

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL SUR DE GUANAJUATO



CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA UNIÓN COBRE A COBRE MEDIANTE SOLDADURA DE ALTA FRECUENCIA

Opción 2: Titulación Integral – Tesis Profesional

Elaborada por:

Ariadna Sánchez Ochoa

Que presenta para obtener el título de:

INGENIERO EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

Asesor:

M.C Mariano Braulio Sánchez

“CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA UNIÓN COBRE A COBRE MEDIANTE SOLDADURA DE ALTA FRECUENCIA”

Elaborada por:

Ariadna Sánchez Ochoa

Aprobado por. M.C Mariano Braulio Sánchez
Docente de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices
Asesor de la Tesis Profesional

Revisado por. M.C Pedro Durán Reséndiz.
Docente de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices
Revisor de la Tesis Profesional

Revisado por. Ing. Miguel Ángel López Durán
Docente de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices
Revisor de la Tesis Profesional



LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Uriangato, Gto., 07/noviembre/2022

Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral

Ing. J. Trinidad Tapia Cruz
Director Académico y de Estudios Profesionales
ITSUR
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre de estudiante y/o egresado(a): Ariadna Sánchez Ochoa	
Carrera: Ingeniería en Sistemas Automotrices	Núm. de control: T17120139
Nombre del proyecto: Caracterización mecánica de la unión cobre a cobre mediante soldadura de alta frecuencia	
Producto: Tesis Profesional	

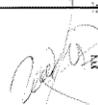
Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestras y nuestros egresados.

ATENTAMENTE


M.C. Mariano Braulio Sánchez
Coordinador de Ingeniería en Sistemas Automotrices
ITSUR



La comisión revisora ha tenido a bien aprobar la reproducción de este trabajo.

		
M.C. Mariano Braulio Sánchez Asesor de la Tesis Profesional	Ing. Miguel Ángel López Durán Revisor de la Tesis Profesional	M.C. Pedro Durán Reséndiz Revisor de la Tesis Profesional

Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA
EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

c.c.p.- Expediente

Julio 2017



Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato
División de Ingeniería en Sistemas Automotrices

DEPARTAMENTO ACADEMICO	CLAVE:11EIT0002E ISA-EGR-2022/43
---------------------------	-------------------------------------

Uriangato, Guanajuato, 07/noviembre/2022

Asunto: Aprobación de impresión de trabajo profesional

C. ARIADNA SANCHEZ OCHOA
PRESENTE:

Por medio de este conducto, le comunico a usted que después de haber sido revisado su trabajo bajo la cual se derivó la Monografía Titulada:

“Caracterización mecánica de la unión cobre a cobre mediante soldadura de alta frecuencia”

La comisión revisora, ha tenido a bien aprobar la impresión de este trabajo.

ATENTAMENTE
“Excelencia en Educación Tecnológica”.
“Tecnología y Calidad para la Vida”

M.C. Mariano Braulio Sánchez
Jefe de División de Ingeniería en Sistemas Automotrices



Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato
COORDINACIÓN INGENIERÍA
EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

C.c.p Unidad de Servicios Escolares
C.c.p Coordinación de Ingeniería en Sistemas Automotrices



Ave. Educación Superior No. 2000, Col. Benito Juárez, Uriangato, Guanajuato,
C.P. 38980
Tels. (445) 45 7 74 68 al 71 Ext. *116, e-mail: promocion@itsur.edu.mx
tecmm.mx | itsur.edu.mx



2022 Flores
Año de
Magón
PROCESOS DE LA REVOLUCIÓN HECHOS

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se enfoca en la caracterización de la soldadura cobre a cobre mediante el proceso de soldadura ultrasónica (USW) por alta frecuencia. La composición del material de la probeta es; Cu 99.99% (metal base) y la aleación Cu 92% - Ag 8% (metal de aporte).

