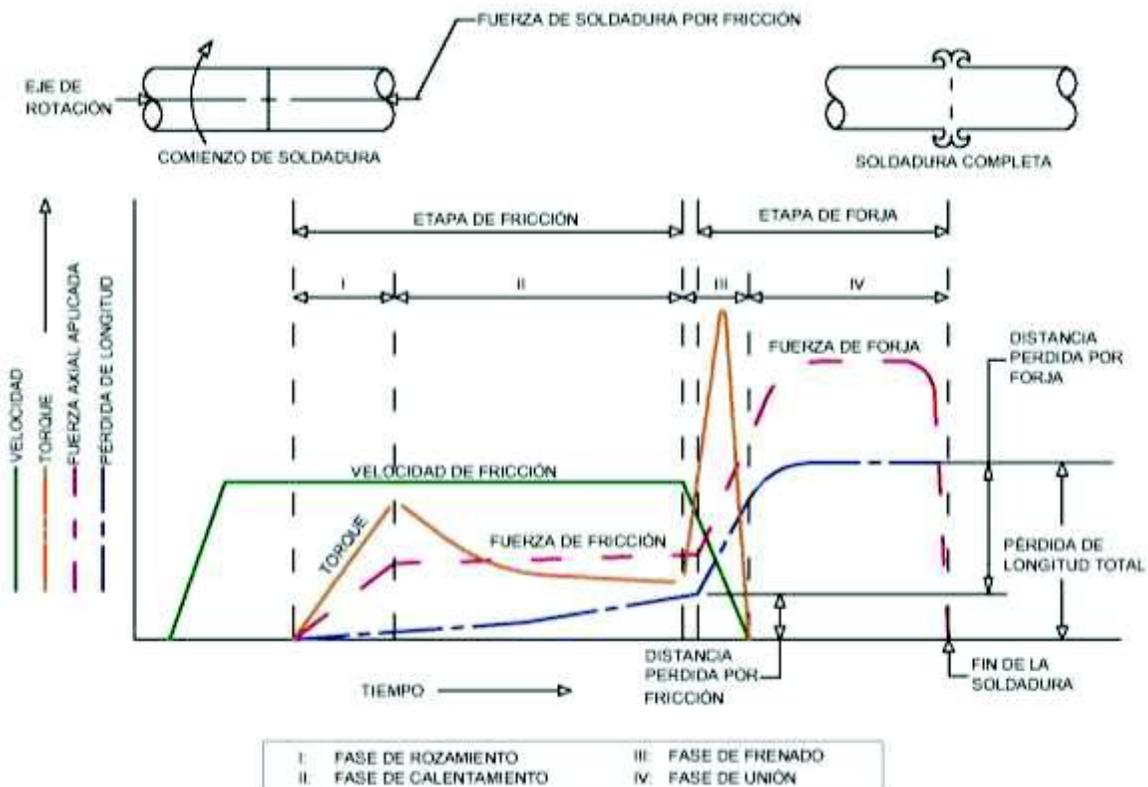


Figura 1.2. Características y parámetros de la soldadura por fricción directa.
(Fuente: Propia)

1.3.1.1. Fase del proceso de soldadura por fricción

En la fase de rozamiento una cierta cantidad del área transversal de las probetas hace contacto, produciendo altas presiones entre las superficies originando una deformación plástica y por ende el aplanamiento de las superficies. Además, las regiones exteriores se encuentran sometidas a la máxima velocidad de rotación relativa entre las superficies de contacto [5]. Bethlehem (1984), citado por Meyer (2003), demostró que la región comprendida entre 0,3 y 0,7 del radio se encuentra sometida a una gran deformación y calentamiento durante la primera fase, mientras que el resto de las superficies permanece casi intacto.

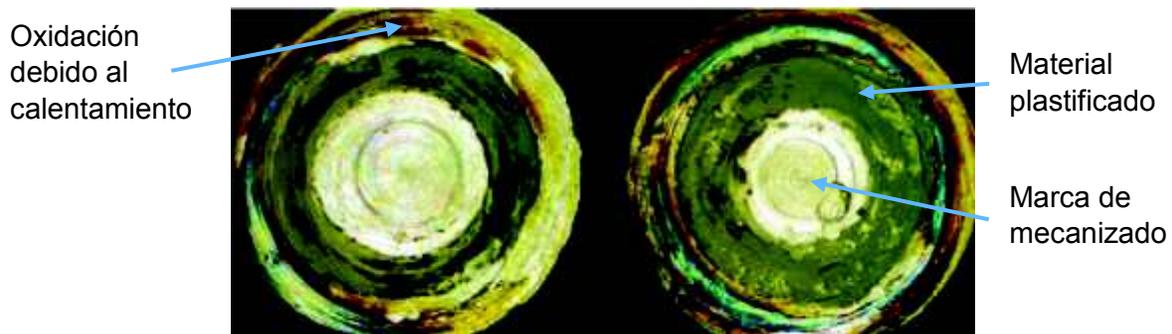


Figura 1.3. Anillos de plastificación durante la fase de rozamiento.
(Fuente: [5])

Debido a las altas temperaturas locales que ocurren repetidamente durante un corto período de tiempo y las reacciones químicas inducidas por fricción, se producen óxidos, especialmente en las regiones externas [5].

Uno de los efectos principales es el suavizado de las regiones exteriores de las superficies de rozamiento, que tiene lugar durante las primeras vueltas de la pieza de trabajo. Cuando el suavizado en las regiones exteriores está casi completado se empieza a desarrollar hacia el centro de rotación de la articulación. Por lo tanto, se observa una concentración de material en un área de anillo circular (fina película plastificada de material cortado), cuya distancia desde el centro de rotación de la pieza de trabajo es de $1/2$ a $2/3$ del radio de la superficie de fricción [5].

La fase de rozamiento se completa tan pronto como el torque de fricción alcanza su máximo valor. Este pico es causado por la eliminación de la película contaminante y la fricción adicional causada por las superficies rugosas producidas por el ataque en el otro. La extracción de la película contaminante permite el contacto de superficies del nuevo material con un aumento considerable en el coeficiente de fricción [5].

En la fase de calentamiento el material altamente plastificado es estrujado hacia las zonas más frías del área de fricción (centro de rotación) formando un área circular que amplía su diámetro lentamente hacia el exterior de las regiones de la zona de soldadura, ocasionando el aumento de la superficie de fricción (Figura 1.4.) y por tanto el torque de fricción [5].

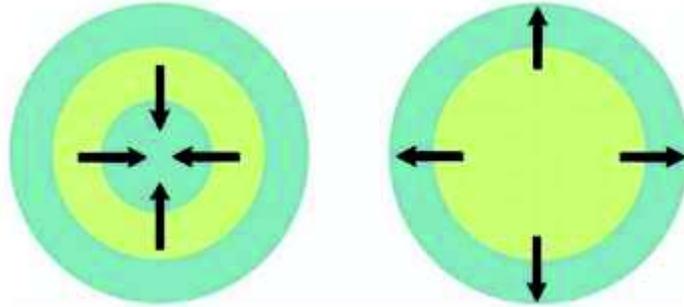


Figura 1.4. Superficies de fricción durante la fase de calentamiento.
(Fuente: [9])

Debido al enfriamiento inmediato del material plastificado se produce una fricción intensa de nuevo en estas zonas particulares provocando que aumenta la temperatura del material y la resistencia a la fuerza axial se reduce y el material se presiona fuera del área de fricción para formar el flash. Desde este punto se establece de manera casi constante la tasa burn-off (acortamiento de las piezas de trabajo) [5], [9].

La fase de calentamiento termina al alcanzar la temperatura predeterminada, una cierta cantidad de burn-off o un tiempo preestablecido.

La fase de frenado comienza con la disminución de velocidad de rotación, además la resistencia al corte aumenta debido a la baja tasa de deformación y, por lo tanto, el torque de fricción alcanza su segundo pico. El aumento del torque provoca una deformación adicional en el material adyacente, que hasta ahora no ha sido sometido a ninguna deformación [5], [10].

La fase de unión permite un pegado homogéneo en toda la sección mediante la aplicación de una fuerza de forja, aunque el mecanismo de unión ya comienza en la fase de calentamiento de forma no homogénea en toda la superficie de contacto [5], [9].

Las capas de óxido en las regiones exteriores de la zona de soldadura producida por contacto de fricción insuficiente ahora son expulsadas. Las superficies de soldadura hacen contacto más cercano y el material se junta a distancias atómicas para producir uniones metálicas [5], [9], [10].

1.3.1.2. Ventajas

- Menor fuerza de soldadura para piezas sólidas. Las piezas más grandes se pueden soldar en la misma máquina.
- El par de soldadura inferior si se aplican los frenos al final del ciclo de soldadura.
- Bajo rpm para piezas sólidas.
- Es posible una orientación angular después de la soldadura de $\pm 1^\circ$ o mejor entre las dos piezas.

1.3.2. Soldadura por fricción inercial (IFW)

La soldadura IFW consiste en conectar una de las probetas al husillo que tiene uno a más volantes de inercia fijos mecánicamente a él, mientras que la otra pieza de trabajo normalmente está restringida de rotación. La energía necesaria para realizar la soldadura se almacena en un volante que se ha acelerado a una velocidad determinada por medio de un motor. La soldadura se realiza cuando se desconecta el volante del motor y se presionan las partes a soldar, la energía cinética almacenada en el volante se disipa en forma de calor generado por la fricción entre las superficies, produciendo la coalescencia de las probetas [1].

Los principales parámetros de soldadura por fricción inercial son los siguientes:

- Velocidad de rotación.
- Momento de inercia del volante.
- Fuerza de fricción determinada.
- Fuerza de forja determinada [3].

La soldadura por fricción inercial se aplica mejor para las secciones tubulares grandes, sin la necesidad de considerar el tamaño del accionamiento del husillo. También tiene ventajas para aplicaciones de placa a tubo, que necesitan impulsos de alta energía al comienzo del ciclo de soldadura para penetrar el material de la placa [8].

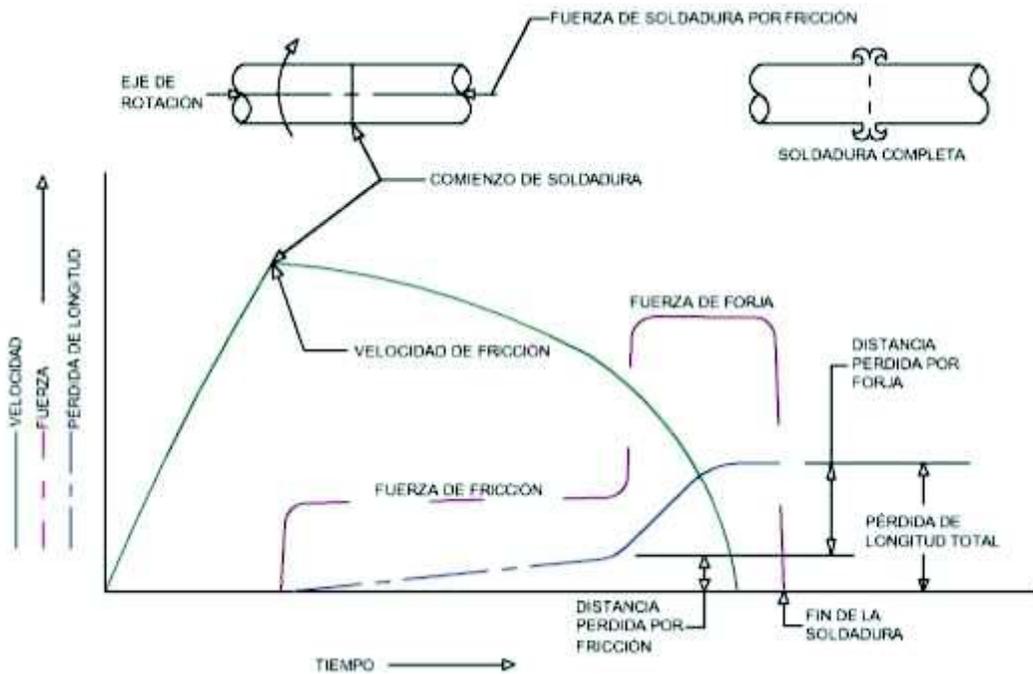


Figura 1.5. Características y parámetros de la soldadura por fricción inercial.
(Fuente: [1])

1.3.2.1. Ventajas

- Zonas estrechas afectadas por el calor.
- Tiempos de soldadura más cortos.
- Las líneas de flujo helicoidales y el trabajo en caliente al final del ciclo de soldadura pueden ayudar en la resistencia de la soldadura.
- Parámetros pre-calculables para la mayoría de materiales y geometría. Por lo tanto, el proceso puede ser escalado matemáticamente (es decir, se pueden usar muestras pequeñas para el desarrollo de grandes partes).
- Sin embragues, sin frenos debido a la presencia del volante de inercia.
- El par de soldadura se determina indirectamente midiendo la velocidad de cambio de velocidad del husillo [7].

1.4. Tipos de movimientos relativos

Dentro de las principales aplicaciones en la CDFW e IFW, una de las piezas de trabajo se hace girar alrededor de un eje de simetría con las superficies de contacto perpendiculares a dicho eje. Por lo general, una de las dos piezas de trabajo debe ser circular o tubular cuyas disposiciones típicas para las operaciones de soldadura simple o múltiple puede ser como se muestra en la Figura 1.6.

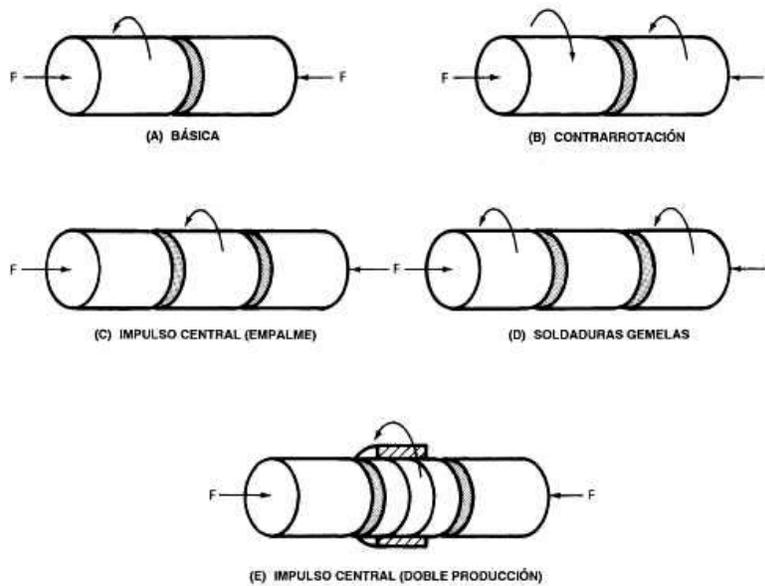


Figura 1.6. Disposiciones típicas de soldadura por fricción.
(Fuente: [11])

La Figura 1.6. (A) representa la disposición típica más utilizada, donde una pieza de trabajo gira mientras la otra permanece estacionaria. La Figura 1.6. (B) muestra el modo de contra-rotación, en la cual las piezas de trabajo giran en direcciones opuestas. Este procedimiento es recomendable para soldaduras que requieren altas velocidades relativas. La Figura 1.6. (C) indica el modo de accionamiento central donde las dos piezas de trabajo estacionarias se empujan contra una pieza giratoria situada entre ellas. Esta configuración puede aplicarse cuando las dos piezas de los extremos son muy largas o cuya forma dificulta la rotación. La Figura 1.6. (D) muestra la disposición de doble soldadura, en el cual las dos piezas de trabajo giran y entran en contacto con una pieza estacionaria que se encuentra en medio de ellas. El modo de accionamiento central mostrado en la Figura 1.6. (E) aplica el mismo principio de doble soldadura, para hacer dos soldaduras superficie con superficie usando un husillo giratorio en el centro con el fin de mejorar la productividad [1].

Otras formas adicionales de soldadura por fricción únicas (radial, orbital, angular, lineal y de superficies de fricción) son casos especiales que utilizan un sistema diferente para proporcionar el movimiento relativo. Estas variaciones de soldadura por fricción se describen a continuación [1].

Tabla 1.1. Variaciones de soldadura por fricción.

Variaciones de soldadura por fricción	Descripción
Soldadura por fricción radial	El movimiento radial se puede utilizar para soldar collares a secciones circulares (no conviene girar las partes a unir). La fuerza aplicada sobre la banda giratoria es perpendicular al eje de rotación. El collar gira y se comprime a medida que se genera calor [1].
Soldadura por fricción orbital	La pieza de trabajo no gira alrededor de su eje y, en consecuencia, las piezas de trabajo no deben ser necesariamente circulares o tubulares. Este proceso con movimiento orbital es una opción cuando es necesario una orientación angular entre elementos [1].
Soldadura por fricción lineal	Consiste en rozar un componente sobre la superficie del otro al utilizar un movimiento lineal oscilatorio. El movimiento se produce normalmente utilizando distancias de recorrido del orden de 1-3 [mm] y por consiguiente se genera un estado plástico en un cierto volumen de material (flash), que es desplazado hacia la periferia del material [12].
Soldadura por fricción angular	Emplea un movimiento de rotación reversible cíclico en el cual, una o ambas piezas en movimiento giran a través de un ángulo dado que es menor que una rotación completa [1].
Superficies de fricción orbital	Se consigue por el movimiento de rotación de una pieza de trabajo consumible a medida que recorre a través de la superficie de otra pieza de trabajo. La pieza de trabajo se encuentra perpendicular al eje de rotación de la pieza consumible [1].

(Fuente: [1], [12])

1.5. Aluminio

La materia prima para la obtención de aluminio es por excelencia la bauxita, misma que contiene en su mayoría óxido de aluminio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$), el proceso de obtención de aluminio puro inicia con el lavado y triturado de la bauxita hasta obtener polvo fino, posteriormente se utiliza el proceso Bayer, el cual consiste en manejar una solución de sosa cáustica (NaOH) y bauxita para precipitar el hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), el $\text{Al}(\text{OH})_3$ se calcina a continuación para formar alúmina (Al_2O_3), finalmente por un proceso de electrólisis realizado en una disolución de criolita (Na_3AlF_6) se obtienen los compuestos constituyentes de la alúmina, en el cátodo aluminio y en el ánodo oxígeno [13], [14].

1.5.1. Propiedades Físicas

El aluminio es el metal más abundante de la corteza terrestre; se cristaliza en el sistema (FCC) lo que confiere una excelente capacidad para ser deformado [15]. Se trata de un metal de color blanco ligeramente azulado, su peso equivale a la tercera parte del acero. Es un metal muy maleable y muy dúctil, pudiéndose obtener en hilos finos y en hojas muy delgadas para la fabricación de cables eléctricos, pero no como elemento estructural [16]. Para mejorar estas propiedades se alea con otros metales, principalmente magnesio, manganeso, cobre, cinc y silicio [17].

Tabla 1.2. Propiedades físicas del aluminio.

Símbolo	Al
Número atómico	13
Peso atómico	26,98
Densidad [g/cm ³]	2,69
Punto de Fusión [°C]	650
Módulo de elasticidad [MPa]	70
Calor Específico [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	917
Conductividad Térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]	238
Resistividad Eléctrica a 20°C [μohm m]	2,67

(Fuente: [13], [16])

1.5.2. Propiedades Químicas

La capa de valencia del aluminio está poblada por tres electrones, por lo que su estado normal de oxidación es III. Esto hace que reaccione con el oxígeno de la atmósfera formando con rapidez una fina capa gris mate de alúmina Al₂O₃, que recubre el material, aislándolo de posteriores corrosiones. Esta capa puede disolverse con ácido cítrico. A pesar de ello es tan estable que se usa con frecuencia para extraer otros metales de sus óxidos. Por lo demás, el aluminio se disuelve en ácidos y bases. Reaccionan con facilidad con el ácido clorhídrico y el hidróxido sódico [18].

1.5.3. Aplicaciones

El aluminio es uno de los metales más fáciles de formar, por esa razón es muy apreciable [14]. En el campo de propiedades del aluminio en forma de numerosas aleaciones para fundición, laminación y forja, así como los procesos de conformación, unión tratamiento superficial adecuados a cada aplicación, explica las múltiples aplicaciones de este metal alcanzando en la actualidad en la construcción de vehículos aparatos de cirugía, contenedores criogénicos, motores de explosión, utensilios así como en otras industrias [19].

1.6. Latón

El latón es una aleación de cobre (constituyente principal) y cinc. Ocasionalmente contiene pequeñas cantidades de otros elementos (Al, Sn, Pb o As). Por ejemplo, la adición de plomo (1% a 2%) mejora la calidad de mecanizado del latón. Tiene una mayor resistencia que la del cobre, pero tiene una conductividad térmica y eléctrica menor. Las aleaciones de latón son muy resistentes a la corrosión atmosférica y pueden soldarse fácilmente [20].

1.6.1. Propiedades Físicas

El latón es una aleación de cobre y cinc. Se trata básicamente de una aleación binaria de cobre con hasta un 50% de cinc [21].

Posee buenas características eléctricas y térmicas, resistencia a la corrosión, excelente para trabajos de maleabilidad y ductilidad, por lo cual se utiliza para recubrimiento en tuberías de agua y otros fluidos, deformaciones en frío y estampación en caliente por su buena plasticidad [22].

Tabla 1.3. Propiedades físicas del latón.

Densidad [g/cm ³]	8,44
Punto de Fusión [°C]	980
Módulo de elasticidad [MPa]	46
Calor Específico [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	393
Conductividad Térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]	119,4
Resistividad Eléctrica a 20°C [μohm m]	0,158

(Fuente: [21], [22])

1.6.2. Aplicaciones

Las aplicaciones típicas de latón en el campo de la ingeniería mecánica son tubos de condensador del intercambiador de calor, núcleo del radiador, remaches, vástagos de válvulas y soldadura [23]. Así mismo su uso puede ser para la fabricación de accesorios para calderas como válvulas de vapor [24].

1.7. Temperatura de recristalización

La recristalización se caracteriza por una temperatura definida (T_{rec}) como la menor temperatura de calentamiento en la que es posible la nucleación de nuevos granos. La

temperatura de recristalización de un metal constituye una cierta fracción de su temperatura de fusión (T_{mp}) [25].

$$T_{rec} = a * T_{mp}$$

Ecuación 1.1. Temperatura de recristalización.
(Fuente: [25])

Donde:

a: coeficiente que depende de la pureza del metal y del grado de deformación plástica.

El valor de “a” se obtiene mediante las siguientes consideraciones:

- Para metales con un alto porcentaje de pureza, “a” = 0,3-0,4. La reducción de la concentración de impurezas puede disminuir el coeficiente a 0,1-0,2.
- Para soluciones sólidas, “a” = 0,5-0,6 y puede alcanzar 0,7-0,8 en la disolución de metales de alto punto de fusión.

Para Al, Cu y Fe comercialmente puro, las temperaturas más bajas de recristalización son iguales a 220 ° C, 470 ° C y 550 ° C respectivamente [25].

Además, la temperatura de recristalización está relacionada con:

- Mayor cantidad de deformación previa, menor temperatura para iniciar la recristalización, debido a que habrá mayor distorsión y más energía interna disponible.
- Mayor tiempo de recocido disminuye la T_{rec} [26].

2.2. Probetas de ensayo

Los materiales utilizados en el presente estudio son probetas de aluminio 6061 y latón C38500 provenientes de la comercializadora IVAN BOHMAN C.A., debido a la facilidad de adquisición en el mercado y propiedades de los mismos.

La aleación 6061 es un material de endurecimiento por precipitación que pertenece a la serie 6xxx, contiene principalmente magnesio (0,6% a 1,2% en peso) y silicio (0,4% a 1.3% en peso). Se agrega manganeso o cromo a la mayoría de las aleaciones 6xxx para aumentar la fuerza y el control del tamaño de grano. El cobre también aumenta la resistencia de estas aleaciones, pero si está presente en cantidades superiores al 0,5% en peso reduce la resistencia a la corrosión [28].

Las características más importantes de la serie 6xxx son:

- Tratable térmicamente.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Excelente extrudabilidad.
- Buena capacidad de soldadura, buen acabado superficial y buenas propiedades mecánicas.
- Rango típico de resistencia a la tracción: 124-400 MPa (18-58 ksi).
- Soldada fácilmente por soldadura de arco de metal de gas y métodos de soldadura por arco de tungsteno de gas [28], [29].

El latón C38500 (ASTM B455) es una aleación de cobre de buena ductilidad y maquinabilidad por la adición de plomo. Por su alto contenido de cinc se puede utilizar en trabajos en caliente [30]. Se consideran buenas impurezas el estaño, aluminio, níquel y hierro debido a que benefician las propiedades mecánicas o favorecen la resistencia a la corrosión como el níquel, aluminio y estaño, siendo por el contrario perjudiciales el azufre, cadmio, arsénico, bismuto, antimonio, fósforo, magnesio y silicio [31].

Las características más importantes del latón C38500 son:

- No es adecuado para aplicaciones de estampado en frío, embutido y troquelado.
- Buena capacidad de doblado, maquinado y estampado en caliente.
- Resistencia a la tracción: 414 MPa (60 ksi) [30], [32].

Dentro de las aplicaciones más importantes del latón se encuentra tubos para agua, aire acondicionado o refrigerador, enfriador de aceite, placas tubulares para

intercambiadores de calor y condensadores, aunque se debe tener en cuenta que es un material susceptible a la corrosión por descincificación, que consiste en la disolución de la aleación produciéndose una precipitación de cobre y óxidos de cobre, mientras que el cinc se disuelve en el electrolito, dejando una estructura frágil y porosa. La adición de hierro puede mitigar o bloquear la descincificación. En latones $\alpha+\beta$ el estaño permite aumentar la resistencia a ambientes marinos, aunque la corrosión de la fase β no puede evitarse [31], [33].

2.2.1. Dimensiones y disposiciones de las probetas

El corte de las diferentes disposiciones de las varillas se realiza mediante un torno con la aplicación de refrigerante para evitar incrementos de temperatura entre la herramienta y la varilla, además de facilitar la evacuación de virutas. Posteriormente con ayuda de lijas de agua se eliminan impurezas e irregularidades encontradas en las probetas. El procedimiento se realiza para asegurar que exista un buen contacto entre las superficies durante la fase de rozamiento.

Las disposiciones utilizadas durante la soldadura por fricción con y sin precalentamiento son de junta simple y junta de ranura o lengüeta, las cuales serán sometidas a ensayos mecánicos, dureza mediante microindentación y el estudio sobre el comportamiento a nivel microestructural.

Para las dimensiones de las probetas se toma en consideración a las limitantes geométricas de la máquina de soldadura, por lo tanto, se opta por facilidad de montaje y desmontaje, probetas con una longitud aproximada de 85 [mm] y un diámetro de 1/2 [pulg]. Estas dimensiones son consideradas tanto para las varillas de aluminio y latón como se muestran en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Probetas de latón (izquierda) y aluminio (derecha).
(Fuente: Propia)

La nomenclatura o codificación que se utiliza en la junta simple y de ranura para identificar las probetas en los estudios posteriores se detalla a continuación.

Tabla 2.1. Código de las juntas.

Junta de ranura o lengüeta		Junta simple	
Sin precalentamiento	Con precalentamiento	Sin precalentamiento	Con precalentamiento
1D	6D	1	6
2D	7D	2	7
3D	8D	3	8
4D	9D	4	9
5D	10D	5	10
-	11D	-	-

(Fuente: Propia)

Una vez identificada cada junta, se procede a tomar las dimensiones de las probetas de aluminio y latón con la ayuda de un calibrador pie de rey, tal como se muestra en la Tabla 2.2. y 2.3.

Así mismo para poder identificar cada una de las dimensiones de las probetas, se procede a nombrar cada cota como se muestra en la Figura 2.3. y 2.4.

Tabla 2.2. Dimensiones de las probetas de aluminio y latón para la junta de ranura o lengüeta.

Código	Aluminio				Latón			
	a	b	c	d	e	f	g	h
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1D	83,9	6,6	12,8	5,9	84	12,8	5,98	5,7
2D	84,4	8,2	12,8	5,92	84,5	12,8	6,0	7,0
3D	84,4	8	12,8	5,7	83,7	12,8	6,0	6,7
4D	82,9	7,2	12,8	5,8	84,5	12,8	6,0	6,5
5D	85	7,92	12,8	5,98	85,0	12,8	6,0	5,8
6D	80,3	4,1	12,8	6,2	80,3	12,8	6,24	4,0
7D	79,8	4,0	12,8	6,2	80,2	12,8	6,22	4,2
8D	83,9	6,5	12,8	5,96	86,7	12,8	6,3	5,6
9D	85	7,96	12,8	5,88	86	12,8	5,9	7,1
10D	83,3	7,3	12,8	5,98	84,9	12,8	6,0	6,5
11D	80,2	3,82	12,8	6,2	80,3	12,8	6,24	4,0

(Fuente: Propia)

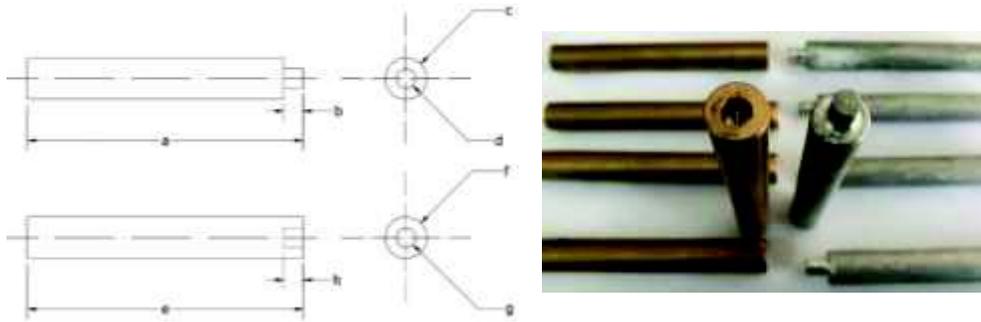


Figura 2.3. Geometría de las probetas de aluminio y latón para la junta de ranura o lengüeta.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.3. Dimensiones de las probetas de aluminio y latón para la junta simple.

Código	Aluminio		Latón	
	j	k	l	m
	mm	mm	mm	mm
1	84,1	12,8	84,1	12,8
2	83,9	12,8	83,7	12,8
3	84,5	12,8	84,1	12,8
4	84,2	12,8	83,9	12,8
5	83,7	12,8	84,9	12,8
6	87,8	12,8	87,1	12,8
7	83,6	12,8	85,0	12,8
8	84,0	12,8	84,5	12,8
9	87,1	12,8	87,3	12,8
10	85,3	12,8	85,4	12,8

(Fuente: Propia)

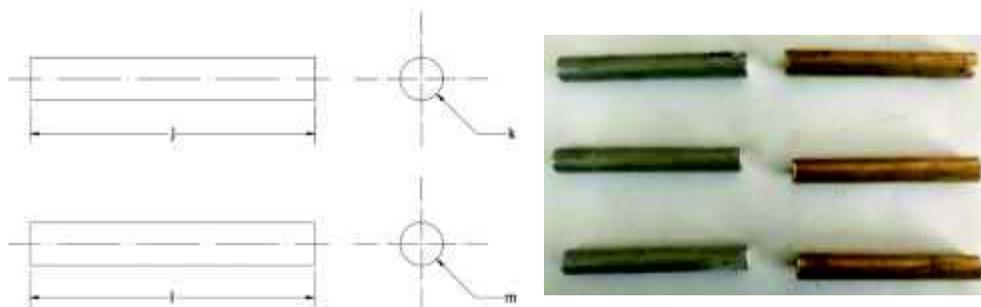


Figura 2.4. Geometría de las probetas de aluminio y latón para la junta simple.
(Fuente: Propia)

2.2.2. Preparación de las juntas

Con la finalidad de no afectar la calidad de la soldadura, las superficies de unión deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- Estar libres de suciedad, óxidos o incrustaciones, grasas, aceite y otros agentes externos.
- Verificar que las superficies a soldar sean perpendiculares al eje de rotación para evitar la desalineación de la unión.
- Evitar agujeros en las superficies ya que estos pueden atrapar aire o impurezas en la zona de unión.
- No usar agentes de limpieza que puedan contribuir a la rápida aparición de contaminantes [11].

2.3. Equipos para el proceso de soldadura

Para realizar el proceso de soldadura se utiliza la máquina para soldar por fricción que se encuentra en el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. La máquina para soldar por fricción permite variar parámetros básicos como: la velocidad de rotación, las presiones de calentamiento y forja.



Figura 2.5. Máquina de soldadura por fricción de conducción directa/continua.
(Fuente: Propia)

Además, cabe mencionar otros parámetros básicos como: el encogimiento axial y el tiempo total de soldadura se registra de manera manual con un calibrador y con un cronómetro digital externos a la máquina.

Para garantizar un correcto proceso de soldadura se inspecciona el funcionamiento del equipo en todos los sistemas que lo componen (mecánico, eléctrico e hidráulico).

El sistema mecánico cuenta con un sistema de poleas que permite regular las velocidades de rotación de la máquina, mandriles de sujeción (fijo y móvil) encargados de sujetar a las probetas y el sistema de frenado, siendo este último de gran importancia para garantizar una correcta unión de los materiales. Se debe verificar que no exista un deslizamiento entre las poleas y la banda en el momento de puesta en marcha para así garantizar que la velocidad sea la seleccionada. Además, se debe garantizar un buen agarre por parte de las tenazas de los mandriles, para que no exista un deslizamiento de las probetas al momento de ejercer la fuerza de forja.

El sistema eléctrico debe garantizar:

- Una óptima alimentación de energía al motor de la máquina.
- La seguridad para que el operario de la misma no esté expuesto a riesgos eléctricos.

Finalmente, el sistema hidráulico, es el encargado de suministrar las fuerzas necesarias (calentamiento y forja) para obtener una correcta unión en las probetas, asimismo se debe garantizar un correcto funcionamiento del manómetro y que no existan fugas de aceite.

2.4. Relación entre los parámetros

La relación entre las ecuaciones mostradas a continuación se aplica únicamente para la fase de rozamiento, la cual implica fricción de deslizamiento en seco o velocidad relativa entre las superficies de contacto [34]. Además de considerar las siguientes suposiciones:

- Las probetas de trabajo son varillas cilíndricas sólidas.
- La forma de las probetas no cambia a lo largo de la etapa de soldadura.
- Para la soldadura por fricción se utilizó una disposición básica, es decir, una pieza de trabajo gira mientras que la otra permanece estacionaria.
- La fuerza de fricción se aplica a las piezas de trabajo mediante un pistón hidráulico.
- La presión de fricción se extiende homogéneamente en la interfaz de las partes giradas y no giradas.
- Hay diferentes torsiones circunferenciales y flujos de calor debido a la fricción a lo largo del eje de rotación en las interfaces de las piezas de trabajo [35], [36].

2.4.1. Torque y energía térmica producida sobre la superficie de la soldadura

El calor producido y su variación se pueden determinar con respecto a las características operativas y las dimensiones de la pieza [36]. Para comenzar el análisis, se comienza con un área diferencial como se indica en la Figura 2.6.

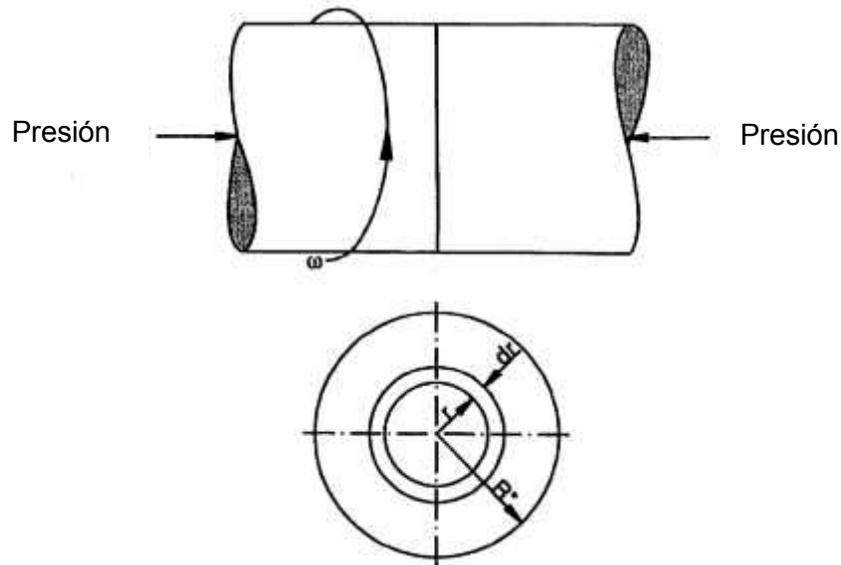


Figura 2.6. Disposición esquemática de soldadura por fricción de una barra sólida.
(Fuente: [37])

El área de r a dr puede ser expresada como:

$$dA = 2 * \pi * r * dr$$

Ecuación 2.1. Área de la probeta.
(Fuente: [38])

La fuerza normal que actúa sobre el área es:

$$dN = P * dA = 2 * \pi * r * P * dr$$

Ecuación 2.2. Presión normal que actúa sobre el área dA .
(Fuente: [38])

Donde:

P: Presión de contacto normal (presión axial).

La fuerza de fricción es directamente proporcional a la fuerza normal por el coeficiente de fricción, es decir:

$$dF_{fric} = \mu * dN = \mu * P * 2 * \pi * r * dr$$

Ecuación 2.3. Fuerza de fricción.
(Fuente: [35], [36], [38])

Donde:

μ : Coeficiente de fricción.

El momento resultante de la fuerza de fricción es:

$$dM = r * dF_{fric} = 2 * \mu * P * \pi * r^2 * dr$$

Ecuación 2.4. Momento resultante.
(Fuente: [38])

La tasa de generación de calor total G está dado por:

$$G = Q_f + Q_p$$

Ecuación 2.5. Tasa de generación de calor G.
(Fuente: [39])

Donde:

Q_f : Tasa de generación de calor.

Q_p : Tasa de generación de calor debido a la deformación plástica.

La energía térmica producida puede ser expresada como:

$$dQ_f = w * dM = 2 * w * \mu * P * \pi * r^2 * dr$$

Ecuación 2.6. Energía térmica producida.
(Fuente: [35])

Donde:

w: Velocidad angular [rpm].

La tasa de generación de calor debido a la deformación plástica:

$$Q_p = \eta * \sigma * \dot{\epsilon}$$

Ecuación 2.7. Tasa de generación de calor debido a la deformación plástica.
(Fuente: [39])

Donde:

η : Fracción de calor inelástica.

σ : Esfuerzo efectivo.

$\dot{\epsilon}$: Tasa de deformación plástica.

La tasa de generación de calor debido a la deformación plástica no es evaluada en el presente estudio debido a que únicamente se considera la fase de rozamiento y según las suposiciones solo existe fricción por deslizamiento en seco.

Al integrar de 0 a R, se obtiene las siguientes ecuaciones para la superficie de soldadura:

Tabla 2.4. Ecuaciones para la superficie de soldadura.

Nombre	Ecuación
Fuerza normal [N]	$N = \pi * P * R^2$
Fuerza de fricción [N]	$F_{fric} = \pi * \mu * P * R^2$
Momento [N-m]	$M = \frac{2}{3} * \pi * \mu * P * R^3$
Calor producido en unidad de tiempo sobre la superficie de soldadura [W].	$Q_f = \frac{2}{3} * \pi * \mu * P * w * R^3 = w * M$

(Fuente: Propia)

La generación de calor en la interfaz durante la soldadura de fricción de accionamiento continuo en ausencia de fusión de asperezas (q) se puede obtener por medio de la ley de fricción convencional de Coulomb:

$$\tau_f = \mu * P$$

Ecuación 2.8. Ley de fricción convencional de Coulomb.
(Fuente: [40])

Donde:

τ_f : Esfuerzo cortante de fricción.

μ : Coeficiente de fricción.

P: Presión de contacto normal (presión axial).

