ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

TEMA: ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MICRO-ESTRUCTURAL DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN EN MATERIALES DISÍMILES COBRE ELECTROLÍTICO- ALUMINIO (AA-6063)

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

BYRON JOSE AMAGUAYO PUGLLA

byron.amaguayo@epn.edu.ec

OSCAR VINICIO SÁNCHEZ CALERO

oscar.sanchez@epn.edu.ec

DIRECTOR:

ING. CARLOS WIME DÍAZ CAMPOVERDE M.Sc.

carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2017

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por BYRON JOSE AMAGUAYO PUGLLA y OSCAR VINICIO SÁNCHEZ CALERO, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Wime Díaz Campoverde M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **BYRON JOSE AMAGUAYO PUGLLA Y OSCAR VINICIO SÁNCHEZ CALERO**, 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.

Byron Jose Amaguayo Puglla	**Oscar Vinicio Sánchez Calero**

DEDICATORIA

A mi madre Victoria por su inagotable perseverancia para sacar a delante a sus hijos, por sus consejos, valores y en especial por su amor que me ha permitido ser una persona de bien.

A mi padre Juan por su apoyo incondicional en todas las decisiones que he tomado siendo un gran ejemplo de seriedad y compromiso.

A mis hermanos Rita, Diego, Mayra por enseñarme que con esfuerzo y constancia no existe meta que no se pueda alcanzar.

A mis sobrinos Valeria, Adriana, Sebastián, Nathaly, Camila, Ariel, Anahí, Diego por sacarme una sonrisa y hacerme olvidar de los problemas.

A mis amigos y compañeros que formaron parte de mi vida estudiantil gracias por todos las experiencias y consejos.

Byron José Amaguayo Puglla

A mi madre
La mujer que admiro, que ha sido mi ejemplo, mi heroína, mi protectora en mi niñez, mi mejor amiga en mi adolescencia y la mejor madre en cada etapa de mi vida. Para ti mamita todo mi esfuerzo, tiempo, dedicación y cansancio entregado para la realización de esta tesis.
Con amor.

Oscar Vinicio Sánchez Calero

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarme la sabiduría para culminar esta etapa de mi vida, siendo un gran apoyo durante todos los momentos difíciles.

A mis padres los cuales con su ejemplo, dedicación y consejo me guiaron, aceptando mis errores y aciertos.

A los Ing. Carlos Díaz e Ing. Gabriel Velasteguí por ser parte fundamental en la realización del presente proyecto.

A todo el personal de Laboratorio de soldadura y del Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica por el apoyo brindado durante la experimentación del proyecto.

A mi amigo y compañero Oscar por sus apoyo incondicional en la realización del proyecto.

Byron José Amaguayo Puglla

Es algo irreal llegar a este punto de mi historia.
Mi historia es real; y no hay nada más real en la vida que los errores, equivocarnos nos aleja de la perfección pero a pesar de los tropiezos, es posible tener un final feliz.

Agradezco a DIOS por su fortaleza; a mi MADRE Rosita Calero, a mi PADRE Eduardo Sánchez, quienes hombro a hombro lucharon con paciencia, dedicación, tesón y amor para que alcance este título, a mis HERMANOS Anita y Diego; por siempre contar con su apoyo y cariño incondicional que me ha llevado hasta donde estoy.

Debo agradecer a nuestro director de tesis, Ing. Carlos Díaz, a mi compañero Byron Amaguayo y a todo el personal de los laboratorios, ya que este proyecto es fruto de un trabajo en equipo.
Agradezco a los buenos amigos que confiaron en mi Danny, Marco, Santiago y Byron, de una u otra forma su amistad contribuyó en mi formación como individuo y profesional.

Finalmente, agradezco a mi querida Facultad de Ingeniería Mecánica y a mis profesores quienes supieron compartir su conocimiento preparándome para un futuro competitivo.

Oscar Vinicio Sánchez Calero

ÍNDICE

Certificación……...…i
Declaración……ii
Dedicatoria ……iii
Agradecimientos ……..iv
Resumen……..……xv
Abstract……xvi
INTRODUCCIÓN. 1
Objetivo general 3
Objetivos específicos. 3
Alcances 3
1. MARCO TEÓRICO 4
1.1. Cobre 4
Características 5
Tipos…….. 5
Aplicaciones 6
Cobre electrolítico 6
1.2. Aluminio 7
Características 8
Tipos……. 9
Codificación para una aleación de aluminio original modificada 10
Aplicaciones 11
Aluminio AA 6063 12
1.3. Estudios previos de soldadura por fricción de materiales disímiles 13
1.4. Soldadura por fricción 15
Cohesión de materiales soldados por FRW. 16
Energía presente en el proceso FRW 16
Descripción del proceso de soldadura 17
Clasificación de la soldadura FRW 19
Soldadura de fricción por conducción continua 19
Soldadura de fricción por inercia 19

Velocidad de rotación. (V_R) 20
Presión de calentamiento. (P_C) 20
Presión de forja. (P_f) 21
Encogimiento axial. (X) 21
Tiempo de calentamiento. (t_c) 21
Tiempo de frenado. (t_f) 21
Tiempo de forjado. (t_{fo}) 21
2. TRABAJO EXPERIMENTAL 22
2.1. Materiales y equipos a utilizarse 22
Equipos para la soldadura por fricción de impulsión directa 22
Equipos para realizar ensayos y metalografías 24
2.2. Extracción y preparación de las probetas para la soldadura 26
2.3. Proceso experimental de soldadura 29
Soldadura FRW sin calentamiento previo 29
Soldadura FRW con calentamiento previo a 210°C, 310°C y 415°C 32
2.4. Ensayo de tracción y metalografías 32
Ensayo de tracción 32
Metalografías 33
Selección y extracción 33
Desbastado grueso 34
Montaje de Probetas 35
Desbaste fino 35
Pulido final 36
Ataque Químico 36
3. RESULTADOS OBTENIDOS 37
3.1. Encogimiento axial posterior a la soldadura FRW 37
3.2. Ensayo de tracción 37
Gráficas del ensayo de tracción 38
Probeta 3A-3C 38

Probeta 12A-12C 39
Probeta 13A-13C 39
Probeta 16A-16C 40
3.3. Metalografías 40
Micrografías de las probetas Cu-Al 40
3.4. Microdurezas 53
Microdureza en la probeta Al-Cu [4A-4C] 55
Microdureza en la probeta Al-Cu [11A-11C] 57
Microdureza en la probeta Al-Cu [15A-15C] 59
Microdureza en la probeta Al-Cu [17A-17C] 61
Microdureza en la probeta Al-Cu [18A-18C] 63
3.5. Microscopía electrónica 65
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS 67
4.1. Proceso de soldadura FRW 67
4.2. Ensayo de tracción 67
4.3. Metalografías 69
Caracterización del cobre 69
Caracterización del aluminio 70
Caracterización de la unión 71
Probetas 2A-2C y 7A-7C 71
Probeta 4A-4C 72
Probeta 5A-5C 72
Probeta 15A-15C 73
Probeta 17A-17C 73
Probeta 18A-18C 73
Análisis probeta 11A-11C 74
4.4. Microdurezas 79
4.5. Microscopía electrónica 80
4.6. Análisis comparativo 92

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 95
5.1. Conclusiones 95
5.2. Recomendaciones 96
6. Bibliografía 98
7. ANEXOS 101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades físicas del cobre....5
Tabla 1.2. Composición química de la varilla de cobre....7
Tabla 1.3. Propiedades físicas del aluminio....8
Tabla 1.4. Composición química de la varrilla de aluminio....12
Tabla 1.5. Dureza y resistencia del aluminio....13
Tabla 2.1. Parámetros para soldar por el método de fricción con volante de inercia para materiales disímiles con un Φ de 25mm (1in)....22
Tabla 2.2. Equipos para el proceso de soldadura....23
Tabla 2.3. Equipos para metalografías y ensayos de tracción....24
Tabla 2.4. Dimensiones, codificación de probetas y detalle del proceso....28
Tabla 2.5. Dimensiones de bandas estandarizadas....30
Tabla 2.6. Longitud de la banda en “V” in....30
Tabla 3.1. Encogimiento axial de las probetas soldadas por FRW....37
Tabla 3.2. Resultados de los valores de tracción de los materiales Cu-Al (precaletamiento a 210°C)....38
Tabla 3.3. Características de las micrografías Cu-Al....41
Tabla 3.4. Probetas para análisis de microdureza....53
Tabla 3.5. Ensayo de microdureza en el eje axial (4A-4C)....55
Tabla 3.6. Ensayo de microdureza transversal, realizado en la varilla de aluminio cerca de la zona de unión (4A-4C)....56
Tabla 3.7. Ensayo de microdureza transversal, en la varilla de cobre cerca de la zona de unión (4A-4C)....56
Tabla 3.8. Ensayo de microdureza en el eje axial (11A-11C)....57
Tabla 3.9. Ensayo de microdureza transversal, realizado en el aluminio cerca de la zona de unión (11A-11C)....58
Tabla 3.10. Ensayo de microdureza transversal, realizado en el cobre cerca de la zona de unión (11A-11C)....58
Tabla 3.11. Ensayo de microdureza en el eje axial (15A-15C)....59
Tabla 3.12. Ensayo de microdureza transversal, realizado en el aluminio cerca de la zona de unión (15A-15C)....60
Tabla 3.13. Ensayo de microdureza transversal, en el cobre cerca de la zona de unión (15A-15C)....60
Tabla 3.14. Ensayo de microdureza en el eje axial (17A-17C)....61

Tabla 3.15. Ensayo de microdureza transversal, realizado en el aluminio cerca de la zona de unión (17A-17C) 62
Tabla 3.16. Ensayo de microdureza transversal, en el cobre cerca de la zona de unión (17A-17C) 62
Tabla 3.17. Ensayo de microdureza en el eje axial (18A-18C) 63
Tabla 3.18. Ensayo de microdureza transversal, realizado en el aluminio cerca de la zona de unión (18A-18C) 64
Tabla 3.19. Ensayo de microdureza transversal, en el cobre cerca de la zona de unión (18A-18C) 64
Tabla 3.20. Resultados microscopía electrónica en la probeta 11A-11C 65
Tabla 4.1. Resultados de la micrografía por difracción de rayos X en la probeta 11A-11C 84
Tabla 4.2. Difracción de rayos X en sólidos, distribución de elementos en varios puntos de la soldadura 87
Tabla 4.3. Nomenclatura de la estructura cristalográfica 88
Tabla 4.4. Composición química estimada del EDS, en los puntos 1 a 6 de la probeta 11A-11C 89
Tabla 4.5. Compuestos intermetálicos presentes en los puntos 1 a 6. 90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de la soldadura según la AWS……2
Figura 1.1. Calcopirita....4
Figura 1.2. Mineral de aluminio 8
Figura 1.3. Aluminio AA-6063-T5 12
Figura 1.4. Resistencia a la transición eléctrica de una combinación de Al-Cu 14
Figura 1.5. Soldadura por fricción (FRW): (1) Mandril rotando, sin contacto; (2) partes presionadas para que entren en contacto para generar calor por fricción; (3) la rotación se detiene y se aplica la presión de forja; y (4) se forma la soldadura....18
Figura 1.6. Máquina para soldadura por fricción continua....19
Figura 1.7. Principio de Funcionamiento FRW con inercia....20
Figura 2.1. Corte de probetas....26
Figura 2.2. Refrentado de probetas....26
Figura 2.3. Adaptación de la polea a la máquina FRW 30
Figura 2.4. Secciones de bandas en V estandar....31
Figura 2.5. Ensayo deTracción....33
Figura 2.6. Selección y corte de probetas 34
Figura 2.7. Desbaste grueso 34
Figura 2.8. Montaje de las probetas en resina 35
Figura 2.9. Desbastado fino....35
Figura 2.10. Pulido Final....36
Figura 2.11. Compuesto para ataque químico de cobre y aluminio 36
Figura 3.1. Esfuerzo vs. Deformación 3A-3C 38
Figura 3.2. Esfuerzo vs. Deformación 12A-12C 39
Figura 3.3. Esfuerzo vs. Deformación 13A-13C 39
Figura 3.4. Esfuerzo vs. Deformación 16A-16C 40
Figura 3.5. Huella (tipo rombo) del indentador piramidal sobre aluminio, con aumento de 100X 53
Figura 3.6. Distancias entre cada marca de indentación, con aumento de 0.5X 54
Figura 3.7. Dureza vs. Distancia probeta 4A-4C 55
Figura 3.8. Dureza vs. Distancia. Aluminio y Cobre (4A-4C)....56
Figura 3.9. Dureza vs. Distancia probeta 11A-11C 57
Figura 3.10. Dureza vs. Distancia. Aluminio y Cobre (11A-11C)....58
Figura 3.11. Dureza vs. Distancia probeta 15A-15C 59
Figura 3.12. Dureza vs. Distancia. Aluminio y Cobre (15A-15C)....60

Figura 3.13. Dureza vs. Distancia probeta 17A-17C 61
Figura 3.14. Dureza vs. Distancia. Aluminio y Cobre (17A-17C).....62
Figura 3.15. Dureza vs. Distancia probeta 18A-18C 63
Figura 3.16. Dureza vs. Distancia. Aluminio y Cobre (18A-18C).....64
Figura 4.1. Esfuerzo vs. Deformación, de las últimas cuatro probetas ensayadas a tensión (3A-3C,12A-12C, 13A-13C y 16A-16C) 68
Figura 4.2. (A)Metalografía probeta 17A-17C (B) Metalogafía del estudio de Sahim, M. .69
Figura 4.3 Micrografía del aluminio 6063-T5, con un aumento de 1000X y ataque químico 70
Figura 4.4 Micrografía de la aleación de aluminio (6063-T5 extruido) 71
Figura 4.5. Acabado superficial en la probeta 7A-7C (sin calentamiento previo).....74
Figura 4.6. Acabado superficial en la probeta 11A-11C (calentado el cobre a 210°C) 74
Figura 4.7. Micrografía obtenida de la probeta 11A-11C a un aumento de 100X sin ataque previo 75
Figura 4.8. Fragmento de cobre en el aluminio, micrografía de la probeta 11A-11C con un aumento de 500X 75
Figura 4.9. Micrografía sin ataque químico de la probeta 11A-11C a un aumento de 500X 76
Figura 4.10. Micrografía de la probeta 11A-11C con ataque químico a un aumento de 100X. (A) Zona de unión (ZU), (B) Zona afectada Termo-mecánicamente (ZATM), (C) Zona afectada térmicamente (ZAT), y (D) Material Base (MB) 76
Figura 4.11. Micrografía a 50X de aumento, zona de intermetálicos 77
Figura 4.12 Número de granos interceptados y granos dentro del área 78
Figura 4.13. Microscopía electrónica de la probeta 11A-11C, análisis en la zona de intermetálicos en el aluminio cerca de la interface de unión con un aumento de 500X....81
Figura 4.14. Microscopía electrónica de la probeta 11A-11C, análisis en la zona afectada térmicamente en la varilla de aluminio cerca de la interface de union, con un aumento de 750X 81
Figura 4.15. Microscopía electrónica de la probeta 11A-11C, partícula de cobre presente en la matriz de aluminio con un aumento de 250X.....82
Figura 4.16. Micrografía de la probeta 11A-11C en la zona afectada termo-mecánicamente (intermetálicos) con un aumento de 500 X.....82
Figura 4.17. Diagrama de difracción de rayos X realizado en la mezcla mecánica de Cu-Al en el punto 1 en la probeta 11A-11C.....86
Figura 4.18. Diagrama de fase Aluminio-Cobre 90

Figura 4.19. Diagrama de difracción de rayos X realizado en la probeta 11A-11C en una área representativa. 91
Figura 4.20. Cartografía de la ubicación de los diferentes elementos presentes en la soldadura FRW de Cu-AL 92

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I. Tablas de valores para las gráficas Esfuerzo vs Deformación..…….....101

Anexo II. Tablas para el cálculo de tamaño de grano según la norma ASTM E112...….107

Anexo III. Tamaño de grano según la norma ASTM E112..…….……108

Anexo IV. Resultados del análisis químico del cobre electrolítico….……..109

Anexo V. Resultados del ensayo de tracción de la soldadura FRW……...110

Anexo VI. Micrografías de la falta de unión de la probeta 17A-17C..……111

Anexo VII. Micrografía de la probeta 11A-11C (aumento 50X) de la zona cercana a la unión, para determinar el tamaño de grano……...112

Anexo VIII. Redes de Bravais……113

Anexo IX. Las 14 redes de Bravais y su símbolo de Pearson….……114

Anexo X. Tabla de distribución de los elementos presentes en varios puntos de la zona de unión…….115

Anexo XI. Diagrama de difracción de rayos X en los 6 diferentes puntos de la probeta 11A-11C…….116

Anexo XII. Micrografía de la difracción de rayos X para cada elemento presente en la soldadura FRW de materiales disímiles……...119

RESUMEN

En la actualidad existen varios métodos de soldadura que permiten unir materiales disímiles (Cobre electrolítico – Aluminio AA-6063). Los procesos de unión en estado sólido como: soldadura por ultrasonido, por láser y fricción los métodos más usados.

La soldadura por fricción toma gran importancia, debido a que este tipo de unión no necesita de material de soldadura consumibles, pero intervienen variables importantes para su realización como: velocidad de rotación (V_r), presión de calentamiento (P_c), presión de forja (P_f), tiempo de calentamiento (t_c), encogimiento axial (X_c), tiempo de frenado (t_f), etc. Estas variables condicionan la calidad de junta a soldarse y determinan propiedades mecánicas específicas para esta soldadura.

Mediante este proceso de soldadura se obtuvo varias probetas, las cuales se sometieron a ensayos de resistencia a la tracción, metalografías, microdureza, y microscopia electrónica, para observar la forma de grano, la zona afectada por el calor, la resistencia última a la tracción, la dureza en las diferentes zonas de la unión y las posibles imperfecciones que se pueden generar al realizar este tipo de soldadura con presión y calor, permitiendo además caracterizar el material base y la zona de coalescencia de la soldadura.

Palabras clave: Estudio y Caracterización, Cobre electrolítico-aluminio AA 6063, Comportamiento microestructural, Soldadura por fricción, Materiales disímiles.

ABSTRACT

There are some welding methods to join dissimilar materials (Electrolytic Copper - Aluminum AA-6063). The processes of solid state joining as: welding by ultrasonic, laser and friction are the most used methods.

Friction welding is rather important because this type of weld does not require consumable welding materials (electrodes), but it has some variables that are involved such as: rotational velocity (Vr), heating pressure (Pc), forging pressure (Pf), heating time (tc), axial shrinkage (Xc), braking time (tf), etc. These variables determine the quality of the joint and permits to obtain certain properties for this type of welding.

Using this welding process, several tests pieces were obtained, which were tested for tensile strength, metallographic analysis, micro hardness, and scanning electron microscopy in order to study grain shape, the heat affected zone, tensile properties, hardness and different areas of the weld and the possible imperfections that can be generated by this type of welding process with pressure and heat. These tests allowed the characterization of the base material and the coalescence zone of the weld.

Keywords: Characterization and Study, Dissimilar materials, Electrolytic copper-Aluminum AA 6063, Friction welding, Microstructural behavior.

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MICRO-ESTRUCTURAL DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN EN MATERIALES DISÍMILES
COBRE ELECTROLÍTICO- ALUMINIO (AA-6063)

INTRODUCCIÓN.

La soldadura genera un gran aporte a las diferentes industrias tanto de producción como mantenimiento, difícilmente se puede mencionar una industria metalmecánica que no necesite de este proceso como parte fundamental de su constitución. La AWS (American Welding Society) posee una lista de más de 90 procesos diferentes que conllevan distintas metodologías y aplicaciones como se observa en la Figura 1.

La unión de materiales por fricción es un método de soldadura en estado sólido, en que la coalescencia de los materiales se genera por la aplicación de calor (fricción) y presión, al no utilizar material de aporte ni gas de protección es posible unir materiales con diferentes propiedades químicas, mecánicas o térmicas (disímiles), siendo de gran interés para muchas aplicaciones en varias ramas de la industria: química, nuclear, aeroespacial, de transporte, generación de energía y la electrónica, mediante el proceso de soldadura FRW se puede obtener soldaduras de alta calidad en: acero, magnesio, aluminio y aleaciones de cobre, motivo por el cual este proceso de unión es llevando a una escala industrial. Este tipo de unión que posee dos clasificaciones: soldadura por fricción continua y soldadura por fricción con volante de inercia, las cuales mantienen variables de soldadura como: presión, rotación y tiempo de forjado, mismas que permiten obtener una correcta mezcla mecánica entre materiales disímiles.

Debido al aumento en la utilización de la soldadura a nivel mundial, se necesitan procedimientos los cuales permitan conocer el comportamiento, características y propiedades que se presentan en la soldadura, teniendo como opciones el realizar ensayos destructivos y no destructivos. Una manera de caracterizar la soldadura es la aplicación de un estudio metalográfico de los componentes estructurales de la unión con la finalidad de conocer la calidad y las propiedades específicas que obtendrá la soldadura (Pender , 1989).

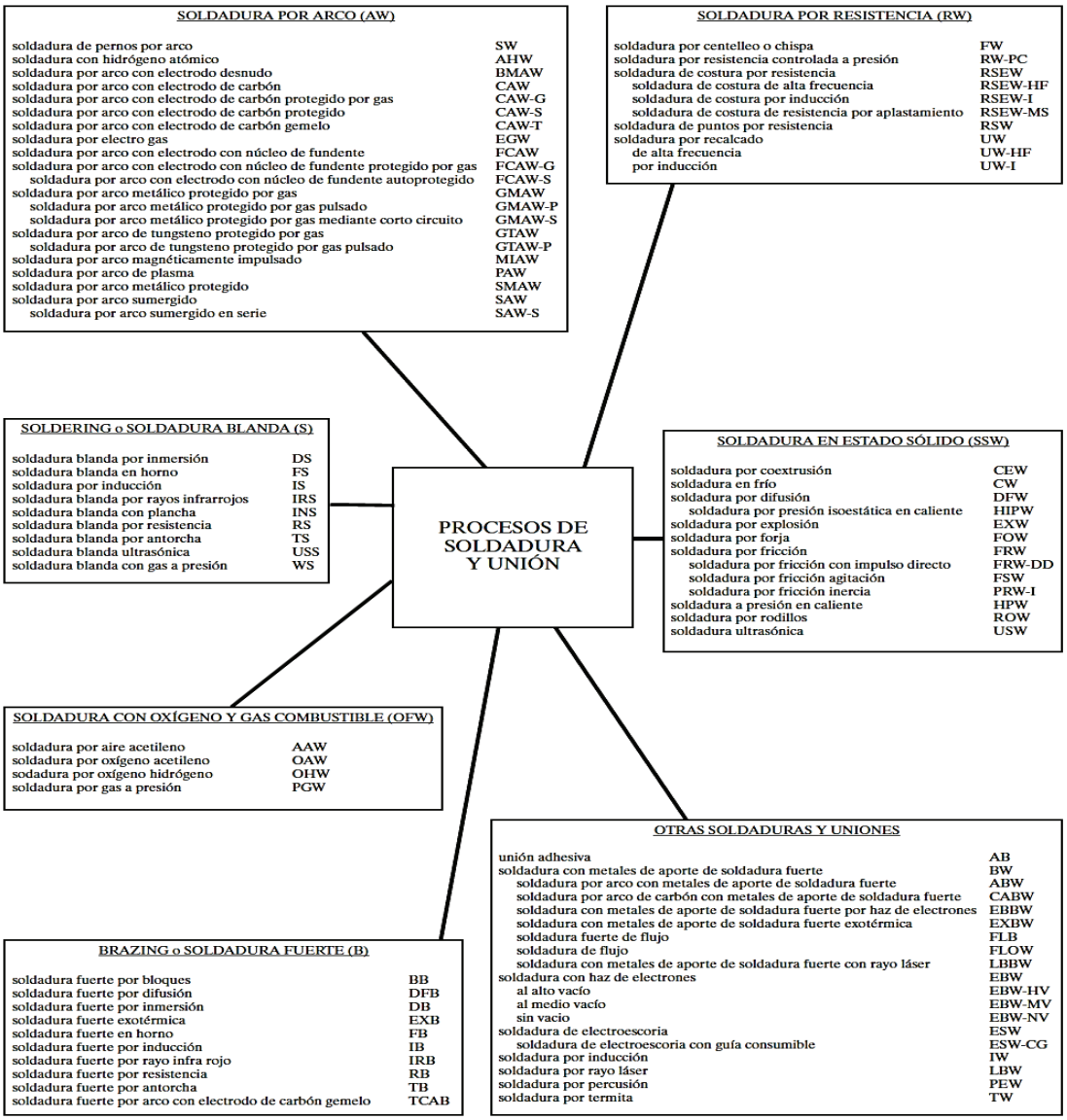


Figura 1. Clasificación de la soldadura segun la AWS
(American Welding Society, 2010)

El estudio metalográfico genera un campo amplio de estudio para caracterizar materiales o procesos de soldadura. Generalmente este procedimiento viene regularizado por normas internacionales como ASTM que dan directrices para la toma de probetas y la realización de ensayos metalográficos, obteniendo resultados estandarizados y fáciles de analizar.

Con el fin de conocer la resistencia que posee la unión de los materiales se realiza un ensayo de tracción que permite conocer el esfuerzo último a atracción, para posteriormente compararlo con la resistencia del material base y determinar si la soldadura está o no dentro del rango de aceptación para su determinada aplicación.

La aplicación de la soldadura por fricción en las industrias: automotriz (ejes de transmisión, válvulas), en turbo-maquinaria (elementos de turbocompresores) y la aeronáutica para la elaboración de componentes mecánicos con materiales disímiles, demanda un importante conocimiento de las propiedades mecánicas que se obtiene en la soldadura, como también las imperfecciones y limitaciones inherentes en la unión.

El presente trabajo se basa en el estudio metalográfico de la soldadura y otros ensayos complementarios (resistencia a la tracción, microdureza, microscopia electrónica, etc), que facilitan la obtención de datos experimentales para analizar e interpretar el comportamiento de los materiales disímiles en la zona de soldadura realizada por fricción.

Objetivo general

- Estudiar y caracterizar el comportamiento microestructural de la soldadura por fricción en materiales disímiles cobre electrolítico- aluminio (AA-6063).

Objetivos específicos.

- Obtener probetas normalizadas para la caracterización de la microestructura de la soldadura de los materiales.
- Identificar y analizar la microestructura presente en la soldadura de materiales disímiles.
- Recolectar información procedente de los ensayos destructivos (tracción, metalografías y dureza) para evaluar el desempeño de estos materiales al ser soldados por fricción.
- Analizar cada una de las microestructuras y comparar las propiedades mecánicas de la soldadura.
- Determinar el desempeño de la soldadura de los materiales cuando se encuentran sometidos a cargas estáticas.

Alcances

- Se realizará el estudio de la soldadura por fricción de aluminio 6063-T5 y cobre electrolítico.
- Se caracterizará la zona de la soldadura entre de los materiales utilizando metalografías.
- Se obtendrán las propiedades mecánicas de la unión (tracción, metalografías y microdureza) propias de la soldadura.

- Se contrastará los resultados de las propiedades, de los materiales por separado con los de la soldadura.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Cobre

El cobre (Cu) fue unos de los primeros materiales utilizados por la humanidad alrededor de los 6000 A.C. en aquellas épocas el cobre se encontraba libre en estado metálico, por lo que los pueblos antiguos confeccionaron varias herramientas con este material, el cual al martillarlo (forjado en frío) incrementaba su dureza, cerca del año 4000 A.C. los hombres comprobaron que el cobre podía ser fundido y colado en una infinidad de formas útiles para los requerimientos de esta época, posteriormente se empezó a incluir el estaño en la fundición del cobre para mejorar sustancialmente su capacidad de ser moldeado.

Actualmente el cobre ya no se encuentra en estado libre como en la antigüedad por lo que se extrae de sus minerales los cuales en su mayoría son sulfuros, como la calcopirita (CuFeS2) ver Figura 1.1.

Figura 1.1. Calcopirita
(Claudio, 2015)

Para obtener el cobre de la calcopirita se la tritura y se la concentra por flotación, el producto resultante tiene una pureza de entre el 98 y 99 %, recibiendo el nombre de blíster, para su uso comercial el cobre debe alcanzar mayores niveles de pureza por lo que se lo refina mediante procesos de electrólisis obteniendo una pureza muy cercana al 100%.

Características

El cobre puro posee un color característico (rosado rojizo), pero una de sus propiedades más distintivas en la ingeniera es su baja resistividad eléctrica, debido a esta propiedad y a su abundancia en la naturaleza el cobre es utilizado como conductor eléctrico además posee una excelente conductividad térmica. La resistencia y dureza del cobre son relativamente bajas especialmente cuando se toma en cuenta el peso, para ello se lo alea frecuentemente con materiales como: estaño, silicio, berilio, etc.

Este material es noble pero diferente de otros metales como el oro, y puede ser atacado por reactivos tales como: amoniaco e hidrógeno, aunque es muy resistente a la mayoría de medios corrosivos ambientales porque la presencia de oxígeno en el cobre es una impureza insignificante.

Tabla 1.1. Propiedades físicas del cobre

Símbolo	Cu
Número atómico.	29
Peso atómico	63,546
Red espacial	Cubica de caras centradas
Diámetro atómico (Å)	1,28
Densidad (gr/cm^3)	8,96
Punto de fusión (°C)	1083
Módulo de elasticidad (MPa)	$209*10^3$
Calor específico prom. 0-100°C ($J.Kg^{-1}K^{-1}$)	390
Conductividad térmica 20-100($Wm^{-1}K^{-1}$)	398
Resistividad eléctrica a 20°C (μ ohm*m)	$1,71 \times 10^{-8}$

(Groover, 1997)

Tipos

La forma más común de clasificar a las aleaciones de cobre es dividirla en 6 familias:

- Cobre
- Cobre diluido (High Copper Alloys)
- Latones
- Bronces
- Cu-Ni(cuproníqueles)
- Cu-Ni-Zn (alpaca o plata alemana)

La especificación para las aleaciones de cobre se basan en el United Numbering System for Metals and Alloys (UNS), la cual usa un número de cinco dígitos precedidos por la letra C (Cobre) debido a que las aleaciones de cobre se procesan por fundición o por

conformado, este sistema de especificación incluye los dos tipos de proceso. Para las aleaciones conformables la numeración viene dada por los números C10100 al C79900 y los números C80000 al C99900 para las aleaciones de fundición.

La norma ASTM B 601 ¨*Standard Practice for Temper Designations for Copper and Copper Alloys-Wrouth and Cast*¨ establece un código alfanumérico que se relaciona con cada estado de entrega por ejemplo: el código TB00 indica que el material en este caso ha sido tratado en solución o solubilizado para cualquier aleación que se endurezca por precipitación.

Aplicaciones

El cobre comercialmente puro es utilizado principalmente en alambres, cables, contactos y diversos artículos que se utilizan en aplicaciones eléctricas, ciertos latones, bronces y cuproníqueles se usan en servicios que requieren una alta conductividad térmica como en: radiadores de automóviles y sistemas de calefacción, debido a la alta resistencia a la corrosión el cobre es utilizado en caños y válvulas de agua potable, sistemas de procesamiento de aguas industriales u otros fluidos acuosos.

La gran mayoría de aleaciones de cobre denominadas ¨*wrougth alloys*¨ en la literatura inglesa, son fácilmente comercializadas en cualquier mercado con distintos grados de trabajado en frio, de modo que la resistencia a la fatiga y la resistencia mecánica dependen del tipo de trabajo en frío que sufrió el material, este tipo de aleaciones son comúnmente utilizadas en resortes y pequeños engranajes, levas, contactos eléctricos, etc. Las aleaciones que contienen plomo del 1 al 6% son denominadas aleaciones de corte libre y se las emplea en componentes mecanizados o roscados (Maffia, 2013).

Cobre electrolítico

Este tipo de cobre comercialmente puro viene representado por la UNS C10100 a C13000, los diversos tipos de elementos de este grupo tienen diferentes grados de pureza y por ende diferentes características. El cobre refinado a fuego (C12500) llamado así coloquialmente se obtiene de la desoxidación del cobre anódico hasta que el contenido de oxígeno se haya reducido en un valor de entre 0,002 y 0,004%, generalmente posee una cantidad de azufre residual de 10 a 30 ppm. La designación C11100 es usada en los llamados cobres electrolíticos.

La plata puede estar presente como impureza, o puede ser agregada intencionalmente para lograr una mayor resistencia al ablandamiento, cuando el cobre ha sido trabajado en frío. Esta aleación se utiliza en radiadores de vehículos y conductores eléctricos que trabajan a temperaturas que sobrepasan los 200 ^{o}C.

Debido a que en el mercado ecuatoriano no existen fabricantes de cobre electrolítico, los proveedores de metales importan este material de Colombia, por lo que es necesario realizar un análisis de composición química por espectrofotometría de chispa en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, para conocer el grado de pureza de la barra de cobre, ya que el proveedor no poseía la hoja técnica del material, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Composición química de la varilla de cobre

Metales	Porcentaje (%)
Zinc (Zn)	0,055
Plomo (Pb)	0,021
Estaño (Sn)	0,01
Níquel (Ni)	0,014
Silicio (Si)	0,037
Cobalto (Co)	0,02
Bismuto (Bi)	0,01
Cobre (Cu)	99,75

(Departamento de Metalurgia Extractiva , 2016)

1.2. Aluminio

Humphrey Davy en 1807, intentó extraer el metal de la alúmina (Al_2O_3) pensando que tenía una base metálica, sin embargo no logró obtener el metal pero empezó a llamar a dicha mezcla como alumio, que posteriormente sería conocido como aluminio.

En 1825, Hans Orsted reconocido químico y físico logró separar el aluminio contenido en la alúmina, además determinó que el comportamiento de dicho material era semejante al del estaño, en el año 1845 en Alemania el físico Friedrich Wohler fue el primer investigador en determinar las propiedades del aluminio tales como: gravedad específica, ductilidad, etc (Groover, 1997).

El aluminio es un metal de apariencia muy agradable para los usuarios, es un excelente conductor de electricidad y de calor, es un metal resistente a la oxidación, es liviano, no tóxico pero en su estado puro sus propiedades mecánicas son bajas. Es así, que para aumentar las propiedades mecánicas de este material se debe alear con otros elementos como el magnesio, cobre, manganeso, silicio y zinc entre otros. Con la obtención de la aleación se logra aumentar su resistencia mecánica por deformación en frío o por tratamiento térmico.

Figura 1.2. Mineral de aluminio
(Ferrera, 2016)

En la actualidad la materia prima para la obtención de aluminio es por excelencia la bauxita, misma que contiene en su mayoría óxido de aluminio hidratado (Al_2O_3-H_2O), 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 ($Al(OH)_3$), el $Al(OH)_3$ 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 obtiene los compuestos constituyentes de la alúmina, en el cátodo aluminio y en el ánodo oxígeno (Groover, 1997).

Características

Las propiedades por las que el aluminio es muy económico y atractivo son: bajo peso, versatilidad de uso, obtención, acabado superficial, resistencia a la oxidación, no ferromagnético, excelente conductor térmico y eléctrico. Además tiene una amplia aplicación en recipientes de bebidas, sector automotriz, perfileria, industria aeronáutica, etc.

Tabla 1.3. Propiedades físicas del aluminio

Símbolo	Al
Número, atómico.	13
Peso atómico	26,98154
Red espacial	Cubica de caras centradas
Diámetro atómico (Å)	2,8
Parámetro de red (Å)	4,04
Densidad (gr/cm^3)	2,7
Punto de fusión (°C)	660

Módulo de elasticidad (MPa)	70
Calor específico prom. 0-100°C ($J.Kg^{-1}K^{-1}$)	917
Conductividad térmica 20-100($Wm^{-1}K^{-1}$)	238
Coef. De exp. Térmica 0-100°C ($10^{-6}K^{-1}$)	23,5
Resistividad eléctrica a 20°C (μ ohm cm^{-1})	2,67

(Groover, 1997)

A los materiales como el aluminio y el magnesio se les designa como metales ligeros (light metal), y se los utiliza frecuentemente por su bajo peso. El aluminio tiene un tercio de la densidad del acero.

Tipos

La clasificación de las aleaciones de aluminio han cambiado mucho a través del tiempo y dependiendo de los países, varias instituciones dedicadas a la investigación y la ingeniería han establecidos procedimientos para clasificarlas. Entre las instituciones más importantes a mencionar se encuentran, la International Alloy Designation System (IADS) iniciada en el año de 1970 y la American National Standards Institute (ANSI), estas dos instituciones tienen gran aceptación a nivel mundial porque se basan en la Aluminum Association of the United States, esta asociación ubicada en Washington, DC. Es líder mundial en la industria del aluminio debido a que proporciona estándares globales, estadísticas de la industria y conocimiento experto, los cuales son facilitados por las empresas miembros y entidades responsables de formular políticas comprometidas con el uso sostenible del material de aluminio.

A continuación se detallará la clasificación de las aleaciones de aluminio con referencia en la ANSI. Esta norma clasifica a los productos de aluminio en dos categorías: aquellos productos obtenidos directamente por fundición (cast aluminum alloys) o lingotes de aleación de aluminio (foundry lingots aluminum alloys) y el segundo grupo son las aleaciones de aluminio forjado (wrough aluminum alloys). Ambos grupos se encuentran referenciados por la Aluminum Association dentro del estándar ANSI H35, en lo referente a composición, tratamiento térmico y designación.

Aleaciones forjadas de aluminio

La ANSI para cada aleación designa un número comprendido de cuatro dígitos, el primero hace referencia al principal elemento aleante. Así se determina los siguientes grupos de aleaciones: serie 1xxx aluminio sin alear (99% de pureza), serie 2xxx con cobre, serie 3xxx con manganeso, serie 4xxx con silicio, serie 5xxx con magnesio, serie

6xxx con magnesio y silicio, serie 7xxx con zinc y en algunos casos magnesio, serie 8xxx para otros elementos (litio) y la serie 9xxx para aleaciones inusuales.

En el primer grupo (serie 1xxx) el tercer y cuarto número son importantes porque mediante estos dos dígitos se expresa la pureza del aluminio. Ejemplo un aluminio 1150 representa que tiene una pureza del 99.50%. Para las series comprendidas del 2xxx al 8xxx los dígitos tercero y cuarto tienen un significado de poca importancia ya que representa el número consecutivo de la aleación, por ejemplo 3003, 3004 y 3005 son completamente diferentes. El segundo dígito dentro de la designación explica la modificación de la aleación, si es cero es una aleación original, si es un número entre 1 y el 9 referencia modificaciones menores.

Aleaciones fundidas de aluminio

La ANSI expresa la designación de estas aleaciones con cuatro dígitos pero además incorpora un punto decimal antes del último dígito para marcar la diferencia del vaciado ya sea directo o en lingote.

Codificación para una aleación de aluminio original modificada

El sistema empleado en los Estados Unidos para determinar una modificación en una aleación original o de los límites de impurezas en una varilla de aluminio puro (nivel de pureza, tratamiento térmico o conformado mecánico) es una letra mayúscula individual, empezando desde la “A” hasta la “Z” omitiendo las letras “I”, “O”, “Q”, y “x”, cada letra describe un tratamiento principal sea térmico o mecánico (recocido, conformado mecánico, tratamiento térmico, tratamiento térmico en solución, endurecimiento por deformación, etc.), por ejemplo la letra “T” se emplea para describir un tratamiento térmico y envejecido. Dentro de los tratamientos principales (térmicos o mecánicos) se detallan tratamientos específicos usando números del 1 al 10, dichos números son colocados a continuación de la letra mayúscula, ejemplo el código “T5” hace referencia a una aleación que fue enfriada directamente después de un proceso de conformado a alta temperatura y envejecido artificial.

Esta codificación de letra mayúscula y número se representa después de determinar la serie o aleación y está separada por un guion (6063-T5). (ASM International, 2008)

Los tratamientos térmicos más comunes y la secuencia de operaciones tanto como su designación se detallan a continuación:

- O Recocido
- F Como se fabricó

- W Tratamiento de solubilidad
- H Endurecimiento por deformación
- H1 Solamente endurecido por deformación
- H2 Endurecido por deformación y recocido parcialmente
- H3 Endurecido por deformación y estabilizado
- T Tratamiento de solubilidad
- T1 Enfriado directamente después de un proceso de conformado a alta temperatura y envejecido natural.
- T2 Enfriado directamente después de un proceso de conformado a alta temperatura trabajado en frio y envejecido naturalmente en condiciones estables.
- T3 Tratamiento de solubilización, trabajo en frio y envejecido naturalmente en condiciones estables.
- T4 Tratamiento de solubilización y envejecido naturalmente a condiciones estables.
- T5 Enfriado directamente después de un proceso de conformado a alta temperatura y envejecido artificial.
- T6 Tratamiento de solubilización y envejecido artificial.
- T7 Tratamiento de solubilización y sobre envejecido o estabilizado.
- T8 Tratamiento de solubilización, trabajado en frio y envejecido artificial.
- T9 Tratamiento de solubilización, envejecido artificial y trabajado en frio.
- T10 Enfriado directamente de un proceso de formado a alta temperatura, trabajado en frío y envejecido artificial.

Existen otros procesos que se pueden aplicar a las aleaciones de aluminio, sin embargo, en este trabajo se presenta los más comunes.

Aplicaciones

Su uso es principalmente en cuatro áreas específicas que son: la construcción, recipientes (alimenticios y farmacéuticos), en aplicaciones eléctricas y transporte. Dentro de la construcción se lo utiliza en puentes, torres, tanques, edificios, diseños arquitectónicos por su resistencia a la corrosión y bajo peso. Se usa en recipientes y empaquetadores para la industria farmacéutica y de comida por no ser tóxico y no reaccionar químicamente, evita el crecimiento de bacterias. En el área de la transportación están presentes en la fabricación de aeronaves y vehículos, especialmente en partes del motor como: bielas, pistones, manivelas, cabezotes y tubos de escape de

gases entre otros. Por ser buen conductor de la electricidad y resistencia a la corrosión se usa en conductores, motores y generadores, transformadores, luminarias, etc.

Aluminio AA 6063

Esta aleación contiene magnesio y silicio con una adecuada proporción para la formación de silisiuro de magnesio (Mg_2Si), en comparación con las series 2xxx y 7xxx esta serie 6xxx presenta mejores propiedades como: maquinabilidad, resistencia a la corrosión, formabilidad y soldabilidad (Cavazos, 1998). Para el presente proyecto se usó este tipo de aluminio adquirido en la empresa CEDAL S.A.