La caracterización de la soldadura se compone de la evaluación mecánica de la unión, se determinaron las propiedades del material que sufrieron de alguna modificación a nivel microestructural durante el proceso de soldadura modificando sus propiedades físicas y químicas del material, como; la resistencia a la tensión, la resistencia a la flexión, la rugosidad superficial y la dureza del material. Para conocer dichas propiedades las probetas fueron sometidas a diferentes ensayos y mediciones, los cuales se realizaron en los laboratorios del Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato bajo la coordinación de la ingeniería en sistemas automotrices.

La evaluación mecánica de la soldadura cobre a cobre se compone de ensayos destructivos (Ensayo de tensión, flexión y dureza) y no destructivos (Perfiles de rugosidad superficial, análisis microestructural y análisis termodinámico).

Los ensayos de tensión y de flexión realizados en la máquina de ensayos universales nos permitieron determinar los esfuerzos reales, y los esfuerzos máximos de la unión antes de llegar a la deformación plástica del material. Para los perfiles de dureza se realizaron mediciones por duplicado mediante un durómetro en distintas zonas de la probeta (zona de la unión, zona afectada térmicamente y la zona correspondiente al metal base), los resultados de la resistencia del material se analizaron y compararon mediante la desviación estándar. Los perfiles de rugosidad superficial se realizaron mediante un rugosímetro, obteniendo los valores de los parámetros Ra, Rq, y Rz. Con el valor de Ra se determinó su nivel de rugosidad según la norma DIN 4769. Se realizaron 2 análisis termodinámicos, el primero para conocer el desempeño del sistema, identificando y cuantificando las irreversibilidades del mismo y los productos que se originaron en la aleación (Cu

92% - Ag 8%), el segundo para evaluar la soldadura en los tubos de cobre. Para concluir con la evaluación mecánica de la soldadura, se realizó la preparación metalográfica de la probeta previa al análisis microestructural, mediante un microscopio óptico se obtuvo la metalografía del material y el tipo de fractura de la unión. El conjunto de estas pruebas y mediciones nos dio una caracterización completa de la soldadura permitiéndonos conocer las ventajas y desventajas de utilizar este tipo de proceso de soldadura para estos materiales.

ABSTRACT

This research work focuses on the characterization of copper-to-copper welding using the high-frequency ultrasonic welding (USW) process. The composition of the material of the test piece is; Cu 99.99% (base metal) and the Cu 92% - Ag 8% alloy (filler metal).

The characterization of the weld is made up of the mechanical evaluation of the joint, the properties of the material that suffered from some modification at the microstructural level during the welding process were determined, modifying its physical and chemical properties of the material, such as; the tensile strength, the flexural strength, the surface roughness and the hardness of the material. To know these properties, the specimens were subjected to different tests and measurements, which were carried out in the laboratories of the Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato under the coordination of automotive systems engineering.

The mechanical evaluation of copper to copper welding is made up of destructive tests (tensile, bending and hardness tests) and non-destructive tests (surface roughness profiles, microstructural analysis and thermodynamic analysis).

The tension and bending tests carried out in the universal testing machine allowed us to determine the real stresses and the maximum stresses of the joint before reaching the plastic deformation of the material. For the hardness profiles, duplicate measurements were made using a durometer in different areas of the specimen (joint area, thermally affected area and the area corresponding to the base metal), the results of the material resistance were analyzed and compared by means of the standard deviation. Surface roughness profiles were performed using a roughness meter, obtaining the values of the parameters Ra, Rq, and Rz. With the value of Ra, its level of roughness was determined according to the DIN 4769 standard. Two thermodynamic analyzes were carried out, the first to know the performance of the system, identifying and quantifying its irreversibilities and the products that originated in the alloy (Cu 92% - Ag 8%), the second to evaluate the solder on copper

tubes. To conclude with the mechanical evaluation of the weld, the metallographic preparation of the specimen was carried out prior to the microstructural analysis, by means of an optical microscope the metallography of the material and the type of fracture of the joint were obtained. The set of these tests and measurements gave us a complete characterization of the welding, allowing us to know the advantages and disadvantages of using this type of welding process for these materials.

