



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN DE MATERIALES DISÍMILES COBRE – LATÓN

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

CHIRIBOGA TORRES ANDRÉS FERNANDO

andres.chiriboga@epn.edu.ec

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

carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, abril 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **ANDRÉS FERNANDO CHIRIBOGA TORRES**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **ANDRÉS FERNANDO CHIRIBOGA TORRES**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

Andrés Fernando Chiriboga Torres

DEDICATORIA

A mis padres, a mi hermano y a mi mejor amigo por su apoyo a lo largo de mi vida.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, mi hermano y mi mejor amigo que siempre han brindado su incondicional apoyo.

Al Ing. Carlos Díaz por su ayuda, conocimientos y paciencia que supo brindarme durante el desarrollo de este proyecto de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Soldadura por fricción	3
1.2. Cobre.....	7
1.3 Latón	11
2. METODOLOGÍA.....	13
2.1. Equipos y materiales utilizados.....	13
2.2. Probetas de ensayo.....	18
2.3. Ensayo de tracción y metalografías	25
3. RESULTADOS OBTENIDOS.....	31
3.1. Encogimiento axial posterior a la soldadura por fricción	31
3.2. Ensayo de tracción.....	32
3.3. Resultados de las metalografías	33
3.4. Microdurezas.....	39
3.5. Discusión de resultados.....	44
4. CONCLUSIONES	61
Referencias Bibliográficas	63

Anexos	67
Resultados del análisis químico de los materiales base (cobre y latón)	67
Resultados de los ensayos de tracción del material base y las probetas soldadas	69
Resultados de los ensayos de microdureza	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Pasos de la soldadura por fricción.	3
Figura 1.2. Máquina soldadura por fricción directa.	5
Figura 1.3. Máquina para soldadura por fricción directa.	5
Figura 1.4. Fases de la soldadura por fricción directa.	7
Figura 1.5. Bornita.	8
Figura 1.6. Calcopirita.	8
Figura 1.7. Calcosina.	9
Figura 1.8. Azurita.	9
Figura 2.1. Máquina de soldadura por fricción directa.	13
Figura 2.2. Equipo soldadura oxiacetilénica.	14
Figura 2.3. Máquina de ensayos Tinius-Olsen.	15
Figura 2.4. Máquina de desbaste.	16
Figura 2.5. Máquina de pulido.	16
Figura 2.6. Microscopio metalográfico.	17
Figura 2.7. Máquina de microdurezas.	18
Figura 2.8. Probetas de latón (izquierda) y cobre (derecha).	20
Figura 2.9. Polea.	23
Figura 2.10. Banda.	23
Figura 2.11. Pre calentamiento de las probetas.	24
Figura 2. 12. Pirómetro infrarrojo.	24
Figura 2.13. Probetas soldadas.	25
Figura 2.14. Probeta según norma ASTM E8.	25
Figura 2.15. Probeta soldada.	26
Figura 2.16. Ensayo de tracción del material base.	26
Figura 2.17. Corte de probetas.	27
Figura 2.18. Desbastado grueso.	28
Figura 2.19. Probeta desbastada.	29
Figura 2.20. Montaje de las probetas en resina.	29
Figura 2.21. Pulido fino.	30
Figura 2.22. Lubricante de diamantes suspendidos en agua.	30
Figura 2.23. Probetas atacadas.	31

Figura 3.1. Micrografías del material base.....	34
Figura 3.2. Micrografías cobre-latón y sus características de la probeta B6.....	35
Figura 3.3. Micrografías cobre-latón y sus características de la probeta B7.....	36
Figura 3.4. Micrografías cobre-latón y sus características de la probeta A6.....	37
Figura 3.5. Micrografías cobre-latón y sus características de la probeta A7.....	38
Figura 3.6. Marca del indentador sobre la unión de los materiales, con un aumento de x100.....	39
Figura 3.7. Distancia entre las marcas de indentación, con aumento de x100.....	40
Figura 3.8. Dureza vs. Distancia probeta B6.....	41
Figura 3.9. Dureza vs. Distancia probeta B7.....	42
Figura 3.10. Dureza vs. Distancia probeta A6.....	43
Figura 3.11. Dureza vs. Distancia probeta A7.....	44
Figura 3.12. Probeta de latón fracturada.....	45
Figura 3.13. Área efectiva de soldadura.....	47
Figura 3.14. Zona de unión de las probetas; probeta de latón (izquierda) y cobre (derecha).....	49
Figura 3.15. Zona de unión; probeta de latón (derecha) y cobre (izquierda).....	49
Figura 3.16. Mapeo de la zona de unión.....	50
Figura 3.17. Enriquecimiento de cobre en el latón.....	50
Figura 3.18. Metalografía de Medina F.(izquierda), Metalografía del presente estudio (derecha).....	52
Figura 3.19. Metalografía de la Universidad de Barcelona. (izquierda), Metalografía del presente estudio (derecha).....	53
Figura 3.20. Estructura cristalina FCC.....	54
Figura 3.21. Estructura cristalina BCC.....	54
Figura 3.22. Diagrama de fases cobre-zinc.....	55
Figura 3.23. Zonas de la soldadura.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades físicas del cobre.....	10
Tabla 1.2. Propiedades físicas del latón.....	12
Tabla 2.1. Características de la máquina de soldadura por fricción.....	14
Tabla 2.2. Características soldadura oxiacetilénica.....	14
Tabla 2.3. Características de máquina de ensayos de tracción.....	15
Tabla 2.4. Características de máquina de desbastado grueso.....	16
Tabla 2.5. Características de máquina de pulido.....	17
Tabla 2.6. Características microscopio metalográfico.....	17
Tabla 2.7. Características máquina de microdurezas.....	18
Tabla 2.8. Composición química de la muestra de cobre.....	19
Tabla 2.9. Composición química de la muestra del latón.....	19
Tabla 2.10. Codificación de las probetas.....	21
Tabla 2.11. Dimensiones de las probetas.....	21
Tabla 2.12. Parámetros para la soldadura.....	22
Tabla 2.13. Dimensiones probeta de ensayo de tracción según norma ASTM E8.....	26
Tabla 3.1. Encogimiento axial de las probetas soldadas.....	31
Tabla 3.2. Resultados de los ensayos de tracción de las probetas de material base.....	32
Tabla 3.3. Resultados del ensayo de tracción realizado a las juntas soldadas.....	33
Tabla 3.4. Probetas para ensayo de microdureza.....	40
Tabla 3.5. Ensayo de microdureza probeta B6.....	40
Tabla 3.6. Ensayo de microdureza probeta B7.....	41
Tabla 3.7. Ensayo de microdureza probeta A6.....	42
Tabla 3.8. Ensayo de microdureza probeta A7.....	43
Tabla 3.9. Porcentaje de eficiencia de la soldadura según la resistencia a la tracción.....	46
Tabla 3.10. Esfuerzos de las probetas ensayadas.....	47
Tabla 3.11. Porcentaje de eficiencia de la soldadura real.....	48
Tabla 3.12. Tratamientos térmicos del cobre.....	51
Tabla 3.13. Tratamientos térmicos del cobre.....	51
Tabla 3.14. Composición química del latón $\alpha+\beta$	52

RESUMEN

La soldadura por fricción es un proceso en la industria que se utiliza en la producción de determinados productos como ejes de transmisión, válvulas de automóviles y aires acondicionados; por nombrar unos pocos ejemplos. En el caso del latón 6040 y el cobre puro son utilizados en la fabricación de placas tubulares para intercambiadores de calor y como accesorios para instalaciones sanitarias debido a su resistencia a la corrosión incrustaciones. La finalidad del presente proyecto es el estudio y caracterización de la soldadura del latón 6040 y cobre puro siguiendo normas y estudios previamente realizados en trabajos similares. Por medio de análisis metalográficos, de microdurezas y ensayos de tracción de la soldadura realizada se obtuvieron resultados que permiten conocer la microestructura y características mecánicas de las zonas presentes en la unión de los materiales antes mencionados.

Palabras clave: Soldadura por fricción, caracterización, latón 6040, cobre puro.

ABSTRACT

Friction welding is a process in the industry that is used in the production of certain products such as transmission axles, automobile valves and air conditioners; to name a few examples. In the case of 6040 brass and pure copper, they are used in the manufacture of tubular plates for heat exchangers and as accessories for sanitary installations due to their resistance to corrosion incrustations. The purpose of the present project is the study and characterization of the welding of the 6040 brass and pure copper according norms and studies previously realized in similar works. By means of metallographic analysis, microhardness and tensile tests of the welding carried out, results were obtained which allow to determine the microstructure and mechanical characteristics of the areas present in the welded joint formed by the mentioned materials.

Keywords: Friction welding, characterization, 6040 brass, pure copper

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDABILIDAD EN MATERIALES DISÍMILES LATON (6040) – COBRE PURO MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN

INTRODUCCIÓN

La unión de materiales por medio de la fricción es un método de soldadura que se realiza cuando los materiales a soldarse se encuentran en estado sólido, en la que la unión de ellos o coalescencia se da por la aplicación de calor (fricción) y presión. En este tipo de soldadura no es necesario la utilización de material de aporte ni de una atmósfera de protección, por lo cual, es posible unir materiales con diferentes propiedades mecánicas, químicas o térmicas (disímiles) [1]. Con el fin de poder garantizar la unión de estos materiales con diferentes propiedades entre sí, se busca encontrar los rangos de temperatura de precalentamiento adecuados que faciliten la soldabilidad de materiales diferentes, y así, obtener buenas propiedades mecánicas posteriores a la soldadura.

La cantidad de información sobre la soldadura por fricción no se ha formalizado, por ello la unión de materiales disímiles es compleja. No existen parámetros de calor o de presión que se deban aplicar para la realización de soldaduras de materiales específicos. Las juntas que se generan poseen una combinación de puntos de fusión [2]. Por este motivo se debe realizar ensayos de tensión y microdureza para observar el comportamiento y los defectos de la soldadura (zonas afectadas por el calor, uniones incompletas, grietas y presencia de zonas no coalescentes en la soldadura) [3].

En el presente estudio se establecer de manera experimental los parámetros por los cuales la unión por soldadura por fricción del latón y cobre es factible, y de esta manera, formalizar la información sobre la misma.

Para evaluar que tan efectiva es la soldadura se realiza ensayos de tracción y mediciones de microdurezas de las probetas soldadas. Al finalizar se obtiene los parámetros de soldadura adecuados donde la unión posea buenas propiedades y el proceso sea fácil de reproducir.

Objetivo general

Caracterizar la soldadura por fricción de materiales disímiles cobre y latón

Objetivos específicos

- Identificar y establecer los parámetros que se necesitan para realizar la unión de cobre y latón por medio de la soldadura por fricción.
- Obtener información de los ensayos que se deben realizar para evaluar las probetas y los criterios de aceptación de los mismos.
- Analizar en base a los resultados de los ensayos realizados las características de la unión obtenida.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Soldadura por fricción

La soldadura por fricción rotacional FWR (por sus siglas en inglés) es un proceso donde el calor necesario para producir la soldadura se obtiene por la fricción generada por el movimiento de las caras en contacto de los materiales a unir, lo que convierte la energía mecánica en energía térmica para lograr la soldadura de los materiales.

En la Figura 1.1. se muestra la soldadura por fricción, en la que una pieza que no gira entra en contacto con otra que, si gira bajo condiciones de presión axial que aumenta durante el proceso, esto permite que se alcance la temperatura necesaria de soldadura para que la unión de los materiales se realice.

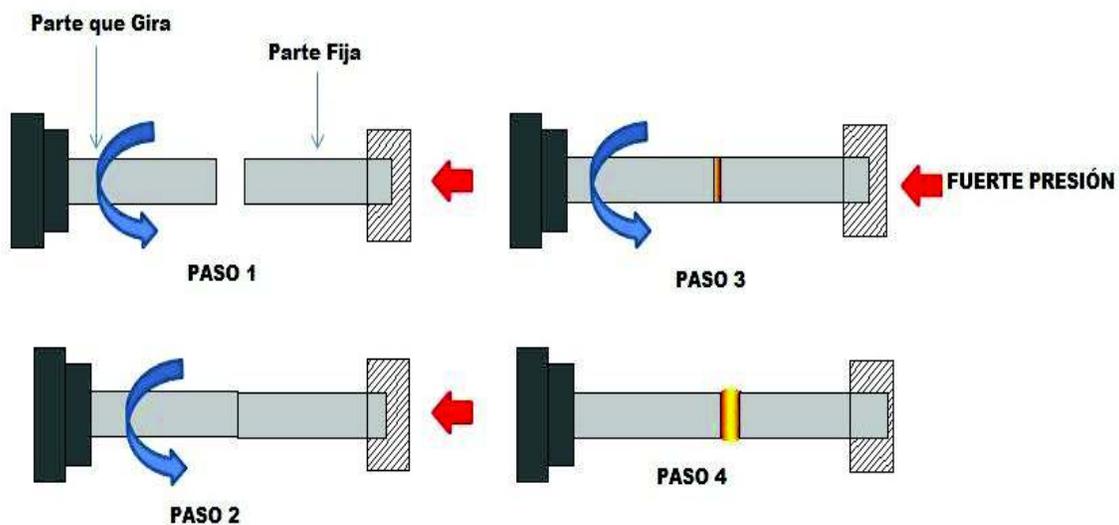


Figura 1.1. Pasos de la soldadura por fricción.
(Fuente: [4])

Las principales variables de este proceso de soldadura son:

- Velocidad de rotación.
- Presión que se ejerce de manera axial durante el calentamiento.
- Tiempo de aplicación de la fuerza.
- Presión que se ejerce de manera axial durante la forja.

Estas variables son controladas para generar el calor necesario y presión para formar la soldadura e influyen en su calidad. Al ajustarlas se logra que el material alcance un estado plástico para que la soldadura pueda ocurrir, una vez logrado este calentamiento, se aplica la presión axial para que las piezas entren en contacto íntimo. Durante esta etapa final de la soldadura se produce la coalescencia de los materiales, lo que permite que estos se unan.

La temperatura de calentamiento es una variable crítica para asegurar la obtención de buenas soldaduras, y depende directamente de los materiales a soldar ya que cada material necesita una temperatura de calentamiento diferente.

En la mayoría de aplicaciones de la soldadura por fricción, una de las piezas a soldar gira alrededor de un eje de simetría con las superficies perpendiculares al mismo (superficies de empalme). Esto quiere decir que las piezas deben tener secciones circulares en el punto de unión de la soldadura [4].

1.1.1. Ventajas y desventajas

Todo proceso tiene ventajas y desventajas, y el proceso por soldadura por fricción no es la excepción. A continuación, se listan sus ventajas y desventajas:

1.1.1.1. Ventajas

- No requiere material de aporte ni atmósfera de protección
- Es ecológico en comparación a otros procesos de soldadura debido a que no produce arcos eléctricos ni vapores cuando las piezas se sueldan.
- Permite la unión de materiales disímiles.
- La resistencia mecánica de la soldadura es igual o superior a la más débil de los materiales soldados.
- No exige una preparación exhaustiva por parte del operador para realizar el proceso.
- Es sencillo, por ello es fácil automatizarlo para producción en serie.
- El tiempo que se requiere para realizar la soldadura es corto en comparación con otros procesos de soldadura.
- Los costos de producción en serie son bajos.

1.1.1.2. Desventajas

- Las piezas a soldar deben girar y tener un eje de simetría por lo que es indispensable alinear correctamente las piezas antes de soldarlas, de otro modo se obtendrá una mala soldadura.
- Los costos iniciales en equipos especializados en este proceso son elevados.

1.1.2. Soldadura por fricción directa

La soldadura por fricción directa DFRW (por sus siglas en inglés), se realiza al hacer girar una de las piezas sobre la otra estática para conseguir la soldadura (Figura 1.2.).

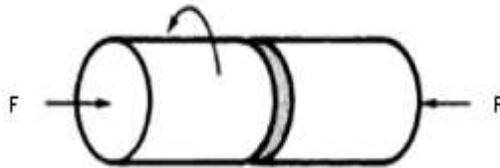


Figura 1.2. Máquina soldadura por fricción directa.
(Fuente: [4])

En la Figura 1.3. se muestra un ejemplo de la máquina de soldadura parecida a un torno que se utiliza en este tipo de proceso.

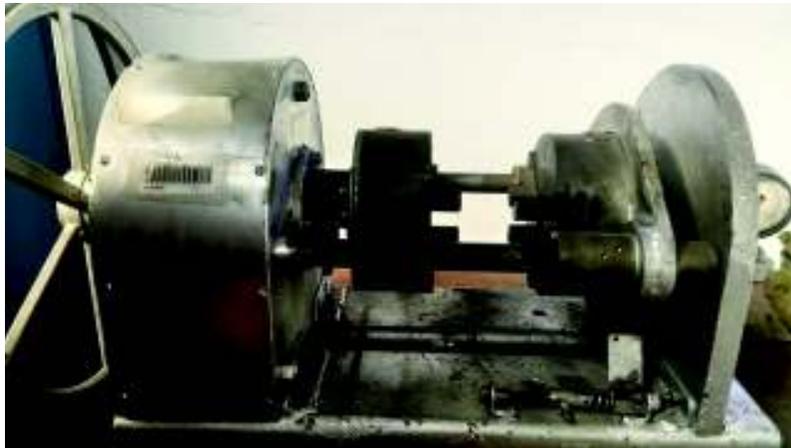


Figura 1.3. Máquina para soldadura por fricción directa.
(Fuente: Propia)

Esta máquina posee un sistema que permite la aplicación de presión axial. El proceso de soldadura se realiza en 3 fases:

- 1) fase de fricción en la cual se genera el calor para realizar la soldadura.
- 2) fase de frenado en donde la pieza ya no gira.
- 3) fase de forja donde se aplica la presión para soldar las piezas.