La Ecuación 2.8. solo se aplica al comienzo de la soldadura, cuando la temperatura de la interfaz es relativamente baja [40].

Cuando se tiene altas temperaturas y la fricción visco-plástica es dominante en las interfaces, se aplica la ley modificada de Coulomb.

$$\tau_f = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$$

Ecuación 2.9. Ley modificada de Coulomb.
(Fuente: [40])

Donde:

σ_s : Esfuerzo de flujo equivalente.

El flujo de calor (q) generado por la fricción entre las dos muestras cargadas que se frotran juntas con la velocidad de deslizamiento V_{max} relativa se puede expresar como:

$$q = \tau_f * V_{max} = \mu * P * V_{max} = \mu * P * w * r$$

Ecuación 2.10. Flujo de calor producido en cualquier punto a la distancia r del eje de rotación [W/m²].
(Fuente:[35], [41])

Donde:

V_{max} : Velocidad máxima de la superficie en el borde exterior.

Desafortunadamente, el coeficiente de fricción no es una constante durante todo el proceso y depende de varios factores. Estos son:

- La velocidad relativa de movimiento de las superficies de fricción.
- La temperatura de las superficies de fricción.
- La naturaleza del material y la presencia de películas de superficie.
- La magnitud de la fuerza de presión normal.
- La rigidez y elasticidad de las superficies de fricción [38].

El coeficiente de fricción claramente no se puede definir como un solo valor. Dar una expresión para una ecuación gobernante para el factor de fricción sería extremadamente complicado. Además, el coeficiente de fricción depende de la temperatura, es decir, la liberación de calor depende del factor de fricción [38].

Comprender la soldadura por fricción desde un sentido analítico rápidamente se vuelve muy difícil y las pruebas físicas probablemente sean la mejor manera de resolver este problema [38].

2.4.2. Parámetros estimados para la soldadura

Almeida (1989) concluye que para soldar materiales disímiles se debe considerar los parámetros de soldadura en base al material de menor dureza, siendo en este caso el aluminio.

Srija y Chennakesava (2015) en su trabajo con materiales disímiles Aluminio 2024 - Latón C23000 recomienda utilizar velocidades de rotación relativamente bajas y las presiones de trabajo constantes, mientras que Almeida (1989) en estudios de materiales similares a este trabajo recomienda el tiempo total de soldadura y presión de forja. Los parámetros estimados para este estudio se detallan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Parámetros estimados para la soldadura.

Parámetros	Valor estimado	Unidades
Velocidad de rotación (n)	1000	rpm
Fuerza de calentamiento (F_1)	500	kgf
Fuerza de forja (F_2)	1500	kgf
Tiempo total de soldadura (t_t)	20	s

(Fuente: Propia)

Arguello (1987) realizó el diseño y construcción de una máquina para soldar por fricción que posee una variedad de velocidades mediante un sistema de poleas existentes, siendo 2500 [rpm] la velocidad de trabajo más baja que se puede obtener, por lo cual es necesario reducir la velocidad de rotación acorde a este estudio.

Amaguayo y Sánchez (2017) para el estudio de la soldadura Cobre electrolítico – Aluminio 6063 adaptaron una polea de 16 [in] de diámetro al eje conducido para reducir la velocidad de salida a 1300 [rpm]. Como el eje conductor posee un cinturón de poleas como se observa en la Figura 2.5., la banda en “V” se coloca en la polea de 3,5 [pulg] para obtener la velocidad de rotación deseada para este estudio.

Los parámetros mostrados en la Tabla 2.5. se aplican para la soldadura sin precalentamiento. Para la soldadura con precalentamiento se utilizan tanques de acetileno y oxígeno para obtener una llama oxidante con el fin de evitar la aparición de carbono en la interfaz durante la metalografía. Además, se utiliza un mayor tiempo de soldadura (aproximadamente 29 segundos) y distintas fuerzas de fricción y forja.

2.5. Ensayo de tracción

Para el ensayo de tracción de las diferentes juntas soldadas se utiliza la máquina universal computarizada Tinius Olsen SUPER L-120 localizada en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la Facultad de Ingeniería Mecánica, tal como se muestra en la Figura 2.7.

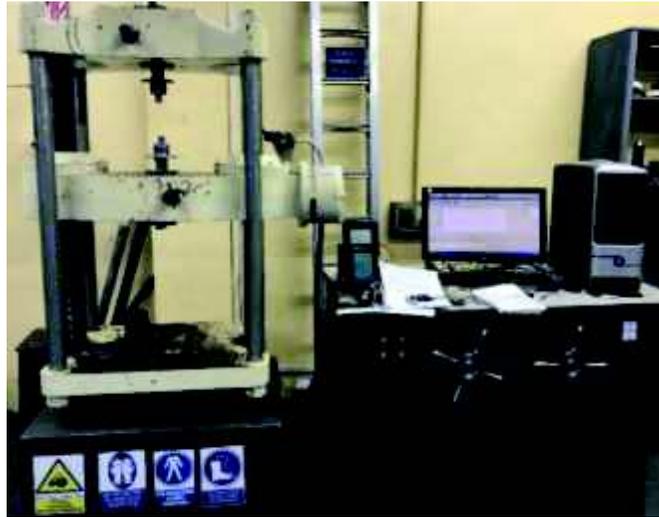


Figura 2.7. Máquina universal de ensayo computarizada.
(Fuente: Propia)

2.5.1. Evaluación del material base

El material base es evaluado para conocer sus propiedades mecánicas. Según la norma ASTM E8/E8M-16 se mecanizaron las muestras de acuerdo a las dimensiones mostradas a continuación:

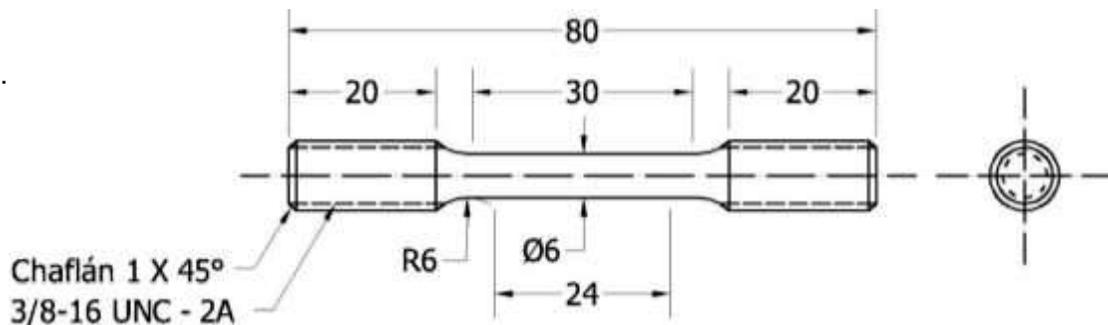


Figura 2.8. Probeta para ensayos de tracción (Todas las dimensiones están en milímetros a excepción de la rosca).
(Fuente: [42])

La Figura 2.9. muestra las probetas de latón y aluminio mecanizadas según la norma ASTM E8.



Figura 2.9. Probetas para ensayo de tracción: latón C38500 (izquierda) – aluminio 6061 (derecha).
(Fuente: Propia)

La parte ensayada es el cuerpo central, por lo cual se deben marcar dos puntos sin dañar la probeta, a una distancia "l" (Figura 2.10.), con la finalidad de medir el alargamiento después de la ruptura [43]. La longitud entre marcas se encuentra disponible en la norma ASTM E8 o puede ser calculada mediante la Ecuación 2.11.

$$l = K * 0,886 * d = K * \sqrt{S}$$

Ecuación 2.11. Longitud entre marcas.
(Fuente: [43])

Donde:

d: diámetro del cuerpo central (en probetas de sección circular).

S: sección del cuerpo central (en probetas de cualquier forma de la sección transversal).

K: coeficiente que varía de acuerdo a la proveniencia del modelo de la probeta (norteamericana, inglesas, francesas, alemanas, etc.).

Como la probeta maquinada proviene de normas americanas, el valor de K corresponde a 4,510.

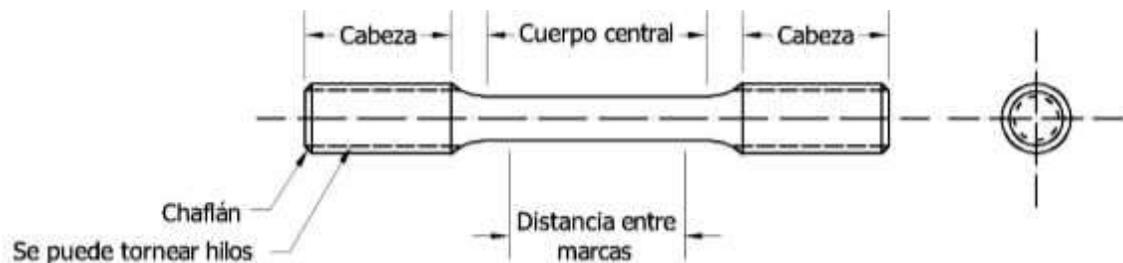


Figura 2.10. Partes de la probeta de tracción.
(Fuente: [43])

2.5.2. Evaluación de las juntas soldadas

El ensayo de tracción se realiza directamente sobre la junta soldada, sin emplear probetas según la norma ASTM E8 debido a la cantidad, los tipos de disposiciones

utilizadas para este estudio y al desalineamiento de las juntas ocasionado por las vibraciones durante el proceso de soldadura. Sin embargo, se elimina el material plásticamente deformado (flash) presente en la soldadura por medio del torneado.



Figura 2.11. Eliminación del flash (izquierda) y ensayo de tracción (derecha).
(Fuente: Propia)

Para el ensayo de tensión se selecciona las juntas mostradas en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Juntas para ensayo de tracción.

Junta de ranura o lengüeta		Junta simple	
Sin precalentamiento	Con precalentamiento	Sin precalentamiento	Con precalentamiento
2D	6D	1	7
3D	7D	3	8
4D	11D	4	9

(Fuente: Propia)

2.6. Metalografía

2.6.1. Selección y preparación de las muestras

Para iniciar la observación microscópica, se debe evitar la presencia de irregularidades y agentes externos con el fin de observar únicamente en el microscopio detalles propios de la estructura.

La preparación de las muestras metalográficas se basa en la norma ASTM E3-11 (2017) (Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens).

Para la selección de las muestras, se escogen las juntas soldadas que presentan mayores variaciones en el lugar de unión. En este caso se selecciona las juntas de la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Juntas seleccionadas para metalografía.

Junta de ranura o lengüeta		Junta simple	
Sin precalentamiento	Con precalentamiento	Sin precalentamiento	Con precalentamiento
1D	8D	2	6
5D	9D	5	10
-	10D	-	-

(Fuente: Propia)



Figura 2.12. Selección y corte de las juntas.
(Fuente: Propia)

El corte de las juntas se realiza acorde a las dimensiones del sujetador de las probetas de la máquina de pulir (FORCIMAT) que es aproximadamente 35 [mm] (Figura 2.12.).

2.6.2. Desbaste grueso

La superficie a pulir primero se desbasta con lija de lona número 100 hasta lograr una superficie plana que permita la facilidad del montaje en la resina y con adición de agua se remueve las partículas, además de actuar como refrigerante, tal como se muestra en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Desbaste grueso.
(Fuente: Propia)

2.6.3. Montaje en resina

El montaje en resina permite manipular con mayor facilidad las muestras durante el pulido fino, análisis metalográfico y ataque químico. Para la preparación de la resina se mezcla resina poliéster, cobalto 12% y meck peróxido, la cual se deposita dentro de un molde (previamente colocado aceite en las paredes interiores) que se encuentra sujeto a la base con pegamento (Figura 2.14.).



Figura 2.14. Montaje de las muestras en resina.
(Fuente: Propia)

2.6.4. Pulido fino

El pulido de las superficies desbastadas se realiza pasando sucesivamente las muestras por abrasivos más finos. Para lograr este proceso se utiliza los equipos FORCIPOL, FORCIMAT y la máquina de pulido mostrados en la Figura 2.15.



Figura 2.15. Equipos FORCIMAT, FORCIPOL (izquierda) y máquina de pulido (derecha).
(Fuente: Propia)

Los equipos son utilizados de acuerdo al orden que se indica en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Condiciones de trabajo del proceso de pulido.

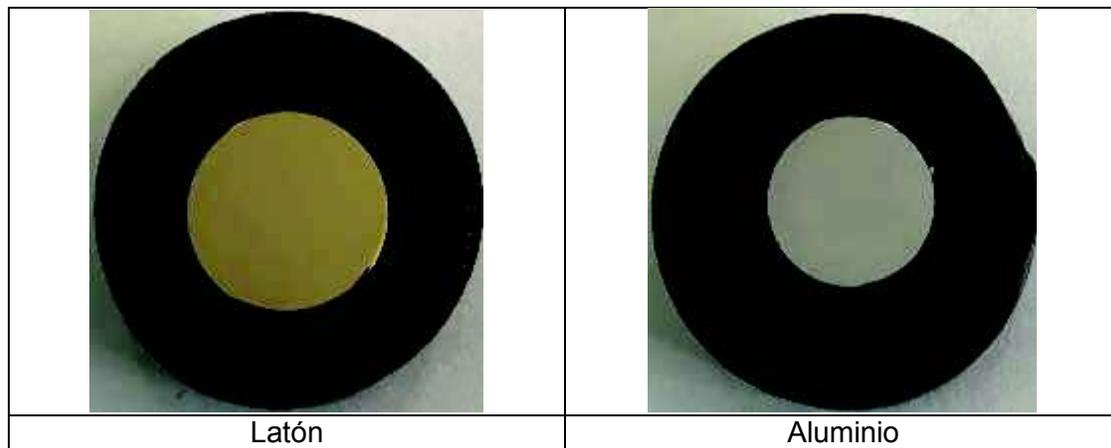
No. de proceso	No. de pasadas	Equipo	Condiciones de trabajo	Materiales	Refrigerante	Tiempo
1	3	FORCIPOL	300 [rpm]	Lijas de agua No. 240	Agua	1 minuto
		FORCIMAT	125 [rpm] 15 [N]			
2	2	FORCIPOL	300 [rpm]	Lijas de agua No. 1200	Agua	30 segundos
		FORCIMAT	125 [rpm] 15 [N]			
3	2	FORCIPOL	160 [rpm]	Paño	Alúmina cada 20 segundos	30 segundos
		FORCIMAT	125 [rpm] 12 [N]			
	1	FORCIPOL	160 [rpm]	Paño	Alúmina cada 20 segundos	30 segundos
		FORCIMAT	125 [rpm] 20 [N]			
4	Varias veces	Máquina de pulido	Manual	Paño	Agua	Hasta lograr un superficie tipo espejo
5	1	FORCIPOL	155 [rpm]	Paño de 1 micra	Suspensión de diamante de 1 micra	2 minutos
		FORCIMAT	125 [rpm] 15 [N]			

(Fuente: Propia)

2.6.5. Microscopia metalográfica

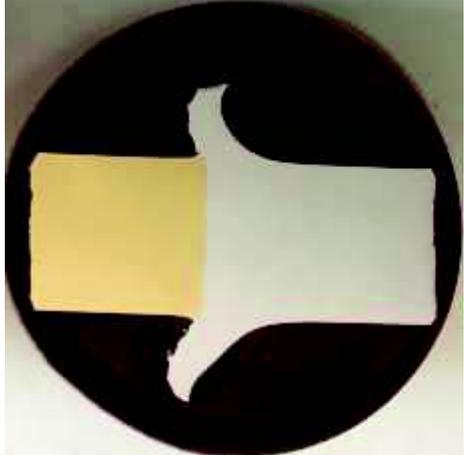
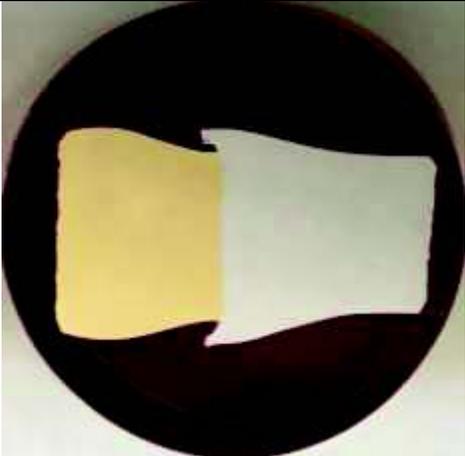
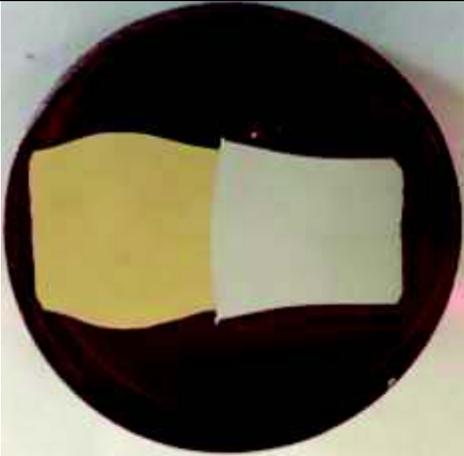
Una vez logrado la superficie tipo espejo como se muestra en las Tabla 2.9. - 2.11. se procede a la microscopia metalográfica con y sin ataque químico, con el fin de conocer las propiedades físicas y mecánicas que tendrá tanto el material base como las juntas soldadas.

Tabla 2.9. Muestras para microscopia del material base.



(Fuente: Propia)

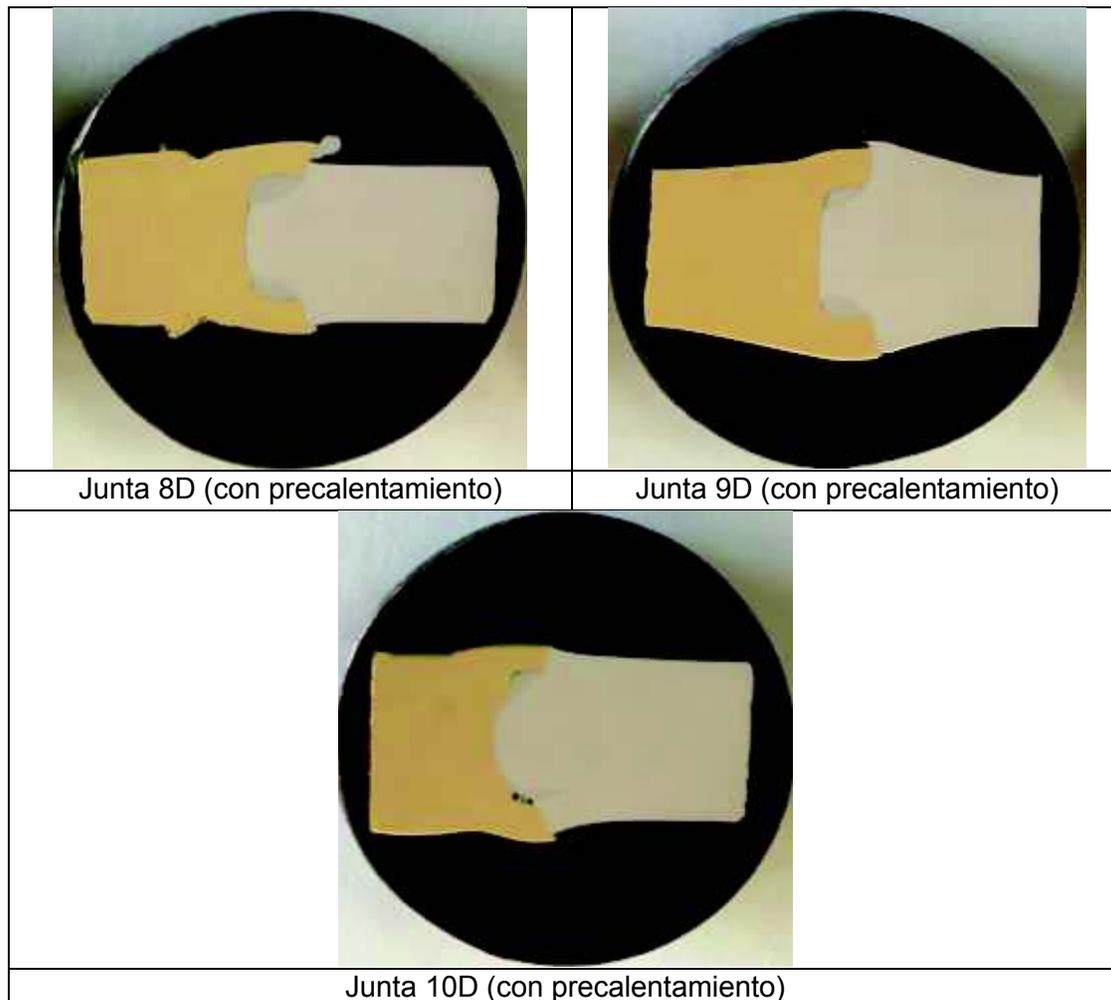
Tabla 2.10. Muestras para microscopia de junta simple.

	
Junta 2 (sin precalentamiento)	Junta 5 (sin precalentamiento)
	
Junta 6 (con precalentamiento)	Junta 10 (con precalentamiento)

(Fuente: Propia)

Tabla 2.11. Muestras para microscopia de junta de ranura o lengüeta.

	
Junta 1D (sin precalentamiento)	Junta 5D (sin precalentamiento)



(Fuente: Propia)

Para el estudio de la unión aluminio-latón, se utiliza el microscopio metalográfico OLYMPUS GX41 (Figura 2.16.), en el cual, se observa cada muestra en aumentos de 100x, 500x y 50x para observar zonas que poseen variaciones significantes. Por medio del software Stream Essentials se extrae las imágenes más relevantes, con la finalidad de analizar las características de los componentes soldados por fricción.



Figura 2.16. Microscopio metalográfico OLYMPUS GX41.
(Fuente: Propia)

La preparación de los reactivos para el ataque químico se realiza según la norma ASTM E407-07 (Standard Practice for Microetching Metals and Alloys), la cual indica el tipo de químico a utilizar en los diferentes metales y sus aleaciones. Para el aluminio correspondiente a la serie 6xxx se utiliza Keller, mientras que para el latón un reactivo para Cu y aleaciones. La Tabla 2.12. muestra la forma de ataque realizadas al material base y a las muestras seleccionas para la microscopia.

Tabla 2.12. Descripción del ataque químico.

Material a atacar	No. de pasadas	Reactivo	Materiales	Tiempo de exposición	Descripción
Aluminio	-	Keller	Algodón Alcohol	90 a 120 segundos	La muestra se sumerge en Keller por 30 [s], luego se retira para limpiar con agua y alcohol utilizando algodón. Este procedimiento se repite hasta llegar al tiempo establecido.
Latón	1	Para Cu y aleaciones	Hisopo Algodón Alcohol	1 a 2 segundos	El hisopo es sumergido en el reactivo para luego realizar una pasada rápida por la superficie a analizar. Posteriormente se limpia la zona afectada con agua y alcohol utilizando algodón.

(Fuente: Propia)

2.7. Microdureza

El ensayo se realiza bajo la norma ASTM E384 (Standard test method for microindentation hardness of materials), cuyos parámetros son: microindentación con una carga de 25 a 1000 [gf], aplicación de la carga de 2 a 15 segundos con una tolerancia de ± 2 segundos, dependiendo del material y la dificultad que presente la visualización de la huella dejada por el indentador en la superficie de estudio. Además, se especifica las condiciones de la superficie de la muestra para garantizar los resultados, como la total limpieza sobre las áreas de ensayo y la correcta posición en la máquina de ensayos colocando una superficie paralela al soporte para tener una penetración perpendicular del indentador [44].

La dureza del aluminio y latón se obtiene realizando huellas de indentación a lo largo del eje axial de cada material por medio del microdurómetro marca Metkon (Figura 2.17.)

y se analiza las huellas dejadas por el indentador de diamante por medio del programa Kameram, el cual permite obtener la distancia de las diagonales y la dureza del material.



Figura 2.17. Microdurómetro marca Metkon.
(Fuente: Propia)

Para la correcta determinación del número de dureza Vickers se debe considerar:

- La superficie del material a ensayar debe tener el mínimo de distorsiones (suficientemente pulida), además de utilizar refrigerantes adecuados durante el maquinado para evitar endurecimientos de la probeta.
- El microdurómetro debe estar ubicado en áreas libres de vibraciones.
- Las microindentaciones deben estar lo suficientemente distanciadas para evitar el endurecimiento por impresiones anteriores.
- Se debe tomar por lo menos cinco mediciones.
- El espesor de la probeta debe ser al menos 10 veces la profundidad de penetración [44],[46].

El análisis de microdureza se realiza en las seis muestras cuya información se detalla a continuación:

Tabla 2.13. Muestras para análisis de microdureza.

Código	Detalles
2	Junta simple; sin precalentamiento
6	Junta simple; con precalentamiento
1D	Junta de ranura; sin precalentamiento
10D	Junta de ranura; con precalentamiento
Aluminio	Material base
Latón	Material base

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos del material base (propiedades del material base) y posteriores al proceso de soldadura por fricción como: la fuerza de calentamiento y forja, encogimiento axial, propiedades mecánicas, dureza mediante microindentación y el estudio sobre el comportamiento a nivel microestructural. También se discute los resultados obtenidos mediante la utilización de los parámetros iniciales mostrados en la Tabla 2.5.

3.1. Resultados

3.1.1. Tiempo total de soldadura, fuerza de calentamiento - forja y temperatura de calentamiento y precalentamiento

Mediante el uso de un cronómetro, manómetro y pirómetro se obtiene el tiempo de soldadura, fuerza axial aplicada y temperatura respectivamente. Al comparar los valores obtenidos de la junta simple (Tabla 3.1.) y junta de ranura (Tabla 3.2.) con los parámetros estimados se puede apreciar que no son semejantes en su mayoría.

A continuación, se muestra los valores finales obtenidos del proceso de soldadura por fricción convencional.

Tabla 3.1. Valores obtenidos en el proceso de soldadura de junta simple.

Código	Tiempo de calentamiento (t ₁)	Tiempo de forja (t ₂)	Tiempo total (t _t)	Fuerza Calentamiento (F ₁)	Fuerza Forja (F ₂)	Temperatura	
	s	s	s	kgf	kgf	°C	
1	15	14	29	200	1100	De calentamiento	88
2	15	10	25	450	1100		89
3	13	12	25	300	1100		89
4	12	12	24	300	1300		85
5	11	15	26	400	1250		86
6	14	26	40	300	1500	De precalentamiento	258
7	13	17	30	0-100	800		209
8	11	21	32	0-100	1250		186
9	14	15	29	200	1500		208
10	19	25	44	100	1250		226

(Fuente: Propia)

Tabla 3.2. Valores obtenidos en el proceso de soldadura de junta de ranura o lengüeta.

Código	Tiempo de calentamiento (t ₁)	Tiempo de forja (t ₂)	Tiempo total (t _t)	Fuerza Calentamiento (F ₁)	Fuerza Forja (F ₂)	Temperatura	
	s	s	s	kgf	kgf	°C	
1D	25	25	50	250	1200	De calenta- miento	98
2D	15	13	28	350	1200		91
3D	13	16	29	200	1450		87
4D	13	14	27	200	650		84
5D	12	16	28	250	1000		89
6D	29	17	46	200	1950	De precalenta- miento	193
7D	19	9	28	200	450		201
8D	15	18	33	0-100	1800		325
9D	14	14	28	0-100	1000		205
10D	20	18	38	0-100	2150		272
11D	15	15	30	200	1250		200

(Fuente: Propia)

3.1.2. Pérdida de longitud total (burn-off)

El encogimiento axial se obtiene mediante la diferencia de las dimensiones iniciales de las probetas de aluminio – latón (Tabla 2.2., Tabla 2.3.) tomadas después del mecanizado y la longitud final de las juntas soldadas.

A continuación, se muestra los valores finales del encogimiento axial de junta simple (Tabla 3.3.) y de ranura (Tabla 3.4.).

Tabla 3.3. Encogimiento axial de junta simple.

Código	Longitud inicial aluminio	Longitud inicial latón	Longitud inicial total	Longitud final total	Encogimiento axial
	mm	mm	mm	mm	mm
1	87,8	87,1	174,9	169,6	5,3
2	83,9	83,7	167,6	158,8	8,8
3	84,5	84,1	168,6	157,0	11,6
4	84,2	83,9	168,1	158,7	9,4
5	83,7	84,9	168,6	158,4	10,2
6	87,8	87,1	174,9	156,1	18,8
7	83,6	85,0	168,6	154,8	13,8
8	84,0	84,5	168,5	156,0	12,5
9	87,1	87,3	174,4	167,5	6,9
10	85,3	85,4	170,7	161,8	8,9

(Fuente: Propia)

En la junta de ranura o lengüeta, la longitud inicial del aluminio es la diferencia entre la longitud total y la longitud de la lengüeta o pin. Por ejemplo, para la junta 1D:

$$\text{Long. inicial del aluminio} = a - b = 83,9 - 6,6 = 77,3 \text{ [mm]}$$

Tabla 3.4. Encogimiento axial de junta de ranura o lengüeta.

Código	Longitud inicial aluminio	Longitud inicial latón	Longitud inicial total	Longitud final total	Encogimiento axial
	mm	mm	mm	mm	mm
1D	77,3	84,0	161,3	152,5	8,8
2D	76,2	84,5	160,7	154,1	6,6
3D	76,4	83,7	160,1	155,9	4,2
4D	75,7	84,5	160,2	155,0	5,2
5D	77,1	85,0	162,1	152,1	10,0
6D	76,2	80,3	156,5	149,5	7,0
7D	75,8	80,2	156,0	144,1	11,9
8D	77,4	86,7	164,1	145,5	18,6
9D	77,0	86,0	163,0	145,2	17,8
10D	76,0	84,9	160,9	144,9	16,0
11D	76,4	80,3	156,7	149,7	7,0

(Fuente: Propia)

3.1.3. Ensayo de tracción

El ensayo mecánico se realiza con la finalidad de conocer la resistencia del material base y las juntas soldadas con y sin precalentamiento mediante la aplicación de dos cargas que tiene la misma dirección del eje de la junta, pero en sentido contrario.

La Tabla 3.5. muestra el resultado del material base aluminio y latón.

Tabla 3.5. Resultado de ensayo de tracción del material base aluminio y latón.

Código	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 25 [mm]
	mm	lbf	N	Ksi	Mpa	ksi	Mpa	
Aluminio (M1)	6,02	1514	6735	31,3	216	34,3	237	20,6
Aluminio (M2)	6,04	1477	6570	30,2	208	33,3	229	20
Latón (L1)	6,23	3810	16948	54,1	373	80,6	556	25,2
Latón (L2)	6,15	3320	14768	42,8	295	72,1	497	29,4

(Fuente: Propia)

La sujeción del material base se realizó mediante mordazas para probetas de cabeza redonda, roscada y tornillos debido a la geometría mecanizada según la norma ASTM E8.

La Tabla 3.6 y 3.7. muestran el resultado de las juntas soldadas.

Tabla 3.6. Resultado del ensayo de tracción en juntas sin precalentamiento.

Código	Diámetro post-soldadura		Carga máxima		Resistencia a la tracción	
	in	mm	lbf	N	ksi	MPa
Junta simple						
1	0,59	15,0	7650	34029	27,93	192,56
3	0,60	15,2	10350	46039	36,80	253,72
4	0,59	15,0	8700	38700	31,76	219,00
Junta de ranura o lengüeta						
2D	0,58	14,8	6030	26823	22,61	155,92
3D	0,55	14,0	6450	28691	27,03	186,38
4D	0,54	13,74	4340	19305	18,88	130,20

(Fuente: Propia)

Tabla 3.7. Resultado del ensayo de tracción en juntas con precalentamiento.

Código	Diámetro post-soldadura		Carga máxima		Resistencia a la tracción	
	in	mm	lbf	N	ksi	MPa
Junta simple						
7	0,63	15,9	8380	37276	27,23	187,73
8	0,64	16,3	11110	49420	34,35	236,83
9	0,63	16,1	3670	16325	11,63	80,19
Junta de ranura o lengüeta						
6D	0,59	14,9	4745	21107	17,56	121,05
7D	0,58	14,82	6800	30248	25,43	175,35
11D	0,60	15,2	6950	30915	24,71	170,37

(Fuente: Propia)

La sujeción de las juntas simples y de ranura se realizó mediante mordazas tipo cuña debido a la carencia de mecanizado de las juntas soldadas.

A continuación, las Figuras 3.1. - 3.4. muestran la relación entre la fuerza aplicada vs. tiempo de las juntas soldadas con y sin precalentamiento que poseen mayor resistencia a la tracción. Dichas curvas son obtenidas gracias a la filmación a tiempo real del manómetro durante toda la etapa de soldadura.

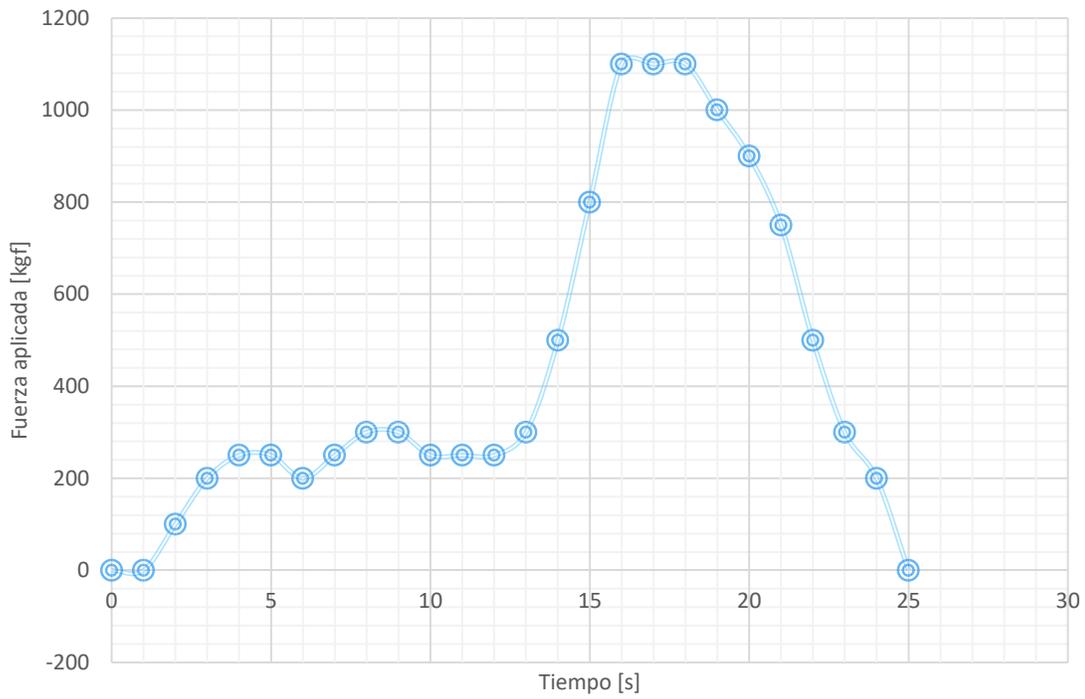


Figura 3.1. Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 3 (sin precalentamiento).
(Fuente: Propia)

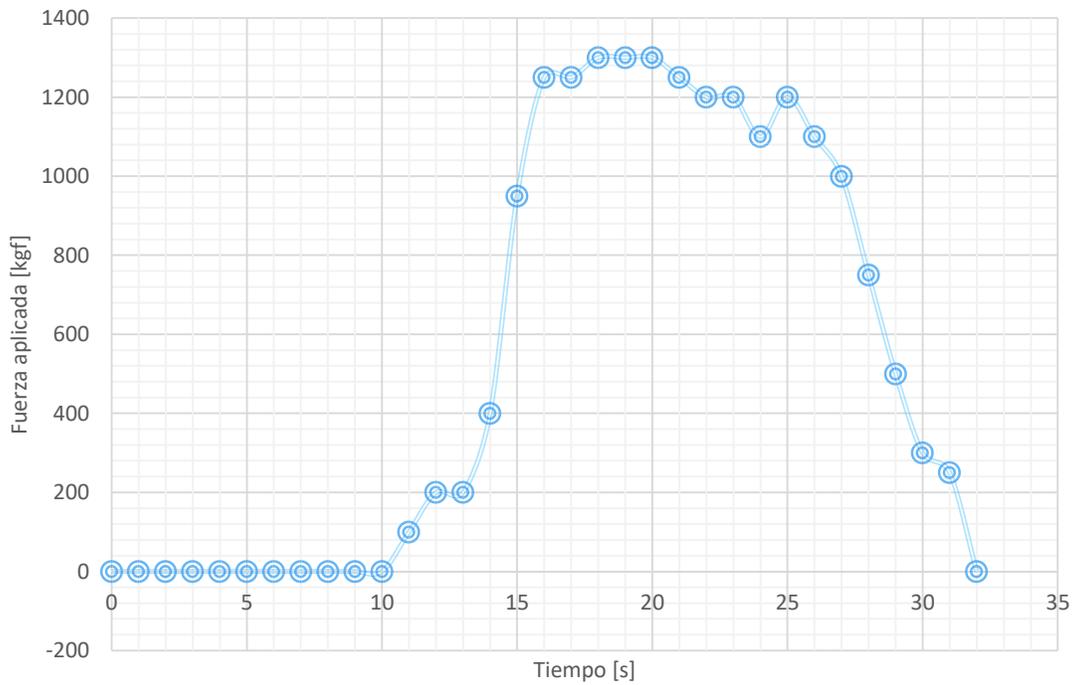


Figura 3.2. Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 8 (con precalentamiento); entre los 7 y 10 segundos la aguja varía entre 0 [kgf] y 100 [kgf].
(Fuente: Propia)

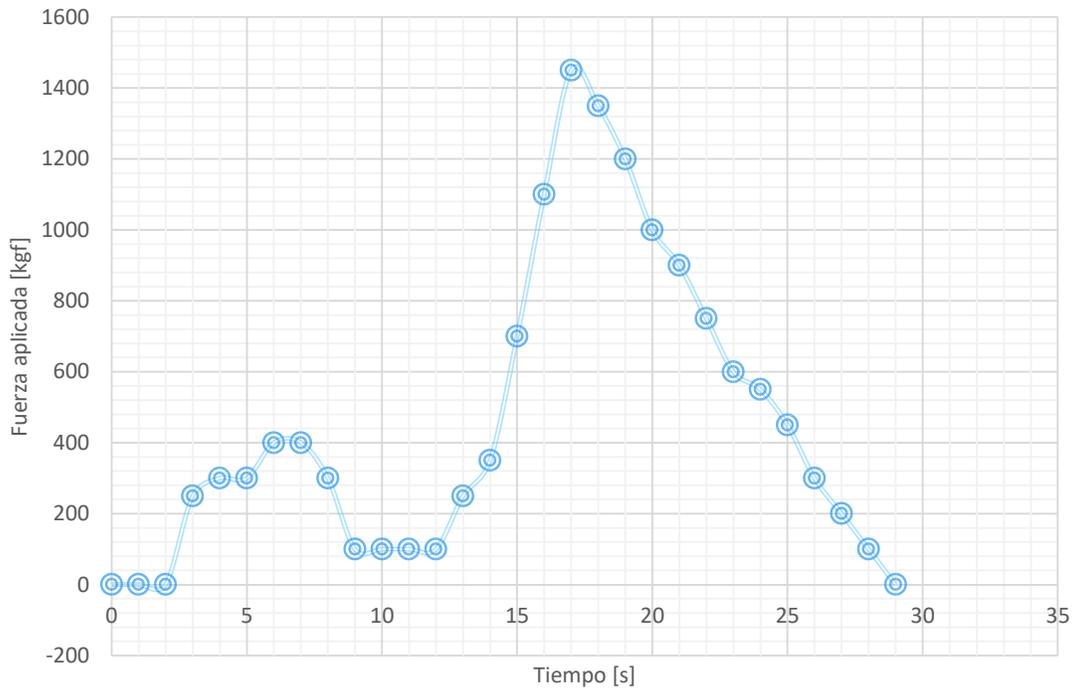


Figura 3.3. Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 3D (sin precalentamiento); a los 2 segundos la aguja varía entre 0 [kgf] y 100 [kgf].
(Fuente: Propia)

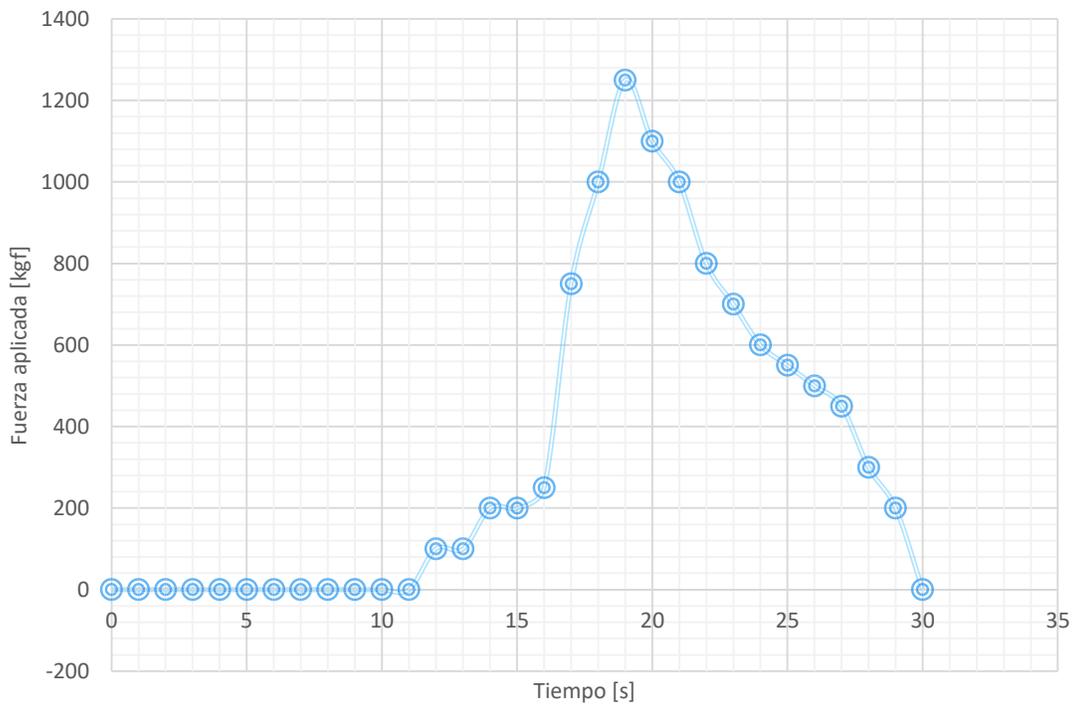


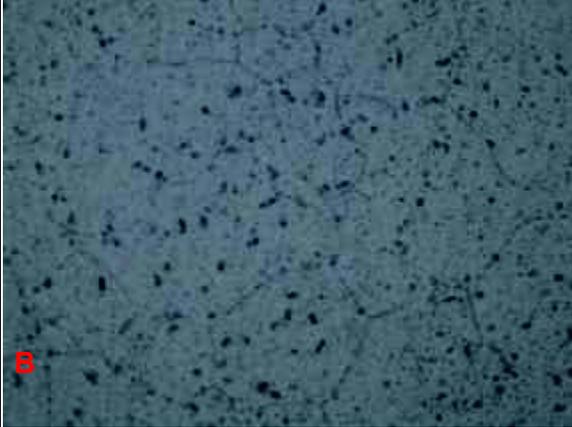
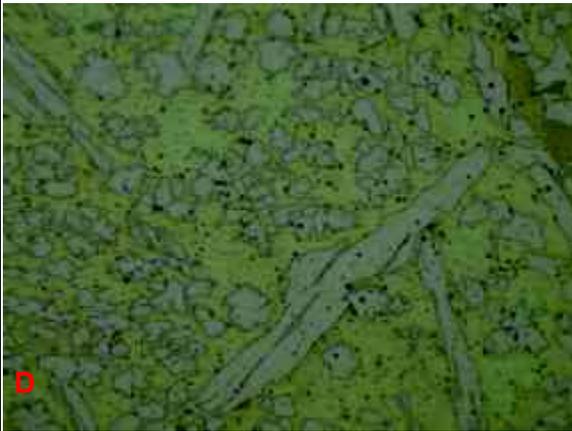
Figura 3.4. Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 11D (con precalentamiento).
(Fuente: Propia)

Las gráficas del resto de juntas soldadas se encuentran en el ANEXO II.