PALABRAS CLAVE

- Soldadura ultrasónica
- Unión de materiales
- Cobre
- Ensayos mecánicos
- Flexión
- Tensión
- Rugosidad
- Dureza
- Análisis termodinámico
- Metalografía
- Plata
- Metal base
- Metal de aporte
- Aleación

AGRADECIMIENTOS

Ariadna Sánchez Ochoa agradece al Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato por las facilidades brindadas para la realización de este trabajo. Asimismo, se agradece el apoyo incondicional, la paciencia, la buena disposición, la grata compañía y el tiempo dedicado para la elaboración de esta tesis a M.C Mariano Braulio Sánchez jefe de división de ingeniería en sistemas automotrices.

DEDICATORIAS

Este trabajo de titulación está dedicado a mi familia, principalmente a mi Abuelita materna, por su valentía y fortaleza, es la mujer que más admiro en mi vida, siempre me ha impulsado a cumplir mis sueños y a ver las situaciones difíciles a las que me ha enfrentado la vida como aprendizaje. A mi papá, quien siempre ha luchado por darnos una mejor calidad de vida, me dio el apoyo necesario para estudiar mi carrera universitaria, y me acompañó en cada paso. A mi mamá, quien siempre ha sido mi refugio, su amor y su apoyo incondicional me han mantenido firme ante cualquier situación. A mi hermano, por ser lo más valioso que tengo en mi vida. A mi compañero de vida, por hacerme infinitamente feliz, y ser ese sitio de paz y tranquilidad en lo caótico de mi día a día. A mi amiga Natalia por brindarme sus reconfortantes palabras en las múltiples ocasiones que me sentí desmotivada. Por último, pero no menos importante a mi tía Lupita, por ser mi gran ejemplo a seguir, y ser una fuente de inspiración y motivación, todos ellos han creído y confiado en mí, y han sido pilares fundamentales en mi vida.

INDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
PALABRAS CLAVE.....	V
AGRADECIMIENTOS	VI
DEDICATORIAS	VII
Capítulo 1	1
Introducción.	1
Capítulo 2.....	4
Marco teórico (Antecedentes).....	4
2.1 Unión de materiales	4
2.1.1 Unión en estado sólido.....	4
2.1.2 Unión por difusión en fase líquida	5
2.1.3 Flujo Capilar	5
2.1.4 Soldadura de alta frecuencia.....	6
2.1.4.1 Parámetros de la soldadura por alta frecuencia.....	8
2.1.5 Mojabilidad	10
2.1.5.1 Ecuación de Young Dupre	12
2.2 Materiales Base	13
2.2.1 Cobre (Cu)	13
2.2.2 Propiedades físicas y mecánicas del cobre (Cu)	13
2.2.3 Propiedades químicas del cobre (Cu)	15
2.3 Plata (Ag)	15
2.3.1 Propiedades químicas de la plata (Ag).....	16
2.4 Aleación Plata (Ag) – Cobre (Cu).....	16
2.4.1 Diagrama de fase	17
2.5 Lineamientos y parámetros de los perfiles de rugosidad superficial.	18
2.5.1 Lineamientos de los perfiles de rugosidad superficial.	18
2.6 Dureza Rockwell	20
2.7 Estado del arte en los procesos de soldadura por alta frecuencia	21

Capítulo 3.....	25
Planteamiento del problema	25
3.1 Identificación.	25
3.2 Justificación.....	25
3.3 Alcance.	26
Capítulo 4.....	27
Objetivos.....	27
4.1 Objetivo General	27
4.2 Objetivos Específicos	27
Capítulo 5.....	28
Metodología	28
5.1 Diseño de probetas	28
5.1.2 Elaboración de las probetas.....	29
5.2 Micrografía del cobre.....	29
5.2.1 Preparación metalográfica de las probetas	29
5.3 Ensayos de rugosidad.....	32
5.4 Evaluación Mecánica	33
5.4.1 Ensayos de dureza.....	33
5.4.2 Resistencia a la tensión.	34
5.4.3 Resistencia a la flexión.....	35
Capítulo 6.....	36
Resultados.....	36
6.1 Diseño de las probetas.....	36
6.1.2 Área total de la probeta.	37
6.1.3 Volumen de la probeta.	37
6.1.4 Densidad de la probeta.	37
6.2 Análisis termodinámico	38
6.2.1 Análisis termodinámico de la aleación (Cu 92% - Ag 8%).....	38
6.2.2 Análisis termodinámico de la soldadura	39
6.3 Análisis microestructural del cobre (Cu).....	40
6.4 Rugosidad Superficial	41