Las principales variables de este proceso son:

1.1.2.1. Velocidad Rotacional (rpm)

Esta variable es muy importante, ya que, si esta no es la adecuada se tendrán soldaduras de mala calidad o en el peor de los casos la soldadura no se podrá realizar. Las velocidades varían según la dureza y ductilidad de los materiales a soldar.

La velocidad rotacional tiene una gran importancia en la generación del calor para la soldadura. Las velocidades bajas pueden dañar el equipo debido a la generación de pares mientras que las velocidades altas generan una zona afectada por el calor (ZAC) amplia.

1.1.2.2. Tiempo de calentamiento

La duración del tiempo de calentamiento es un parámetro básico de este proceso de soldadura. Una manera de saber cuándo se cumplió este tiempo es observando la deformación plástica de los materiales involucrados en el proceso de soldadura.

1.1.2.3. Presión axial

La presión axial debe ser suficiente para mantener la superficie de los materiales en contacto y consolidar la unión de los materiales, ya que una presión baja aumenta la ZAC debido a una entrada de potencia insuficiente, mientras que una presión alta hace extruir a los materiales y por ello se tiene defectos en la unión.

En la Figura 1.4. se ilustra la relación entre las variables antes descritas del proceso de soldadura por fricción directa descritas anteriormente.

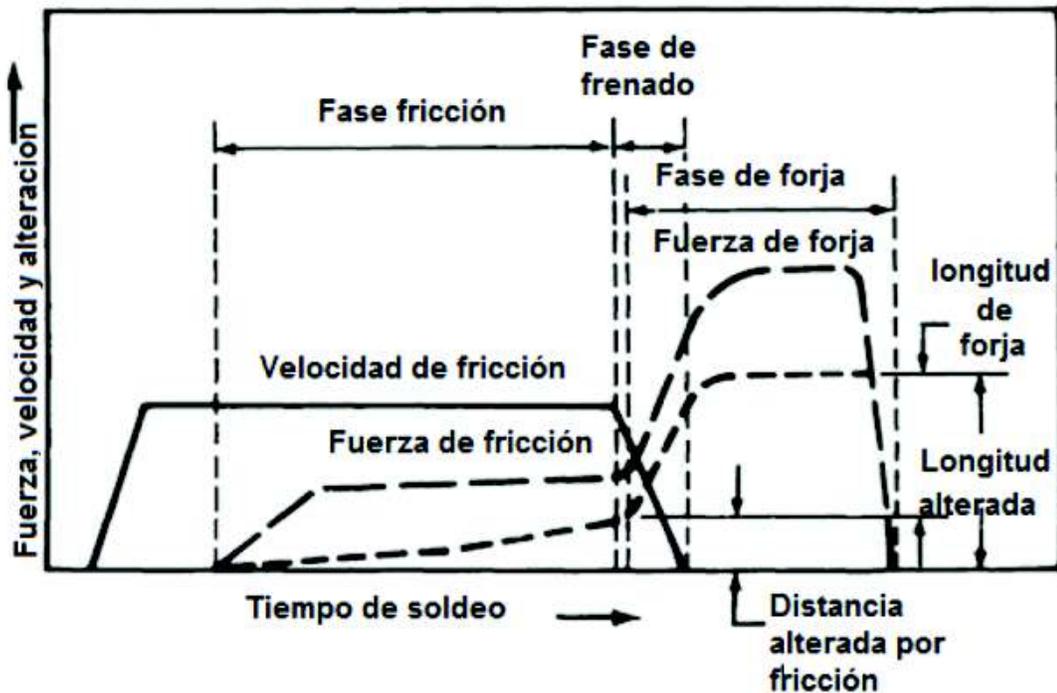


Figura 1.4. Fases de la soldadura por fricción directa.
(Fuente: [4])

1.2. Cobre

El cobre cuyo símbolo químico es Cu, probablemente es el primer metal que se extrajo de algún mineral. Se ha encontrado restos de este metal en ruinas de civilizaciones antiguas como en Egipto, China y Chipre de la cual proviene la palabra cobre. Aproximadamente en el año 6000 A.C. comenzaron a forjarlo en frío para incrementar su dureza, posteriormente en el año 4000 A.C. comenzaron a fundirlo para formar utensilios, viendo que lo podían fundir procedieron a incluir estaño para mejorar su capacidad a ser modelado en formas más complejas. Cabe recalcar que, en aquella época el cobre se encontraba libre en estado metálico, actualmente ya no se encuentra en ese estado y por ello se extrae de minerales en su mayoría sulfurosos como la bornita (Figura 1.5.), calcopirita (Figura 1.6.), calcosina (Figura 1.7.) y la azurita (Figura 1.8.).

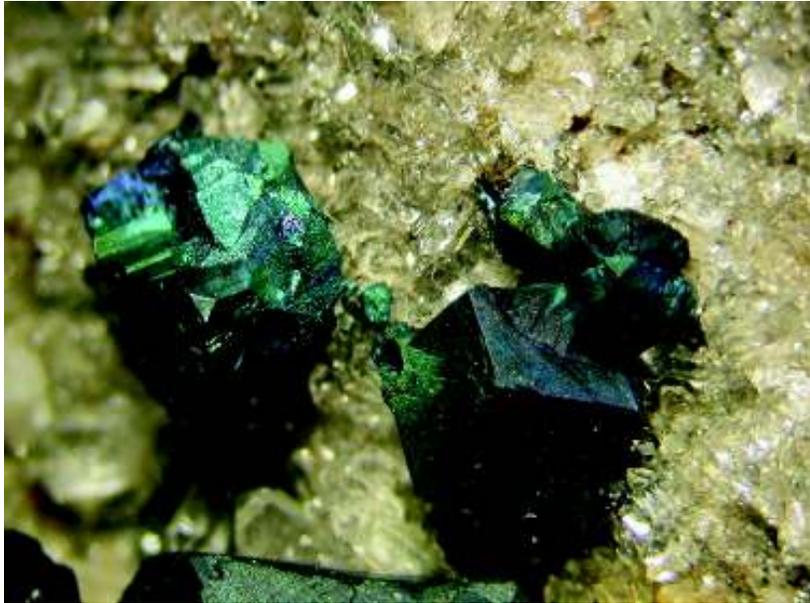


Figura 1.5. Bornita.
(Fuente: [8])



Figura 1.6. Calcopirita.
(Fuente: [9])

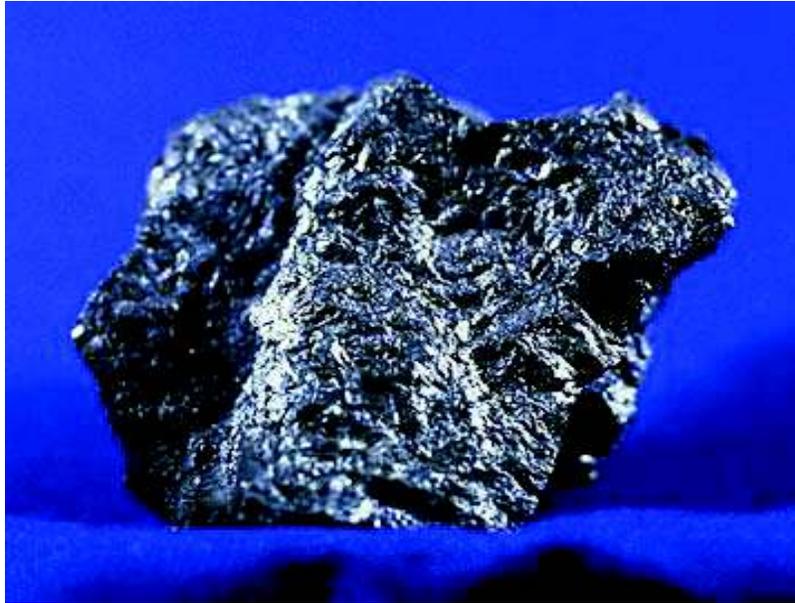


Figura 1.7. Calcosina.
(Fuente: [10])



Figura 1.8. Azurita.
(Fuente: [11])

Para la obtención del cobre, estos minerales son triturados y son concentrados por flotación obtenido un producto con una pureza entre 98% y 99% llamado “cobre blíster”. El cobre para uso comercial debe poseer una mayor pureza, por ello a este cobre blíster es refinado por medio de electrólisis con lo cual alcanza una pureza casi del 100%.

1.2.1. Propiedades

El cobre posee un llamativo color rojizo lo cual lo hace fácil de identificar de otros metales, las propiedades más distintivas de este metal es su baja resistividad eléctrica, buena conductividad térmica y su resistencia a la corrosión, así como su dureza y resistencia con respecto a su peso, son relativamente bajas. Debido a estas propiedades es ampliamente utilizado en intercambiadores de calor y como material para tuberías que transportan diferentes tipos de fluidos. Se debe señalar que este metal es extremadamente resistente a la corrosión porque el oxígeno en el cómo una impureza sin importancia significativa. La del cobre puro tomando en cuenta. En la Tabla 1.1. se observan las características principales del cobre.

Tabla 1.1. Propiedades físicas del cobre.

Símbolo	Cu
Número atómico	29.000
Peso atómico	63.546
Red Cristalina	Cúbica de caras centradas
Densidad [gr / cm ³]	8.960
Punto de fusión [°C]	1083.000
Módulo de elasticidad [10 ¹⁰ N/m ²]	10.800
Calor específico [J.Kg ⁻¹ K ⁻¹]	390.000
Conductividad térmica [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	398.000
Resistividad eléctrica [μ ohm*m]	1.710 x 10 ⁻⁸
Temperatura de recristalización [°C]	470.000

(Fuente: [6], [7], [12])

1.2.2. Aleaciones del cobre

De acuerdo con su composición, el cobre y sus aleaciones se clasifican en:

- Cobre puro
- Bronces (Cu-Sn)
- Latones (Cu-Zn)
- Cuproníqueles (Cu-Ni)

- Alpaca o plata alemana (Cu-Ni-Zn)

1.2.3. Aplicaciones

El cobre puro y sus aleaciones tienen diferentes aplicaciones. El cobre puro comercialmente se utiliza en elementos que conducen electricidad, ya sean alambres, cables, transformadores y en casi cualquier componente usado en aplicaciones eléctricas, por otro lado, los latones y los bronces además de su utilización en adornos y estatuas artísticas debido a su acabado y agradable color, son utilizados también junto a los cuproníqueles en radiadores de automóviles, aire acondicionado, sistemas de calefacción e intercambiadores de calor debido a la alta conductividad térmica que poseen.

El cobre y sus aleaciones se utilizan también en sistemas de procesamiento de aguas u otros fluidos en tuberías, caños y válvulas de dichos sistemas.

1.3 Latón

El latón es una aleación binaria en la cual el cobre es el material predominante y el segundo metal de esta aleación es el zinc, el mismo que puede encontrarse en la aleación con una concentración máxima del 50%, aunque ocasionalmente se encuentran pequeñas cantidades de otros elementos como son el aluminio, plomo o arsénico que son elementos que aportan mejoras de las propiedades de la aleación, por ejemplo, el plomo permite que el latón sea más fácil de mecanizar. Este metal tiene una resistencia y dureza mayor que la del cobre, pero su conductividad térmica y eléctrica es menor. Las aleaciones de latón al igual que el cobre son resistentes a la corrosión [14].

1.3.1. Propiedades

Al igual que el cobre esta aleación posee buenas características eléctricas, térmicas y buena resistencia a la corrosión, posee buena maleabilidad y ductilidad [15]. El latón es más duro que el cobre, pero esto se compensa al ser más fácil de mecanizar y fundir [16]. En la Tabla 1.2. se observan las características principales del latón.

Tabla 1.2. Propiedades físicas del latón.

Densidad [gr / cm ³]	8.440
Módulo de elasticidad [10^{10} N/m ²]	9.800
Punto de fusión [°C]	980.000
Calor específico [J.Kg ⁻¹ K ⁻¹]	393.000
Resistividad eléctrica [μ ohm*m]	0.158
Conductividad térmica [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	119.400
Temperatura de recristalización [°C]	425.000 – 600.000

(Fuente: [15])

1.3.2. Aplicaciones

Las aplicaciones de los latones dependen de su concentración de cobre y zinc ya que, dependiendo de estas, las propiedades y la apariencia de las aleaciones cambia. Estos cambios se observan a continuación:

1.3.2.1. Latones Rojos

Estos latones poseen un 10% de zinc y se usan en joyería por el parecido al oro que poseen. El latón semi-rojo tiene un 15% de zinc y se utiliza en radiadores de automóviles. El latón “bajo” con un 20% de zinc se utiliza en la fabricación de tubería flexible.

1.3.2.2. Latones amarillos

En estos latones el porcentaje de zinc está en el rango de 25% a 35% y se utilizan en la fabricación de muelles, resortes y en municiones de armas y cartuchos.

1.3.2.3. Latones alfa + beta

Estos latones poseen entre un 36% a 42% de zinc, son menos dúctiles que los latones antes mencionados y por ello deben ser trabajados en caliente. Son utilizados en la industria naval y conocidos como “metal Muntz” ya que fue el quien patentó este tipo de latón.

1.3.2.4. Latones especiales

A los latones se les añade otros elementos para aumentar ciertas propiedades como dureza, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. A estos se les conoce como latones especiales y los más usados son: [17]

- Latón al hierro (mayor dureza y resistencia a la tracción).
- Latón al plomo (mayor resistencia mecánica y más fácil de maquinar).
- Latón al manganeso (mayor resistencia a la tracción y menor ductilidad).
- Latón al estaño (mayor resistencia a la tracción y a la corrosión).
- Latón al silicio (mayor resistencia a la corrosión).

2. METODOLOGÍA

2.1. Equipos y materiales utilizados

Para la realización de la soldadura, el maquinado de los materiales base y los ensayos de tracción y metalografías, se utiliza los equipos disponibles en la Facultad de Ingeniería Mecánica en los laboratorios de Soldadura, Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional.

Para soldar las varillas con un diámetro de 25 mm de cobre y latón por fricción, se utiliza la máquina de soldadura por fricción de velocidad constante del Laboratorio de Soldadura (Figura 2.1.). Esta máquina permite controlar tres parámetros que son: velocidad de rotación, presión de calentamiento y forja. Esta máquina posee un sistema de poleas, que permite controlar la velocidad de rotación, dos mandriles de sujeción, uno móvil y otro fijo y un sistema hidráulico que es el encargado de suministrar la presión para generar las fuerzas de calentamiento y forja para unir los materiales. En la Tabla 2.1. se observa las características del equipo antes mencionado.

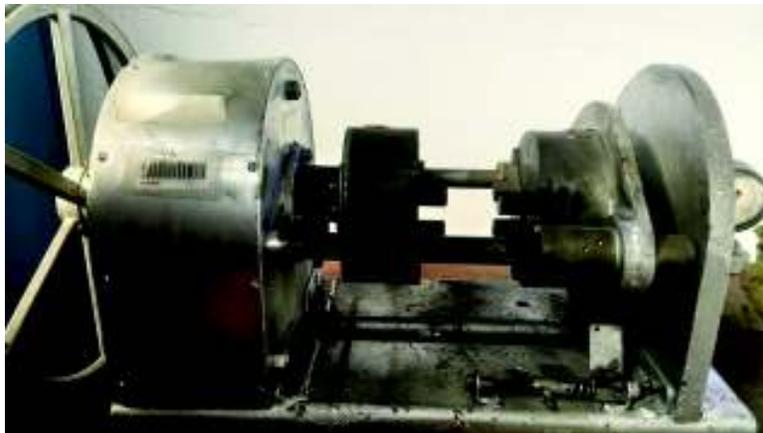


Figura 2.1. Máquina de soldadura por fricción directa.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.1. Características de la máquina de soldadura por fricción.

Proceso	Equipo	Características	
FWR	Bomba hidráulica	Presión [Psi]	1000
	Motor	RPM	1300; 2500; 4200; 4900

(Fuente: Propia)

El equipo de soldadura oxiacetilénica (Figura 2.2.) se utiliza para realizar el precalentamiento de algunas probetas antes de soldarlas. En la Tabla 2.2. se observa las características del equipo antes mencionado.



Figura 2.2. Equipo soldadura oxiacetilénica.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.2. Características soldadura oxiacetilénica.

Proceso	Equipo	Características	
OAW	Tanque de O ₂	Presión [Psi]	2000
	Tanque de C ₂ H ₂		260

(Fuente: Propia)

2.1.1. Equipos utilizados para la realización de ensayos de tracción y metalografías

La máquina utilizada para realizar los ensayos de tracción es un equipo Tinius-Olsen (Figura 2.3.) disponible en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica. En la Tabla 2.3. se observa sus características.



Figura 2.3. Máquina de ensayos Tinius-Olsen.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.3. Características de máquina de ensayos de tracción.

Proceso	Equipo	Características	
Ensayo de tracción	Máquina de ensayos Tinius-Olsen	Carga máxima [Tn]	60

(Fuente: Propia)

Para realizar las metalografías se utiliza para el desbastado grueso una máquina de desbastado (Figura 2.4.), mientras que para el pulido la máquina Forcimat de marca Metkom (Figura 2.5.). Para observar las metalografías se emplea un microscopio Olympus GX41 (Figura 2.6.) y para la medición de microdurezas el equipo Duroline de marca Metkon (Figura 2.7.). Todos los equipos nombrados pertenecen al Laboratorio de Desgaste y Falla. En la Tabla 2.4., Tabla 2.5., Tabla 2.6. y Tabla 2.7. se observan las características de los equipos antes mencionados respectivamente.