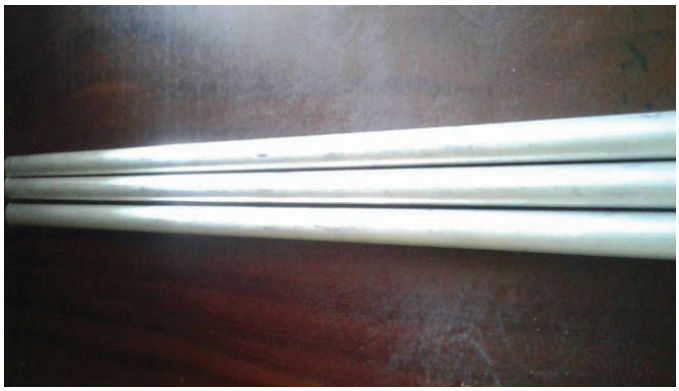


Figura 1.3. Aluminio AA-6063-T5
(Fuente propia)

Las principales características del aluminio AA-6063-T5 son:

- Tratable térmicamente.
- Alta resistencia a la corrosión y una moderada resistencia a la tracción.
- Facilidad de ser soldado mediante procesos de arco eléctrico con gas de protección (tungsteno).
- Sobresaliente capacidad de extrusión (ASM International, 2008).

La empresa CEDAL garantiza que las aleaciones usadas para la perfilería arquitectónica se basan en aleaciones de aluminio 6063, cumpliendo con la norma NTE INEN 2250:2000 en cuanto a su composición química (CEDAL, 2008).

Tabla 1.4. Composición química de la varrilla de aluminio

Composición Química de la varilla de aluminio										
No. Aleación.	**Si**	**Fe**	**Mg**	**Mn**	**Cu**	**Cr**	**Zn**	**Ti**	**Varios**	**Al (min)**
6063	0,20 – 0,60	0,35	0,45 – 0,90	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	restante

(CEDAL, 2008)

Tabla 1.5. Dureza y resistencia del aluminio

Aleación A.A.	Espesor mm	Dureza (HWB) min.	Webster B normal	Resist. a Fluencia (MPa)		Resist. a tracción (MPa)		Elongación (% en 5 cm)
				Mínimo	normal	mínimo	normal	
6063-T1	Todos	4	6	54,91	83,35	109,83	156,90	14
T4	<12.7	5	7	60,80	86,29	126,50	163,77	14
T5%(1)	<12.7 o más	4	6	58,83	83,35	122,58	157,88	14
T5	Todos	7	8	93,16	120,62	136,31	172,59	12
T6	<12.7	8	10	109,83	158,86	152,00	193,19	8
	<12.7 o más	7	9	78,45 104,93	141,21	145,13	182,40	8
	<12.7	10	13	172,59	209,86	206,92	231,43	8
	<12.7 o más	9	12	172,59	189,26	205,93	220,64	8

(CEDAL, 2008)

1.3. Estudios previos de soldadura por fricción de materiales disímiles

La soldadura por fricción fue desarrollada por la ex Unión Soviética, y posteriormente introducida en los Estados Unidos en el año de 1960 por ser un método de producción automático. La soldadura FRW (por sus siglas en inglés friction welding), genera la unión de los materiales en estado sólido usando el calor generado por el frotamiento mecánico de dos superficies y la aplicación de presión.

Por sus tiempos breves de soldadura, se utiliza este proceso para la unión de tubos y ejes, y es muy empleado para la industria de producción masiva. Industrias como la automotriz, petrolera, de equipo agrícola, aeronáutica entre otras; han propiciado el estudio de este tipo de coalescencia de materiales tanto entre materiales de igual características como en materiales disimiles (Groover, 1997).

La mayoría de estudios realizados para la soldadura en frío por rozamiento se ha profundizado evaluando la soldadura friction stir welding (FSW). Este método se caracteriza por combinar el calor por fricción obtenido por la interacción de una herramienta generalmente de acero endurecido o de carburo sobre las superficies a soldar y la deformación plástica inherente que se genera en este proceso FSW.

Los estudios realizados bajo este procedimiento proporcionan las recomendaciones para controlar las variables de rotación, velocidad de avance y la presión de carga para lograr un buen desempeño en la unión de los materiales (American Society for Metals, 2011). Las investigaciones llevadas a cabo por este método (FSW) analizan la unión de aleaciones que no pueden ser soldadas por métodos convencionales, mediante el

análisis de la microestructura, la resistencia a la tracción y el comportamiento a la fatiga (Ávila , Franco, & Jaramillo, 2012).

La motivación para realizar estudios de juntas de materiales difíciles de soldar es el uso de la electro-movilidad, este es un concepto que maneja la industria para crear vehículos más amigables con el medio ambiente y reducir las emisiones contaminantes, de tal forma que en Alemania, especialmente en la industria automotriz han adoptado este nuevo desarrollo de unir materiales tales como el cobre y el aluminio, para el desarrollo de baterías.

En la empresa Fraunhofer, se lleva a cabo una investigación que compara cuatro diferentes métodos no convencionales de soldadura, con el fin de determinar que método de unión genera una baja resistencia eléctrica por área en la soldadura.

Los métodos de soldadura usados para la comparación son los siguientes:

1. Soldadura por rayo láser.
2. Soldadura por fricción y avance.
3. Enchapado por rolado con inducción láser.
4. Soldadura por pulso electromagnético (bajo par de apriete).
5. Soldadura por pulso electromagnético (alto par de apriete).

Después de realizar los estudios pertinentes y análisis de resultados, el resumen de la comparación de los procesos anteriormente citados se muestra en la Figura 1.4.

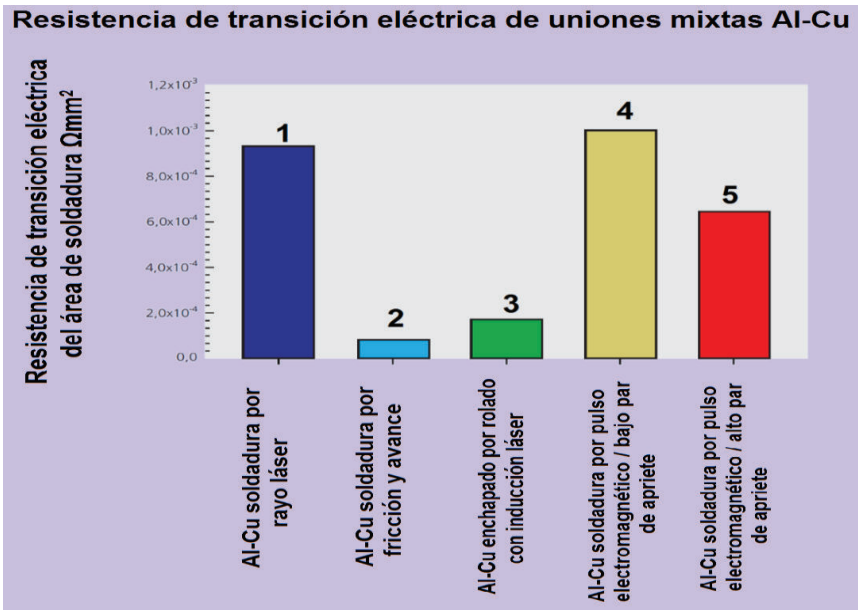


Figura 1.4. Resistencia a la transición eléctrica de una combinación de Al-Cu (Fraunhofer-Gesellschaft, 2015)

La Figura anterior muestra que el método de soldadura por fricción y avance presenta menor resistencia eléctrica en la transición de la mezcla aluminio-cobre. En cambio la unión realizada mediante el proceso soldadura por pulso electromagnético (bajo par de apriete), indica la mayor resistencia eléctrica en el área de soldadura y es semejante a la

resistencia eléctrica que se obtiene al realizar la unión por el proceso de soldadura por rayo láser (Fraunhofer-Gesellschaft, 2015).

Kawai, Ogata y Tokisue (1997) después de soldar materiales con diferentes propiedades físicas y térmicas (disímiles), indican que las condiciones (tiempo de forja, revoluciones, presión de forja, etc) del proceso de soldadura por fricción influyen directamente en las fuerzas internas y exteriores que forman las rebabas del proceso FRW, además se realiza ensayos en probetas tubulares concluyendo que; la deformación de los materiales aumenta con el transcurso del tiempo y que la resistencia a la tracción aumenta en relación a la presión de soldadura en las uniones.

Sathiya, Aravindan, y Noorul (2004) posterior a su estudio de la soldadura de acero austenítico AISI 304, analizan la optimización de parámetros para garantizar la calidad de la soldadura por fricción. Esta unión alcanza una resistencia última a la tracción comparable con la de su material base, además demostraron el aumento de la microdureza Vickers con el transcurso del tiempo de fricción).

Mendez (2011) menciona la relación entre: la velocidad de rotación y la calidad que se obtiene en la junta, al realizar uniones por fricción de aluminio AA 6063, sus resultados detallan que la velocidad recomendada para soldar barras cilíndricas de esta aleación de aluminio es de 2000 rpm, porque genera un excelente estado de plasticidad para la formación de rebabas y mantiene el tamaño de grano pequeño en la zona afectada por el calor (ZAC).

En 2011, Linares desarrolla un trabajo que abarca el estudio de la influencia de la presión en las soldadura por fricción de aluminio AA 6063, mediante el estudio micrográfico concluye que la existencia de precipitados de AlMgSi y/o AlMgSiFe, aumentan de tamaño y que los granos son más pequeños en la zona de la unión, en la zona afectada por el calor producto de una recristalización. Un aporte extra que da a conocer el autor en su estudio, es el aumento de la dureza en la zona de unión en comparación con su material base.

1.4. Soldadura por fricción

Los procesos de soldadura por arco eléctrico pueden generar defectos tales como: impurezas, porosidades y fisuras en el cordón de soldadura, estas imperfecciones contribuirán en el deterioro de las propiedades mecánicas de la junta soldada.

Aproximadamente desde hace dos décadas existe un método alternativo de soldadura, denominado soldadura por fricción (FRW), unión que se realiza en estado sólido. El proceso presenta grandes ventajas tecnológicas en sus propiedades mecánicas siendo superiores o iguales a las ofrecidas por métodos convencionales de soldadura por fusión,

además el proceso FRW ofrece un bajo consumo de energía y no requiere de un material de aporte (Ávila , Franco, & Jaramillo, 2012).

Cohesión de materiales soldados por FRW.

La coalescencia es una propiedad que poseen los materiales de unirse o fundirse, para una soldadura realizada por fricción el término coalescencia hace referencia a la unión de materiales similares o de distintas características químicas, físicas o mecánicas (disímiles) mediante el uso de presión y calor conjuntamente. El calor usado para unir los materiales no es lo suficientemente elevado para fundir los elementos a soldar. La coalescencia por FRW se logra por la interacción de los granos superficiales que se encuentran en contacto dentro de las superficies a soldar.

Es decir, los granos superficiales de una material son atraídos (fuerza de atracción) por los granos de otro material que está en contacto superficial. Para lograr esta coalescencia, en las superficies de contacto deben estar íntimamente cercana para lograr que la fuerza de atracción atómica de un material atraiga a los átomos contenidos en la otra superficie y viceversa. (López , 2013)

Energía presente en el proceso FRW

En cualquier proceso de soldadura en estado sólido (sin fusión de materiales) hay dos áreas principales de preocupación: el enlace de los materiales y cuán fuerte es el enlace, siendo la energía de adhesión ($\Gamma_{adhesion}$) una manera de cuantificar este tipo de enlace.

Para ello se parte del concepto de la energía superficial (Γ_{sup}) que se define como: el incremento de energía ΔE_I dividido por su área A, causada por la creación de la superficie.

$$\Gamma_{sup} = \frac{\sum \Delta E_I}{A} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Una superficie recién creada posee una energía superficial elevada debido a que los átomos de la interface contribuyen con energía extra (ΔE_I), mientras que si la superficie es reconstruida, esta energía es más baja en un rango de 3 a 5 %. Para relacionar la energía superficial y la energía de fractura ideal (Γ_{COH}) se utiliza el criterio de Griffith, el cual determina que la energía de fractura ideal (Γ_{COH}) es dos veces la energía superficial (Γ_{sup}).

$$\Gamma_{COH} = 2 * \Gamma_{sup} \quad \text{(Ec. 2)}$$

Teniendo en cuenta que estas energías se relacionan con el tamaño de grano de los materiales se analiza la energía del límite de grano (Γ_{GB}) que se define de la misma manera que la energía superficial, pero esta depende de la orientación relativa de los granos adyacentes:

$$\Gamma_{GB} = \frac{\sum \Delta E_I}{A_I}(GB) \quad \text{(Ec. 3)}$$

Debido a que ya se tiene dos granos A y B, el análisis de la energía de cohesión del límite de grano $\Gamma_{COH}(GB)$ toma en cuenta la energía superficial para los dos granos más la energía del límite de grano.

$$\Gamma_{COH}(GB) =* \Gamma_{\text{sup}\, grano\ A} + \Gamma_{\text{sup}\, grano\ b} - \Gamma_{GB} \quad \text{(Ec. 4)}$$

Todas las energías anteriores (superficial y cohesión) dependen básicamente de los átomos y los límites de grano por lo que para determinar la energía de adhesión se analiza la energía de interface $\Gamma_{interfase}$, para dos materiales A y B:
La energía interfacial entre dos materiales (A y B) es la misma que la energía del límite del grano, excepto que hay dos estados de referencia:

$$\Gamma_{interfase} = \frac{\sum \Delta E_I(A) + \sum \Delta E_J(B)}{A} \quad \text{(Ec. 5)}$$

Finalmente se puede definir la energía de adhesión ideal $\Gamma_{adhesion}(GB)$, la cual es similar a la cohesión del límite de grano $\Gamma_{COH}(GB)$ y es la diferencia entre las energías interfaciales de las dos superficies.

$$\Gamma_{adhesion}(GB) = \Gamma_{\text{sup}\ A} + \Gamma_{\text{sup}\ B} - \Gamma_{A/B} \quad \text{(Ec. 6)}$$

La ecuación de energía de adhesión se utiliza para caracterizar materiales, utilizando métodos de análisis numérico a nivel atómico permitiendo describir las propiedades de muchos metales o compuestos y sus interacciones con impurezas (The American Society for Metals, 1993).

Descripción del proceso de soldadura

El método de soldadura por fricción (FRW, por sus siglas en inglés Friction Welding), realiza la soldadura de dos materiales en estado sólido, este tipo de unión logra mezclar los materiales base sin que exista fusión, la unión se da sólo por el rozamiento de una

pieza móvil respecto a una fija, la generación de calor y presión provoca el desplazamiento plástico de los materiales, el metal más suave, tenderá a desplazar mayor cantidad de metal que el de mayor dureza. Sin embargo, se requiere un bajo porcentaje de mezcla metálica para lograr una buena unión. Este tipo de soldadura es un proceso que no requiere de gases de protección, de material de aporte y es fácilmente automatizable, se lo emplea para realizar juntas de materiales cuya geometría es de revolución.

Las propiedades mecánicas que entrega este proceso son buenas, además que esta tecnología es esencialmente amigable con el medio ambiente, ya que en la soldadura no se maneja radiación, chispa o emisión de gases contaminantes.

El proceso de soldadura por fricción (FRW) se utiliza para unir materiales que presentan dificultades de ser unidos mediante una soldadura por fusión. Dentro del proceso de soldadura FRW hay parámetros importantes que se deben controlar como son: velocidad de rotación, tiempo en la etapa de calentamiento, presión de forja y la precarga que se aplique, con el control de dichos parámetros se logra garantizar una unión de calidad (Cordero, Rodríguez, & Piña, 2012).

Pese a que la unión que se obtiene por el proceso FRW es aceptable, dependiendo del régimen de trabajo o el nivel de esfuerzos a los que va estar sometida la soldadura, se puede mejorar las propiedades mecánicas de la junta al realizar tratamientos térmicos (difusión).

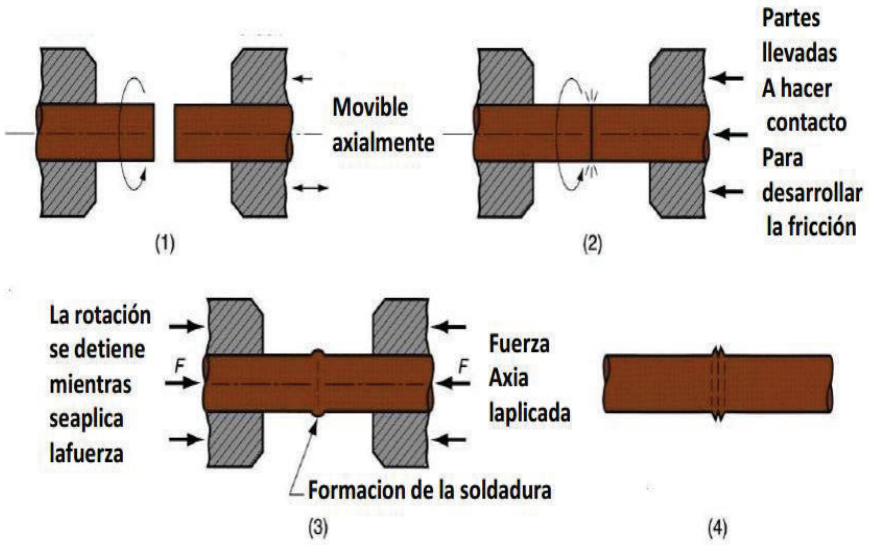


Figura 1.5. Soldadura por fricción (FRW): (1) Mandril rotando, sin contacto; (2) partes presionadas para que entren en contacto para generar calor por fricción; (3) la rotación se detiene y se aplica la presión de forja; y (4) se forma la soldadura
(Aguilar, 2013)

Clasificación de la soldadura FRW

En todas las operaciones de FRW, se usa la rotación como principio básico para desarrollar el calor necesario para el proceso de unión, existen dos sistemas que distinguen claramente a la soldadura FRW.

Soldadura de fricción por conducción continua

En este tipo de soldadura una de las probetas lleva una velocidad de rotación constante y posteriormente se la pone en contacto con otra probeta estacionaria con un cierto nivel de fuerza para que se genere calor por fricción en la interface, cuando alcanza la temperatura de trabajo adecuada se frena la rotación en forma abrupta y al mismo tiempo se juntan las partes a presiones de forja (Groover, 1997). Se puede observar este tipo de máquina FRW en la Figura 1.6.

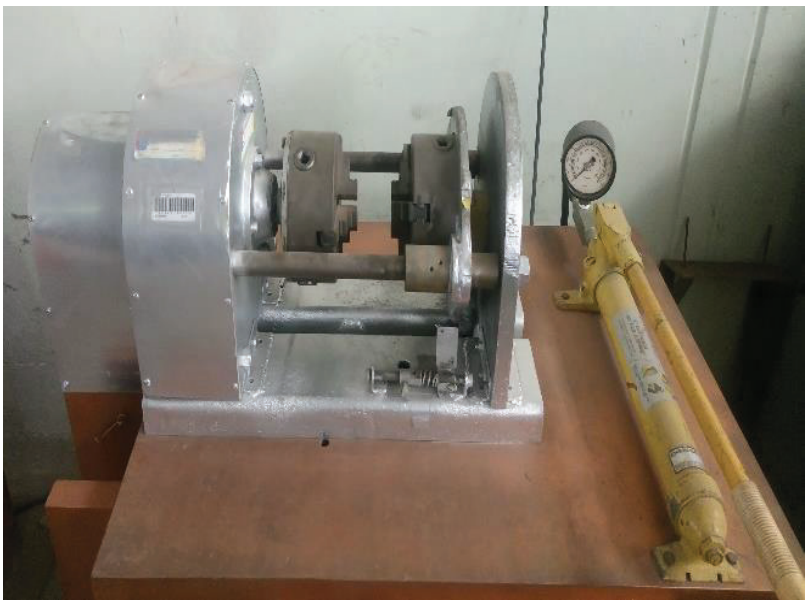


Figura 1.6. Máquina para soldadura por fricción continua
(Fuente: Propia)

Soldadura de fricción por inercia

En este tipo de soldadura la parte rotatoria se conecta a un volante el cual llega a acelerarse a una velocidad determinada, se desconecta el volante del motor de conducción y se presionan las partes a soldarse, la energía cinemática almacenada en el volante se disipa en forma de calor por fricción para producir la coalescencia de las superficies. El principio de soldadura FRW por inercia se puede observar en la Figura 1.7.

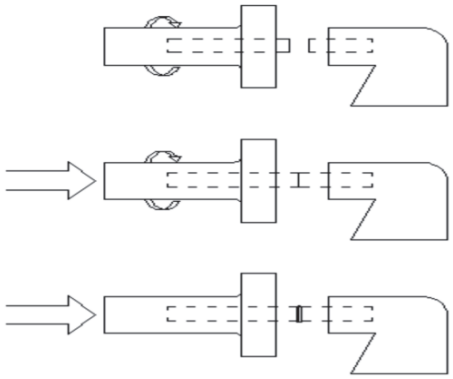


Figura 1.7. Principio de Funcionamiento FRW con inercia
(Hould , 1998)

Velocidad de rotación. (V_R)

Es una propiedad importante para determinar el calor de las capas en desgaste por rozamiento de los dos materiales a soldarse, pero además es la que menos influye en la calidad de la unión.

En una soldadura con velocidades muy bajas se produce una extracción de partículas muy profundas, en cambio en una soldadura con velocidades muy elevadas se genera un efecto de limpiado en las superficies en contacto (desgaste de una capa superficial muy delgada). Como consecuencia del uso de velocidades relativamente bajas es el alto consumo de potencia, y viceversa para el uso de velocidades altas baja el consumo de potencia. Con esas primicias se determina que el uso de una velocidad moderada es lo ideal.

Presión de calentamiento. (P_C)

Es la presión que se genera al aplicar una fuerza precargada sobre las superficies de los elementos a soldarse. Por experimentación se determina que para obtener una soldadura de calidad mediante este proceso se necesita dos niveles de presión, una presión relativamente baja para generar el rozamiento entre las caras de los materiales a soldarse y generar el calor necesario antes de la forja, y una secundaria más elevada (presión de forja, Pf) para generar el encogimiento axial de los materiales para obtener así la soldadura, esta presión es aplicada inmediatamente después del frenado. Con esta presión de calentamiento se logra alcanzar un estado de plasticidad en las caras de las muestras por efecto de la fricción y elevación de temperatura donde la resistencia a la fluencia en cada una de las zonas afectadas es más baja.

Presión de forja. (P_f)

Esta presión se aplica al terminar la rotación debido al frenado que se genera con el pedal, con el fin de lograr la unión de los materiales, de esta presión depende la calidad de la unión, debido a que si ésta presión es baja no se logra una coalescencia entre los materiales y la unión se vuelve frágil, al contrario si este valor de presión es muy alto generará un exceso de material que sale de la soldadura en forma de rebaba aumentado el encogimiento axial.

Encogimiento axial. (X)

Por medio de la presión de forja que se aplica, se forma el encogimiento axial y la formación de las rebabas hacia el exterior de la junta a tope, en las rebabas es el lugar donde se encuentra los asentamientos de impurezas y recubrimientos de las superficies en contacto. Así se garantiza que no haya defectos en la soldadura y exista un adecuado contacto entre las caras a soldarse a nivel atómico. Es importante tener en cuenta este valor de encogimiento para obtener piezas con las dimensiones requeridas ya que se pierde material y se reduce el tamaño de las muestras.

Tiempo de calentamiento. (t_c)

Este tiempo se determina por pruebas o experiencias previas, porque el uso excesivo del tiempo de calentamiento dentro de una producción, baja el rendimiento de la empresa, genera pérdida de tiempo y de recursos; cuando se tiene un tiempo de calentamiento relativamente corto para un determinado material o materiales (soldadura de materiales disimiles) se forman zonas dentro de la soldadura que no se sueldan y puede además quedar atrapados óxidos. Las variables que más influyen en el tiempo de calentamiento son: el encogimiento axial, así como el diámetro de las piezas o áreas en contacto.

Tiempo de frenado. (t_f)

El tiempo de frenado es un valor instantáneo, aproximadamente varia de 1 a 3 segundos, mismo que depende de los diámetros de los materiales base, el estado del conjunto de frenado de la maquina soldadora y de la sensibilidad del operador. .

Tiempo de forjado. (t_{fo})

El tiempo de forjado no es de gran interés ya que su duración se resume al tiempo que tarda en realizar el encogimiento axial en los materiales a soldar después de la aplicación de la presión de forja que es de aproximadamente menor a 5 segundos (Almeida, 1989).

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales y equipos a utilizarse

Para la obtención y maquinado del material base, soldadura y realización de los distintos ensayos de la soldadura se utiliza máquinas y equipos de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica: Laboratorio de Máquinas y Herramientas, Laboratorio de Soldadura y Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla.

Equipos para la soldadura por fricción de impulsión directa

La gran mayoría de soldaduras de materiales disímiles por fricción son producidas relativamente por su bajo precio, y otras son empleadas por la complicación que presenta el unir materiales de distinta naturaleza. En la Tabla 2.1, muestra los parámetros para realizar la soldadura por fricción con volante de inercia, en materiales disímiles o que presentan dificultad para ser soldados por métodos convencionales (soldadura por fusión).

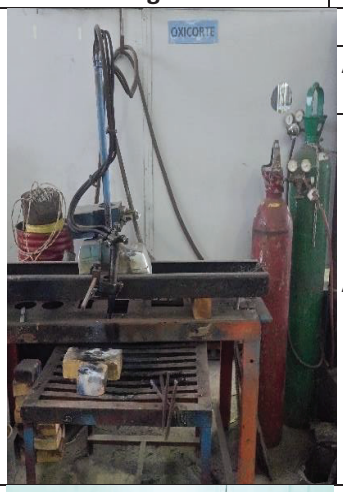
Tabla 2.1. Parámetros para soldar por el método de fricción con volante de inercia para materiales disímiles con un Φ de 25mm (1in)

Metal de trabajo	Velocidad de rotación RPM	Fuerza Axial		Tamaño volante de inercia		Energía de soldadura		Material perdido		Tiempo total
		KN	lbfx10^3	Kg. M^2	Lb. ft^2	KJ	lbf:ftx10^3	mm	in	s
Cobre-acero 1018	8000	22	5	0,06	1,4	20	15	3,8	0,15	1,0
Acero rápido M2-acero1045	3000	180	40	1,14	27,0	54	40	2,5	0,1	3,0
Aleación de níquel 718-acero 1045	1500	180	40	5,48	130,0	68	50	3,8	0,15	2,5
Inoxidable tipo 302-acero1020	3000	80	18	0,84	20,0	41	30	2,5	0,1	2,5
Acero sinterizado alto carbono-acero1018	4600	53	12	0,35	8,3	41	30	2,5	0,1	2,5
Aluminio 6061-inoxidable tipo 302	5500	22	5	0,16	3,9	27	20	5,1	0,2	3,0
Cobre-aleación de aluminio 1100	2000	33	7,5	0,46	11,0	10	7,5	5,1	0,2	1,0

(The American Society for Metals, 1993)

La soldadura de las varillas de cobre electrolítico y aluminio 6063-T5 por fricción, se realiza con la máquina de soldadura por fricción de torque o velocidad continua que se encuentra disponible en el laboratorio de soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica. En el mismo laboratorio se encuentran los tanques e implementos de la máquina de soldadura oxiacetilénica, en la que se realiza el calentamiento previo de las barras de cobre. El detalle de las especificaciones de las máquinas se muestra a continuación:

Tabla 2.2. Equipos para el proceso de soldadura

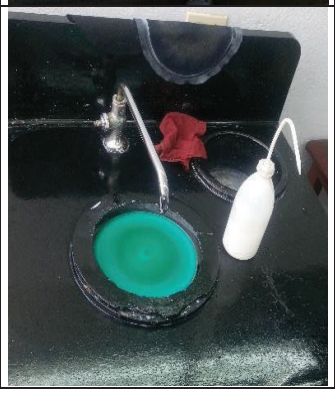
#	Proceso	Figura	Equipo	Características	
1	OAW		Oxiacetilénica		
			Acumulador de O_2	**Presión Psi**	2000
			Acumulador de C_2H_2	**Presión Psi**	260
2	FRW		Bomba hidráulica	**Presión**	1000 lb
			Motor	**RPM**	2500;3100;4200;4900

(Fuente: Propia)

Equipos para realizar ensayos y metalografías

En el ensayo de tracción no se utiliza ninguna norma para la obtención de probetas, debido a que la soldadura resiste cargas bajas. Para las metalografías se utiliza la norma ASTM E3 que da los parámetros para la obtención de probetas para análisis metalográfico. Los equipos utilizados para las metalografías se detallan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Equipos para metalografías y ensayos de tracción

Número	Proceso	Figura	Equipo	Características	
1	Desbastado grueso		Máquina de desbaste	Potencia HP.	1
2	Desbastado fino		Mesa de desbaste fino	Capacidad # lijas	4
3	Pulido		Máquina de Pulido	Potencia HP.	1

4	Revisión Metalográfica		Microscopio Olympus	Serie	GX41
5	Medición de microdurezas		Duroline metkon	Carga Máxima Kg.	1
6	Ensayo de Tracción		Máquina de ensayos Tinius-Olsen	Carga Máxima Tn.	60

(Fuente: Propia)

2.2. Extracción y preparación de las probetas para la soldadura

En la selección de las longitudes de las probetas a ensayar se opta por facilidad de montaje y desmontaje, probetas con una longitud aproximada de 90 mm, y un diámetro de 12.7 mm. Estas dimensiones son consideradas tanto para las varillas de aluminio y cobre, como se muestran en la Figura 2.1.

Figura 2.1. Corte de probetas
(Fuente: Propia)

Las varillas redondas de cobre y aluminio son cortadas con una sierra de mano, resultando con un acabado poco uniforme en la sección transversal de las probetas. Posteriormente las probetas son refrentadas (ver Figura 2.2) en ambos extremos, para garantizar que las superficies en contacto sean en lo posible paralelas y el rozamiento a nivel superficial entre las probetas sea maximizado.

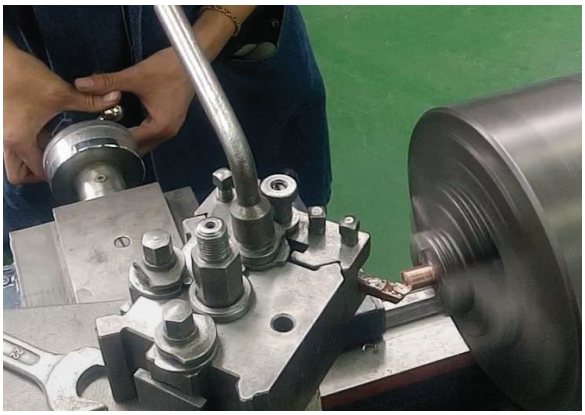


Figura 2.2. Refrentado de probetas
(Fuente: Propia)

Debido al refrentado, las probetas cambiaron sus dimensiones longitudinales disminuyendo en alrededor de 3 a 8 milímetros, estas dimensiones dependen del grado de irregularidad que se obtuvo al realizar el corte a mano. Sus denominaciones, dimensiones y los ensayos que se realizan a cada una de las probetas se detallan en la Tabla 2.4.

Soldar materiales disímiles es muy difícil con métodos convencionales (fusión), por la diferencia en las propiedades químicas, físicas y mecánicas que poseen los materiales. Para materiales disímiles es recomendable realizar una soldadura en frío, para que una unión se realice en frío es fundamental que el calor utilizado para soldar no exceda entre el 80 y 90% de la temperatura de fusión (Temperatura de trabajo en caliente) de los materiales bases. En el caso particular de la soldadura de aluminio y cobre se considera la temperatura de fusión de la varilla de aluminio de 660°C como referente, porque es menor a la temperatura de fusión del cobre (1083°C). La ASM International (American Society for Metals) especifica que la temperatura de rotura para la varilla de aluminio es de 400 a 540°C (temperatura de forja o trabajo en caliente) y de la aleación de cobre de 650° en adelante hasta llegar al punto de fusión.

Debido a estas consideraciones en el presente trabajo se elige como temperatura limite la de 415°C para garantizar que el estudio se centre en una soldadura en frio por FRW.

La soldadura por el método de FWR, es un proceso experimental en el que los valores (precalentamiento, encogimiento, entre otros) y consideración de variables (presión de calentamiento, de forja, tiempo de frenado, revoluciones, etc) se las realiza por recomendaciones o por valores experimentales.

Debido a la falta de información referente a las temperaturas de calentamiento, se opta por realizar muestras en probetas soldadas sin calentamiento en la varilla de cobre, calentando a 210°C la aleación de cobre, porque es la temperatura que (Ouyang, Yarrapareddy, & Kovacevic, 2006) recomiendan para el alivio de esfuerzos en el cobre, calentar a 310°C la varilla de cobre por ser un valor intermedio aproximado entre 210°C - 415°C; y finalmente calentar la varilla de cobre a 415°C para no exceder el límite de trabajo en frio para el cobre y especialmente a la aleación de aluminio (ASM International, 2008).

Siendo este estudio de carácter experimental se procede a realizar análisis de prueba y error a las primeras probetas que se soldaron en frio, al recibir un golpe o caída la soldadura se separaba mientras que para las temperaturas de 210 °C, 310°C y 415°C se realiza un análisis previo mediante micrografías que corroboran que la mejor temperatura de precalentamiento de la varilla de cobre es 210°C.

Tabla 2.4. Dimensiones, codificación de probetas y detalle del proceso

#	Código	Longitud inicial aluminio. Lo(Al) cm	Longitud inicial cobre. Lo(Cu) cm	Aplicación:	Proceso
0	0A-0C	9,1	8,7	Calibración	Soldadura por fricción sin calentamiento previo.
1	1A-1C	8,6	8,7	Calibración	Soldadura por fricción sin calentamiento previo.
2	2A-2C	8,7	8,8	Metalografía	Soldadura por fricción sin calentamiento previo.
3	3A-3C	8,7	8,7	Ensayo de tracción	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
4	4A-3C	8,7	8,7	Metalografía	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
5	5A-4C	8,7	6,7	Metalografía	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 310°C
6	6A-6C	8,8	7,5	Inspección visual	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 415°C
7	7A-7C	9,2	8,7	Metalografía	Soldadura por fricción sin calentamiento previo.
8	8A-8C	8,7	8,8	Ensayo de tracción	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
9	9A-9C	8,5	8,8	Ensayo de tracción	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
10	10A-10C	8,8	8,9	Ensayo de tracción	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
11	11A-11C	8,7	8,6	Metalografía	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
12	12A-12C	8,7	8,9	Ensayo de tracción	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
13	13A-13C	8	8,8	Ensayo de tracción	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
14	14A-14C	8,6	8,7	Ensayo de tracción	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
15	15A-15C	8,5	8,7	Metalografía	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
16	16A-16C	8,5	8,6	Ensayo de tracción	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
17	17A-17C	8,8	8,7	Metalografía	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C
18	18A-18C	8,5	8,6	Metalografía	Soldadura por fricción con calentamiento previo a 210°C

(Fuente: Propia)

2.3. Proceso experimental de soldadura

Soldadura FRW sin calentamiento previo

Se considera las recomendaciones detalladas por Almeida (1989), quien compara diferentes procesos y variables para soldar materiales disímiles en la que concluye que se debe considerar las variables que influyen en el material de menor dureza; y una de estas variables constituye la velocidad de rotación, que para materiales suaves como el aluminio es de 1300 RPM, la misma que se toma como valor referencial para la unión de Cobre-Aluminio.

Por parámetros de diseño de la máquina de soldadura FRW (friction welding), el autor Arguello (1987) permite relacionar diferentes poleas mediante una banda para obtener distintas RPM siendo 2500 RPM la velocidad más baja, en la Tabla 2.2 se encuentran detalladas las diferentes velocidades que se pueden obtener. Se realiza un nuevo cálculo de la relación de poleas para adaptar una nueva polea que permita reducir la velocidad a 1300 RPM, como recomienda Almeida (1989).

Por este motivo se emplea la siguiente ecuación (Budynas & Keith, 2012):

$$N_1 * D_1 = N_2 * D_2 \qquad \text{(ec. 7)}$$

Donde:

N_1, Velocidad angular en la polea motriz

D_1, Diámetro de la polea motriz.

N_2, Velocidad angular de la polea conducida

D_2, Diámetro de la polea conducida

Reemplazando los valores iniciales propios de la máquina, N_2 = 2500[RPM], D_2 = 5[in] y D_1 = 3[in], se determina la velocidad angular en la polea inferior sujeta al eje motriz.

$$N_1 = \frac{5"*2500\text{RPM}}{3"}$$

$$N_1 = 4166{,}6\ RPM$$

Con el valor de las revoluciones N_1 en la polea inferior, la ecuación (7) y la velocidad angular requerida de 1300 RPM se obtiene el diámetro de polea a usarse.

$$4166.6 * 5" = D_2 * 1300RPM$$

$$D_2 = 16.02" \approx 16"$$

A partir de este resultado se procede a realizar el montaje de una polea de 16 in (ver Figura 2.3.) en el eje superior conducido.

Figura 2.3. Adaptación de la polea a la máquina FRW
(Fuente: Propia)

Para la selección de la banda se procede a tomar la medida del contorno de las dos poleas ya montadas en la máquina, dando una longitud de perímetro de 187 cm.

Tabla 2.5. Dimensiones de bandas estandarizadas

Sección de la banda	Ancho (a), in	Espesor (b), in	Diámetro mínimo de polea, in	Intervalo de potencias hp, una o más bandas.
A	½	$^{11}/_{32}$	3,0	$^{1}/_{4}$ - 10
B	$^{21}/_{32}$	$^{7}/_{16}$	5,4	1-25
C	$^{7}/_{8}$	$^{17}/_{32}$	9,0	15-100
D	$1\,^{1}/_{4}$	$^{3}/_{4}$	13,0	50-250
E	$1\,^{1}/_{2}$	1	21,6	100 y mayores

(Budynas & Keith, 2012)

Basándose en las especificaciones y las condiciones funcionales de la máquina (motor 5Hp). Se selecciona una banda de sección A.

Los valores normados para las longitudes de las bandas en V se especifican en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Longitud de la banda en “V” in

Sección	Circunferencia in
A	26, 31 33, 35, 38, 42, 46, 48,51, 53, 55, 57, 60, 62, 64, 66, 68, 71, 73, 75, 78, 80, 85, 90, 96, 105, 112, 120, 128
B	35, 38, 42, 46, 48, 51, 53, 55, 57, 60, 62, 64, 65, 66, 68, 71, 75, 78, 79, 81, 83, 85, 90, 93, 97, 100, 103, 105, 112, 120, 128, 131, 136, 144, 158, 173, 180, 195, 210, 240, 270, 300

(Budynas & Keith, 2012)

Las poleas empleadas son normalizadas y cumplen con las dimensiones detalladas en la Tabla 2.5 respecto a “a” y “b” (ver Figura 2.4). Con la longitud del perímetro obtenido de 187 cm (73,62 in) se optó por una banda de 73 in.

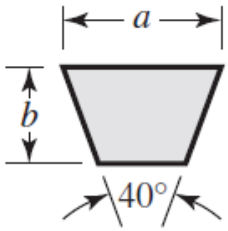


Figura 2.4. Secciones de bandas en V estandar
(Budynas & Keith, 2012)

La banda en V usada para bajar las revoluciones de la máquina para soldar por el método FRW tiene una denominación A-73.

Respecto a la carga de calentamiento y forja, se considera las recomendaciones expuestas por los autores de la máquina Arguello y Paredes (1987), quienes indican que la carga de calentamiento debe ser de 600 Kgf para soldar probetas de aluminio (Arguello & Paredes , 1987).

Para el tiempo de calentamiento se considera los resultados obtenidos por la experimentación, donde 21 segundos expuestos a dicha carga arrojó los mejores acabados superficiales y la formación aceptable de rebabas, lo que garantiza un adecuado proceso de unión.

Las probetas refrentadas fueron colocadas en la máquina soldadora FRW, la varilla de cobre en el mandril móvil y la varilla de aluminio en el mandril fijo, experimentalmente se observa que los mejores resultados se obtienen al hacer girar la probeta de cobre y mantener fija la de aluminio.

Cuando arranca el equipo se da una carga inicial de 400 kgf, después de 8 segundos se da una carga de 600 kgf. A medida que se aplica la carga, el manómetro empieza a tener un decrecimiento en la carga debido a la deformación que sufre el aluminio al estar calentándose debido a la fricción generada por el contacto con el cobre; por este motivo se aplica después de 10 segundos otra carga de 600 kgf para posteriormente realizar el frenado y aplicar la presión de 600 kgf de forja que genera el encogimiento axial final de las dos varillas soldadas.

Soldadura FRW con calentamiento previo a 210°C, 310°C y 415ºC

Para realizar la soldadura FRW con calentamiento previo, se consideran las variables anteriormente mencionadas en la soldadura sin calentamiento, con la diferencia que la probeta de cobre es calentada con llama oxiacetilénica, controlando la temperatura con un pirómetro, hasta llegar a la temperatura deseada de 210°C, ya que el control se lo realiza de manera manual y con la apreciación humana esta temperatura es tentativa, ya que se obtuvieron valores hasta de 215°C. Después de calentar las probetas, se traslada los elementos a la máquina de soldadura ubicada a dos metros del banco de oxicorte.

Para los ensayos a realizarse con temperaturas de 310 y 415°C, se sigue el mismo procedimiento pero con un aumento gradual de la temperatura, manipulando la cantidad de oxígeno y acetileno en el banco de oxicorte, y controlando la temperatura con un pirómetro hasta llegar a la temperatura deseada.

2.4. Ensayo de tracción y metalografías

Ensayo de tracción

La resistencia última a la tracción es una propiedad física que posee cada material, en este estudio se busca conocer la cantidad de esfuerzo que soporta la soldadura de Cobre-Aluminio, cuando se encuentra sometida a una carga de esfuerzo continua, los datos obtenidos que nos permite conocer de manera experimental la máquina de ensayos universales del LAEV de la Facultad de Ingeniería Mecánica, permitirán realizar la gráfica Esfuerzo vs. Deformación. Este tipo de ensayos se realizan bajo la norma ASTM E8 la cual determina la forma y tamaño de la probeta a ser ensayada, así como la velocidad con la que se aplica la carga, se opta por utilizar una velocidad de 0,05 mm/s la cual se utiliza para uniones de materiales con baja soldabilidad (American Society of Testing Metals , 2016), adicionalmente la máquina de ensayos universal que posee el laboratorio es calibrada bajo la norma ASTM E4 que garantiza los procesos y resultados (American Society for Testing Metals, 2016).

Las probetas no poseen entalle , debido a que se puede propagar las imperfecciones que se presentan en la unión arrojando así un dato erróneo sin embargo se tornea las rebabas presentes en la soldadura dejando un diámetro similar al de los matariles base para realizar el ensayo.