6.4.1 Rugosidad Superficial Zona de la unión.....	41
6.4.2 Rugosidad Superficial Metal base.....	42
6.4.3 Rugosidad Superficial Zona afectada térmicamente (ZAT).....	43
6.5 Medición de las propiedades mecánicas.....	44
6.5.1 Ensayos de dureza.....	44
6.5.2 Resistencia a la tensión	47
6.5.3 Resistencia a la flexión.....	50
6.6 Microscopia óptica del tipo de fractura.....	54
Capítulo 7	55
Conclusiones.....	55
Referencias bibliográficas	58
Anexos.	60

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Soldadura por capilaridad [2].....	6
Figura 2. Trabajo por adhesión [5].....	11
Figura 3. Tensión interfacial γ_{sl} [5]	12
Figura 4. Diagrama de fase Plata-Cobre [11].	17
Figura 5. Ra y Rq [12]	19
Figura 6. Rz (ISO) [12].	20
Figura 7. Microestructura en la zona de la soldadura de placas de cobre [18].....	23
Figura 8. Metalografía de corrosión en una sección transversal [19].	24
Figura 9. a) Composición del material la probeta. b) Croquis.....	28
Figura 10. Probeta.....	29
Figura 11. Probetas cortadas por la mitad para comenzar con su preparación metalográfica.....	30
Figura 12. Proceso de limado a) Vista Interior. b) Vista exterior.....	31
Figura 13. Probeta siendo analizada en el microscopio.	31
Figura 14. Probeta sometida al ensayo de rugosidad.	32
Figura 15. Probeta sometida al ensayo de dureza.	33
Figura 16. Probeta lista para ser sometida al ensayo de tensión en la máquina de ensayos universales ETM – 100KN.	34
Figura 17. Probeta lista para ser sometida al ensayo de flexión en la máquina de ensayos universales ETM – 100KN.	35
Figura 18. Geometría de la probeta.....	36
Figura 19. Visualización microestructural del cobre obtenida con el microscopio óptico.....	41
Figura 20. Perfil de rugosidad zona de la unión.	42
Figura 21. Perfil de rugosidad metal base.	42
Figura 22. Perfil de rugosidad ZAT.....	43
Figura 23. Zonas ensayos de dureza.	45

Figura 24. Grafica de desviación estándar de los ensayos de dureza.	46
Figura 25. Probetas llegando a la fractura después de ser sometidas al ensayo de tensión, a) Probeta 1. b) Probeta 2.	47
Figura 26. Curvas obtenidas en la gráfica esfuerzo-deformación de las probetas sometidas al ensayo de tensión.	48
Figura 27. Esfuerzos reales ensayos de tensión.	49
Figura 28. Estado final de las probetas después de ser sometidas al ensayo de flexión. a) Probeta 1, b) Probeta 2, Probeta 3.	51
Figura 29. Curvas obtenidas de la gráfica esfuerzo-deformación de las probetas sometidas al ensayo de flexión.	52
Figura 30. Resistencia real de las probetas en el ensayo de tensión.....	53
Figura 31. a) Fractura de la probeta. b) vista microscópica del borde de la probeta donde se presentó la fractura.....	54

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades químicas del cobre [7].	15
Tabla 2. Propiedades químicas de la plata [9].	16
Tabla 3. N° Grado de rugosidad [13].	19
Tabla 4. Productos formados en la aleación cobre-plata.	38
Tabla 5. Productos formados durante la soldadura.	40
Tabla 6. Mediciones de rugosidad zona de la unión.	42
Tabla 7. Mediciones de rugosidad metal base.	43
Tabla 8. Mediciones de rugosidad ZAT.	44
Tabla 9. Mediciones y desviación estándar de los resultados obtenidos en la probeta 1.	45
Tabla 10. Mediciones y desviación estándar de los resultados obtenidos en la probeta 2.	46

Capítulo 1

Introducción.