Figura 2.4. Máquina de desbaste.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.4. Características de máquina de desbastado grueso.

Proceso	Equipo	Características	
		Desbastado grueso	Máquina de desbaste

(Fuente: Propia)



Figura 2.5. Máquina de pulido.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.5. Características de máquina de pulido.

Proceso	Equipo	Características	
		Pulido	Máquina de pulido
		Amperaje [A]	4.87 – 2.44
		Voltaje [V]	155.00 – 230.00
		Frecuencia [Hz]	50.00

(Fuente: Propia)



Figura 2.6. Microscopio metalográfico.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.6. Características microscopio metalográfico.

Proceso	Equipo	Características	
		Revisión metalográfica	Microscopio metalográfico

(Fuente: Propia)



Figura 2.7. Máquina de microdurezas.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.7. Características máquina de microdurezas.

Proceso	Equipo	Características	
Medición de microdurezas	Duroline mekon	Carga máxima [kg]	1

(Fuente: Propia)

2.2. Probetas de ensayo

Los materiales que se utilizan en el presente estudio son probetas de cobre puro y de latón 6040. El latón 6040 también es conocido comercialmente como latón amarillo o “bronce dulce” debido su color y es una aleación binaria que contiene 60% de cobre y 40% de zinc. El cobre puro también se conoce comercialmente como cobre electrolítico.

Debido a que productores de cobre electrolítico y latón 6040 no existen en nuestro país, el material debe ser importado razón por la cual no se conocen sus características mecánicas o químicas, por ello es absolutamente necesario realizar un análisis de composición química por espectrofotometría de chispa en el Laboratorio de Fundición, para conocer las composiciones de los dos materiales. En la Tabla 2.8. y Tabla 2.9. se lista la composición química del cobre y latón respectivamente.

Tabla 2.8. Composición química de la muestra de cobre.

Muestra de Cobre	
Elemento	Valor [%]
Cobre [Cu]	99.6200
Zinc [Zn]	0.2810
Plomo [Pb]	<0.0500
Estaño [Sn]	0.0086
Fosforo [P]	<0.0100
Manganeso [Mn]	<0.0100
Hierro [Fe]	0.0370
Níquel [Ni]	0.0340
Silicio [Si]	<0.0050
Aluminio [Al]	<0.0100
Azufre [S]	<0.0050
Arsénico [As]	<0.0100
Bismuto [Bi]	<0.0100
Selenio [Se]	<0.0100
Sumatoria	99.9800

(Departamento de Materiales, 2018)

Tabla 2.9. Composición química de la muestra del latón.

Muestra de Latón	
Elemento	Valor [%]
Cobre [Cu]	53.700
Zinc [Zn]	43.170
Plomo [Pb]	2.604
Estaño [Sn]	0.130
Fosforo [P]	<0.005
Manganeso [Mn]	<0.002
Hierro [Fe]	0.180
Níquel [Ni]	0.168
Silicio [Si]	0.015
Aluminio [Al]	0.022

Azufre [S]	<0.003
Arsénico [As]	<0.004
Bismuto [Bi]	<0.005
Selenio [Se]	<0.005
Sumatoria	99.989

(Departamento de Materiales, 2018)

2.2.1. Dimensiones y codificación de las probetas soldadas

Las probetas fueron cortaron en un torno y en este proceso se fue aplicando refrigerante para evitar que se desarrollaran altas temperaturas durante el corte, posteriormente se quitó las rebabas usando una lima y se procedió a lijarlas para obtener una superficie lo más lisa posible para obtener un buen contacto superficial de las muestras de cobre y latón al realizar el proceso de soldadura.

Las dimensiones de las muestras fueron aproximadamente de 80 mm de longitud y 12.7 mm de diámetro ya que la máquina de soldadura por fricción no permite un montaje y desmontaje de probetas de mayores dimensiones (Figura 2.8.).



Figura 2.8. Probetas de latón (izquierda) y cobre (derecha).
(Fuente: Propia)

La Tabla 2.10. enlista la codificación que se utiliza es la que se muestra en

Tabla 2.10. Codificación de las probetas.

Sin precalentamiento	Precalentamiento de 150°C	Precalentamiento de 250°C
S1	B1	A1
S2	B2	A2
-	B3	A3
-	B4	A4
-	B5	A5

(Fuente: Propia)

Una vez que las probetas (cobre y latón) han sido codificadas, se procede a tomar sus dimensiones con un calibrador pie de rey cuya precisión es de 0.02 mm (Tabla 2.11.).

Tabla 2.11. Dimensiones de las probetas.

Código	Cobre		Latón	
	Longitud [mm]	Diámetro [mm]	Longitud [mm]	Diámetro [mm]
S1	80.40	12.70	80.10	12.70
S2	80.40	12.70	70.80	12.70
B1	80.44	12.70	80.10	12.70
B2	80.40	12.70	80.22	12.70
B3	80.39	12.80	70.54	12.70
B4	80.20	12.70	70.56	12.64
B5	80.39	12.70	70.70	12.70
A1	80.30	12.60	70.68	12.70
A2	80.30	12.60	70.54	12.70
A3	80.32	12.70	70.34	12.70
A4	80.31	12.70	70.58	12.70
A5	80.42	12.70	70.74	12.70

*S: Probetas sin precalentamiento

*B: Probetas con precalentamiento de 150 [°C]

*A: Probetas con precalentamiento de 250 [°C]

(Fuente: Propia)

2.2.2. Preparación de las probetas

Para asegurar una buena calidad de la soldadura, la superficie de las probetas que van a soldarse deben cumplir con las siguientes condiciones:

- Deben estar libres de suciedad (óxidos y aceites).
- Se debe asegurar que las superficies a soldar sean perpendiculares al eje de rotación de la probeta.
- Las superficies de contacto deben ser lo más lisas posibles para evitar que quede alguna impureza atrapada en la unión.
- No utilizar ningún artículo de limpieza sobre las superficies a soldar ya que estos hacen que aparezcan contaminantes en la unión de los materiales.

2.2.3. Parámetros para la soldadura

Se toma en consideración las recomendaciones dadas por Almeida (1989), en la cual compara varios procesos y variables para soldar materiales disímiles y concluye que se debe considerar las variables determinadas por el material con menor dureza, en este caso el cobre es el material con menor dureza. La velocidad de rotación que el cobre necesita es de 1300 rpm por lo que es tomada como referencia para realizar la soldadura del cobre con el latón. El tiempo total de soldadura y tiempo de forja sugeridos para la soldadura de estos materiales y demás parámetros se muestran en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Parámetros para la soldadura.

Parámetros	Valor
Velocidad de rotación [rpm]	1300
Presión de calentamiento [kgf]	35
Presión de forja [kgf]	105
Tiempo de soldadura [s]	20

(Fuente: Propia)

La máquina de soldadura por fricción que se va a utilizar fue construida por Arguello y Paredes (1987) y está diseñada de tal forma que su velocidad más baja es de 2500 rpm, por ello es necesario añadir una rueda adicional que reduzca la velocidad de la máquina a la que se necesita que es de 1300 rpm y para esto se toma en consideración en cálculo

realizado por Amaguayo y Sánchez (2017); en dicho cálculo se llega a la conclusión que para obtener la velocidad de 1300 rpm se debe montar una polea de 406.4 mm (Figura 2.9) en el eje superior conducido de la máquina para soldar por fricción. En el mismo cálculo se define la banda que se necesita para accionar dicha polea (Figura 2.10); es de 1854.2 mm de perímetro.



Figura 2.9. Polea.
(Fuente: Propia)



Figura 2.10. Banda.
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.11. se puede observar la soldadura de las probetas considerando los parámetros de la Tabla 2.12.



Figura 2.11. Pre calentamiento de las probetas.
(Fuente: Propia)

Para controlar que la temperatura de pre calentamiento sea la deseada, se utiliza un pirómetro infrarrojo (Figura 2.12.) Este pirómetro puede medir temperaturas de hasta 400° C con un error del 1%.



Figura 2. 12. Pirómetro infrarrojo.
(Fuente: Propia)

Las probetas soldadas pueden ser observadas en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Probetas soldadas.
(Fuente: Propia)

Una vez soldadas las probetas se procede a realizar un análisis metalográfico y ensayos de tracción a las mismas

2.3. Ensayo de tracción y metalografías

2.3.1. Ensayo de tracción

Este ensayo se realiza para determinar la resistencia última a la tracción del material. En este estudio se quiere conocer la cantidad de esfuerzo que soporta la soldadura cobre-latón, estos resultados son obtenidos haciendo uso de la máquina de ensayos universales del LAEV de la facultad de Ingeniería Mecánica. Las probetas para este ensayo se fabrican bajo la norma ASTM E8 (Figura 2.14.), que indica el tamaño que debe poseer la probeta a ser ensayada (Tabla 2.13.), así como también la velocidad a la que debe ser ensayada (0.05 mm/s).

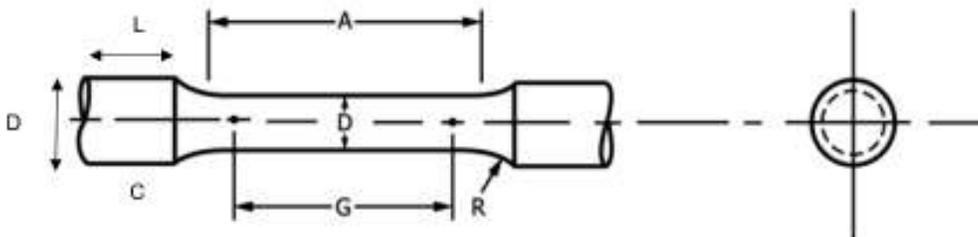


Figura 2.14. Probeta según norma ASTM E8.
(Fuente: [18])

Tabla 2.13. Dimensiones probeta de ensayo de tracción según norma ASTM E8.

G- Longitud [mm]	24 ± 0.1
D – Diámetro [mm]	6 ± 0.1
R – Radio [mm]	6.0
A - Longitud de sección reducida paralela [mm]	30.0
C – Rosca [in]	3/8, paso de 16G
L – Longitud Roscado [mm]	20.0

(Fuente: [18])

Las probetas a ensayar no poseen ningún tipo de roscado debido a que cuando fueron soldadas no quedaron alineadas (Figura 2.15.) y no es posible hacer una rosca adecuada en el torno con esa desalineación, por ello se optó por sujetarlas con abrazaderas en la máquina de ensayos universales.



Figura 2.15. Probeta soldada.
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.16. se muestra el ensayo de tracción realizado a las probetas bajo la norma ASTM E8



Figura 2.16. Ensayo de tracción del material base.
(Fuente: Propia)

2.3.2. Metalografía

La metalografía es un procedimiento fundamental utilizado para el estudio y caracterización de la soldadura, para este estudio es necesario la utilización de químicos que revelan los constituyentes metalográficos y la estructura de los metales. Los químicos utilizados dependen de cada metal o aleación a estudiar.

Para proceder a realizar el análisis metalográfico se determina la zona a estudiar, la misma que debe ser representativa, por lo que se debe pulir la superficie y dejarla con un acabado tipo espejo para así poder llegar a observar la estructura del metal, su estructura interna, deformaciones, defectos y daños térmicos producidos en el material durante la soldadura al usar ataque químico que permita la visualización de dichos defectos.

2.3.3. Selección y extracción

Una selección adecuada de la pieza y su orientación reducirá al mínimo la cantidad de muestras que se requieren haciendo más fácil y rápido el estudio por lo que se debe cortar las probetas de tal manera que se obtengan superficies planas generando la menor cantidad de calor durante el corte ya que una alta temperatura puede modificar la microestructura del metal por lo que se utiliza líquido lubricante. Se corta las probetas de manera transversal (Figura 2.17.) ya que de esta manera se puede observar la estructura, impurezas, coalescencia de los materiales, etc. Estas muestras son obtenidas de acuerdo a la norma ASTM E3.



Figura 2.17. Corte de probetas.
(Fuente: Propia)

2.3.4. Desbastado grueso

Se utiliza este desbastado para eliminar las deformaciones que se obtuvieron al realizar el corte y así obtener una superficie lisa para las siguientes etapas de la preparación de la muestra; para esta operación se utiliza una lija de grano grueso sujeta a un disco giratorio (Figura 2.18.), cuando se está puliendo en esta lija de grano grueso se utiliza agua para refrigerar e ir desplazando las partículas del material que se van desprendiendo en el proceso. El resultado es una probeta con un acabado basto (Figura 2.19.).



Figura 2.18. Desbastado grueso.
(Fuente: Propia)

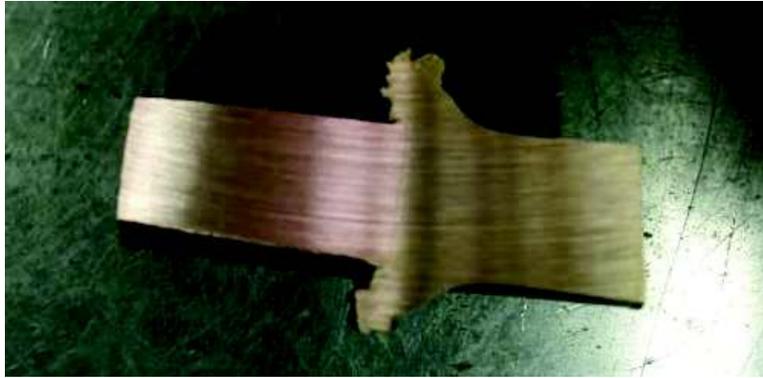


Figura 2.19. Probeta desbastada.
(Fuente: Propia)

2.3.5. Montaje de probetas

Para facilitar la manipulación de las probetas de tamaño pequeño las muestras son montadas en resina (Figura 2.20.), este proceso de montaje es sencillo ya que solo se debe preparar la mezcla y esta se deposita sobre la probeta dentro de un molde redondo, la resina se seca en un corto periodo de tiempo. Una vez seca la resina se puede proceder a realizar el desbaste fino y el pulido.



Figura 2.20. Montaje de las probetas en resina.
(Fuente: Propia)

2.3.6. Pulido fino

En el pulido fino se utilizan abrasivos en polvo depositados en una superficie lubricada; este proceso se realiza sobre paños especiales en platos giratorios (Figura 2.21). Para pulir las probetas cobre-latón de este estudio se utilizó alúmina suspendida en agua para eliminar la mayor cantidad de rayones presentes en los materiales, en la etapa final del pulido fino

se utilizó un lubricante especial de suspensión de diamantes en agua (Figura 2.22.) en un paño.



Figura 2.21. Pulido fino.
(Fuente: Propia)



Figura 2.22. Lubricante de diamantes suspendidos en agua.
(Fuente: Propia)

2.3.7. Ataque químico

Una vez pulidas las probetas, se realiza el ataque químico sumergiendo las probetas en una solución (nital al 5%) por 15 segundos que ataca la superficie (Figura 2.23.). Para determinar que reactivo se necesita para los materiales se toma como guía las normas ASTM E 304 y la ASTM E407.

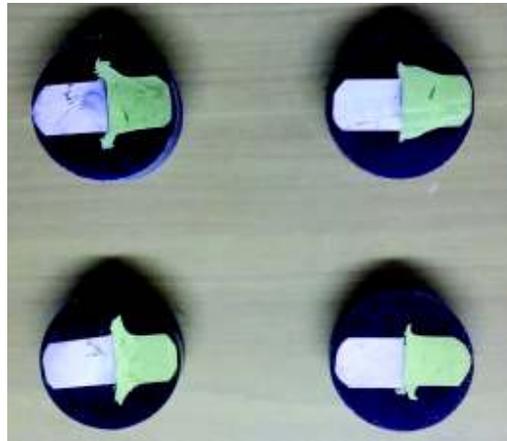


Figura 2.23. Probetas atacadas.
(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS OBTENIDOS

3.1. Encogimiento axial posterior a la soldadura por fricción

Se tomaron las medidas de los materiales antes de realizar la soldadura, una vez hecha la soldadura se vuelve a medir la longitud de los materiales soldados y se conoce el valor del encogimiento axial (Tabla 3.1.).

Tabla 3.1. Encogimiento axial de las probetas soldadas.

Código	Longitud inicial del cobre	Longitud inicial del latón	Longitud inicial total del cobre y latón	Longitud final de la soldadura cobre-latón	Encogimiento axial
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
S1	80.40	80.10	160.50	-	-
S2	80.40	70.80	151.20	-	-

B1	80.44	80.10	160.54	154.34	6.20
B2	80.40	80.22	160.62	156.82	3.80
B3	80.40	70.54	150.94	146.54	4.40
B4	80.20	70.56	150.76	145.36	5.40
B5	80.39	70.70	151.09	147.89	3.20
A1	80.30	70.68	150.98	141.58	9.40
A2	80.30	70.54	150.84	144.24	6.60
A3	80.32	70.34	150.66	143.46	7.20
A4	80.32	70.58	150.90	147.70	3.20
A5	80.42	70.74	151.16	140.96	10.20
Encogimiento axial promedio					5.96

*S: Probetas sin precalentamiento

*B: Probetas con precalentamiento de 150 [°C]

*A: Probetas con precalentamiento de 250 [°C]

(Fuente: Propia)

3.2. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realizó en 16 muestras: 10 de las cuales fueron de las probetas soldadas y en las 6 restantes fueron los materiales base (3 en probetas de cobre y 3 en probetas de latón). Los resultados se detallan en la Tabla 3.2. y la Tabla 3.3.