Figura 2.5. Ensayo deTracción
(Fuente: Propia)

Metalografías

El examen estructural de la soldadura por vía metalografía es uno de los procedimientos principales que se utiliza para la investigación y caracterización de la soldadura, para la realización de las micrografías se utiliza reactivos químicos que permiten revelar los constituyentes metalográficos, la estructura de los metales y sus aleaciones, que se encuentran en forma de una solución sólida homogénea o compuesto intermetálico de composición química definida. De dichos constituyentes dependen las propiedades de la aleación.

Para iniciar el análisis metalográfico se determina la zona de interés la cual debe ser representativa en relación al fenómeno que se va a estudiar, teniendo en cuenta la forma, función y origen del material. Para ello se debe obtener una superficie perfectamente plana y pulida, la cual permite llegar a conclusiones siguiendo adecuadamente las técnicas de la metalografía. El uso de normas, recomienda variables (reactivos químicos, aumentos ópticos, entre otros) para una adecuada interpretación de las micrografías en el área de estudio.

Este proceso metalográfico nos revelará tanto la estructura interna, las deformaciones generadas, elementos extraños, relieves o daños térmicos producidos durante el proceso de soldadura.

Selección y extracción

La selección adecuada de la ubicación de la muestra y la orientación de la misma reducirá al mínimo el número de muestras requeridas y por ende simplificará su interpretación. Es necesario cortar las probetas en una forma determinada para obtener superficies planas con la menor deformación posible, un factor a tomar en cuenta es la

temperatura generada por el corte, la cual debe controlarse mediante un líquido refrigerante y lubricante debido a que las altas temperaturas puede modificar la estructura original. Las secciones transversales de las probetas son las más adecuadas para revelar información tal como: variaciones de la estructura en el centro de la probeta, distribución de impurezas, profundidad de imperfecciones, profundidad de corrosión, grado de deformación plástica, coalescencia de materiales, etc. Para la obtención de las muestras metalográficas se utiliza la norma ASTM-E3 (American Society for Testing Materials, 2011).

Figura 2.6. Selección y corte de probetas
(Fuente: Propia)

Desbastado grueso

El objetivo del desbastado grueso es la eliminación de las deformaciones obtenidas en el corte de la probeta y lograr un plano liso para las siguientes etapas en la preparación de muestras, se utiliza una lija de grano grueso (80) adherida al disco giratorio de la máquina de desbaste para la remoción de partículas (ver Figura 2.7.), durante este proceso se utiliza agua, la misma que tiene por objetivo refrigerar y barrer partículas de material desprendido y los residuos del abrasivo, para obtener una superficie plana y uniforme.

Figura 2.7. Desbaste grueso
(Fuente: Propia)

Montaje de Probetas

El montaje de probetas, es un procedimiento que se realiza para mejorar la manipulación de muestras que tiene dimensiones pequeñas, por lo que se realiza una mezcla de resina, la cual es posteriormente depositada sobre la probeta que fue preparada previamente dentro de un molde, la resina tarda un tiempo en secarse, una vez seca, la probeta se encuentra lista para el desbaste fino. Las probetas montadas en resina se observan en la Figura 2.8.

Figura 2.8. Montaje de las probetas en resina
(Fuente: Propia)

Desbaste fino

El desbaste se lo realiza en una mesa que posee cuatro ranuras en las cuales se coloca papel abrasivo (lijas) de diferente tamaño de grano (200, 320, 400, 600, 1000,1200), las cuales tiene como objetivo ir eliminando los rayones de los procedimientos previos, la probeta durante el pulido se gira 90 grados, para lograr una superficie homogénea. Todo el proceso se lo realiza con la presencia de agua como refrigerante el cual corre por encima del papel abrasivo. La Figura 2.9 presenta el desbastado de la probeta.

Figura 2.9. Desbastado fino
(Fuente: Propia)

Pulido final

En esta etapa se utiliza abrasivos en polvo incrustadas en una superficie adecuadamente lubricada para eliminar de forma efectiva las líneas provocadas por el proceso de desbaste fino, el proceso se realiza en paños especiales (depende del material a ser pulido) colocados en platos giratorios. Para pulir las probetas de Cobre-Aluminio se utiliza inicialmente alúmina de 1µm suspendida en agua para eliminar la mayoría de los rayones en los materiales, finalmente se realiza un pulido sin el uso de abrasivos usando solo agua como refrigerante para la interacción entre el paño y los metales. Ver Figura 2.10.

Figura 2.10. Pulido Final
(Fuente: Propia)

Ataque Químico

Se removerá todo el material distorsionado durante los pasos previos al realizar el ataque químico, el ataque se lo realiza sumergiendo la muestra en una solución ácida o básica que ataca la superficie, para la determinación del reactivo se toma en consideración la Norma ASTM E 304 (macroataque) y la NORMA E 407 (microataque).

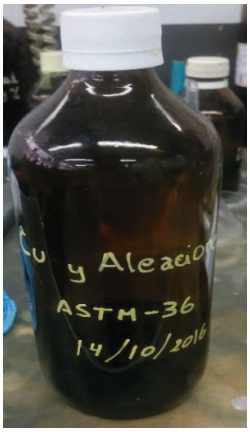


Figura 2.11. Compuesto para ataque químico de cobre y aluminio
(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS OBTENIDOS

3.1. Encogimiento axial posterior a la soldadura FRW

Previo a realizar la soldadura se toman medidas de longitud a cada una de las probetas, tras realizar la soldadura se vuelve a medir la longitud de los materiales ya soldados, conociendo así la longitud de encogimiento axial, los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Encogimiento axial de las probetas soldadas por FRW

#	Id.	Longitud inicial aluminio. Lo(Al) cm	Longitud inicial cobre. Lo(Cu) cm	Longitud inicial total. Al-Cu cm	Longitud final. Al-Cu cm	Encogimiento Axial cm
0	0A-0C	9,1	8,7	17,8	17,2	0,6
1	1A-1C	8,6	8,7	17,3	17	0,3
2	2A-2C	8,7	8,8	17,5	16,8	0,7
3	3A-3C	8,7	8,7	17,4	16,3	1,1
4	4A-3C	8,7	8,7	17,4	16,6	0,8
5	5A-4C	8,7	6,7	15,4	14,5	0,9
6	6A-6C	8,8	7,5	16,3	15	1,3
7	7A-7C	9,2	8,7	17,9	17,2	0,7
8	8A-8C	8,7	8,8	17,5	16,2	1,3
9	9A-9C	8,5	8,8	17,3	16,1	1,2
10	10A-10C	8,8	8,9	17,7	16,3	1,4
11	11A-11C	8,7	8,6	17,3	16,2	1,1
12	12A-12C	8,7	8,9	17,6	16,1	1,5
13	13A-13C	8	8,8	16,8	15,9	0,9
14	14A-14C	8,6	8,7	17,3	16,1	1,2
15	15A-15C	8,5	8,7	17,2	16,2	1
16	16A-16C	8,5	8,6	17,1	16	1,1
17	17A-17C	8,8	8,7	17,5	16,6	0,9
18	18A-18C	8,5	8,6	17,1	16	1,1
					Promedio:	1

(Fuente: Propia)

3.2. Ensayo de tracción

Con el fin de caracterizar la soldadura FRW se realiza un ensayo de tracción de las probetas soldadas con una precalentamiento de 210 ^{o}C presentados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados de los valores de tracción de los materiales Cu-Al (precaletamiento a 210°C)

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	mm	lbf	N	Ksi	Mpa
8A-8C	13,92	3025	13456	12,82	88,42
9A-9C	13,06	3250	14457	15,65	107,92
10A-10C	13,48	2975	13233	13,45	92,73
14A-14C	13,66	3250	14457	14,31	98,65
12A-12C	13,89	1825	8118	7,77	53,57
13A-13C	13,68	1961	8723	8,61	59,35
3A-3C	13,80	2456	10925	10,59	73,04
16A-16C	13,74	2393	10645	10,41	71,79

(Fuente: Propia)

Gráficas del ensayo de tracción

El Laboratorio de Análisis de esfuerzos y vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica permitió que se realice videos de los últimos 4 ensayos de tracción de las probetas: 12A-12C, 13A-13C, 3A-3C y 16A-16C, para realizar las gráficas Esfuerzo vs. Deformación, las tablas de datos obtenidos del video para cada ensayo se detallan en el Anexo 1.

Probeta 3A-3C

En la Figura 3.1 se observa un incremento lineal de 1,09 Ksi hasta un valor máximo de 10,34 Ksi, este gráfico es típico de un material metálico.

Figura 3.1. Esfuerzo vs. Deformación 3A-3C
(Fuente: Propia)

Probeta 12A-12C

En la Figura 3.2 se observa una curva típica de un material dúctil, ésta probeta soporta cargas bajas, que incrementan hasta la carga de fractura de 7,79 Ksi.

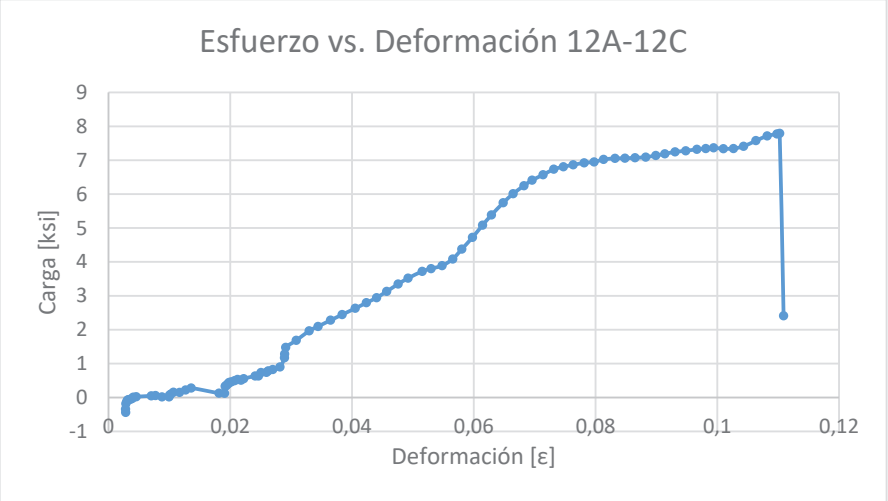


Figura 3.2. Esfuerzo vs. Deformación 12A-12C
(Fuente: Propia)

Probeta 13A-13C

En la Figura 3.3 se observa un incremento lineal de las cargas hasta llegar a la fractura con un esfuerzo de 8,55 Ksi.

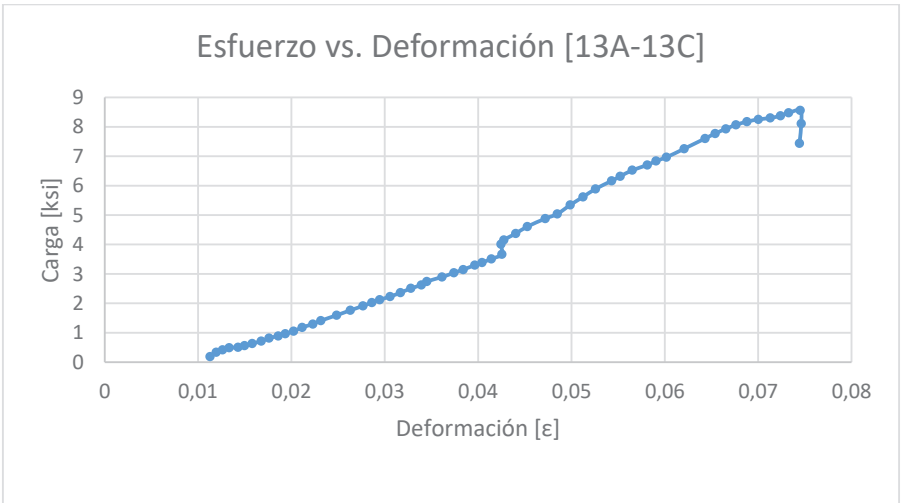


Figura 3.3. Esfuerzo vs. Deformación 13A-13C
(Fuente: Propia)

Probeta 16A-16C

En la Figura 3.4 se observa que la fractura se da cuando la carga es de 10,41 Ksi, tiene una curva característica a los materiales metálicos.

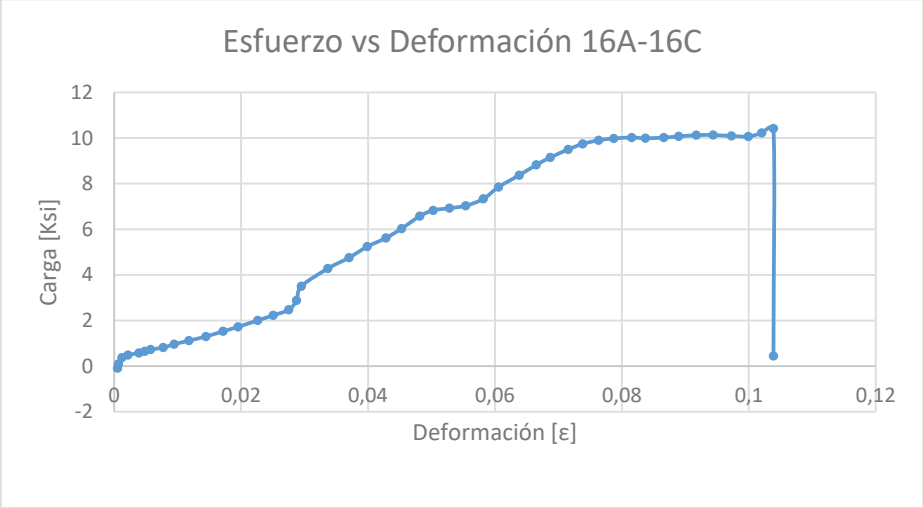


Figura 3.4. Esfuerzo vs. Deformación 16A-16C
(Fuente: Propia)

3.3. Metalografías

El estudio micro-estructural de la unión de materiales disímiles cumple un aspecto fundamental al caracterizar la soldadura, por lo que se da un mayor énfasis realizando varias micrografías a las diferentes probetas soldadas. Al realizar la soldadura sin calentamiento previo como primer paso se intenta calibrar la máquina y conocer de antemano que pasa con los materiales al unirlos y buscar una solución de cómo mejorar la soldadura. Para las probetas con calentamiento previo se realiza el mismo análisis metalográfico.

Micrografías de las probetas Cu-Al

En la Tabla 3.3 se detallan las diferentes observaciones que se obtuvieron al analizar cada una de las micrografías realizadas a todas las probetas, adicionalmente se puede conocer la temperatura de precalentamiento de la varilla de cobre, el aumento de cada micrografía y si la probeta fue atacada previamente o no.

Tabla 3.3. Características de las micrografías Cu-Al

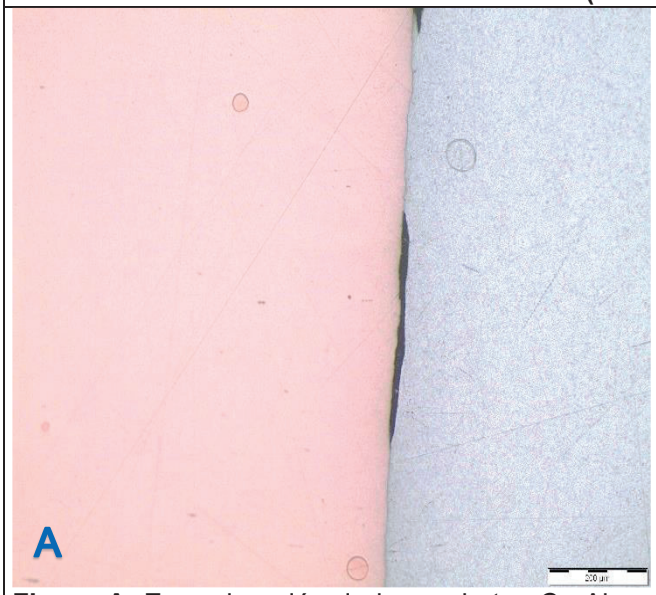
<table>
<tr><th colspan="2">Probeta 2A – 2C (sin calentamiento previo)</th></tr>
<tr><td> 

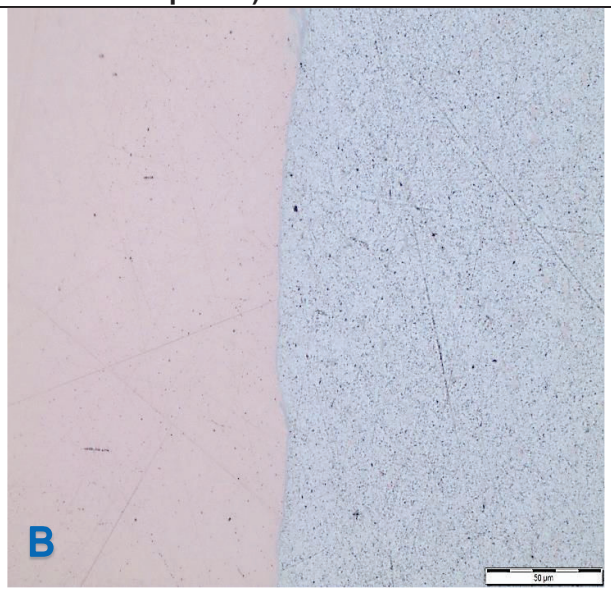
Figura A. Zona de unión de las probetas Cu-Al, se observa falta de coalescencia, micrografía con aumento de 100X y sin ataque químico.</td><td> 

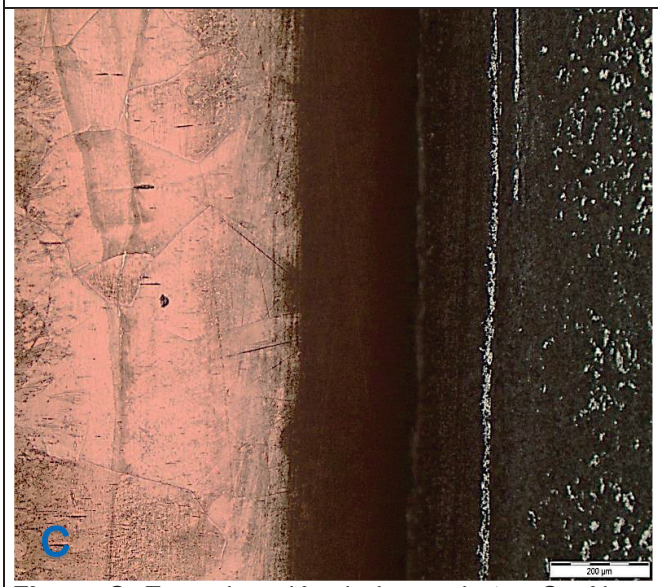
Figura B. Zona de unión de las probetas Cu-Al, se observa coalescencia parcial en diferentes zonas, micrografía con aumento 500X sin ataque químico.</td></tr>
<tr><td> 

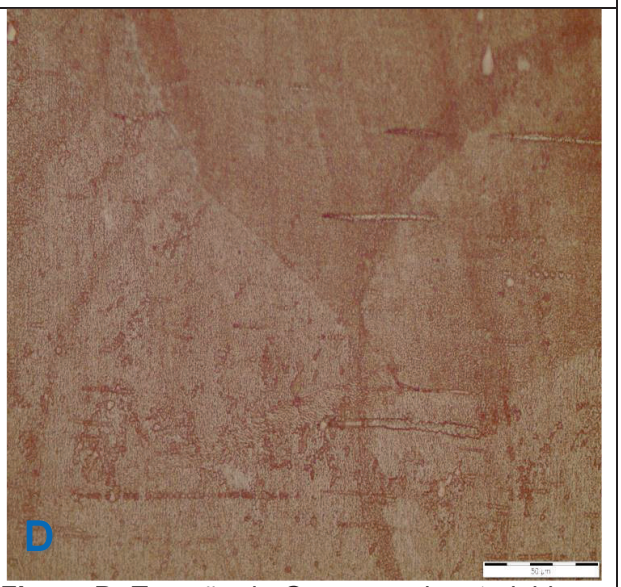
Figura C. Zona de unión de las probetas Cu-Al, se observa el tamaño de grano del cobre en la zona cercana a la unión, micrografía con aumento de 100X y con ataque químico.</td><td> 

Figura D. Tamaño de Grano en el material base (varilla de cobre), micrografía con aumento de 500X y con ataque químico.</td></tr>
</table>

Probeta 4A – 4C (calentamiento previo a 210 ºC)

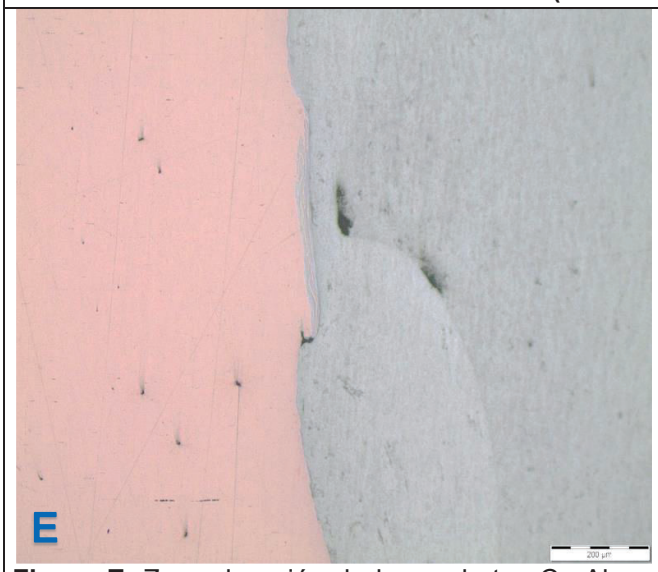


Figura E. Zona de unión de las probetas Cu-Al, se observa una mezcla de materiales en una pequeña zona, micrografía con aumento a 100X y sin ataque químico.

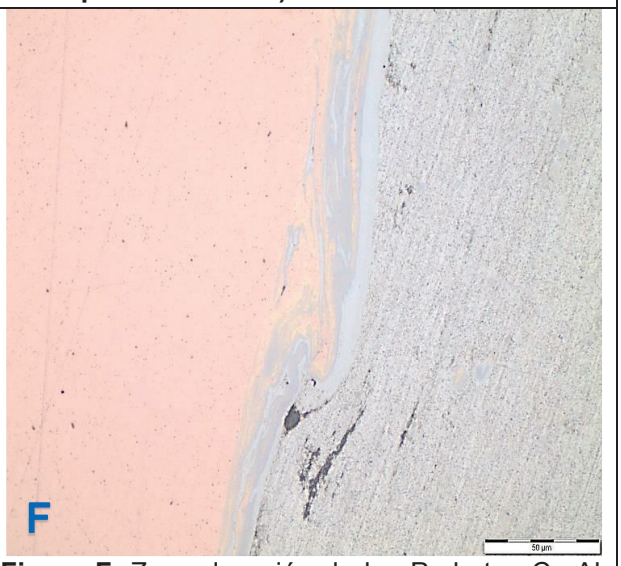


Figura F. Zona de unión de las Probetas Cu-Al, se observa la mezcla mecánica de aluminio y cobre, micrografía con aumento a 500X y sin ataque químico.

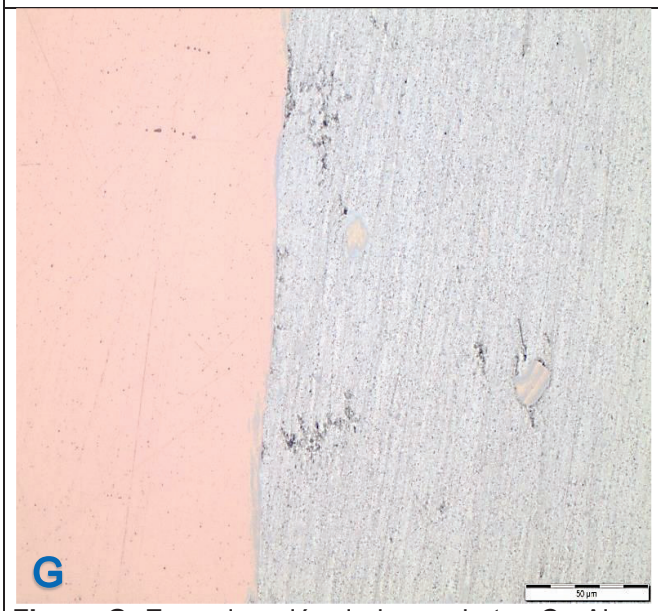


Figura G. Zona de unión de las probetas Cu-Al, se observa la presencia de una pequeña cantidad de cobre en el aluminio, micrografía con aumento de 500X y sin ataque químico.

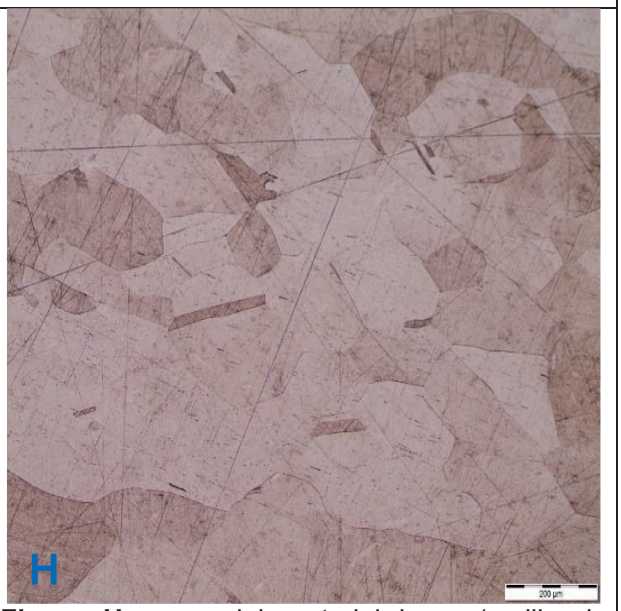


Figura H. zona del material base (varilla de cobre), se observa claramente los granos irregulares característicos del cobre, micrografía con aumento de 100X y con ataque químico.

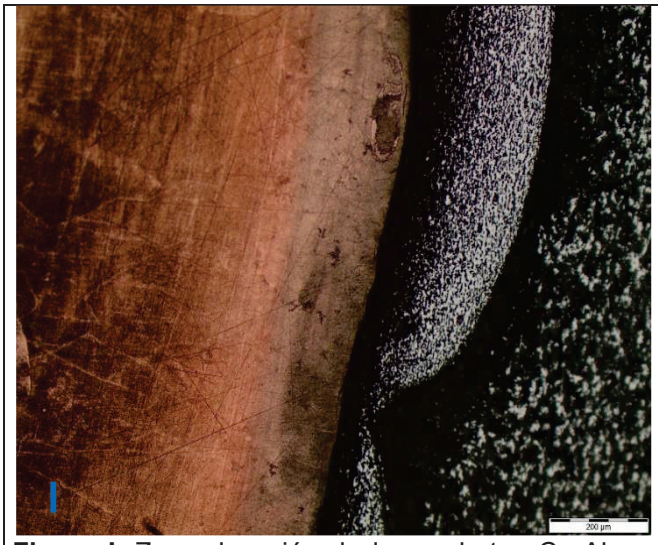


Figura I. Zona de unión de las probetas Cu-Al, se observa la zona afectada térmicamente con una coloración distinta, micrografía con aumento de 100X y con ataque químico.

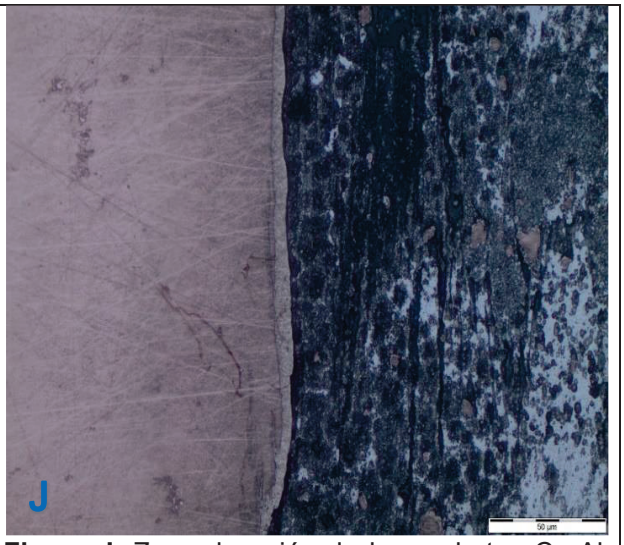


Figura J. Zona de unión de las probetas Cu-Al, se observa la zona termomecánica con una coloración distinta y de un espesor pequeño, micrografía con aumento de 500X y con ataque químico.

Probeta 5A – 5C (calentamiento previo a 310 ºC)

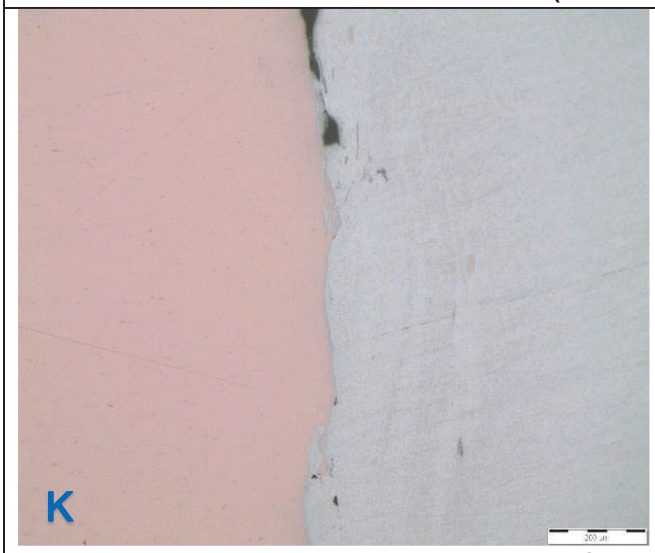


Figura K. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa falta de unión en la parte superior, zonas de coalescencia y fragmentos de cobre en el aluminio cerca a la unión, metalografía con aumento de 100X y sin ataque químico.

Figura L. Zona de unión de las probetas Cu-Al, se observa grietas en la unión, fragmentos de cobre en el aluminio y una zona de coalescencia muy pequeña, metalografía con aumento de 100X y sin ataque químico.

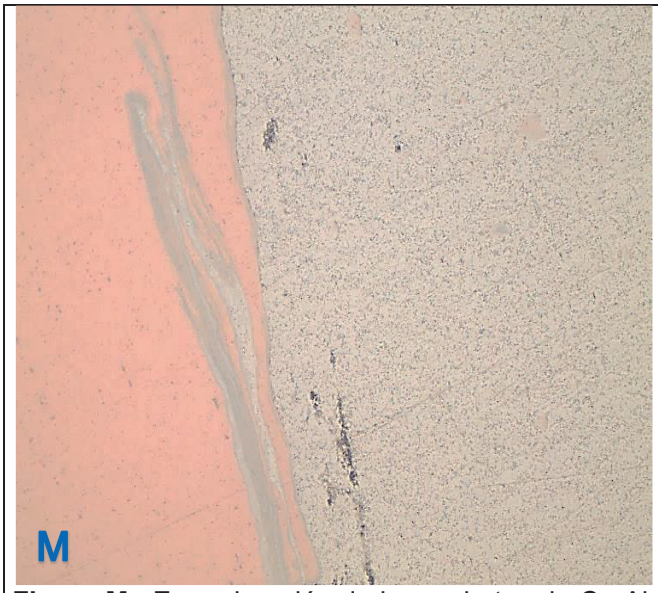


Figura M. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la coalescencia de los materiales en forma de filamentos, metalografía con aumento de 500X y sin ataque químico.

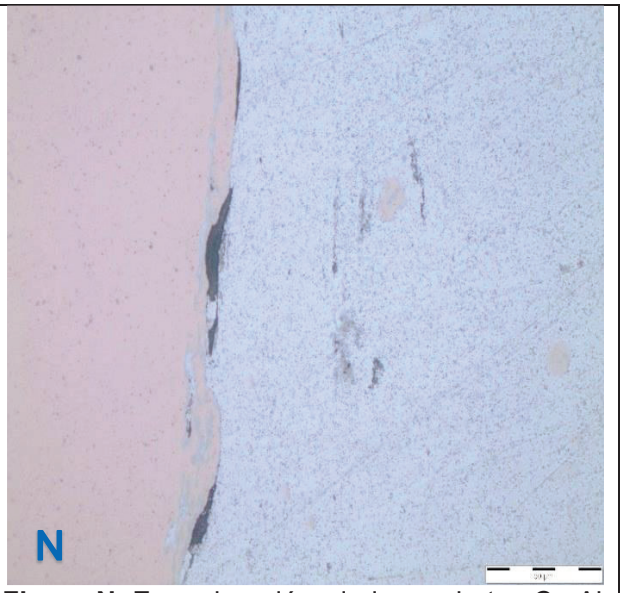


Figura N. Zona de unión de las probetas Cu-Al, se observa fragmentos de cobre en el aluminio, grietas en la unión y coalescencia de materiales, micrografía con aumento de 500X y sin ataque químico.

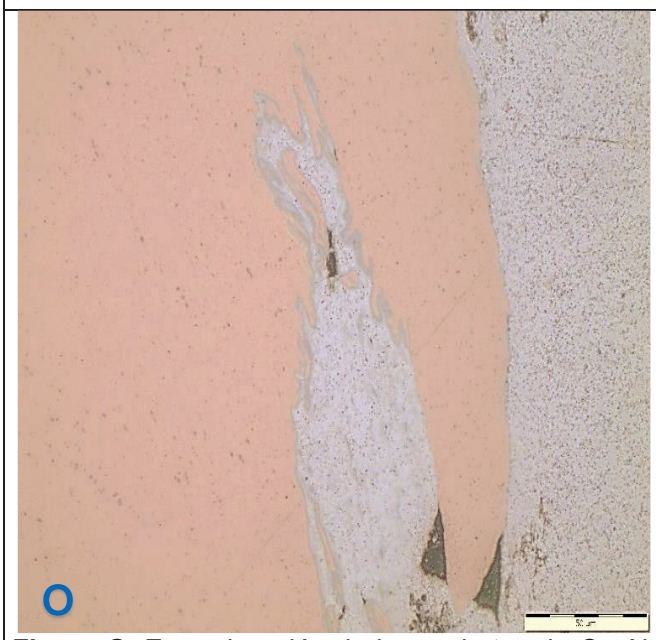


Figura O. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la coalescencia de materiales, micrografía con aumento de 500X sin ataque químico.

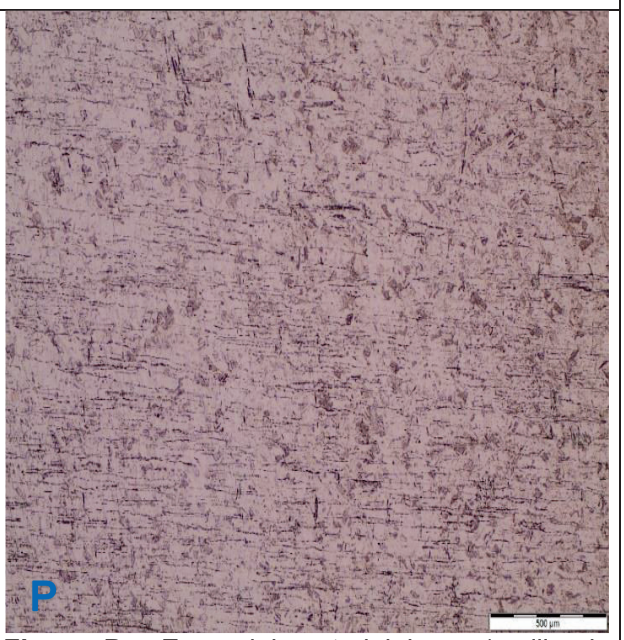


Figura P. Zona del material base (varilla de cobre), se oberva la forma del grano y las líneas de conformado del material. Micrografía con aumento de 50X y con ataque químico.

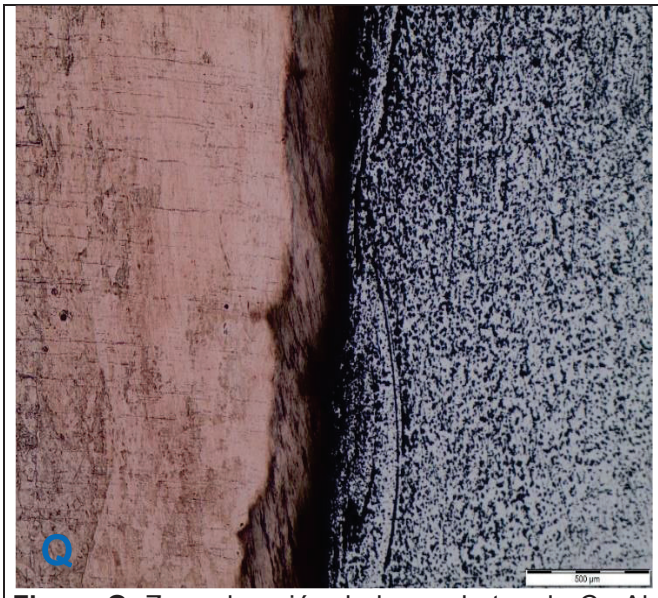


Figura Q. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la zona afectada por el calor con una colaracion distinta, micrografía con aumento de 50X y con ataque químico.

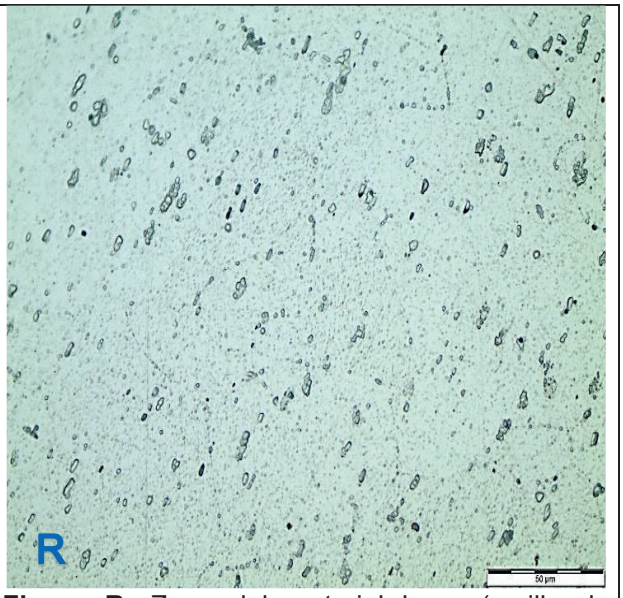


Figura R. Zona del material base (varilla de aluminio), se observa componentes del material (granos de silicio), micrografía con aumento de 500X, con ataque químico.

Probeta 7A – 7C (sin calentamiento previo)

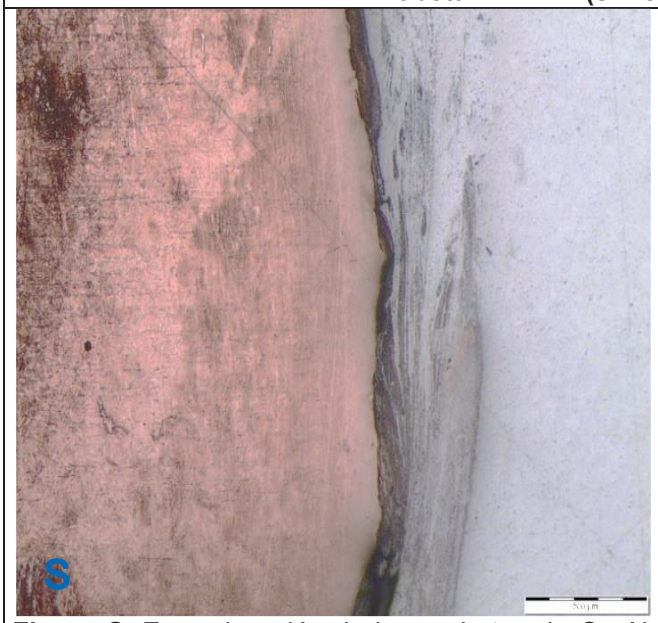


Figura S. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la zona de coalescencia de materiales y la zona afectada por el calor. Micrografía con aumento de 500X y con ataque químico.

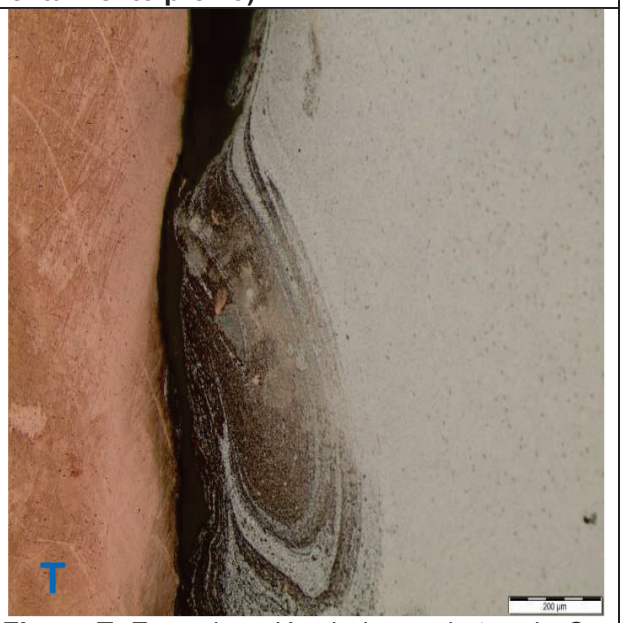


Figura T. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la coalescencia de materiales, fragmentos de cobre en el aluminio, micrografía con aumento de 100X y con ataque químico.

Figura U. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la coalescencia de materiales y presencia de fragmentos de cobre en el aluminio cerca de la unión, micrografía con aumente de 1000X y con ataque químico.

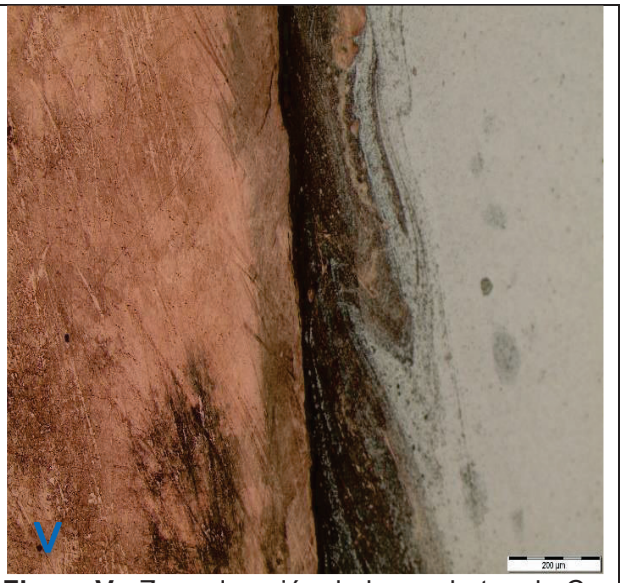


Figura V. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la zona afectada por el calor, la zona de coalescencia de materiales y la zona termomecánica, micrografía con aumento de 100X y con ataque químico.