3.1.4. Micrografía de las muestras Aluminio – Latón

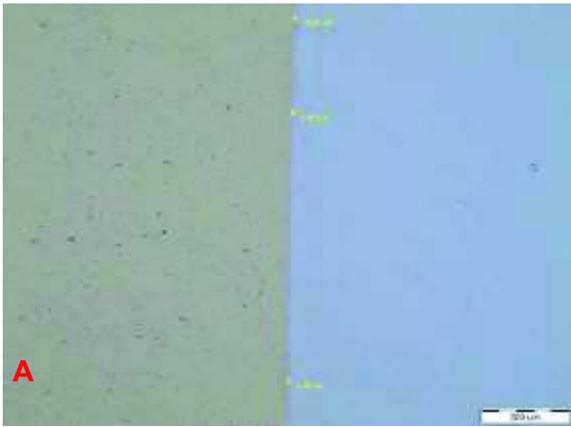
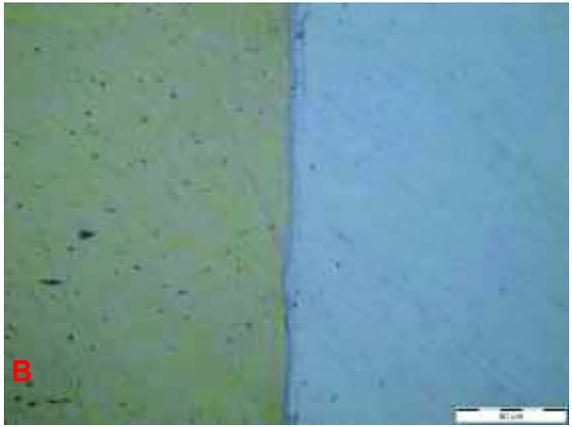
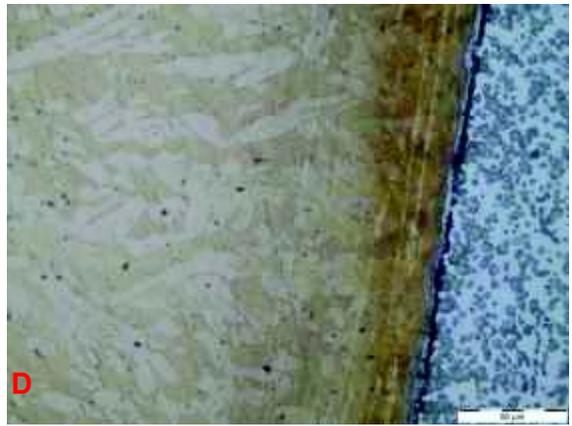
En este apartado se detallan las principales micrografías de las juntas soldadas que servirán para conocer las características de la estructura interna y su relación con las propiedades mecánicas.

Tabla 3.8. Características del material base.

Aluminio	
 A	 B
Figura A. Probeta de aluminio, se observa partículas de Mg_2Si y Fe_3SiAl_2 . Aumento 100x con ataque químico.	Figura B. Probeta de aluminio, se observa partículas de Mg_2Si y Fe_3SiAl_2 . Aumento 500x con ataque químico.
Latón	
 C	 D
Figura C. Probeta de latón, se observa la fase α y β , siendo esta última de un tono más oscuro, además de precipitados finos de Pb de color negro. Aumento 100x con ataque químico.	Figura D. Probeta de latón, se observa la fase α y β , siendo esta última de un tono más oscuro, además de precipitados finos de Pb de color negro. Aumento 500x con ataque químico.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.9. Características de las micrografías de junta simple.

Junta 2 (sin precalentamiento)	
 <p>A</p>	 <p>B</p>
<p>Figura A. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, no se observa fisuras o uniones incompletas. Aumento 100x sin ataque químico.</p>	<p>Figura B. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa la línea de coalescencia a lo largo de la junta. Aumento 500x sin ataque químico.</p>
 <p>C</p>	 <p>D</p>
<p>Figura C. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa una zona afectada por el calor con una coloración distinta. Aumento 100x con ataque químico al latón.</p>	<p>Figura D. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa el tamaño de grano del latón en la zona cercana a la interfaz. Aumento 500x con ataque químico al latón.</p>

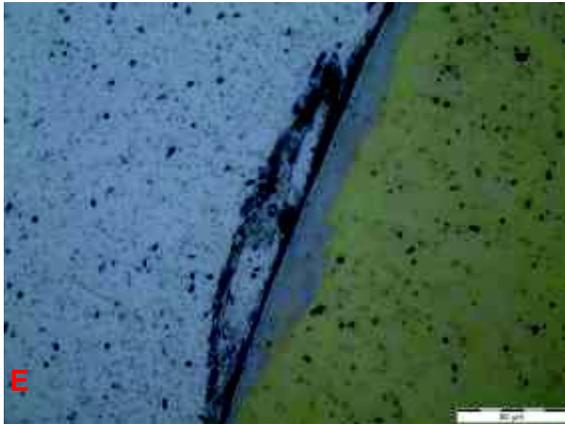


Figura E. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa zonas de distorsión y coalescencia. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.

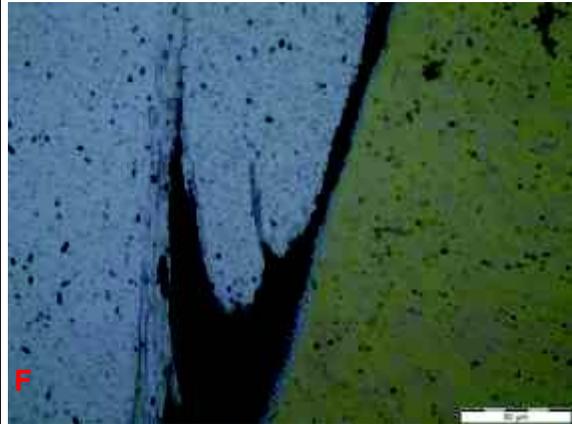


Figura F. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa una zona de distorsión. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.

Junta 5 (sin precalentamiento)

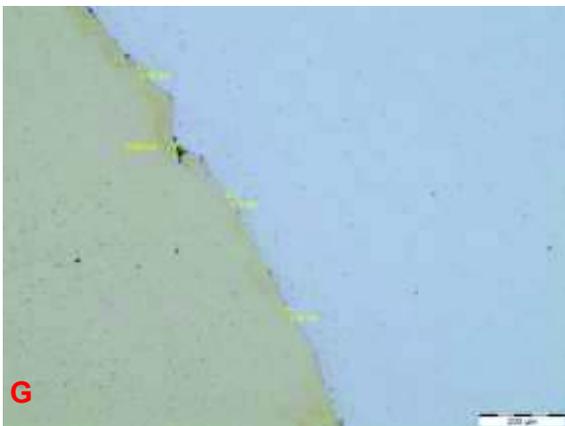


Figura G. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa una delgada línea de coalescencia. Aumento 100x sin ataque químico.



Figura H. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa grietas cerca de la zona de coalescencia, fragmentos de latón en el aluminio y una delgada zona de coalescencia. Aumento 500x sin ataque químico.

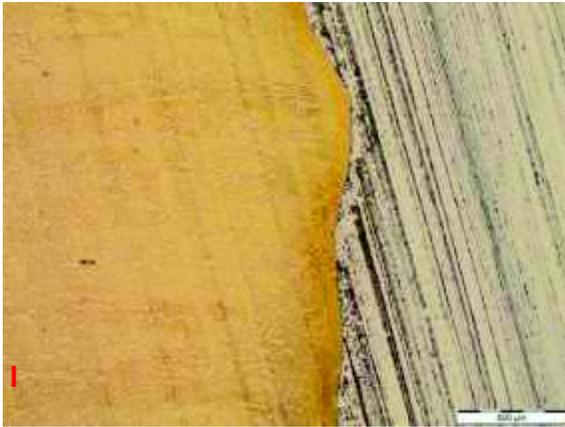


Figura I. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa el tamaño de grano del latón, con una pequeña zona afectada por el calor en la parte inferior. Aumento 100x con ataque químico al latón.

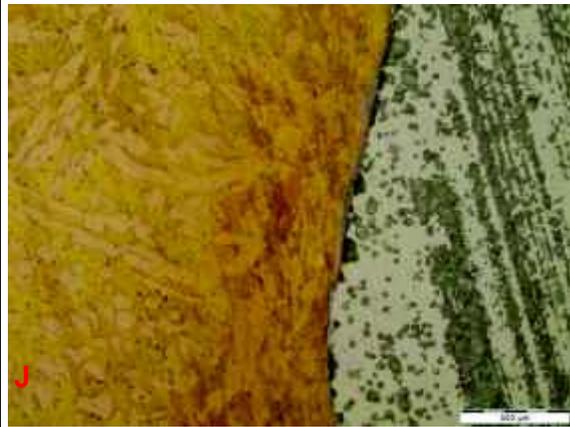


Figura J. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa el tamaño de grano del latón en la zona cercana a la interfaz, la cual muestra distinta coloración. Aumento 500x con ataque químico al latón.

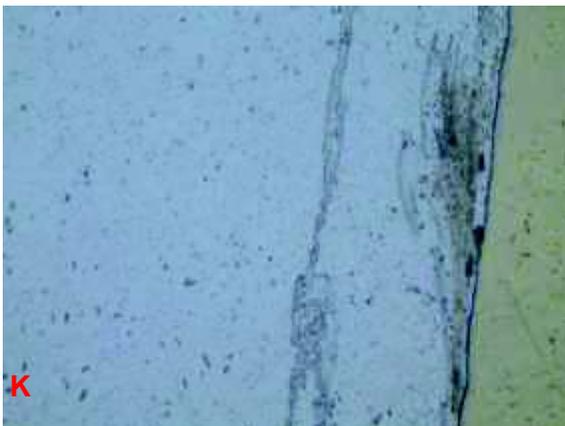


Figura K. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa zonas de distorsión y de coalescencia. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.

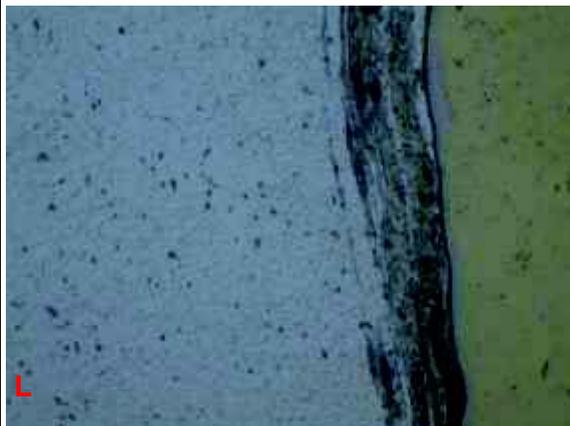


Figura L. Zona de unión de las probetas, se observa una coalescencia del latón en el aluminio y zonas de distorsión. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.

Junta 6 (con precalentamiento)

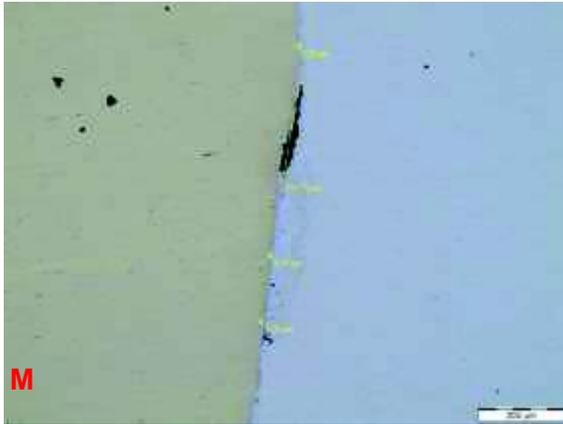


Figura M. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa grietas internas en la interfaz. Aumento 100x sin ataque químico.

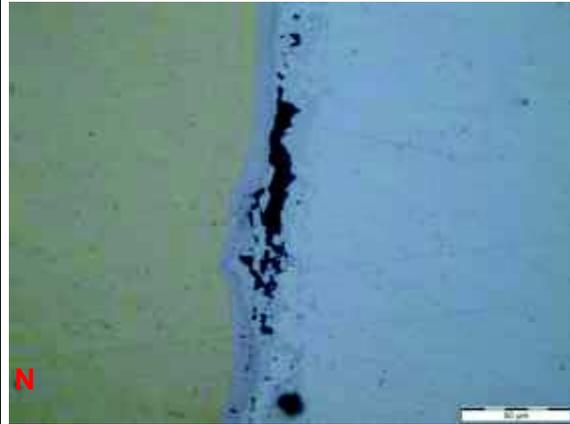


Figura N. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa una delgada línea de coalescencia y material deformado en el aluminio. Aumento 500x sin ataque químico.



Figura O. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa el tamaño de grano del latón, la zona de coalescencia con presencia de material deformado y la zona afectada por el calor. Aumento 100x con ataque químico al latón.

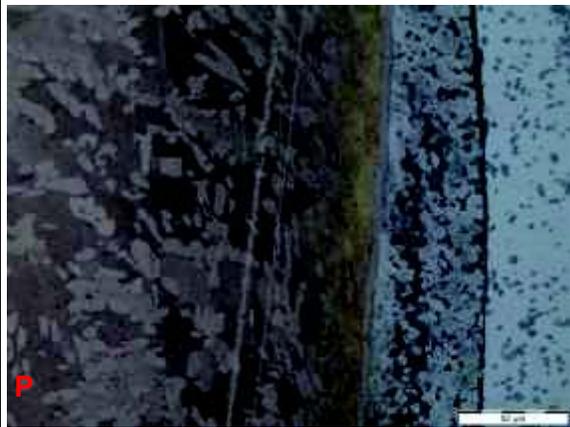


Figura P. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa el tamaño de grano del latón en la zona cercana a la interfaz. Aumento 500x con ataque químico al latón.

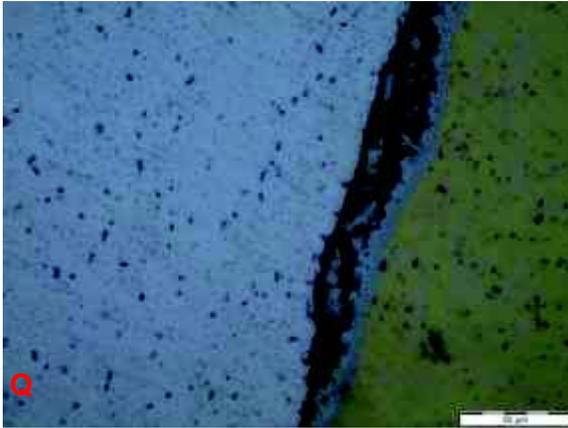


Figura Q. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa una coalescencia en el latón con grietas cerca de la interfaz del aluminio. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.

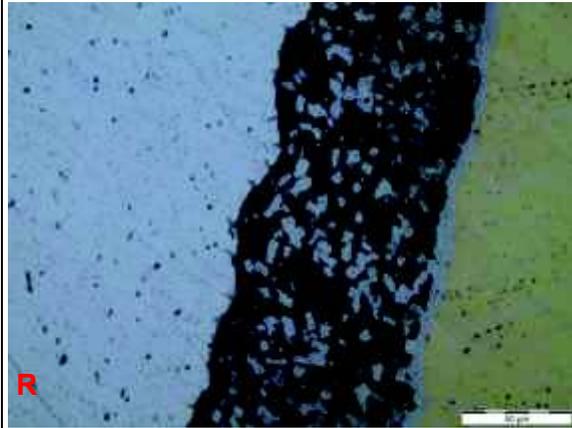


Figura R. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa inclusiones de aluminio en la grieta de la interfaz. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.

Junta 10 (con precalentamiento)



Figura S. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa una unión incompleta y grietas en la interfaz. Aumento 100x sin ataque químico.



Figura T. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa poca coalescencia con grietas en la interfaz. Aumento 500x sin ataque químico.

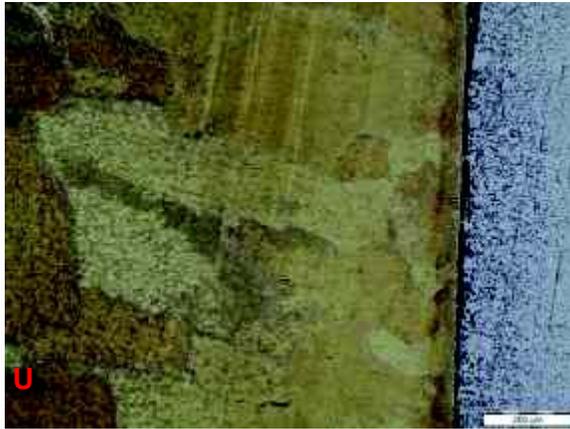


Figura U. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa tres diferentes zonas en la estructura. Aumento 100x con ataque químico al latón.

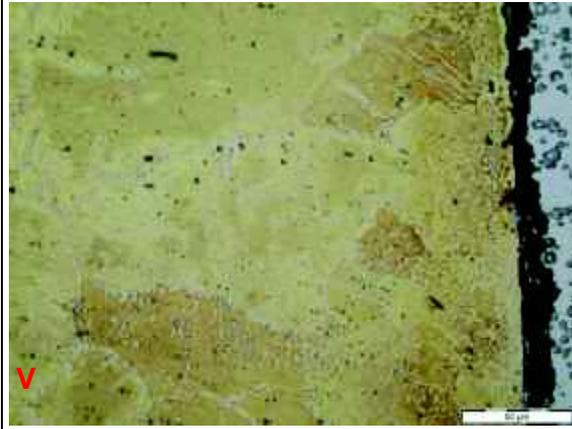


Figura V. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa el tamaño de grano del latón en la zona cercana a la interfaz y una grieta en la misma. Aumento 500x con ataque químico al latón.



Figura W. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa una falta de unión a lo largo de la junta soldada. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.

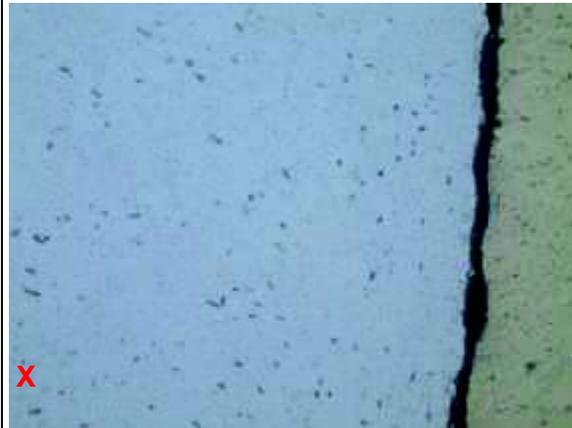


Figura X. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa contaminantes superficiales en la zona de unión. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.

(Fuente: Propia)

Para la junta de ranura se procede a nombrar las esquinas del pin del aluminio, como se observa a continuación. Cuando la imagen mostrada corresponda a una de estas zonas, la codificación será “Figura X-Z#”.

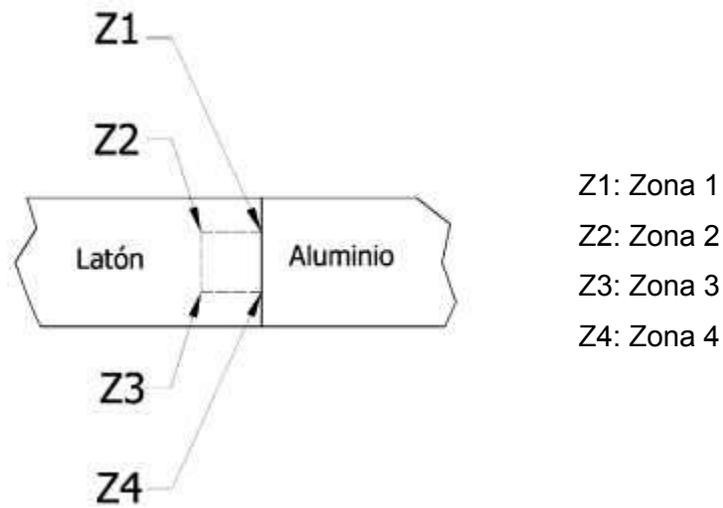
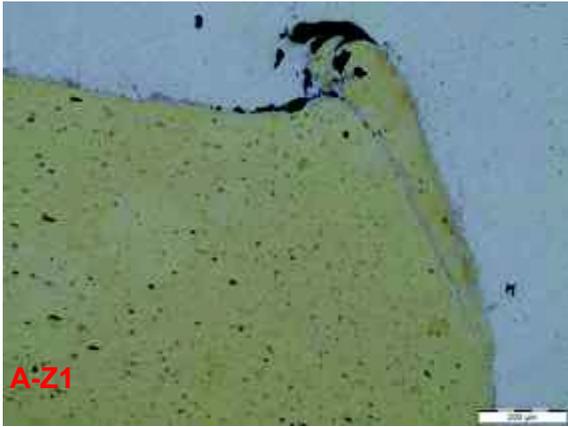
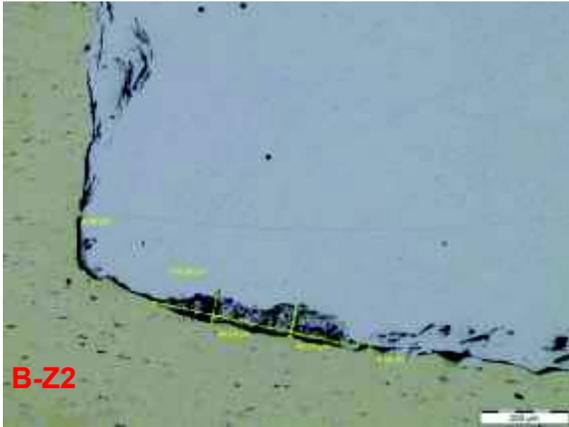


Figura 3.5. Zonas de análisis de la micrografía de la junta de ranura o lengüeta.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.10. Características de las micrografías de junta de ranura o lengüeta.

Junta 1D (sin precalentamiento)	
 <p>A-Z1</p>	 <p>B-Z2</p>
<p>Figura A-Z1. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa coalescencia del aluminio en el latón a lo largo de la unión. Aumento 100x sin ataque químico.</p>	<p>Figura B-Z2. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa falta de coalescencia, grietas y deformación en el aluminio. Aumento 100x sin ataque químico.</p>

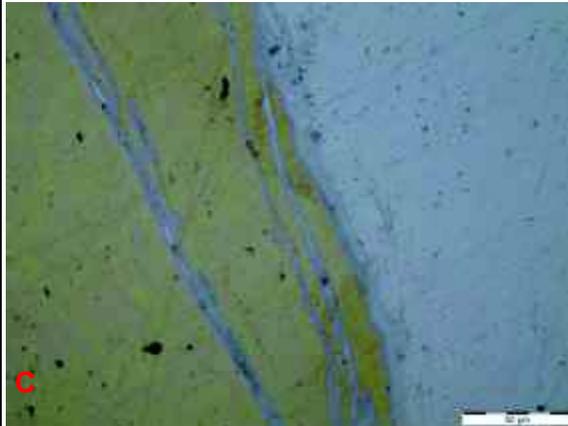


Figura C. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio cerca de Z1, se observa coalescencia del aluminio en el latón. Aumento 500x sin ataque químico.



Figura D. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, entre Z1 y Z2, se observa incrustaciones de latón en el aluminio. Aumento 500x sin ataque químico.



Figura E-Z3. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa un cambio de coloración cerca de la unión. Aumento 50x con ataque químico al latón.



Figura F-Z1. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa una forma de grano regular. Aumento 100x con ataque químico al latón.

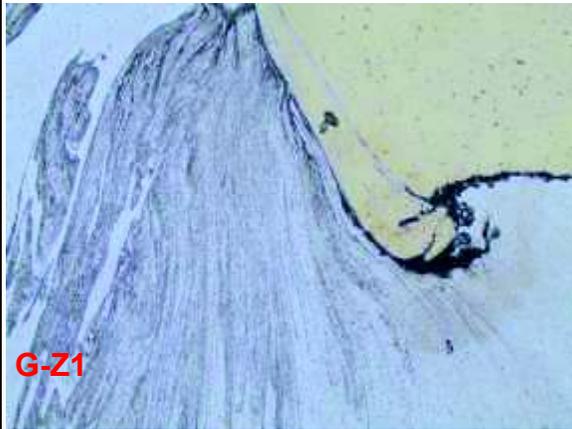


Figura G-Z1. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa una distorsión del grano en el aluminio. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.

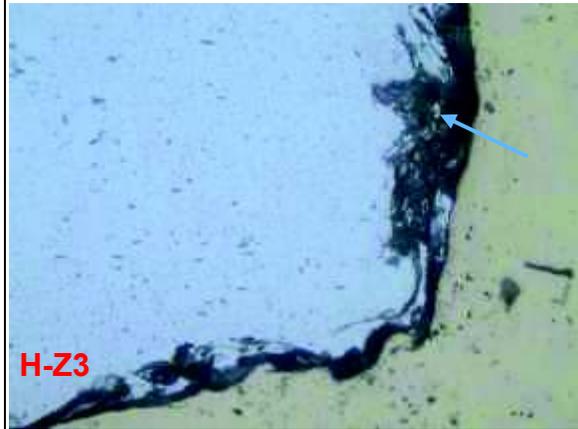


Figura H-Z3. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa inclusiones de latón en el aluminio. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.

Junta 5D (sin precalentamiento)

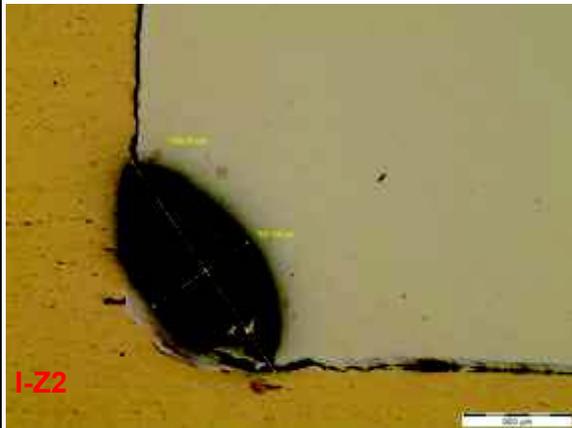


Figura I-Z2. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa uniones incompletas. Aumento 50x sin ataque químico.

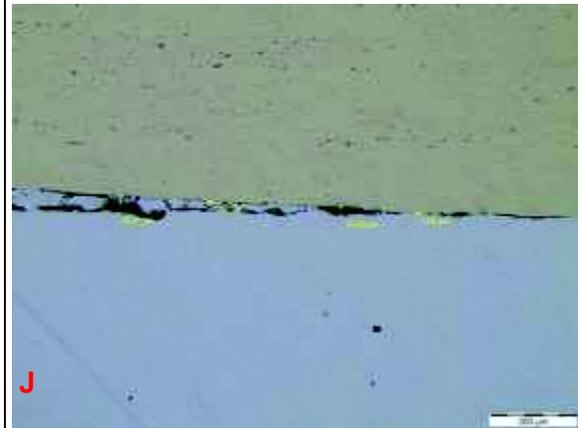


Figura J. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio entre Z3 y Z4, se observa poca coalescencia y grietas en la unión. Aumento 100x sin ataque químico.

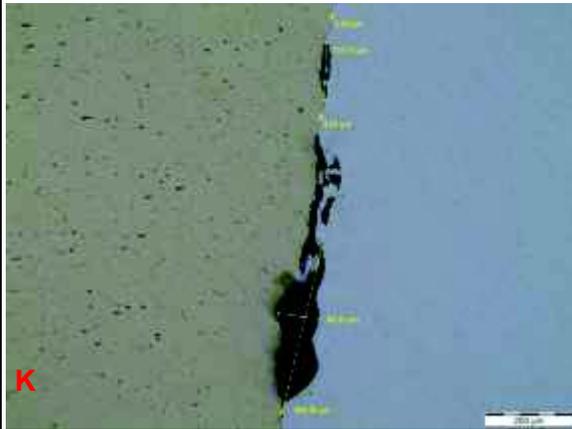


Figura K. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio cerca de Z4, se observa poca coalescencia y cavidades cerca de la unión. Aumento 100x sin ataque químico.

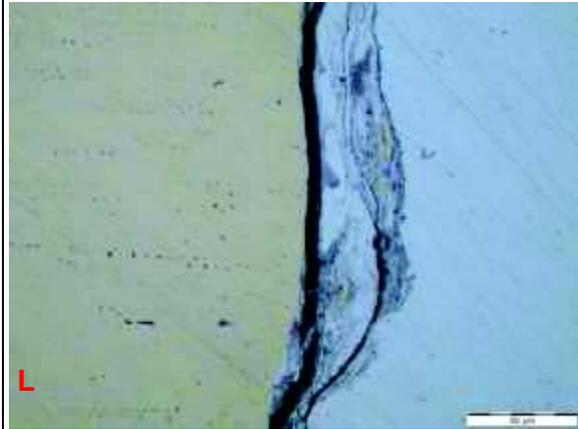


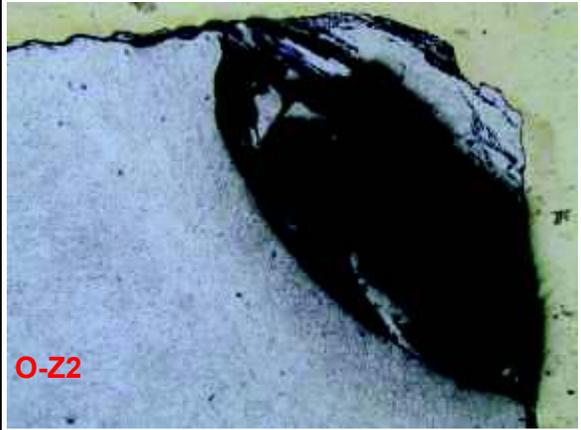
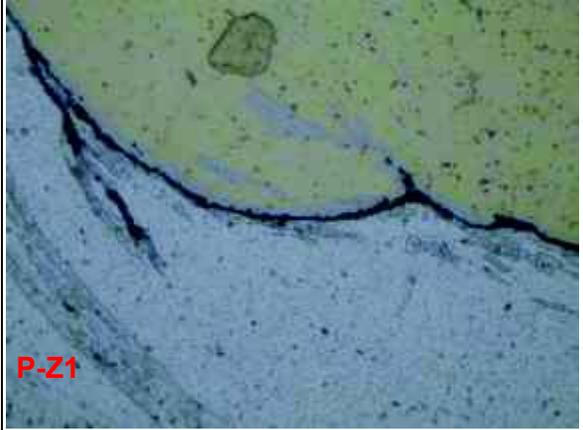
Figura L. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio entre Z2 y Z3, se observa incrustaciones de latón en el aluminio y una gran fractura en el aluminio. Aumento 500x sin ataque químico.



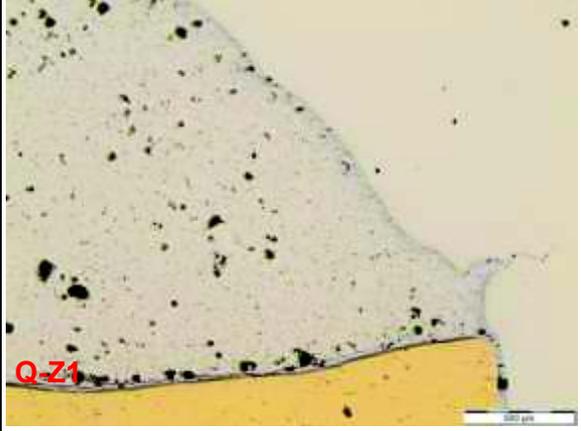
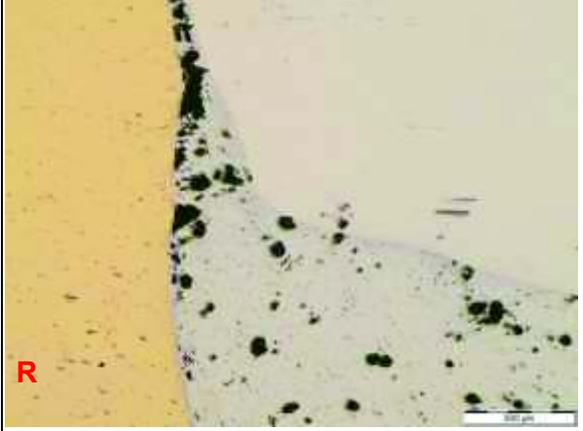
Figura M-Z1. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa distinta coloración y forma del grano cerca de la unión. Aumento 100x con ataque químico al latón.

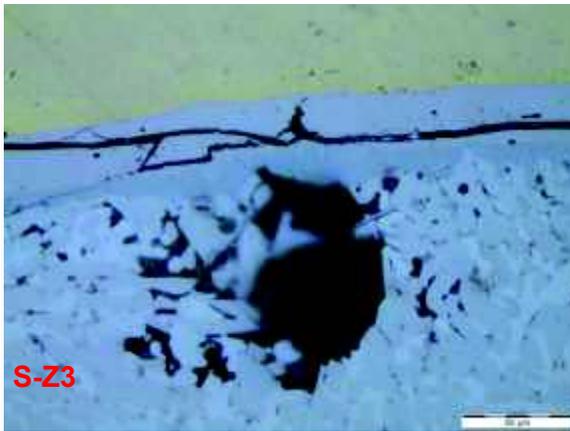


Figura N. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio entre Z2 y Z3, se observa no hay cambio de grano del latón. Aumento 500x con ataque químico al latón.

 <p>O-Z2</p>	 <p>P-Z1</p>
<p>Figura O-Z2. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa falta de unión en los bordes. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.</p>	<p>Figura P-Z1. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa coalescencia del aluminio en el latón y grietas en la unión. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.</p>

Junta 8D (con precalentamiento)

 <p>Q-Z1</p>	 <p>R</p>
<p>Figura Q-Z1. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa una distorsión del aluminio. Aumento 50x sin ataque químico.</p>	<p>Figura R. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio entre Z2 y Z3, se observa la continuación de las distorsiones en el aluminio. Aumento 50x sin ataque químico.</p>



S-Z3

Figura S-Z3. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa una gran fractura en el aluminio a través de toda la interfaz de soldadura. Aumento 500x sin ataque químico.



T-Z4

Figura T-Z4. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa coalescencia. Aumento 500x sin ataque químico.



U-Z4

Figura U-Z4. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa una distorsión del grano de latón en la junta. Aumento 100x con ataque químico al latón.



V-Z1

Figura V-Z1. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa coalescencia de aluminio en el latón. Aumento 500x, ataque químico al aluminio.

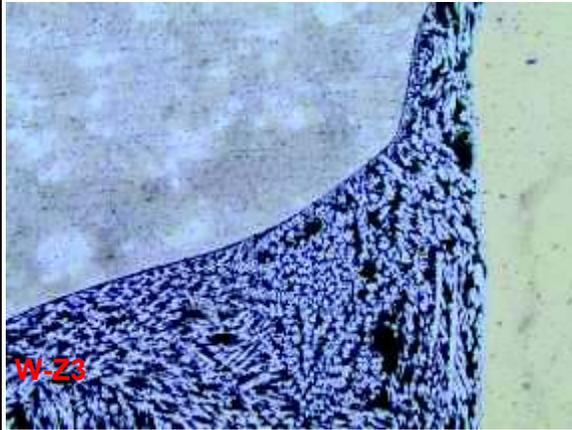


Figura W-Z3. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa una distorsión del grano de aluminio y coalescencia en la unión. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.