Tabla 3.2. Resultados de los ensayos de tracción de las probetas de material base.

Código	Diámetro Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		%elongación en 25 [mm]
	[mm]	[lbf]	[N]	[ksi]	[MPa]	
D1	6.15	3268	14536	71.00	489.30	28.60
D2	6.08	3012	13400	66.90	461.50	16.10
D3	6.14	3049	13564	66.40	458.10	21.20
E1	6.05	2157	9596	48.40	333.80	21.30
E2	5.97	2053	9131	47.30	326.20	22.90
E3	5.99	2130	9473	48.80	336.20	22.80

*D: Probetas de latón

*E: Probetas de cobre

(Fuente: Propia)

Tabla 3.3. Resultados del ensayo de tracción realizado a las juntas soldadas

Código	Diámetro Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs. *
	[mm]	[lbf]	[N]	[ksi]	[MPa]	
A1	12.73	4103	18252	20.80	143.40	FJS
A2	12.81	4063	18074	20.30	140.20	FJS
A3	12.96	3471	15439	17.00	117.00	FJS
A4	12.76	2002	8903	10.10	69.60	FJS
A5	12.77	1514	6734	7.60	52.60	FJS
B1	12.88	937	4166	4.60	32.00	FJS
B2	12.85	2875	12790	14.30	98.60	FJS
B3	12.93	2415	10742	11.90	81.80	FJS
B4	12.91	1640	7293	8.10	55.70	FJS
B5	12.88	1633	7263	8.10	55.70	FJS

*B: Probetas con precalentamiento de 150 [°C]

*A: Probetas con precalentamiento de 250 [°C]

*FJS: Falla junta soldada.

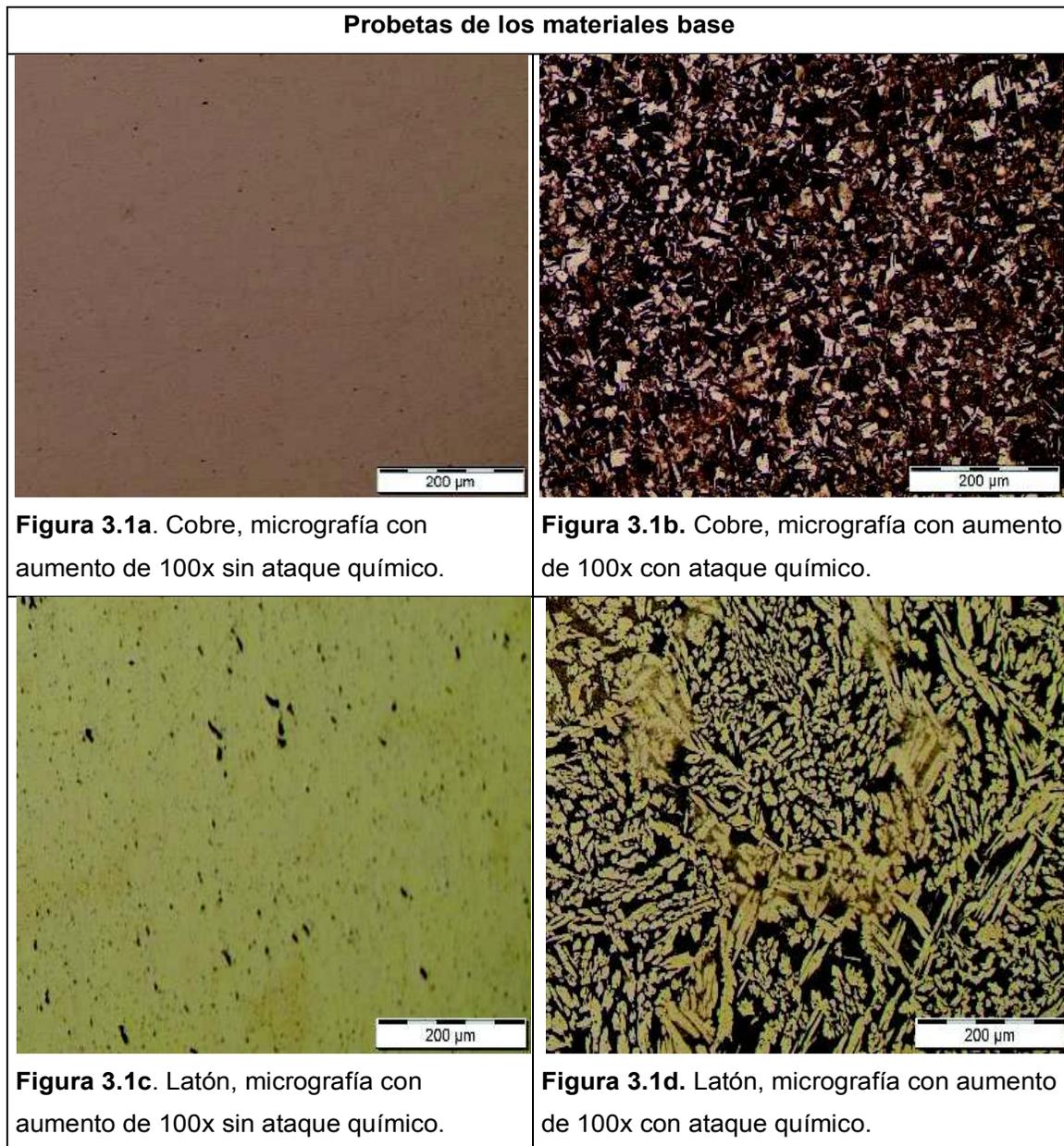
(Fuente: Propia)

3.3. Resultados de las metalografías

El estudio de las metalografías es importante si se desea hacer una caracterización de la soldadura, ya que así se conoce como es la microestructura de los materiales soldados. En soldadura sin precalentamiento no se pudo realizar debido a la fragilidad del latón, por ello, no se hizo su análisis metalográfico. Sin embargo, las probetas con precalentamiento que sí pudieron ser soldadas fueron preparadas para análisis metalográfico.

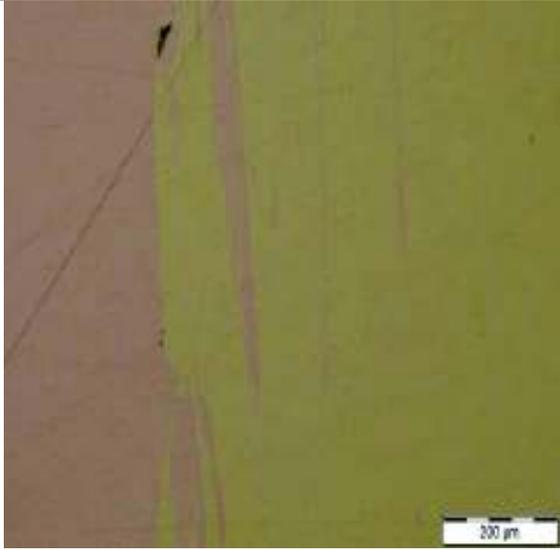
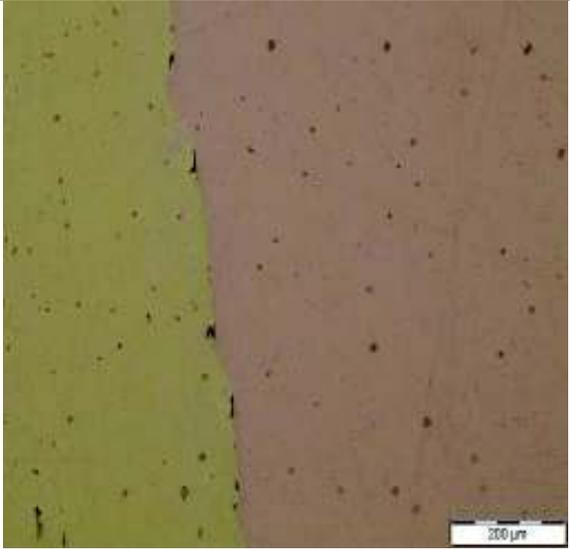
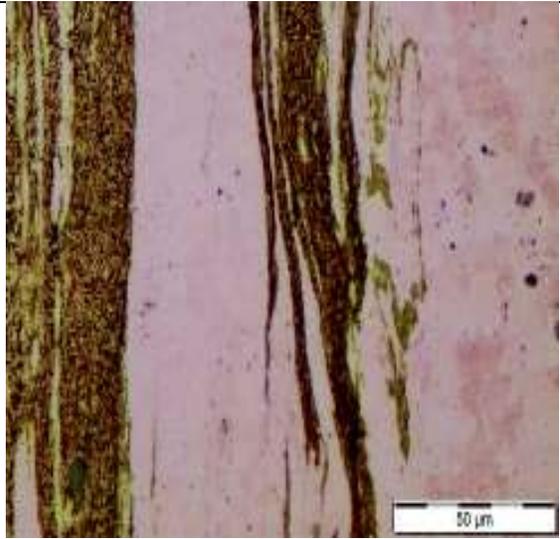
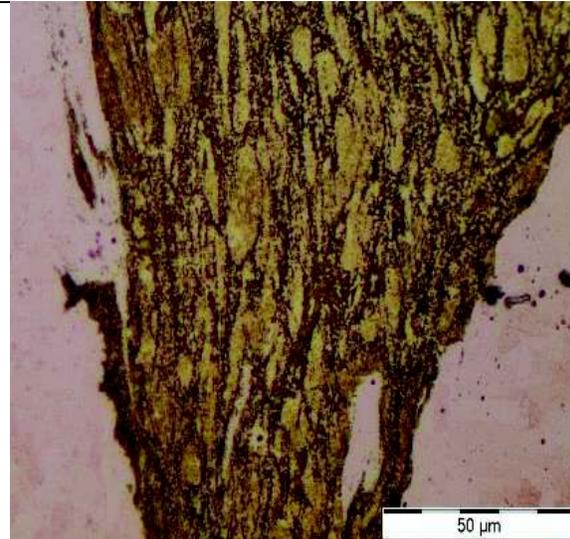
En la Figura 3.1. se muestra las micrografías del material base (cobre y latón) con y sin ataque químico. En la Figura 3.2. hasta la Figura 3.5. las micrografías realizadas a cada probeta.

Figura 3.1. Micrografías del material base.



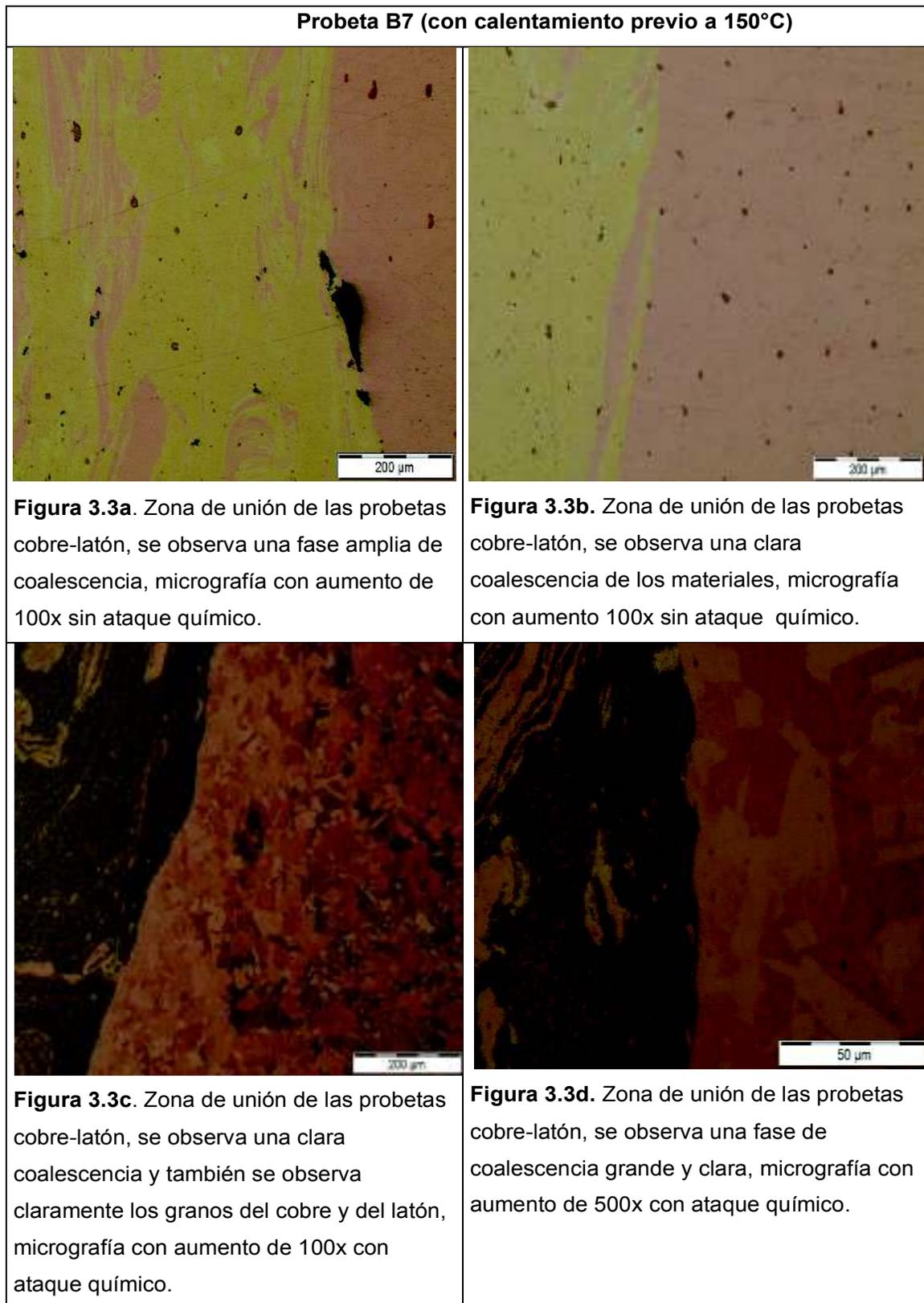
(Fuente: Propia)

Figura 3.2. Micrografías cobre-latón y sus características de la probeta B6.

Probeta B6 (con calentamiento previo a 150°C)	
	
<p>Figura 3.2a. Zona de unión de las probetas cobre-latón, se observa una clara coalescencia, micrografía con aumento de 100x sin ataque químico.</p>	<p>Figura 3.2b. Zona de unión de las probetas cobre-latón, se observa coalescencia parcial en varias zonas, micrografía con aumento 100x sin ataque químico.</p>
	
<p>Figura 3.2c. Zona de unión de las probetas cobre-latón, se observa una clara coalescencia y también se observa los granos del cobre y del latón, micrografía con aumento de 500x con ataque químico.</p>	<p>Figura 3.2d. Zona de unión de las probetas cobre-latón, se observa coalescencia, micrografía con aumento de 500x con ataque químico.</p>

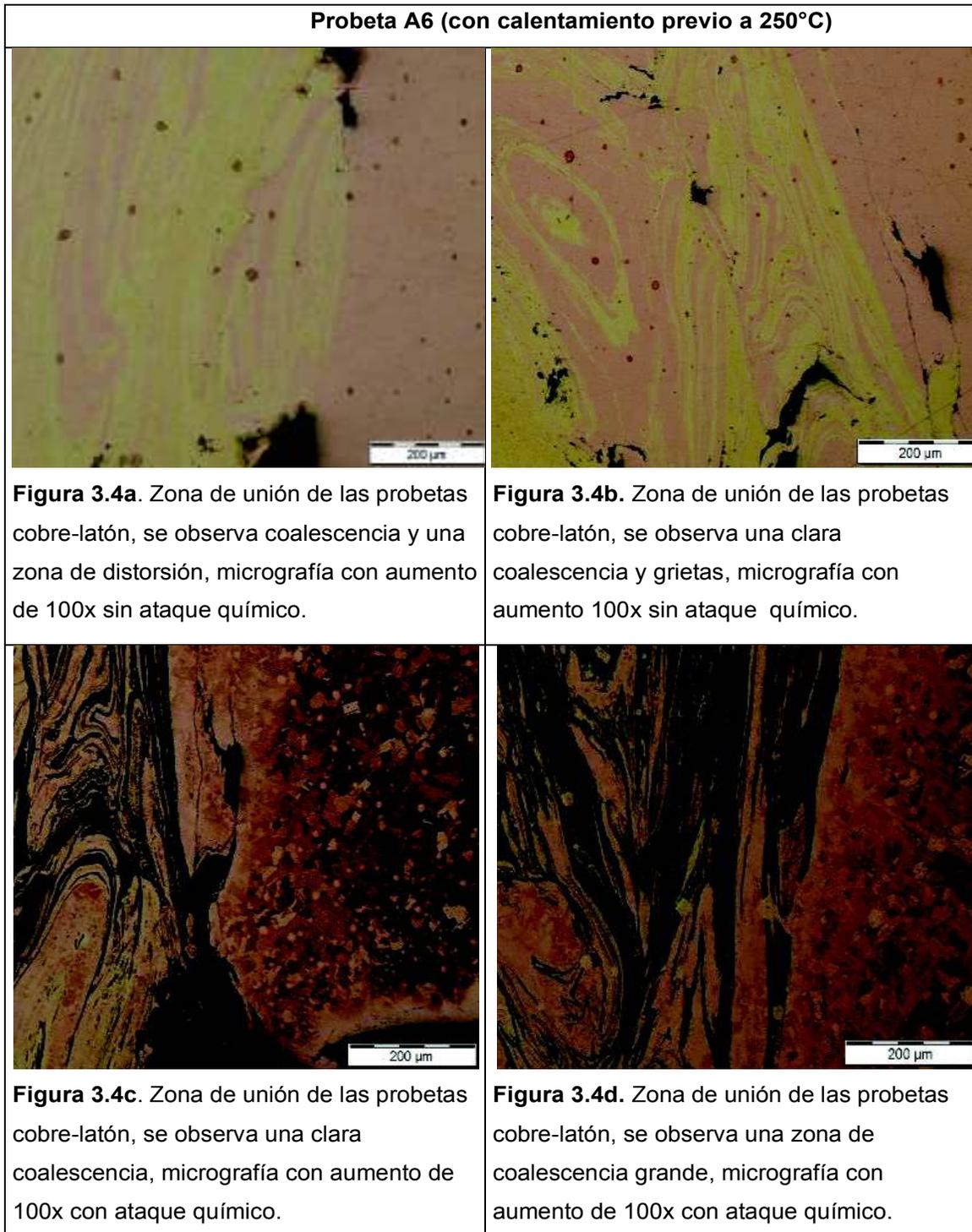
(Fuente: Propia)

Figura 3.3. Micrografías cobre-latón y sus características de la probeta B7.