Probeta 11A – 11C (calentamiento previo a 210 ºC)

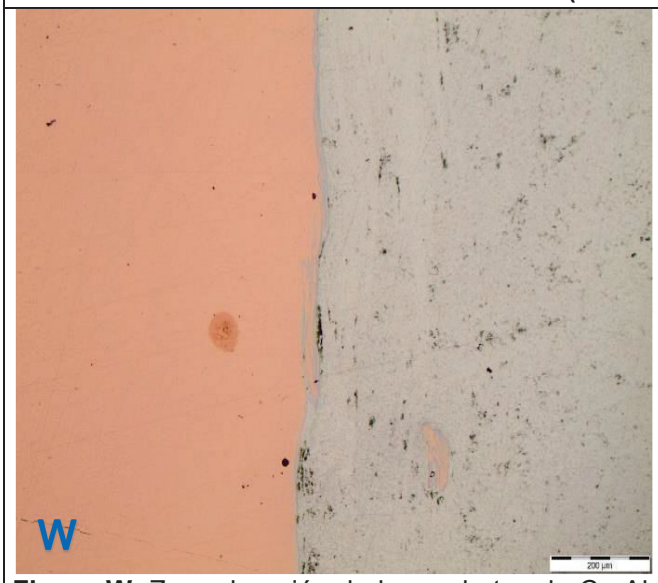


Figura W. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa una buena coalescencia de materiales a lo largo de unión, fragmentos de cobre en el aluminio, micrografía con aumento de 100X y sin ataque quimico.

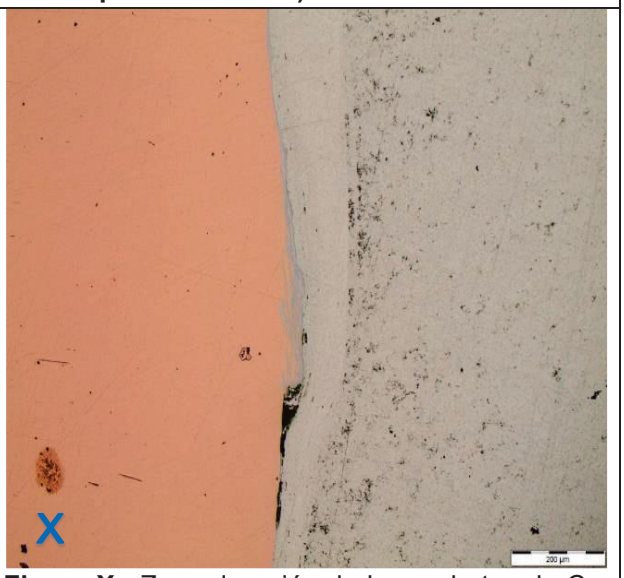


Figura X. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa que la coalescencia se da a lo largo de la unión y con un ancho considerable, micrografía cona aumento de 100X y sin ataque químico.

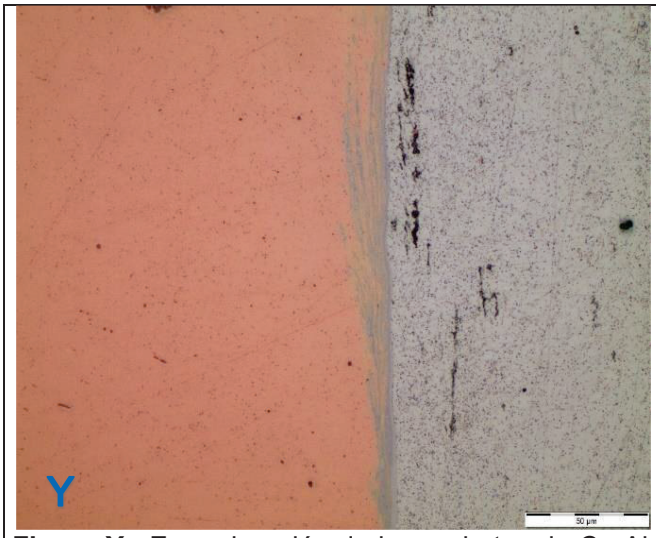


Figura Y. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa otra sección de la unión con buena coalescencia, con una coloración distinta en al zona termomecánica, micrografía con aumento de 500X y sin ataque químico.

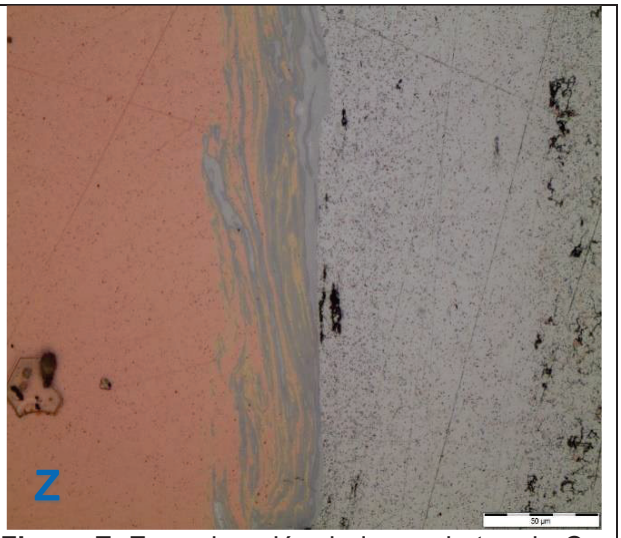


Figura Z. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa que el ancho de la zona de coalescencia de materiales es considerable y existe una coloración de la zona termomecánica, micrografía con aumento de 500X y sin ataque químico.

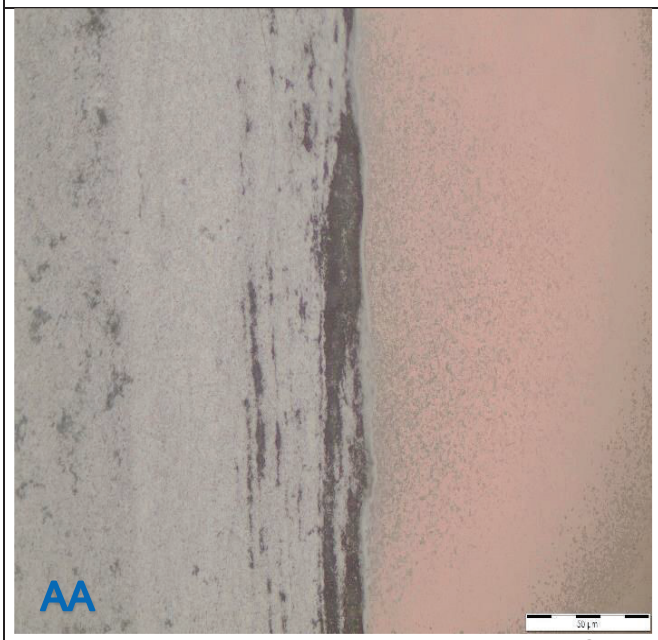


Figura AA. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la zona de colescencia con una colaración distinta, micrografía con aumento de 500X y sin ataque químico.

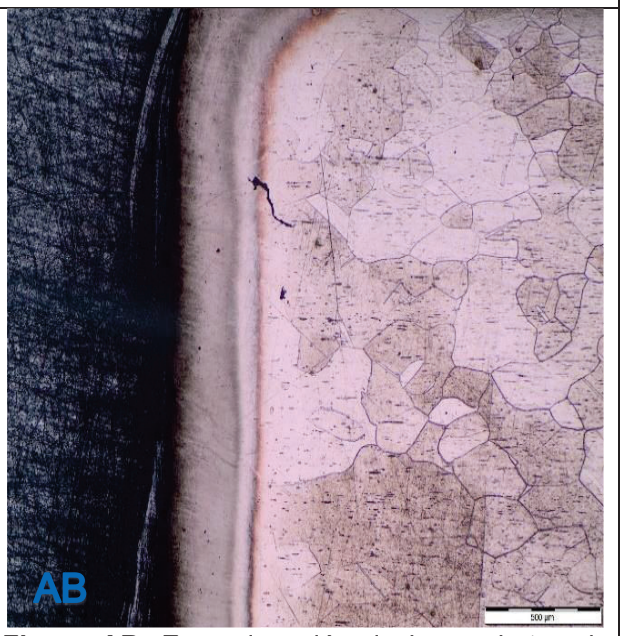


Figura AB. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la zonas de coalescencia, termomecánica y la zona afectada por la temperatura, micrografía con aumento de 1000X y con ataque químico.

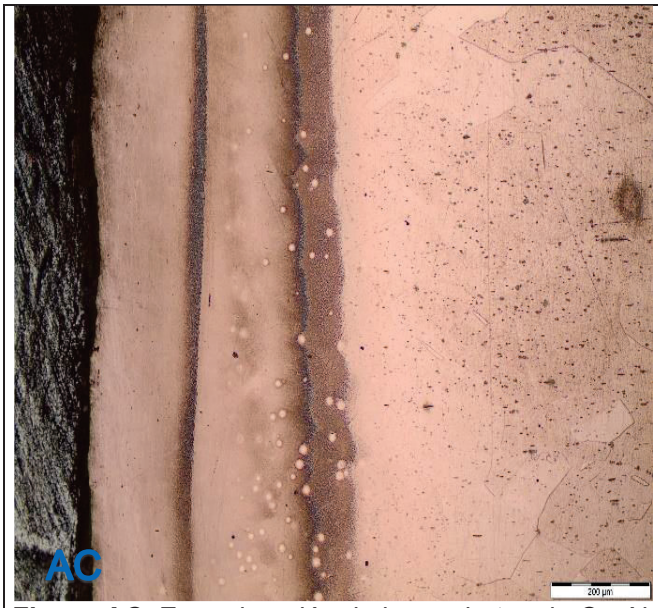


Figura AC. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la zona de coalescencia, afectada térmicamente y termomecanica, micrografía con aumento de 100X y con ataque químico.

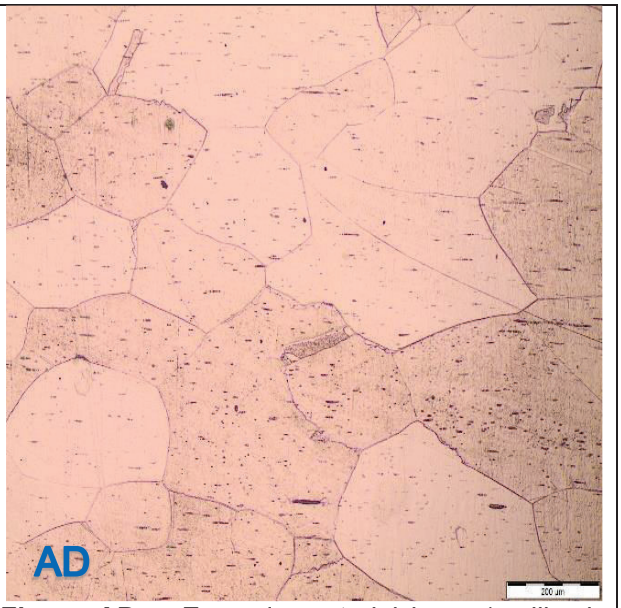


Figura AD. Zona de material base (varilla de cobre), se observa con mayor detalle la forma de grano en la zona cercana a la unión, micrografía con aumento de 100X y sin ataque químico.

Probeta 15A – 15C (calentamiento previo a 210 ºC)

Figura AE. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la zona de coalescencia con una coloración distinta, micrografía con aumento de 1000X con ataque químico en el aluminio y la zona de union.

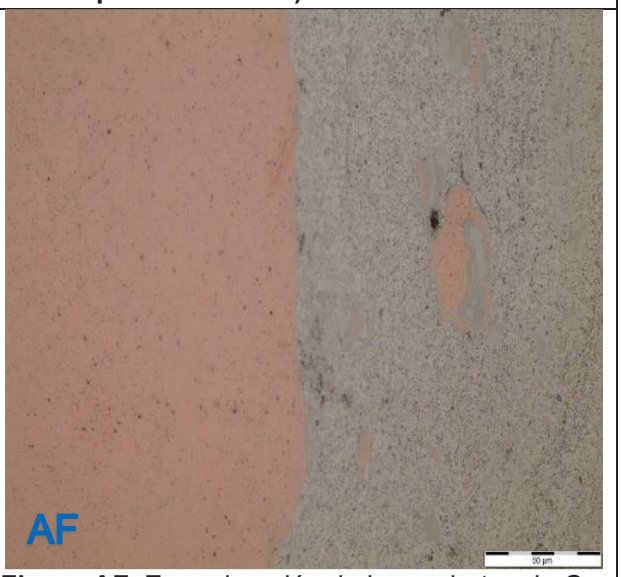


Figura AF. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa fragmentos de cobre en el aluminio cerca de la zona de unión, micrografía con aumento de 500X y sin ataque químico.

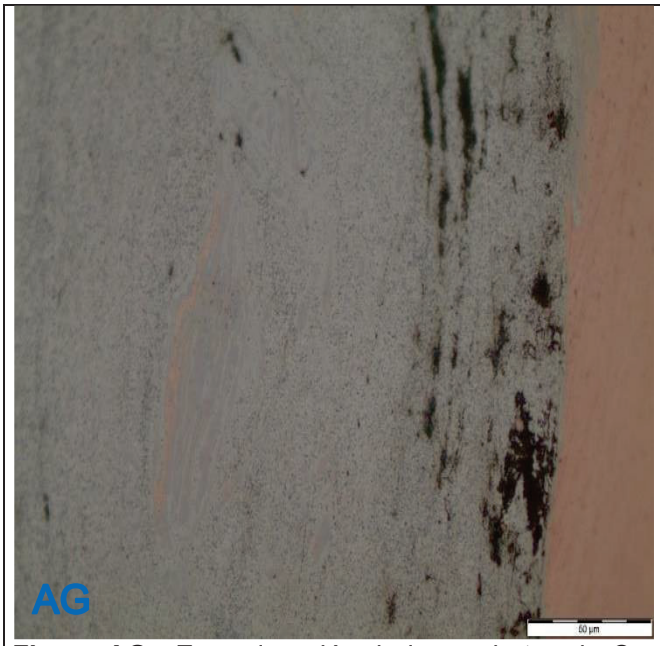


Figura AG. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la zona de coalescencia y fragmentos de cobre en el aluminio, micrografía con aumento de 500X y sin ataque químico

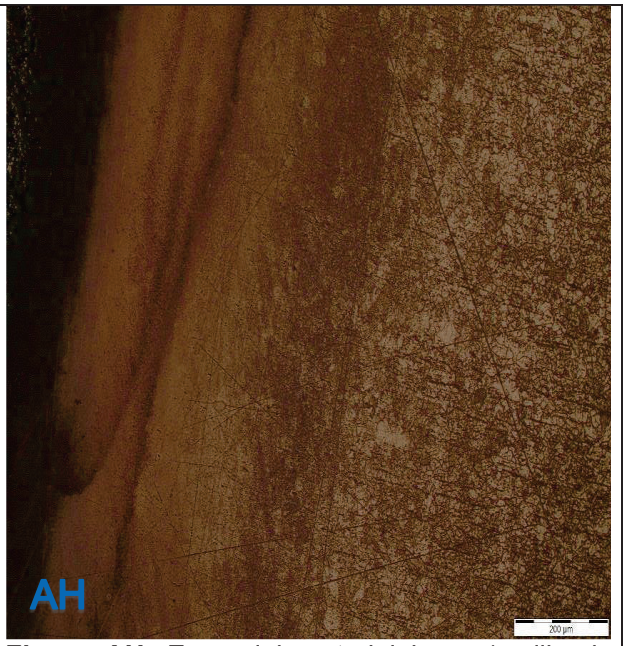


Figura AH. Zona del material base (varilla de cobre) próxima a unión de las probetas, se observa tres zonas distintas con diferentes coloraciones, micrografía con aumento de 100X y con ataque químico.

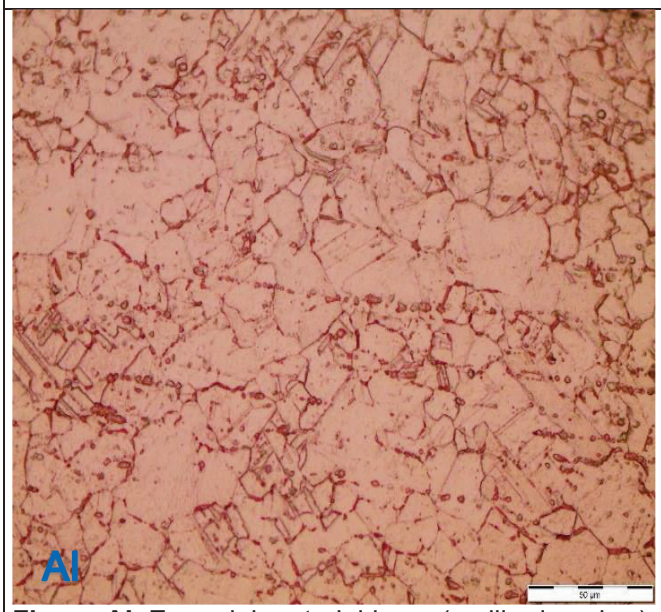


Figura AI. Zona del material base (varilla de cobre), se observa la forma del grano en una zona cercana a la unión de los materiales, micrografía con un amuento de 500X y con ataque químico.

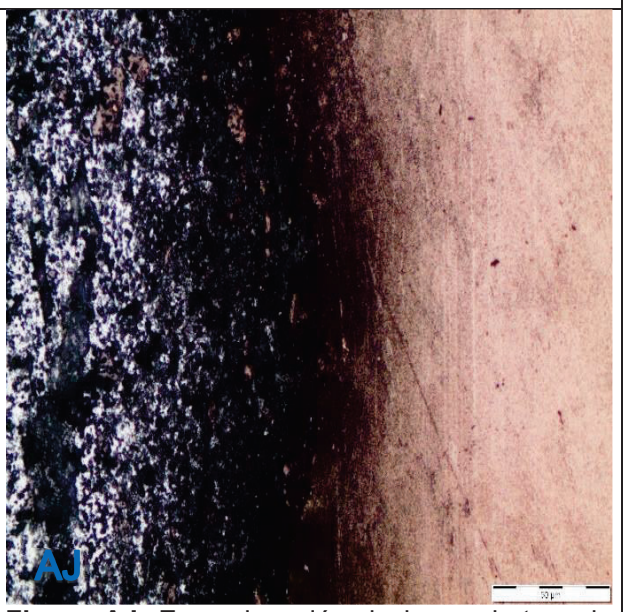


Figura AJ. Zona de unión de las probetras de Cu-Al, se observa la zona de coalescencia y fragmentos de cobre en el aluminio, micrografía con aumento de 500X y con ataque químico.

Probeta 17A – 17C (calentamiento previo a 210 ºC)

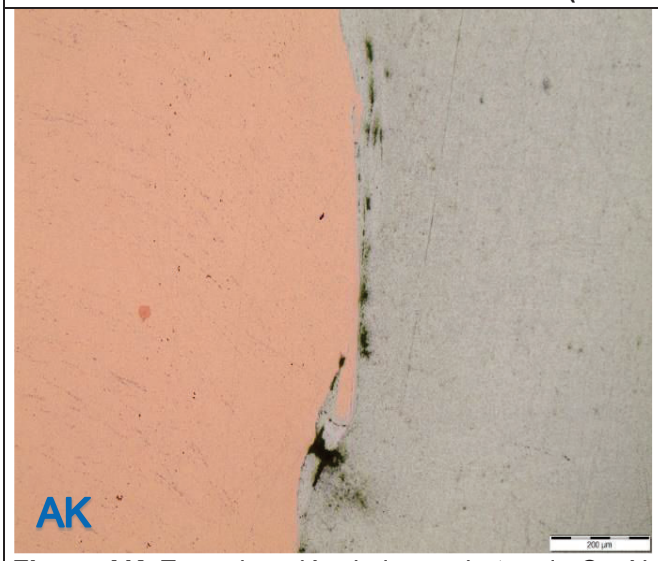


Figura AK. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa poca coalescencia entre los materiales, micrografía con aumento de 100X y sin ataque químico.

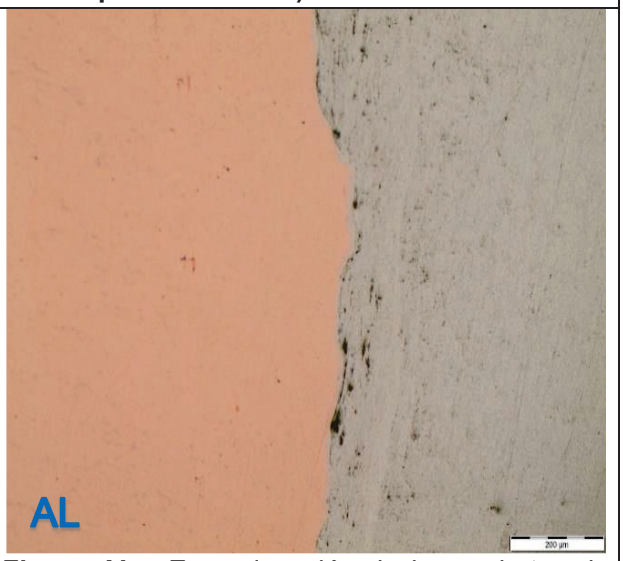


Figura AL. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se oberva coalescencia de los materiales con un espesor pequeño, micrografía con aumento de 100X y sin ataque químico.

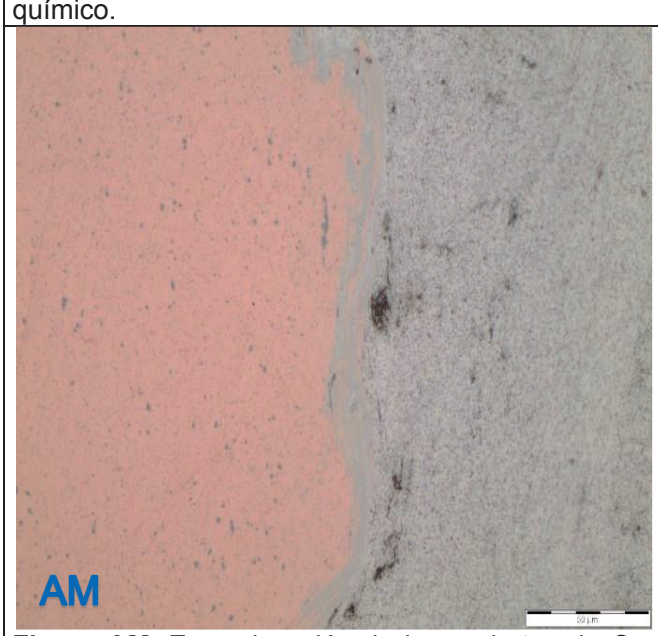


Figura AM. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la coalescencia de los materiales a lo largo de toda la unión, micrografía con aumento de 500X y sin ataque químico.

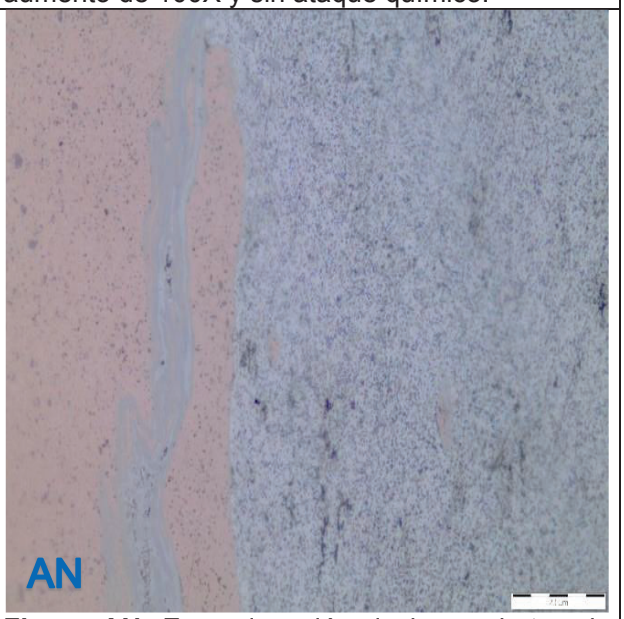


Figura AN. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la mezcla de los materiales en forma de filamentos y fragmentos de cobre en el aluminio, micrografía con aumento de 500X y sin ataque químico.

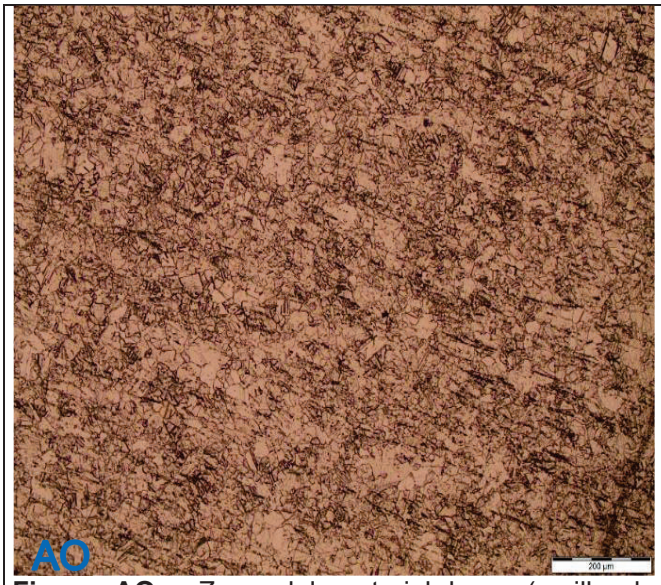


Figura AO. Zona del material base (varilla de cobre), se observan lineas longitudinales y la forma irregular del grano, micrografía con aumento de 100X y con ataque químico.

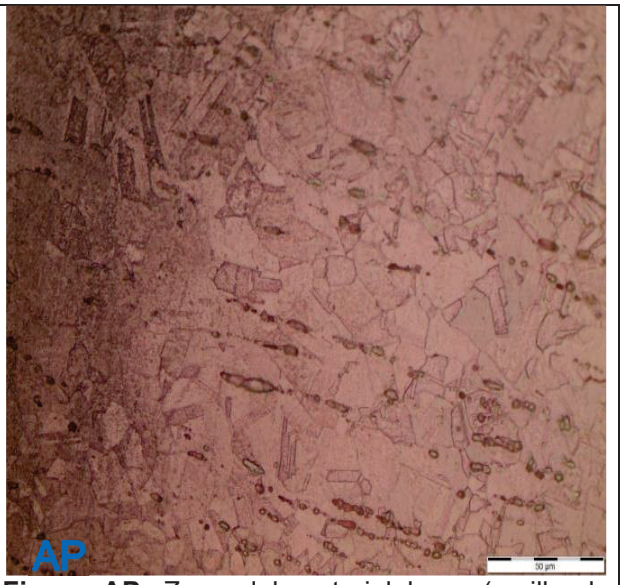


Figura AP. Zona del material base (varilla de cobre), se observa la forma irregular del grano en la zona cercana a la unión, micrografía con aumento de 500X y con ataque químico.

Probeta 18A – 18C (calentamiento previo a 210 ºC)

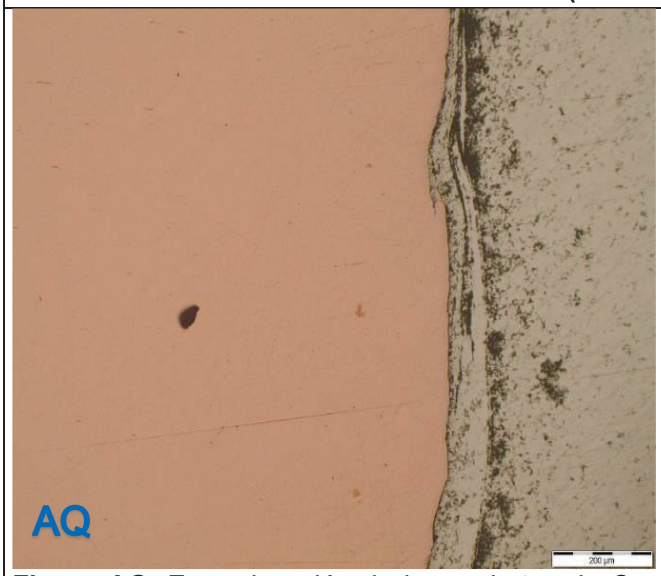


Figura AQ. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa falta de coalescencia de los materiales, micrografías con un aumento de 100X y con ataque químico en el auminio.

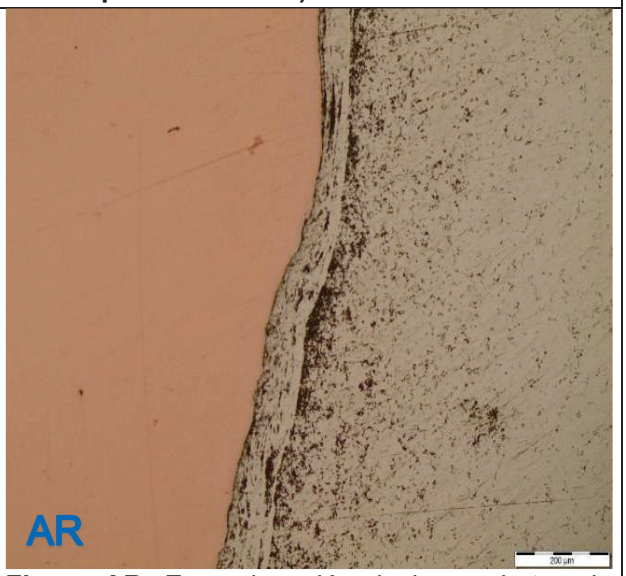


Figura AR. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la zona afectada térmicamente en el aluminio, micrografía con aumento de 100X y con ataque químico en el aluminio.

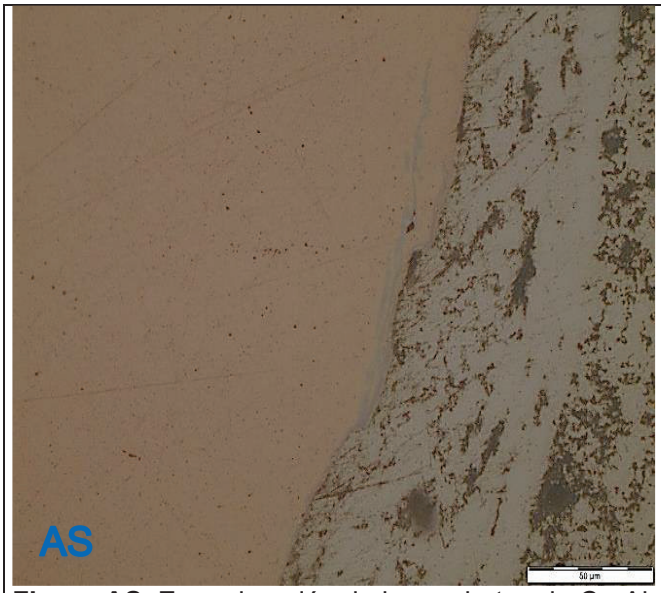


Figura AS. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa coalescencia de los materiales en forma de filamentos, micrografía con aumento de 500X y con ataque químico en el aluminio.

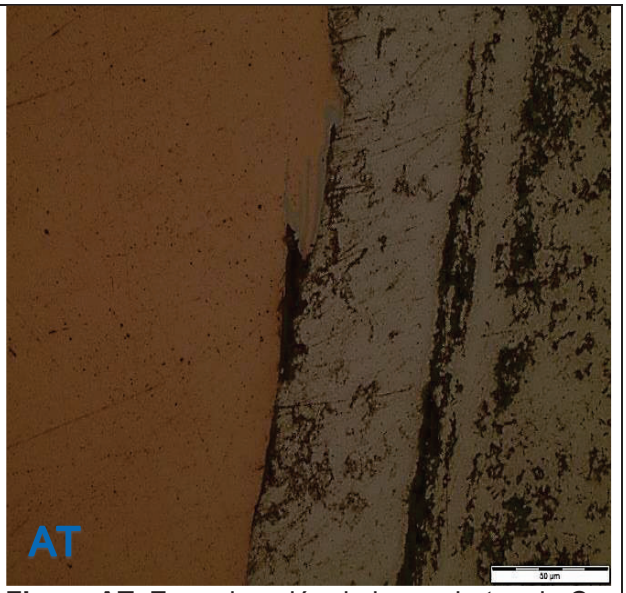


Figura AT. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa grietas en la soladura y coalescencia de materiales, micrografía con aumento de 500X y con ataque químico en el aluminio.

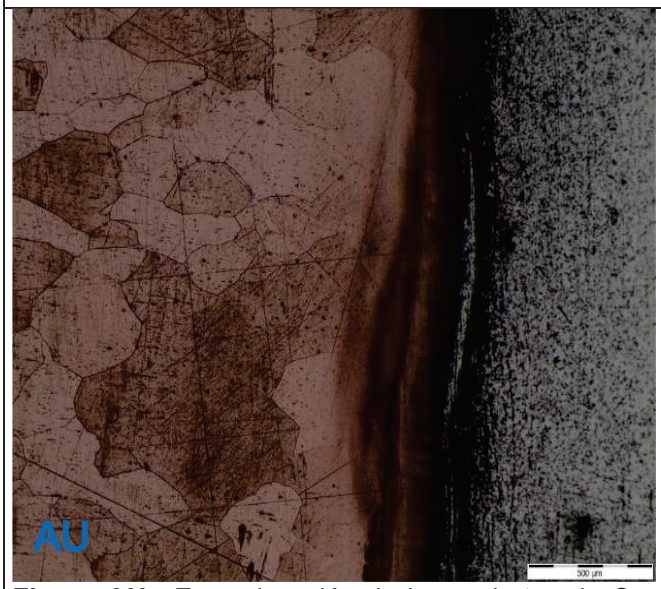


Figura AU. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la zona afectada térmicamente y la forma de grano cerca a la unión, micrografía con aumento de 50X y con ataque químico.

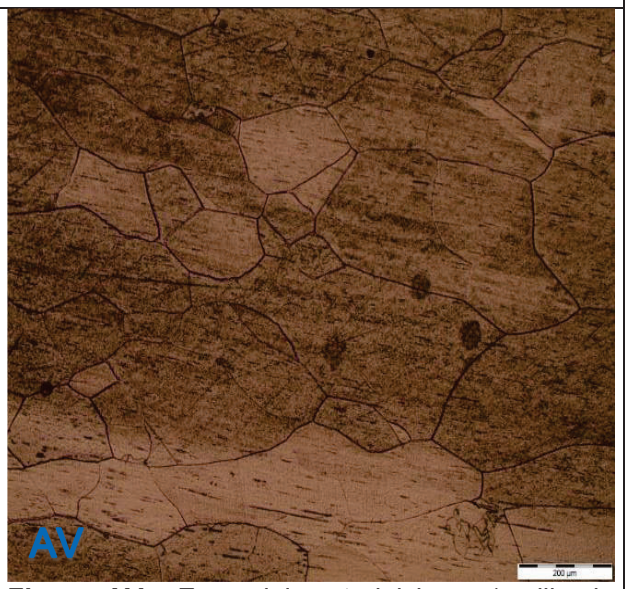


Figura AV. Zona del material base (varilla de cobre), se observa la forma del grano cercano a la union, micrografía con aumento de 100X y con ataque químico.

(Fuente: Propia)

3.4. Microdurezas

Las pruebas de microdureza se realizan con un microdurómetro de marca Duroline Metkon, cuyas características esenciales están descritas en la Tabla 2.3. Este equipo permite la indentación de la superficie con la ayuda de un aumento de 100X. Para la medición de la dureza se basa en la marca o huella (área) que deja el indentador de diamante de forma piramidal sobre la superficie del material y la carga que se aplica en el ensayo.

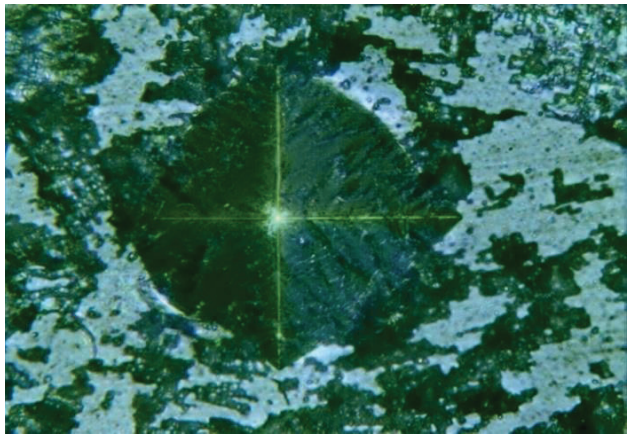


Figura 3.5. Huella (tipo rombo) del indentador piramidal sobre aluminio, con aumento de 100X
(Fuente: Propia)

El análisis de micro dureza se realiza en cinco probetas que se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 3.4. Probetas para análisis de microdureza

#	Codificación	Prueba realizada
1	4A-4C	Microdureza
2	11A-11C	Microdureza
3	15A-15C	Microdureza
4	17A-17C	Microdureza
5	18A-18C	Microdureza

(Fuente: Propia)

El ensayo de microindentación se realizó bajo las directrices de la norma ASTM E384 (Standard test method for microindentation hardness of materials), con ayuda de esta norma se puede cuantificar las variaciones de dureza en distancias pequeñas. La ASTM E384 recomienda una microindentación con una carga de 25 a 1000 grf, 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 diagonal (o diagonales) de la huella dejada

por el indentador en la superficie de estudio, la velocidad con la que el indentador se pone en contacto con el material a ensayar es entre 15 y 70µm/s (este valor viene dado por defecto por la máquina de dureza Vickers). En la norma además; especifica las condiciones de la superficie de la probeta para garantizar los resultados, indicaciones como la total limpieza sobre las áreas de ensayo y la correcta posición en la máquina de ensayos (superficie paralela al soporte para una penetración perpendicular del indentador). (American Society for Testing Metals, 2014)

La distancia entre cada marca dejada por el indentador se detallan en la Figura 3.6, estas medidas se obtuvieron con ayuda del software integrado al microscopio, marcando los puntos de referencia sobre las huellas obtenidas en el análisis de microdureza, el valor de referencia entre distancias es de 2,53 mm; estos datos son de ayuda para la realización de las gráficas de dureza en función de la distancia.

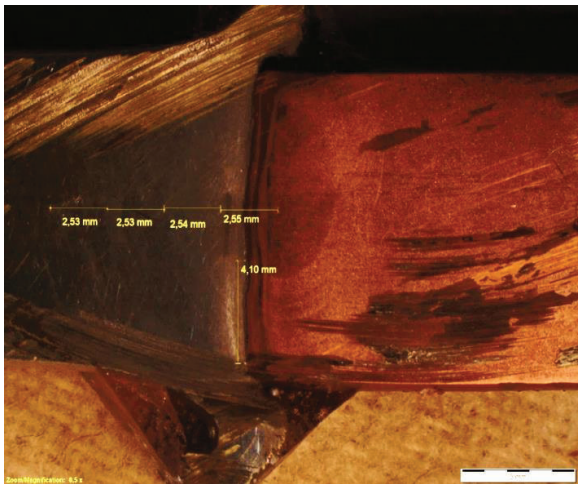


Figura 3.6. Distancias entre cada marca de indentación, con aumento de 0.5X
(Fuente: Propia)

En cada probeta anteriormente mencionada (ver Tabla 3.4) se realiza el ensayo de microdureza en tres zonas diferentes:

1. Zona 1: Microdurezas a lo largo del eje axial, partiendo desde el aluminio hasta llegar al cobre. Obteniendo entre ocho o nueve puntos de referencia.
2. Zona 2: Microdurezas en el eje transversal, en el material de aluminio lo más próximo a la zona de unión.
3. Zona 3: Microdurezas en el sentido transversal de la probeta, en el material de cobre lo más próximo a la zona de unión.

Las durezas obtenidas en las diferentes zonas se detallan a continuación:

Microdureza en la probeta Al-Cu [4A-4C]

Tabla 3.5. Ensayo de microdureza en el eje axial (4A-4C)

#	Etiqueta	HV	D1	D2	Diagonal media
1	O1	61,43	79,56	75,83	77,69
2	O2	51,52	85,17	84,51	84,84
3	O3	49,26	87,26	86,27	86,76
4	O4	50,34	80,99	90,66	85,83
5	O5	105,48	60,34	58,24	59,29
6	O6	89,38	66,83	61,99	64,41
7	O7	87,02	66,15	64,4	65,28
8	O8	100,04	64,07	57,69	60,88
9	O9	100,03	63,85	57,92	60,88

(Fuente: Propia)

*HV dureza en escala Vickers.

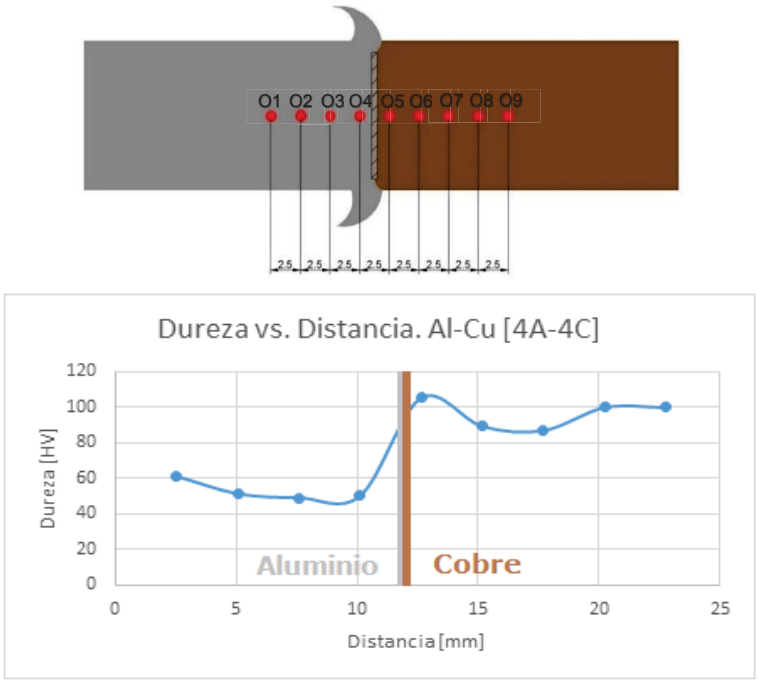


Figura 3.7. Dureza vs. Distancia probeta 4A-4C
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.7 se observa la variación de la dureza bajo condiciones de 200 g aplicados durante 20 segundos en la probeta 4A-4C, mostrando los resultados con respecto a la distancia horizontal en unidades Vickers.