La soldadura de alta frecuencia UW-HF (o ultrasónica USW) es un proceso de soldadura en estado sólido que une los materiales por la aplicación de vibraciones de energía de alta frecuencia mientras las piezas están siendo sujetadas a presión [1]. Walter Herrmann es un pionero de la soldadura por ultrasonidos, con sus inventos y patentes, ha contribuido en gran medida a industrializar esta tecnología que nació finales de la década de 1950 [2]. Este tipo de soldadura se utiliza en la industria automotriz, médica, eléctrica y electrónica, de comunicaciones, electrodomésticos, productos de consumo, juguetes, textiles y de empaque. Hay muchas ventajas de la soldadura ultrasónica, ya que es un proceso rápido, limpio, eficiente y repetible que produce uniones fuertes e integrales mientras se consume muy poca energía. No se requieren solventes, adhesivos, aceleradores mecánicos o calor externo. Los ensamblajes terminados son fuertes y limpios además de ser un proceso económico que puede incrementar la producción significativamente y reducir los costos de ensamblaje [3]. Para unir dos piezas, es necesario que los materiales sean químicamente compatibles. De otra manera, aunque ambos materiales tal vez se derritan juntos no habrá enlace molecular.

El presente trabajo se enfocó en determinar la modificación de las propiedades mecánicas y microestructurales de los materiales unidos por soldadura ultrasónica de alta frecuencia del cobre (Cu) siendo este el material base y la aleación (Cu – 98%) y plata (Ag – 8%) como material de aporte.

El cobre (Cu) es un metal suave de color pardo rojizo y brillante que se caracteriza por ser un buen conductor de calor y electricidad. Es uno de los metales más importantes en la industria metalúrgica [4]. La unión se realiza por capilaridad, atacando las superficies de los elementos a unir. Después se calienta y se le aporta un metal que se funde al contacto con ellos, el metal fundido asciende y colmata el espacio entre los elementos al enfriarse se produce una unión hermética. La soldadura puede ser blanda (estaño Sn) o dura (plata Ag) [5], mientras la plata (Ag)

Capítulo 1. Introducción.

es un elemento químico perteneciente al grupo de los metales de transición. Se caracteriza por su tonalidad blanca o grisácea brillante, la plata tiene múltiples aplicaciones en la industria y se utiliza principalmente para aleaciones con otros materiales [6]. La aleación entre ambos elementos (Cu+Ag). Tiene una alta dureza que le permite soportar temperaturas de hasta 226 °C [7].

Para determinar la modificación de las propiedades de los materiales después de la soldadura se realizó la evaluación mecánica de la soldadura cobre a cobre, la cual se compone de ensayos destructivos (Ensayo de tensión, flexión y dureza) y no destructivos (Perfiles de rugosidad superficial, análisis microestructural y análisis termodinámico).

Los ensayos de tensión y de flexión realizados en la máquina de ensayos universales ETM – 100KN bajo la norma ISO 6892-1-2016 y la norma GBT 1452-93 respectivamente nos permitieron determinar los esfuerzos reales, y los esfuerzos máximos de la unión antes de llegar a la deformación plástica del material. Para los perfiles de dureza se realizaron mediciones por duplicado mediante un durómetro Mitutoyo HR-200, tomando como referencia la norma ASTM E18-11 en distintas zonas de la probeta (zona de la unión, zona afectada térmicamente y la zona correspondiente al metal base), los resultados de la resistencia del material se analizaron y compararon mediante la desviación estándar. Los perfiles de rugosidad superficial se realizaron mediante un rugosímetro Mitutoyo SJ-301 bajo la norma JIS-2001, obteniendo los valores de los parámetros Ra, Rq, y Rz. Con el valor de Ra se determinó su nivel de rugosidad según la norma DIN 4769. Se realizaron 2 análisis termodinámicos, el primero para conocer el desempeño del sistema, identificando y cuantificando las irreversibilidades del mismo y los productos que se originaron en la aleación (Cu 92% - Ag 8%), el segundo para evaluar la soldadura en los tubos de cobre. Para concluir con la evaluación mecánica de la soldadura, se realizó la preparación metalográfica de la probeta previa al análisis microestructural, mediante un microscopio óptico VE-407 se obtuvo la metalografía del material y el tipo de fractura de la unión. El conjunto de estas pruebas y mediciones nos dio una