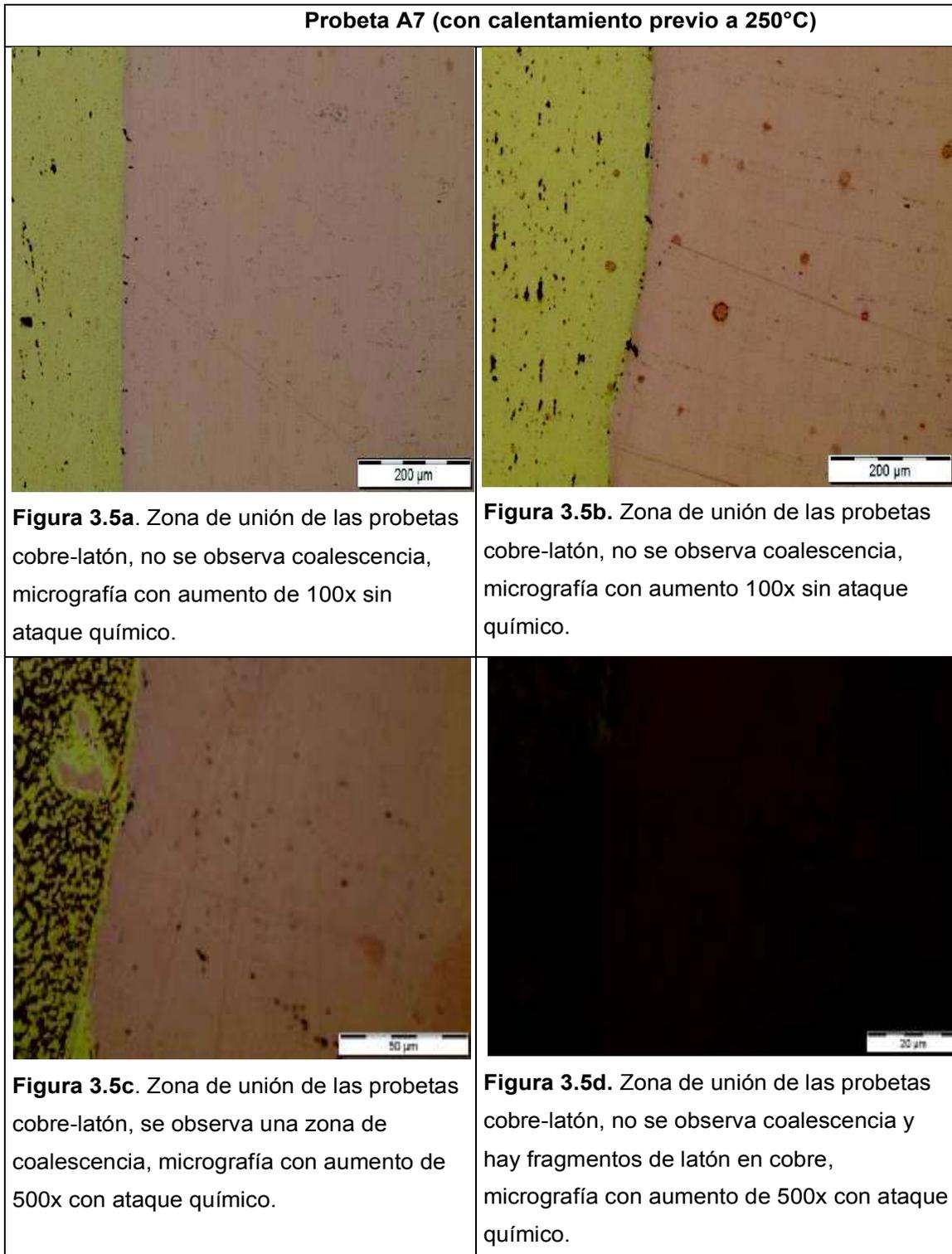
(Fuente: Propia)

Figura 3.4. Micrografías cobre-latón y sus características de la probeta A6.



(Fuente: Propia)

Figura 3.5. Micrografías cobre-latón y sus características de la probeta A7.



(Fuente: Propia)

3.4. Microdurezas

Estas pruebas se realizaron con un microdurómetro marca Duroline Metkon, este equipo permite determinar las microdurezas de los materiales mediante la indentación de sus superficies, para visualizar esta indentación se utiliza un microscopio de aumento de 100x. El indentador deja una marca en forma de rombo o diamante (Figura 3.6.) y se mide las diagonales de esa marca para determinar su dureza en escala Vickers.

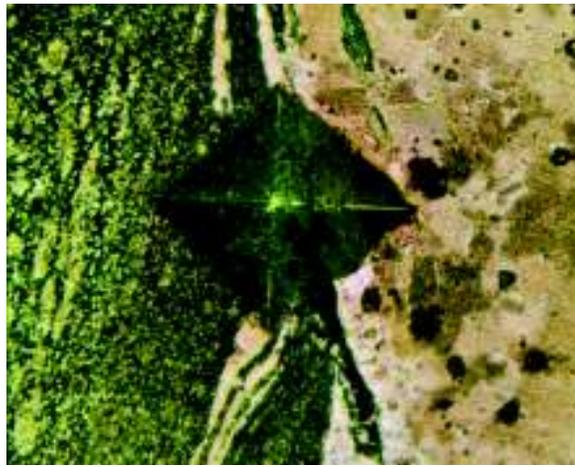


Figura 3.6. Marca del indentador sobre la unión de los materiales, con un aumento de x100.
(Fuente: Propia)

Este ensayo se realizó bajo la norma internacional ASTM E384, la cual recomienda la aplicación de carga de 25 a 100 grf, esta carga debe ser aplicada de 2 a 15 s y la velocidad del indentador debe estar entre 15 y 70 $\mu\text{m/s}$. Cabe recalcar que esta velocidad viene dada por la máquina a utilizarse.

La norma ASTM E384 también especifica las condiciones que debe tener la superficie de las probetas a ensayar, da indicaciones sobre la limpieza de las áreas de ensayo y la correcta posición de la máquina.

Las distancias tomadas para realizar las indentaciones en el presente estudio fueron:

- La primera medida en la unión de los materiales,
- Las dos medidas siguientes a 1 mm a la derecha e izquierda de la primera medida
- Las siguientes seis medidas: 3 medidas consecutivas a una distancia de 2 mm de las dos medidas anteriores realizadas.

En la Figura 3.7. se ilustra as distancias entre las marcas de indentación.

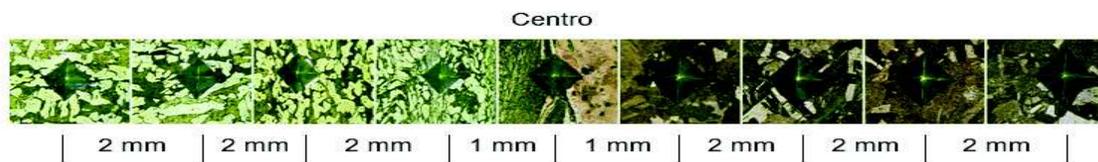


Figura 3.7. Distancia entre las marcas de indentación, con aumento de x100.
(Fuente: Propia)

El análisis de microdureza se realizó en cuatro probetas y sus resultados se detallan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Probetas para ensayo de microdureza.

Codificación	Prueba realizada
B6	Microdureza
B7	Microdureza
A6	Microdureza
A7	Microdureza

*B: Probetas con precalentamiento de 150 [°C]

*A: Probetas con precalentamiento de 250 [°C]

(Fuente: Propia)

3.4.1. Microdureza en la probeta cobre-latón [B6]

En la Tabla 3.5. se observa los valores de microdurezas de puntos a lo largo de la junta soldada B6 (precalentamiento de 150° C).

Tabla 3.5. Ensayo de microdureza probeta B6.

Material	Etiqueta	HV	D1	D2	Diagonal media
Latón	O1	122.08	53.99	56.23	55.11
	O2	126.61	55.31	52.92	54.12
	O3	128.70	54.50	52.85	53.68
Junta soldada	O4	167.18	47.91	46.28	47.10
	O5	97.03	61.12	62.52	61.82
	O6	81.46	68.69	66.24	67.47
Cobre	O7	71.07	73.10	71.36	72.23
	O8	68.49	75.04	72.12	73.58
	O9	64.37	76.76	75.03	75.90

*HV dureza en escala Vickers

(Fuente: Propia)

La Figura 3.8. muestra la curva de las mediciones de microdureza que se obtuvieron de la probeta B6, para la zona del latón su microdureza varía entre 120 a 128 HV, mientras que la zona del cobre su microdureza varía entre 65 a 71 HV.

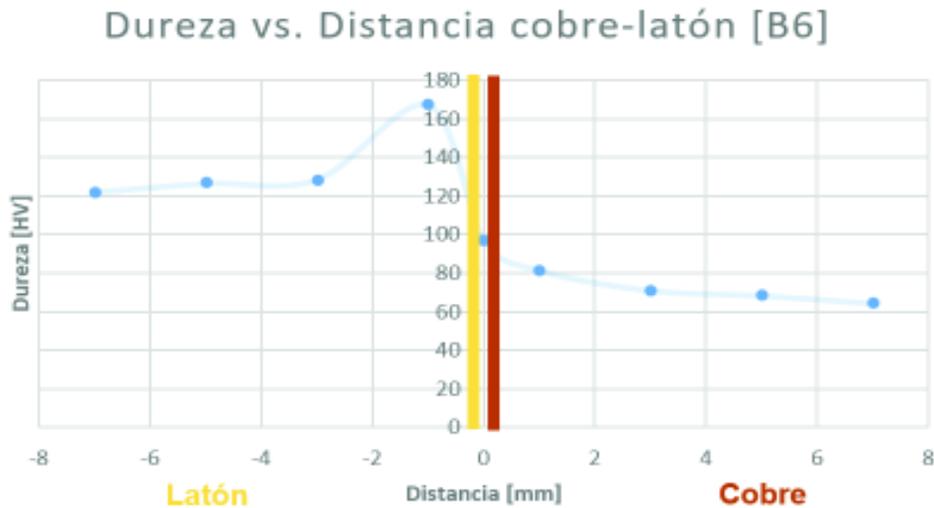


Figura 3.8. Dureza vs. Distancia probeta B6.
(Fuente: Propia)

3.4.2. Microdureza en la probeta cobre-latón [B7]

En la Tabla 3.6. se observa los valores de microdurezas de puntos a lo largo de la junta soldada B7 (precalentamiento de 150° C).

Tabla 3.6. Ensayo de microdureza probeta B7.

Material	Etiqueta	HV	D1	D2	Diagonal media
Latón	O1	124.73	55.16	53.89	54.52
	O2	128.01	53.31	54.33	53.82
	O3	126.14	54.96	53.48	54.22
Junta soldada	O4	134.22	53.73	51.39	52.56
	O5	125.32	55.05	53.74	54.39
	O6	59.12	79.94	78.45	79.20
Cobre	O7	57.30	80.19	80.71	80.45
	O8	59.45	80.51	77.43	78.97
	O9	57.09	81.01	80.18	80.60

*HV dureza en escala Vickers
(Fuente: Propia)

La Figura 3.9. muestra la curva de las mediciones de microdureza que se obtuvieron de la probeta B7, para la zona del latón su microdureza varía entre 124 a 127 HV, mientras que la zona del cobre su microdureza varía entre 58 a 59 HV.

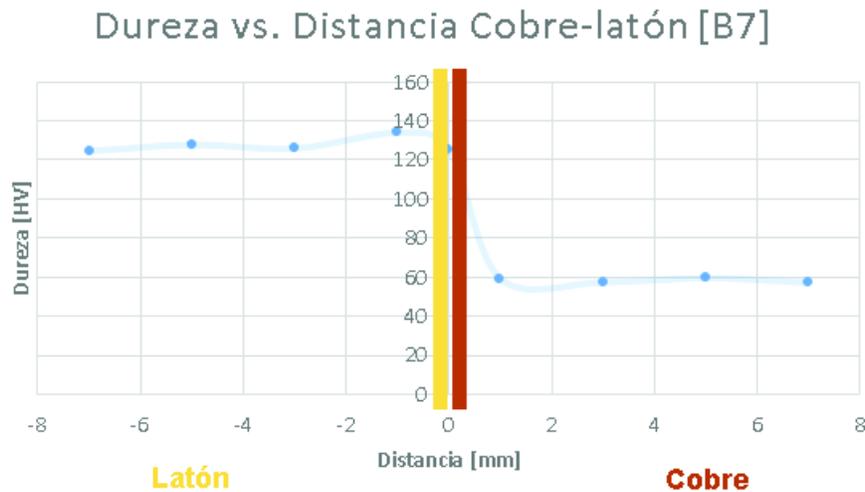


Figura 3.9. Dureza vs. Distancia probeta B7.
(Fuente: Propia)

3.4.3. Microdureza en la probeta cobre-latón [A6]

En la Tabla 3.7. se observa los valores de microdurezas de puntos a lo largo de la junta soldada A6 (precalentamiento de 250° C).

Tabla 3.7. Ensayo de microdureza probeta A6.

Material	Etiqueta	HV	D1	D2	Diagonal media
Latón	O1	124.24	55.04	54.22	54.63
	O2	128.26	54.04	53.50	53.77
	O3	127.68	53.91	53.87	53.89
Junta soldada	O4	135.36	52.76	51.92	52.34
	O5	113.57	55.69	58.59	57.14
	O6	66.53	75.71	73.59	74.65
Cobre	O7	60.89	76.95	79.12	78.04
	O8	59.15	81.73	76.62	79.17
	O9	58.74	81.34	77.56	79.45

*HV dureza en escala Vickers
(Fuente: Propia)

La Figura 3.5. muestra la curva de las mediciones de microdureza que se obtuvieron de la probeta A6, para la zona del latón su microdureza varía entre 125 a 128 HV, mientras que la zona del cobre su microdureza varía entre 58 a 61 HV.

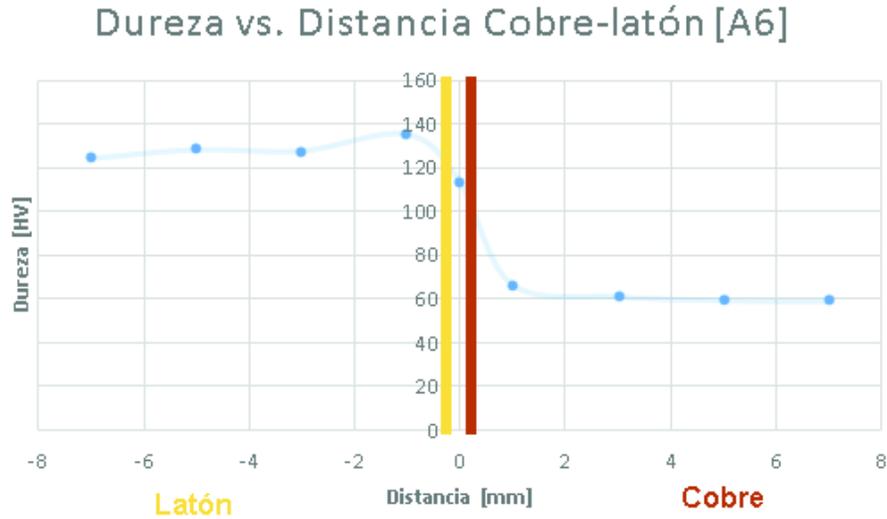


Figura 3.10. Dureza vs. Distancia probeta A6.
(Fuente: Propia)

3.4.3. Microdureza en la probeta cobre-latón [A7]

En la Tabla 3.8. se observa los valores de microdurezas de puntos a lo largo de la junta soldada A7 (precalentamiento de 250° C).

Tabla 3.8. Ensayo de microdureza probeta A7.

Material	Etiqueta	HV	D1	D2	Diagonal media
Latón	O1	115.71	56.71	56.51	56.61
	O2	116.66	55.46	57.29	56.38
	O3	114.77	57.78	55.90	56.84
Junta soldada	O4	131.22	54.14	52.18	53.16
	O5	122.08	53.99	56.23	55.11
	O6	81.44	67.11	67.84	67.48
Cobre	O7	64.41	76.98	74.77	75.87
	O8	64.73	76.59	74.79	75.69
	O9	63.01	76.00	77.43	76.71

*HV dureza en escala Vickers
(Fuente: Propia)

La Figura 3.6. muestra la curva de las mediciones de microdureza que se obtuvieron de la probeta A6, para la zona del latón su microdureza entre 115 a 117 HV, mientras que la zona del cobre su microdureza varía entre 63 a 65 HV.