Tabla 3.6. Ensayo de microdureza transversal, realizado en la varilla de aluminio cerca de la zona de unión (4A-4C)

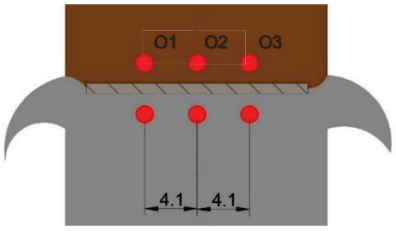
#	Etiqueta	*HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	69,32	74,52	71,76	73,14
2	O2	51,99	85,83	83,08	84,45
3	O3	69,93	72,42	73,22	72,82

(Fuente: Propia)
*HV dureza en escala Vickers.

Tabla 3.7. Ensayo de microdureza transversal, en la varilla de cobre cerca de la zona de unión (4A-4C)

#	Etiqueta	*HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	92,2	63,31	63,53	63,42
2	O2	98,25	60,56	62,31	61,43
3	O3	83,3	65,73	67,7	66,72

(Fuente: Propia)
*HV dureza en escala Vickers.



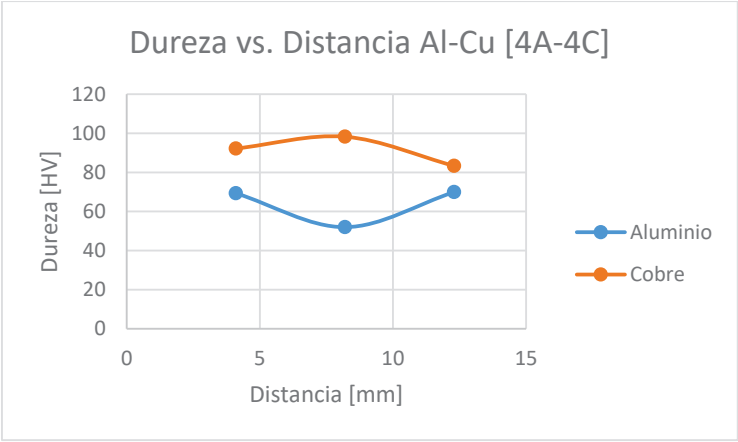


Figura 3.8. Dureza vs. Distancia. Aluminio y Cobre (4A-4C)
(Fuente: Propia)

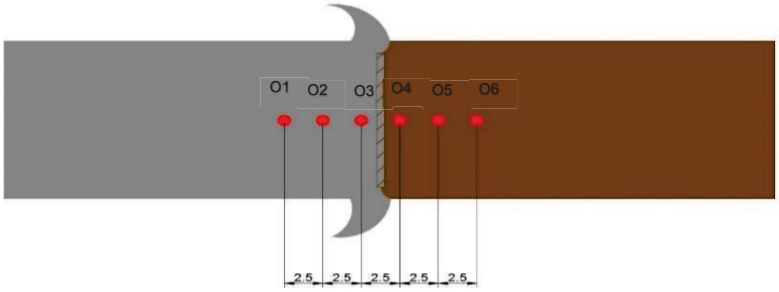
En la Figura 3.8 se observa la variación de microdurezas a lo largo de la unión, para la zona de la varilla de cobre cercana a la zona de coalescencia, la microdureza varía en un rango de 80 a 90 HV, mientras que en la aleación de aluminio cercana a la intercara de unión la microdureza varía 50 a 70 HV.

Microdureza en la probeta Al-Cu [11A-11C]

Tabla 3.8. Ensayo de microdureza en el eje axial (11A-11C)

#	Etiqueta	*HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	53,44	85,93	80,66	83,3
2	O2	46,8	88,46	89,56	89,01
3	O3	48,7	89,02	85,5	87,26
4	O4	94,17	65,28	60,22	62,75
5	O5	94,16	64,73	60,78	62,75
6	O6	92,22	63,08	63,74	63,41

(Fuente: Propia)
*HV dureza en escala Vickers



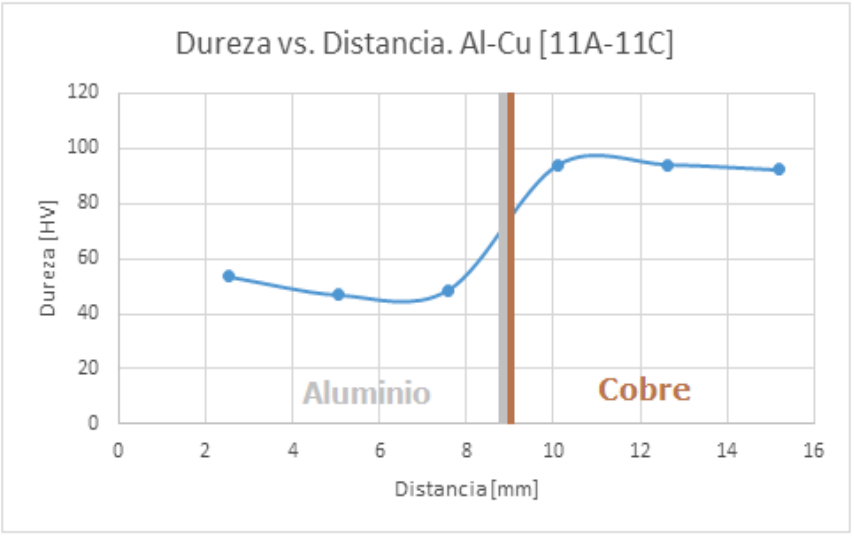


Figura 3.9. Dureza vs. Distancia probeta 11A-11C
(Fuente: Propia)

La Figura 3.9 presenta un valor de microdureza para la varilla de aluminio de 53 HV, en la zona de coalescencia el valor de dureza aumenta hasta el valor de 94 HV y en la zona de la varilla de cobre el valor de microdureza tiene un valor de 92 HV.

Tabla 3.9. Ensayo de microdureza transversal, realizado en el aluminio cerca de la zona de unión (11A-11C)

#	Etiqueta	*HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	50,08	86,93	85,17	86,05
2	O2	51,72	85,28	84,07	84,67
3	O3	55,54	82,53	80,88	81,71

(Fuente: Propia)
*HV dureza en escala Vickers.

Tabla 3.10. Ensayo de microdureza transversal, realizado en el cobre cerca de la zona de unión (11A-11C)

#	Etiqueta	*HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	84,44	66,6	65,93	66,27
2	O2	86,88	63,63	67,04	65,33
3	O3	90,49	62,2	65,82	64,01

(Fuente: Propia)
*HV dureza en escala Vickers.

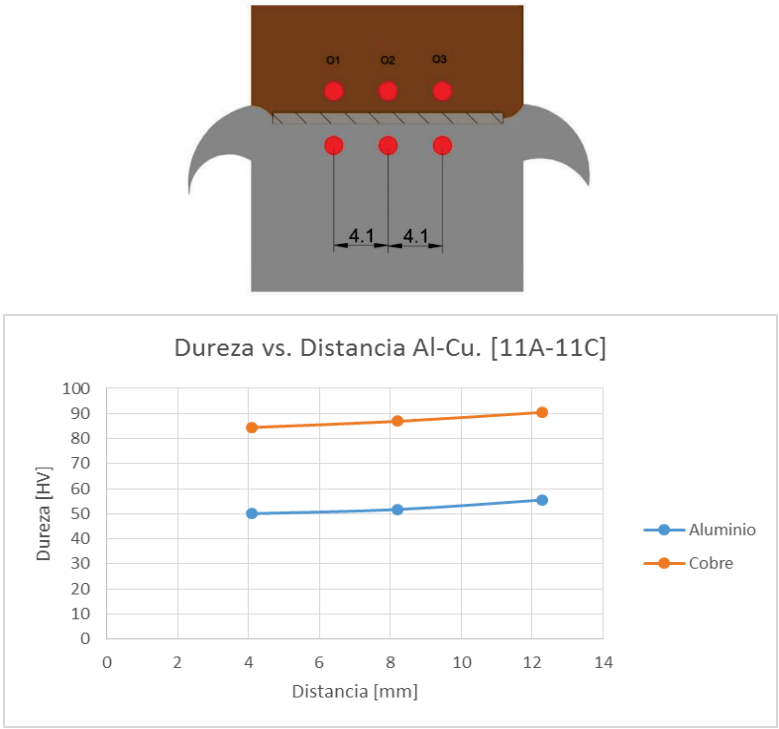


Figura 3.10. Dureza vs. Distancia. Aluminio y Cobre (11A-11C)
(Fuente: Propia)

Las mediciones de microdurezas que se realizaron en la probeta 11A-11C, presentan la menor variación de durezas a lo largo de la unión, esto debido a que esta probeta presenta la mejor coalescencia en toda la intercara de unión. La microdureza en la varilla de cobre cerca de la unión es 85 a 90 HV, mientras que en el lado de la aleación de aluminio cerca de la zona de coalescencia la variación de dureza es de 50 a 55 HV.

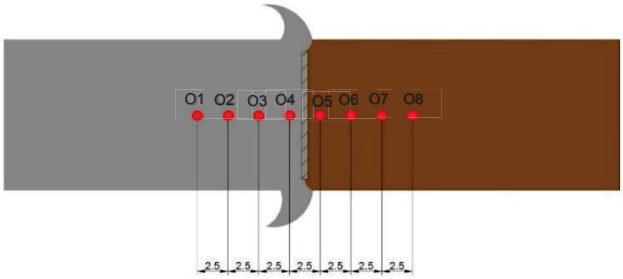
Microdureza en la probeta Al-Cu [15A-15C]

Tabla 3.11. Ensayo de microdureza en el eje axial (15A-15C)

#	Etiqueta	*HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	60,23	79,79	77,14	78,47
2	O2	51,25	88,46	81,65	85,06
3	O3	49,01	87,36	86,59	86,98
4	O4	45,77	97,49	82,53	90,01
5	O5	70,38	74,62	70,55	72,58
6	O6	68,48	75,07	72,1	73,58
7	O7	65,44	75,17	75,38	75,28
8	O8	61,96	77,8	76,92	77,36

(Fuente: Propia)

*HV dureza en escala Vickers.



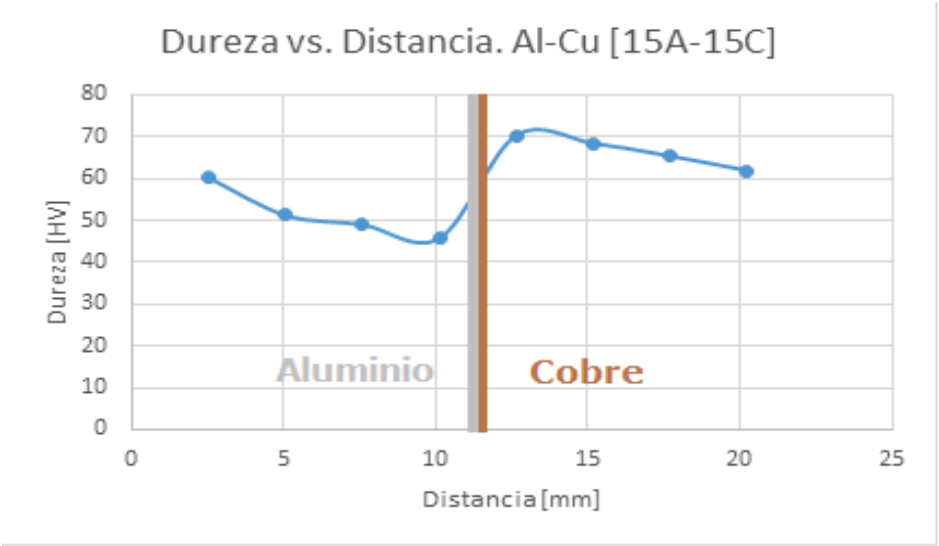


Figura 3.11. Dureza vs. Distancia probeta 15A-15C
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.11, se observa que el valor de la microdureza en lado de la aleación de aluminio es de 60 HV, el valor pico cercano a la zona de coalescencia tiene un valor de 70 HV, mientras que la dureza en el lado de la varilla de cobre es de 62 HV.

Tabla 3.12. Ensayo de microdureza transversal, realizado en el aluminio cerca de la zona de unión (15A-15C)

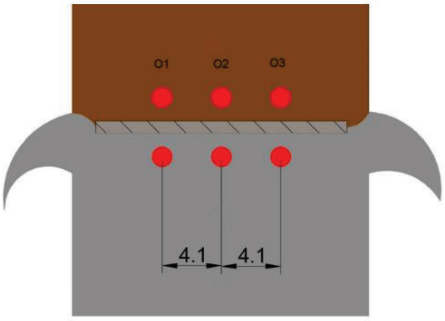
#	Etiqueta	*HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	99,5	61,11	60,99	61,05
2	O2	54,66	81,32	83,41	82,36
3	O3	47,92	89,34	86,59	87,97

(Fuente: Propia)
*HV dureza en escala Vickers

Tabla 3.13. Ensayo de microdureza transversal, en el cobre cerca de la zona de unión (15A-15C)

#	Etiqueta	*HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	75,08	70,11	70,44	70,27
2	O2	69,33	73,41	72,86	73,13
3	O3	58,64	81,22	77,82	79,52

(Fuente: Propia)
*HV dureza en escala Vickers.



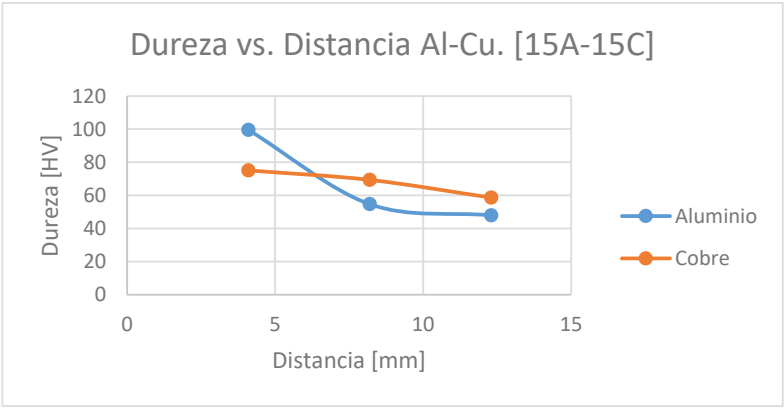


Figura 3.12. Dureza vs. Distancia. Aluminio y Cobre (15A-15C)
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.12 se puede observar que existe un valor pico 100 HV en la medición de microdurezas en el lado de la aleación de aluminio cerca de la zona de unión, debido a que la medida se toma en la dirección transversal de la soldadura y la irregularidad de la intercara de coalescencia se supondría que esta medida pertenece a la zona donde estaría formado intermetálicos, mientras que en el lado de la varilla de cobre tiene un valor máximo de 75 HV.

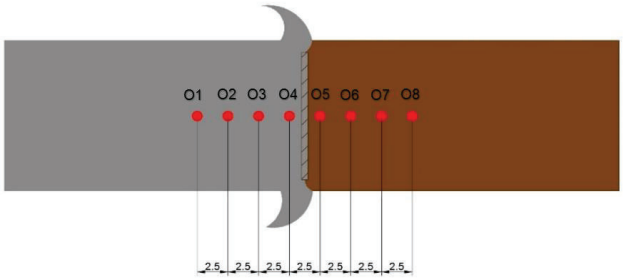
Microdureza en la probeta Al-Cu [17A-17C]

Tabla 3.14. Ensayo de microdureza en el eje axial (17A-17C)

#	Etiqueta	HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	65,82	75,72	74,4	75,06
2	O2	56,61	81,87	80	80,94
3	O3	50,9	84,84	85,72	85,28
4	O4	42,19	92,98	94,51	93,74
5	O5	74,03	70,33	71,22	70,77
6	O6	80,13	65,5	70,55	68,02
7	O7	65,63	75,82	74,51	75,17
8	O8	70,38	72,64	72,53	72,58

(Fuente: Propia)

*HV dureza en escala Vickers.



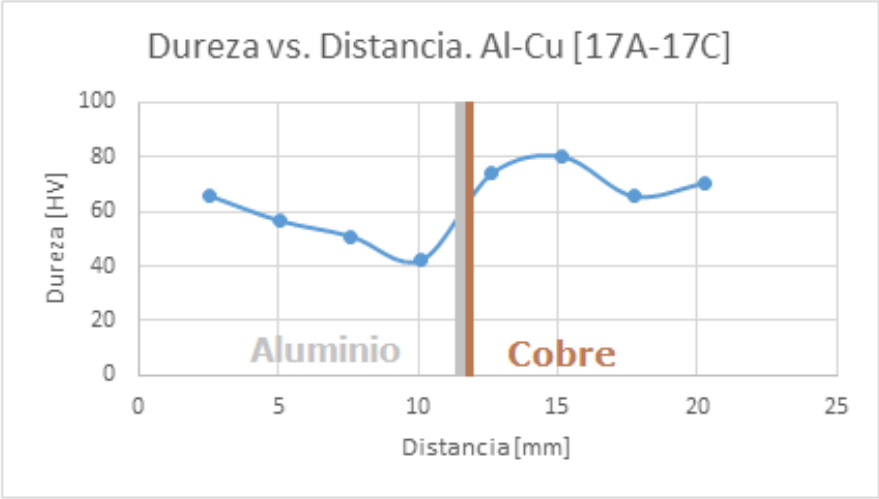


Figura 3.13. Dureza vs. Distancia probeta 17A-17C
(Fuente: Propia)

La Figura3.13 muestra que la microdureza en el lado de la varilla de aluminio es de 65 HV, en la zona de coalescencia cerca de la unión tiene un valor pico de 74 HV y en la varilla de cobre la dureza es de 65 HV.

Tabla 3.15. Ensayo de microdureza transversal, realizado en el aluminio cerca de la zona de unión (17A-17C)

#	Etiqueta	*HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	38,61	104,75	91,26	98
2	O2	43,25	96,16	89,03	92,59
3	O3	68,2	77,91	69,56	73,74

(Fuente: Propia)
*HV dureza en escala Vickers.

Tabla 3.16. Ensayo de microdureza transversal, en el cobre cerca de la zona de unión (17A-17C)

#	Etiqueta	HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	74,72	71,98	68,91	70,45
2	O2	73,45	72,21	69,89	71,05
3	O3	105,69	49,89	68,57	59,23

(Fuente: Propia)
*HV dureza en escala Vickers.

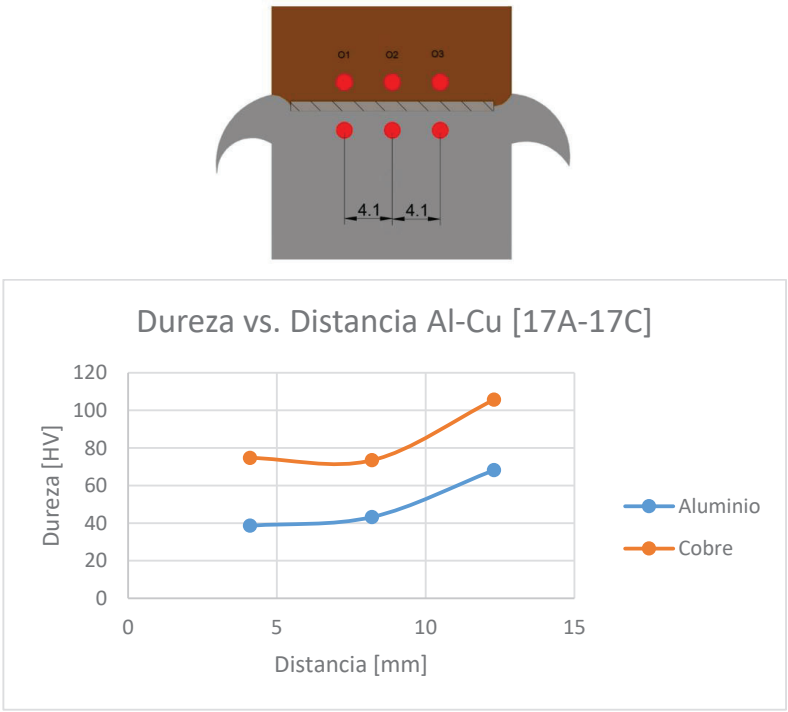


Figura 3.14. Dureza vs. Distancia. Aluminio y Cobre (17A-17C)
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.14 se puede observar, que la variación de las microdurezas en el lado de la varilla de cobre cerca de la zona de unión, está dentro de un rango de 73 a 106 HV mientras, que en lado de la aleación de aluminio cerca de la zona de coalescencia la dureza varia en un rango de 40 a 50 HV.

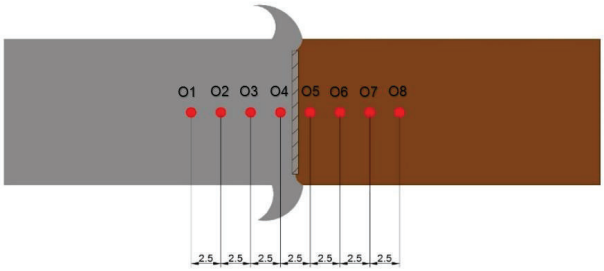
Microdureza en la probeta Al-Cu [18A-18C]

Tabla 3.17. Ensayo de microdureza en el eje axial (18A-18C)

#	Etiqueta	HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O2	51,12	86,16	84,18	85,17
2	O3	44,62	92,75	89,56	91,16
3	O4	45,78	90,44	89,56	90
4	O5	88,06	64,84	64,94	64,89
5	O6	94,18	65,17	60,33	62,75
6	O7	85,44	66,48	65,28	65,88
7	O8	90,18	64,62	63,63	64,12
8	O9	95,17	65,17	59,67	62,42

(Fuente: Propia)

*HV dureza en escala Vickers.



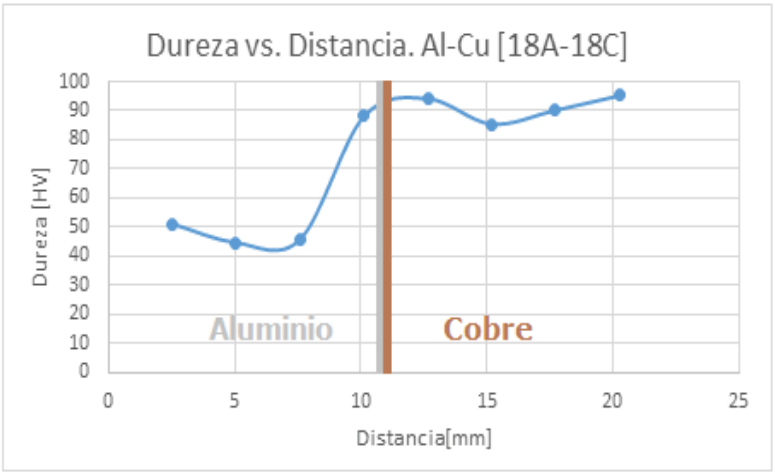


Figura 3.15. Dureza vs. Distancia probeta 18A-18C
(Fuente: Propia)

La Figura 3.15 muestra la curva característica de las mediciones de microdureza realizadas a todas las probetas anteriores, en el lado de la aleación de aluminio la dureza tiene un valor de 50 HV, el valor de dureza en la zona cercana a la unión tiene un valor pico de 94 HV y en el lado de la varilla de cobre el valor de dureza es de 90 HV.

Tabla 3.18. Ensayo de microdureza transversal, realizado en el aluminio cerca de la zona de unión (18A-18C)

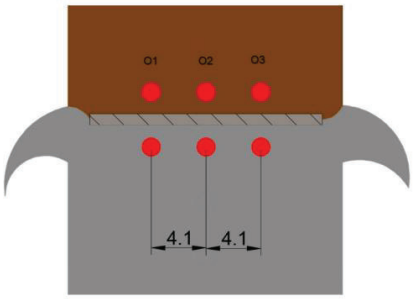
#	Etiqueta	*HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	43	90,99	94,73	92,86
2	O2	49,14	92,97	80,77	86,87
3	O3	50,02	86,92	85,28	86,1

(Fuente: Propia)
*HV dureza en escala Vickers.

Tabla 3.19. Ensayo de microdureza transversal, en el cobre cerca de la zona de unión (18A-18C)

#	Etiqueta	*HV	D1	D2	Diagonal Media
1	O1	93,85	63,74	61,98	62,86
2	O2	98,94	58,58	63,86	61,22
3	O3	112,9	57,91	56,7	57,31

(Fuente: Propia)
*HV dureza en escala Vickers.



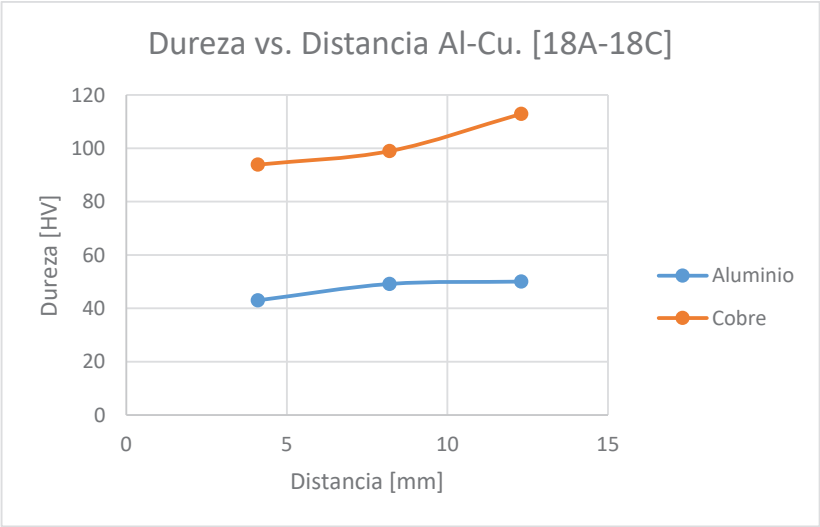


Figura 3.16. Dureza vs. Distancia. Aluminio y Cobre (18A-18C)
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.16 se observa que los valores de microdureza medidos en el lado de cobre cerca de la zona de unión tiene un rango mayor el cual va de 94 a 113 HV, mientras que en lado de la aleación de aluminio tiene un rango de durezas entre 43 a 50 HV.

3.5. Microscopía electrónica

El ensayo por microscopía electrónica es el resultado de conceptos teóricos y experimentales realizados por Sir J.J. Thomson, quien analiza el comportamiento de los rayos catódicos en tubos con gases, directrices que fueron consideradas para su teoría de la naturaleza ondulatoria de las partículas. En la actualidad hay dos grupos de microscopios: ópticos y electrónicos de transmisión y barrido, el microscopio electrónico presenta mejor resolución que el óptico.

Con el fin de conocer con mayor exactitud los diferentes aspectos que se presentan en la soldadura por fricción de materiales disímiles, se opta por realizar un análisis con un microscopio electrónico a la probeta que presenta mejor coalescencia entre materiales (11A-11C) en el Laboratorio de Nuevos Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Resultados microscopía electrónica en la probeta 11A-11C

Microscopía electrónica probeta 11A-11C	

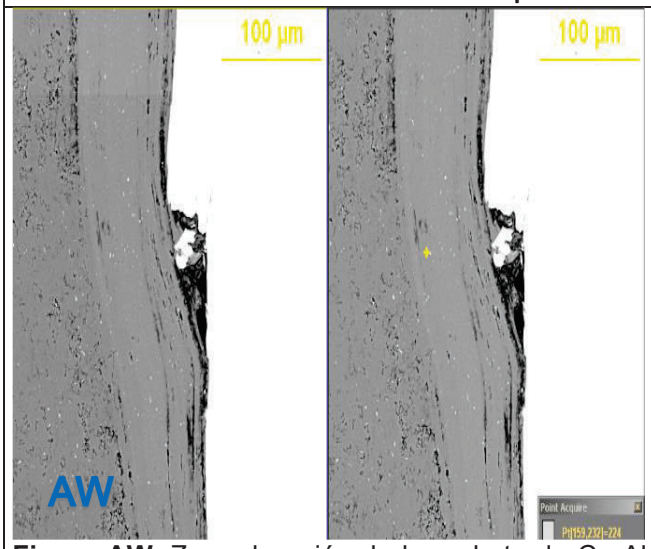
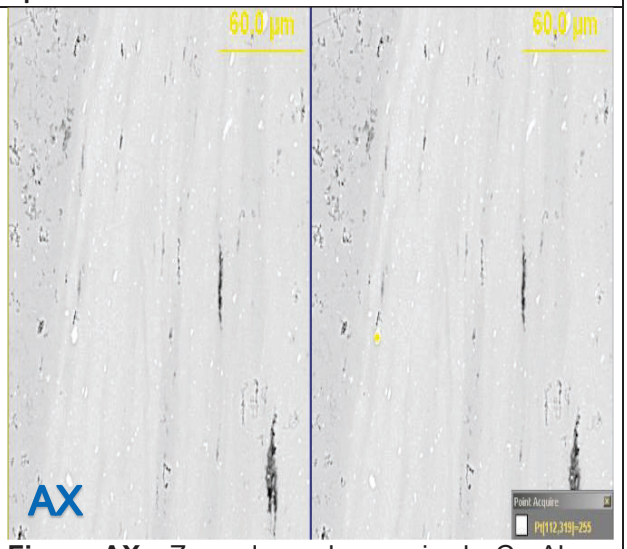

	

Figura AW. Zona de unión de la probeta de Cu-Al, se observa la zona afectada termo-mecánicamente y la zona de coalescencia, microscopía con aumento de 250 X y sin ataque químico.	**Figura AX.** Zona de coalescencia de Cu-Al, en lado de la aleación de aluminio, se observa un coloración grisácea diferente a los materiales base, microscopía con aumento de 250X y sin ataque químico.

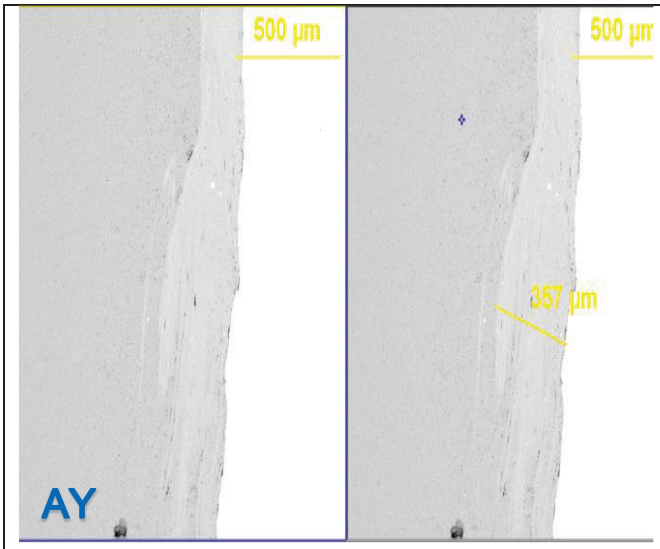


Figura AY. Zona de unión de las probetas de Cu-Al, se observa la zona afectada térmicamente y la zona termo-mecánica, que tiene un ancho de 357 µm y una coloración grisácea clara, micrografía con aumento de 250X y sin ataque químico.

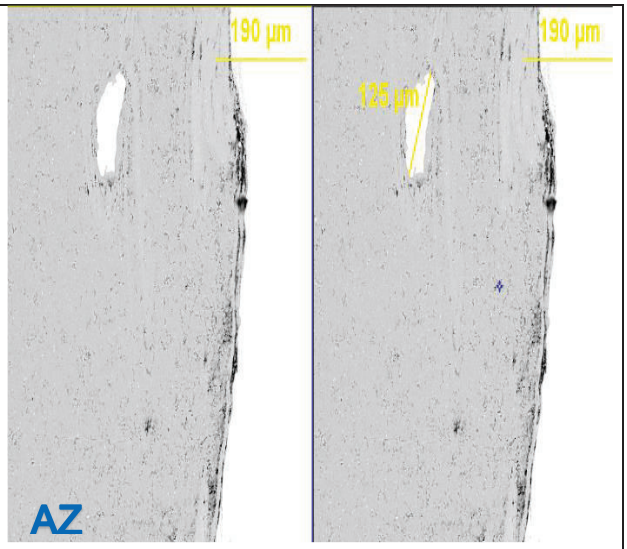


Figura AZ. Zona de material base (aluminio), se observa un fragmento de cobre en lado de la varilla de aluminio, que tiene un longitud de 125 µm, micrografía con aumento de 250X y sin ataque químico.

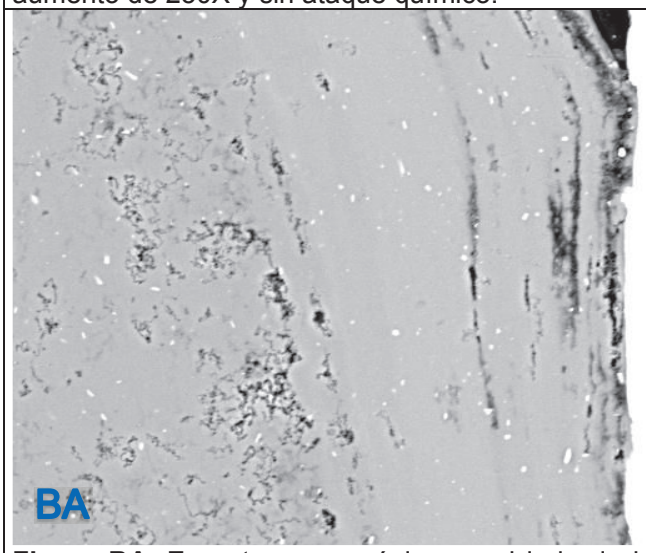


Figura BA. Zona termo-mecánica en el lado de la varilla de aluminio, se observa la coalescencia de Cu-Al en forma de filamentos, micrografía con aumento de 750X y sin ataque químico.

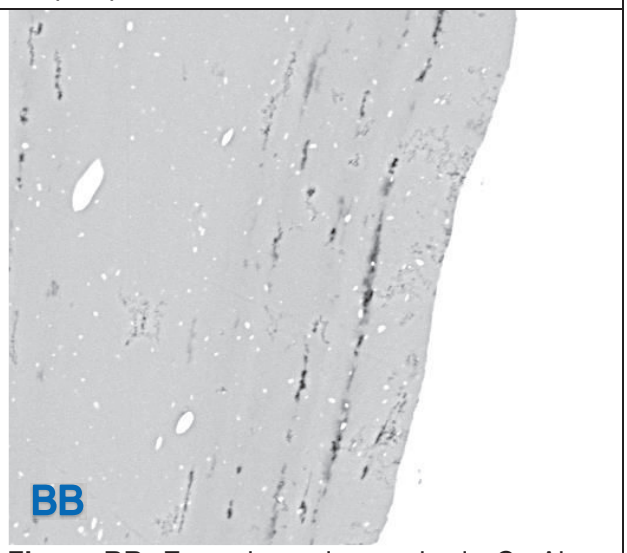


Figura BB. Zona de coalescencia de Cu-Al, se observa la zona afectada térmicamente y la zona termo-mecánica, se aprecia fragmentos de cobre en el lado de la aleación de aluminio, microscopía con aumento de 750X y sin ataque químico

(Fuente: Propia)

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Proceso de soldadura FRW

Las deformaciones posteriores a la soldadura por fricción de las probetas de cobre y aluminio se dan tanto de forma axial (encogimiento) como radial (formación de rebabas), una manera rápida pero no segura de conocer el estado de la soldadura es la inspección visual en la superficie de las rebabas que dan una idea empírica de la temperatura que alcanzaron los materiales y si existe coalescencia entre ellos.

La Tabla 3.1 presenta valores del encogimiento axial, que varían entre 0,3 y 1,5 cm, siendo los valores más altos correspondientes a las probetas que poseen calentamiento previo (210 ^{o}C y 310 ^{o}C), del proceso experimental FRW se determina que los mejores resultados se dan al manejar un encogimiento axial cerca del promedio (1 cm).

El encogimiento axial se da en su totalidad en la aleación de aluminio, porque la dureza y temperatura de plasticidad de la varilla de cobre es mayor que la aleación de aluminio, por este motivo el ablandamiento de las capas de aluminio en el plano de fricción, generan la extrusión hacia la periferia de la probeta de aluminio con forma de “hongo”, mientras el cobre no presenta deformación, solo ingresa en la varilla de aluminio.

La temperatura de plasticidad del cobre se encuentra en el rango de 680-780 ^{o}C (temperatura de deformación en frio y caliente respectivamente) y la temperatura de fusión del aluminio es de 660 ^{o}C, con el objetivo de mejorar la coalescencia entre las probetas, mejorar la formación de rebaba en la unión y mantener el principio de la soldadura en estado sólido, se optó por precalentar las probetas de cobre a varias temperaturas (210 ^{o}C, 310 ^{o}C y 410 ^{o}C), porque este rango de temperaturas no exceden la temperatura de fusión del aluminio.

Una vez soldadas las probetas se realiza un análisis metalográfico para conocer que temperatura es la más adecuada para realizar las posteriores uniones y se toma como base la temperatura de 210 ^{o}C, la cual presentó una mejor coalescencia e interface (Ratkovic, y otros, 2009).

4.2. Ensayo de tracción

Con el fin de conocer la resistencia mecánica de la soldadura por fricción, se ensaya a tracción las probetas (3A-3C, 8A-8C, 9A9C, 10A-10C, 12A-12C, 13A-13C, 14A-14C, 16A-16C), para conocer el máximo valor que reporta cada una de las probetas ensayadas, previamente se realiza un mecanizado a la zona de rebabas, localizada en la parte central de la soldadura, obteniéndose varios diámetros que se encuentran en un rango de entre 13,06-13,92 mm.

Las cargas máximas que registró la máquina universal de ensayos para cada probeta se encuentra entre los valores 8118 N y 14457 N, para conocer los valores del esfuerzo que soporta cada una de las probetas se dividen las cargas máximas para el área transversal de cada probeta obteniéndose resultados entre los 53,57 MPa y 107,92 MPa (Figura 4.1). De las 8 probetas que se realizan en este ensayo, 6 probetas (3A-3C, 8A-8C, 9A9C, 10A-10C, 14A-14C,16A-16C) tienen resistencias similares debido a que se siguió el procedimiento establecido para la soldadura por fricción (calentamiento previo a 210 ^{o}C) sin cambiar ningunas de sus variables, obteniendo valores de 71,79 MPa a 107,92 MPa, conforme a estos resultados se puede analizar que cada una de las uniones varía su resistencia, esto debido a que la máquina de soldadura por fricción del Laboratorio de Soldadura, es producto de un proyecto de titulación y realiza la soldadura de una forma muy básica, la presión de fricción y la de forja es proporcionada por un pistón hidráulico y la carga se la realiza de manera manual, teniendo como principales actores a las personas que mediante prueba y error realizan esta soldadura. Cabe recalcar que 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 136,3 MPa (ver Tabla 1.5), toda soldadura tiene como fin que la unión posea mayores propiedades que los materiales base pero al unir materiales disimiles se busca una mezcla de propiedades por lo que la soldadura realizada en este estudio es aceptable bajo estos parámetros.

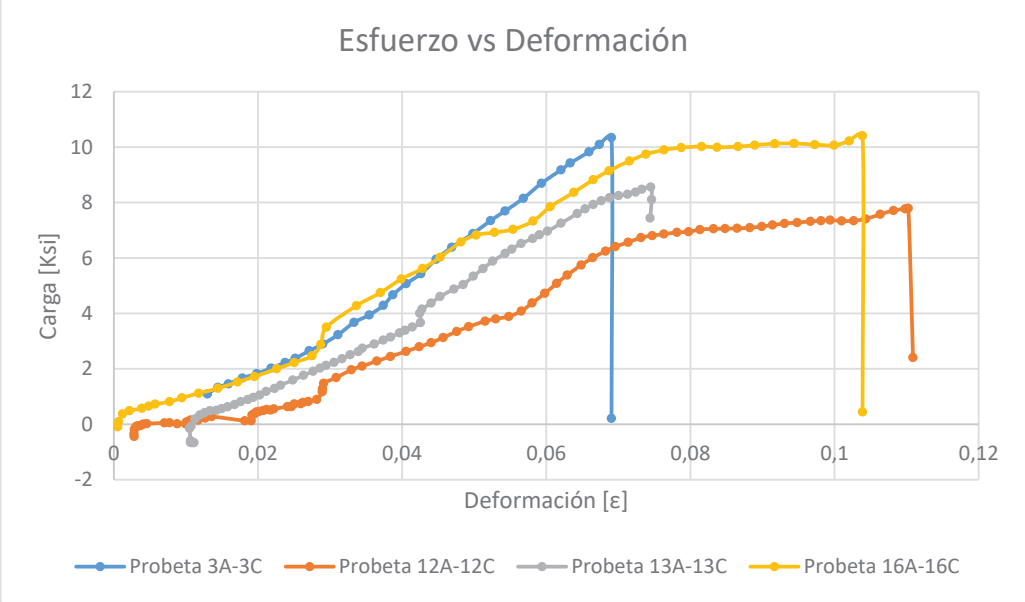


Figura 4.1. Esfuerzo vs. Deformación, de las últimas cuatro probetas ensayadas a tensión (3A-3C,12A-12C, 13A-13C y 16A-16C)
(Fuente: Propia)

Las probetas (12A-12C, 13A-13C), presentan los valores más bajos de resistencia, éstas fueron soldadas considerando dos variantes: la primera, colocar la probeta de aluminio en el mandril móvil (12A-12C) y la segunda variante, fue realizar una reducción de la sección transversal por mecanizado a la probeta de cobre (13A-13C), a fin de experimentar y observar que resultados se consiguen, para la probeta 12A-12C (mandril móvil) se obtuvo un valor de resistencia de 59,35 MPa. Para la probeta 13A-13C, al reducir el área de contacto entre las superficies de los metales base, se obtuvo uno de los valores más bajos de resistencia 53,57 MPa, adicionalmente no se generó exceso de rebaba ni coalescencia de los materiales.

4.3. Metalografías

Caracterización del cobre

Previo al estudio metalográfico de la soldadura por fricción de materiales disímiles, se realiza un análisis de la varilla de cobre que permite caracterizar el material base, por la composición química que se detalla en la Tabla 1.2 determinandose que es cobre de alta pureza llamado comúnmente como cobre electrolítico. Con un porcentaje de 99,75% de cobre, mientras que sus aleantes como Zn, Pb, Ni, etc. representan el 0,25 % restante, este tipo de varilla de cobre se obtiene mediante extrusión.

En la Figura 4.2 se observa una comparación entre la micrografía realizada a la probeta 17A-17C (varilla de cobre) y la micrografía del mismo material realizado por Sahin M. (2010), observando que el grano presenta similitud en su forma irregular y su tamaño.