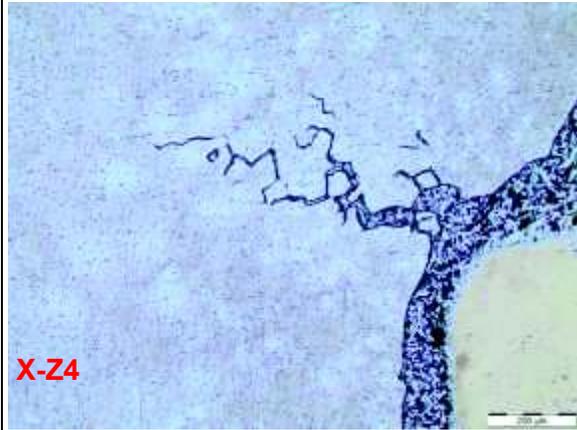


Figura X-Z4. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa grietas a través del aluminio. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.

Junta 9D (con precalentamiento)

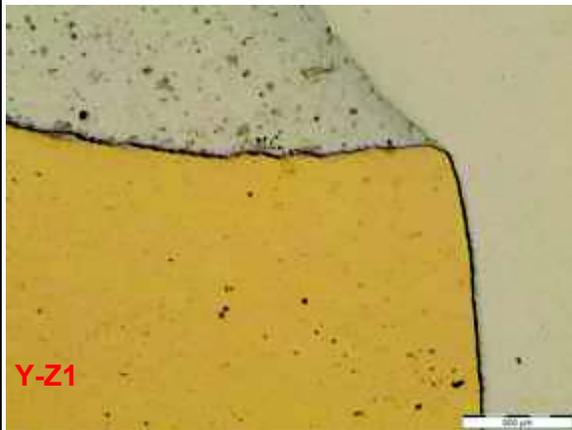


Figura Y-Z1. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa incrustaciones de latón en la zona distorsionada del aluminio. Aumento 50x sin ataque químico.

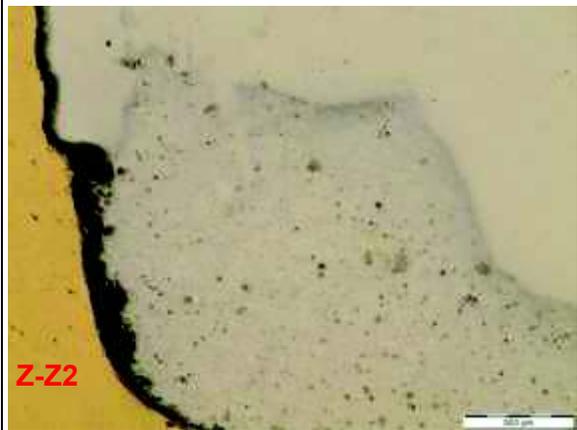


Figura Z-Z2. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa grietas en la unión. Aumento 50x sin ataque químico.

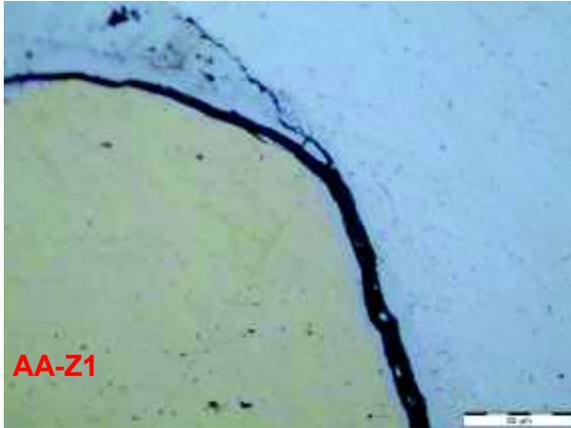


Figura AA-Z1. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa grietas a lo largo de la zona de coalescencia. Aumento 500x sin ataque químico.

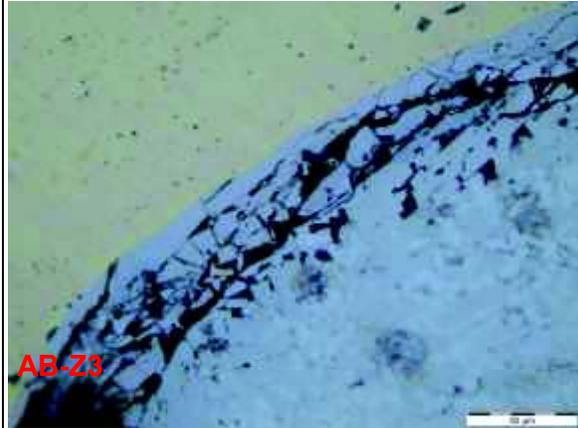


Figura AB-Z3. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa incrustaciones de latón en el aluminio. Aumento 500x sin ataque químico.



Figura AC. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio cerca de Z4, se observa la forma del grano del latón cerca de la interfaz. Aumento 500x con ataque químico al latón.

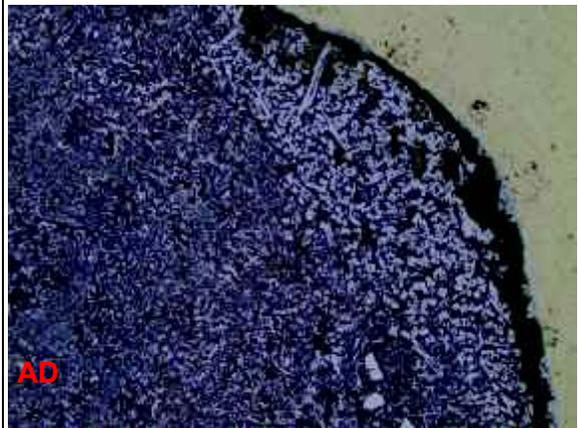


Figura AD. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón entre Z1 y Z2, se observa distorsiones en el grano de aluminio. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.

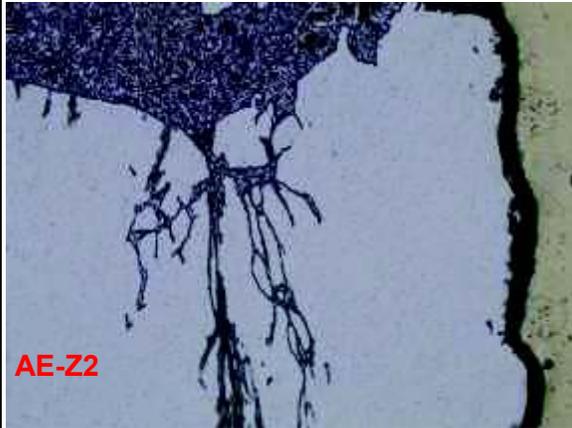


Figura AE-Z2. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa grietas en el aluminio. Aumento 100x, ataque químico al aluminio.

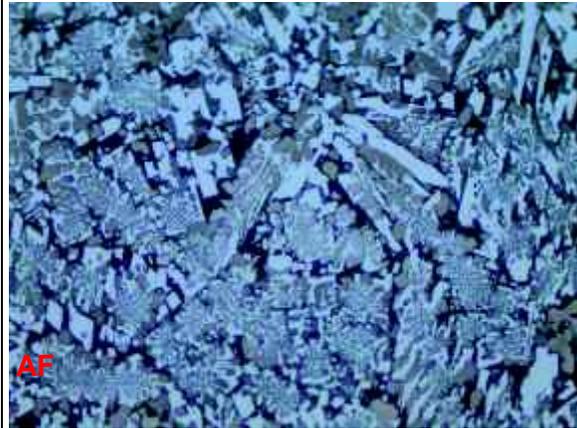


Figura AF. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón entre Z3 y Z4, se observa una variación del grano de aluminio e incrustaciones de latón. Aumento 500x, ataque químico al aluminio.

Junta 10D (con precalentamiento)



Figura AG-Z3/Z4. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa cambio en superficie del aluminio con grietas en las esquinas. Aumento 50x sin ataque químico.

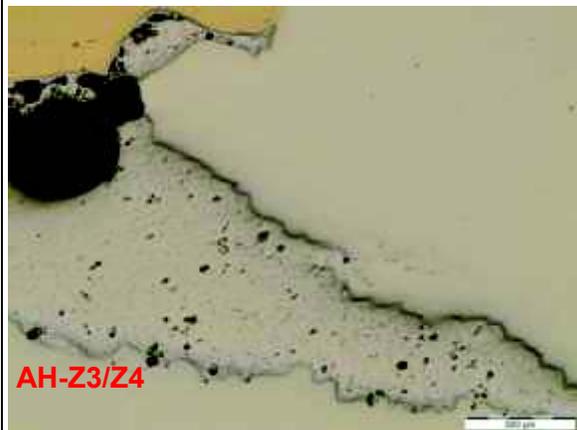
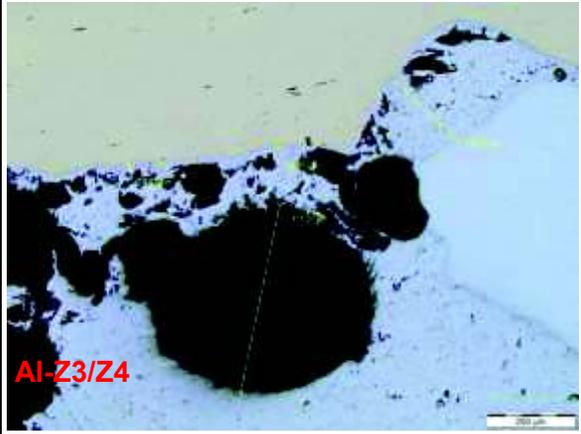
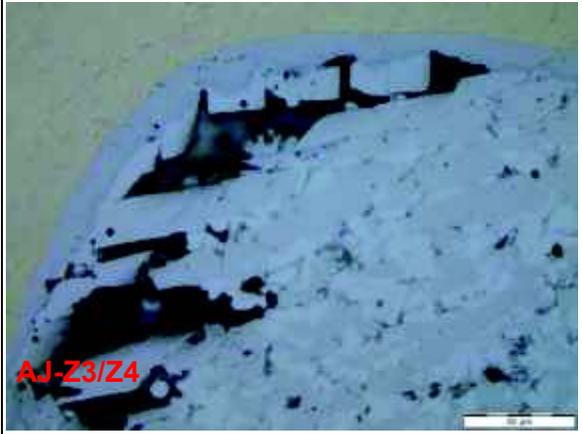
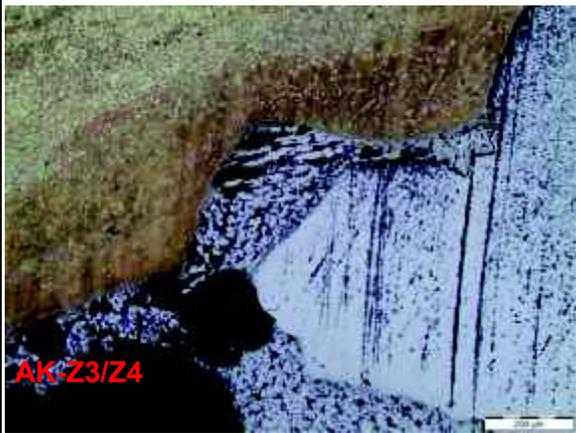
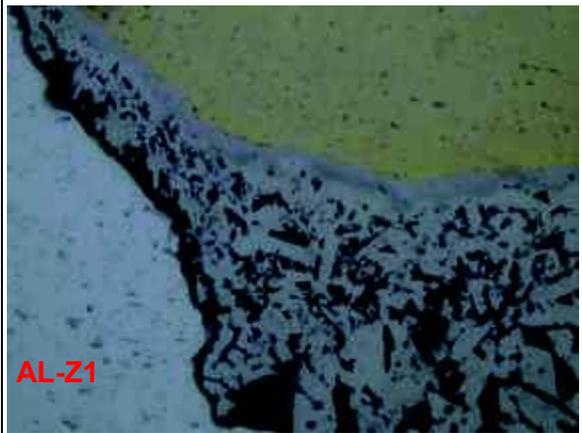


Figura AH-Z3/Z4 (Continuación). Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa cambio en la superficie del aluminio. Aumento 50x sin ataque químico.

 <p>AI-Z3/Z4</p>	 <p>AJ-Z3/Z4</p>
<p>Figura AI-Z3/Z4. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa grietas entre la zona de coalescencia. Aumento 100x sin ataque químico.</p>	<p>Figura AJ-Z3/Z4. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa coalescencia. Aumento 500x sin ataque químico.</p>
 <p>AK-Z3/Z4</p>	 <p>AL-Z1</p>
<p>Figura AK-Z3/Z4. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio cerca de Z4, se observa la zona afectada por el calor en el latón. Aumento 100x con ataque químico al latón.</p>	<p>Figura AL-Z1. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa distorsión en el aluminio. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.</p>

(Fuente: Propia)

El resto de micrografías se encuentran disponibles en el ANEXO IV.

3.1.5. Microdureza

Las microdurezas se realizaron a lo largo del eje axial, partiendo desde la unión hasta llegar al material base correspondiente (

Figura 3.6.). La distancia entre cada marca dejada por el indentador se obtuvo con ayuda del software integrado en el Microscopio metalográfico OLYMPUS GX41 (Figura 2.16.).

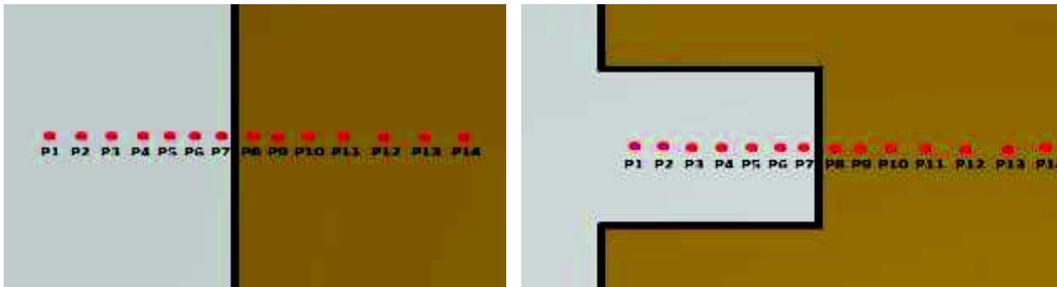


Figura 3.6. Puntos de microindentación en la junta simple (izquierda) y de ranura (derecha).
(Fuente: Propia)

La carga aplicada a las juntas soldadas es 100 [gf] según los estudios realizados por Falla et al. (2012) y Wu et al. (2004) para el aluminio y de Barlas y Uzun (2008) y Ninan (2014), para el latón.

El tiempo de duración de cada microindentación en este estudio es de 15 segundos para ambos materiales de acuerdo a la norma ASTM E384.

El número de dureza de Vickers para cada ensayo realizado se calcula con la carga aplicada y la diagonal promedio mediante la Ecuación 3.1.

$$HV = 1854,4 * \frac{P}{d^2}$$

Ecuación 3.1. Número de dureza Vickers.
(Fuente: [44])

Donde:

P: Carga aplicada [gf].

d: longitud diagonal media de la indentación [μm].

A continuación, en las Figuras 3.7. - 3.10. se observa como varia la dureza desde la interfaz hasta cada uno de los extremos de las probetas de aluminio y latón. Los

resultados obtenidos de cada microindentación por medio del microdurómetro marca Metkon (Figura 2.17.) se encuentran tabulados en el ANEXO V.

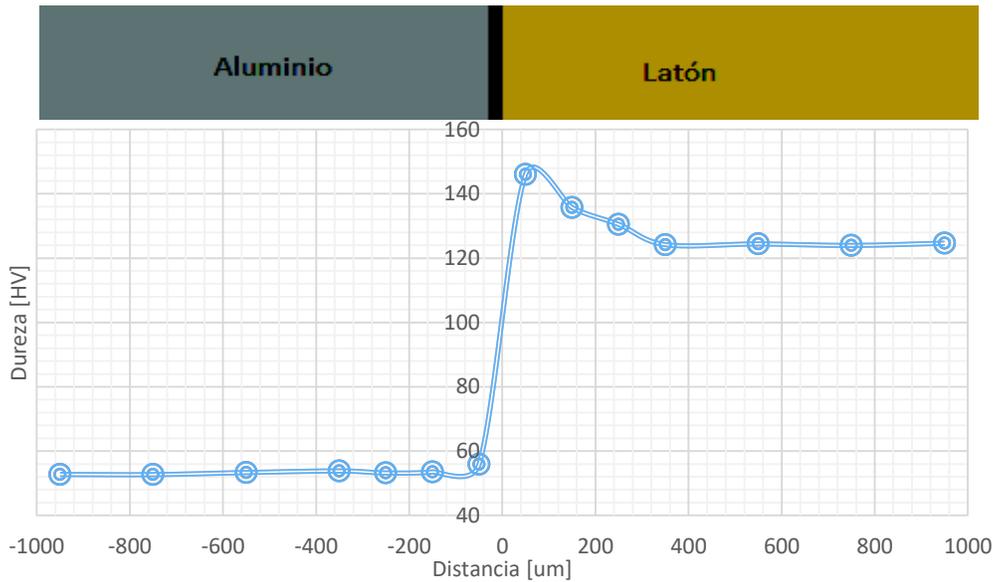


Figura 3.7. Dureza vs. Distancia de junta 2.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.7. muestra la curva característica de las mediciones de microdureza obtenidos en la junta 2, en el lado de la aleación de aluminio la dureza tiene un valor de 53 HV, mientras en la zona cercana a la unión se registra un valor de pico de 146 HV y finalmente en el lado de la varilla de latón el valor de la dureza es la esperada, siendo 124 HV.

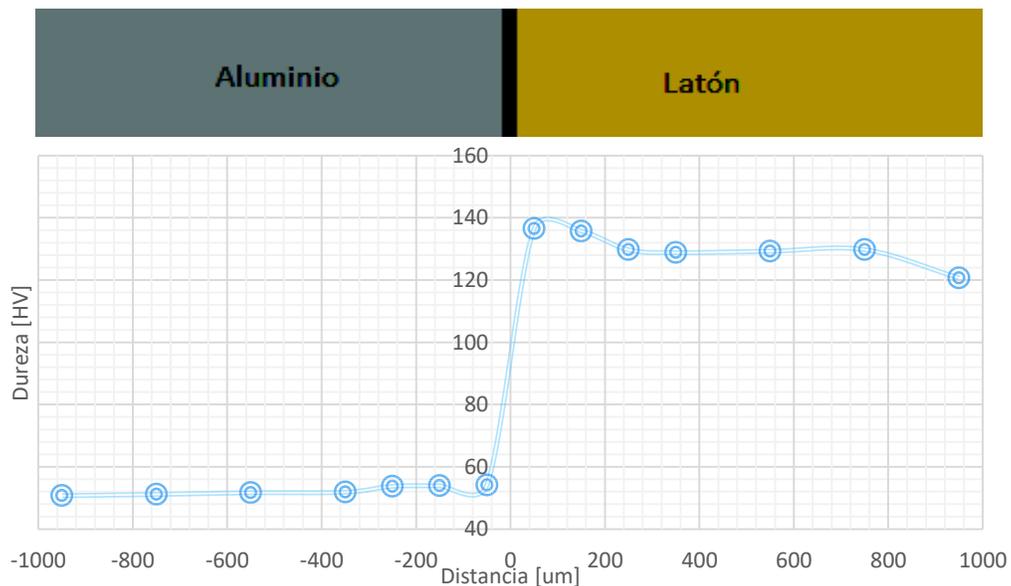


Figura 3.8. Dureza vs. Distancia de junta 6.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.8. muestra los valores de microdureza para el aluminio de 50 HV, mientras en la zona cercana a la unión se registra un valor de pico de 136 HV y finalmente en el lado de la varilla de latón el valor de la dureza es la esperada, siendo 120 HV.

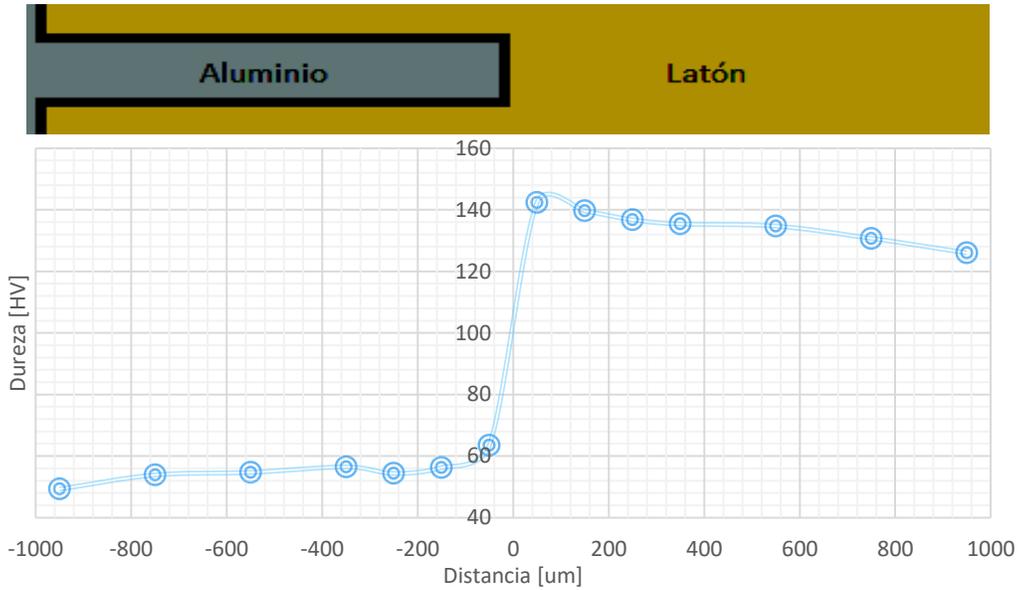


Figura 3.9. Dureza vs. Distancia de junta 1D.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.9. muestra los valores de microdureza para el aluminio de 49 HV, en la zona de coalescencia cerca de la unión un valor de 142 HV y para la varilla de latón la microdureza tiene un valor de 126 HV.

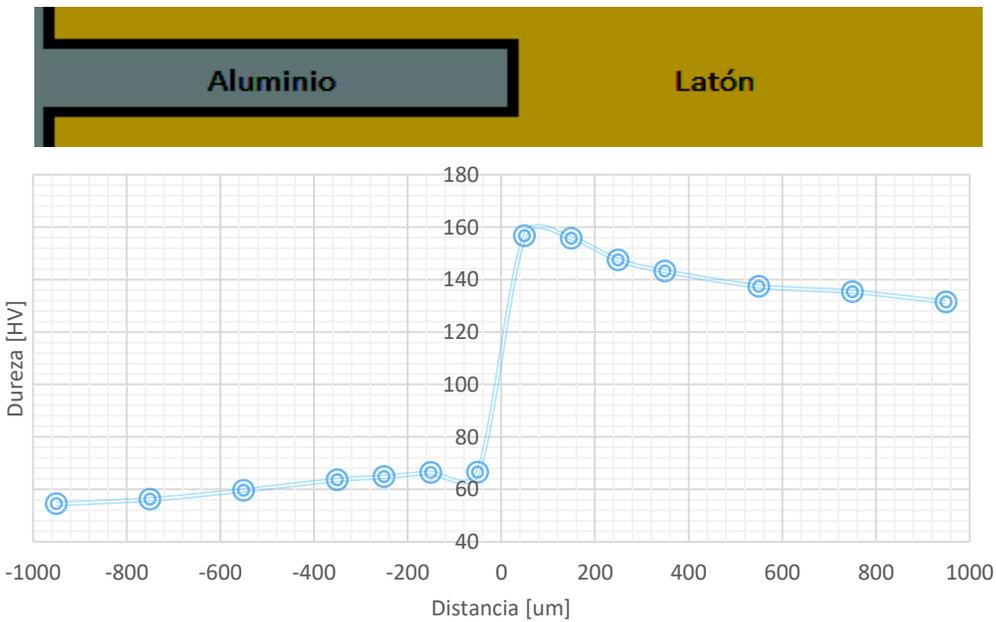


Figura 3.10. Dureza vs. Distancia de junta 10D.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.10. para la varilla de aluminio se observa un valor de microdureza de 54 HV, la dureza en la zona de coalescencia tiene un aumento de valor, llegando a 156 HV y en la zona referente a la varilla de latón, la microdureza tiene un valor de 131 HV.

3.2. Discusión

La soldadura por fricción convencional de los materiales aluminio – latón presenta diferentes resultados esto se debe a que son materiales disímiles, la aplicación de precalentamiento y principalmente al cambio de disposición de la junta. Esto conlleva a la variación del tiempo total de soldadura, temperatura y la fuerza de calentamiento y de forja. Dichos cambios afectan la eficiencia de la unión y del proceso de soldadura, debido a la utilización de una mayor cantidad de recursos como materia prima (probetas), tiempo, energía eléctrica y temperatura (precalentamientos).

Para lograr la utilizar lo estrictamente necesario se analiza los grupos de juntas soldadas (junta simple y de ranura con y sin precalentamiento) y para aprovechar en un futuro la que posea la mayor eficiencia en cuanto a la obtención de la junta soldada aluminio-latón.

3.2.1. Encogimiento axial

Al finalizar el proceso de soldadura se puede apreciar la deformación de las probetas de latón y aluminio tanto en forma axial con un encogimiento en su longitud inicial como en forma radial mediante una formación de rebaba, esto se aprecia de manera instantánea mediante una inspección visual.

Los valores para el encogimiento axial varían entre 5,3 y 18,8 milímetros que representa 3,03% y 10,75 % con respecto a la longitud inicial para las probetas de junta simple, tal como se aprecia en la Tabla 3.3. y de igual manera existe una disminución en la longitud axial para las probetas con junta de ranura mostrados en la Tabla 3.4. cuyos valores varían entre 4,2 y 18,6 milímetros que representa 2,62% y 11,33% con respecto a la longitud inicial, siendo para ambos casos los valores más altos obtenidos de las probetas soldadas con precalentamiento.

Las probetas de aluminio son las que poseen mayor encogimiento axial debido a su menor dureza y temperatura de plasticidad, teniendo como resultado que el latón ingrese y deforme al aluminio formando una rebaba como se observa en la Figura 3.11.



Figura 3.11. Probetas soldadas de junta simple.
(Fuente: Propia)

3.2.2. Ensayo de tracción

3.2.2.1. Ensayo de tracción del material base

Los ensayos realizados a las probetas de aluminio y latón, presentan un valor promedio de resistencia a la tracción de 233 [MPa] y 526,5 [MPa] respectivamente, además se registró una carga máxima promedio para el aluminio de 6652,5 [N] y 15858 [N] para el latón.

Según AALCO (2011), la resistencia a la tracción del latón C38500 se encuentra entre 360 [MPa] y 580 [MPa], mientras que para el aluminio es 241 [MPa] acorde a la literatura de Kutz (2015). Los materiales base utilizado en este estudio se encuentra dentro de los rangos establecidos como se observa en la Tabla 3.5.

Las probetas de aluminio se fracturan de forma dúctil debido a la presencia considerable de una zona de deformación plástica, mientras que las probetas de latón presentan una fractura moderadamente dúctil de poca deformación plástica debido a la presencia de la fase β más dura que posee una plasticidad menor que la fase α [47]. El porcentaje promedio de elongación en 25 mm es de 20,3 % para el aluminio y 27,3 % para el latón.

3.2.2.2. Ensayo de tracción de las probetas soldadas

El ensayo se realiza a 12 juntas con la finalidad de conocer la resistencia mecánica obtenida en la soldadura mediante el proceso de fricción. Antes de realizar el ensayo, se realiza un mecanizado en la zona donde se encuentran las rebabas para obtener el diámetro promedio que permite calcular la resistencia, este valor de diámetro oscila entre 13,74 y 16,3 [mm].

Los valores que registró la máquina universal de ensayos referente a las cargas máximas para cada junta seleccionada se encuentra entre 16325 [N] y 49420 [N], seguidamente para obtener los valores de la resistencia a la tracción se divide la carga

máxima para el área transversal de cada probeta, teniendo en cuenta el diámetro final posteriores al maquinado, dando como resultado valores entre 80,19 [MPa] y 253,72 [MPa] (Tabla 3.6. y 3.7.).

Los mejores resultados presentan las muestras de junta simple que fueron soldadas a temperatura ambiente, obteniendo un valor promedio de 221,76 [MPa] muy cercano a la resistencia del material base de aluminio.

Tabla 3.11. Porcentaje de eficiencia de la soldadura según su resistencia a la tracción.

Código de las juntas	Resistencia a la tracción promedio	Resistencia a la tracción promedio del aluminio	Porcentaje de eficiencia de la soldadura (η)
	MPa	MPa	%
1, 3, 4	221,76	233	95,18
2D, 3D, 4D	157,50		67,60
7, 8, 9	168,25		72,21
6D, 7D, 11D	155,59		66,78

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.11. se aprecia que el primer grupo de muestras ensayadas tiene en promedio una mejor eficiencia comparando su resistencia a la tracción con el aluminio, y de igual manera podemos observar que los siguientes tres grupos de muestras tienen valores semejantes entre sí.

Todas las juntas ensayadas presentan la falla en la unión de soldadura, esto se debe a la carencia de un cuerpo central (Figura 2.11.) y a la forma de sujeción de las probetas en la máquina de ensayo. Esta falta de distancia en el cuerpo central de las probetas soldadas se debe en parte al encogimiento axial y a las limitaciones de la máquina de soldadura por fricción, que permite introducir ejes cuya longitud no superen los 90 [mm]. Con los resultados obtenidos se observa que cada una de las uniones varía su resistencia, esto es debido a que la máquina de soldadura por fricción del Laboratorio de Soldadura realiza la unión de las probetas de una forma muy sencilla, la presión de calentamiento y la de forja es proporcionada por un pistón hidráulico y la carga se la realiza de manera manual. Sin embargo, pese a estas limitaciones los valores de los esfuerzos obtenidos son cercanos a la resistencia mínima a tracción del aluminio el cual tiene un valor de 233 [MPa].

3.2.3. Análisis de la zona de unión de las probetas sometidas a tracción

La zona unión de las probetas soldadas presentan material deformado del aluminio hacia el latón en forma de una película plastificada de material cortado. En zonas plastificadas, a mayor temperatura causada por la torsión es menor la deformación [5].

A continuación, se analiza la zona de unión de las juntas que soportaron la menor y mayor resistencia a la tracción.

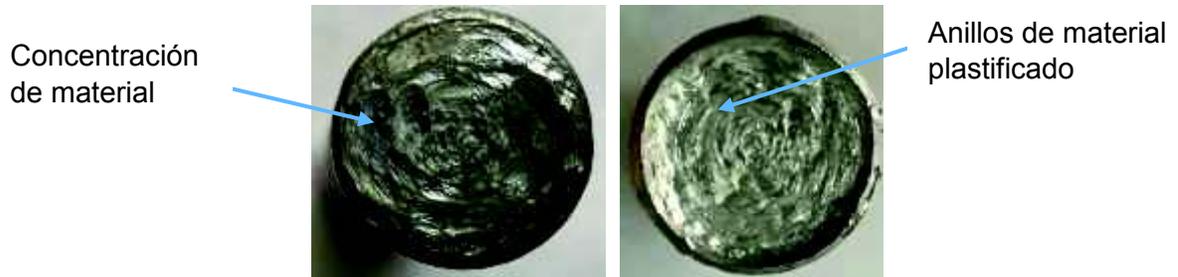


Figura 3.12. Material plastificado concentrado de la junta 3; probeta de latón (izquierda) y aluminio (derecha).
(Fuente: Propia)



Figura 3.13. Material plastificado concentrado de la junta 9; probeta de latón (izquierda) y aluminio (derecha).
(Fuente: Propia)



Figura 3.14. Material plastificado concentrado de la junta 4D; probeta de latón (izquierda) y aluminio (derecha).
(Fuente: Propia)

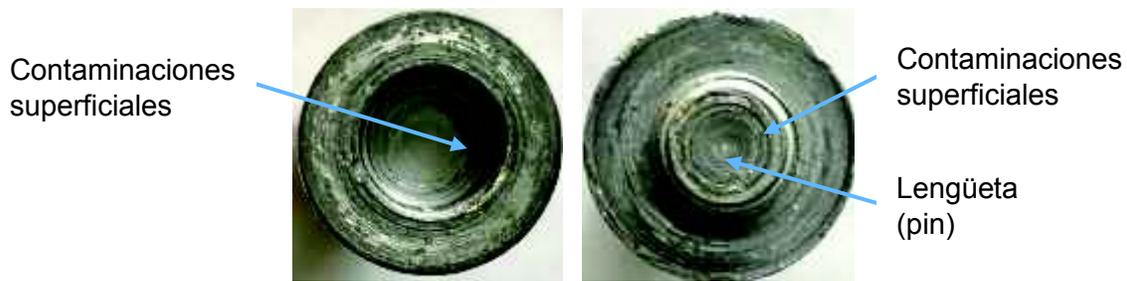


Figura 3.15. Material plastificado concentrado de la junta 11D; probeta de latón (izquierda) y aluminio (derecha).
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.12. se observa una gran cantidad de concentración de material y anillos de plastificación debido al aumento de temperatura durante la fase de calentamiento que ocasiona que el material se haga plástico rápidamente y el torque se reduzca dando una menor generación de calor. Otra razón de la excesiva acumulación de material se debe a que la fuerza axial aplicada se mantiene constante durante toda la etapa de fricción (Figura 3.1.) ocasionando que el material plastificado creado en la fase de rozamiento no pueda salir hacia el exterior de la zona soldada durante la fase de calentamiento.

En el caso de la junta 4, se observa en su gráfica (ANEXO II) tanto el primer como segundo nivel de fricción, lo cual provoca la salida del material plastificado hacia el exterior, aunque la caída de la fuerza axial al pasar de la fuerza de forja no permitió concretar la unión de las zonas donde apareció nuevo material ocasionando la reducción de la resistencia a la tracción.

En la Figura 3.13. se observan óxidos y contaminantes superficiales ocasionado por la temperatura de precalentamiento y la carencia de la fase de calentamiento, además de las reacciones químicas inducidas por fricción.

La Figura 3.14. y 3.15. muestran desgaste y corte de la probeta de aluminio debido a la variación excesiva de la presión que ocasiona una zona de unión no óptima, tal como se muestra en la Figura 3.16., además de la falta de unión en los bordes internos del latón y la presencia de contaminantes superficiales debido a que no es posible su extracción a causa del diseño de tipo ranura presente en el latón.

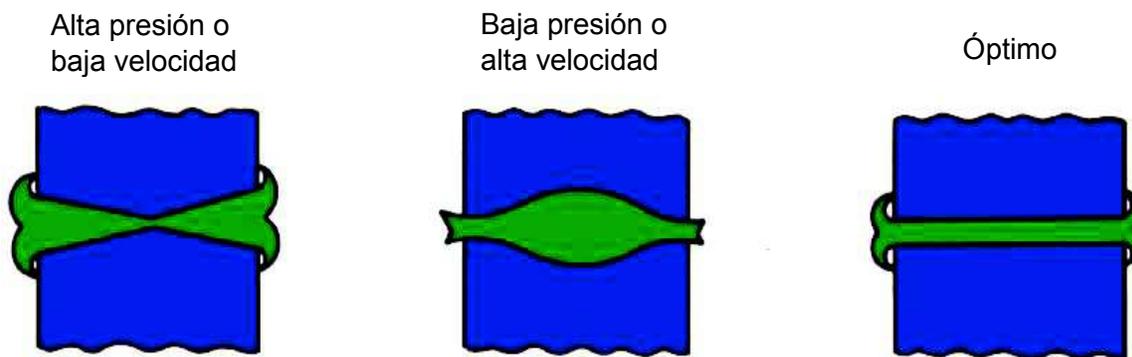


Figura 3.16. Forma de las zonas de unión en la soldadura por fricción como una función de la fuerza axial aplicada y la velocidad de rotación.
(Fuente: [48])

3.2.4. Metalografía

3.2.4.1. Caracterización del latón

La composición química realizada al material base del latón (Tabla 3.12.), muestra que corresponde al C38500 obtenido mediante el proceso de extrusión. Esta aleación también conocida como latón $\alpha+\beta$ se caracteriza por tener porcentajes de cinc entre 35% y 46,6%, siendo este el principal elemento de la aleación [49], [50].

Tabla 3.12. Composición química de la probeta de latón.

Elemento	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si
Valor [%]	48,35	43,58	4,197	0,258	0,282	<0,010	0,209	0,164	0,461
Elemento	Al	S	As	Bi	Se	Sb	-	-	-
Valor [%]	<0,010	0,146	0,588	<0,010	0,446	1,035	-	-	-

(Fuente: Propia)

Los componentes del latón C38500 se encuentran dentro de los parámetros a excepción del Cu (48,35%) y Pb (4,19%), esto se debe a que la producción de barras en América Latina se realiza por colada continua debido a que tendrá un costo de 40% a 50% más bajo en el proceso de fabricación. Esta forma de conseguir la homogeneidad en la aleación provoca la emisión de vapores y polvos metálicos tóxicos que se acumulan en el horno y causa la aparición de impurezas en el producto final [51], [52]. En este proceso también interviene el departamento de calidad, el cual, analiza varias probetas por espectrometría para garantizar la calidad en las posteriores etapas del proceso.

Según la ASM International (1990) y OTTO FUCHS Dülken (2014), la composición química debe ser como se muestra en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Composición química del latón C38500.

Elemento	Cu	Zn	Pb	Sn	Fe	Mn	Ni	Al
Valor [%]	57-59	Restante	2,5-3,5	0,16-0,3	0,15-0,3	0,02	0,06-0,2	0,002-0,05

(Fuente: [53], [54])

La disminución de cobre reduce la ductilidad y la deformación a temperatura ambiente [33].

El antimonio es un elemento que se encuentra en altos porcentajes (1,04%), el cual siempre se debe evitar en los latones, porque son causa de gran fragilidad [55]. Así mismo, se tiene un alto contenido de plomo (4,19%), aunque permite mejorar la calidad de mecanizado [32].

La microestructura del latón mostrada en la Tabla 3.8. es similar a la Figura 3.17., en la cual se puede observar una mezcla de cristales de fase α precipitados en una matriz de fase β dependiendo de la deformación, enfriamiento y tratamiento térmico. Así mismo, se observa Pb (insoluble) en forma de precipitados finos de color negro [53], [56].

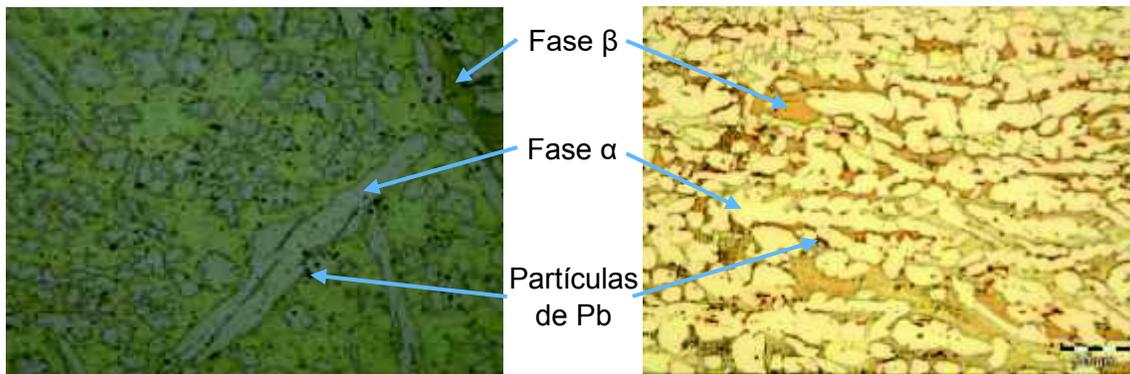


Figura 3.17. Comparación de la microestructura de C38500 de estudio (izquierda) y según OTTO FUCHS Dülken (derecha).