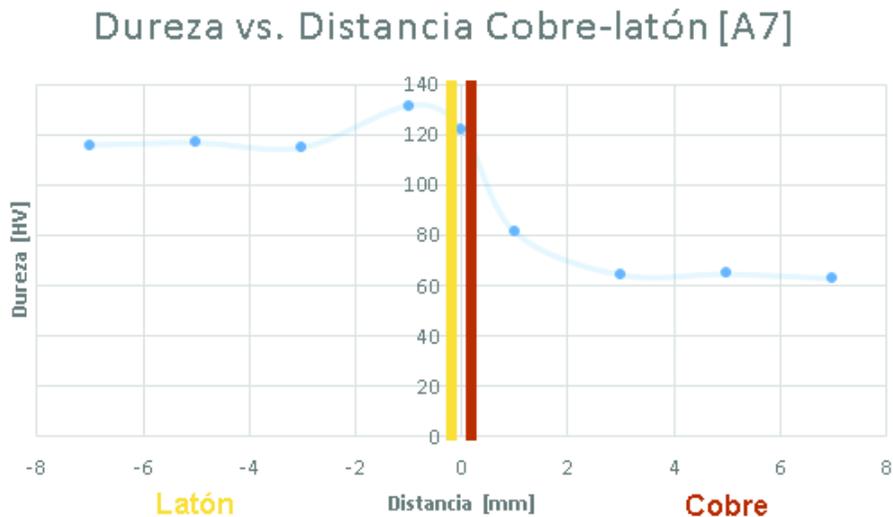


Figura 3.11. Dureza vs. Distancia probeta A7.
(Fuente: Propia)

3.5. Discusión de resultados

3.5.1. Proceso de soldadura por fricción

Posterior al proceso de soldadura por fricción los materiales sufren deformación tanto en la dirección axial (encogimiento) como en la dirección radial (rebabas). La primera forma de observar el estado de la soldadura realizada es por medio de la inspección visual, esta inspección da una idea de si existió o no coalescencia de los materiales.

Se puede observar en la Tabla 3.1. que los valores de encogimiento axial están entre 3.80 y 10.20 mm, y los valores más elevados de este encogimiento axial se dan en las probetas con la temperatura de precalentamiento más alta (250°C) pero estas probetas que son las que presentan mayor encogimiento axial son las que mejores resultados de resistencia a la tracción presentaron. Este encogimiento axial se da más en el cobre ya que el latón es más duro y posee mayor temperatura de plasticidad.

Debido a que no fue posible soldar las probetas por la alta dureza y fragilidad del latón pues, se fracturaba al aplicar la presión de calentamiento (Figura 3.12.), se optó por calentar las probetas a dos temperaturas (150 °C y 250 °C) pues estas temperaturas no exceden las temperaturas de fusión ni del cobre ni del latón, para el efecto se utilizó un equipo oxiacetilénico (Figura 2.11.) y se controló la temperatura con un pirómetro infrarrojo marca Fluke (Figura 2.12.).



Figura 3.12. Probeta de latón fracturada.
(Fuente: Propia)

3.5.2. Ensayo de tracción

3.5.2.1. Ensayo de tracción del material base

Las probetas de cobre y latón ensayadas presentan un valor promedio de resistencia a la tracción de 332.06 MPa y 469.63 MPa respectivamente, adicionalmente se registró una carga máxima promedio para el cobre de 9400 N y 13833.33 N para el latón.

Según Goodfellow (2018), la resistencia a la tracción del cobre electrolítico tiene un valor que se encuentra entre 224 MPa y 410 MPa, mientras que para el latón según AALCO (2011) la resistencia a la tracción se encuentra entre 360 MPa y 580 MPa. Si se observa la Tabla 3.2. los valores que se obtuvieron están dentro de los rangos establecidos para cada material.

Las probetas de cobre se fracturan de manera dúctil debido a la presencia de una zona de

deformación plástica, por otro lado, las probetas de latón presentan poca deformación plástica, esto se debe a que esta aleación presenta dos fases, una fase α y otra β , siendo esta última más dura y de menor plasticidad, por lo que el material no sufre deformación plástica. El porcentaje promedio de elongación en 25 mm es de 22.33% para el cobre y 21.96% para el latón.

3.5.2.2. Ensayo de tracción de las probetas soldadas

Los valores de las cargas máximas que se registraron están entre 4166 N y 18252 N, con estos valores se calcula la resistencia a la tracción, dando como resultado valores entre 32 MPa y 143.40 MPa (Tabla 3.3.).

Los mejores resultados se observan en las juntas que fueron soldadas con un precalentamiento de 250° C, obteniendo un valor promedio de 104.56 MPa (Tabla 3.9.) un valor lejano al del material base cobre.

Tabla 3.9. Porcentaje de eficiencia de la soldadura según la resistencia a la tracción.

Código de las juntas	Resistencia a la tracción promedio	Resistencia a la tracción promedio del cobre	Porcentaje de la eficiencia de la soldadura (η)
	[MPa]	[MPa]	[%]
A1, A2, A3, A4, A5	104.56	332.06	31.48
B1, B2, B3, B4, B5	64.76		19.50

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.9. se observa que el grupo con un precalentamiento de 250° C tiene en promedio una mejor eficiencia que las juntas con un precalentamiento de 150° C. Cabe recalcar que la eficiencia que se obtuvo fue calculada con respecto a la resistencia del cobre.

Esta diferencia en los valores de la resistencia a la tracción de las probetas que se observan en la Tabla 3.3. se debe a que el área efectiva de soldadura varía en cada junta soldada.

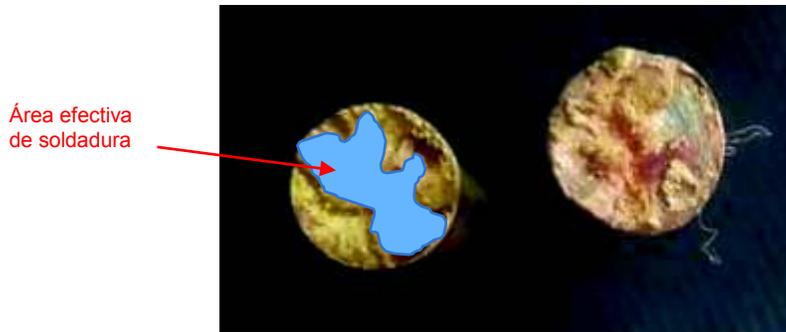


Figura 3.13. Área efectiva de soldadura.
(Fuente: Propia)

Esta área se determinó después del ensayo de tracción con la ayuda de software Photoshop y se calculó el esfuerzo de las probetas con el nuevo valor del área efectiva de soldadura. Para este cálculo se utilizó la siguiente ecuación.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde:

σ es el esfuerzo

F es la fuerza

A es el área de la soldadura

Tabla 3.10 Esfuerzo último a la tracción de las probetas ensayadas

Probeta	Radio equivalente del área efectiva soldada [mm]	Esfuerzo [N/mm ²]
A1	12.73	143.40
A2	12.65	143.80
A3	11.70	143.60
A4	8.93	142.14
A5	7.77	142.01
B1	6.08	143.49
B2	10.65	143.57
B3	9.80	142.41
B4	8.04	143.64
B5	8.04	143.64

(Fuente: Propia)

Se observa que el esfuerzo es similar en todas las probetas soldadas, esto indica que la unión de los materiales es adecuada.

En la Tabla 3.9. se calculó la eficiencia de la soldadura con los datos obtenidos en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones obteniendo una eficiencia de soldadura de 31.48% con respecto a la resistencia de la tracción del cobre. Pero como se observa en la Tabla 3.10. los esfuerzos efectivos son diferentes, y por ello se vuelve a calcular en la Tabla 3.11. la eficiencia real de la soldadura realizada.

Tabla 3.11. Porcentaje de eficiencia de la soldadura real.

Código de las juntas	Resistencia a la tracción promedio	Resistencia a la tracción promedio del cobre	Porcentaje de la eficiencia de la soldadura (η)
	[MPa]	[MPa]	[%]
A1, A2, A3, A4, A5	142.99	332.06	43.06
B1, B2, B3, B4, B5	143.35		43.16

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.11. se observa que el grupo con un precalentamiento de 250° C y el grupo con un precalentamiento de 150° C tienen una eficiencia similar. La unión de los materiales es buena y la temperatura de precalentamiento no influye en gran medida en el esfuerzo a diferencia de la fuerza de forja que hace variar el área efectiva de soldadura. Cabe recalcar que la eficiencia que se obtuvo fue calculada con respecto a la resistencia del cobre.

En la Figura 3.13. también se observa el comportamiento que tuvieron todas las probetas ensayadas cuando fallaron. El fallo de las probetas se dio a un lado de la zona de unión, específicamente del lado del cobre, es decir, fallaron de manera dúctil en el material menos duro de la unión. Que las probetas fallen de esta manera es deseable ya que esto indica que la soldadura (cobre-latón) es buena y que la unión tiene buenas propiedades mecánicas.

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

En la zona de unión de las probetas se observa que el latón se deforma y el cobre ingresa en este. Esto se debe a que se concentró el calor principalmente en el latón para evitar que se fracture durante la soldadura ya que es frágil debido a la fase β presente en el mismo.

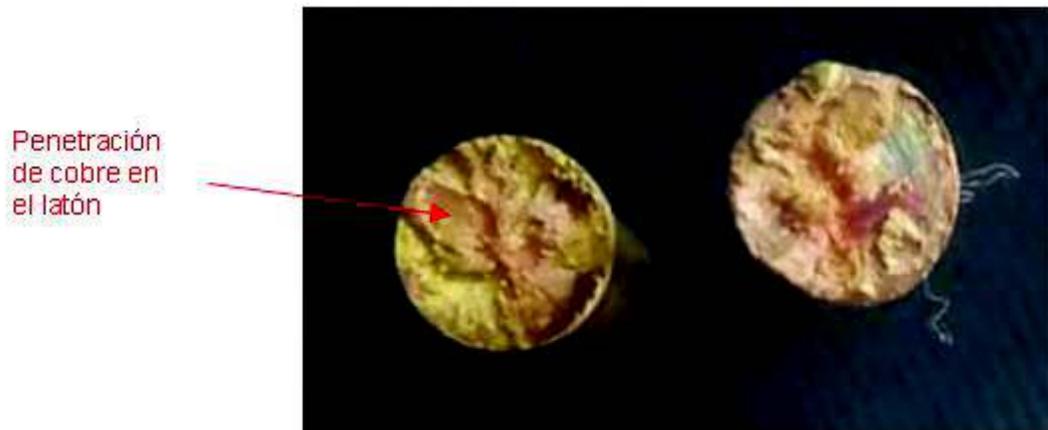


Figura 3.14. Zona de unión de las probetas; probeta de latón (izquierda) y cobre (derecha).
(Fuente: Propia)

Al analizar la zona más representativa de la junta se puede observar penetración de material (cobre en latón), debido al aumento de la temperatura en la fase de calentamiento, lo que ocasiona plasticidad acelerada en el material. Esta penetración de material también se da por la aplicación de la fuerza axial de valor constante en la etapa de calentamiento por fricción, esto ocasiona que el material ya plastificado no pueda salir de la zona de unión de los materiales.

Para obtener más información de la unión soldada, se procede a observar dicha junta con un microscopio electrónico del Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX). Con dicho equipo se observó de manera clara la junta de la soldadura (Figura 3.15.).



Figura 3.15. Zona de unión; probeta de latón (derecha) y cobre (izquierda).
(Fuente: Propia)

Una vez observada la junta se procedió a hacer un mapeo para ver la composición presente en dicha junta (Figura 3.16.).



Figura 3.16. Mapeo de la zona de unión (Fuente: Propia)

Se puede observar en la Figura 3.16. que la soldadura de los materiales se dio por difusión ya que se observa que el latón obtiene un enriquecimiento de cobre (Figura 3.17.).

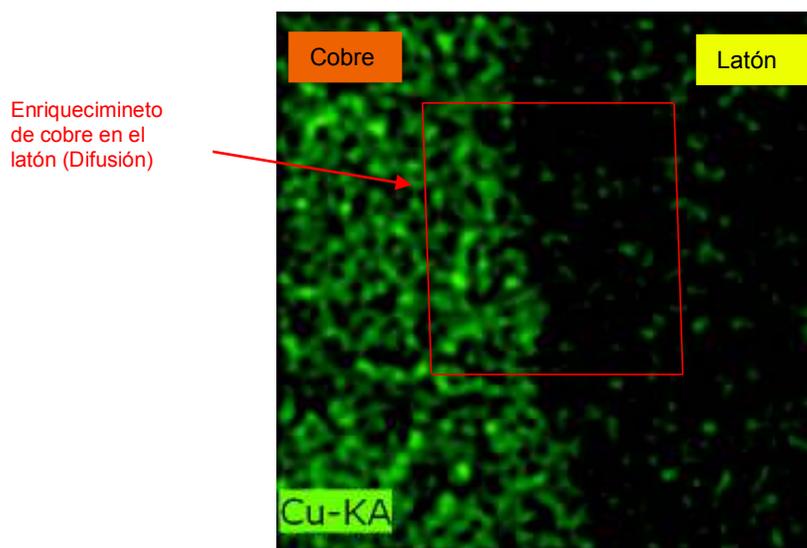


Figura 3.17. Enriquecimiento de cobre en el latón (Fuente: Propia)

La difusión es un proceso físico irreversible, en el que partículas materiales se introducen en un medio en el que inicialmente estaba ausente. En el presente estudio se observó que el cobre se difundió en el latón. Para entender el motivo por el cual ocurre lo antes

mencionado se debe observar los valores de la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Tratamientos térmicos del cobre.

Material	D [m/s]	Q [kJ/mol]
Cobre puro	2.5×10^{-5}	197
Latón 60-40	1.5×10^{-5}	268

*D: Coeficiente de difusión

*Q: Energía de activación

(Fuente: [44])

La energía de activación indica la cantidad de energía mínima que necesita absorber un material para que este se comience a difundir en otro y el coeficiente de difusión indica la facilidad con que un material se mueve en otro. Por tanto, el cobre al poseer energía de activación menor y coeficiente de difusión mayor al latón ocurre la difusión mencionada anteriormente (cobre al latón).

3.5.3. Caracterización del cobre y el latón

3.5.3.1. Caracterización del cobre

Al realizar un análisis de la muestra de cobre, se determinó que el cobre empleado es puro o mejor conocido como cobre electrolítico pues posee un 99,62% de pureza (Tabla 2.8.). Los componentes se encuentran dentro de los parámetros, exigidos para considerarlo material puro. Según Aguilar si la aleación tiene un porcentaje de cobre mayor al 99.30% es considerado cobre puro.

Según Valencia (1992), la aleación de cobre electrolítico puede ser tratada térmicamente, en la Tabla 3.13. se muestra los tratamientos térmicos más utilizados.

Tabla 3.13. Tratamientos térmicos del cobre.

Tratamiento térmico
Recocido
Refinado
Temple

(Fuente: [29])

En la Figura 3.18. se observa una comparación de la microestructura del cobre que se utilizó con la metalografía de un trabajo anterior realizado por Medina F. (2010), y se observa que

las microestructuras son similares.

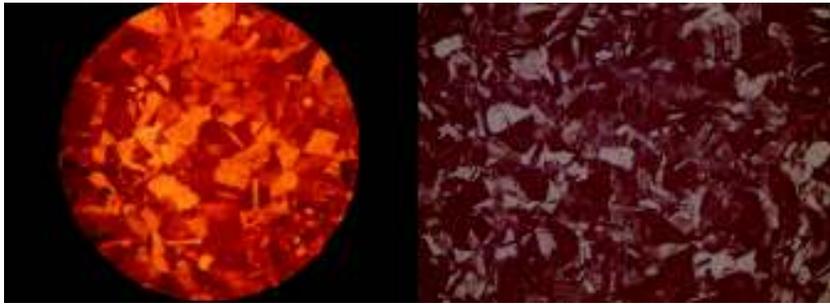


Figura 3.18. Metalografía de Medina F.(izquierda), Metalografía del presente estudio (derecha).

Al comparar las dos metalografías se observa una clara similitud de granos que se obtiene del cobre puro extruido.

3.5.3.2. Caracterización del latón

El análisis de la composición química realizada en el latón (Tabla 2.9.) muestra que es una aleación comercialmente conocida como latón 60-40 (60% cobre y 40% zinc), o como latón $\alpha+\beta$. En la Tabla 3.14. detalla la composición química que debe tener el latón $\alpha+\beta$ según Otto Fuchs (2014).

Tabla 3.14. Composición química del latón $\alpha+\beta$.