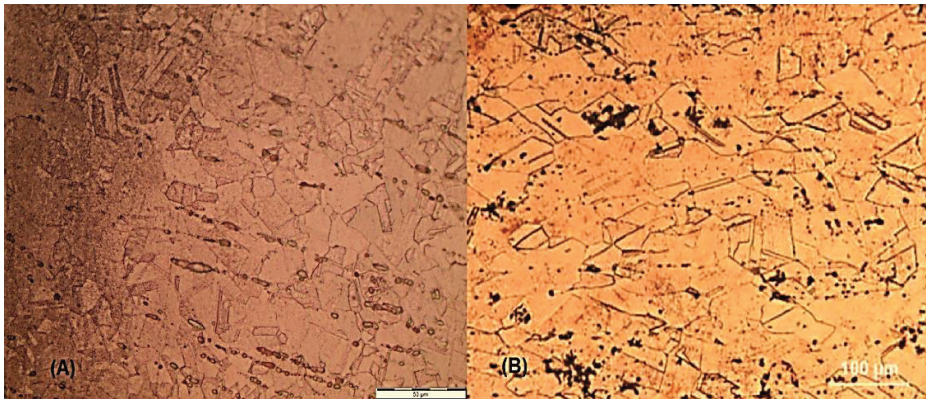


Figura 4.2. (A)Metalografía probeta 17A-17C (B) Metalogafía del estudio de Sahim, M. (Sahin, 2010)

Caracterización del aluminio

Para el análisis del aluminio se considera su composición química y la microestructura que se observa en el estudio metalográfico y que posteriormente es comparado con estudios previos del mismo material.

La probeta corresponde a una barra de aluminio 6063-T5 obtenida por extrusión y tratada térmicamente (Enfriado directamente de un proceso de formado a alta temperatura y envejecido artificial) (CEDAL, 2008).

Su composición química se detalla en la Tabla 1.4, recalcando que su mayor porcentaje de aleantes son de magnesio dentro de un rango de 0,45-0,90% y silicio con un rango de 0,20 – 0,60%, propios de una aleación de aluminio 6063.

La aleación de aluminio presenta una formación de partículas insolubles de $FeAl_3$ se muestran de color negro, como se puede observar en la Figura 4.3, para revelar su estructura se atacó con un reactivo (Keller) cuya composición es: 2 ml de HF, 2 ml de HCl, 5 ml de HNO_3 y 190 ml de agua destilada.

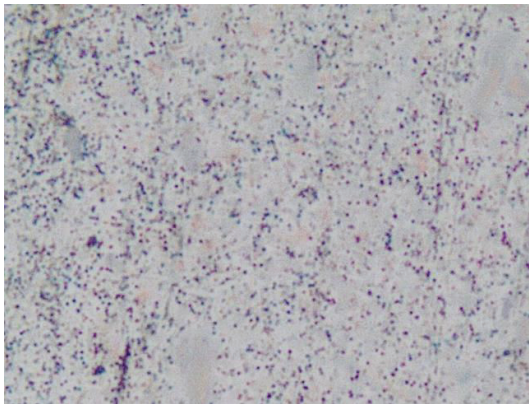


Figura 4.3 Micrografía del aluminio 6063-T5, con un aumento de 1000X y ataque químico (Fuente: Propia)

En la micrografía anterior (Figura 4.3), capturada en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional no se puede apreciar la formación de granos debido a que es un material extruido.

La Figura 4.4 presenta la metalografía realizada por Mackenzie S. y Totten G. a la aleación de aluminio (AA 6063 T5 extruida) en la cual se observan partículas de siliciuro de magnesio (Mg_2Si) de color negro, partículas de Fe_3SiAl_2 de un color grisáceo y precipitados finos de Mg_2Si a lo largo de toda la metalografía. Al comparar la Figura 4.3 y 4.4 se puede observar claramente los mismos componentes característicos de la aleación de aluminio 6063-T5 obtenida mediante extrusión.

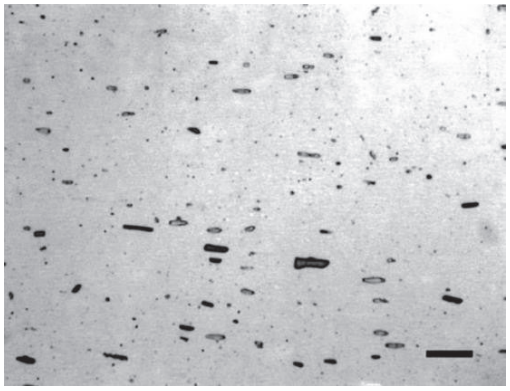


Figura 4.4 Micrografía de la aleación de aluminio (6063-T5 extruido)
(Mackenzie & Totten, 2006)

Caracterización de la unión

Para caracterizar la unión de materiales disímiles se realiza un análisis de las micrografías obtenidas de 8 probetas, las cuales permiten caracterizar la soldadura.
A continuación se realiza el estudio y caracterización de la zona de unión para cada probeta, basándose en las micrografías contenidas en la Tabla 3.3 mismas que serán referenciadas por su codificación para el presente análisis.

Probetas 2A-2C y 7A-7C

Ambos tipos de muestras fueron soldadas sin calentamiento previo. En la micrografía realizada con un aumento de 100X, probeta 2A-2C y que se observa en la **Figura A**; se aprecia que no hay coalescencia alguna entre los materiales, tan sólo dos materiales unidos "débilmente". En dicha micrografía se puede ver la presencia de una gran zona con falta de unión debido a la falta de temperatura y presión, que aseguren que no haya vacíos entre los dos materiales. En la **Figura B**, al observar la micrografía con un aumento de 500X en la parte superior de la intercara de los materiales, se observa una pequeña zona de mezcla de ambas probetas, pero la presencia de esta zona de coalescencia es muy pequeña y escasa a lo largo de la unión de los metales.
Al atacar las probetas unidas sin calentamiento previo, como se observa en la **Figura C** se logra distinguir tres diferentes colores; correspondientes a los materiales base y a una zona afectada térmicamente. Esta tendencia es corroborada con la micrografía mostrada en la **Figura T**, que muestra pequeñas zonas donde hay coalescencia. En la **Figura U**, se observa una pequeña cantidad de cobre dentro del aluminio y esto se da cerca de la unión de soldadura.
La coalescencia se da por el calor obtenido de la fricción generada entre los dos metales y por la aplicación de la presión de deformación, mediante el estudio de la micrografía se determina que no se alcanzó una temperatura ideal, para lograr la mezcla mecánica y

generar la soldadura, es necesario que se cuente con dos factores para lograr unir estos dos materiales por el proceso de FRW: primero, que los materiales sean forjables y segundo, que generen rozamiento entre ellos. Los dos materiales cumplen con las condiciones, pero se diferencian en el rango de temperaturas de trabajo en frio, porque el cobre tiene una temperatura de plasticidad cercana a la temperatura de fusión del aluminio (The American Society for Metals, 1993).

Probeta 4A-4C

La probeta 4A-4C fue soldada con calentamiento previo a 210°C en la varilla de cobre. La **Figura E** con aumento de 100X, presenta mayor deformación en la intercara de unión y la formación de una delgada interface de coalescencia. En la **Figura G** a 500X, se obsevan fragmentos de cobre dentro del aluminio y pequeñas zonas de mezcla mecánica a lo largo de la unión. Después de realizar el ataque químico a la probeta y examinar la muestra a un aumento de 100X como se observa en la **Figura I**, se tiene la formación de tres zonas cercanas a la unión, estas zonas se diferencian por las tonalidades de color rojizo (varilla de cobre) y color negro con pequeños puntos grises en la varilla de aluminio debido al sobre ataque realizado en la misma. En la **Figura J** con un aumento de 500X se distingue una franja delgada a lo largo de la unión que representa la zona afectada termo mecánicamente.

Probeta 5A-5C

La **Figura K** al igual que la **Figura L,** presentan coalescencia de los materiales en diferentes zonas con un aumento de 100X, para la soldadura de esta probeta se precalentó la varilla de cobre a una temperatura de 310 ^{o}C mejorando sustancialmente la interface a lo largo de la unión, a pesar de que se mejora la calidad de la soldadura existe una gran cantidad de concentradores de esfuerzos. En la **Figura M** que tiene un aumento de 500X se observa la coalescencia de los materiales en forma de filamentos alargados que ingresaron en el cobre, no existe la presencia de grietas u otras imperfecciones en esta metalografía. En la **Figura N** se observa coalescencia de los materiales cerca de la zona de unión, existen zonas carentes de unión a lo largo de la interface de soldadura con dimensiones considerables que provocarán que la soldadura falle, existen fragmentos de cobre en el aluminio los cuales fueron desprendidos por la fricción propia del proceso de soldadura, en la **Figura O** se observa que fragmentos de cobre ingresa en el aluminio producto del cizallamiento de los materiales el cual es inherente en el proceso FRW.

Al calentar la probeta de cobre a una temperatura de 310 °C, permite por conducción que el aluminio llegue a una temperatura de plasticidad adecuada, facilitando el encogimiento

y la formación de rebabas en la probeta de aluminio, pero este elevado ablandamiento de la varilla de aluminio no genera la fricción y presión necesaria entre los materiales para producir la mezcla mecánica, propiciando la formación de zonas en las cuales ingresa el cobre con facilidad, la presencia de pequeños fragmentos de cobre en el aluminio se da por las imperfecciones superficiales y la diferencia de dureza entre los materiales base al iniciar el proceso.

Probeta 15A-15C

En la Figura AE con un aumento de 100X y sin ataque químico, correspondiente a la unión de las probetas 15A-15C con un calentamiento previo de 210 ^{o}C. Se observa que la zona de coalescencia de los materiales abarca un área considerable y presenta una coloración característica debido a la temperatura que se da en esta zona. La **Figura AF** posee similitud con las metalografías previamente analizadas a las probetas con calentamiento previo, ya que existe la presencia de fragmentos de cobre que ingresaron en la varilla de aluminio, estos fragmentos presentan coalescencia.

La **Figura AI** con un aumento de 500X, muestra la forma irregular del grano en la varilla de cobre en la zona cercana a la unión y las líneas que posiblemente son de aleantes del material base.

Probeta 17A-17C

Los resultados obtenidos en esta probeta con calentamiento previa a 210°C, son similares a las tres probetas anteriores mostrando una aceptable deformación plástica por el perfil curvilíneo, en la **Figura AL** (100X) presenta zonas de coalescencia muy prolongadas, pero esta soldadura no se da en toda la unión de los materiales como se ve en el Anexo 6 solo en ciertas regiones.

En la **Figura AO** se observa la dirección del grano debido a la conformación de la varilla de cobre por extrusión.

Probeta 18A-18C

En las micrografías de la probeta 18A-18C que se soldó con un calentamiento de 210°C en la varilla de cobre, se aprecia las mismas cualidades anteriormente mencionadas en las probetas que se realizaron con calentamiento previo, cabe resaltar que al realizar el ataque en esta probeta como se observa en la **Figura AU**, presenta la aparición de: dos zonas en el cobre con tonos de color rojizo y una zona de color negro en la aleación de aluminio. Se presume un pequeño incremento en el tamaño de grano en la estructura de la varilla de cobre cerca de la unión. El aluminio no presenta cambio alguno salvo el aumento de regiones negras debido al sobre ataque o quemado producido al exponer el

aluminio al reactivo que se usa para revelar la microestructura de la varilla de cobre, por este motivo las zonas negras se presentan en gran cantidad cerca de la unión de materiales.

Después de analizar y comparar las micrografías de todas las probetas, se procede a estudiar las imágenes obtenidas en la probeta 11A-11C, para caracterizar y exponer los resultados obtenidos mediante el proceso de soldadura FRW.

Análisis probeta 11A-11C

La soldadura presenta un aspecto superficial aceptable en la rebaba formada de la varilla de aluminio, en cambio la probeta de cobre no se deforma por tener una dureza mayor que la de la aleación de aluminio, al comparar el acabado superficial de una probeta realizada sin calentamiento previo (Figura 4.5) con la probeta 11A-11C se aprecia una gran diferencia en el acabado superficial de la rebaba presentando una forma de hongo fluida y sin asperezas (Figura 4.6).

Figura 4.5. Acabado superficial en la probeta 7A-7C (sin calentamiento previo)
(Fuente: Propia)

Figura 4.6. Acabado superficial en la probeta 11A-11C (calentado el cobre a 210°C)
(Fuente: Propia)

En la micrografía con un aumento de 100X de la Figura 4.7, se aprecia que no hay formación de grietas en la intercara de unión de los metales, presenta varios sectores de coalescencia y relativamente pronunciados, creando una soldadura casi en todo el largo de la sección transversal de la unión.

Figura 4.7. Micrografía obtenida de la probeta 11A-11C a un aumento de 100X sin ataque previo
(Fuente: Propia)

En la figura anterior (Figura 4.7) se observa la formación de una delgada interface de mezcla con una tonalidad gris; y con un gris más claro casi de color blanco la zona afectada por el calor en el aluminio. La Figura 4.8 muestra que en la etapa de fricción donde se genera el calor por frotamiento entre las caras de los materiales a empalmar, además de formar puntos de muy fuerte coalescencia, hay cizallamiento y trasferencia de material de una superficie a la otra, en este caso particular del cobre hacia el aluminio.
Dependiendo del par torsional y la temperatura de la interfaz estos fragmentos tienden a crecer hasta formar una capa delgada de metal plastificado. El calor generado por la fricción y la presión que se aplica en el proceso FRW, provocan la deformación plástica de los metales, el enclavamiento mecánico, la difusión de elementos y la formación de una interfaz de unión metalúrgica, en la Figura 4.8 se distingue que se arrancó material pero no tuvo la temperatura adecuada ni presión para que ese fragmento de cobre se mezcle plásticamente con el aluminio.

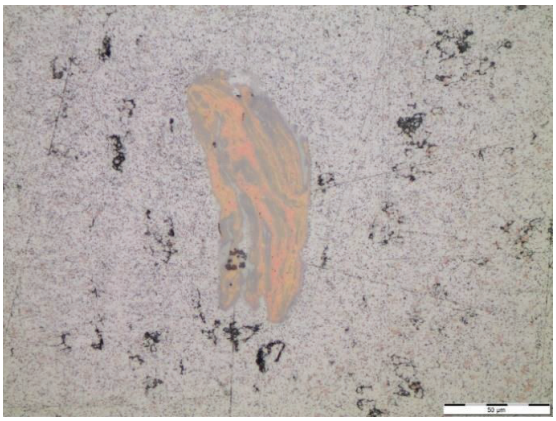


Figura 4.8. Fragmento de cobre en el aluminio, micrografía de la probeta 11A-11C con un aumento de 500X
(Fuente: Propia)

En la Figura 4.9, se observa el sentido ascendente de los hilos formados por la interfaz metalúrgica de unión, debido al sentido horario de giro de la varilla de cobre que genera la fricción entre los materiales. (Gou, You, Yuan, & Zhang, 2016)

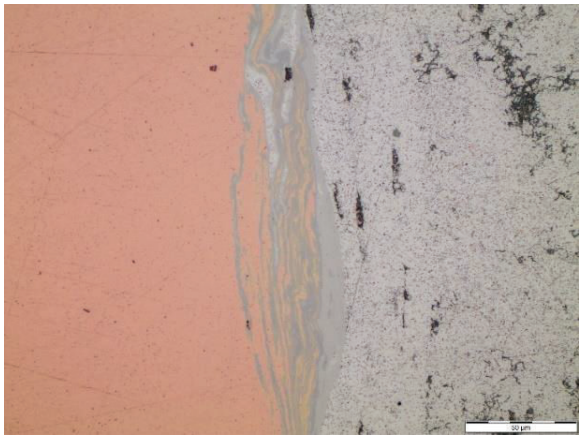


Figura 4.9. Micrografía sin ataque químico de la probeta 11A-11C a un aumento de 500X
(Fuente: Propia)

Al realizar el ataque químico para revelar la microestructura del cobre, la micrografía muestra la formación de cuatro zonas diferenciadas por sus tonalidades: tres de color rojizo y una de color negro (ver la Figura 4.10), en dicha micrografía se aprecia que las zonas más cercanas a la unión no permite observar el tamaño y la forma de grano.

En una soldadura por fricción las zonas más comunes y características que se forman son cuatro: la zona de unión o donde se da la coalescencia de materiales (ZU), la zona de vuelco o deformación plástica acompañada de energía térmica y referida como zona afectada termo-mecánicamente (ZATM); la zona afectada por el calor o térmicamente (ZAT), y la cuarta zona es la que se conoce como material base y no presenta cambia alguno en su estructura original (MB). (Cordero, Rodríguez, & Piña, 2012)

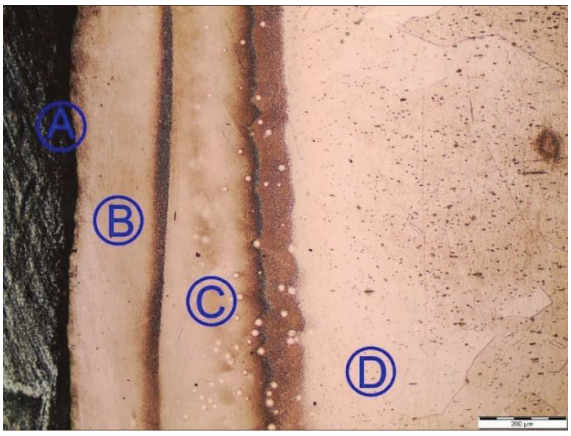


Figura 4.10. Micrografía de la probeta 11A-11C con ataque químico a un aumento de 100X. (A) Zona de unión (ZU), (B) Zona afectada Termo-mecánicamente (ZATM), (C) Zona afectada térmicamente (ZAT), y (D) Material Base (MB)
(Fuente: Propia)

Como se aprecia en la Figura 4.10, la microestructura del material base en el cobre es un conjunto de granos alargados, orientados por su forma de conformado y heterogéneos (MB). En la zona afectada termo-mecánicamente (ZATM) y la zona afectada térmicamente (ZAT) después de atacar químicamente la probeta, no revela su microestructura debido a que en estas dos zonas particularmente se encuentran los compuestos intermetálicos del tipo Cu_xAl_x que se forman de manera inherente en este proceso de soldadura en frío FRW.

El proceso de soldadura por fusión de cobre con aluminio no es factible, porque ambos materiales tienen una alta afinidad a temperaturas mayores a 120°C y producen fragilidad, baja resistencia y una alta resistencia eléctrica en los compuestos intermetálicos formados en sus interfaces. Por los motivos anteriormente mencionados, no se usa un proceso convencional de soldadura por fusión entre estos materiales, es preferible una soldadura en frío como la soldadura por fricción, varios estudios aclaran que en dicho proceso (FRW), se reducen en gran medida las imperfecciones que genera una soldadura por fusión y los componentes intermetálicos también son eliminados, pero la interfaz de soldadura formada en estado sólido de aluminio y cobre es susceptible a la nucleación y aumento de compuestos intermetálicos a temperaturas mayores a 120°C. Este proceso de formación de intermetálicos es directamente proporcional al aumento térmico, mientras más energía calórica, más acelerada es la nucleación y el crecimiento de compuestos intermetálicos. Los compuestos intermetálicos formados poseen enlace covalente no-metálico, motivo por lo que presentan una alta fragilidad y alta resistencia eléctrica en las zonas tentativas (Ver Figura 4.11) donde se forman los intermetálicos. (Abbasi, Karimi, & Salehi, 2001)

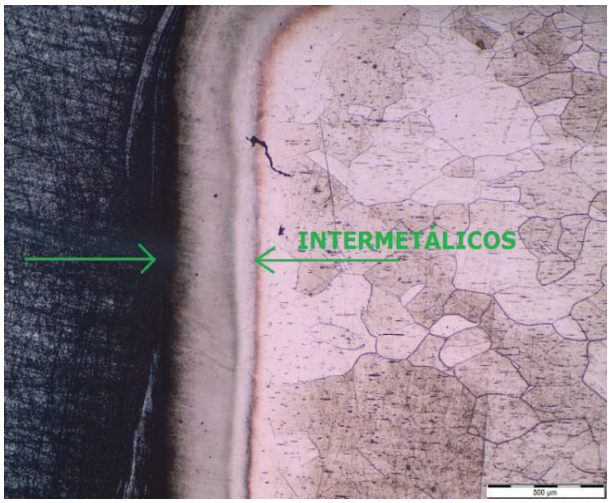


Figura 4.11. Micrografía a 50X de aumento, zona de intermetálicos
(Fuente: Propia)

Por la temperatura que alcanza la soldadura por fricción, la unión no se da por difusión de átomos, mucho menos por fusión, la unión obtenida es más una mezcla mecánica.

Según el estudio de varios autores, Aritoshi, M., Okita, K., Enjo, T., Ikeuchi, K. & Matsuda, F. (2009), muestran que la mayoría de los compuestos intermetálicos que se obtiene por la soldadura en frío de cobre y aluminio son: $CuAl_2$ en mayor proporción, el Cu_9Al_4 en menor cantidad que el anterior y por último el $CuAl$ con la mínima cantidad comparado con los dos anteriores (Aritoshi, Okita, Enjo, Ikeuchi, & Matsuda, 1991).

Para el análisis de tamaño de grano tanto del material base (cobre) y la zona cercana a la unión se realizó un procedimiento de determinación, aplicando la norma ASTM E 122, tomando en cuenta al procedimiento planimétrico de Jeffries en un área determinada, debido a que se utiliza factores para diferentes aumentos. Para conocer el número de granos se utiliza la siguiente ecuación:

$$N_A = f\left(N_{inside} + \frac{N_{intercep}}{2}\right) \quad \text{(Ec. 8)}$$

Donde:

N_A: Número de granos por milímetro cuadrado.

N_{inside}: Número de grano dentro del área.

$N_{intercep}$: Número de granos interceptados por el área.

f : Factor de Jeffries.

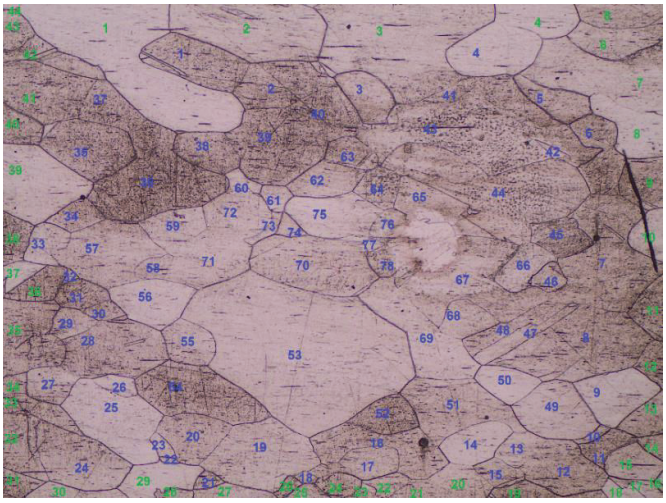


Figura 4.12 Número de granos interceptados y granos dentro del área
(Fuente: Propia)

Remplazando los valores obtenidos en la Figura 4.12 que tiene un aumento de 50X, posterior al conteo de granos en el material base, se procede al cálculo del número de

granos y el factor de Jeffries que depende del aumento de la micrografía, la obtención de este factor se especifica en el Anexo 2 y se obtiene el siguiente valor:

$$N_A = 0{,}5(78 + \frac{44}{2})$$

$$N_A = 50\ [\#\ granos\ /mm^2]$$

Para obtener el número de granos ASTM se remplaza el valor de N_A en la siguiente ecuación:

$$G = (3{,}321928\ log_{10} N_A) - 2{,}954 \quad \text{(Ec. 9)}$$

Donde:

G: Tamaño de grano ASTM

Remplazando los datos obtenidos en la Ecuación. 9

$$G = (3{,}321928\ log_{10}\ 50) - 2{,}954$$

$$G = 2{,}68$$

Para conocer el tamaño de grano de la zona cercana a la soldadura se realiza el mismo procedimiento con la micrografía que se encuentra en el Anexo 7, teniendo como resultado:

$$N_A = 65{,}25\ [\#\ granos\ /mm^2]$$

$$G = 3{,}07$$

Conforme a los valores obtenidos de las dos diferentes zonas, se puede indicar que no existe un cambio significativo en el tamaño de grano, ya que para este análisis se debe aproximar los valores de G para poder compararlos con los de la tabla de la norma ASTM E112 y que se muestra en el Anexo 3, de los principios de la soldadura por fricción expuestos en la sección 1.4. No debe existir un gran cambio tamaño de grano de la zona de unión, debido a que la temperatura que se genera no es muy alta, y es por eso que se considera al proceso FRW como un proceso de unión en frío (American Society for Testing Materials, 2014).

4.4. Microdurezas

Para la obtención de las durezas en la superficie tanto del material base como de la unión se aplica las indicaciones de la norma ASTM E384, una carga de 200 grf por un tiempo de 20 segundos, obteniendo varias medidas en la escala de dureza (Vickers). Todas las gráficas que se obtienen de este procedimiento de dureza, presentan el mismo comportamiento (Figura 3.9), los valores de dureza en el lado del Aluminio presentan un

valor de 40 a 60 HV característico del material, mientras que el Cobre presenta un valor de 80 a 100 HV, las mediciones de microdureza obtenidos en la zona cercana a la ZAT presenta valores en un rango de 100 a 110 HV, la dureza de los compuestos intermetálicos que se encuentran en esta zona (ZATM) son claramente superiores a los de la aleación de aluminio 6063 y de la varilla de cobre.

Se realiza tres mediciones de microdureza cercanas a la ZAT en la varilla de cobre y la aleación de aluminio (ver Figura 3.10) para varias probetas (4A-4C,11A-11C,15A-15C, 17A-17C y 18A-18C) obteniendo las figuras que se detalla en la sección 3.4 del presente documento, donde se obtienen valores en el rango de 60 a 100 HV para la varilla de cobre y de 50 a 100 HV en la aleación de aluminio, se presume que la variación de las microdurezas a lo largo de las zonas cercanas a la unión varían por la presencia de diferentes compuesto en la ZAT y por la irregularidad de la interface de unión, evaluando áreas muy cercanas a la zona de intermetálicos o alejadas respectivamente.

Existe una buena correlación entre la dureza y la distribución de las diferentes zonas causadas por el flujo de material y la interacción de los materiales base, presentando una curva similar para todas las probetas, donde los valores más altos de microdureza se dan en la ZATM y la ZAT, y los valores menores que corresponden a los del material base. Cabe recalcar que las variaciones de microdureza son comunes en toda soldadura y no son la excepción en este estudio (Ouyang, Yarrapareddy, & Kovacevic, 2006).

4.5. Microscopía electrónica

El análisis de microscopia electrónica se realiza para determinar los componentes intermetálicos u óxidos existentes en la soldadura por la presencia de durezas relativamente mayor a las durezas de los materiales bases en la zona de unión, el ensayo SEM (scanning electron microscopy), se realiza con un haz de energía de 20 kV, una emisión de corriente de 43,6 μAm y diferentes aumentos desde 100X hasta 750X. Con la microscopia electrónica se detalla el estudio de ciertos puntos de interés para conocer su composición química puntual (porcentaje en peso de los elementos) y tamaño de las partículas presentes en la unión.

En la Figura 4.13 se observa la interface entre el aluminio y el cobre, así como la formación de intermetálicos sobre el aluminio (la zona gris corresponde al Aluminio y la más brillante al cobre), en la parte inferior se puede apreciar además el resultado del porcentaje en peso que se obtiene de los diferentes elementos actuantes.

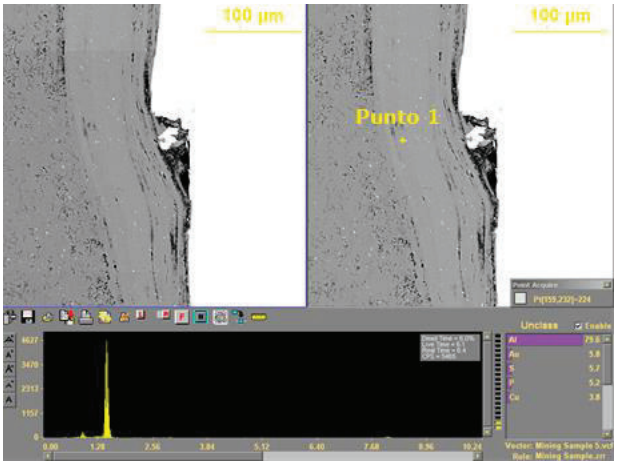


Figura 4.13. Microscopía electrónica de la probeta 11A-11C, análisis en la zona de intermetálicos en el aluminio cerca de la interface de unión con un aumento de 500X
(Fuente: Propia)

En las siguientes figuras se muestra la zona de interface, esto con el objetivo de determinar cómo se da la unión de las dos probetas.

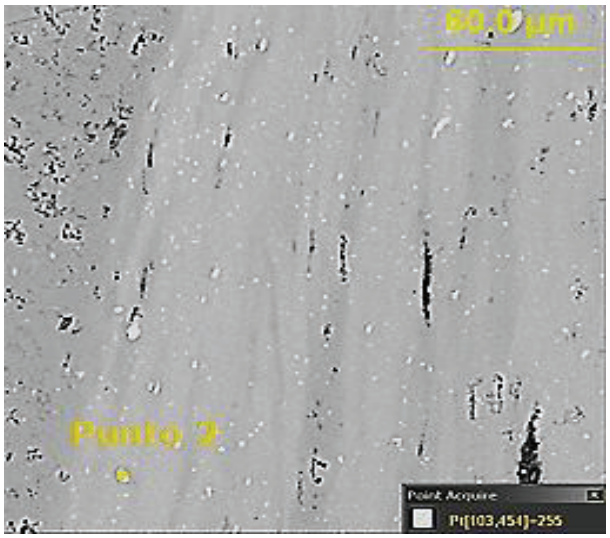


Figura 4.14. Microscopía electrónica de la probeta 11A-11C, análisis en la zona afectada térmicamente en la varilla de aluminio cerca de la interface de union, con un aumento de 750X
(Fuente: Propia)

La Figura 4.14 muestra la evaluación de un área de interés representada como “Punto 2” ubicada en la zona afectada térmicamente, que presenta una coloración grisácea más clara que la varilla de aluminio.

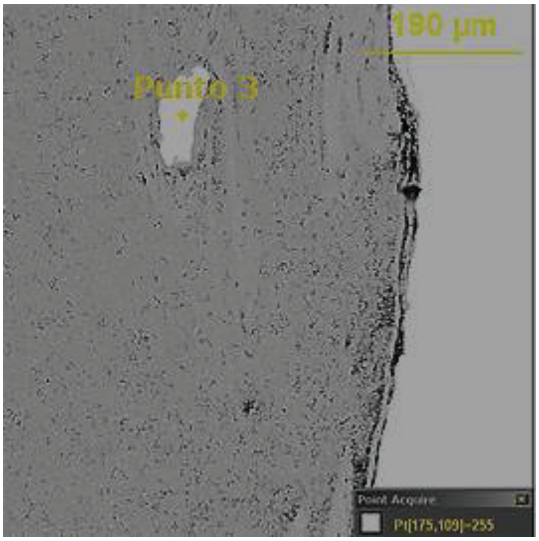


Figura 4.15. Microscopía electrónica de la probeta 11A-11C, partícula de cobre presente en la matriz de aluminio con un aumento de 250X
(Fuente: Propia)

En la Figura 4.15 se observa un fragmento de cobre (Punto 3) en la varilla de aluminio, que se encuentra alejado de la zona de unión misma que se distingue por su coloración grisácea a lo largo de la interface Cu-Al.

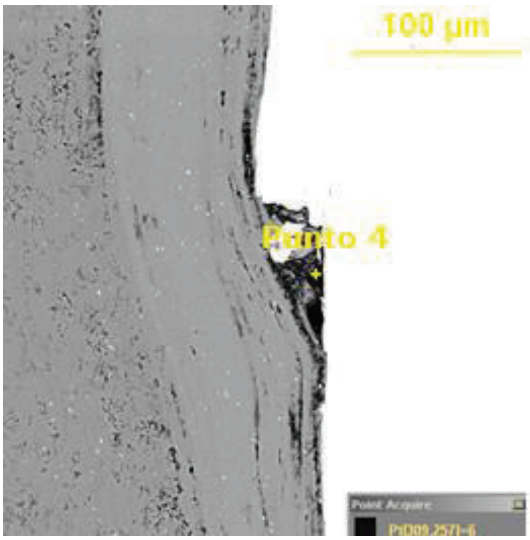


Figura 4.16. Micrografía de la probeta 11A-11C en la zona afectada termo-mecánicamente (intermetálicos) con un aumento de 500 X
(Fuente: Propia)

La Figura 4.16 analiza la zona afectada termo-mecánicamente (Punto 4), lugar donde se producen los compuestos intermetálicos que toman una coloración negra a lo largo de la interface de coalescencia. La tabla del Anexo X contiene los resultados del análisis de áreas puntuales de interés realizado por microscopía electrónica en la probeta 11A-11C

sin ataque químico, estas áreas fueron representadas por puntos en las Figuras anteriores (Figura 4.13 a Figura 4.16), los resultados son la composición en porcentaje de peso de los elementos químicos contenidos en dicha área.

El software del equipo de microscopía electrónica permite mediante el desplazamiento de un haz de luz sobre una superficie generar perfiles de concentración de elementos químicos. Los valores de la tabla del Anexo X y la descripción de la ubicación de las superficies puntuales de estudio, permite conocer los diferentes compuestos que hay en zonas importantes de la unión de los metales. En los puntos 1 y 4 (ver Figura 4.13 y Figura 4.16) de las zonas afectada térmicamente (ZAT) y termo-mecánicamente (ZATM) respectivamente, se encuentra un mayor número de elementos químicos, confirmando que la soldadura por fricción de la varilla de cobre y aleación de aluminio contiene algunos compuestos intermetálicos y que estos compuestos se forman en la ZAT y ZATM, siendo la zona afectada termo-mecánicamente de menor grosor aproximadamente de 357 μm de ancho (ver Figura AY, Tabla 3.20) que la zona afectada térmicamente cuyo valor es de 918 μm (ver Figura 3.6). La formación de intermetálicos quebradizos en las zonas cercanas a la coalescencia permite un degradamiento en la resistencia a la tracción en la unión. El punto 3 cuya localización se muestra en la Figura 4.15 y su cartografía de composición química para esta área puntual se muestra en la tabla del Anexo X, se observa que esta área corresponde a un fragmento de cobre, el cual posee una dimensión en su diagonal mayor de 125 μm (ver Figura AZ, Tabla 3.20) que por falta de presión y temperatura no logró realizar una mezcla mecánica de las probetas de cobre y aluminio. La presencia de fragmentos arrancados de la probeta de cobre en la varilla de aluminio, se debe al cizallamiento que se da en los materiales al momento de producir la rotación para generar el calor por fricción.

En el punto 3 se observa algo inusual y es la presencia de sodio (Na), el estudio de este punto en particular se realizó en la incrustación de una partícula o fragmento de la varilla de cobre electrolítico en la matriz de aluminio, motivo por el cual se esperaría encontrar elementos de la varilla de cobre en su mayoría y de la aleación de aluminio en menor proporción.

En el análisis de espectrometría por chispa se obtuvo la composición de la varilla de cobre (ver Anexo 4) y se observa que no contiene el elemento sodio, de acuerdo a la tabla de composición química de la aleación de aluminio (ver Tabla 1.4) tampoco presenta sodio en su composición, en la Tabla 1.4 se hace referencia a un porcentaje de 1,5% wt de varios elementos no especificados. Sin embargo en el análisis del área

puntual (punto 3) se encuentra un porcentaje de 11,8%wt de sodio, razón por la que se presume un dato erróneo.

Dentro de los compuestos obtenidos por el ensayo de microscopia electrónica detallados en el Anexo X, se observa que los elementos: oro (Au), calcio (Ca), azufre (S) y fosforo (P) no se encuentran señalados en la composición de las aleaciones de cobre y de aluminio respectivamente. Se propone tres hipótesis para determinar la presencia de estos elementos químicos: podrían estar presentes en el porcentaje de "varios" que se observa en la tabla de composición química de la aleación de aluminio 6063-T5 (Tabla 1.4) como elementos químicos no especificados de la aleación, se debería a la presencia de contaminantes durante el proceso FRW o a datos erróneos arrojados por el equipo de microscopia electrónica.

Después de detallar estas presunciones, se realiza un ensayo más específico (espectrometría de dispersión de energía de rayos X) para determinar la existencia de estos elementos o si se descarta estos resultados por el ensayo de microscopía electrónica. El ensayo realizado consiste en la inspección de zonas puntuales obtenidas en las regiones de interés (áreas afectadas térmicamente y termo-mecánicamente). La ubicación de referencia donde se realizó el análisis puntual se detalla en las figuras mostradas en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resultados de la espectrometría de dispersión de rayos X en la probeta 11A-11C

Espectrometría de dispersión de energía de rayos X	

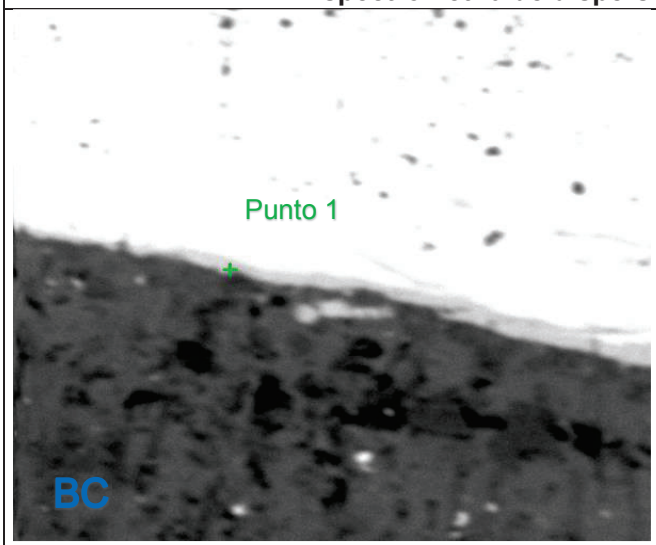
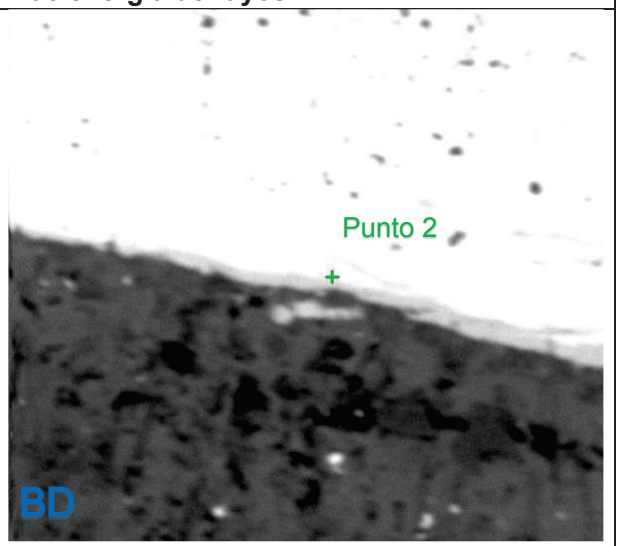

	

Figura BC. El punto 1 se encuentra en la zona de unión de la probeta de Cu-Al, se observa la zona afectada termo-mecánicamente, microscopía con aumento de 20 µm y sin ataque químico.	**Figura BD.** El punto 2 se encuentra en la zona termo-mecánica de la probeta de Cu-Al, en el lado de la aleación de cobre, se observa una coloración grisácea diferente a los materiales base, microscopía con aumento de 20 µm y sin ataque químico.

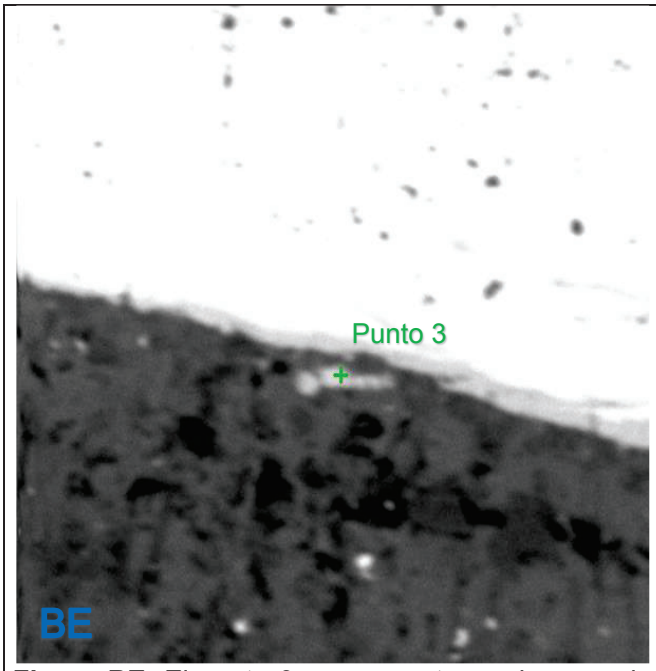


Figura BE. El punto 3 se encuentra en la zona de material base (aluminio), se observa un fragmento de cobre en lado de la varilla de aluminio, cerca de la zona de coalescencia, micrografía con aumento de 20 µm y sin ataque químico.

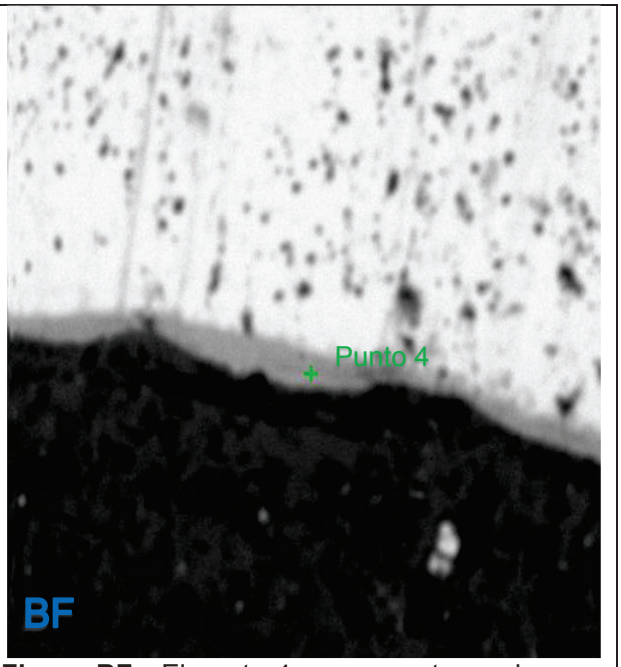


Figura BF. El punto 4 se encuentra en la zona afectada termo-mecánica en el lado de la varilla de cobre, se observa una coloración grisácea diferente a los materiales base, micrografía con aumento de 20 µm y sin ataque químico.