(Fuente: [53])

Las aleaciones con porcentajes de cinc comprendidas entre el 37% y 57% aproximadamente, presenta una fase β estable a 800 [°C], pero al disminuir la temperatura una parte se transforma en fase α , quedando finalmente constituidas entre 35% y 46,6% de cinc por cristales $\alpha+\beta$ (Figura 3.18.). Al enfriar esta aleación hasta 454 [°C], la fase β se transforma en la fase β' , la cual se diferencia de la anterior porque tiene todos los átomos colocados ordenadamente en la estructura cristalina cúbica centrado en el cuerpo [31], [33], [57].

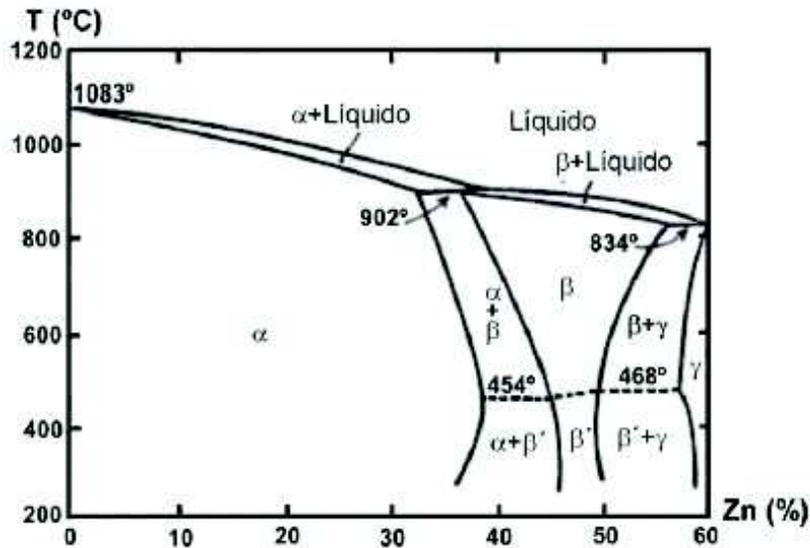


Figura 3.18. Diagrama de fases Cu-Zn.
(Fuente: [57])

La fase alfa es una solución sólida FCC, y la fase beta es el compuesto CuZn no estequiométrico intermetálico que tiene una estructura cristalina BCC [56].

La Figura 3.18. muestra que para que exista un cambio de fase teniendo un 43,5 % de cinc se necesita trabajar con temperaturas superiores a 454 °C, por lo tanto, en este estudio el latón no sufre un cambio de fase debido a que solo se trabajó con rangos de temperatura que no sobrepasaron los 300 [°C].

3.2.4.2. Caracterización del aluminio

La composición química realizada al material base del aluminio (Tabla 3.14.), muestra que corresponde al 6061 obtenido mediante el proceso de extrusión [58].

Tabla 3.14. Composición química de la probeta de aluminio.

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
Valor [%]	1,083	0,377	0,112	0,067	0,575	0,096	0,140	0,419	0,048
Elemento	Pb	Sn	V	Sr	Zr	Co	B	Ag	Bi
Valor [%]	0,276	0,221	0,038	0,053	0,045	0,126	>0,072	0,084	0,141
Elemento	Ca	Li	Al	-	-	-	-	-	-
Valor [%]	>0,096	0,898	95,08	-	-	-	-	-	-

(Fuente: Propia)

Los componentes de la aleación se encuentran dentro de los parámetros a excepción del Zn (0,419%) y Si (1,08%), esto se debe principalmente a la alta competencia que

existe en el mercado, por lo cual ha dado paso a la falta de cumplimiento de las normas mínimas en la calidad [59].

Según la literatura de Wu et al. (2004) y Kutz (2015), la composición química debe ser como se muestra en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Composición química de la aleación de aluminio 6061.

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Valor [%]	0,4-0,8	0,7	0,28	0,15	1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	Restante

(Fuente: [60], [61])

Según la ASM International (1990), el cinc no aporta beneficios al aluminio. Sin embargo, junto con la adición de Cu y/o Mg, mejora la respuesta al endurecimiento por tratamiento térmico o natural.

La adición de silicio incrementa las características de fundición, mejora la fluidez y aumenta la resistencia al agrietamiento en caliente [62].

El litio es otro componente que se encuentra en mayor cantidad (0.89%), el cual permite mejorar el módulo de elasticidad y disminuir la densidad [63].

Según Kutz (2015), la aleación de aluminio 6061 es susceptible a ser tratada térmicamente, en la Tabla 3.16. se describe la nomenclatura comúnmente utilizada para este elemento.

Tabla 3.16. Nomenclatura estándar para describir el tratamiento térmico del aluminio 6061.

Nomenclatura	Tratamiento térmico
O	Recocido
T4	Tratamiento de solubilización y envejecido naturalmente a condiciones estables.
T6	Tratamiento de solubilización y envejecido artificial.

(Fuente: [54])

La Figura 3.19. presenta la metalografía obtenida por Wu et al. (2004) a la aleación de aluminio 6061 extruida en la cual se observan partículas de siliciuro de magnesio (Mg_2Si) de color negro y partículas de Fe_3SiAl_2 de un color grisáceo en forma de precipitados [64].

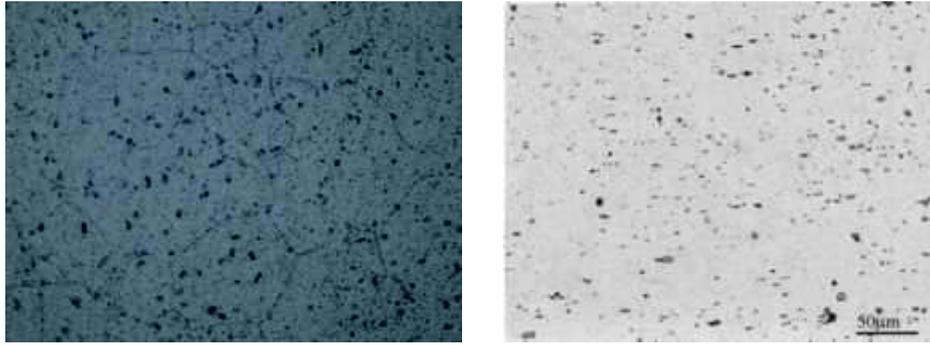


Figura 3.19. Comparación de la microestructura de A6061 de estudio (izquierda) y según Wu et al. (derecha).
(Fuente: [60])

Al comparar la microestructura del material base mostrada en la Tabla 3.8. se observa claramente los mismos componentes característicos de la aleación de aluminio 6061 obtenida mediante extrusión.

Según Singh (2017), las aleaciones de la serie 6xxx son tratables térmicamente mediante el endurecimiento por precipitación. Esto implica dos pasos: tratamiento térmico de la solución y envejecimiento. El tratamiento térmico de la solución se realiza elevando la temperatura de la aleación y manteniéndola durante un tiempo (aproximadamente una hora). El objetivo de esto es disolver todos los elementos de aleación en una solución sólida de aluminio. Luego la aleación se enfría en agua, aceites o minerales con la finalidad de enfriarlo lo suficientemente rápido como para evitar que los elementos de aleación se precipiten al enfriarse. Entonces, tenemos una solución sólida de magnesio, silicio y otros elementos en aluminio a temperatura ambiente. Esto se llama tratamiento T4 [65].

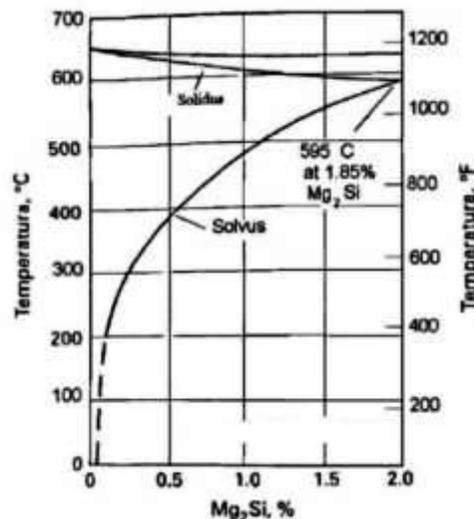


Figura 3.20. Diagrama de fases de la aleación AA6061.
(Fuente: [66])

La característica principal del diagrama para la aleación de aluminio 6061 y el compuesto Mg₂Si es la formación de un sistema cuasi-binario por las características propias de esta aleación, no existe compuesto ternario alguno, sino una mezcla de Mg₂Si (Figura 3.20.). El compuesto Mg₂Si, inicialmente considerado como un compuesto iónico, según las investigaciones recientes, se comporta como un semiconductor [67]. La solubilidad del compuesto Mg₂Si en el aluminio varía en función de la temperatura y el exceso de magnesio como se muestra en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17. Solubilidad del Mg₂Si en función de la temperatura y del exceso del magnesio en la matriz.

Temperatura °C	Exceso de magnesio				
	0 %	0,20%	0,40%	0,80%	1%
595	1,85				
535	1,2	1,15	0,97	0,67	0,55
500	1,05	0,85	0,69	0,45	0,36
400	0,53	0,35	0,2	0	0
300	0,3	0,16	0,02	0	0
200	0,25	0,05	0	0	0

(Fuente: [67])

Por el contrario, el silicio no tiene efecto apreciable sobre esta solubilidad [67]. Si se conoce el peso atómico del magnesio y silicio, se obtiene la relación estequiométrica entre magnesio y silicio para encontrar la formulación química del Mg₂Si para las aleaciones de la serie 6xxx [68].

$$\frac{Mg}{Si} = \frac{48,61}{28,0855} = 1,73$$

Ecuación 3.2. Relación estequiométrica entre magnesio y silicio.
(Fuente: Propia)

Si la relación indica niveles mayores a 1,73, la aleación posee exceso de Mg, menor a 1,73 la aleación posee exceso de Si y si es igual a 1,73 la aleación es de tipo estequiométrica [68].

Aplicando la Ecuación 3.2. a la aleación de aluminio analizada en este estudio (ANEXO I) se obtiene 0,531 que indica un exceso de silicio.

A continuación, es necesario conocer cuánto silicio es consumido para formar Mg₂Si; mediante la relación estequiométrica se puede establecer aplicando la siguiente ecuación:

$$\%Si = \frac{\%Mg}{1,73} = \frac{0,575}{1,73} = 0,332$$

Ecuación 3.3. Porcentaje de silicio consumido para formar Mg₂Si.
(Fuente: Propia)

Para calcular el porcentaje de peso de Mg₂Si de la aleación de aluminio se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%Mg_2Si = \%Mg + \%Si_{consumido}$$

Ecuación 3.4. Porcentaje de peso de Mg₂Si.
(Fuente: [68])

Para la aleación de aluminio se obtiene un valor promedio de 0,907 de porcentaje de peso de Mg₂Si. Al comparar el resultado con los datos de la Tabla 3.17., se puede observar que a la varilla de aluminio se realizó la solubilización a una temperatura entre 400 [°C] y 500 [°C].

Luego la aleación se enfría en un medio adecuado y con el exceso de silicio se promueve una respuesta adicional en el envejecido en dos formas, refinando el tamaño de las partículas (Mg₂Si) y precipitando silicio [66].

3.2.4.3. Análisis de las muestras por microscopia

El estudio y caracterización de la zona de unión para las 9 probetas soldadas se basa en las micrografías contenidas en la Tabla 3.9. y 3.10., las mismas que serán referenciadas por su codificación para el presente análisis.

El ataque químico realizado a todas las probetas se dividió en dos partes: primero se atacó al latón y en segundo lugar al aluminio con los reactivos y tiempos mencionados en la Tabla 2.12.

A continuación, se presenta las principales características encontradas en las microscopias realizadas tanto de la junta simple como la de ranura o lengüeta.

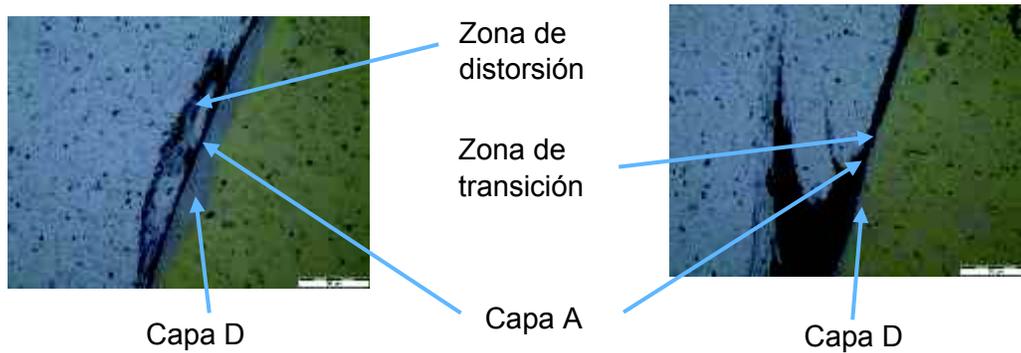


Figura 3.21. Defectos y capas intermetálicas de la junta 2.
(Fuente: Propia)



Figura 3.22. Defectos y capas intermetálicas de la junta 5D.
(Fuente: Propia)

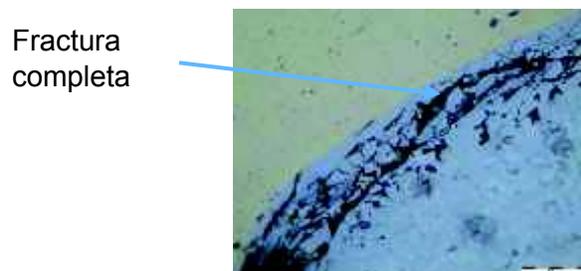


Figura 3.23. Defectos y capas intermetálicas de la junta 9D.
(Fuente: Propia)

A continuación, se realiza el análisis de las micrografías de junta simple presentes en la Tabla 3.9.

La junta 2 (sin precalentamiento) presenta una pequeña zona de distorsión (deformación del aluminio) ocasionado por la velocidad de rotación (**Figura E-F**), esto se ratifica en los estudios realizados por Rombaut (2011), además de desarrollar una zona de transición y engrosamiento de las capas intermetálicas A y D [69], las cuales dependiendo de la ubicación y los parámetros de soldadura se pueden observar de diferentes formas (Figura 3.21) [70]. En el caso de tener una mayor cantidad de capas

(capa B y C) puede ocasionar la aparición de microfisuras, lo cual indica un exceso de la velocidad de rotación [69].

La **Figura C y D** con ataque químico al latón muestran una pequeña zona afectada por el calor con una coloración distinta, esto se debe a la baja temperatura de rozamiento entre las probetas y la falta de un precalentamiento. Adicionalmente se observa la forma de grano el cual no presenta variaciones en comparación con el grano del material base.

La junta 5 (sin precalentamiento) presenta pequeñas cavidades, deformación del aluminio y una capa intermetálica uniforme (**Figura H, K y L**). La **Figura I y J** con ataque químico al latón muestran una pequeña zona afectada termomecánicamente y no presenta variaciones de grano.

La junta 6 (con precalentamiento) presenta cavidades, zonas de distorsión en el aluminio, además de la presencia de una delgada línea uniforme de coalescencia (**Figura M, N y R**) según la ISO 15620, mientras que en las **Figuras Q y R** se observa que no existe variaciones en la forma del grano cerca de la unión ni cerca de la grieta como lo ratifica Liu et al. (2004).

La **Figura O** muestra la formación de tres zonas cercanas a la unión presentes en la varilla de latón y se pueden diferenciar por sus tonalidades de color marrón [71]. En estas zonas no se alcanza a producir cambios observables en la estructura del grano del latón como se muestra en la **Figura P**.

La micrografía de la junta 10 realizada con un aumento de 100X y sin ataque químico no presenta coalescencia alguna entre los materiales, tan sólo dos materiales unidos “débilmente”, tal como se muestra en la **Figura S**. Al realizar un aumento de 500x (**Figura T**) se aprecia pequeños fragmentos de coalescencia que no son suficientes para garantizar una buena unión. Esta falta de unión se debe a parámetros como la presión o tiempos de soldadura, los cuales garantizan que no existan vacíos entre los materiales [3].

La **Figura U y V** muestran el ataque químico realizado al latón con un aumento de 100x y 500x respectivamente donde se aprecia claramente la falta de unión entre los materiales debido a que el precalentamiento se realizó a un lado de la zona de unión del latón, por lo cual, al aplicar un tiempo excesivo de la fuerza de forja (ANEXO II) ocasiono que el latón se deforme fuera de la interfaz y produzca una unión pobre sin

presencia de material deformado (Tabla 2.10.), además de observar un cambio en la forma del grano del latón.

El ataque químico realizado al aluminio mostrado en las **Figuras W y X** corroboran la falta de unión entre los materiales, sin embargo, a diferencia del latón no existe un cambio de grano en el aluminio al compararlo con su micrografía base.

A continuación, se realiza el análisis de las micrografías de junta de ranura presentes en la Tabla 3.10.

La **Figura A-Z1** muestra una esquina externa de la unión entre las probetas de aluminio y latón para la junta 1D sin ataque químico y con un aumento de 100x, donde se observa la coalescencia de los materiales en forma de filamentos alargados que ingresaron en el latón [72] con la presencia de concentradores de esfuerzos que pueden provocar fracturas [3]. La **Figura C** con un aumento de 500x y sin ataque químico muestra el mismo comportamiento de filamentos alargados de aluminio a través del latón. La **Figura D** muestra fragmentos de latón en el aluminio, los cuales fueron desprendidos por la fricción propia del proceso de soldadura y reafirmando la coalescencia de los materiales en la zona de unión.

El ataque químico realizado al latón a la muestra 1D como se observa en la **Figura E-Z3** presenta la aparición de dos zonas en el latón con tonos de color marrón claro y marrón oscuro cerca de la unión, siendo esta última la zona afectada por el calor según estudios realizados por Heidarzadeh et al. (2016) y Mironov et al. (2014), conservando el tamaño de grano en la estructura de la varilla de latón cerca de la unión como se ve en la **Figura F-Z1** con un aumento de 100x.

La **Figura G-Z1** muestra el ataque químico realizado al aluminio con un aumento de 100x, se observa el sentido ascendente de los hilos formados por la mezcla mecánica en la unión, debido al sentido horario de giro de la varilla de latón que genera la fricción entre los materiales, provocando una distorsión en la forma del grano en la varilla de aluminio.

La junta 5D presenta características similares a la junta 1D, sin embargo, las zonas de carencia de material son de mayor magnitud como se muestra en la **Figura I-Z2**, además de la poca presencia de filamentos de aluminio incrustados en el latón. Aunque existen fragmentos de latón en el interior de la varilla de aluminio como se ve en la **Figura L**.

Al realizar el ataque químico sobre la junta 5D se observa la zona afectada por el calor presente en la varilla de latón con una tonalidad distinta y no presenta cambios notables en su forma y tamaño de grano como se aprecia en la **Figura N**.

La **Figura M-Z1** muestra una distorsión en el grano de aluminio muy similar a la junta 1D, siendo esta una zona crítica debido a la geometría de la unión, ya que al observar la **Figura P-Z1** se observa que la forma del grano es muy similar al del material base para la varilla de aluminio.

Las micrografías de las juntas 8D, 9D y 10D cuentan con un diseño de ranura en las probetas y fueron soldadas con un calentamiento previo en la varilla de latón, las cuales presentan gran cantidad de imperfecciones como: carencia de material en la zona de unión y grietas según la ISO 15620 y Faes et al. (2010), tal y como se observa en las **Figura R**, **Figura Z-Z2**, **Figura AH-Z3/Z4** y **Figura AI-Z3/Z4** sin ataque químico.

Al realizar el ataque químico al latón se observa una delgada zona de unión seguido de una zona afectada termomecánicamente, una zona afectada por el calor y finalmente la zona del material base que no presenta afectación alguna [72], tal como se muestra en la **Figura U-Z4** y **Figura AK-Z3/Z4**.

La **Figura W-Z3** muestra el ataque químico realizado a la varilla de aluminio, donde se observa una distorsión del grano en la zona afectada termomecánicamente y una delgada zona de unión [73], [74] como se observa en la **Figura AL-Z1**. En la **Figura X-Z4** se observa como las grietas se dirigen hacia el interior de la varilla de aluminio debido al desalineamiento y rotura de la lengüeta durante la etapa de fricción, siendo esto un concentrador de esfuerzos [3], el mismo fenómeno se observa en la **Figura AE-Z2**. Al realizar un aumento a 500x como se aprecia en la **Figura AF**, observamos incrustaciones de latón en la zona afectada termomecánicamente del aluminio, y lo mismo ocurre en la **Figura AB-Z3**.

Según Tufaro y Svoboda (2014), las zonas oscuras de las micrografías referente a las probetas con diseño de junta tipo ranura con y sin precalentamiento ubicadas en la unión son consecuencia de óxidos presentes relacionados con un excesivo calor y un flujo de material plastificado insuficiente.

En algunas soldaduras se observan capas intermetálicas (coalescencia) que son susceptibles de agrietarse, como se muestra en la Tabla 3.10., debido a que no es capaz de resistir las tensiones residuales provocadas por un enfriamiento acelerado [75].

La junta 6 presenta la formación de cuatro zonas que se diferencian por sus tonalidades de marrón (Figura 3.24.), en la metalografía se aprecia que en la zona de unión (I) no existe tamaño ni forma de grano debido a la presencia de compuestos intermetálicos propios del proceso de soldadura en frío [76], la zona afectada termomecánicamente (II) es la causante de la deformación plástica (mínima en el latón) y acumulación de energía térmica [60], la zona afectada por el calor (III) presenta una deformación mínima en la forma del grano y finalmente tenemos la zona del material base (IV) con sus fases características $\alpha+\beta$ que no sufren variación alguna [74].

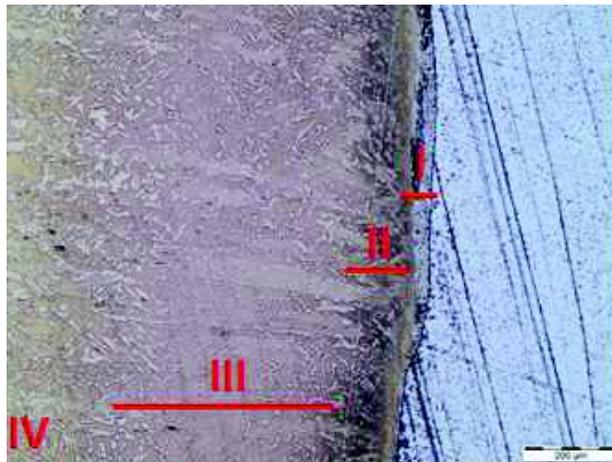


Figura 3.24. Micrografía de la junta 6, con un aumento de 50X y ataque químico. (A) Zona de unión. (B) Zona afectada termomecánicamente (ZATM). (C) Zona afectada por el calor (ZAC) y (D) material base.
(Fuente: Propia)

Como se observa en la Figura 3.25. las probetas que presentan una mayor longitud referente a su zona afectada por el calor y su zona afectada termomecánicamente fueron probetas a las cuales se les aplicó un tiempo de soldadura elevado, además de disminuir su zona de unión, esto se puede apreciar de igual manera en el estudio realizado por Kawai (1997).

La interfaz de soldadura formada en estado sólido entre aluminio y latón es susceptible a la nucleación y aumento de compuestos intermetálicos a temperaturas mayores a 120 [°C] [77]. Los compuestos intermetálicos formados poseen enlace covalente no-metálico, motivo por lo que presentan una alta fragilidad [78], [79].

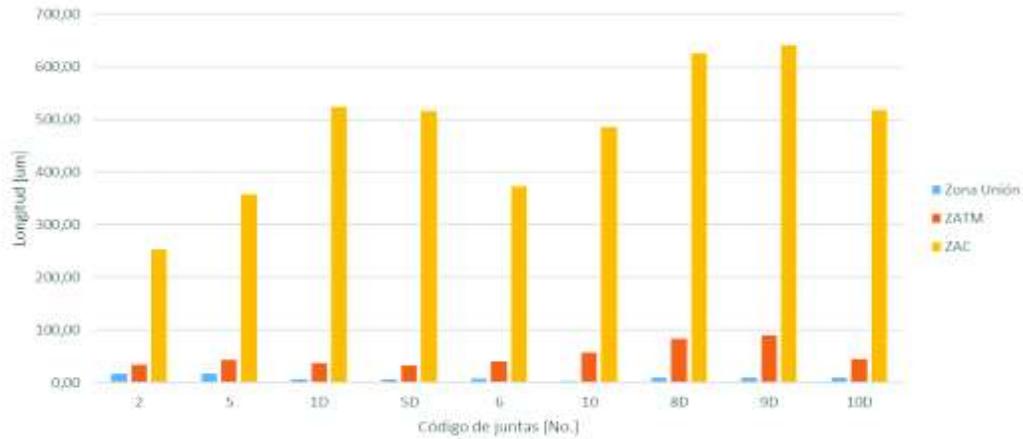


Figura 3.25. Longitud de la zona de unión, zona afectada termomecánicamente (ZATM) y zona afectada por el calor (ZAC).
(Fuente: Propia)

La unión en la soldadura por fricción es un proceso que trabaja con temperaturas relativamente bajas [1], [4] y la unión obtenida es más una mezcla mecánica ocasionada por la intensa deformación plástica que acelera la velocidad de difusión en la soldadura por fricción, lo que permite una concentración atómica suficiente para que los compuestos intermetálicos se formen incluso a bajas temperaturas [79].

En la Figura 3.26. observamos tres zonas (A,B,C) visibles en el compuesto intermetálico formado entre el latón y el aluminio, según el estudio de Akbarifar y Divadari (2016) muestran que la mayoría de los compuestos intermetálicos presentes en la interfaz son: A) Compuesto CuZn en mínima proporción y con un porcentaje de aluminio escaso, B) Compuesto Al_4Cu_3Zn el cual contiene un porcentaje de cinc mínimo y permanece estable desde 300 °C hasta la temperatura ambiente y C) Compuesto Al_2Cu siendo este último el de mayor proporción en el intermetálico.



Figura 3.26. Zona de intermetálico.
(Fuente: Propia)

3.2.5. Microdureza

Para el ensayo de microdureza realizado en las superficies tanto del material base como de la unión soldada, se aplicó las indicaciones de la norma ASTM E384, con una carga de 100 [gf] por un tiempo de 15 segundos, realizando un total de 14 indentaciones por probeta soldada. Las gráficas obtenidas en este procedimiento de dureza, presentan un comportamiento similar, pero con diferentes valores de dureza en la escala Vickers.

Los valores de dureza en el aluminio presentan un valor de 50 a 55 HV característico del material [80], mientras que el latón alcanza una dureza de 120 a 145 HV [81], los materiales presentan valores de microdureza constante a lo largo del eje axial hasta llegar a puntos de la unión cercanos donde se presentan variaciones (Figura 3.7.).

Los valores registrados de microdureza obtenidos cerca de la unión, es decir en la zona afectada por el calor y en la zona afectada termomecánicamente, son los más altos, tal como se muestran en los estudios de Liu et al. (2004) donde el aluminio posee microdurezas que van desde los 60 HV hasta los 66 HV, mientras que para el latón según Faes et al (2010), están en un rango de 146 HV a 183 HV. Para este estudio los valores de microdureza obtenidos en la varilla de aluminio alcanzan valores de hasta 65 HV, esta variación se puede atribuir a la elevada deformación plástica que presenta este material [74], mientras que para la varilla de latón los valores están entre 160 HV, siendo las probetas de junta de ranura las que mayor dureza presentan.

La variación de las microdurezas a lo largo de la zona de unión es debido a la presencia de diferentes capas intermetálicas, la variación del grano en las diferentes zonas (ZAC y ZATM) y por irregularidades en la interface [76], [82].

Como se puede apreciar en el ANEXO V existe una buena correlación entre las microdurezas y las diferentes zonas cercanas a la unión, causadas por la interacción de los materiales base y el efecto rotacional propio de la soldadura por fricción, presentando una curva similar para todas las probetas, donde los valores más altos de microdureza se dan en la ZAC y la ZATM, y los valores menores que corresponden a los del material base (aluminio y latón) conforme al estudio de Franco et al. (2009), tanto para las probetas de junta simple como para las probetas de junta de ranura.

Las probetas con diseño de junta tipo ranura presentan una dureza elevada esto se debe a las distorsiones presentes en el grano cerca de la unión (Figura M-Z1 y Figura

W-Z3) y se ratifica en el estudio realizado por Franco et al. (2009) quien indica que las líneas de flujo del material en la coalescencia evidencian una deformación, extendiéndose hasta la zona afectada termomecánicamente (ZATM) y presentando una variación en el grano, lo que ocasiona una mayor dureza tanto en la zona de unión, como en la ZATM y ZAC.

3.2.6. Análisis de junta simple frente a la junta de ranura o lengüeta

Las juntas simples 3 y 4 sin precalentamiento muestran una diferencia de encogimiento de 2,2 [mm] (Figura 3.27.) debido a una caída de fuerza axial al pasar de la fuerza de forja en la junta 4, tal como se muestra en el ANEXO II, lo cual no permitió concretar la unión de las zonas donde apareció nuevo material ocasionando la reducción de su resistencia a la tracción. La junta 3 mantiene la fuerza axial constante durante toda la etapa de fricción ocasionando una acumulación de material plastificado, el cual es extraído en la etapa de forja. Esto ocasiona la presencia de material deformado cerca de la zona de unión semejante a la Figura E y F pertenecientes a la junta 2 (Tabla 3.9).

La junta 1 presenta un bajo encogimiento axial debido a la baja fuerza de forja y un instante de aplicación de fuerza máxima que da origen a la aparición de zonas distorsionadas, cavidades y fracturas, tal como se observa en las micrografías de la junta 5 y 6 (Tabla 3.9.). Estos defectos ocasionan que su resistencia a la tracción disminuya (Figura 3.28.). Este comportamiento se encuentra presente en las juntas 2D, 3D y 4D, tal como se muestra en la Figura 3.27 y Figura 3.28.

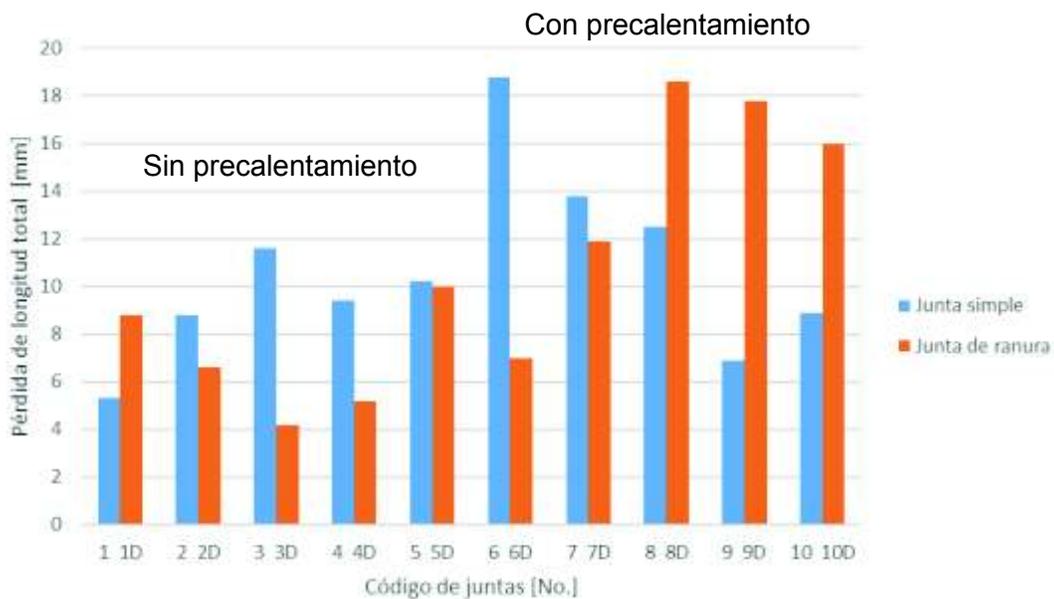


Figura 3.27. Pérdida de longitud total de juntas simples y juntas de ranura o lengüeta. (Fuente: Propia)

Al comparar la resistencia a la tracción promedio de la junta 2D, 3D y 4D (Tabla 3.11.) con la resistencia de la Junta 1 mostrada en la Figura 3.28., se observa que la junta 1 posee mejores características debido a su diseño que permite la extracción de contaminantes superficiales al contrario de las juntas de ranura donde los óxidos quedan atrapados, tal como se observa en la Figura 3.14 y Figura 3.15.

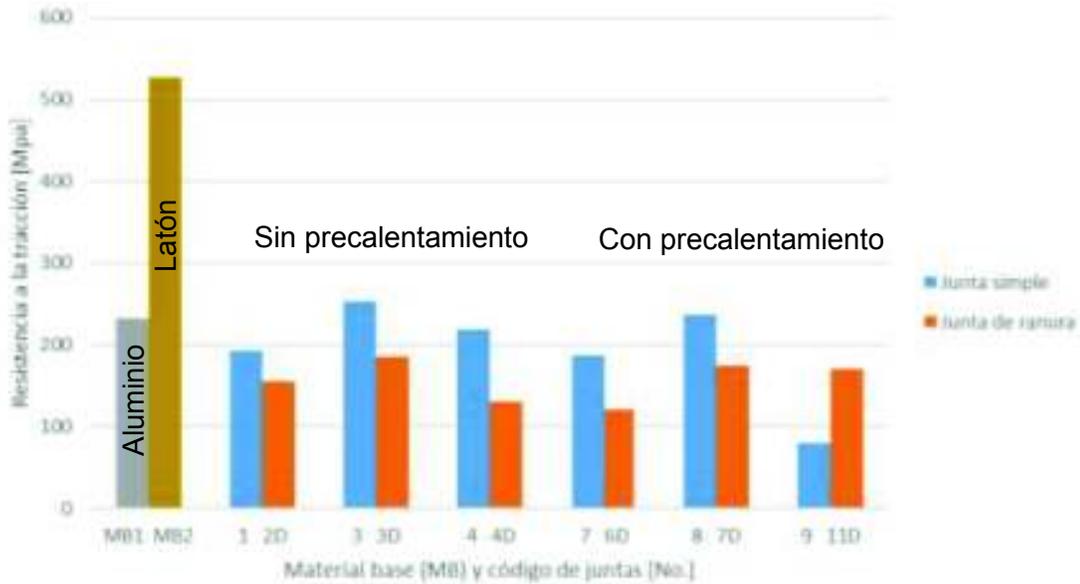


Figura 3.28. Resistencia a la tracción del material base, juntas simples y juntas de ranura o lengüeta.
(Fuente: Propia)

Las juntas 6, 7 y 8 presentan una disminución del encogimiento axial (Figura 3.29.), así como su temperatura de precalentamiento y fuerza de calentamiento, aunque la fuerza de forja no presenta una disminución consecutiva (ANEXO II). La junta 7 presenta una fuerza de forja de 800 [kgf], la cual no permitió que el material suavizado se compacte y por lo tanto posea una pobre resistencia mecánica, además de generar grietas, cavidades y una deformación excesiva especialmente en el aluminio. Este comportamiento se observa en las juntas de ranura 7D, 11D y 6D respectivamente.

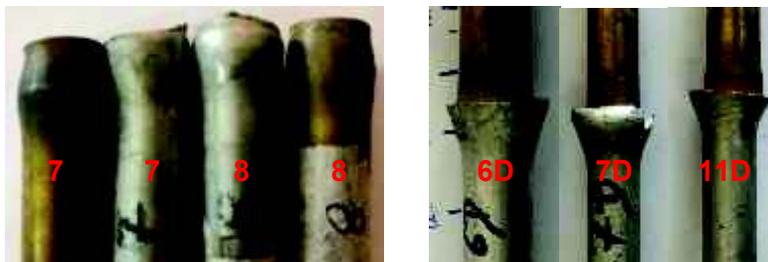


Figura 3.29. Deformación del aluminio y latón de las juntas 7, 8, 6D, 7D y 11D.
(Fuente: Propia)

En el caso de las juntas 9 y 10 no presentan buena coalescencia debido a la carencia de la fase de calentamiento, además de la temperatura de precalentamiento que ocasionó la presencia de óxidos y contaminantes superficiales que reducen las propiedades mecánicas de la junta (Tabla 3.1.). El mismo comportamiento se observa en las juntas de ranura 8D, 9D y 10D, las cuales, al ser sometidas a una elevada temperatura y fuerza de forja, el aluminio en lugar de producir material plásticamente deformado, se introdujo dentro de la ranura del latón ocasionando un ensanchamiento del mismo atrapando los óxidos y por ende un aumento del diámetro.

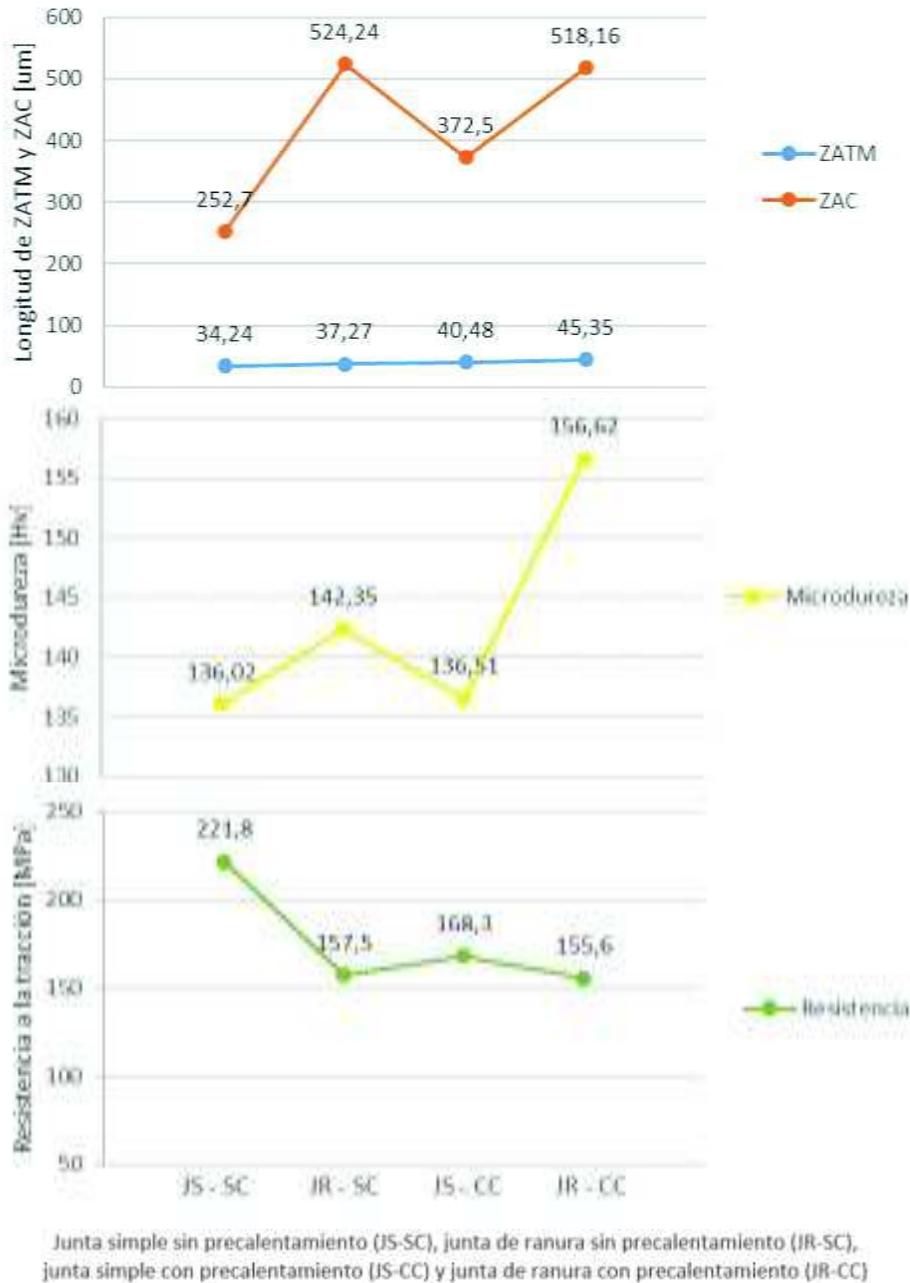


Figura 3.30. Comparación de resultados del ensayo de tracción, microdureza y longitudes ZATM – ZAC con respecto a las juntas simples y de ranura con y sin precalentamiento. (Fuente: Propia)

La Figura 3.30. relaciona la longitud de la zona afectada termomecánicamente y la zona afectada por el calor con la microdureza de la unión de las zonas y la resistencia a la tracción. La longitud de la ZAC, ZATM, microdureza y resistencia a la tracción dependen de la correcta aplicación de los parámetros de soldadura (fuerza axial, tiempo de soldadura y velocidad de rotación) debido a la influencia que tienen sobre la calidad de la junta soldada.