Capítulo 1. Introducción.

caracterización completa de la soldadura permitiéndonos conocer las ventajas y desventajas de utilizar este tipo de proceso de soldadura para estos materiales.

El trabajo de Tesis, en su Capítulo 2, describe los conceptos básicos en los cuales se basó la parte experimental del proyecto, el Capítulo 3 nos presenta el planteamiento del problema, así como su justificación y el alcance del proyecto. En el Capítulo 4 encontramos los objetivos generales y los objetivos específicos. En el Capítulo 5 la metodología se muestra de forma detallada cada paso realizado para las pruebas mecánicas de tensión, flexión y dureza llevadas a cabo en el presente proyecto. En el Capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos, así como la discusión y comparación con los resultados de la literatura. Por último, en el capítulo 7 tenemos las conclusiones obtenidas y el trabajo a futuro a realizar.

Capítulo 2

Marco teórico (Antecedentes).

2.1 Unión de materiales

Una limitante asociada a los materiales es la dificultad que presentan para ser soldados entre sí y/o a otros componentes. La necesidad de unir un material a otro es inevitable; la tecnología de unión debe proporcionar una variedad de procesos adecuados para la fabricación de juntas de alta integridad con óptimas propiedades mecánicas y la facilidad de la inspección [1].

2.1.1 Unión en estado sólido

La difusión es un proceso de enlace en estado sólido capaz de unir un amplio rango de metales, cerámicos o sus combinaciones, para producir formas complejas grandes y pequeñas. Este proceso se refiere a los procesos de unión en los cuales la fusión proviene de la aplicación de presión solamente o una combinación de calor y presión [1]. Algunos procesos representativos de este proceso son:

- Soldadura por difusión. Las partes se colocan juntas bajo presión a temperatura elevada.
- Soldadura por fricción. Es un proceso similar al de difusión, solo que la temperatura se obtiene al friccionar las partes a unir.
- Soldadura ultrasónica. Se realiza aplicando una presión moderada entre las dos partes y un movimiento oscilatorio a frecuencias ultrasónicas en una dirección paralela a las superficies de contacto. La combinación de las fuerzas normales y vibratorias produce intensas tensiones que remueven las películas superficiales y obtienen la unión atómica de las partes.

2.1.2 Unión por difusión en fase líquida

Se define como el proceso de unir dos materiales, similares o disímiles, mediante un proceso de calentamiento a la temperatura adecuada (en un rango que cae entre las temperaturas de fusión de los materiales a unir) utilizando en la unión un material de relleno con una temperatura de fusión inferior a la de los metales base para producir una capa líquida transitoria en la interfaz a unir [1].

2.1.3 Flujo Capilar

En la mayoría de la literatura reportada desde la mitad del siglo XX hasta finales del mismo, es normal describir al brazing como un proceso de unión capilar. La realidad es diferente; esta definición no es apropiada para todas las situaciones en las que la soldadura fuerte se utiliza para producir una unión. Por ejemplo, hay muchas aplicaciones donde materiales de aporte base cobre son activados en la unión de superaleaciones, o donde cerámicos son unidos entre sí mismos o a metales con materiales brazing activos. En tales casos, se logran uniones altamente satisfactorias donde el flujo del metal de aporte fundido a la temperatura brazing nunca es mayor de aproximadamente 0.15 mm y muy a menudo es cero.