Elemento	Valor [%]
Cobre [Cu]	57.000 – 59.000
Zinc [Zn]	Restante
Plomo [Pb]	2.500 – 3.500
Estaño [Sn]	0.160 – 0.300
Manganeso [Mn]	0.020
Hierro [Fe]	0.150 – 0.300
Níquel [Ni]	0.060 – 0.200
Aluminio [Al]	0.002 – 0.050

(Fuente: [30])

Los componentes del latón $\alpha+\beta$ de la muestra que se obtuvo del Laboratorio de Fundición (Tabla 2.9.) se encuentran dentro de los parámetros de un latón 60-40 según Otto Fuchs (2014) a excepción del Sn (0.1300%) y Mn (<0.0020), esto se debe a que la producción de

este material se realiza por colada continua, proceso que se utiliza en nuestro medio por ser económico, sin embargo, poco preciso al momento de mantener la concentración adecuada de los diferentes componentes de la aleación. Otra razón para que haya otros componentes en la aleación puede deberse a que en la preparación de la misma se emiten vapores y polvos metálicos que se van acumulando en el horno y provoca la aparición de impurezas en el producto final.

En la Figura 3.19. se observa una comparación de la microestructura del latón que se utilizó con la metalografía de un trabajo anterior realizado por la Universidad de Barcelona, y se puede observar que la microestructura es la misma.

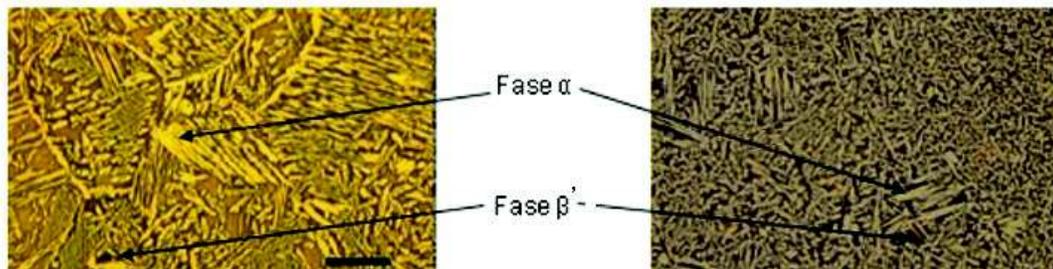


Figura 3.19. Metalografía de la Universidad de Barcelona. (izquierda), Metalografía del presente estudio (derecha).

En las dos metalografías se observa claramente las fases α (fase clara) y β' (fase oscura). Los latones con porcentajes de zinc entre 38% y 58% aproximadamente (en este rango se encuentra el latón del presente estudio) presentan la fase β estable a 800°C con una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, mejor conocida por sus siglas en inglés FCC (cabe decir que en las estructuras cristalinas o redes de Bravais se considera al átomo como una esfera perfecta). En dicha estructura entran cuatro átomos por celda (Figura 3.20.).

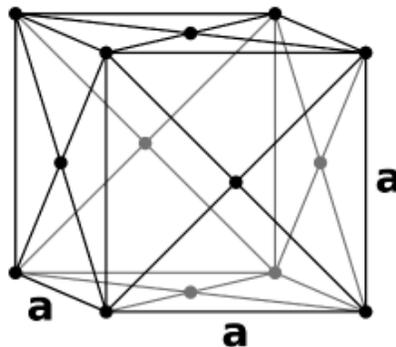


Figura 3.20. Estructura cristalina FCC
(Fuente: [43])

Que el latón tenga esta estructura cristalina cuando posea las fases $\alpha+\beta$ (Figura 3.22.) implica que este es fácil de deformar ya que, la FCC tiene un factor de empaquetamiento de 0.74 (mayor densidad media) que facilita el movimiento de las dislocaciones promoviendo su dislocación.

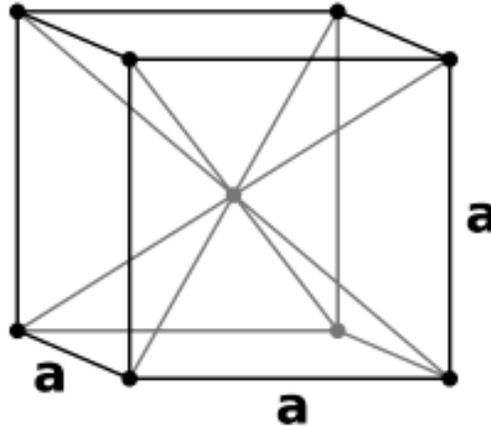


Figura 3.21. Estructura cristalina BCC
(Fuente: [44])

Al enfriar la aleación una parte de la fase β se transforma en fase β' (Figura 3.22.), esto provoca que la estructura cristalina cambie a una estructura cubica centrada en el cuerpo (Figura 3.21.), mejor conocida por sus siglas en inglés BCC. Este cambio ocurre cuando el latón se enfría y la fase β' localizada en el átomo de Zn se ubica en el centro de la estructura. Este cambio de estructura cristalina provoca que el latón sea más difícil de deformar debido a que tiene un factor de empaquetamiento de 0.68, que reduce el movimiento de las dislocaciones

Por esta razón el latón que se utilizó en el presente proyecto (latón 60-40) no se lo podía soldar sin un previo precalentamiento, ya que, era difícil de deformar y eso impedía la soldadura con el cobre.

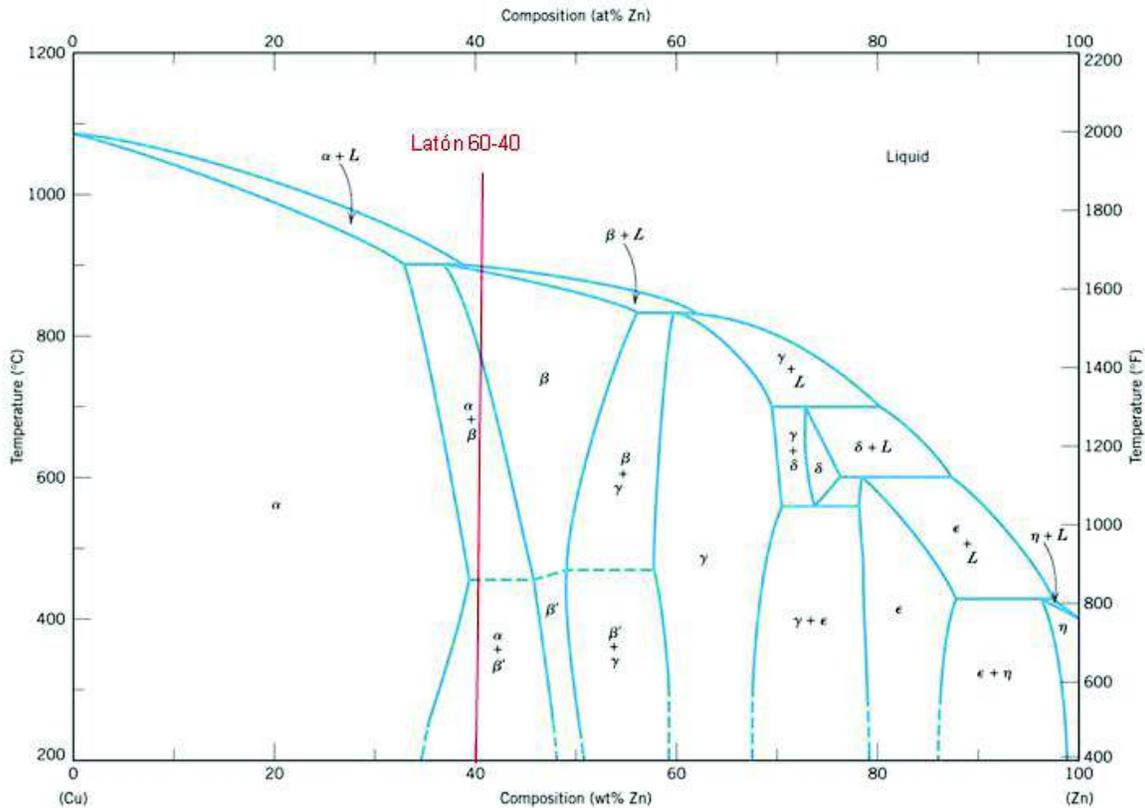


Figura 3.22. Diagrama de fases cobre-zinc.
(Fuente: [28])

3.5.3.3. Caracterización de la soldadura cobre-latón

En la caracterización de la soldadura cobre-latón se realiza un análisis de las metalografías de las cuatro probetas (B6, B7, A6 y A7) y cuya información se detalla en la Tabla 3.5., Tabla 3.6., Tabla 3.7. y Tabla 3.8.

En las probetas B6, B7, A6 y A7 los materiales cobre y latón fueron atacados químicamente simultáneamente ya que son similares.

Cabe recalcar que los trabajos anteriores sobre la soldadura de estos dos materiales (cobre y latón) son inexistentes y debido a esta escasez de información, no es posible tener una comparación de todos los resultados obtenidos con otros estudios. Por ello, se ha decidido realizar un cotejamiento de los resultados obtenidos con trabajos anteriores en los cuales se sueldan materiales disímiles diferentes.

A continuación, se realiza el análisis de las micrografías con un precalentamiento de 150° C (Tabla 3.5. y Tabla 3.6.).

3.5.3.3.1. Probeta B6

En la **Figura 3.2a.** se observa que en la zona de coalescencia el cobre ingresó al latón de manera similar observada en el estudio de Franco F. (2009). El ingreso del cobre al latón sigue líneas de flujo que se forman por el movimiento de rotación relativo de los materiales base, el obtener esta coalescencia es deseable en la soldadura, pues permite una buena unión de los materiales. Dicha coalescencia es necesaria para dar continuidad en los materiales base como se observa en estudios hechos por Serna A. (2015).

Al borde de la zona de coalescencia existe una pequeña cavidad la cual no es deseada, pues actúa como concentrador de esfuerzos. En este estudio la cavidad generó una grieta y por ello la soldadura no puede ser aceptada bajo la norma ISO 15620.

En la **Figura 3.2b.** se observa una pequeña fase de coalescencia, la cual según Serna A. (2015), es buena si da continuidad entre los materiales base, como se observa en la metalografía de la probeta B6. En esta metalografía no se observan grietas y por ello la soldadura puede aceptarse bajo la norma ISO 15620. La zona de difusión de cobre en el latón es deseada porque permite la unión de los metales al encontrarse en las fronteras de la zona de coalescencia. Sin embargo, esta interfaz posee mayor dureza que uno de los materiales base siendo más frágil pero la soldadura del presente estudio falla a un lado de esta zona, específicamente al lado del cobre. Se puede observar en la Figura 3.14. que cuando se realizó el ensayo de tracción a las probetas fallaron al lado del cobre de la zona de unión como se dijo anteriormente.

Después de realizar el ataque químico a la probeta, en la **Figura 3.2c.** y la **Figura 3.2d.** la observación de la misma a un aumento de 500X presenta una amplia fase de coalescencia. Dicha fase es buscada debido a que da una continuidad entre los materiales base como se observa en estudios hechos por Serna A. (2015). No se observa ninguna grieta lo que indica que no se tienen concentradores de esfuerzos.

3.5.3.3.2. Probeta B7

En la **Figura 3.3a.** y en la **Figura 3.3b.** se observa una amplia zona de coalescencia de los materiales lo cual es beneficioso pues permite que exista continuidad entre los materiales base como se observa en estudios hechos por Serna A. (2015). En la **Figura 3.3a.** se observan cavidades alrededor de la zona de coalescencia, estas se formaron por mala operación del equipo ya que la presión de forja no fue la adecuada durante la soldadura, se debe mencionar que estas cavidades no son deseables porque actúan como concentradores de esfuerzos que comprometen la soldadura. En la **Figura 3.3b.** se observa que en la zona coalescencia el latón ingresó al cobre de manera similar a lo observado en el estudio de Franco F. (2009). Dicha coalescencia es buscada debido a que da una continuidad entre los materiales base como se observa en estudios hechos por Serna A. (2015). No se observan cavidades en esta metalografía, lo que indica que el proceso de soldadura fue realizado correctamente y se obtuvo una buena interfaz de coalescencia.

Una vez realizado el ataque químico, en la **Figura 3.3c.** con un aumento de 100X se observa claramente una zona amplia de mezcla de ambos materiales a lo largo de la unión de estos. Esta línea presenta una buena continuidad entre los metales soldados como dice Serna A. (2015) ya que no existe ningún defecto o discontinuidad en la zona de unión. El cobre muestra una pequeña zona afectada por el calor con una coloración distinta, un color marrón más claro y esta zona con esta coloración es la zona afectada por el calor según el estudio realizado por Morinov (2014); esta zona es normal cuando se realizan soldaduras, y en el presente estudio esta zona no resulto perjudicial debido a que, en los ensayos de tracción realizados, ninguna probeta fallo en la misma.

En la **Figura 3.3d.** se observa una zona de coalescencia sin ninguna imperfección, esto indica la soldadura se realizó de manera correcta con los parámetros de calor y presión adecuados según la Tabla 2.12. La línea que se observa en la unión presenta una buena continuidad entre los metales soldados como dice Serna A. (2015) ya que no existe ningún defecto o discontinuidad en la zona de unión.

A continuación, se realiza el análisis de las micrografías con un precalentamiento de 250° C presentes en la Figura 3.4. y Figura 3.5.

3.5.3.3.3. Probeta A6

En la **Figura 3.4a.** se observa coalescencia del cobre y del latón, el cobre que ingresó en el latón similar a lo que se observa en el estudio de Franco F. (2009). Pero existen algunos concentradores de esfuerzos ya que se pueden observar grietas en y alrededor de la zona de coalescencia. Como se dijo anteriormente, estos concentradores de esfuerzos y grietas no son nada deseados en una soldadura según la norma ISO 15620 ya que estos comprometen la integridad de la misma.

En la **Figura 3.4b.** se observa al igual que en la **Figura 3.4a.** una amplia zona de coalescencia, pero con concentradores de esfuerzos a lo largo de toda la zona de unión de los materiales y presencia de grietas. Estos concentradores de esfuerzos y grietas no son nada deseados en una soldadura según la norma ISO 15620 ya que estos comprometen la integridad de esta.

Todas estas cavidades y grietas se dan en las soldaduras por no aplicar de manera correcta los parámetros de soldadura que se encuentran en la Tabla 2.12. y también se pueden dar estas cavidades por no verificar que los materiales estén limpios antes de realizar la soldadura.

Una vez realizado el ataque químico y examinar la **Figura 3.4c.** se observa una zona bastante amplia de coalescencia de los materiales, cabe recalcar que la esta zona de coalescencia es considerablemente grande en comparación de las probetas anteriores (B6 y B7) lo que indica que al aumentar la temperatura de precalentamiento se aumenta la zona de coalescencia. Pero a pesar de aumentar esta zona, no se mejoró la calidad de la soldadura ya que esta presenta grietas más grandes a lo largo de la zona de coalescencia. Estas grietas se dieron debido a que la junta soldada A6 con precalentamiento de 250° C se enfrió en el mismo intervalo de tiempo que las probetas B6 y B7 con precalentamiento de 150° C y por ello, el enfriamiento de la probeta A6 fue muy brusco con respecto a las probetas anteriores, lo que generó grietas que se observan en la **Figura 3.4c.**

El cobre muestra una zona afectada por el calor con una coloración distinta, un color marrón más claro. En esta probeta se observa que la zona afectada por el calor no es beneficiosa para la junta soldada, ya que la grieta más grande se encuentra en esa zona, lo que

confirma que el enfriamiento de esta probeta fue muy rápido.

En la **Figura 3.4d.** y **Figura 3.4c.** presenta una zona amplia de mezcla del cobre y del latón, pero a diferencia de la anterior micrografía esta no presenta grietas o alguna otra imperfección que pueda comprometer a la soldadura, ya que no hay concentradores de esfuerzos en esta zona de coalescencia. Esto indica que la soldadura se realizó de manera correcta con los parámetros adecuados de acuerdo con la Tabla 2.12.

La zona de coalescencia presenta una buena continuidad entre los metales soldados como dice Serna A. (2015) ya que no existe ningún defecto o discontinuidad en la zona de unión.

3.5.3.3.4. Probeta A7

En la **Figura 3.5a.** y **Figura 3.5b.** se observa que no existe coalescencia entre los materiales, solo se unieron “débilmente” debido a que hubo falta de calor y presión que facilite la mezcla y unión de los materiales. No se observa defectos o imperfecciones en la micrografía.

Una vez realizado el ataque químico en la **Figura 3.5c.** y **Figura 3.5d.** se observa una pequeña zona de coalescencia y adicionalmente en la **Figura 3.5d.** se observa una incrustación de latón en el cobre, esta pequeña zona de coalescencia e incrustaciones no son suficientes para garantizar una buena unión de los materiales. Esta falta de unión y mezcla de materiales se da porque la presión, los tiempos de soldadura y las temperaturas de calentamiento y forja no fueron los que se especifican en la Tabla 2.12.

En todas las probetas se dio una difusión de cobre en el latón, por ello se soldaron los materiales como se puede observar en la Figura 3.17. Según los resultados obtenidos en el laboratorio de DEMEX se puede concluir que siempre va a existir difusión por la similitud de la composición de los materiales base utilizados (cobre y latón).

3.5.4. Microdurezas

Los valores del latón obtenidos en este estudio presentan valores de 115 a 128 HV característico de este material comparables a los obtenidos en el estudio de Sudarchan S. (2017), a su vez los valores obtenidos del cobre presentan un valor de dureza de 58 a 72

HV como se ve en el estudio de Goodfellow (2018). Los dos materiales presentan valores de microdureza constantes en el material base a lo largo del eje axial hasta llegar a la zona de unión de los materiales, donde se observan variaciones.

La dureza de la zona de unión de los materiales tiene los valores más altos que van de 98 a 126 HV, tal como se observa en el estudio realizado por Faes (2010), donde los valores más altos también se dan en las zonas antes mencionadas.