El aumento de la fuerza axial ocasiona un aumento de la resistencia a la tracción y la dureza en la zona afectada por el calor (ZAC), siempre que se aplique una fuerza axial creciente como se muestra en la Figura 1.2. tal como la ratifica Meyer (2003) en su estudio. En el caso de las juntas de ranura (JR-SC y JR-CC) y juntas simples con precalentamiento (JS-CC) no cumplen esta regla debido a la variación de la fuerza axial y la carencia de la fase calentamiento (ANEXO II).

Por otra parte Linares (2011) elaboró un trabajo sobre “Efecto de la presión sobre la calidad de las uniones de soldadura por fricción de un Aluminio AA-6061” y encontró que una fuerza superior a los 15 [kN] (1530 [kgf]) aumenta la longitud de la zona afectada por el calor y por consiguiente la zona afectada termomecánicamente reduciendo la zona de unión, esto debido a una disminución del grano ocasionado por una recristalización este comportamiento se presenta en las probetas 8D y 10D, tal como se observa en la Figura 3.25., las cuales presentan elevadas cargas en la soldadura (Tabla 3.2.), además, Linares (2011) menciona que la dureza es mayor en la zona de la unión y varia al alejarse, pero sin sobrepasar este máximo valor, siendo este comportamiento característico de todas las probetas analizadas en este estudio para los ensayos de microdureza (Figura 3.30.).

La JS-SC presenta una elevada resistencia a la tracción y una moderada longitud de la ZAC, la cual indica una adecuada aplicación de la fuerza axial tal como se observa en la Figura 3.1. y el ANEXO II que provoca una unión aceptable con pocas zonas de distorsión y una buena coalescencia de las juntas. La JR-CC presenta una elevada aplicación de la fuerza de forja que ocasiona una elevada longitud de la ZAC, aunque la resistencia a la tracción es baja debido a la carencia de la fase de calentamiento tal como se muestra en el ANEXO II que origina una unión pobre con aparición de defectos como grietas, uniones incompletas e inclusiones. De la misma manera la JR-SC y JS-CC presentan una baja resistencia a la tracción y microdureza ocasionado por el diseño de la junta de ranura y el precalentamiento que causa un aumento de la ZAC.

La Figura 3.31. muestra como los parámetros: fuerza de forja y tiempo de soldadura intervienen en la longitud de la zona afectada por el calor, afectando también la zona de unión (Figura 3.25.) y por consiguiente afectando las propiedades de la unión (Figura 3.30.). Se observa que las juntas 1D y 10D, presentan la mayor longitud de la zona afectada por el calor, siendo un alto valor de presión de forja el causante de la longitud del ZAC para la junta 10D y aunque las juntas 2 y 1D presentan presiones similares, la longitud del ZAC es diferente, esto se debe al tiempo de soldadura que se aplicó a la junta 1D, siendo 50 segundos por lo tanto la presión de forja y el tiempo de soldadura afectan a la longitud del ZAC. En el caso de la junta 6 presenta un elevado tiempo y fuerza de forja (no supera los 15 [kN]) ocasionando que la zona del ZAC sea moderada.

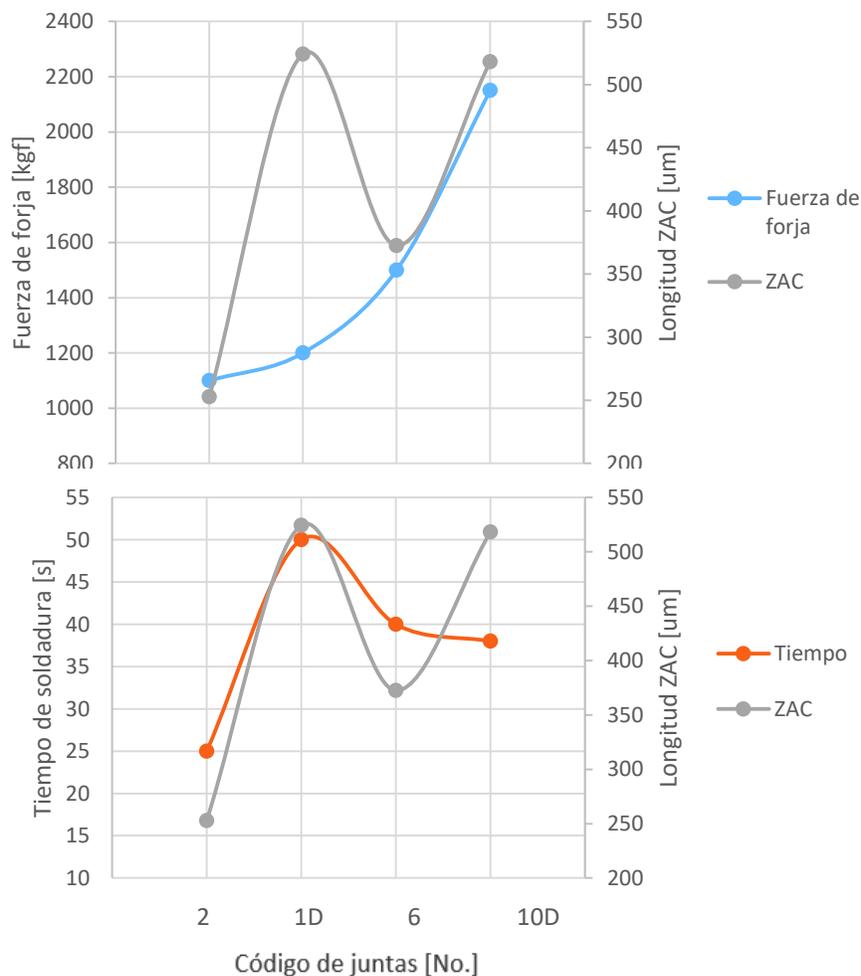


Figura 3.31. Comparación de la fuerza de forja, tiempo de soldadura y longitud ZAC con respecto a las juntas simples y de ranura.
(Fuente: Propia)

La zona afectada termomecánicamente (ZATM) y la zona afectada por el calor (ZAC) se ven afectados por las variaciones de velocidad de rotación, además de la calidad de la unión como lo menciona Méndez (2011), citado por Cordero et al (2012) en su trabajo

“Determinación del tiempo en la etapa de calentamiento para obtener la unión de un aluminio AA 6063 soldado por fricción” encontrando que las juntas soldadas por encima de las 2000 [rpm] presentan una gran cantidad de material deformado y mayor número de granos de pequeño tamaño en la zona de la unión debido a la posible recrystalización, mientras que la zona afectada termomecánicamente (ZATM) aumentó ligeramente el tamaño y la cantidad de precipitados en comparación a las demás uniones realizadas a velocidades de 1400 y 1000 [rpm]. En el trabajo realizado en este estudio, se trabajó con una velocidad de rotación constante de 1000 [rpm], por lo cual la ZAC y ZATM no se ven afectadas por este parámetro.

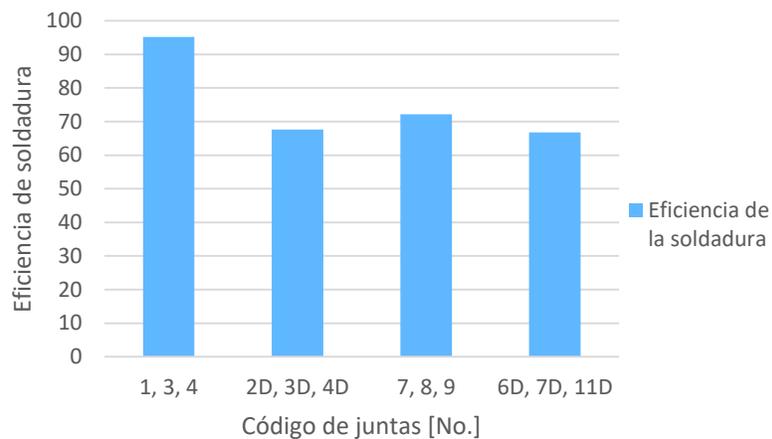
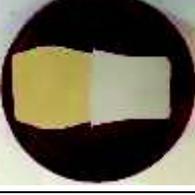
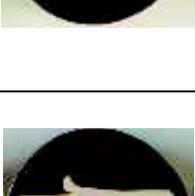


Figura 3.32. Eficiencia de soldadura.
(Fuente: Propia)

Además, Méndez M. (2011) muestra que las juntas poseen una resistencia a la tracción comparable con el material base cuando trabajan a velocidades de entre 1000 [rpm] a 1400 [rpm], y que la resistencia disminuía al aumentar el tiempo de fricción, además del aumento de la microdureza Vickers por el mismo factor, esto se puede apreciar en las juntas 1D y 10D, las cuales poseen tiempos de soldadura elevados (ANEXO II) y presentan una elevada dureza en la zona de unión, por otra parte las juntas 3, 4 y 8 presentan una resistencia a la tracción comparable con la del aluminio y los tiempos de soldadura se encuentran en un rango de 25 a 32 segundos. En la Figura 3.32. se observa este comportamiento al obtener la eficiencia de cada grupo de juntas soldadas.

A continuación, se presenta una comparación entre el material plásticamente deformado, análisis de la microestructura y microdureza.

Tabla 3.18. Descripción de las observaciones de las juntas simples y de ranura.

Código	Metalografía	Parámetros	Comentarios	Calidad
2 (JS-SC)		F ₁ = 450 [kgf] t ₁ = 15 [s] F ₂ = 1100 [kgf] t ₂ = 10 [s] n = 1000 [rpm]	-Mínima zona de deformación en el aluminio. -Capa intermetálica (17,70 μm).	Buena
5 (JS-SC)		F ₁ = 400 [kgf] t ₁ = 11 [s] F ₂ = 1250 [kgf] t ₂ = 15 [s] n = 1000 [rpm]	-Zonas de deformación en el aluminio. -Algunas grietas locales. -Capa intermetálica (18,11 μm).	Aceptable
6 (JS-CC)		F ₁ = 300 [kgf] t ₁ = 14 [s] F ₂ = 1500 [kgf] t ₂ = 26 [s] n = 1000 [rpm]	-Algunas grietas y cavidades. - Capa intermetálica (8,69 μm).	Baja
10 (JS-CC)		F ₁ = 100 [kgf] t ₁ = 19 [s] F ₂ = 1250 [kgf] t ₂ = 25 [s] n = 1000 [rpm]	-Zonas de deformación. -Algunas grietas y cavidades. - Capa intermetálica (3,05 μm).	Baja
1D (JR-SC)		F ₁ = 250 [kgf] t ₁ = 25 [s] F ₂ = 1200 [kgf] t ₂ = 25 [s] n = 1000 [rpm]	-Zonas de deformación. -Presencia de filamentos alargados de aluminio en el latón. -Óxidos y contaminantes superficiales. - Capa intermetálica (6,63 μm).	Baja
5D (JR-SC)		F ₁ = 250 [kgf] t ₁ = 12 [s] F ₂ = 1000 [kgf] t ₂ = 16 [s] n = 1000 [rpm]	-Zonas de deformación. -Presencia de cavidades. -Fracturas completas. -Óxidos y contaminantes superficiales. - Capa intermetálica (6,21 μm).	Baja
8D (JR-CC)		F ₁ = 0-100 [kgf] t ₁ = 15 [s] F ₂ = 1800 [kgf] t ₂ = 18 [s] n = 1000 [rpm]	-Zonas de deformación. -Presencia de cavidades. -Fracturas completas. -Óxidos y contaminantes superficiales. - Capa intermetálica (10,49 μm).	Baja

9D (JR-CC)		$F_1 = 0-100$ [kgf] $t_1 = 14$ [s] $F_2 = 1000$ [kgf] $t_2 = 14$ [s] $n = 1000$ [rpm]	-Zonas de deformación. -Presencia de cavidades. -Fracturas completas. -Óxidos y contaminantes superficiales. - Capa intermetálica (10,48 μm).	Baja
10D (JR-CC)		$F_1 = 0-100$ [kgf] $t_1 = 20$ [s] $F_2 = 2150$ [kgf] $t_2 = 18$ [s] $n = 1000$ [rpm]	-Zonas de deformación. -Presencia de cavidades. -Fracturas completas. -Óxidos y contaminantes superficiales. - Capa intermetálica (9,39 μm).	Baja

(Fuente: Propia)

La Tabla 3.18. muestra que la junta 2 tiene una buena cantidad de material plásticamente deformado (flash) por parte del aluminio, lo que indica la generación de calor adecuada y la expulsión de óxidos y contaminantes superficiales, además de presentar buenas características. La junta 5 presenta poca formación de flash, que es una indicación de una generación de calor inadecuada, esto lo ratifica Rafi et al. (2010).

La formación de grandes cantidades de material deformado plásticamente no siempre se traduce en uniones fuertes como es el caso de las juntas 6, 8D, 9D y 10D que presentan curvas finas en la zona de unión debido a la alta fuerza de forja aplicada y un excesivo encogimiento axial [83]. Otro factor es la elevada temperatura de precalentamiento que provoca el aumento de material plastificado, lo cual indica una disminución del par y por ende de la generación de calor [5].

Las juntas 10, 1D y 5D presenta una pobre concentración de material plásticamente deformado y no presentan un segundo nivel de fricción, por lo cual pasa directamente a la etapa de forja (ANEXO II), ocasionando la presencia de óxidos y contaminantes superficiales que reducen las propiedades mecánicas de la junta, además de curvas finas en la zona de unión.

A continuación, se presenta una comparación entre los valores promedios obtenidos en los diferentes grupos de soldadura además de la resistencia a la tracción promedio con respecto a otros estudios similares.

Tabla 3.19. Descripción de los valores obtenidos de las juntas simples y de ranura.

Grupos	Fuerza de calentamiento	Fuerza de forja	Tiempo total	Resistencia a la tracción	
	Prom. [kgf]	Prom. [kgf]	Prom. [s]	Prom. [MPa]	Al [MPa]
1, 3, 4 (JS-SC)	267	1167	26	221,76	233
2D, 3D, 4D (JR-SC)	250	1100	28	157,50	
7, 8, 9 (JS-CC)	133	1183	30	168,25	
6D, 7D, 11D (JR-CC)	200	1217	35	155,59	

(Fuente: Propia)

La Tabla 3.19. muestra que la fuerza de calentamiento, la fuerza de forja y el tiempo de soldadura presentan variaciones debido a las diferentes condiciones de soldadura en cada grupo. Es por esta razón que la resistencia a la tracción promedio no supera la resistencia del material base del aluminio debido principalmente a los cambios de la fuerza axial y el tiempo total durante el proceso de soldadura, tal como se muestra en las Figuras 3.1. – 3.4. y el ANEXO II.

Tabla 3.20. Comparación de la resistencia a la tracción promedio con otros estudios.

Material base (Al)	$\sigma_{Al\ 6061} = 233$ [MPa]			
Grupos de soldadura	1, 3, 4 (JS-SC)	2D, 3D, 4D (JR-SC)	7, 8, 9 (JS-CC)	6D, 7D, 11D (JR-CC)
		$\sigma_{prom.} = 221,76$ [MPa] $\eta = 95,18$ [%]	$\sigma_{prom.} = 157,5$ [MPa] $\eta = 67,6$ [%]	$\sigma_{prom.} = 168,25$ [MPa] $\eta = 72,21$ [%]
Amaguayo y Sánchez (2017) $\sigma_{Al\ 6063} = 136,3$ [MPa]	-		$\sigma_{prom.} = 80,68$ [MPa] $\eta = 59,19$ [%]	
Ashfaq y Rao (2014) $\sigma_{Al\ 6061} = 340$ [MPa]	$\sigma_{prom.} = 231,2$ [MPa] $\eta = 68$ [%]		-	
Alves et al. (2010) $\sigma_{Al\ 1050} = 165$ [MPa]	$\sigma_{prom.} = 136,8$ [MPa] $\eta = 82,91$ [%]		-	
Muralimohan et al. (2014) $\sigma_{Al\ 6082} = 170$ [MPa]	$\sigma_{prom.} = 152,22$ [MPa] $\eta = 89,54$ [%]		-	

(Fuente: Propia)

Donde:

JS-SC: junta simple sin precalentamiento

JR-SC: junta de ranura sin precalentamiento

JS-CC: junta simple con precalentamiento

JR-CC: junta de ranura con precalentamiento

σ_{prom} : resistencia a la tracción promedio de las juntas

σ_{al} : resistencia a la tracción del material base

La Tabla 3.20. muestra los resultados obtenidos en el ensayo de tracción y su eficiencia en comparación con el material base (aluminio) para los diferentes grupos de juntas. Además, se observa una comparación con trabajos similares, donde Amaguayo y Sánchez (2017) realizan un estudio aplicando un precalentamiento de 210 °C obteniendo una eficiencia del 59,15% la cual es comparable con este estudio para las juntas soldadas con precalentamiento.

En los trabajos realizados por Ashfaq y Rao (2014), Alves et al. (2010) y Muralimohan et al. (2014) logran eficiencias de 68 [%], 82,91 [%] y 89,54 [%] respectivamente en condiciones ambientales, que al compararlos con este estudio observamos que las juntas simples sin precalentamiento presentan una eficiencia aceptable, mientras que las juntas de ranura sin precalentamiento están por debajo de estos valores, esto se debe al diseño de las juntas (no permite la evacuación de óxidos e impurezas), cambios de fuerza axial durante el proceso y carencia de la fase de calentamiento.

Los valores obtenidos en las Tabla 3.1 y Tabla 3.2. presentan variaciones de los parámetros (velocidad de rotación, tiempo de soldadura y fuerza de calentamiento y forja) estimados en la Tabla 2.5. Esto se debe principalmente a que no fue posible pasar del primer nivel de fricción que corresponde a minimizar el torque sobre las piezas de trabajo, además de la falta de mantenimiento de los componentes mecánicos de la máquina de soldadura, dentro de los cuales se encuentran: desalineamiento de los mandriles para la sujeción de las probetas, presencia de juego en las guías del mandril móvil, pérdida de presión en el cilindro hidráulico durante la soldadura, exceso de vibración de la máquina de soldadura (falta de robustez), ausencia de glicerina en el manómetro (no hay estabilidad de la aguja).

El problema de las juntas de ranura es un elevado tiempo para el primer nivel de fricción, falta de un segundo nivel de fricción, una alta fuerza de forja, desalineación de las probetas (Figura 3.33.) y principalmente el diseño de la junta que no permite la salida

de los óxidos que dan origen a defectos en la interface como: uniones incompletas, inclusiones no metálicas, falta de coalescencia y grietas (Tabla 3.10.).

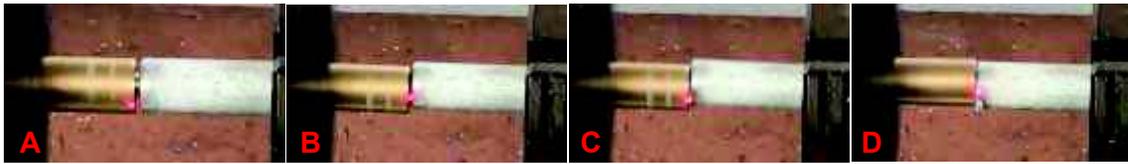


Figura 3.33. Soldadura de junta de ranura o lengüeta; (A) comienzo de la soldadura, (B) desalineación y rotura del pin durante la aplicación de presión, (C) desalineación y aparición de material plastificado, (D) desalineación y comienzo de formación del material plásticamente deformado.
(Fuente: Propia)

La junta simple presenta problemas de estabilidad de la fuerza axial aplicada ocasionada por el error humano al momento de aplicar la presión a las probetas.

La gráfica de la junta 2 (ANEXO II) es semejante a una curva típica de este proceso. Al comparar dicha curva con la Figura 3.34., se observa la fase de rozamiento (existe una fuerza axial aplicada F_0 por un instante para vencer el torque generado entre los componentes), de calentamiento y la etapa de forja en la curva de fuerza axial aplicada vs. tiempo. Estas mismas etapas se observa en las juntas 3 y 5.

La Figura 3.34. se modificó del diagrama desarrollado por Isshiki et al. (2005) en su artículo "Measurement of quantity of heat in friction welding".

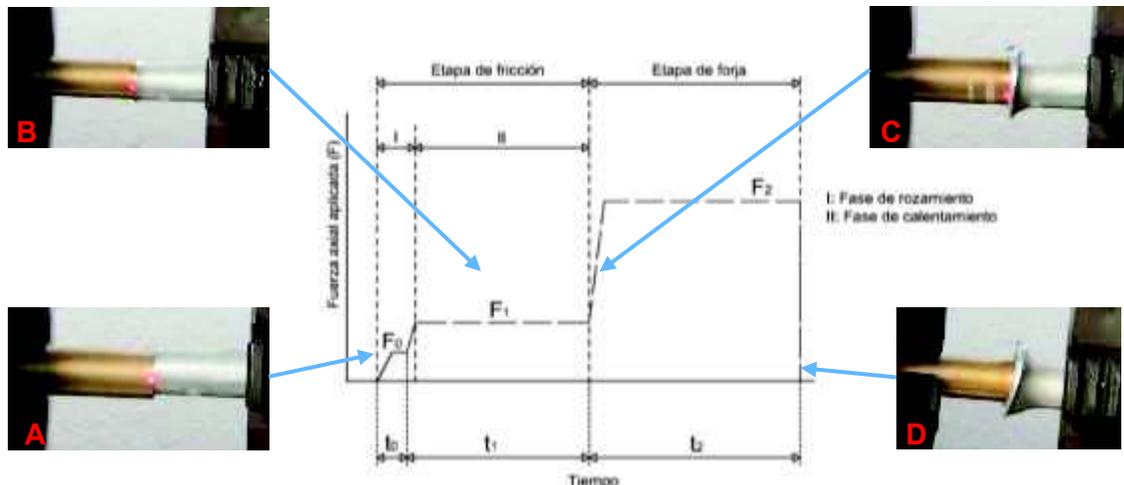


Figura 3.34. Variación de la fuerza axial aplicada frente al tiempo; (A) aplicación de la fuerza F_0 (B) aplicación de la fuerza F_1 y ampliación del diámetro hacia el exterior de las regiones de la zona de soldadura y comienzo del acortamiento de las piezas de trabajo (C) formación del material plásticamente deformado (D) final de la soldadura.
(Fuente: Propia)

Un diseño de junta recomendado es mantener a la probeta de mayor dureza con una disposición plana, mientras que la otra posea una geometría de cono truncado o semiesférico. Este tipo de junta comienza con la formación de material plastificado en el centro para luego ser desplazado a los bordes externos, lo cual cambiaría la forma típica de la aparición de las fases que se tiene en una junta simple. Dicho diseño podría ser una alternativa para obtener mejores características y propiedades de la junta final soldada en comparación con la junta simple.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1. Conclusiones

- En el presente estudio se logró cumplir los objetivos planteados, desde recopilar información, establecer los parámetros de soldadura, cuantificar las propiedades de la resistencia de la soldadura, análisis de las características de la microestructura de las juntas hasta comparar la eficiencia de la soldadura con y sin precalentamiento de la junta simple vs. la junta de ranura o lengüeta.
- La soldadura por fricción es un proceso ventajoso cuando se trata de unir materiales disímiles, pero no muy difundido, si tenemos en cuenta los parámetros que se deben controlar para obtener una soldadura correcta se aprecia que son menores en comparación con otros procesos, además, si se tienen los equipos adecuados, el factor humano tiene poca relevancia sobre los resultados que se desean obtener.
- Los materiales utilizados para la soldadura son soldables según las características y el estudio realizado del material base, además de ser comprobado en las diferentes pruebas realizadas en las juntas soldadas.
- La junta soldada 2 se puede considerar que tiene las mejores características utilizando los siguientes parámetros: sin precalentamiento, diseño de junta simple, velocidad de rotación de 1000 [rpm], fuerza de calentamiento de 450 [Kgf], fuerza de forja de 1100 [Kgf] y tiempo de soldadura de 25 segundos; se seleccionó esta probeta porque presenta un encogimiento axial intermedio, una metalografía aceptable y coalescencia total a lo largo de la junta.
- La junta simple debido a su forma geométrica sencilla permite vencer el torque inicial con facilidad, además de extraer los contaminantes superficiales y óxidos que aparecen en la etapa de fricción mediante el material plásticamente deformado (flash) con respecto a la junta de ranura o lengüeta, la cual presenta cavidades y grietas debido a las limitaciones mecánicas como: falta de robustez que ocasiona una excesiva vibración de la máquina y por ende de las probetas de trabajo, ocasionando el desalineamiento de las mismas al momento de la aplicación de la fuerza axial, además de la aplicación manual de dicha fuerza que ocasiona la aparición del error por factor humano.

- Al realizar un precalentamiento, la fuerza de forja requiere un mayor tiempo debido a la aparición de una gran cantidad de material plastificado, el cual debe ser extraído para evitar la aparición de defectos internos en la soldadura.
- La máxima deformación referente al encogimiento axial de las probetas soldadas tiene lugar en el aluminio; el latón no presenta una deformación apreciable, esto se debe a que posee mayor dureza, por lo tanto, no es tan factible soldar por fricción materiales disímiles cuyas durezas considerablemente diferentes.
- Los ensayos de tracción demostraron que las juntas simples sin precalentamiento (JS - SC) poseen una resistencia a la tracción promedio de 221,76 [MPa], es decir un 95,18% en comparación con la resistencia del material base aluminio (233 [MPa]). Al aplicar un precalentamiento en las juntas simples la eficiencia se redujo un 23%, obteniendo valores de 168,25 [MPa] de resistencia a la tracción. Por otra parte, las probetas con junta tipo ranura con y sin precalentamiento presentaron los valores más bajos con un 67,60 % y 66,78 % respectivamente.
- Las probetas de junta simple sin precalentamiento (JS - SC) poseen un porcentaje de eficiencia en la unión superior al 23% en comparación con las juntas simples con precalentamiento (JS - CC), de la misma manera las juntas de ranura sin precalentamiento (JR - SC) presentan una diferencia del 1% en comparación con las juntas precalentadas. Por lo tanto, las juntas soldadas a temperatura ambiente presentan mayor eficiencia que las probetas precalentadas.
- El análisis metalográfico permite observar que las uniones de las probetas que soportaron mayor carga presentan coalescencia en toda la unión y mezcla mecánica de los materiales utilizados, además de incrustaciones de un material en el otro, que a su vez le otorgaron más fortaleza a la soldadura. En cambio, en las probetas que fallaron en la junta soldada, se pudo apreciar varias discontinuidades en la unión como grietas, falta de coalescencia y carencia de material provocadas por la insuficiente fuerza aplicada tanto en el calentamiento como en la forja.

- La formación de fases frágiles se puede apreciar por la variación de dureza que se obtiene en la interfaz de soldadura posteriores al ensayo de microdureza, propias de cualquier proceso y que se aprecian por las diferentes tonalidades cercanas a la unión de soldadura, la misma que posteriormente al ser ensayada a tracción presenta una baja resistencia mecánica, generando así una fractura de tipo frágil en la zona afectada termomecánicamente

4.2. Trabajos futuros

- Para mejorar el estudio de la soldabilidad de materiales disímiles aluminio – latón, se debe considerar la variación del diámetro del aluminio porque es el material que mayor deformación presenta, estudiando las características de unión y determinar cuál es su influencia sobre la soldadura.
- Se necesita un estudio para realizar un análisis del comportamiento de la soldadura y sus propiedades cuando existe corrosión, ya que debido a las características diferentes de los materiales empleados su aplicación en ambientes altamente corrosivos o dañinos puede ser de gran utilidad.
- Se necesita un estudio que abarque más a profundidad el comportamiento de la soldadura y sus propiedades cuando existe más de dos variaciones en el diseño de la junta de unión, debido a que puede existir diseños en los cuales se mejoran las propiedades y realizar un costo beneficio de su aplicación.
- Se necesita un estudio para reducir las zonas frágiles en la soldadura, esto mediante un tratamiento térmico como se indica en la norma ASME sección VIII, Div1.1 para que así los materiales base recuperen su microestructura.
- Se necesita realizar un análisis de la soldadura por fricción para materiales tanto disímiles como similares mediante un modelo de elementos finitos, para poder seleccionar de mejor manera las variables de soldadura a utilizar, mejorando las uniones entre los materiales y comparar los resultados con trabajos realizados en las mismas condiciones.
- Se necesita realizar un estudio con un diseño en la junta de unión que facilite la salida de óxidos por medio del material plásticamente deformado, para que de este modo la alineación de los ejes no sea un factor crítico al momento de la soldadura.

Referencias Bibliográficas

- [1] American Welding Society, *Welding Handbook 9th Edition, Vol. 3, Welding Processes, Part 2*, 9th Edition., vol. 3. Miami: American Welding Society, 2007.
- [2] ASM International, *ASM Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing, and Soldering*, vol. 6. ASM International, 1993.
- [3] International Organization for Standardization, *ISO 15620 Welding - Friction welding of metallic materials*, 1st Edition. International Standard, 2000.
- [4] G. Cordero, R. Rodríguez, y L. Piña, "Determinación del tiempo en la etapa de calentamiento para obtener la unión de un aluminio AA 6063 soldado por fricción", *REDIP - Rev. Digit. Investig. Postgrado*, vol. 2, núm. 5, nov. 2012.
- [5] A. Meyer, "Friction Hydro Pillar Processing Bonding Mechanism and Properties", *GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH*, p. 132, 2003.
- [6] MTI, "Rotary Friction Welding", *Rotary Friction Welding*. [En línea]. Disponible en: <http://www.mtiwelding.com/technologies/rotary-friction-welding/>. [Consultado: 01-sep-2017].
- [7] MTI, "Friction Welding", *Friction Welding*. [En línea]. Disponible en: <https://www.mtiwelding.com/wp-content/uploads/2015/11/mti-friction-welding-technology-brochure.pdf>. [Consultado: 01-sep-2017].
- [8] MTI, "Rotational Friction Welding", *Rotational Friction Welding*. [En línea]. Disponible en: <https://www.mtiwelding.com/wp-content/uploads/2015/11/rotational-friction-welding-flyer.pdf>. [Consultado: 01-sep-2017].
- [9] A. Da Silva, "An Investigation on the Structure/Property Relationships of Solid State Welding Processes in a Titanium Matrix Composite Alloy (Ti6Al4V + 10 wt.% of TiC)", *GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH*, p. 173, 2006.
- [10] M. Kimura, H. Inoue, M. Kusaka, K. Kaizu, y A. Fuji, "Analysis Method of Friction Torque and Weld Interface Temperature during Friction Process of Steel FrictionWelding", *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, vol. 4, núm. 3, pp. 401–413, 2010.
- [11] R. L. O'Brien, *Manual de Soldadura Tomo III*, 8a Edición., vol. 3. México: Pearson Educación, 1996.
- [12] L. López, "Soldadura por fricción", Ingeniería, Universidad del Bío-Bío, Chile, 2013.
- [13] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*, 3ra Edición. Santa Fe: McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2007.
- [14] UMSS, *Introducción a los Procesos de Manufactura*. Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.

- [15] J. R. G. Bercero, S. B. Herrero, y A. M. C. López, *Introducción al conocimiento de los materiales y a sus aplicaciones*. Editorial UNED, 2010.
- [16] J. Duponchelle, *Manual del fundidor*, 1ra Edición. Barcelona: Gustavo Gili, 1932.
- [17] J. D. Durán, *Elementos metálicos y sintéticos*. Editex, 2013.
- [18] M. B. Amar y D. Dakir, “Resistencia a la abrasión de recubrimientos sobre aleaciones de aluminio, obtenidos por inmersión y por ensayos electroquímicos a partir de líquidos iónicos”, Ingeniería, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2013.
- [19] W. Hufnagel, *Manual del aluminio*. Reverte, 1992.
- [20] R. Singh, *Introduction to Basic Manufacturing Process and Workshop Technology*. New Age International, 2006.
- [21] A. S. Wadhwa y E. H. S. Dhaliwal, *A Textbook of Engineering Material and Metallurgy*. Firewall Media, 2008.
- [22] J. R. Davis, *Copper and Copper Alloys*. ASM International, 2001.
- [23] V. B. Bhandari, *Design of Machine Elements*. Tata McGraw-Hill Education, 2007.
- [24] D. R. H. Jones y M. F. Ashby, *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures and Processing*, 2nd Edition. Butterworth-Heinemann, 2012.
- [25] S. L. Kakani, *Material Science*, 1st Edition. New Delhi: New Age International, 2006.
- [26] S. Avner, *Introducción a la metalurgia física*, 2da Edición. México: McGraw-Hill Interamericana de México S.A.
- [27] W. L. Galvery y F. M. Marlow, *Welding Essentials: Questions & Answers*. Industrial Press Inc., 2001.
- [28] F. C. Campbell, *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. ASM International, 2008.
- [29] M. N, “Evaluating fatigue behavior of friction welded dissimilar material joints”, Doctor of Philosophy, Anna University, Chennai, 2017.
- [30] IBCA, *Catálogo de productos*, 3ra Edición. Quito, 2018.
- [31] F. J. Pancorbo Floristán, *Materiales para la fabricación de las griferías sanitarias*. Barcelona, 2009.
- [32] ASM International, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International, 1990.
- [33] E. Nogués Boada, “Caracterización de latones obtenidos por colada continua”, sep. 2008.
- [34] C. Maldonado, “The effect of interlayers on dissimilar friction weld properties”, Doctor in Applied Science, University of Toronto, Canada, 2001.

- [35] A. Can, M. Sahin, y M. Kucuk, "Thermically Evaluation and Modelling of Friction Welding", *Stroj. Časopis Za Teor. Praksu U Stroj.*, vol. 51, núm. 1, pp. 5–13, feb. 2009.
- [36] A. Can, M. Sahin, y M. Kucuk, "Modelling of Friction Welding", *Int. Sci. Conf.*, vol. 2, pp. 135–142, nov. 2010.
- [37] Ø. Grong, *Metallurgical modelling of welding*. London: Institute of Materials, 1997.
- [38] A. J. Adams, "Characterization and optimization of direct drive friction welding parameters in small stainless steel tube welds", Thesis, Montana State University - Bozeman, College of Engineering, Bozeman, 2013.
- [39] I. A. Khan, "Experimental and numerical investigation on the friction welding process", Doctor of Philosophy, Jawaharlal Nehru Technological University, Hyderabad, 2011.
- [40] M. Asif. M, K. A. Shrikrishana, y P. Sathiya, "Finite element modelling and characterization of friction welding on UNS S31803 duplex stainless steel joints", *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, vol. 18, núm. 4, pp. 704–712, dic. 2015.
- [41] M. Maalekian, E. Kozeschnik, H. P. Brantner, y H. Cerjak, "Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars", *Acta Mater.*, vol. 56, núm. 12, pp. 2843–2855, jul. 2008.
- [42] ASTM, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.
- [43] R. Bernau, *Elementos De Metalografía y de Acero al Carbono*. Santiago de Chile: Andres Bello, 1958.
- [44] ASTM, *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- [45] S. Frank, "Mobile Hardness Testing: Applications Guide for Hardness Testers", *GE Insp. Technol.*, 2006.
- [46] A. González Arias y C. González Arias, *Laboratorio de ensayos industriales*, 12^aed. Buenos Aires: Litenia, 1986.
- [47] G. A. Pantazopoulos y A. I. Toulfatzis, "Fracture Modes and Mechanical Characteristics of Machinable Brass Rods", *Metallogr. Microstruct. Anal.*, vol. 1, núm. 2, pp. 106–114, abr. 2012.
- [48] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Manufacturing Engineering & Technology*, 7a ed. Pearson Education, 2013.
- [49] D. A. Scott, *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*. Singapore: Irina Averkieff, 1991.
- [50] W. Jara Calderón, "Apuntes de materiales en medios marinos". Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2006.

- [51] G. C. Olivares, R. L. Mannheim, y J. L. Garin, "Using of scanning electron microscopy with stereoscopy for comparative study of brass bar produced by direct extrusion indirect and continuous casting", *ACTA Microsc.*, vol. 19, pp. 109–113, 2010.
- [52] A. Guevara, E. De la Torre, M. Lozada, y C. Llumiquinga, "Valorización de residuos metálicos de la industria de grifería", 2009.
- [53] OTTO FUCHS Dülken, "Copper and Copper Alloys CuZn39Pb3 (OF 2358)". 2014.
- [54] ASM International, *ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special- Purpose Materials*. ASM International, 1990.
- [55] A. Angiolani, *Introducción a la química industrial: fundamentos químicos y tecnológicos*. Andres Bello, 1960.
- [56] G. Pantazopoulos y A. Vazdirvanidis, "Characterization of the Microstructural Aspects of Machinable-Phase Brass", *Microsc. Anal.*, p. 13, 2008.
- [57] H. Baker, *ASM Handbook, Vol. 3, Alloy phase diagrams*. ASM International, 1992.
- [58] J. R. Davis, *Alloying: Understanding the Basics*. ASM International, 2001.
- [59] L. A. Soria Soto, "Diseño de un plan de producción basado en un análisis del inventario y de la demanda", Tesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2013.
- [60] N. Q. Wu, C. Xia, M. Li, N. Perrusquia, y S. X. Mao, "Interfacial Structure and Micro and Nano-Mechanical Behavior of Laser-Welded 6061 Aluminum Alloy Blank", *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 126, núm. 1, pp. 8–13, ene. 2004.
- [61] M. Kutz, *Mechanical Engineers' Handbook, Volume 1: Materials and Engineering Mechanics*. Wiley, 2015.
- [62] R. Ramírez, "Efecto del zinc en las propiedades mecánicas de una aleación Al-Si tipo A319", Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2012.
- [63] A. Valencia, "Las aleaciones aluminio-litio", núm. 8, pp. 1–37, 2016.
- [64] ASM International, *ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructures*, vol. 9. ASM International, 1998.
- [65] K. P. Singh Chauhan, "Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Aluminium Alloys (6xxx Series): A Literature Review", *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 6, núm. 3, pp. 386–389, 2017.
- [66] M. Nañez, "Comportamiento de una aleación de aluminio tratada térmicamente bajo carga de compresión", Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 1998.
- [67] A. Echavarría y G. Orrego, "Metalurgia básica de algunas aleaciones de aluminio extruidas o laminadas", *Rev. Colomb. Mater.*, núm. 2, pp. 1–20, feb. 2012.