El uso industrial de la soldadura fuerte fue creciendo muy rápidamente a mediados del siglo XX; la primera elección de material de relleno era casi invariablemente de los que contenían un alto contenido en plata y poseían un pequeño rango de fusión. Estos materiales poseen excepcionales características de flujo. La percepción fue tal que, el mecanismo de atracción capilar era apropiado para definir la soldadura fuerte como un proceso de unión capilar.

Sin embargo, cuando el uso y el alcance de soldadura fuerte se desarrollaron ampliamente, durante el último cuarto del siglo XX se encontró un creciente número de casos que no se ajustan a esta definición general, donde la capilaridad era el componente esencial en la producción de la correcta ejecución de soldado común.

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

Se ha reconocido y aceptado que el brazing adopta un amplio rango de diferentes tecnologías. Para el purista, todas las cosas son puras, y es esta característica que provee una de las grandes diferencias que fue prevalente en el mundo del brazing durante las últimas décadas del siglo XX. Como se mencionó, existen aquellos materiales de aporte que, cuando funden, tienen la propiedad de alta fluidez. Hay algunos materiales que presentan prácticamente nula fluidez, y su uso está estrictamente limitado a algunos métodos de unión en especial. Está claro, por lo tanto, que no es apropiado definir al brazing como un proceso de unión capilar [1].



Figura 1. Soldadura por capilaridad [2].

2.1.4 Soldadura de alta frecuencia

La soldadura por alta frecuencia (HF) es la unión de materiales gracias a energía HF en forma de un campo electromagnético (27,12 MHz) y de presión aplicada a las superficies del material a unir.

Un generador produce la energía. La herramienta utilizada para unir el material se denomina electrodo. La energía eléctrica hace que las moléculas dentro del material comiencen a moverse, lo que genera calor que hace que el material se ablande y se fusione. No se aplica calor exterior, sino que el calor se genera dentro del material. Después de enfriar la superficie soldada bajo presión mantenida, el material se funde y se crea una soldadura. La unión soldada puede ser al menos tan resistente como el material circundante, o incluso más.

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

La soldadura de alta frecuencia utiliza principalmente el efecto de piel y el efecto de proximidad de la corriente de alta frecuencia para hacer que la corriente esté altamente concentrada en el lado que se va a soldar, de modo que pueda calentarse a la temperatura de soldadura (1130-1350 °C) en una centésima de segundo.

Este método de soldadura tiene una serie de ventajas: la zona afectada por el calor de la soldadura es pequeña y la velocidad de calentamiento es rápida, por lo que la velocidad de soldadura y la calidad de la soldadura se pueden mejorar enormemente, y la banda de acero sin decapado, granallado y recorte se puede utilizar como pieza en bruto. Soldadura de tubos de acero de aleación, acero de alta aleación y metales no ferrosos, lo que reduce en gran medida el consumo de energía de la unidad. Un conjunto de equipos de soldadura puede producir varios tubos soldados de metal. Para diferentes metales, simplemente cambie la potencia de soldadura y la velocidad de soldadura en consecuencia.

Los métodos de soldadura de alta frecuencia se pueden dividir en alimentación por conducción (soldadura por contacto) y alimentación por inducción (soldadura por inducción) según las diferentes formas de alimentación de las piezas soldadas.

En la soldadura de alta frecuencia, el principio de inducción electromagnética se utiliza para hacer que la pieza de trabajo de soldadura corte las líneas magnéticas de fuerza en el campo magnético del pie e induzca corriente en la superficie. [3]

De acuerdo con el efecto de piel de la corriente alterna, la superficie de la soldadura
Las ventajas son:

1. Pequeña pérdida de calor, calentamiento rápido y alta eficiencia térmica.
2. El equipo es compacto y fácil de usar.
3. El proceso de producción es más limpio que la soldadura por llama, sin altas temperaturas y en buenas condiciones de trabajo.