Este aumento de dureza se da porque en la zona de unión de los materiales se dio la difusión de cobre en el latón antes mencionada. Esta zona es natural que posea mayor dureza que el cobre puro, ya que todas las aleaciones cobre-zinc son más duros que el cobre.

En la Figura 3.23. se aprecia la ubicación de las zonas con diferentes durezas explicadas anteriormente (Sección 3.5.4.).

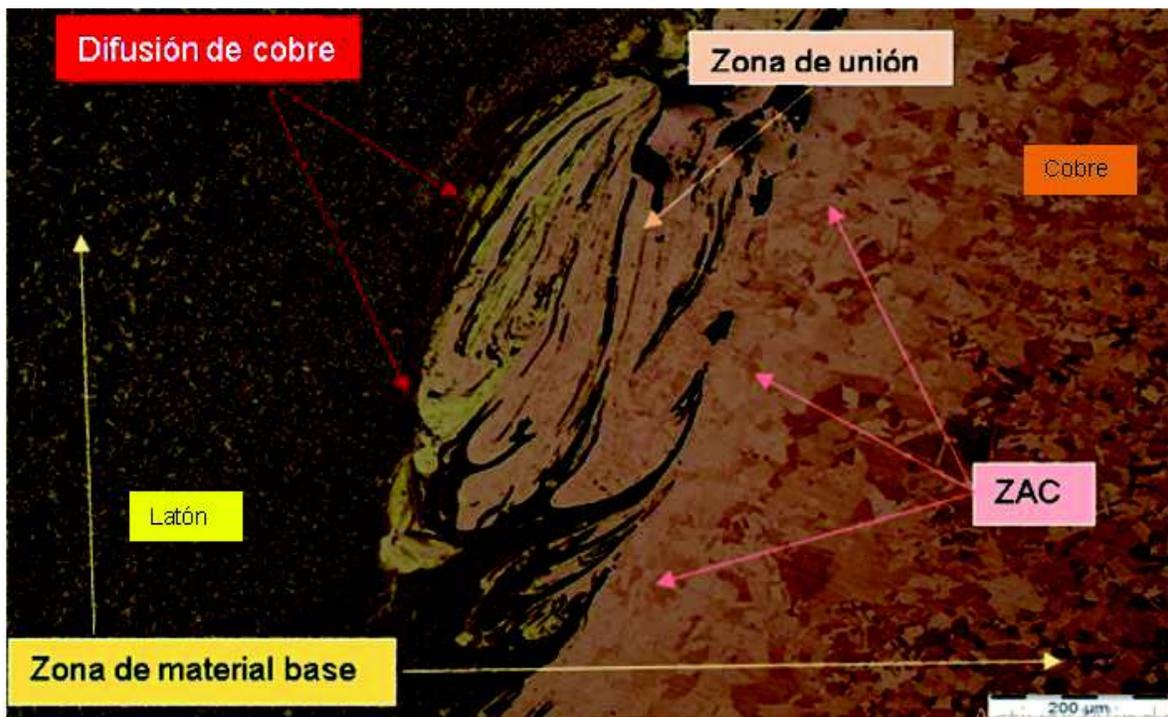


Figura 3.23. Zonas de la soldadura.
(Fuente: Propia)

4. CONCLUSIONES

- En el presente estudio se logró cumplir los objetivos planteados, identificar y establecer los parámetros de soldadura, obtener información y analizar los resultados obtenidos para conocer las características de la unión obtenida y comparar la eficiencia de la soldadura con y sin precalentamiento.
- Con los resultados que se han obtenido de los ensayos realizados, se puede decir que la soldadura cobre-latón es una buena soldadura con propiedades mecánicas aceptables y con una forma de unión de los materiales que no se esperaba observar en las juntas (unión por difusión).
- Las probetas con una mejor área de soldadura efectiva se obtuvieron utilizando los siguientes valores de variables de la soldadura (probetas A): precalentamiento a 250° C, velocidad de rotación de 1300 rpm, tiempo de soldadura de 20 s, presión de calentamiento de 35 kgf y presión de forja de 105 kgf. Esto se debe especialmente a la temperatura, ya que permitió a los materiales ablandarse más y a unirse de mejor manera.
- En las micrografías se observa que en una probeta soldada la coalescencia de los materiales no se da de forma regular a lo largo de la superficie de contacto cobre-latón, ya hay zonas en las que no se logra la unión de estos y esta falta de unión se debe a factores como: mal control de las variables de la soldadura (precalentamiento, presión de calentamiento y forja y tiempo de soldadura), falta de unión que existe en este proceso y desalineación del equipo del Laboratorio de Soldadura.
- Cuando se eleva la temperatura de precalentamiento, la fuerza de forja que se aplica necesita más tiempo para unir los materiales ya que existe más material plastificado y este debe ser extraído para evitar que aparezcan defectos en la soldadura.
- En el análisis metalográfico se observa que las uniones que soportaron más carga son las que presentaron coalescencia a lo largo de toda la unión, además de incrustaciones de un material en el otro. Por otro lado, las probetas que soportaron

una carga menor presentaban discontinuidades (grietas), poca coalescencia y cavidades provocadas por poco calor de calentamiento e insuficiente fuerza en el calentamiento y forjado.

- En el presente estudio, los materiales (cobre y latón) no fueron posibles de soldar sin un previo precalentamiento con el equipo del Laboratorio de Soldadura, ya que este no se encuentra calibrado y sus mandriles no están alineados entre ellos, por ello las probetas no tenían un buen contacto para poder calentarse adecuadamente con la fricción, este desalineamiento provoca que las piezas tengan movimientos relativos no adecuados entre ellas ocasionando que el latón al ser el más duro y frágil se fracture.

Referencias Bibliográficas

- [1] Pender, J. "Soldadura" (Tercera ed.). México: McGraw-Hill, 1898.
- [2] ASM International, *ASM Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing, and Soldering*, vol. 6. ASM International, 1993.
- [3] International Organization for Standardization, *ISO 15620 Welding - Friction welding of metallic materials*, 1st Edition. International Standard, 2000.
- [4] Universidad del Bío-Bío, "Soldadura por Fricción" [En línea]. Recuperado de: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1091/1/Lopez_Gonzalez_Luis_Ricardo.pdf [Consultado: 19- oct-2018].
- [5] MTI, "Rotary Friction Welding", Rotary Friction Welding. [En línea]. Recuperado de: <http://www.mtiwelding.com/technologies/rotary-friction-welding/> [Consultado: 20- oct-2018].
- [6] Pellini C. "Cobre: Usos, propiedades, minerales y yacimientos". [En línea]. Recuperado de: https://historiaybiografias.com/el_cobre/ [Consultado: 20- oct-2018].
- [7] Groover, M. "Fundamentos de la Manufactura Moderna". México: McGraw-Hill, 1997.
- [8] Hupperichs, L. (2010). "Bornite". [Imagen]. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Bornite#/media/File:Bornite-105006.jpg>
- [9] Lavinsky R. (2010). "Calcopyrite". [Imagen]. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Calcopirita#/media/File:Chalcopyrite-199453.jpg>
- [10] United States Geological Survey (2005). "chalcocite". [Imagen]. Recuperado de : <https://es.wikipedia.org/wiki/Calcosina#/media/File:Chalcocite.jpg>
- [11] Lanzi. (2006). "Azurite". [Imagen]. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Azurita#/media/File:Azurit.jpg>
- [12] Duponchelle J." *Manual del fundidor*", 1ra Edición. Barcelona: Gustavo Gili, 1932.
- [13] Maffia, E (2013). "Cobre y sus aleaciones " [En línea]. Recuperado de: <https://es.scribd.com/presentation/305321556/Cobre-y-Sus-Aleaciones-OBERA>
- [14] Singh R. "Introduction to Basic Manufacturing Process and Workshop Technology". New Age International, 2006.
- [15] Davis J. R. "Copper and Copper Alloys". ASM International, 2001
- [16] Sáez de Montoya, Constantino (1856). "Tratado teórico-práctico de metalurgia". Madrid: Gaspar y Roig

- [17] Alsimet, “*Aplicaciones y tipos de latón*”. [En línea]. Recuperado de: <http://alsimet.es/noticias/aplicaciones-y-tipos-de-laton> [Consultado: 20- oct-2018].
- [18] ASTM, “*ASTM E8 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”. USA.
- [19] ASM International, “*Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*”. ASM International, 1990.
- [20] O’Brien R. L.” *Manual de Soldadura Tomo III*”, 8a Edición., vol. 3. México: Pearson Educación, 1996.
- [21] Almeida, M. “*Soldadura por fricción de materiales disímiles*”, Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1989
- [22] Arguello, A. y Paredes, L. “*Diseño y construcción de una máquina para soldar por fricción*”, Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1987.
- [23] Amaguayo, B. y Sánchez, O. “*Estudio y caracterización del comportamiento micro-estructural de la soldadura por fricción en materiales disímiles cobre electrolítico- aluminio (AA-6063)*”, Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2017.
- [24] ASTM, “*ASTM E3 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*”. USA.
- [25] Medina F. “*Metalografía, fractografía y análisis in Situ*”. [En línea]. Recuperado de: <http://metalografiainsitu.blogspot.com/2010/04/metalografia-de-cobre.html> [Consultado: 20- oct-2018].
- [26] Martínez A. “*Influencia de la técnica de soldadura multipasada y de los tratamientos térmicos de precalentamiento y post-soldadura en el comportamiento de uniones GMAW de un acero microaleado HARDOX 400*”. [En línea]. Recuperado de: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/1179/1190> [Consultado: 20- oct-2018].
- [27] Goodfellow. “*Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación*”. [En línea]. Recuperado de: <http://www.goodfellow.com/S/Cobre.html> [Consultado: 19- sep-2018].
- [28] Aguilar J. “*Cobre y sus aleaciones*” [En línea]. Recuperado de: http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/cml/12-Cobre_aleaciones.pdf [Consultado: 19- sep-2018].

- [29] Valencia A. *“Tecnología del tratamiento térmico de los metales”* 2ª Edición. Colombia: Universidad de Antioquía, 1992.
- [30] OTTO FUCHS Dülken, *“Copper and Copper Alloys CuZn39Pb3 (OF 2358)”*. 2014
- [31] Rombaut P. *“Joining of dissimilar materials through rotary friction welding”*. Ghent: Universiteit Gent, 2011.
- [32] Franco F., Sánchez H., Betancourt D., y Murillo O. *“Soldadura por fricción-agitación de aleaciones ligeras – una alternativa a nuestro alcance”*, Supl. Rev. Latinoam. Metal. Mater., vol. 3, núm. S1, 2009.
- [33] Mironov S., Inagaki K., Sato Y. S., y Kokawa H. *“Development of grain structure during friction-stir welding of Cu–30Zn brass”*, Philos. Mag., vol. 94, núm. 27, sep. 2014.
- [34] Tufaro L. N. y Svoboda H. G. *“Efecto del Procedimiento de Soldadura por FSW en la Evolución Temporal de las Propiedades en Uniones de AA 7075-T651”*, Soldag. Insp., vol. 19, núm. 4, 2014.
- [35] Sudarshan S. y Ravisankar B. *“Study on Mechanical and Microstructural Behaviour of Cu-Zn Alloy Upon Heat Treatment and Severe Plastic Deformation”*, Int. J. Mech. Prod. Eng., vol. 5, núm. 9, 2017.
- [36] Faes K., Baaten T., De Waele W., y Debroux N. *“Joining of Copper to Brass Using Magnetic Pulse Welding”*, 4th International Conference on High Speed Forming, Dortmund, Germany, 2010.
- [37] Sanchez O. y Amaguayo B. *“Estudio y caracterización del comportamiento micro-estructural de la soldadura por fricción en materiales disímiles cobre electrolítico-aluminio (AA-6063)”*, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2017.
- [38] Fukumoto S., Tsubakimo H., Okita K., Aritoshi M. y Tomita T. *“Microstructure of friction weld interface of 1050 aluminium to austenitic stainless steel”*, 1998.
- [39] Serna A., Jaramillo A. y Ángel L. *“Metalografía”*, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2015.
- [40] ISO, *“Welding – Friction welding of metallic”*, 2000.
- [41] Baszoetekouw. (2006). *“Celda unidad de un material FCC”*. [Imagen].

Recuperado de:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Deslizamiento_\(ciencia_de_materiales\)#/media/File:Lat_tice_face_centered_cubic.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Deslizamiento_(ciencia_de_materiales)#/media/File:Lat_tice_face_centered_cubic.svg)

- [42] Baszoetekouw. (2006). "Celda unidad de un material BCC". [Imagen].
Recuperado de:
[https://es.wikipedia.org/wiki/Deslizamiento_\(ciencia_de_materiales\)#/media/File:La
ttice_body_centered_cubic.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Deslizamiento_(ciencia_de_materiales)#/media/File:La_tice_body_centered_cubic.svg)
- [43] Weller M., Overton T., Rourke J. y Armstrong F. "Inorganic Chemistry",
Universidad de Oxford, Oxford, United Kingdom, 2014.
- [44] Rodríguez P. "Analysis of a CuZn40 brass", CTM Tecnologic, Barcelona,
España, 2016.

Anexos

Resultados del análisis químico de los materiales base (cobre y latón)

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Carlos Díaz Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 08 de mayo del 2018

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

Descripción: Ensayo de espectrometría por chispa en dos probetas de material Latón y Cobre.

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional dos probetas sueltas.

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

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

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

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






ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN



3. VALORES OBTENIDOS

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

Muestra de Latón	
Elemento	Valor [%]
Cobre [Cu]	53,70
Zinc [Zn]	43,17
Plomo [Pb]	2,604
Estaño [Sn]	0,130
Fosforo [P]	<0,005
Manganeso [Mn]	<0,002
Hierro [Fe]	0,180
Níquel [Ni]	0,168
Silicio [Si]	0,015
Aluminio [Al]	0,022
Azufre [S]	<0,003
Arsénico [As]	<0,004
Bismuto [Bi]	<0,005
Selenio [Se]	<0,005
Sumatoria	99,989

Muestra de Cobre	
Elemento	Valor [%]
Cobre [Cu]	99,62
Zinc [Zn]	0,281
Plomo [Pb]	<0,050
Estaño [Sn]	0,0086
Fosforo [P]	<0,010
Manganeso [Mn]	<0,010
Hierro [Fe]	0,037
Níquel [Ni]	0,034
Silicio [Si]	<0,005
Aluminio [Al]	<0,010
Azufre [S]	<0,005
Arsénico [As]	<0,010
Bismuto [Bi]	<0,010
Selenio [Se]	<0,010
Sumatoria	99,980

Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable

Ing. Oscar Sotomayor

Jefe del Laboratorio de Fundición.

Resultados de los ensayos de tracción del material base y las probetas soldadas



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



INFORME TÉCNICO

LAEV – AGO.18.06.0

Quito, 15 de agosto de 2018

TRABAJO SOLICITADO POR: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
Msc. Carlos Wime Diaz Campoverde

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas metálicas pertenecientes al Sr. Andrés Chiriboga para el proyecto de titulación "ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDABILIDAD EN MATERIALES DISÍMILES COBRE-LATÓN MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. **MUESTRAS:** Seis (6) probetas de material base y diez (10) juntas soldadas para ensayo de tracción.

2. ENSAYO DE TRACCIÓN DE PROBETAS DE MATERIAL BASE

En la tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos de tracción realizados.

Tabla 1. Resultados de los ensayos de tracción de las probetas de material base.

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 25 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
D-1	6,15	3.268	14.536	71,0	489,3	28,6
D-2	6,08	3.012	13.400	66,9	461,5	16,1
D-3	6,14	3.049	13.564	66,4	458,1	21,2
E-1	6,05	2.157	9.596	48,4	333,8	21,3
E-2	5,97	2.053	9.131	47,3	326,2	22,9
E-3	5,99	2.130	9.473	48,8	336,2	22,8



3. ENSAYO DE TRACCIÓN DE JUNTAS SOLDADAS

En la tabla 2 se presentan los resultados del ensayo de tracción realizado a las juntas soldadas.

Tabla 2. Resultados del ensayo de tracción de las juntas soldadas.

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs. *
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
A-1	12,73	4.103	18.252	20,8	143,4	FJS
A-2	12,81	4.063	18.074	20,3	140,2	FJS
A-3	12,96	3.471	15.439	17,0	117,0	FJS
A-4	12,76	2.002	8.903	10,1	69,6	FJS
A-5	12,77	1.514	6.734	7,6	52,6	FJS
B-1	12,88	937	4.166	4,6	32,0	FJS
B-2	12,85	2.875	12.790	14,3	98,6	FJS
B-3	12,93	2.415	10.742	11,9	81,8	FJS
B-4	12,91	1.640	7.293	8,1	55,7	FJS
B-5	12,88	1.633	7.263	8,1	55,7	FJS

*FJS: Falla junta soldada.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Granada, M.Sc.
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	INGENIERO
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		

		Micro Hardness Analysis Report				
Sample		Date	04/06/2018			
Material		Load	200			
Reported by		Eht	1			
Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth
O1	-	115,71	56,71	56,51	56,61	
O2	-	116,66	55,46	57,29	56,38	
O3	-	114,77	57,78	55,90	56,84	
O4	-	131,22	54,14	52,18	53,16	
O5	-	122,08	53,99	56,23	55,11	
O6	-	81,44	67,11	67,84	67,47	
O7	-	64,41	76,98	74,77	75,87	
O8	-	64,73	76,59	74,79	75,69	
O9	-	63,01	76,00	77,43	76,71	
Mean	0,00	93,99	65,10	64,59	64,84	0,00
Signed by:			Unit	µm		
						