- [68] H. A. N. Moscoso, W. H. V. Ortega, J. G. P. Salinas, F. R. M. Fiallos, y D. F. N. Núñez, “Análisis cuantitativo de los elementos aleantes principales precipitados en billets de aluminio de aleación 6063 en equipo de fundición de colada continua horizontal para el proceso de extrusión”, *Ingenius*, núm. 17, pp. 42–50, 2017.
- [69] A. Esmaili, H. R. Zareie Rajani, M. Sharbati, M. K. B. Givi, y M. Shamanian, “The role of rotation speed on intermetallic compounds formation and mechanical behavior of friction stir welded brass/aluminum 1050 couple”, *Intermetallics*, vol. 19, núm. 11, pp. 1711–1719, nov. 2011.
- [70] P. Rombaut, *Joining of dissimilar materials through rotary friction welding*. Ghent: Universiteit Gent, 2011.
- [71] V. Srija y A. Chennakesava, “Finite Element Analysis of Friction Welding Process for 2024Al Alloy and UNS C23000 Brass”, *Int. J. Sci. Res.*, vol. 4, núm. 5, 2015.
- [72] F. Franco, H. Sánchez, D. Betancourt, y O. Murillo, “Soldadura por fricción-agitación de aleaciones ligeras – una alternativa a nuestro alcance”, *Supl. Rev. Latinoam. Metal. Mater.*, vol. 3, núm. S1, pp. 1369–1375, 2009.
- [73] F. Arenas, “Eficiencia mecánica en la soldadura por fricción-agitación de la aleación de magnesio AZ31B”, *Ing. Compet.*, vol. 14, núm. 1, pp. 23–30, 2012.
- [74] P. Cabot, A. Moglioni, y E. Carella, “Soldadura por Fricción Agitación (FSW) de AA 6061 T6”, *Matéria*, vol. 8, núm. 2, pp. 187–195, 2013.
- [75] L. N. Tufaro y H. G. Svoboda, “Efecto del Procedimiento de Soldadura por FSW en la Evolución Temporal de las Propiedades en Uniones de AA 7075-T651”, *Soldag. Insp.*, vol. 19, núm. 4, pp. 333–342, 2014.
- [76] K. Faes, T. Baaten, W. De Waele, y N. Debroux, “Joining of Copper to Brass Using Magnetic Pulse Welding”, en *4th International Conference on High Speed Forming*, Dortmund, Germany, 2010, pp. 84–96.
- [77] J. I. Feng, S. XUE, J. LOU, Y. LOU, y S. WANG, “Microstructure and properties of Cu/Al joints brazed with Zn–Al filler metals”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 22, núm. 2, pp. 281–287, 2012.
- [78] P. Eslami, A. K. Taheri, y M. Zebardast, “A comparison between cold-welded and diffusion-bonded Al/Cu bimetallic rods produced by ECAE process”, *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 22, núm. 10, pp. 3014–3023, 2013.
- [79] D. Ólafsson, “Friction stir welding of aluminum - copper”, Master of Science in Mechanical Engineering, Aalto University School of Engineering, Espoo - Finland, 2017.
- [80] N. Rossello, “Estudio de las propiedades mecánicas y microestructurales de una aleación de aluminio 6061 sometida a un proceso de soldadura GMAW”. Universidad Nacional de Córdoba, 2007.

- [81] S. Sudarshan y B. Ravisankar, "Study on Mechanical and Microstructural Behaviour of Cu-Zn Alloy Upon Heat Treatment and Severe Plastic Deformation", *Int. J. Mech. Prod. Eng.*, vol. 5, núm. 9, pp. 106–109, 2017.
- [82] L. Liu, H. Nakayama, S. Fukumoto, A. Yamamoto, y H. Tsubakino, "Microscopic Observations of Friction Stir Welded 6061 Aluminum Alloy", *Mater. Trans.*, vol. 45, núm. 2, pp. 288–291, 2004.
- [83] H. K. Rafi, G. D. J. Ram, G. Phanikumar, y K. P. Rao, "Microstructure and tensile properties of friction welded aluminum alloy AA7075-T6", *Mater. Des. 1980-2015*, vol. 31, núm. 5, pp. 2375–2380, may 2010.
- [84] American Welding Society, *AWS C6.2/6.2M:2006 Specification for Friction Welding of Metals*, 1st Edition. Miami: American Welding Society, 2006.
- [85] F. J. Gil Mur y J. M. Manero Planella, *Metalografía*. Barcelona, SPAIN: Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [86] R. Bueno, "Soldadura por fricción rotativa". Escuela Politécnica de San Sebastián, 2015.
- [87] A. Arguello y L. Paredes, "Diseño y construcción de una máquina para soldar por fricción", Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1987.
- [88] R. Almeida, "Soldadura por fricción de materiales disímiles", Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1989.
- [89] Y. Isshiki, H. Yamaguchi, G. Kawai, T. Sawai, y K. Ogawa, "Measurement of Quantity of Heat in Friction Welding", presentado en The Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2005.
- [90] ALMAG, "Data sheet: 39Pb3 CW614N". 2017.
- [91] N. Ninan, S. V. S. Narayana Murty, S. Manwatkar, y P. Ramesh Narayanan, "Failure analysis of cracked brass turrets used in electronic circuits", *Case Stud. Eng. Fail. Anal.*, vol. 2, núm. 2, pp. 107–117, oct. 2014.
- [92] R. Falla, K. Quintana, F. Franco, y N. Sánchez, "Propiedades mecánicas de soldadura por fricción agitación de punto en aleación de aluminio AA6063-T5", *Prospectiva*, vol. 10, núm. 1, pp. 79–84, 2012.
- [93] Z. Barlas y H. Uzun, "Microstructure and mechanical properties of friction stir butt welded dissimilar Cu/CuZn30 sheets", *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 30, núm. 2, 2008.
- [94] ASTM, *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- [95] ASTM, *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

- [96] C. H. Muralimohan, S. Haribabu, Y. H. Reddy, V. Muthupandi, y K. Sivaprasad, "Evaluation of Microstructures and Mechanical Properties of Dissimilar Materials by Friction Welding", *Procedia Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 1107–1113, ene. 2014.
- [97] G. Kawai, K. Ogawa, y H. Tokisue, "Friction welding of 6061 aluminum alloy pipe to S25C carbon steel pipe", en *The Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, 1997.
- [98] P. Sathiya, S. Aravindan, y A. N. Haq, "Mechanical and metallurgical properties of friction welded AISI 304 austenitic stainless steel", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 26, núm. 5–6, pp. 505–511, 2005.
- [99] M. Méndez, "Efecto de la velocidad de rotación en la cantidad de la unión de la soldadura por fricción en una aleación de Aluminio AA 6063", Trabajo de grado para Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Barquisimeto, Venezuela, 2011.
- [100] C. Linares, "Efecto de la presión sobre la calidad de las uniones de soldadura por fricción de un Aluminio AA-6063", Trabajo de grado para Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Barquisimeto, Venezuela, 2011.
- [101] M. Akbarifar y M. Divandari, "On the Interfacial Characteristics of Compound Cast Al/Brass Bimetals", *Int. J. Met.*, vol. 11, núm. 3, pp. 506–512, 2017.
- [102] A. Heidarzadeh, T. Saeid, y V. Klemm, "Microstructure, texture, and mechanical properties of friction stir welded commercial brass alloy", *Mater. Charact.*, vol. 119, pp. 84–91, sep. 2016.
- [103] S. Mironov, K. Inagaki, Y. S. Sato, y H. Kokawa, "Development of grain structure during friction-stir welding of Cu–30Zn brass", *Philos. Mag.*, vol. 94, núm. 27, pp. 3137–3148, sep. 2014.
- [104] E. P. Alves, F. Piorino Neto, y C. Y. An, "Welding of AA1050 aluminum with AISI 304 stainless steel by rotary friction welding process", *J. Aerosp. Technol. Manag.*, vol. 2, núm. 3, pp. 301–306, 2010.
- [105] B. Amaguayo y O. Sánchez, "Estudio y caracterización del comportamiento microestructural de la soldadura por fricción en materiales disímiles cobre electrolítico–aluminio (AA-6063)", Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2017.
- [106] M. Ashfaq y K. J. Rao, "Comparing bond formation mechanism between similar and dissimilar aluminium alloy friction welds", *Mater. Sci. Technol.*, vol. 30, núm. 3, pp. 329–338, mar. 2014.

Anexos



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN



INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Carlos Díaz Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 22 de Diciembre del 2017

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor, Ing. Luis Gustavo Huilca

Descripción: Ensayo de espectrometría por chispa en dos probetas sueltas de material latón y Aluminio.

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional dos probetas una de Latón C38500 y otra de Aluminio 6061.

Se solicita realizar la prueba con la finalidad de determinar los componentes presentes en la muestra entregadas.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta	Imagen
Muestra de Latón	M - Latón	
Muestra de Aluminio	M - Aluminio	





3. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se toman 3 mediciones por muestra promediando su valor.

Muestra de Aluminio	
Elemento	Valor [%]
Silicio [Si]	1,083
Hierro [Fe]	0,377
Cobre [Cu]	0,112
Manganeso [Mn]	0,067
Magnesio [Mg]	0,575
Cromo [Cr]	0,096
Níquel [Ni]	0,140
Zinc [Zn]	0,419
Titanio [Ti]	0,048
Plomo [Pb]	0,276
Estaño [Sn]	0,221
Vanadio [V]	0,038
Estroncio [Sr]	0,053
Zirconio [Zr]	0,045
Cobalto [Co]	0,126
Boro [B]	>0,072
Plata [Ag]	0,0084
Bismuto [Bi]	0,141
Calcio [Ca]	>0,096
Litio [Li]	0,898
Aluminio [Al]	95,08

Muestra de Latón	
Elemento	Valor [%]
Cobre [Cu]	48,35
Zinc [Zn]	43,58
Plomo [Pb]	4,197
Estaño [Sn]	0,258
Fosforo [P]	0,282
Manganeso [Mn]	<0,010
Hierro [Fe]	0,209
Níquel [Ni]	0,164
Silicio [Si]	0,461
Aluminio [Al]	<0,010
Azufre [S]	~0,146
Arsénico [As]	~0,588
Bismuto [Bi]	<0,010
Selenio [Se]	0,446
Antimonio [Sb]	1,035

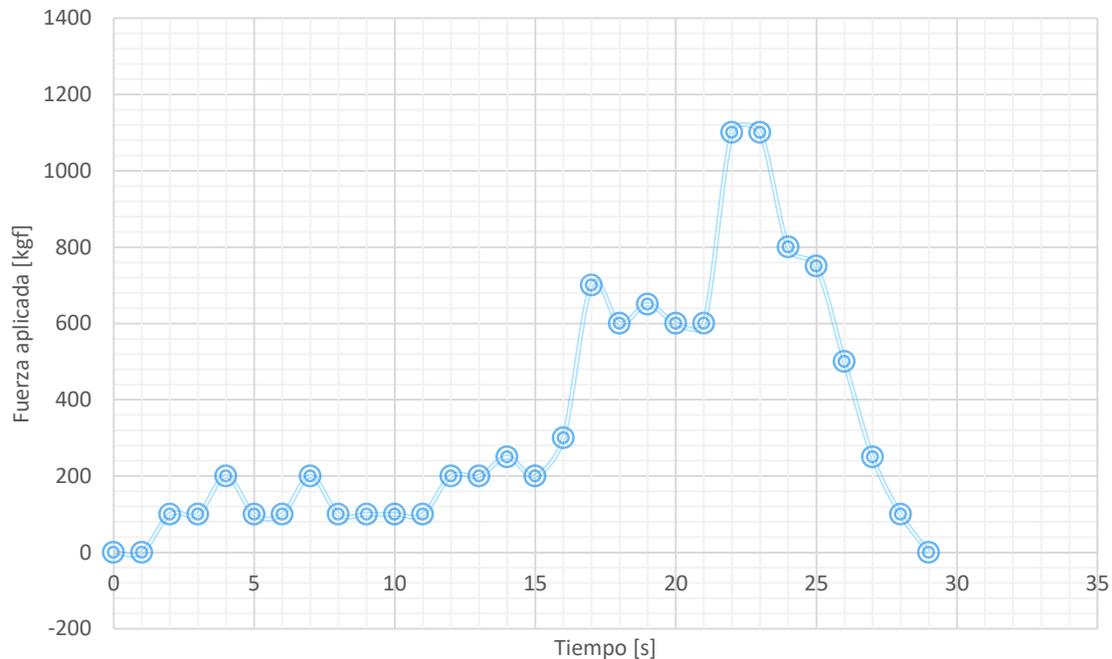
Ing. Luis Gustavo Huilca

Técnico Responsable

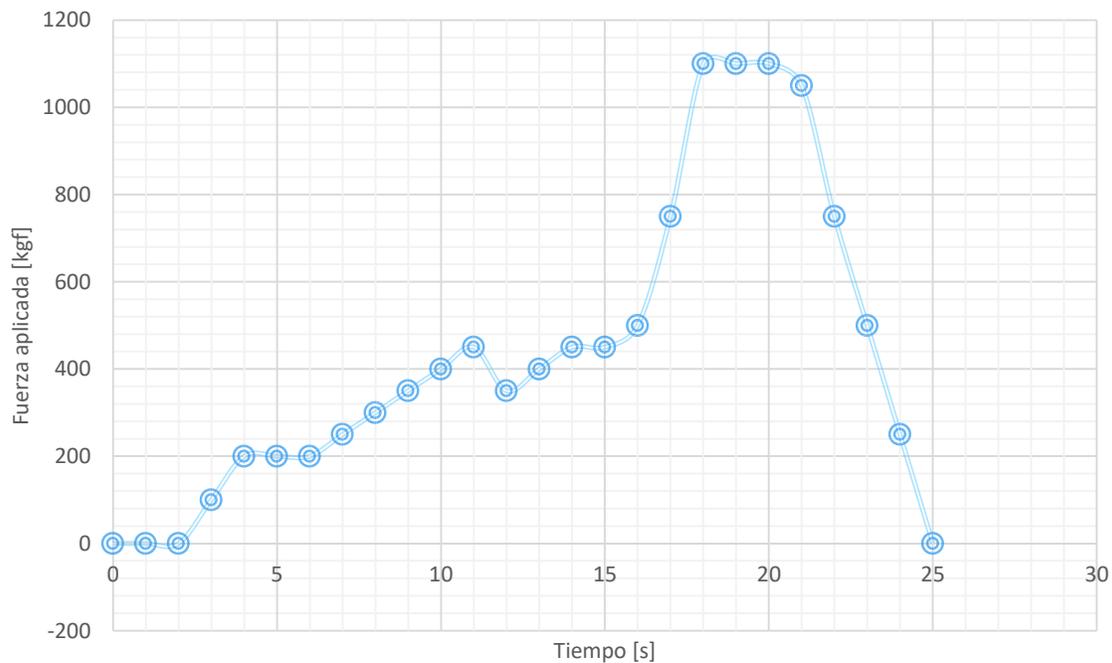
Ing. Oscar Sotomayor

Jefe del Laboratorio de Fundición.

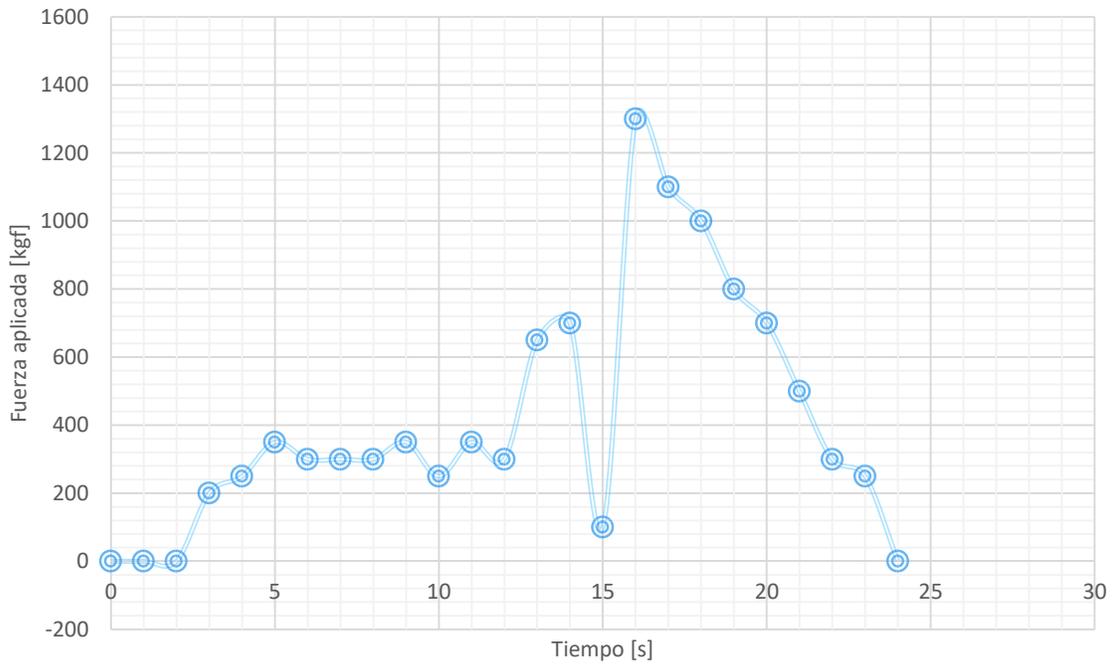
ANEXO II. Gráficas fuerza aplica vs. tiempo de junta simple y de ranura.



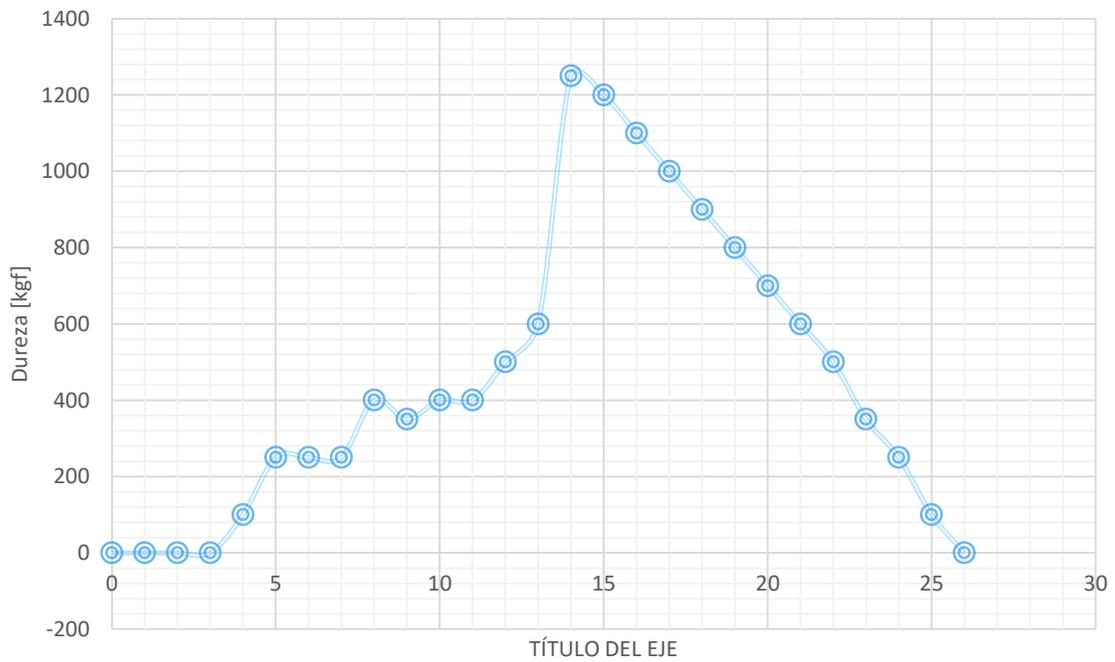
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 1 (sin precalentamiento).



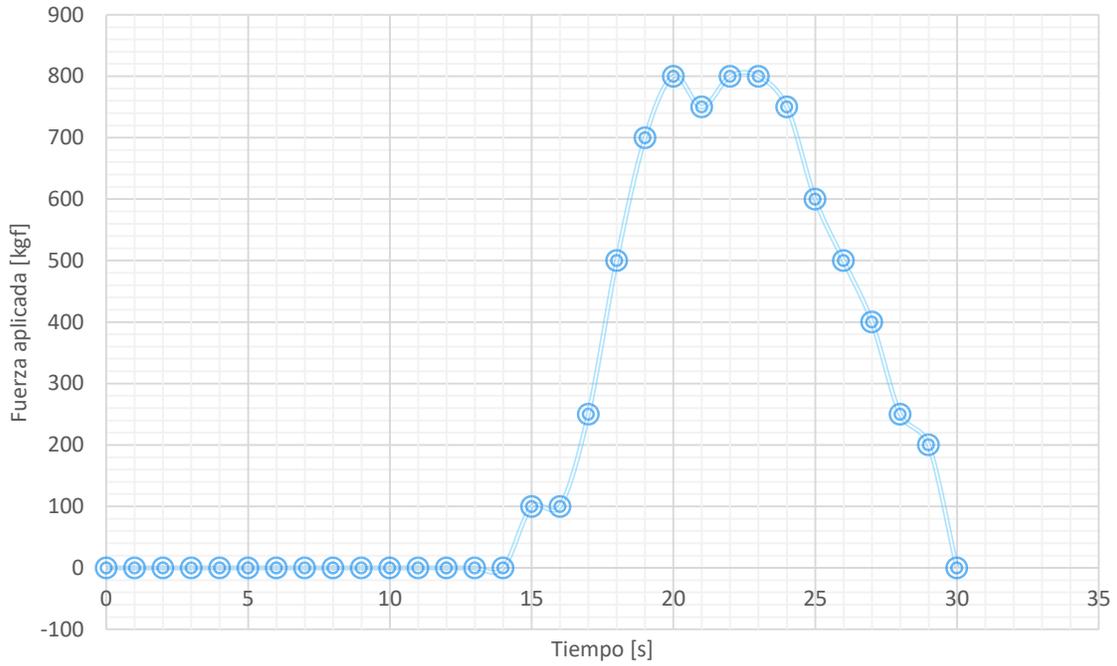
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 2 (sin precalentamiento).



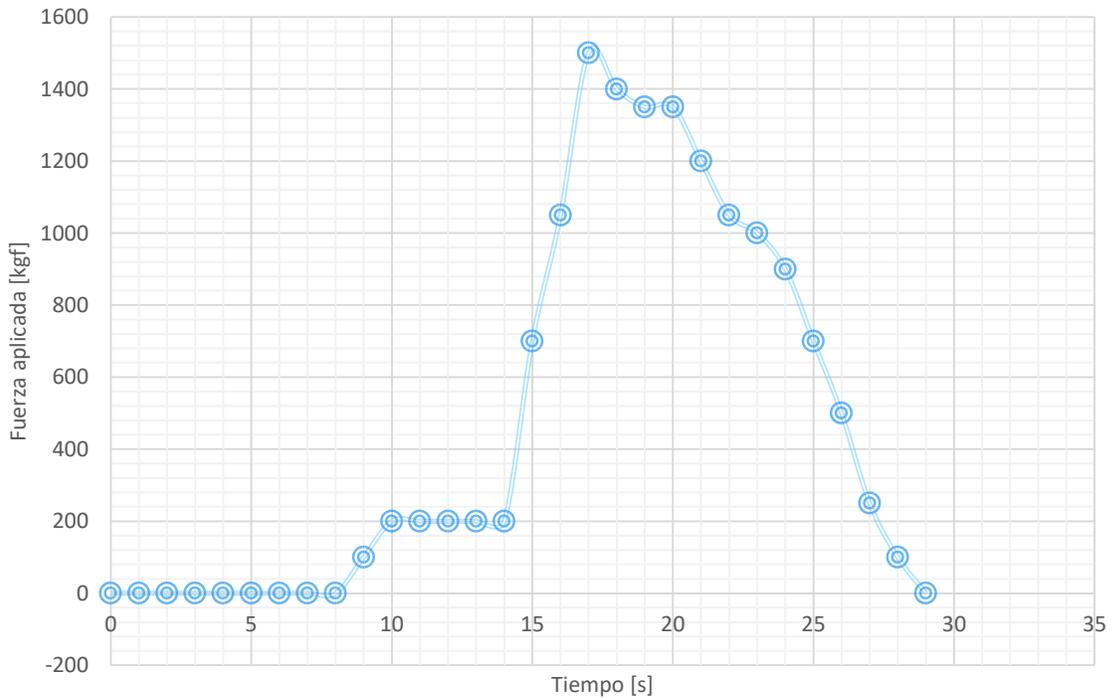
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 4 (sin precalentamiento).



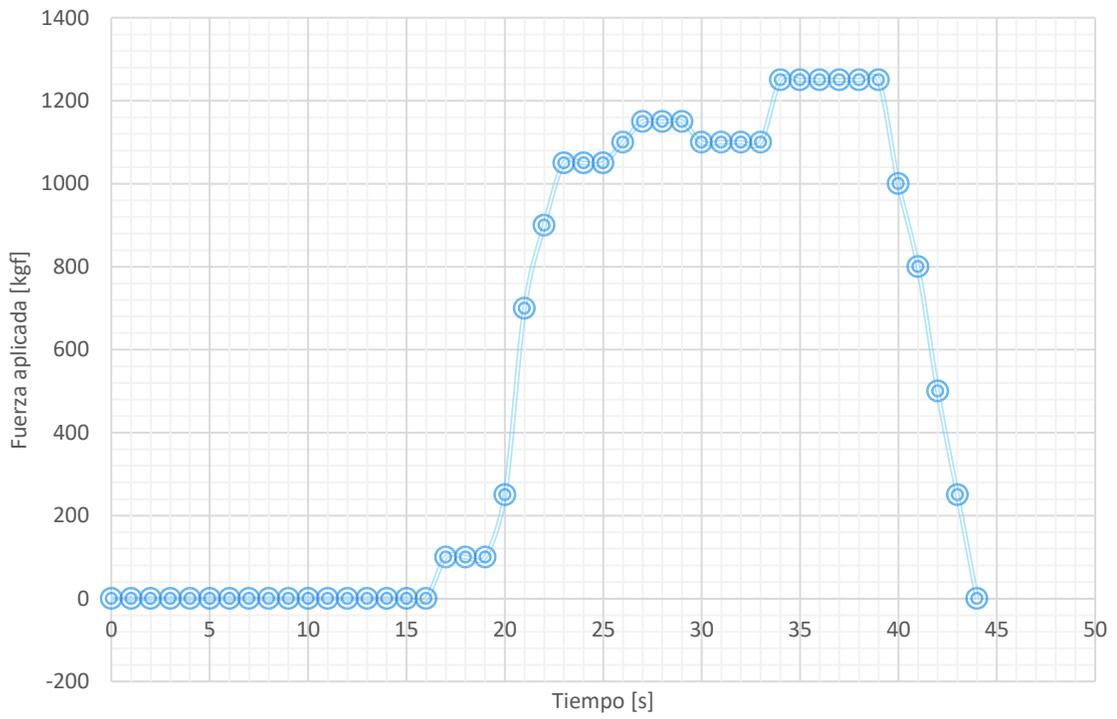
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 5 (sin precalentamiento).



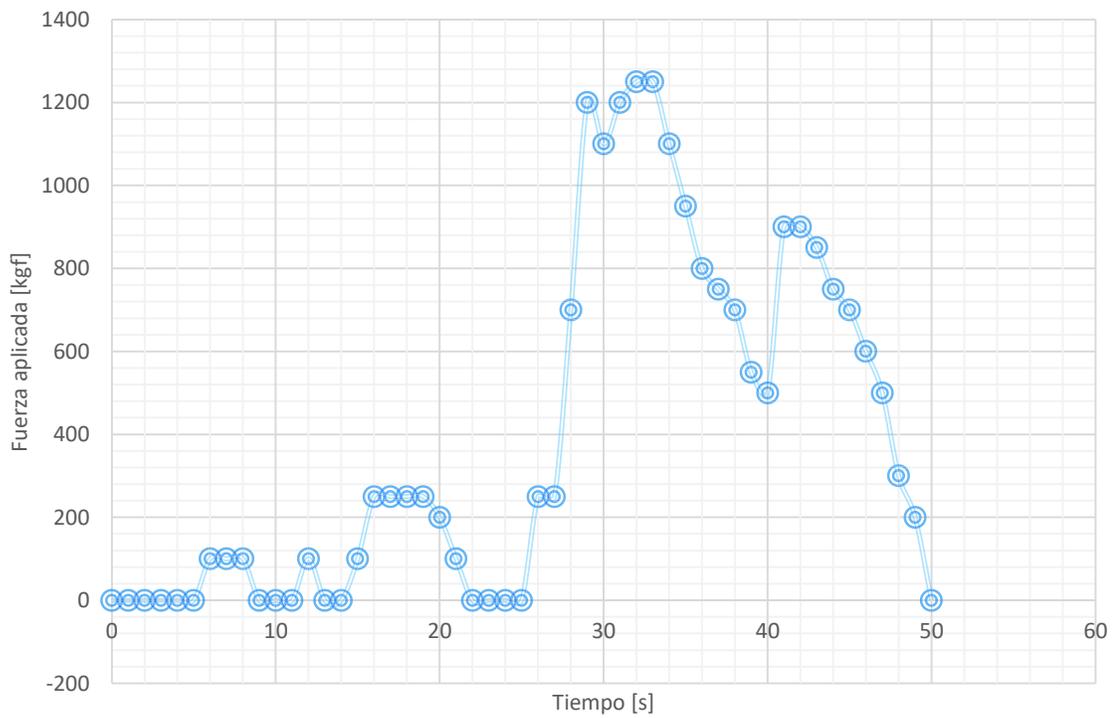
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 7 (con precalentamiento); entre los 10 y 14 segundos la aguja varía entre 0 y 100 [kgf].



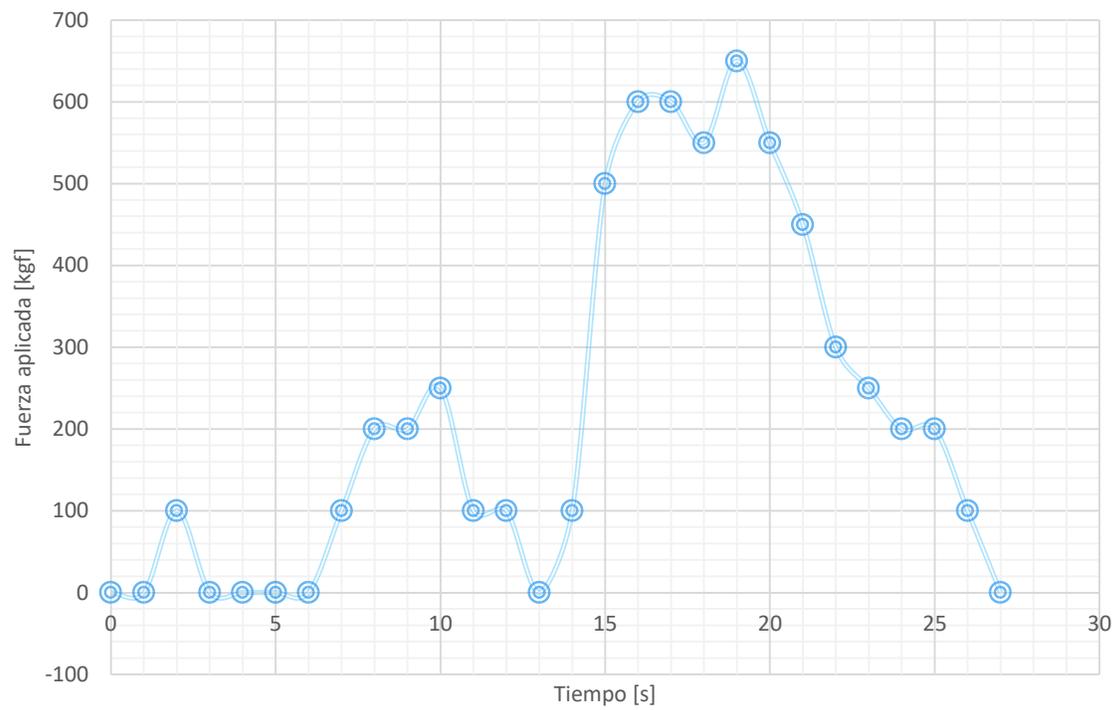
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 9 (con precalentamiento); a los 8 segundos la aguja varía entre 0 y 100 [kgf].



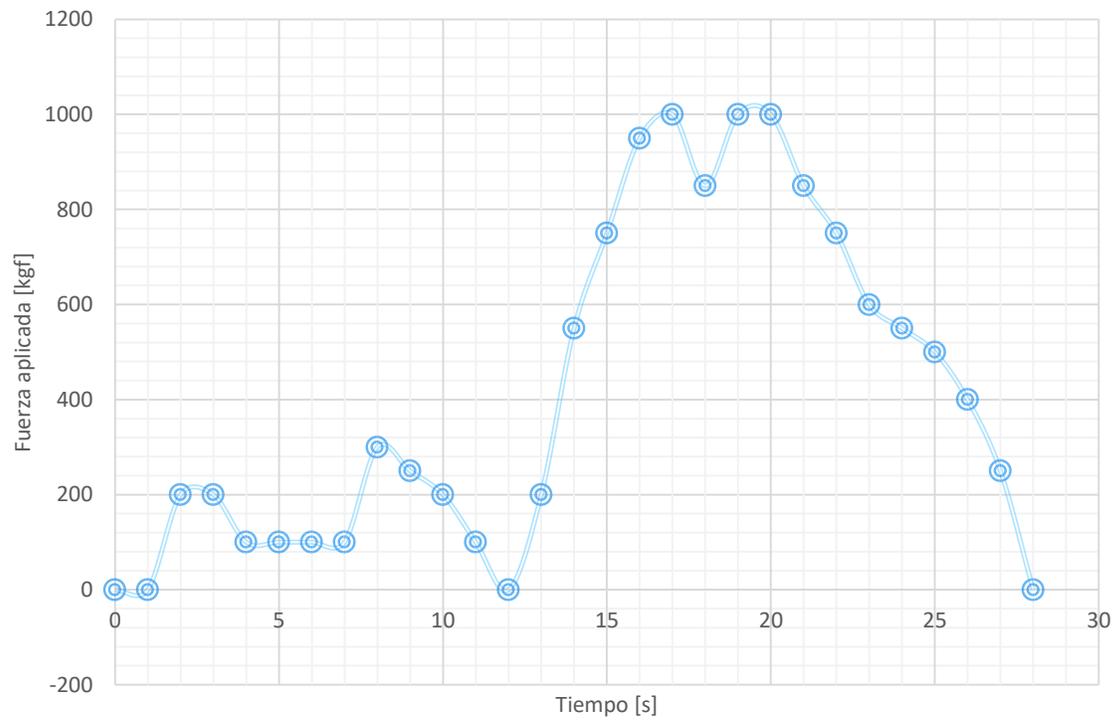
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 10 (con precalentamiento).



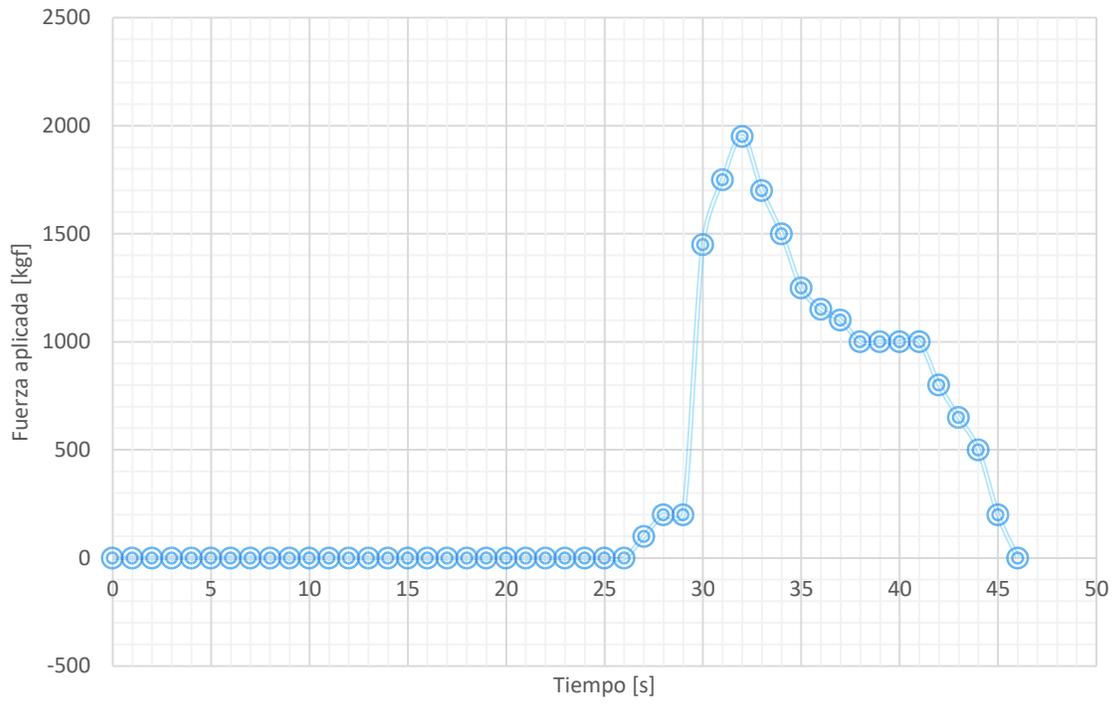
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 1D (con precalentamiento).



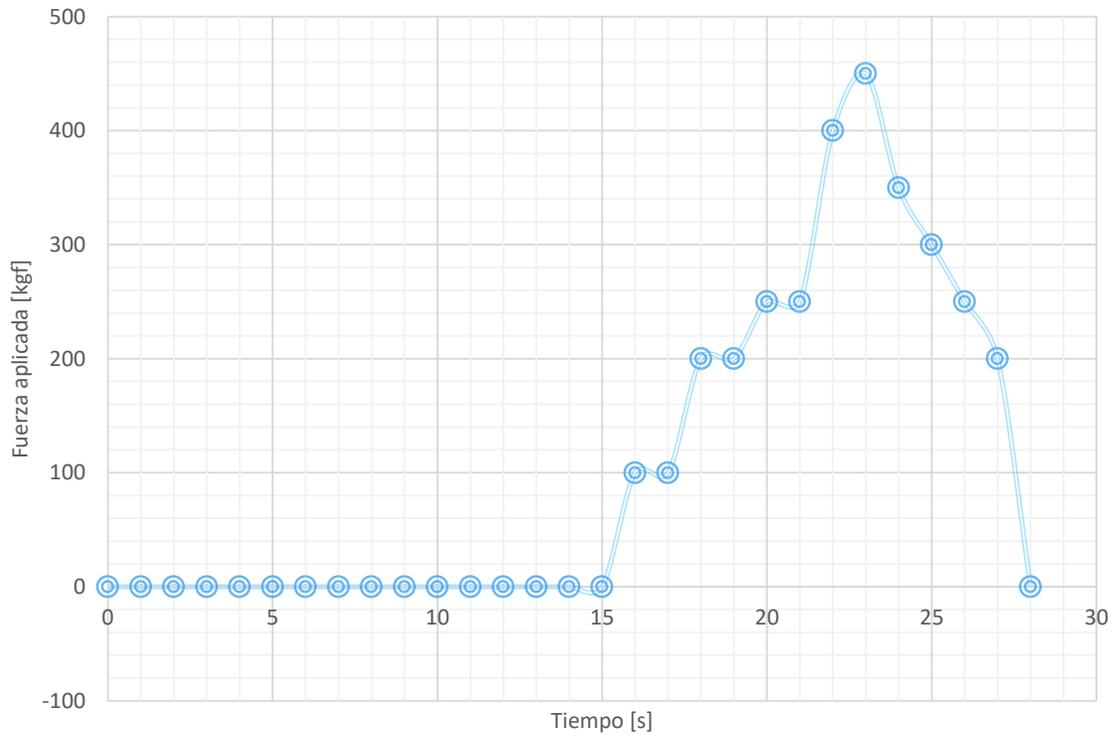
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 4D (sin precalentamiento).