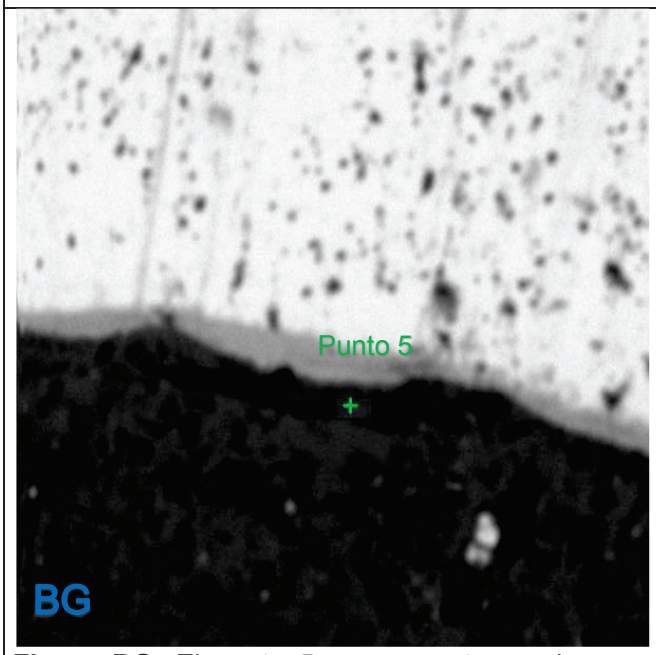


Figura BG. El punto 5 se encuentra en la zona termo-mecánica en el lado de la varilla de aluminio, cerca de la zona de unión, micrografía con aumento de 20 µm y sin ataque químico.

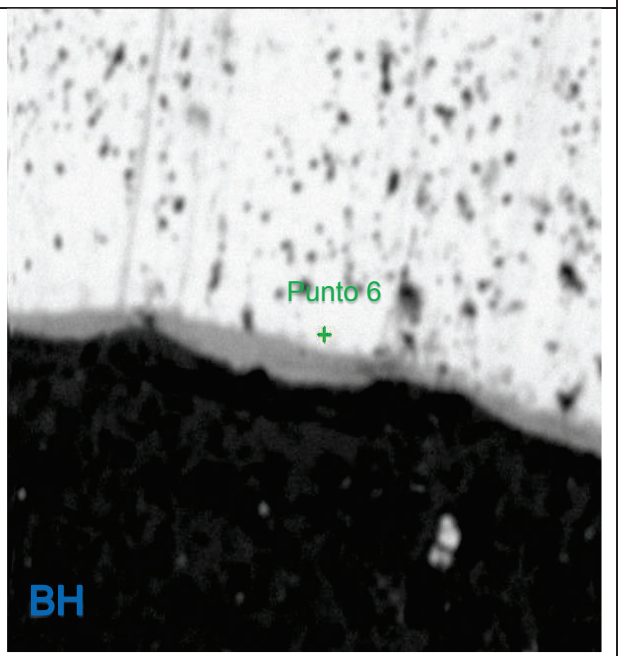


Figura BH. El punto 6 se encuentra en la zona térmica en el lado del material base (cobre), micrografía con aumento de 20 µm y sin ataque químico.

(Fuente: Propia)

El ensayo realizado en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional, tiene su principio físico de funcionamiento basado en la incidencia de un haz de rayos X sobre un cuerpo sólido sujeto a estudio. La muestra interactúa con el vector eléctrico de radiación X, creando así un choque de electrones entre la materia de estudio y el haz de rayos X, al interactuar los electrones (materia y haz de rayos X) generan el fenómeno de dispersión creando interferencias constructivas y destructivas. Esta dispersión da como resultado la difracción, la cual es interpretada por un patrón de intensidades características de la ubicación de los átomos dentro del cristal (MB).

Motivo por el que cada muestra cristalina posee un patrón de difracción único. Mediante un software el diagrama de difracción es interpretado y comparado con una base de datos de la ASTM (Asociación Americana para el Ensayo de Materiales) para determinar el posible elemento o compuesto que constituye la muestra (Universidad Nacional de la Plata, 2017).

Cada zona puntual de estudio entrega un diagrama de difracción de rayos X único, que determina los elementos y compuestos formados por el proceso de soldadura por fricción como se muestra en la Figura 4.17, en la lista de anexos se encuentra los diagramas de difracción para cada punto de estudio (ver Anexo XI).

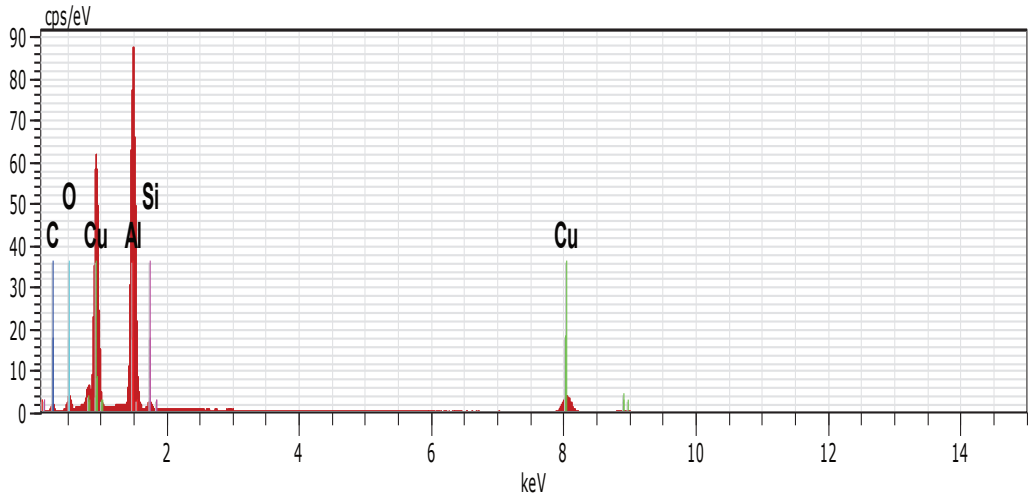


Figura 4.17. Diagrama de disperción de energía de rayos X realizado en la mezcla mecánica de Cu-Al en el punto 1 en la probeta 11A-11C.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 4.2 se observa los resultados de las cantidades de porcentaje en peso de los elementos contenidos en dichas áreas puntuales de estudio.

Tabla 4.2. Dispersión de rayos X en sólidos, distribución de elementos en varios puntos de la soldadura

Punto	Elemento	Energía	Porcentaje en peso
1	Al	15kV	45,71 wt.%
	Cu	15kV	42,40 wt.%
	C	15kV	9,28 wt.%
	Si	15kV	1,22 wt.%
	O	15kV	1,39 wt%
			100,0 wt.%
2	Al	15kV	20,71 wt.%
	Cu	15kV	72,21 wt.%
	C	15kV	5,93 wt%
	O	15kV	1,15 wt%
			100.0 wt.%
3	Al	15kV	58,69 wt.%
	Cu	15kV	31,73 wt.%
	C	15kV	7,41 wt%
	O	15kV	2,16 wt%
			100,0 wt.%
4	Al	15kV	47,48 wt.%
	Cu	15kV	40,87 wt.%
	C	15kV	7,24 wt%
	O	15kV	4,42 wt%
			100,0 wt.%
5	Al	15kV	80,09 wt.%
	O	15kV	9,65 wt.%
	C	15kV	8,73 wt%
	Cu	15kV	0,56 wt%
			100,0 wt.%
6	Cu	15kV	90,71 wt.%
	C	15kV	5,68 wt.%
	Al	15kV	2,16 wt%
	O	15kV	1,45 wt%
			100,0 wt.%

(Fuente: DEMEX)

Al comparar los resultados obtenidos por EDS (Energy Dispersive Spectrometer) y los resultados entregados por SEM (Scanning Electron Microscopy), se identifica que los elementos: oro (Au), calcio (Ca), sodio (Na), fósforo (P) y azufre (S) no pertenecen al estudio del presente trabajo; y que se debería a un error en la interpretación en la estructura cristalina de compuestos intermetálicos u óxidos con elementos que presentan similitud en su forma de empaquetamiento (Ver Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Nomenclatura de la estructura cristalográfica

Elemento	Símbolo de Pearson	Grupo espacial	Prototipo
Au	cF4	$Fm\bar{3}m$	Cu
αCa	cF4	$Fm\bar{3}m$	Cu
βCa	cI2	$Im\bar{3}m$	W
αNa	hP2	$P6_3/mmc$	Mg
βNa	cI2	$Im\bar{3}m$	W
P (negro)	oC8	Cmca	P (negro)
αS	oF128	Fddd	αS
βS	mP64	$P2_3/c$	βS

(The International materials information society, 2008)

En la Tabla 4.3 se detalla el símbolo de Pearson correspondiente a los elementos químicos de interés (Au, Ca, Na, P y S), el símbolo de Pearson relaciona los siete sistemas cristalinos (triclínico, monoclínico, ortorrómbico, tetragonal, hexagonal, romboédrico y cúbico) y la simetría traslacional de los átomos dentro de la celda unitaria (primitiva, red centrada en el interior, red centrada en todas las caras y red centrada en la base) mediante una codificación de letras y números; una letra minúscula para el tipo de cristal, una letra mayúscula para para el tipo de red (simetría traslacional) y un número que señala la cantidad de átomos contenidos en la celda unitaria, con esta codificación (símbolo de Pearson) se puede identificar el tipo de cristal al que pertenece el elemento químico dentro de los 14 tipos de cristales existentes (ver Anexo 8) (Universidad Politécnica de Valencia, 2010). El símbolo de Pearson empleada por el Metals Handbook de la ASM detalla las 14 redes de Bravais que se muestra en el Anexo 9 (The International materials information society, 2008).

En el estudio de espectrometría de energía de dispersión de rayos X (EDS), en los seis puntos analizados se observa (ver Tabla 4.2) que en las zonas cercanas a la coalescencia de materiales se obtiene elementos de cobre (Cu), aluminio (Al), carbono (C), silicio (Si) y oxígeno (O). En el área de estudio realizado en la intercara de unión,

referido al punto 1 como se muestra en la Figura BC de la Tabla 4.1, el estudio muestra que hay oxido de silicio (SiO_2) con un porcentaje en peso de un 2,61% del total del área de estudio.

Con los valores obtenidos por EDS autores como: Aritoshi y Sahin generan una tabla de la composición estimada del espectro de dispersión de rayos X, para posteriormente utilizar el diagrama de equilibrio Al-Cu y determinar los compuestos intermetálicos obtenidos en la soldadura por fricción de materiales disímiles (Aritoshi, Okita, Enjo, Ikeuchi, & Matsuda, 1991).

En la siguiente Tabla 4.4 se detallan los valores estimados del análisis de difracción de rayos X.

Tabla 4.4. Composición química estimada del EDS, en los puntos 1 a 6 de la probeta 11A-11C.

Punto	Elemento	Energía	Porcentaje en peso
1	Al	15kV	46,0 wt.%
	Cu	15kV	54,0 wt.%
			100,0 wt.%
2	Al	15kV	20,0 wt.%
	Cu	15kV	80,21 wt.%
			100.0 wt.%
3	Al	15kV	67,0 wt.%
	Cu	15kV	33,0 wt.%
			100,0 wt.%
4	Al	15kV	46 wt.%
	Cu	15kV	54 wt.%
			100,0 wt.%
5	Al	15kV	80,0 wt.%
	Cu	15kV	20,0 wt%
			100,0 wt.%
6	Cu	15kV	90,0 wt.%
	Al	15kV	10,0 wt%
			100,0 wt.%

(Fuente: Propia)

El estudio realizado por EDS a la probeta 11A-11C con un calentamiento previo a la varilla de cobre a 210°C, permite por su composición el uso del diagrama de fase Aluminio-Cobre para la identificación de los posibles compuestos intermetálicos, la ubicación de los puntos 1 a 6 se muestran en la Figura 4.18.

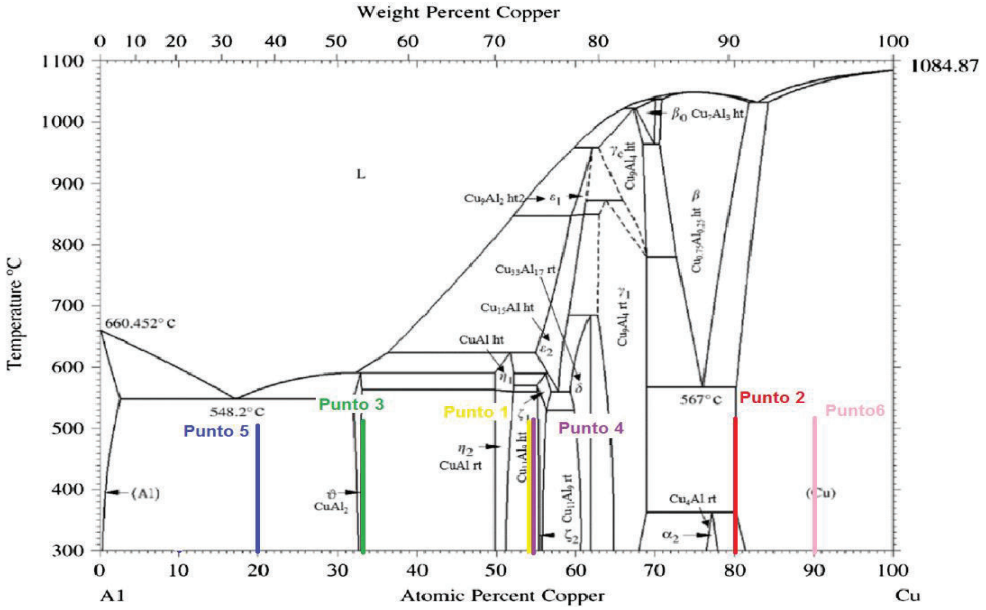


Figura 4.18. Diagrama de fase Aluminio-Cobre
(Kah, Vimalraj, Martikainen, & Souranta, 2015)

En los Puntos 1 y 4 ubicados en la zona de coalescencia se encuentra una fase de $Cu_{11}Al_9$ (Ver Tabla 4.5), este tipo de compuesto provoca en la unión: el incremento de la dureza, fragilidad de la soldadura, y propicia a la formación de defectos (micro-grietas) que a lo largo de la vida útil de la soldadura ocasionará que la misma falle (Kah, Vimalraj, Martikainen, & Souranta, 2015).

En el análisis del Punto 3 se observa la presencia del compuesto intermetálico $CuAl_2$, dicho intermetálico se forma en la periferia del fragmento de cobre incrustado en la matriz de la varilla de aluminio, generando el aumento de la microdureza en la ZAT.

En la Tabla 4.5 se detalla los compuestos intermetalicos presentes en cada uno de los puntos de estudio.

Tabla 4.5. Compuestos intermetálicos presentes en los puntos 1 a 6.

Ubicación	Al	Cu	Posible fase
Punto 1	46,0 %	54,0 %	$Cu_{11}Al_9$ (Saturado)
Punto 2	20,0 %	80,0 %	Cu_4Al + Cu
Punto 3	67,0 %	33,0 %	$CuAl_2$ (Saturado)
Punto 4	46,0 %	54,0 %	$Cu_{11}Al_9$ (Saturado)
Punto 5	80,0 %	20,0 %	Al + $CuAl_2$
Punto 6	10,0 %	90,0 %	Cu

(Fuente: Propia)

Adicionalmente se realiza un estudio EDS sobre una área que contiene las diferentes zonas que presenta la soldadura por fricción de materiales disimiles (MB, ZAT, ZATM y la ZU).

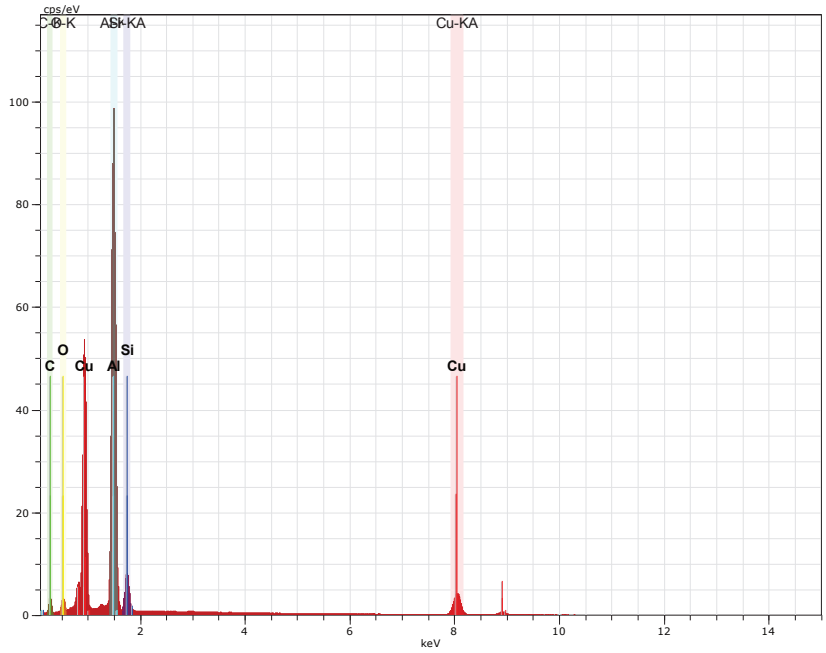


Figura 4.19. Diagrama de dispersión de rayos X realizado en la probeta 11A-11C en una área representativa.
(Fuente: DEMEX)

En la Figura 4.19 se observa el espectro de dispersión de rayos X, característico para cada elemento contenido en el área de estudio, los elementos químicos con mayor concentración de porcentaje se muestran en la figura como picos elevados, permitiendo analizar los tipos de elementos y su ubicación (ver Figura 4.20).

Cada elemento posee su empaquetamiento cristalino único, el ensayo EDS permite con la ayuda de un software la comparación de la energía de dispersión o difracción de rayos X que genera dicho material con un color del espectro visible. La superposición de cada uno de los colores de los elementos presentes en el área de estudio (ver Anexo XII), permite generar una sola micrografía en la que se observa la mezcla de los colores correspondientes a cada elemento.

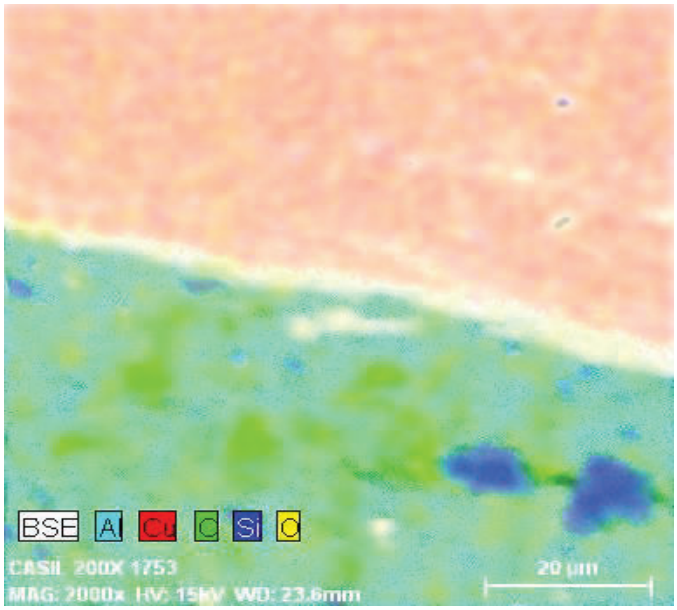


Figura 4.20. Cartografía de la ubicación de los diferentes elementos presentes en la soldadura FRW de Cu-AL.
(Fuente: DEMEX)

El la Figura 4.20 se observa la presencia de silicio (color azul) en la varilla de aluminio (color magenta) esto debido a la composición química de la aleación de aluminio que posee un alto porcentaje de silicio al ser producida. La carencia de aluminio (Color magenta) en la matriz de la varilla de cobre (color marrón) y viceversa indica que no existe difusión de átomos, por falta de energía (térmica) determinando así que la unión se da por una mezcla mecánica en frio.

Adicionalmente se observa la presencia de carbono (color verde) en la superficie de la varilla de aluminio, el carbono está presente debido a la contaminación que se genera en la etapa de calentamiento de la varilla de cobre con la llama oxiacetilénica, este elemento (carbono) se transfiere hacia la superficie del aluminio en el proceso de pulido de las diferentes probetas.

4.6. Análisis comparativo

Un total de 19 soldaduras fueron realizadas bajo el proceso FRW variando ciertos parámetros (temperatura de precalentamiento, material que se ubica en el mandril móvil, reducción del área trasversal) que se pueden controlar en este tipo de soldadura. Al realizar el examen visual en la zona de unión de las probetas de Cu-Al, las probetas sin calentamiento previo fueron las únicas que presentaron imperfecciones en la rebaba formada, las demás probetas presentan una deformación de la varilla de aluminio en forma de hongo, esto es de esperar ya que la varilla de cobre posee una dureza elevada en comparación con la dureza de la aleación de aluminio.

Los ensayos de microdureza realizados a las probetas de Cu-Al, permiten conocer la variación típica de dureza a lo largo del eje longitudinal en zonas cercanas a la soldadura, el pico de mayor resistencia a la penetración se obtiene en la zona cercana a la unión, indicando así que en esta zona, se genera otro tipo de compuesto con mayor dureza que los materiales bases, este pico de dureza aproximadamente tiene un valor de 94,17 HV (para la probeta 11A-11C), estos valores máximos de dureza varían según la probeta y la cercanía en la que se haga la medición de microdureza a la zona de coalescencia debido a que el proceso FRW genera una intercara de unión de forma irregular, existen indentaciones muy cercanas a la zona de coalescencia, razón por lo que las durezas obtenidas están dentro del rango de 90 a 110 HV, en estas zonas se considera que contienen un cierto porcentaje del compuesto intermetálico Cu9Al4 aumentado considerablemente la dureza de la unión. En las figuras de todas las probetas ensayadas se observa (ver sección 3.4) que la dureza en la zona próxima a la unión excede al valor de dureza de sus materiales base.

En el análisis de las micrografías correspondientes a las probetas de Cu-Al, se corroboró la formación de cuatro zonas: la zona de interface de unión, material base, las zonas afectadas termo-mecánicamente y la zona afectada por el calor, esto quedó en evidencia al utilizar el reactivo para revelar la microestructura de la varilla cobre, mostrando la microestructura del material base, pero a lo largo y en la cercanía a las zonas anteriormente mencionadas no se puede apreciar el grano formado, lo que implica que en estas zonas hay otro tipo de compuestos diferentes a la estructura de su material base, la interface Cu-Al es susceptible a la nucleación y crecimiento de compuestos intermetálicos a temperaturas superiores a 120 °C, Este proceso de crecimiento de intermetálicos se activa térmicamente, debido a que al aumentar la temperatura de unión, la nucleación y el crecimiento de los compuestos se aceleran, generando un cambio de color rojizo a amarillo (ver Figura Z, Tabla 3.3) (Ouyang, Yarrapareddy, & Kovacevic, 2006).

En las micrografías de la probeta 11A-11C se calculó el tamaño de grano del material base (aleación de cobre) y se comparó con el grano formado en las cercanías de la zona afectada térmicamente (ZAT), determinando que el grano no tiene un crecimiento significativo al realizar la soldadura por fricción, manteniendo el tamaño 3 que hace referencia la norma ASTM. Para el caso del aluminio no se observa en las metalografías que su tamaño de grano cambie por el proceso de FRW, varios autores han presentados estudios en los que dan como resultado que la microestructura del aluminio no cambia debido a la recristalización dinámica por la deformación plástica.

Para profundizar el análisis de la ZAT y ZATM, se realiza el ensayo de microscopia electrónica en la probeta que presenta mejor coalescencia de materiales (11A-11C),

determinando la presencia de varios elementos químicos en las zonas anteriormente mencionadas, este análisis demuestra la presencia y la formación de regiones de compuestos intermetálicos, estos compuestos debido a su naturaleza de enlace no-metálico covalente y del proceso en sí de unir materiales disímiles por el método de Fricción con volante continuo, son obtenidos de manera constitutiva, los porcentajes en peso obtenidos y con el estudio de varios autores se puede identificar los tres principales intermetálicos que se forman al soldar cobre y aluminio formándose: $CuAl_2$, Cu_9Al_4 y $CuAl$.

La formación de compuestos intermetálicos ocasionan en la soldadura fragilidad de la unión, así con los ensayos de tracción realizado a las probetas obtenidas por la soldadura en frio por fricción, se determina que la fractura se realiza en la zona de soldadura aproximadamente con un esfuerzo de 107,92 MPa menor al esfuerzo mínimo del aluminio, el cual posee una resistencia ultima a la tracción de 136,3 MPa. Este tipo de compuestos intermetalicos pueden aportar a la soldadura de materiales disimiles ventajas (aumento de la dureza y conductividad térmica) o desventajas (generación de micro-grietas, fragilidad de la soldadura) generando un costo adicional en la producción, debido a que toda soldadura de materiales disímiles en estado sólido necesita de un tratamiento térmico para disminuir la presencia de los compuestos intermetálicos, para mejorar la calidad de la soldadura.

Por a los ensayos realizados se puede indicar que los resultados en la unión son aceptables ya que en los estudios realizadas anteriormente como: en la fabricación de la máquina de soldadura por fricción (Arguello & Paredes , 1987) se trató de soldar cobre y aluminio, sin embargo no se pudo realizar este tipo de unión, y en el estudio realizado por Almeida (1989) se logra la unión cobre y aluminio 1100 con mejores resultados en el ensayo de tracción, cabe recalcar que en ningún estudio posterior en el Ecuador, se realizó un análisis metalográfico de la soldadura para poder caracterizar la unión. Debido a que la soldadura que se realizó puede soportar cargas bajas (ensayo de tracción), este tipo de unión puede aplicarse en la fabricación de contactos eléctricos de alto volteje que necesitan una alta conductividad eléctrica y térmica, que los dos materiales (cobre y aluminio) brindan al unirse (Segal, 2010).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- En el presente proyecto se logró la unión de materiales disímiles (cobre electrolítico –aluminio AA6063) cambiando variables que permiten mejorar la unión, el proceso de soldadura FRW es un método eficiente ya que reduce tiempos de producción y proporciona buenas propiedades mecánicas en la unión.
- La mejor unión de los materiales Cu-Al se logra utilizando las siguientes variables de soldadura: precalentamiento de la varilla de cobre electrolítico a 210 ^{o}C, velocidad de rotación de 1800 RPM, tiempo de soldadura de 21 s, presión de pre-forja de 600 lbf y una presión de forja de 600 lbf.
- En este proceso de unión no se genera cambio en la estructura de los materiales base, el tamaño de grano del cobre es el mismo y la estructura del aluminio no cambia por la recristalización dinámica del proceso FRW.
- La formación de compuestos intermetálicos es inherente en este proceso de soldadura FRW, debido a que la temperatura para la formación de dichos compuestos es relativamente baja (120°C), estos compuestos no se pueden eliminar de la zona de coalescencia pero existen tratamientos térmicos que pueden controlar o disminuir su aparición en la unión.
- Se puede considerar la presencia del compuesto intermetálico CuAl cerca de la unión, por el porcentaje en peso que se obtiene del análisis de micrografía electrónica, este tipo de compuesto endurece la zona cercana a la soldadura, debido a que se trata de un compuesto saturado que se encuentra detallado en el diagrama de equilibrio Al-Cu (ver Figura 4.16), estos compuestos generan una alta medida de dureza y degradan la soldadura ya que son compuestos quebradizos.
- La formación de fases frágiles debido a los compuestos intermetálicos se pueden apreciar por la variación de dureza que se obtiene en la interfaz 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 termo-mecánicamente.
- En la combinación de materiales disimiles es mucho más propensa la formación de defectos en la intercara de unión, tales como óxidos que se forman en el aluminio o vapor de agua que generan una unión pobre. Esto se muestra en el ensayo por EDS, donde se observa la presencia de oxigeno hasta un 9,65% de

porcentaje en peso, y se confirma la presencia de óxido de silicio (SiO_2) en la intercara formada en la zona de soldadura.

- Al inspeccionar el encogimiento axial de los materiales soldados se observa que: la máxima deformación tiene lugar en el aluminio y el cobre no sufre deformación apreciable, esto se debe a que el cobre electrolítico posee una dureza más alta. Los materiales duros no son tan factibles de soldar por fricción, debido a su inherente bajo coeficiente de fricción y su baja forjabilidad.
- En el análisis micrográfico se observa que la coalescencia de los materiales no tiene lugar en toda la superficie de contacto Cu-Al, hay zonas en las que no se logra la unión de los materiales, esto se debe a varias condiciones: craqueo térmico (zonas no unidas por la diferencia en el coeficiente de expansión), falta de unión que se produce en el proceso FRW, lo anteriormente mencionado se presenta por falta de control en las variables y limitaciones para juntar cobre electrolítico y aluminio 6063-T5.
- El ancho de las zonas ZAT Y ZATM determinan el comportamiento de la unión cuando las muestras son sometida a cargas de tracción, ya que en estas zonas se encuentran los compuestos intermetalicos, las probetas que presentan los valores más bajos en el ensayo de tracción presentan un valor de 390 µm correspondiente al ancho de la ZAT y ZATM, siendo un valor crítico que permite que la resistencia del enlace se reduzca drásticamente, determinando el comportamiento quebradizo de la soldadura.

5.2. Recomendaciones

- Para mejorar el estudio de la soldabilidad de Cu-Al, es necesario realizar una medición del incremento o decremento de la conductividad eléctrica de la zona soldada, lo que permitirá definir el grado de confiabilidad de la unión así como el efecto Joule que puede generar cuando se encuentra en operación este elemento.
- Es recomendable aumentar la presión de forja para soldar estos materiales porque presenta fragmentos incrustados de cobre en el aluminio, que por ausencia de presión y temperatura no se logra obtener una coalescencia de materiales plastificados, la velocidad debe disminuir para aumentar el tiempo de calentamiento generando así que suba la temperatura por la presión y fricción entre sus caras.
- Es recomendable aumentar el tiempo de calentamiento y mantener las condiciones de velocidad angular y presión expuestas en el presente trabajo, al

aumentar el tiempo de calentamiento genera un incremento en la deformación plástica y aumenta el área de unión de los materiales.

- Presenta fragmentos incrustados de cobre en el aluminio, que por ausencia de presión y temperatura no se logró obtener una coalescencia de materiales plastificados, así es recomendable disminuir la velocidad de rotación del mandril giratorio para aumentar el tiempo de calentamiento, para que suba la temperatura de los materiales por la fricción entre las caras en contacto.
- Se debe complementar el estudio con un análisis de difracción de rayos X, para identificar con exactitud los compuestos intermetálicos que se encuentran en las zonas generadas por la unión de materiales disímiles por el método FRW.
- Para reducir las fases frágiles (compuestos intermetalicos) es necesario realizar un tratamiento térmico para que dichas fases no se produzcan o se disuelvan en su gran mayoría, para ello se recomienda el calentamiento de los materiales previo a su soldadura que permitan alcanzar un equilibro a la temperatura que se producen la transformación de las fases frágiles.
- Al realizar el ataque químico del aluminio para detallar mejor la microestructura y el tamaño de grano se debe realizar el ataque con un reactivo cuyos componentes son: 50 ml de reactivo Poulton, 25 ml de HNO_3 y 40 ml de una solución de 3 g de ácido crómico por 50 ml de agua destilada.
- Para el precalentamiento y montaje del cobre en las mordazas de la máquina de soldadura por fricción se debe realizar en un ambiente controlado ya que al manipular la probeta previamente calentada disminuye su temperatura considerablemente.

6. BIBLIOGRAFÍA

Abbasi, M., Karimi, A., & Salehi, M. (2001). Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process. *Journal of alloys and compounds, 319*, 233 – 241.

Aguilar, J. (2013). *Biblio3*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2016, de http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/19.pdf

Almeida, M. (1989). *Soldadura por friccion de materiales disímiles.* Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero mecánico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica , Quito, Ecuador.

American Society for Metals. (2011). *Joining: Understanding the Basics.* (F. Campbell, Ed.) USA: Autor.

American Society for Testing Materials. (2011). *ASTM E3 Standard Guide for Preparation of metallographic specimens.* USA: Autor.

American Society for Testing Materials. (2014). *ASTM E112. Standar Tests Methods for Determining Average grain size.* USA: Autor.

American Society for Testing Metals. (2014). *ASTM E384 Standar Test method for Microindentation Hardness of Materials .* USA: Autor .

American Society for Testing Metals. (2016). *ASTM E4 Practice for Force Verification of Testing Machines .* USA: Autor .

American Society of Testing Metals . (2016). *ASTM E8 Standard Test Methods for Tension Testing of Metalic Materials .* USA: Autor .

American Welding Society. (2010). *Standar Welding Terms and Definitions.* New York.

Arguello, A., & Paredes , L. (1987). *Diseño y construcción de una máquina para soldar por fricción.* Proyecto previo a la obtención del titulo de ingeniero mecánico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica , Quito, Ecuador.

Aritoshi, M., Okita, K., Enjo, T., Ikeuchi, K., & Matsuda, F. (1991). Friction welding of oxygen free copper to pure aluminium. *Journal of the Japan welding society, 9*(4), 3 – 10.

ASM International. (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys.* Ohio: Autor.

Ávila , J., Franco, F., & Jaramillo, H. (2012). Evaluación de la resistencia a la tensión y a la fatiga de uniones soldadas por fricción agitación de la aleación de magnesio AZ31B. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 32*(1), 71-78.

Budynas, R., & Keith, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.* México DF, México: McGraw-Hill.

Cavazos, J. (1998). *Tratamieto térmico de una aleación de aluminio 6063.* Previo a la obtención del título de doctor en ingeniería de materiales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Nuevo León.

CEDAL. (2008). *Seteco.* Recuperado el 9 de Septiembre de 2016, de http://www.setecoecuador.com/media/archivos_descargables/Seteco_CEDAL_Catalogo_de_Perfiles_2008.pdf

Claudio. (2015). Recuperado el 12 de Octubre de 2016 , de http://historiaybiografias.com/el_cobre/

Cordero, G., Rodríguez, R., & Piña, L. (2012). Determinación del tiempo en la etapa de calentamiento para obtener la union de un aluminio AA 6063 soldado por fricción. *Revista Digital de Investigación y Postgrado, II*, 347-362.

Departamento de Metalurgia Extractiva . (2016). *Resusltados de análisis por Espectrometría de Chispa.* Escuela Politécnica Nacional, Materiales, Quito.

Ferrera, A. (2016). *Materiales*. Recuperado el 13 de Noviembre de 2016, de https://sites.google.com/site/materialestecnologiaaramo/1-metales-y-aleaciones/b-5--aluminio

Fountcuberta, J. (1985). La Electroscopía Mossbahuer Principios y Aplicaciones. *Revista colombiana de Química, 14*(1 - 2), 99-115.

Fraunhofer-Gesellschaft. (2015). *Fraunhofer*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2016, de https://www.fraunhofer.de/en.html

Gou, W., You, G., Yuan, G., & Zhang, X. (2016). Microstructure and mechanical properties of dissimilar inertia friction welding of 7A04 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy. *Journal of alloys and compounds., 30*, 1 - 11.

Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna.* Mexico DF: Pearson.

Hould , P. (1998). *Tecnología de los procesos de soldadura.* Barcelona: Ceac.

Kah, P., Vimalraj, C., Martikainen, J., & Souranta, R. (2015). Factors influencing Al-Cu weld properties by intermetallic compound formation. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering.*

Kawai, G., Ogawa, K., & Tokisue, H. (1997). *Isope.* Recuperado el 25 de Noviembre de 2016, de http://www.isope.org/publications/journals/ijope-8-2/abst-8-2-p144-JC-208-Kawai.pdf

López , L. (2013). *Soldadura por fricción.* Universidad del BIO-BIO, Departamento de ingeniería mecánica, Santiago, Chile.

Mackenzie, S., & Totten, G. (2006). *Analytical Characterization of aluminium, stell and super alloys.* New York, USA: Taylor & Francis Group.

Maffia, E. (2013). *Scribd.* Recuperado el 11 de Noviembre de 2016, de https://es.scribd.com/doc/298938092/Cobre-y-Sus-Aleaciones

Méndez, M. (2011). *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 previo a la obtención del título de ingeniero metalúrgico, Universidad Nacional Experimental Politécnica ¨Antonio José de Sucre¨, Barquisimeto, Venezuela.

Ouyang, J., Yarrapareddy, E., & Kovacevic, R. (2006). Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper. *Journal of Materials Technology, 172*, 10-11.

Pender , J. (1989). *Soldadura* (Tercera ed.). Mexico: McGraw-Hill.

Ratkovic, N., Sedmak, A., Jovanovic, M., Lazic, V., Nokolik, R., & Krstic, B. (2009). *Quality analysis of Al-Cu joint realized by friction welding.* Univerzitet u Kragujevcu, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Servia.

Sahin, M. (2010). *Joining of aluminiun and copper materials with friction welding.* University of Trakya, Mechanical Engineering Department, Edime, Turkey.

Sathiya, P., Aravindan, S., & Noorul, A. (2004). *springerlink.* Recuperado el 26 de Noviembre de 2016, de http://www.springerlink.com/content/btwbr69ymd7gm1kc/.

Segal, B. (2010). *US. Departament of Energy.* Recuperado el 12 de Febrero de 2017, de Inertial welding applications: https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Events/2010/ods/Bill_Segal.pdf

Shigley. (2009). *Diseño en ingeniería mecanica.* Mexico: McGraw-Hill.

The American Society for Metals. (1993). *ASM Handbook: Welding brazing and soldering* (Vol. VI). USA: Autor.

The International materials information society. (2008). *ASM Handbook: Handbook, Alloy Phase Diagrams* (Vol. 6). USA: Autor.