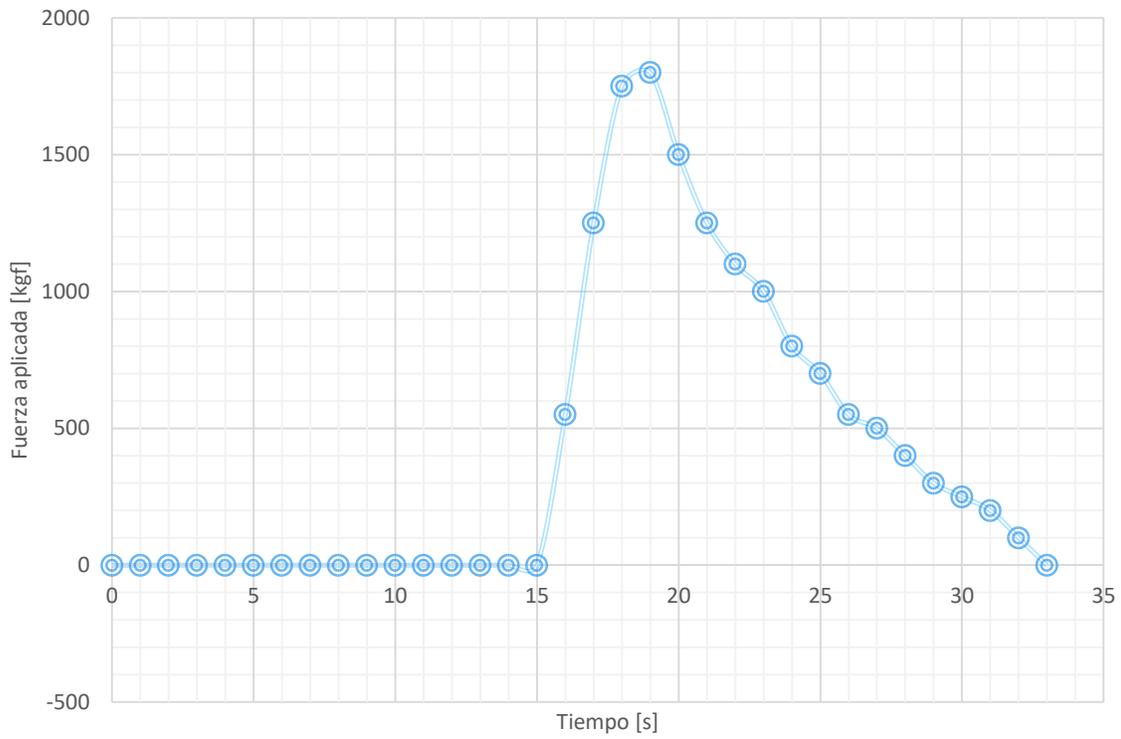
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 5D (sin precalentamiento).



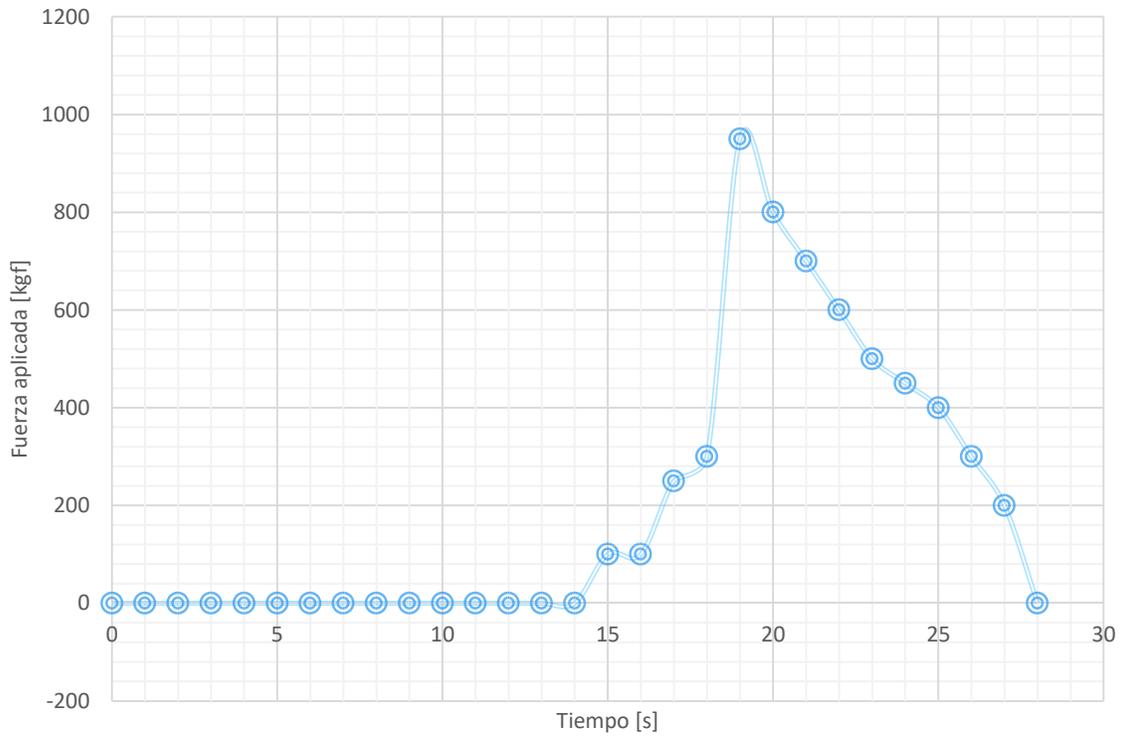
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 6D (con precalentamiento).



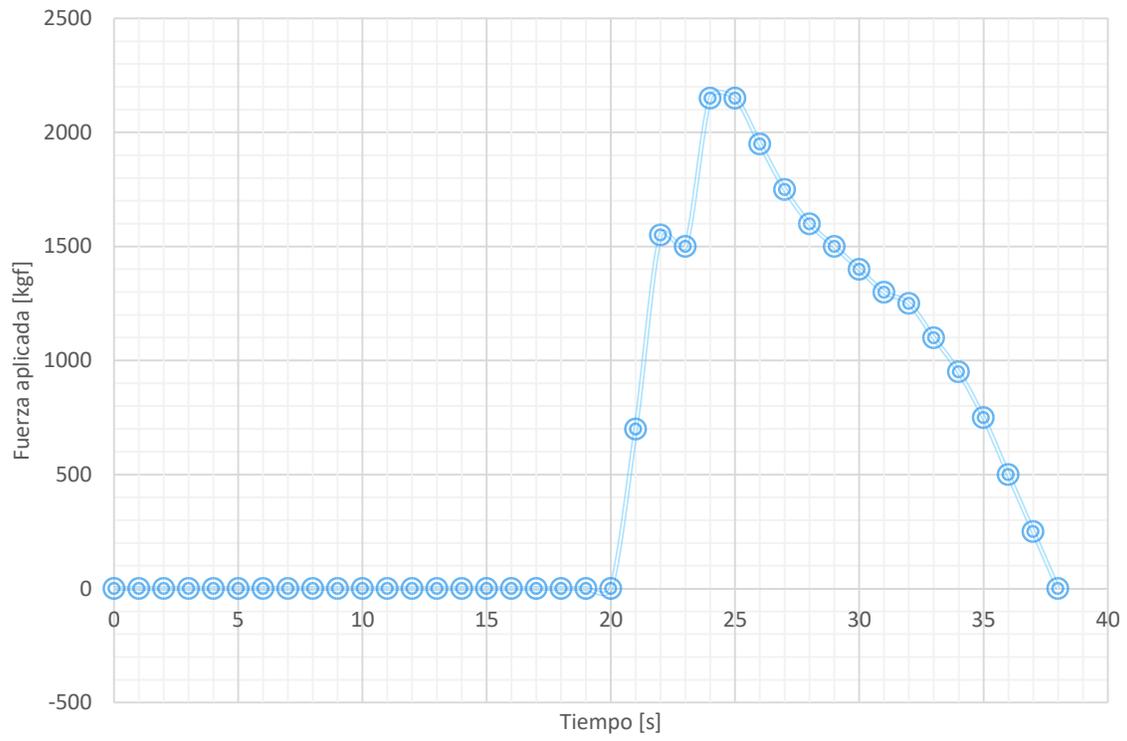
Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 7D (con precalentamiento).



Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 8D (con precalentamiento).



Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 9D (con precalentamiento).



Fuerza aplicada vs. tiempo de junta 10D (con precalentamiento).



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

INFORME TÉCNICO

LAEV – ENE.18.39.0

Quito, 2 de febrero de 2018

TRABAJO SOLICITADO POR: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
M.Sc. Carlos Wime Díaz Campoverde

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas pertenecientes a los Sres. ANDRÉS ANGAMARCA y BRYAN GARCÍA para el proyecto de titulación "ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDABILIDAD DE MATERIALES DISÍMILES ALUMINIO 6061 – LATÓN C38500 MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN". Las muestras fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. **MUESTRA:** Cuatro (4) probetas circulares para ensayo de tracción y doce (12) muestras para ensayo de carga.

2. **ENSAYO DE TRACCION**

En la tabla 1 se presentan los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas.

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Limite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 25 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M1	6,02	1.514	6.735	31,3	216	34,3	237	20,6
M2	6,04	1.477	6.570	30,2	208	33,3	229	20,0
L1	6,23	3.810	16.948	54,1	373	80,6	556	25,2
L2	6,15	3.320	14.768	42,8	295	72,1	497	29,4

3. **ENSAYO DE CARGA**

En la tabla 2 se presenta los resultados de los ensayos de carga realizados.



Tabla 2. Resultados de los ensayos de carga.

Id.	Carga máxima registrada	
	lbf	N
2D	6.030	26.823
3D	6.450	28.691
4D	4.340	19.305
6D	4.745	21.107
7D	6.800	30.248
11D	6.950	30.915
1	7.650	34.029
3	1.,350	46.039
4	8.700	38.700
7	8.380	37.276
8	11.110	49.420
9	3.670	16.325

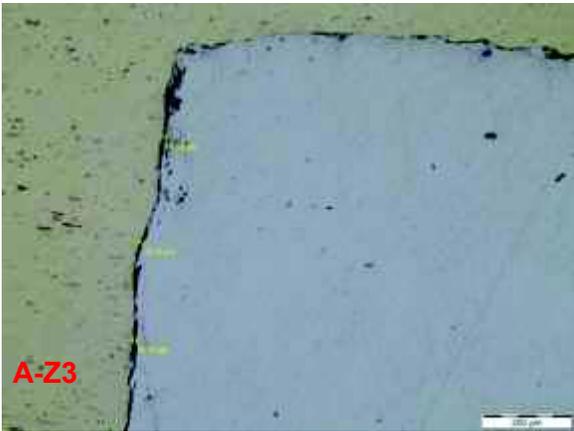
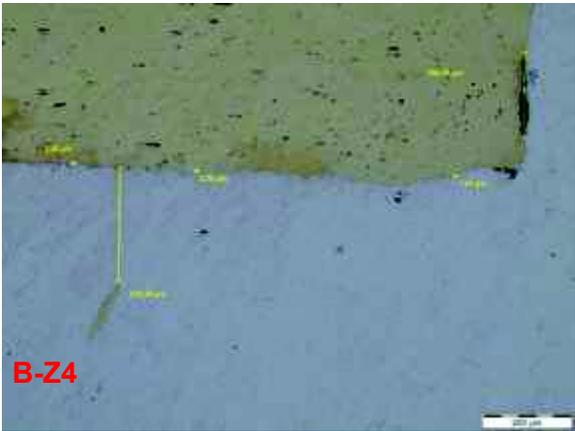
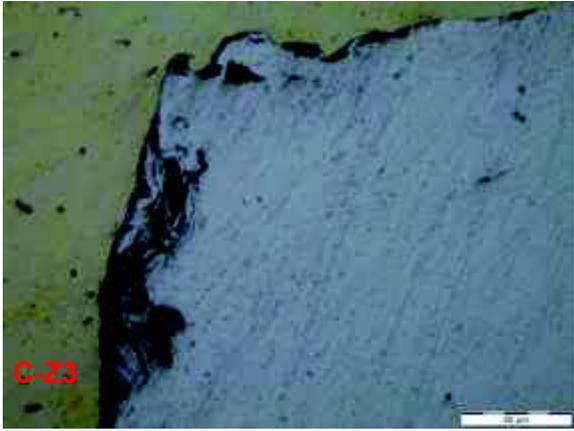
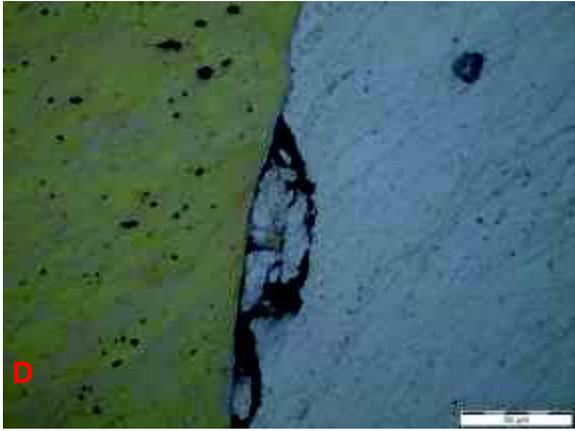
	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Grana, M.Sc.
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



ANEXO IV. Resultado del ensayo metalográfico.

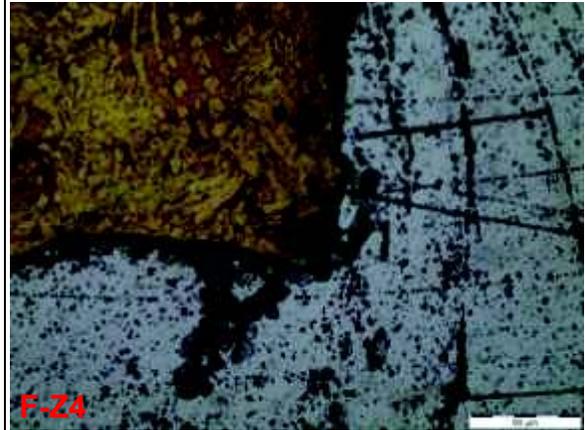
Características de las micrografías de junta de ranura o lengüeta.

Junta 1D (sin precalentamiento)	
 <p>A-Z3</p>	 <p>B-Z4</p>
<p>Figura A-Z3. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa el tamaño de grano del latón. Aumento 100x sin ataque químico.</p>	<p>Figura B-Z4. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa el tamaño de grano del latón en la zona cercana a la interfaz. Aumento 100x sin ataque químico.</p>
 <p>C-Z3</p>	 <p>D</p>
<p>Figura C-Z3. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa incrustaciones de latón en la interfaz. Aumento 500x sin ataque químico.</p>	<p>Figura D. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio cerca de Z4, se observa grietas en la interfaz. Aumento 500x sin ataque químico.</p>



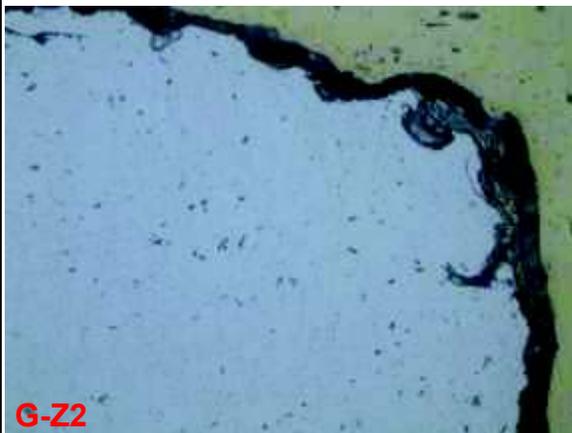
E-Z4

Figura E-Z4. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa un cambio en la forma del grano en el latón. Aumento 100x con ataque químico al latón.



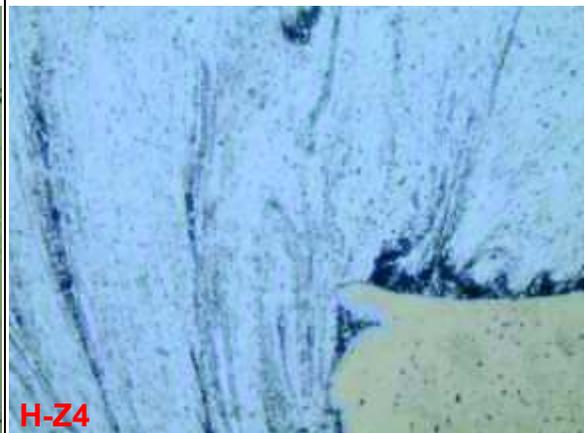
F-Z4

Figura F-Z4. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa el grano en la zona afectada por el calor. Aumento 500x con ataque químico al latón.



G-Z2

Figura G-Z2. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa incrustaciones de latón en la zona de coalescencia. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.



H-Z4

Figura H-Z4. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa distorsión en el aluminio. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.

Junta 5D (sin precalentamiento)

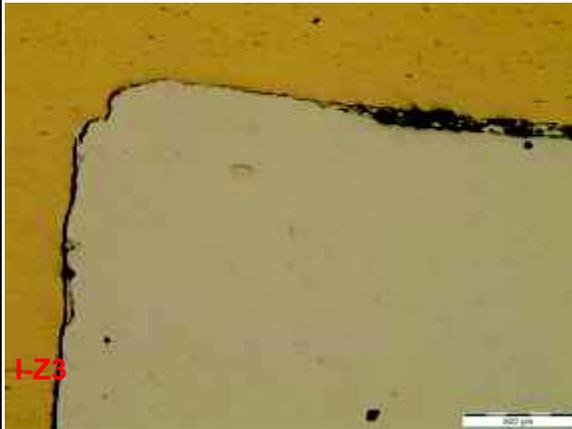


Figura I-Z3. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa falta de coalescencia. Aumento 50x sin ataque químico.

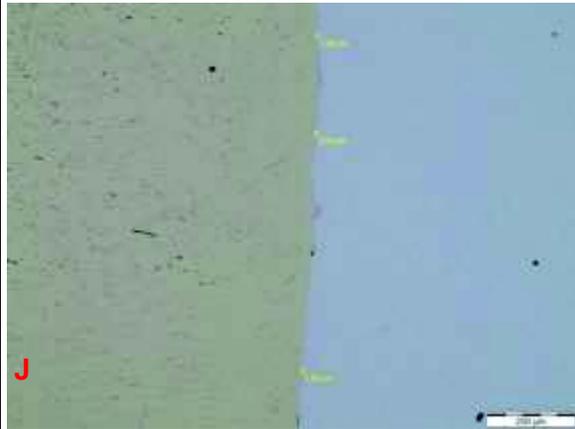


Figura J. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio cerca de Z1, se observa coalescencia. Aumento 100x sin ataque químico.

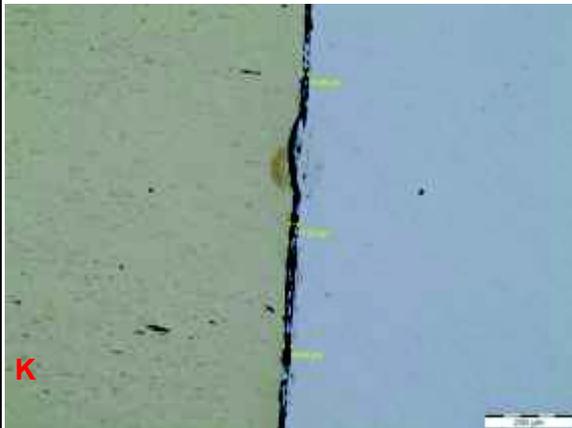


Figura K. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio entre Z2 y Z3, se observa una falta de unión. Aumento 100x sin ataque químico.

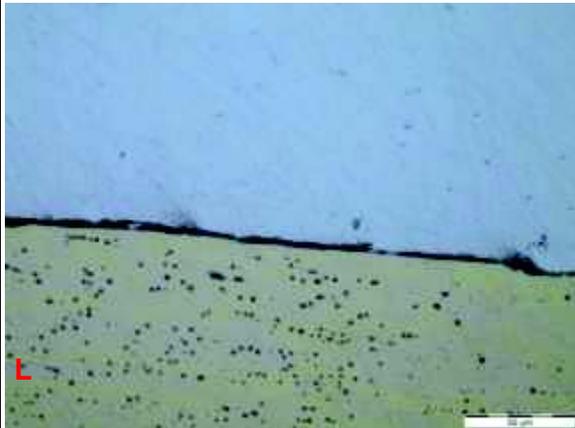


Figura L. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio entre Z1 y Z2, se observa una falta de unión. Aumento 500x sin ataque químico.



Figura M. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio cerca de Z4, se observa incrustaciones de aluminio en el latón y una diferencia en el color del grano en el latón. Aumento 100x con ataque químico al latón.

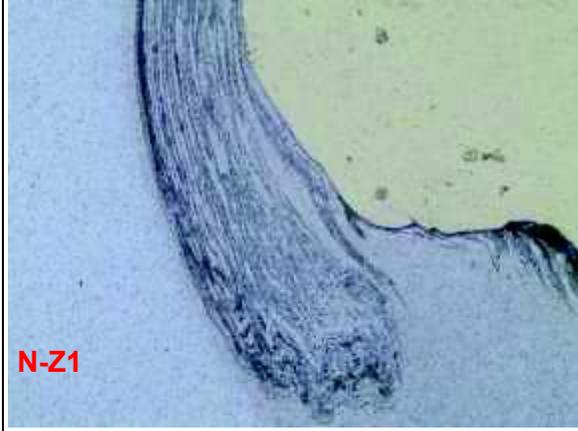


Figura N-Z1. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa distorsión en el aluminio. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.

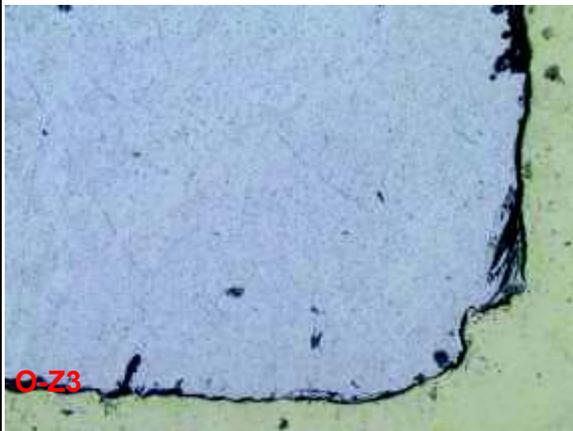


Figura O-Z3. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa distorsiones. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.

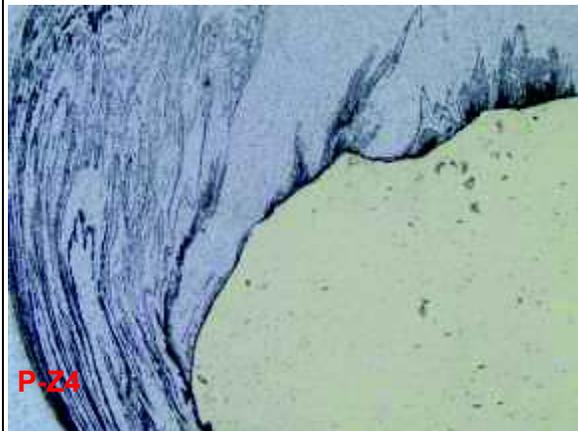
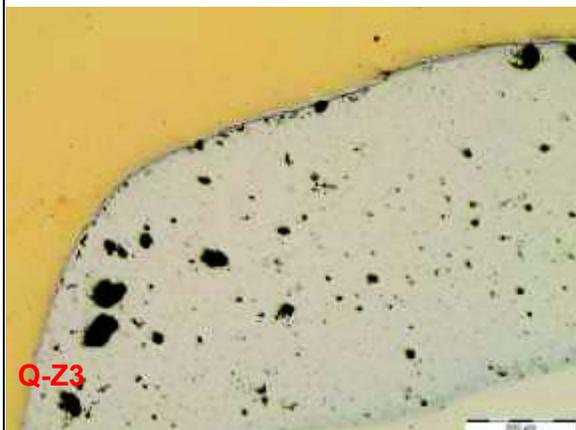


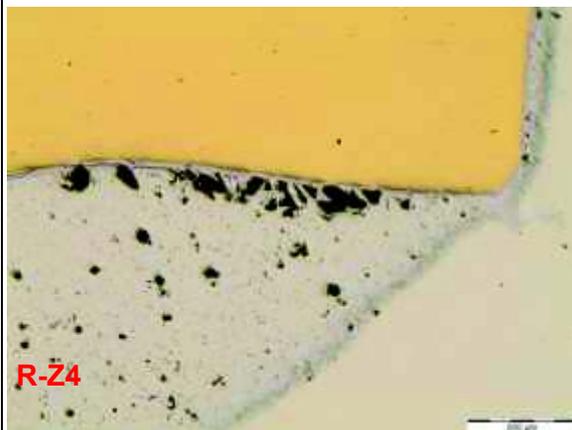
Figura P-Z4. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa distorsiones en el aluminio. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.

Junta 8D (con precalentamiento)



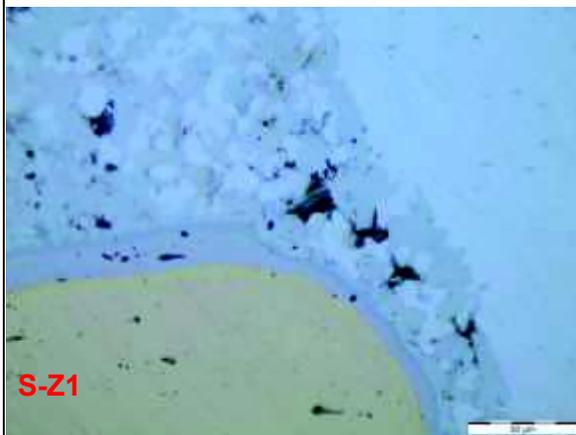
Q-Z3

Figura Q-Z3. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa distorsiones en el aluminio. Aumento 50x sin ataque químico.



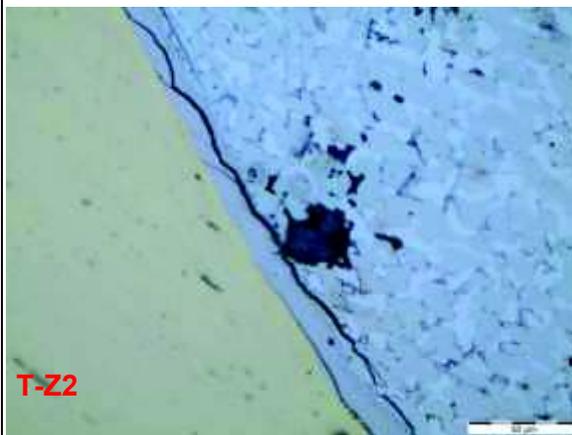
R-Z4

Figura R-Z4. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa distorsiones en el aluminio. Aumento 50x sin ataque químico.



S-Z1

Figura S-Z1. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa coalescencia entre los materiales. Aumento 500x sin ataque químico.



T-Z2

Figura T-Z2. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa una grieta en la zona de coalescencia. Aumento 500x sin ataque químico.

Junta 9D (con precalentamiento)

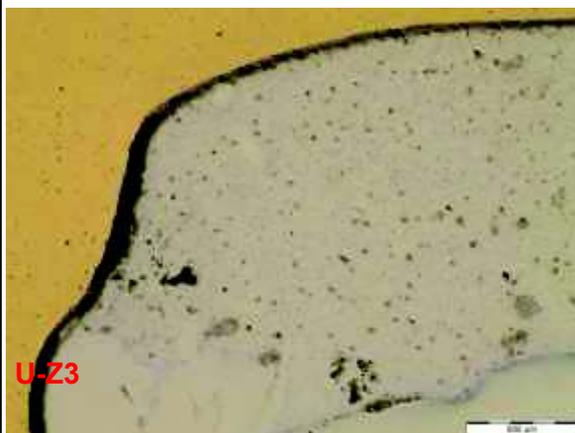


Figura U-Z3. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa falta de unión. Aumento 50x sin ataque químico.

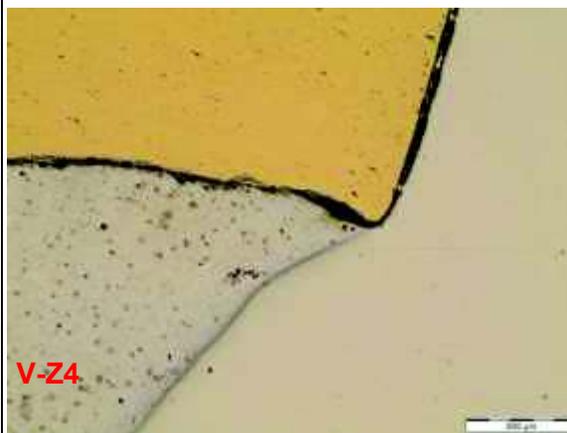


Figura V-Z4. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa falta de unión. Aumento 50x sin ataque químico.

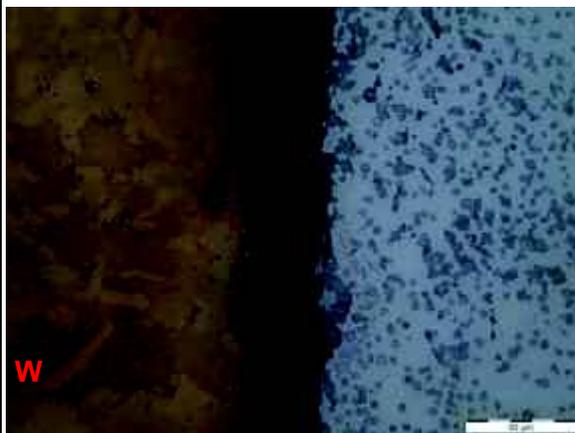


Figura W. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio entre Z2 y Z3, se observa la forma de grano del latón. Aumento 500x con ataque químico al latón.

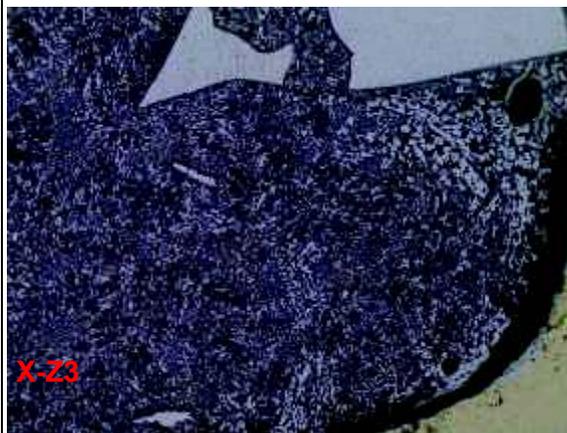


Figura X-Z3. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa cambio en los granos de aluminio. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.

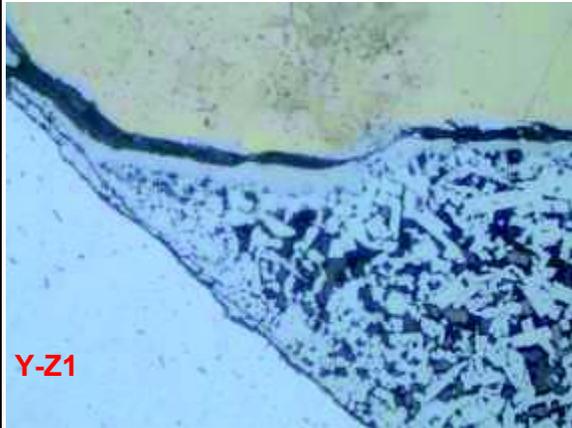


Figura Y-Z1. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa cambio de grano en el aluminio. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.

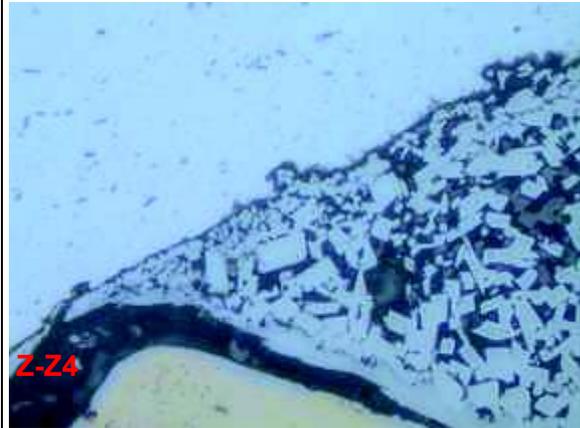


Figura Z-Z4. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa cambio de grano en el aluminio. Aumento 500x con ataque químico al aluminio.

Junta 10D (con precalentamiento)

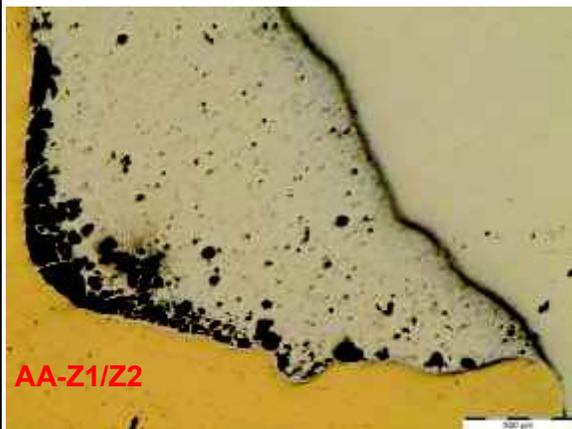


Figura AA-Z1/Z2. Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa distorsión en la superficie del aluminio. Aumento 50x sin ataque químico.

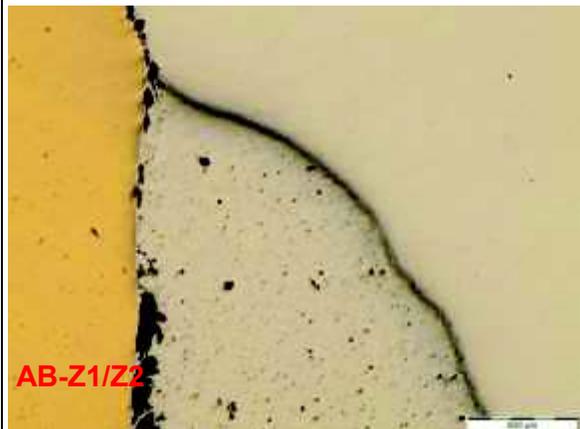
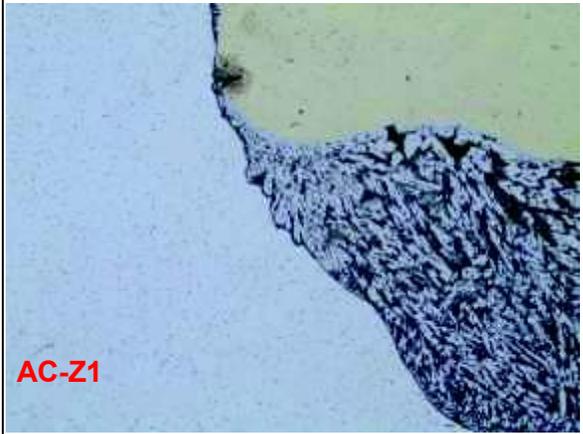
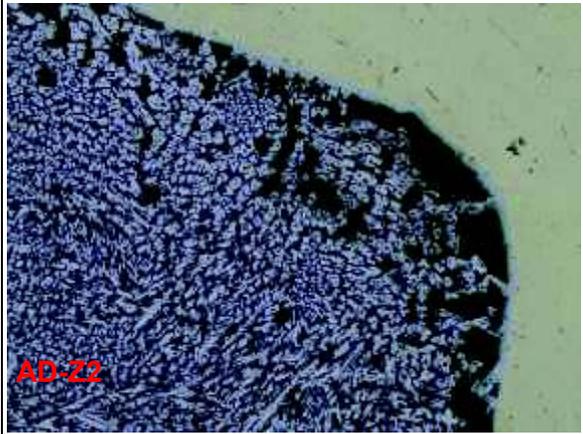


Figura AB-Z1/Z2 (Continuación). Zona de unión de las probetas Latón-Aluminio, se observa distorsión en el aluminio. Aumento 50x sin ataque químico.

 <p>AC-Z1</p>	 <p>AD-Z2</p>
<p>Figura AC-Z1. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa cambios en el grano del aluminio. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.</p>	<p>Figura AD-Z2. Zona de unión de las probetas Aluminio-Latón, se observa cambios en el grano del aluminio. Aumento 100x con ataque químico al aluminio.</p>

(Fuente: Propia)

ANEXO V. Microdureza del material base, juntas simples y de ranura o lengüeta.

Microdureza de la probeta de aluminio.

Aluminio				
Posición	HV	D1 [μm]	D2 [μm]	Diagonal promedio [μm]
P1	54,63	59,58	56,93	58,26
P2	51,46	63,74	56,31	60,03
P3	53,03	62,1	59,03	60,57
P4	58,94	57,48	54,69	56,09
P5	56,45	58,12	56,51	57,32
La dureza promedio se obtiene al descartar el valor más alto y el más bajo.				54,70

(Fuente: Propia)

Microdureza de la probeta de latón.

Latón				
Posición	HV	D1 [μm]	D2 [μm]	Diagonal promedio [μm]
P1	128,33	37,42	38,6	38,01
P2	123,5	39,02	38,47	38,75
P3	118,34	39,72	39,44	39,58
P4	118,34	39,65	39,51	39,58
P5	118,55	40	39,09	39,55
La dureza promedio se obtiene al descartar el valor más alto y el más bajo.				120,13

(Fuente: Propia)

Microdureza en el eje axial de la junta 2.

Posición	HV	D1 [μm]	D2 [μm]	Diagonal promedio [μm]
P1	52,75	58,88	59,68	59,28
P2	52,7	60	58,63	59,32
P3	53,34	58,89	59,03	58,96
P4	53,84	59,66	57,71	58,69
P5	53,21	59,87	58,19	59,03
P6	53,53	60,01	57,69	58,85
P7	55,89	58,82	56,37	57,60
P8	146,02	34,2	37,07	35,64
P9	135,73	37,48	36,43	36,96
P10	130,5	38,6	36,78	37,69
P11	124,2	39,3	37,97	38,64
P12	124,42	38,81	38,39	38,60
P13	123,95	38,6	38,75	38,68
P14	124,64	38,74	38,39	38,57

(Fuente: Propia)

Microdureza en el eje axial de la junta 6.

Posición	HV	D1 [μm]	D2 [μm]	Diagonal promedio [μm]
P1	50,73	61,47	59,44	60,46
P2	51,14	58,67	61,75	60,21
P3	51,68	62,03	57,76	59,90
P4	51,86	61,47	58,11	59,79
P5	53,73	60,07	57,41	58,74
P6	53,92	59,58	57,69	58,64
P7	54,12	60,28	56,78	58,53
P8	136,51	36,64	37,06	36,85
P9	135,73	37,48	36,43	36,96
P10	129,72	38,95	36,66	37,81
P11	128,81	38,33	37,55	37,94
P12	129,26	37,83	37,91	37,87
P13	129,77	38,53	37,06	37,80
P14	120,68	39,02	39,37	39,20

(Fuente: Propia)

Microdureza en el eje axial de la junta 1D.

Posición	HV	D1 [μm]	D2 [μm]	Diagonal promedio [μm]
P1	49,29	61,96	60,7	61,33
P2	53,86	58,74	58,6	58,67
P3	54,7	59,09	57,35	58,22
P4	56,45	58,18	56,43	57,31
P5	54,36	59,1	57,7	58,40
P6	56,24	60,56	54,27	57,42
P7	63,53	59,02	49,02	54,02
P8	142,35	36,37	35,8	36,09
P9	139,66	36,37	36,5	36,44
P10	136,75	37,28	36,37	36,83
P11	135,39	36,51	37,5	37,01
P12	134,71	37,41	36,78	37,10
P13	130,72	37,83	37,49	37,66
P14	126,01	38,88	37,83	38,36

(Fuente: Propia)

Microdureza en el eje axial de la junta 10D.

Posición	HV	D1 [μm]	D2 [μm]	Diagonal promedio [μm]
P1	54,44	62,52	54,2	58,36
P2	56,18	60,49	54,41	57,45
P3	59,6	58,33	53,22	55,78
P4	63,61	58,22	49,76	53,99
P5	64,77	55,61	51,4	53,51
P6	66,33	55,46	50,28	52,87
P7	66,5	52,46	53,15	52,81
P8	156,62	34,2	34,62	34,41
P9	155,66	37,97	31,05	34,51
P10	147,46	38,32	32,59	35,46
P11	143,2	38,53	33,43	35,98
P12	137,41	38,33	35,13	36,73
P13	135,35	39,39	34,63	37,01
P14	131,47	37,62	37,48	37,55

(Fuente: Propia)