Universidad Nacional de la Plata. (2017). *SEDICI*. Recuperado el 4 de Marzo de 2017, de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2681/IV_-_T%C3%A9cnicas_de_caracterizaci%C3%B3n._Conceptos_generales.pdf?sequence=8

Universidad Politécnica de Valencia. (2010). *Universidad Politécnica de Valencia*. Recuperado el 9 de Febrero de 2017, de http://personales.upv.es/~avicente/curso/unidad3/naturaleza2.html

7. ANEXOS

ANEXO I

TABLA DE VALORES PARA LAS GRÁFICAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN, PROBETA 3A-3C

Fuerza [N]	Distancia [mm]	Fuerza [lbf]	Área [mm2]	Área [in2]	Esfuerzo
1127,8	2,34	253,552158	149,566815	0,23182903	1,09370324
1371,5	2,6	308,340827	149,566815	0,23182903	1,33003546
1503,6	2,86	338,039568	149,566815	0,23182903	1,45814169
1720,8	3,21	386,870504	149,566815	0,23182903	1,66877508
1883	3,57	423,336331	149,566815	0,23182903	1,82607129
2091,6	3,93	470,233813	149,566815	0,23182903	2,02836469
2298,7	4,28	516,794065	149,566815	0,23182903	2,22920344
2451,5	4,53	551,146583	149,566815	0,23182903	2,37738384
2736,7	4,88	615,265288	149,566815	0,23182903	2,6539614
2987,3	5,22	671,605216	149,566815	0,23182903	2,89698501
3332,8	5,6	749,280576	149,566815	0,23182903	3,23203951
3789,2	6	851,888489	149,566815	0,23182903	3,67464118
4066,6	6,38	914,253597	149,566815	0,23182903	3,94365455
4422,8	6,73	994,334532	149,566815	0,23182903	4,28908556
4818,2	6,97	1083,22842	149,566815	0,23182903	4,67253144
5229,8	7,3	1175,76439	149,566815	0,23182903	5,07168755
5599,5	7,67	1258,8804	149,566815	0,23182903	5,43021041
6137,8	8,05	1379,90108	149,566815	0,23182903	5,952236
6586,7	8,44	1480,82284	149,566815	0,23182903	6,38756441
7097,3	8,97	1595,61601	149,566815	0,23182903	6,88272745
7579,1	9,41	1703,93435	149,566815	0,23182903	7,3499612
7934,9	9,77	1783,92536	149,566815	0,23182903	7,6950043
8408	10,23	1890,28777	149,566815	0,23182903	8,15380108
8967,4	10,68	2016,05216	149,566815	0,23182903	8,69628875
9464,2	11,17	2127,74281	149,566815	0,23182903	9,178069
9719,5	11,4	2185,13939	149,566815	0,23182903	9,42565052
10137	11,87	2279,0018	149,566815	0,23182903	9,83052825
10409	12,13	2340,15288	149,566815	0,23182903	10,0943049
10670	12,43	2398,83094	149,566815	0,23182903	10,3474141
221,1	12,43	49,7077338	149,566815	0,23182903	0,21441549

TABLA DE VALORES PARA LAS GRÁFICAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN, PROBETA 3A-3C

Fuerza [N]	Distancia [mm]	Fuerza [lbf]	Área [mm2]	Área [ft2]	Esfuerzo
25,043	0,8229	5,630170863	151,524048	0,234	0,024060559
50,658	1,2645	11,38893885	151,524048	0,234	0,048670679
58,97	1,3904	13,25764388	151,524048	0,234	0,056656598
17,826	1,5831	4,007643885	151,524048	0,234	0,017126683
19,653	1,7903	4,418390288	151,524048	0,234	0,01888201
70,61	1,805	15,87455036	151,524048	0,234	0,067839959
102,16	1,8408	22,9676259	151,524048	0,234	0,098152247
160,03	1,9189	35,97796763	151,524048	0,234	0,153751998
155,34	2,1042	34,92356115	151,524048	0,234	0,149245988
232,6	2,282	52,29316547	151,524048	0,234	0,223475066
289,71	2,4452	65,13264388	151,524048	0,234	0,278344632
132,47	3,2696	29,78192446	151,524048	0,234	0,127273181
128,73	3,4331	28,94109712	151,524048	0,234	0,123679902
346,1	3,4505	77,8102518	151,524048	0,234	0,332522444
353,76	3,4715	79,5323741	151,524048	0,234	0,339881941
396,74	3,5103	89,19514388	151,524048	0,234	0,381175829
430,84	3,547	96,86151079	151,524048	0,234	0,41393808
462,16	3,5662	103,9028777	151,524048	0,234	0,444029392
482,3	3,6331	108,4307554	151,524048	0,234	0,463379297
516,83	3,7337	116,193795	151,524048	0,234	0,496554679
554,87	3,8161	124,7459532	151,524048	0,234	0,533102364
532,84	3,917	119,7931655	151,524048	0,234	0,511936605
577,32	3,9971	129,7931655	151,524048	0,234	0,554671647
659,89	4,3364	148,3565647	151,524048	0,234	0,634002413
661,87	4,4369	148,8017086	151,524048	0,234	0,635904738
764,78	4,5093	171,9379496	151,524048	0,234	0,734777563
770,21	4,6697	173,158723	151,524048	0,234	0,739994543
818,32	4,7253	183,9748201	151,524048	0,234	0,78621718
857	4,8572	192,6708633	151,524048	0,234	0,823379758
935,72	5,07	210,368705	151,524048	0,234	0,89901156
1219,1	5,2063	274,0782374	151,524048	0,234	1,171274519
1334,3	5,2104	299,977518	151,524048	0,234	1,281955205
1539,9	5,2401	346,2005396	151,524048	0,234	1,479489485
1754,2	5,5536	394,3794964	151,524048	0,234	1,685382463
2047,3	5,9347	460,2742806	151,524048	0,234	1,966984105
2182,2	6,1984	490,602518	151,524048	0,234	2,096591957
2373,4	6,5672	533,5881295	151,524048	0,234	2,280291152
2545	6,9102	572,1672662	151,524048	0,234	2,445159257
2738,9	7,2984	615,7598921	151,524048	0,234	2,63145253
2908,9	7,6276	653,9793165	151,524048	0,234	2,794783404

3065,2	7,9268	689,118705	151,524048	0,234	2,944951731
3256,9	8,2254	732,2167266	151,524048	0,234	3,12913131
3484,6	8,5662	783,4082734	151,524048	0,234	3,347898604
3662,3	8,8603	823,3588129	151,524048	0,234	3,518627406
3873,2	9,2771	870,7733813	151,524048	0,234	3,721253766
3957,4	9,537	889,7032374	151,524048	0,234	3,802150587
4047,8	9,8657	910,0269784	151,524048	0,234	3,889004181
4251,7	10,178	955,8678058	151,524048	0,234	4,084905153
4555,1	10,448	1024,078237	151,524048	0,234	4,376402724
4918	10,765	1105,665468	151,524048	0,234	4,725066101
5291	11,06	1189,523381	151,524048	0,234	5,083433253
5603,8	11,324	1259,847122	151,524048	0,234	5,383962061
5979,6	11,673	1344,334532	151,524048	0,234	5,745019369
6256,2	11,965	1406,519784	151,524048	0,234	6,010768308
6502,8	12,285	1461,960432	151,524048	0,234	6,247694152
6672,5	12,527	1500,11241	151,524048	0,234	6,410736795
6836,6	12,848	1537,005396	151,524048	0,234	6,568399127
7007,5	13,165	1575,427158	151,524048	0,234	6,732594693
7085,2	13,45	1592,895683	151,524048	0,234	6,80724651
7142,6	13,739	1605,80036	151,524048	0,234	6,8623947
7205,3	14,065	1619,896583	151,524048	0,234	6,922634969
7232,8	14,359	1626,079137	151,524048	0,234	6,94905614
7308,8	14,64	1643,165468	151,524048	0,234	7,022074648
7340,7	14,977	1650,33723	151,524048	0,234	7,052723206
7346,6	15,269	1651,663669	151,524048	0,234	7,058391748
7360,1	15,569	1654,698741	151,524048	0,234	7,071362141
7380,8	15,884	1659,352518	151,524048	0,234	7,091250077
7430	16,185	1670,413669	151,524048	0,234	7,138519953
7481,9	16,452	1682,081835	151,524048	0,234	7,188383908
7542,3	16,755	1695,660971	151,524048	0,234	7,246414407
7574,5	17,069	1702,90018	151,524048	0,234	7,277351196
7620	17,399	1713,129496	151,524048	0,234	7,321066224
7641,2	17,662	1717,895683	151,524048	0,234	7,341434545
7666,7	17,893	1723,628597	151,524048	0,234	7,365934176
7636,6	18,18	1716,861511	151,524048	0,234	7,337015003
7644,6	18,478	1718,660072	151,524048	0,234	7,344701162
7712,5	18,778	1733,92536	151,524048	0,234	7,409937435
7886,1	19,145	1772,954137	151,524048	0,234	7,57672708
8029,7	19,476	1805,238309	151,524048	0,234	7,71469363
8089,7	19,767	1818,727518	151,524048	0,234	7,77233982
8110,7	19,845	1823,448741	151,524048	0,234	7,792515987
2506,7	19,961	563,5566547	151,524048	0,234	2,408361772

TABLA DE VALORES PARA LAS GRÁFICAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN, PROBETA 3A-3C

Fuerza [N]	Distancia [mm]	Fuerza [lbf]	Área [mm2]	Área [ft2]	Esfuerzo
-668,48	2,0055	-150,28777	146,976962	0,22781475	-0,6596929
-677,87	1,9558	-152,39883	146,976962	0,22781475	-0,6689595
-667,68	1,9153	-150,10791	146,976962	0,22781475	-0,6589034
-600,75	1,9164	-135,0607	146,976962	0,22781475	-0,5928532
-146,513	1,892	-32,939074	146,976962	0,22781475	-0,1445871
-70,7	1,9299	-15,894784	146,976962	0,22781475	-0,0697707
192,03	2,0303	43,1722122	146,976962	0,22781475	0,18950578
340,05	2,1506	76,4500899	146,976962	0,22781475	0,33558008
421,8	2,2715	94,8291367	146,976962	0,22781475	0,41625548
495,17	2,399	111,324191	146,976962	0,22781475	0,48866104
510,08	2,5697	114,676259	146,976962	0,22781475	0,50337505
571,36	2,6951	128,453237	146,976962	0,22781475	0,56384953
640,76	2,8435	144,055755	146,976962	0,22781475	0,63233727
723,06	3,0157	162,558453	146,976962	0,22781475	0,71355545
826,66	3,1694	185,84982	146,976962	0,22781475	0,81579363
903	3,346	203,01259	146,976962	0,22781475	0,89113015
978,32	3,4814	219,946043	146,976962	0,22781475	0,96546008
1067,5	3,6425	239,995504	146,976962	0,22781475	1,05346782
1197,8	3,8061	269,289568	146,976962	0,22781475	1,18205503
1311,2	4,0125	294,784173	146,976962	0,22781475	1,2939644
1428	4,1655	321,043165	146,976962	0,22781475	1,40922908
1616,5	4,471	363,421763	146,976962	0,22781475	1,59525126
1787,1	4,7366	401,776079	146,976962	0,22781475	1,76360874
1938	4,9789	435,701439	146,976962	0,22781475	1,91252518
2053,2	5,1502	461,600719	146,976962	0,22781475	2,02621088
2150	5,3007	483,363309	146,976962	0,22781475	2,12173846
2259,7	5,5012	508,026079	146,976962	0,22781475	2,22999646
2392,4	5,7018	537,859712	146,976962	0,22781475	2,36095213
2542,2	5,9019	571,53777	146,976962	0,22781475	2,50878303
2660,5	6,1065	598,133993	146,976962	0,22781475	2,62552798
2779	6,2092	624,77518	146,976962	0,22781475	2,74247031
2932,6	6,5039	659,307554	146,976962	0,22781475	2,89405126
3078,1	6,7314	692,018885	146,976962	0,22781475	3,03763867
3188,7	6,9109	716,883993	146,976962	0,22781475	3,14678485
3340,8	7,1346	751,079137	146,976962	0,22781475	3,29688551
3432,8	7,2744	771,76259	146,976962	0,22781475	3,38767618
3556,1	7,4552	799,482914	146,976962	0,22781475	3,50935541
3717,1	7,6593	835,678957	146,976962	0,22781475	3,66823908
4061,8	7,6393	913,17446	146,976962	0,22781475	4,00840803

4208,9	7,6956	946,245504	146,976962	0,22781475	4,15357442
4432,4	7,9262	996,492806	146,976962	0,22781475	4,37413653
4670,1	8,1481	1049,93255	146,976962	0,22781475	4,60871199
4944,1	8,4942	1111,53327	146,976962	0,22781475	4,87911028
5105,5	8,7264	1147,81924	146,976962	0,22781475	5,0383887
5415,8	8,9773	1217,58094	146,976962	0,22781475	5,34460983
5693,2	9,2238	1279,94604	146,976962	0,22781475	5,61836344
5966,5	9,4625	1341,38939	146,976962	0,22781475	5,88807093
6244,8	9,7749	1403,95683	146,976962	0,22781475	6,16271271
6399,9	9,9406	1438,82644	146,976962	0,22781475	6,31577393
6611,5	10,173	1486,39838	146,976962	0,22781475	6,52459247
6789,6	10,462	1526,43885	146,976962	0,22781475	6,70035136
6930,8	10,63	1558,18345	146,976962	0,22781475	6,8396953
7059,3	10,832	1587,07284	146,976962	0,22781475	6,96650618
7350,4	11,172	1652,51799	146,976962	0,22781475	7,2537797
7703,9	11,576	1731,99191	146,976962	0,22781475	7,60263298
7876	11,772	1770,68345	146,976962	0,22781475	7,77247074
8036,5	11,976	1806,76709	146,976962	0,22781475	7,93086098
8172,8	12,173	1837,41007	146,976962	0,22781475	8,06536933
8284	12,382	1862,41007	146,976962	0,22781475	8,17510762
8361,9	12,605	1879,92356	146,976962	0,22781475	8,25198363
8410,5	12,832	1890,84982	146,976962	0,22781475	8,29994479
8487,6	13,032	1908,18345	146,976962	0,22781475	8,37603132
8588	13,188	1930,7554	146,976962	0,22781475	8,47511157
8671,1	13,412	1949,43795	146,976962	0,22781475	8,55711923
8217,1	13,432	1847,3696	146,976962	0,22781475	8,10908701
7539,4	13,397	1695,00899	146,976962	0,22781475	7,44029532

TABLA DE VALORES PARA LAS GRÁFICAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN, PROBETA 3A-3C

Fuerza [N]	Distancia [mm]	Fuerza [lbf]	Área [mm2]	Área [in2]	Esfuerzo
-93,18	0,097	-20,948741	148,269061	0,2298175	-0,0911538
94,1	0,12	21,1555755	148,269061	0,2298175	0,0920538
381,04	0,22	85,6654676	148,269061	0,2298175	0,37275432
498,11	0,39	111,985162	148,269061	0,2298175	0,48727864
586,61	0,7	131,881745	148,269061	0,2298175	0,57385422
666,86	0,87	149,923561	148,269061	0,2298175	0,65235919
742,08	1,03	166,834532	148,269061	0,2298175	0,72594354
832,2	1,39	187,095324	148,269061	0,2298175	0,81410389
977,39	1,7	219,73696	148,269061	0,2298175	0,95613674
1141,8	2,12	256,69964	148,269061	0,2298175	1,11697166
1326,6	2,6	298,246403	148,269061	0,2298175	1,2977532

1559,4	3,09	350,584532	148,269061	0,2298175	1,52549099
1757,8	3,51	395,188849	148,269061	0,2298175	1,7195768
2047,9	4,07	460,409173	148,269061	0,2298175	2,0033686
2276,3	4,51	511,758094	148,269061	0,2298175	2,22680206
2525,7	4,95	567,828237	148,269061	0,2298175	2,47077888
2941,9	5,17	661,398381	148,269061	0,2298175	2,87792865
3580,8	5,31	805,035971	148,269061	0,2298175	3,50293583
4373,1	6,06	983,160971	148,269061	0,2298175	4,27800733
4858,9	6,66	1092,3786	148,269061	0,2298175	4,75324366
5355,6	7,18	1204,04676	148,269061	0,2298175	5,23914296
5743,9	7,71	1291,34442	148,269061	0,2298175	5,61899941
6162,3	8,15	1385,40917	148,269061	0,2298175	6,02830134
6723,6	8,67	1511,60072	148,269061	0,2298175	6,57739592
6980,1	9,05	1569,26709	148,269061	0,2298175	6,82831835
7077,5	9,51	1591,16457	148,269061	0,2298175	6,9236004
7188,4	9,97	1616,09712	148,269061	0,2298175	7,03208889
7494,3	10,47	1684,8696	148,269061	0,2298175	7,33133712
8022,9	10,9	1803,70953	148,269061	0,2298175	7,84844276
8556,2	11,49	1923,60612	148,269061	0,2298175	8,3701462
9021,5	11,975	2028,21493	148,269061	0,2298175	8,8253283
9351,1	12,37	2102,31565	148,269061	0,2298175	9,14776117
9711,9	12,88	2183,43076	148,269061	0,2298175	9,50071561
9959,3	13,29	2239,05126	148,269061	0,2298175	9,74273592
10119	13,74	2274,95504	148,269061	0,2298175	9,89896326
10204	14,17	2294,06475	148,269061	0,2298175	9,98211494
10244	14,68	2303,05755	148,269061	0,2298175	10,0212451
10214	15,07	2296,31295	148,269061	0,2298175	9,99189749
10242	15,59	2302,60791	148,269061	0,2298175	10,0192886
10295	16,01	2314,52338	148,269061	0,2298175	10,0711362
10350	16,51	2326,88849	148,269061	0,2298175	10,1249402
10357	16,99	2328,46223	148,269061	0,2298175	10,131788
10314	17,51	2318,79496	148,269061	0,2298175	10,089723
10290	17,99	2313,39928	148,269061	0,2298175	10,0662449
10448	18,37	2348,92086	148,269061	0,2298175	10,2208092
10645	18,7	2393,21043	148,269061	0,2298175	10,4135254
455,78	18,7	102,468525	148,269061	0,2298175	0,4458691

ANEXO II

TABLAS PARA EL CÁLCULO DE TAMAÑO DE GRANO SEGÚN LA NORMA ASTM E112

TABLE 5 Relationship Between Magnification Used and Jeffries' Multiplier, *f*, for an Area of 5000 mm² (a Circle of 79.8-mm Diameter) ($f = 0.0002\ M^2$)

Magnification Used, *M*	Jeffries' Multiplier, *f*, to Obtain Grains/mm²
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75[A]	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

Equation	Units
$G = (3.321928 \log_{10} \bar{N}_A) - 2.954$	N_A in mm^{-2}
$G = (6.643856 \log_{10} \bar{N}_L) - 3.288$	$\bar{N}_L$ in mm^{-1}
$G = (6.643856 \log_{10} P_L) - 3.288$	P_L in mm^{-1}
$G = (-6.643856 \log_{10} \ell) - 3.288$	ℓ in mm

Anexo III

TAMAÑO DE GRANO SEGÚN LA NORMA ASTM E112.

Grain Size No.	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{\ell}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$
G	No./in.² at 100X	No./mm² at 1X	mm²	µm²	mm	µm	mm	µm	No./mm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Anexo IV

RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO DEL COBRE ELECTROLÍTICO

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa

Solicitante	:	Sres. Byron Amaguayo y Oscar Sánchez
No. Referencia	:	RM - 8751
Fecha	:	01 - 11 - 2016
Muestras recibidas	:	Una muestra de aleaciones de cobre

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación los resultados obtenidos:

Metales	C 1 (%)
Zinc (Zn)	0,055
Plomo (Pb)	0,021
Estaño (Sn)	0,010
Níquel (Ni)	0,014
Silicio (Te)	0,037
Cobalto (Co)	0,020
Bismuto (Bi)	0,010
Cobre (Cu)	99,75

Ing. Alicia Guevara C. PhD.
Jefe de Departamento

MSc. Evelyn Criollo T.
Jefe de Laboratorios

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

Pasaje Andalucía 134 E12A y Mena Caamaño – TeleFax (593-2) 2 236 562 – Casilla 17-01-2759
E-mail : edelator@interactive.net.ec - Quito-Ecuador

ANEXO V

RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DE LA SOLDADURA FRW

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

INFORME TÉCNICO

LAEV – NOV.16.02

Quito, 7 de noviembre de 2016

TRABAJO SOLICITADO POR: **Ing. Carlos Díaz**
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en juntas soldadas pertenecientes a los señores Byron Amaguayo y Oscar Sánchez para el desarrollo del proyecto de titulación "ESTUDIO Y CARACTERIZACION DEL COMPORTAMIENTO MICROESTRUCTURAL DE LA SOLDADURA POR FRICCION DE MATERIALES DISIMILES COBRE ELECTROLITICO Y ALUMINIO 6063",". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. **MUESTRAS:** Ocho (8) probetas circulares de juntas soldadas para ensayo de tracción.
2. **ENSAYO DE TRACCIÓN**

En la tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas.

Tabla 1. Resistencia a la tracción de las probetas.

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	mm	lbf	N	ksi	MPa
8A	13,92	3.025	13.456	12,82	88,42
9A	13,06	3.250	14.457	15,65	107,92
10A	13,48	2.975	13.233	13,45	92,73
14A	13,66	3.250	14.457	14,31	98,65
12A	13,89	1.825	8.118	7,77	53,57
13A	13,68	1.961	8.723	8,61	59,35
3A	13,80	2.456	10.925	10,59	73,04
16A	13,74	2.393	10.645	10,41	71,79

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

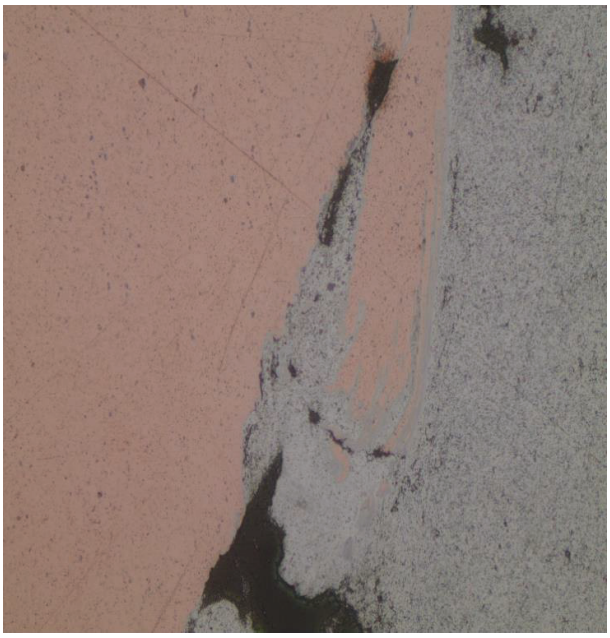
Ing. Jonathan Castro
JEFE (E) DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

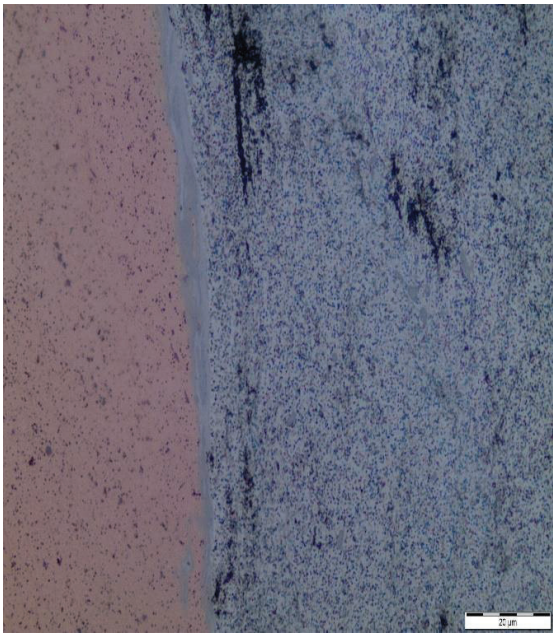
LAEV-EPN

Página 1 de 1

ANEXO VI

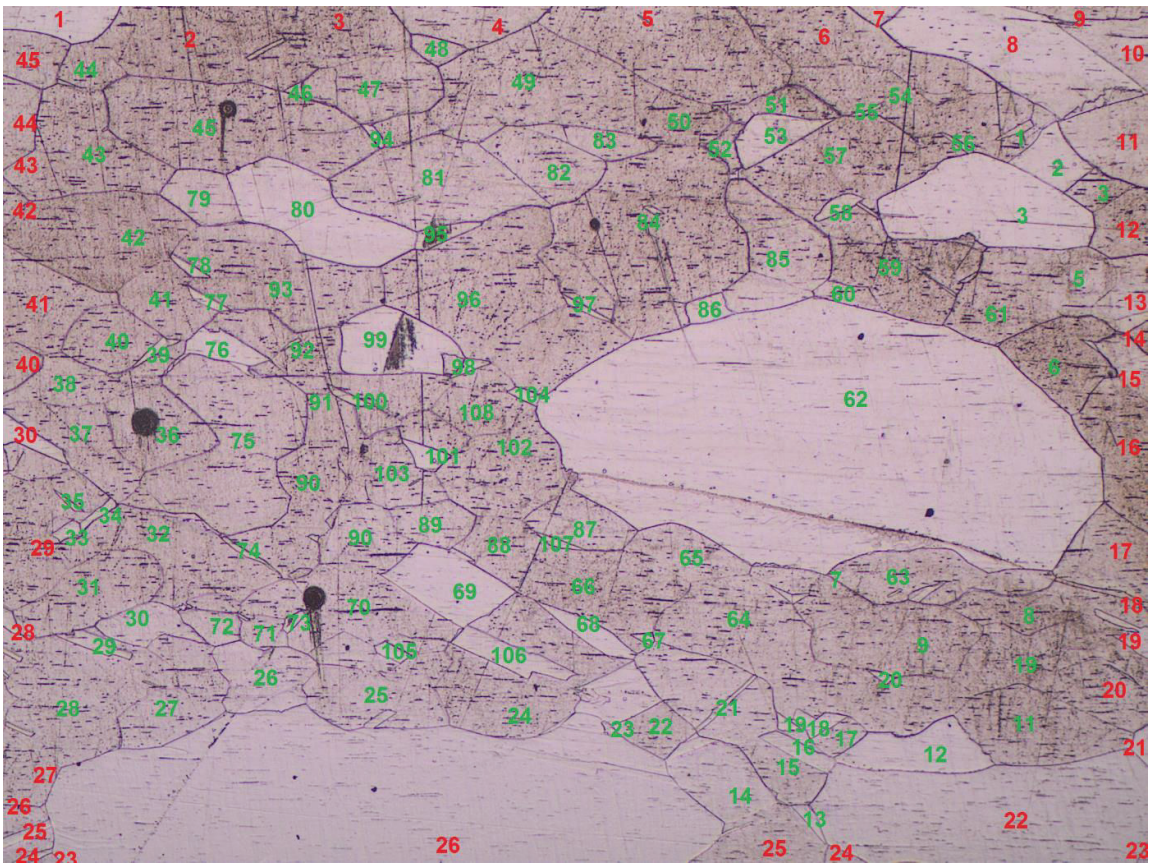
MICROGRAFÍAS DE LA FALTA DE UNIÓN DE LA PROBETA 17A-17C.





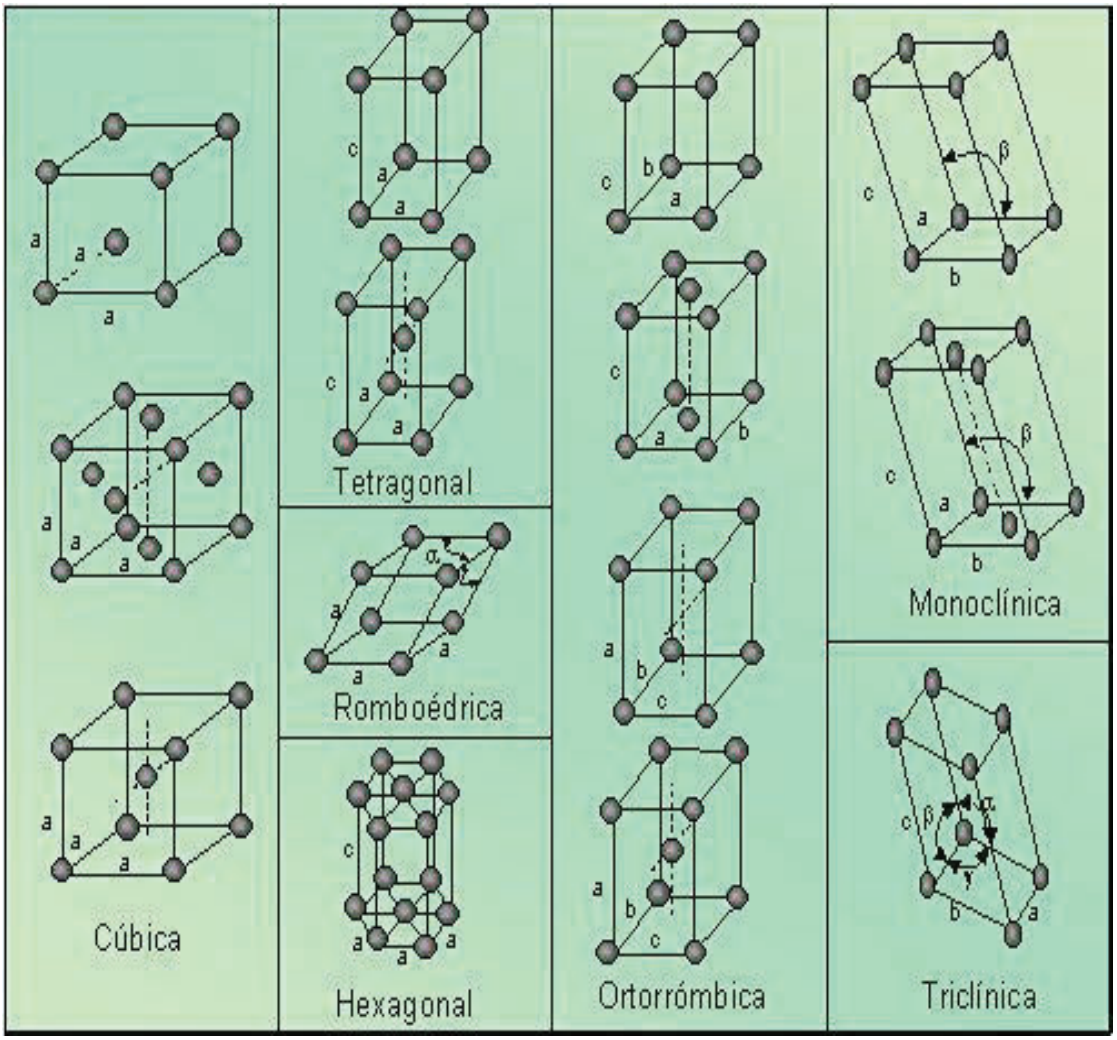
ANEXO VII

MICROGRAFÍA DE LA PROBETA 11A-11C (AUMENTO 50X) DE LA ZONA CERCANA A LA UNIÓN, PARA DETERMINAR EL TAMAÑO DE GRANO.



ANEXO VIII

REDES DE BRAVAIS.



ANEXO IX

LAS 14 REDES DE BRAVAIS Y SU SÍMBOLO DE PEARSON.

Sistema Cristalino	Simetria Traslacional	Símbolo de Pearson
Triclinico	Primitiva	aP
Monoclinico	Primitiva	mP
	Centrada en la base	mC
Ortorrombico	Primitiva	oP
	Centrada en la base	oC
	Centrada en la cara	oF
	Centrada en el cuerpo	oI
Tetragonal	primitiva	tP
	Centrada en el cuerpo	tI
Hexagonal	Primitiva	hP
Romboédrica	Primitiva	hR
cubica	Primitiva	cP
	Centrada en la cara	cF
	Centrada en el cuerpo	cI

ANEXO X

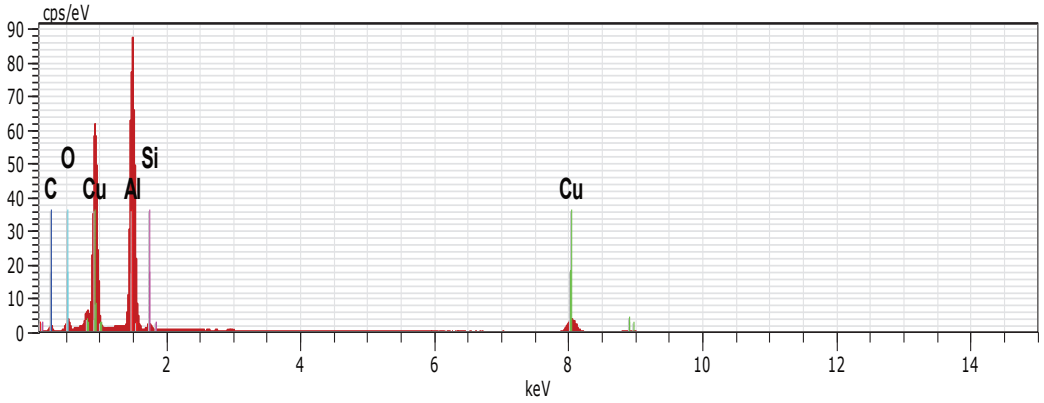
TABLA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS PREENTES EN VARIOS PUNTOS DE LA ZONA DE UNIÓN.

Punto	Elemento	Energía	Porcentaje en peso
1	Al	20kV	79,6 wt.%
	Au	20kV	5,8 wt.%
	S	20kV	5,7 wt.%
	P	20kV	5,2 wt.%
	Cu	20kV	3,8 wt.%
			100,1 wt.%
2	Cu	20kV	68,4 wt.%
	Al	20kV	21,6 wt.%
	Na	20kV	10,0 wt.%
			100,0 wt.%
3	Cu	20kV	82,7 wt.%
	Na	20kV	11,8 wt.%
	Al	20kV	5,4 wt.%
			99,9 wt.%
4	Al	20kV	43,3 wt.%
	Cu	20kV	24,2 wt.%
	S	20kV	12,5 wt.%
	Ca	20kV	7,7 wt.%
	Au	20kV	5,1 wt.%
	Na	20kV	3,8 wt.%
	P	20kV	3,5 wt.%
			100,1 wt.%

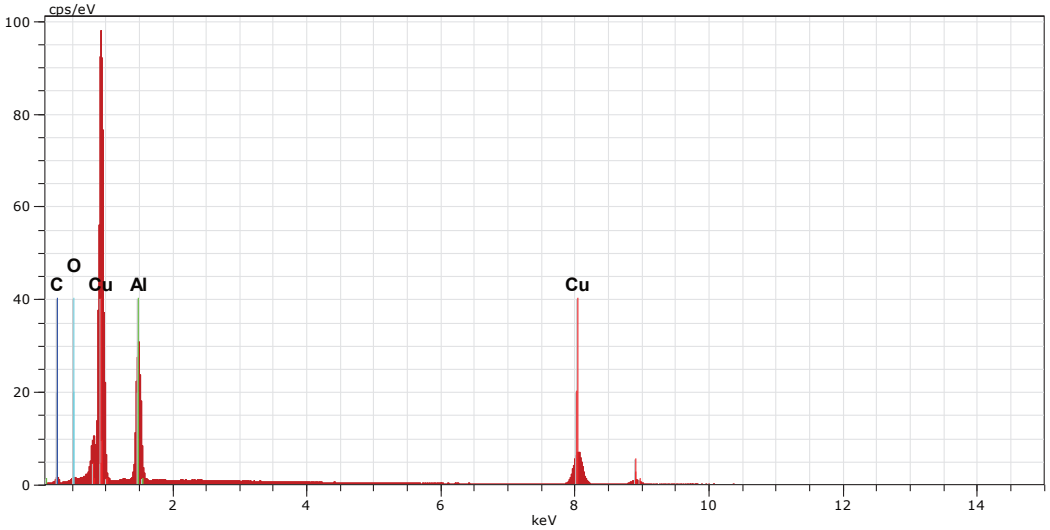
ANEXO XI

DIAGRAMAS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN LOS 6 DIFERENTES PUNTOS DE LA PROBETA 11A-11C.

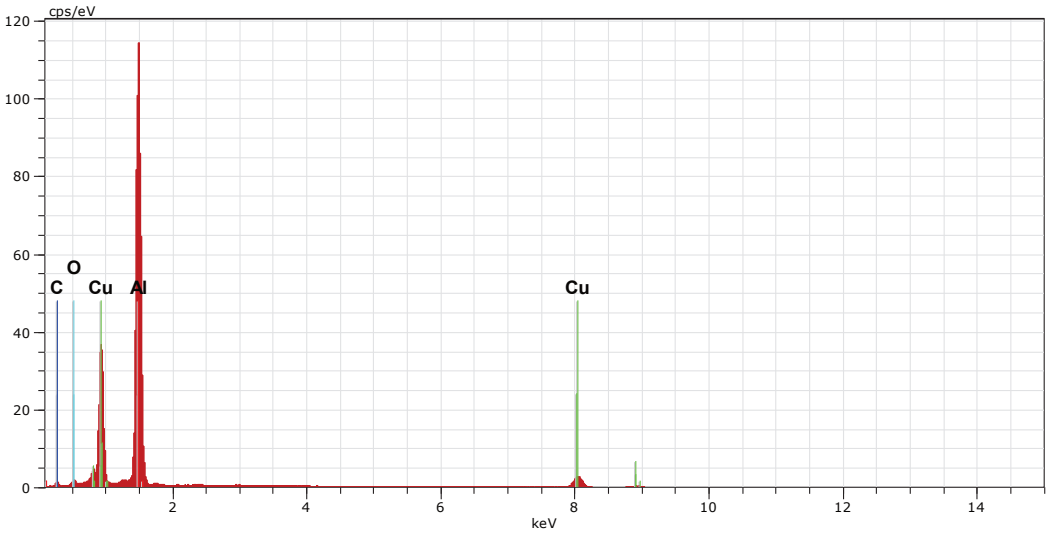
PUNTO 1



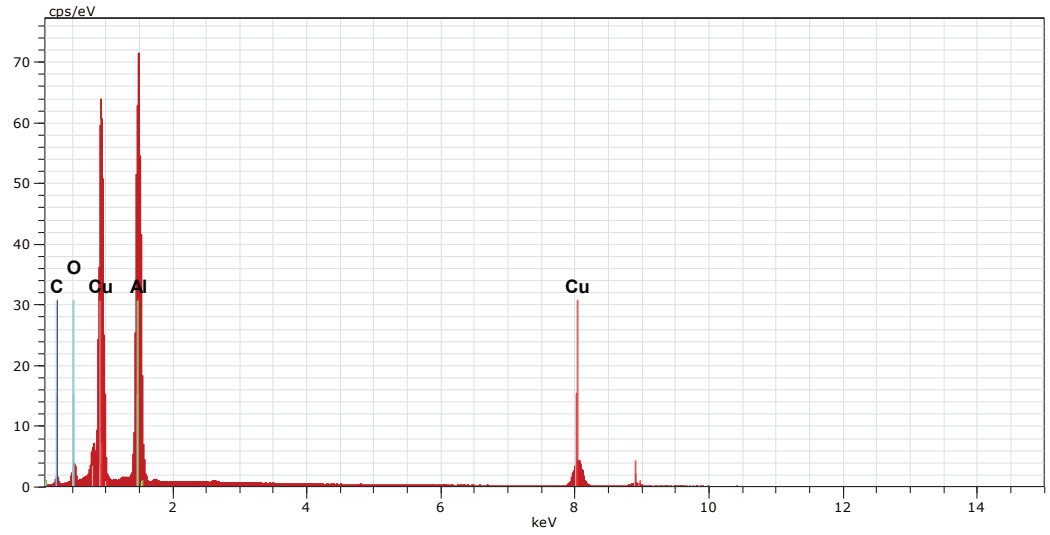
PUNTO 2



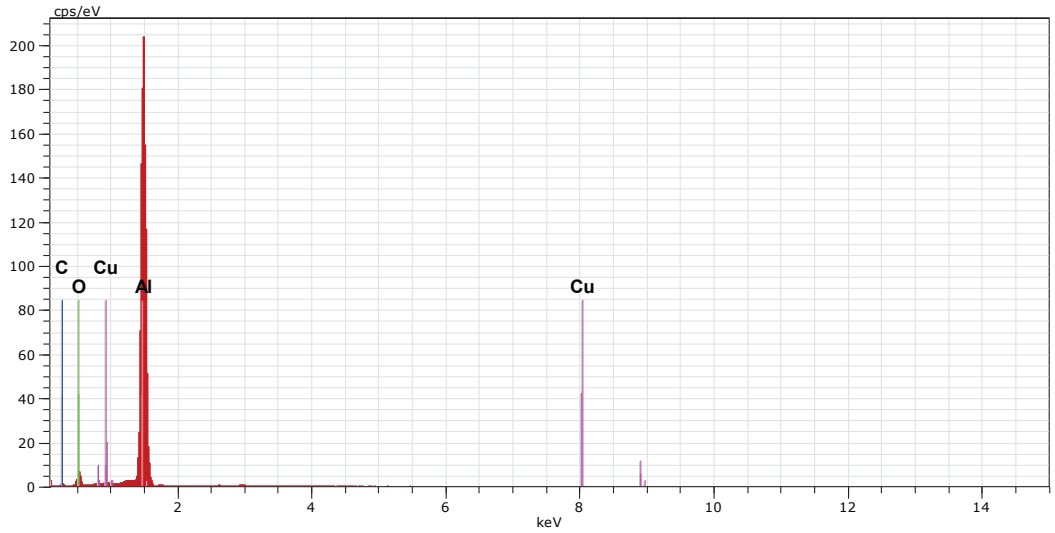
PUNTO 3



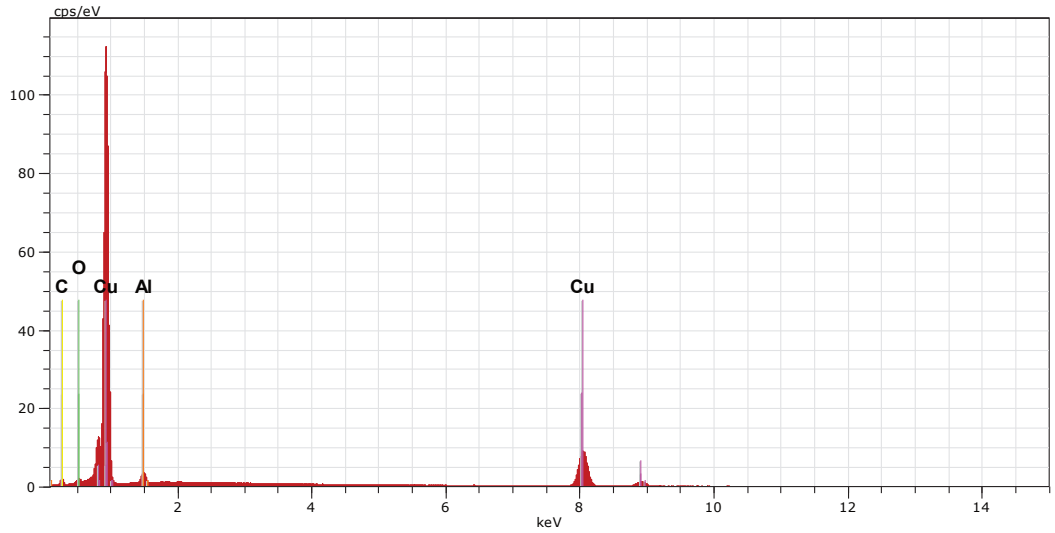
PUNTO 4

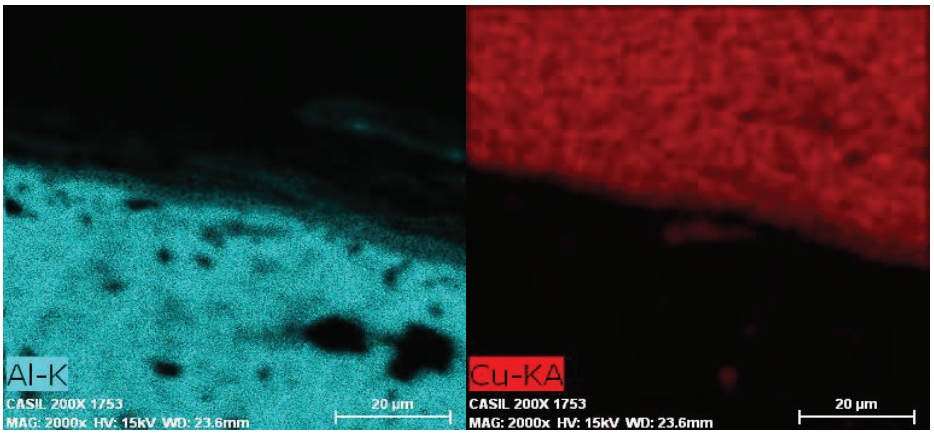
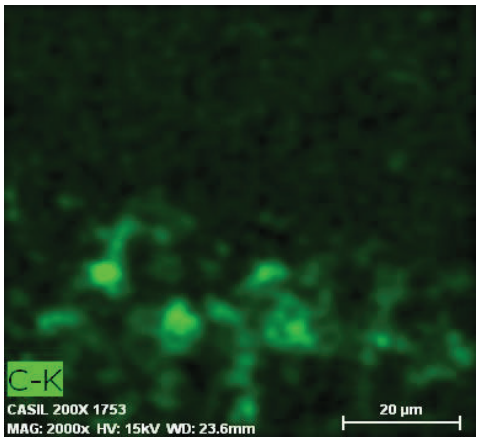
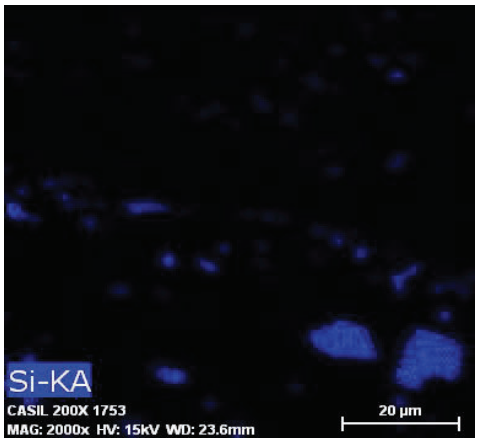
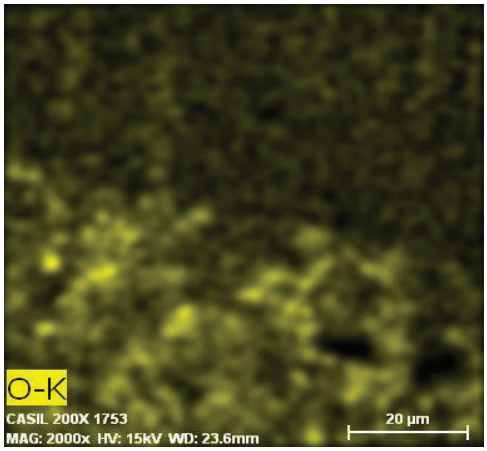


PUNTO 5



PUNTO 6



ANEXO XII

MICROGRAFÍA DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA CADA ELEMENTO PRESENTE EN LA SOLDADURA FRW DE MATERIALES DISÍMILES