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

4. Después de configurar los parámetros, la soldadura es consistente, reduciendo los errores de operación humana.
5. Velocidad de soldadura rápida.
6. Pequeña zona afectada por el calor.
7. No es necesario eliminar la suciedad de la superficie de las piezas soldadas, etc.
8. Puede soldar una variedad de metales.

2.1.4.1 Parámetros de la soldadura por alta frecuencia

Amplitud (A): La amplitud es uno de los parámetros básicos en el proceso de soldadura ultrasónica determina la magnitud del poder de fricción que está relacionado con la eliminación de la película de óxido en la superficie de soldadura, la generación de calor por fricción de la superficie de la junta, el tamaño de la zona de deformación plástica y la condición de la capa de fluido plástico por lo tanto la selección correcta del valor de amplitud de acuerdo con la naturaleza del material a soldar y su grosor es un requisito previo para obtener una unión altamente confiable el rango de amplitud es generalmente de 5 a 25 μ m los soldadores ultrasónicos de baja potencia generalmente tienen más altas frecuencias de vibración pero el rango de amplitud es bajo.

Presión estática (F): El papel de la presión estática es transmitir efectivamente la vibración ultrasónica a la soldadura a través del sonotrodo la cantidad de presión estática requerida para la soldadura ultrasónica varía según el tipo de material cuando la presión estática es demasiado baja ya que las ondas ultrasónicas apenas se transmiten a la soldadura no es suficiente generar un cierto trabajo de fricción en la interfaz de las dos soldaduras y la energía ultrasónica se pierde casi por completo en la superficie que se desliza entre el Polo acústico superior y la soldadura es

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

imposible formar una conexión efectiva con el aumento de la presión estática se mejora la condición de transmisión a la vibración se aumenta la temperatura de la zona de soldadura se disminuye la resistencia a la deformación del material y se aumenta gradualmente el grado de flujo plástico además debido al aumento de la tensión de compresión el área y la conexión de la deformación plástica en el punto de contacto el argumenta y la resistencia de la junta aumenta cuando la presión estática alcanza un cierto valor y luego aumenta la presión la resistencia de la junta ya no aumenta ni disminuye esto se debe a que cuando la presión estática es demasiado grande la energía de vibración no puede utilizarse razonablemente la fuerza de fricción es demasiado grande el movimiento de fricción relativo entre las soldaduras se debilita y el valor de amplitud se reduce lo que resulta en el área de conexión entre las soldaduras ya no aumenta ni disminuye y el aplastamiento del material hace que la sección transversal realce a la junta disminuya lo que reduce la resistencia de la junta en el caso de otras condiciones de soldadura la presión estática alta se puede utilizar para obtener las juntas de soldadura de la misma resistencia en el tiempo de soldadura más corto porque la presión estática más allá se genera una temperatura más baja en la etapa de vibración causado por la deformación plástica al mismo tiempo el uso de alta presión estática puede alcanzar la temperatura más alta en poco tiempo y acortar el tiempo de la soldadura.

Tiempo de soldadura (t): El tiempo de soldadura tiene una gran influencia en la calidad de la unión con del tiempo de soldadura es demasiado corto la película de óxido en la superficie es demasiado tarde para ser destruida y solo se forman algunas protuberancias la resistencia de la junta es demasiado baja incluso la junta no se puede formar a medida que se prolonga el tiempo de soldadura la resistencia de la Unión de la soldadura aumenta rápidamente y el valor de resistencia no se reduce durante un cierto tiempo de soldadura sin embargo cuando el tiempo de soldadura ultrasónica excede un cierto valor la resistencia de la Unión de la soldadura disminuye esto se debe a que la entrada de calor de la soldadura es demasiado grande la zona de plásticos Se agranda y el Polo acústico superior queda atrapado en la soldadura además de reducir el área de sección transversal

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

de la junta de soldadura es fácil causa grietas en la superficie y en el interior de la junta de la soldadura para diferentes presiones estáticas el tiempo de soldadura requerido para obtener la resistencia óptima de la unión es diferente y aumentar el valor de la presión estática puede acortar el tiempo de la soldadura en cierta medida [4].

2.1.5 Mojabilidad

El mojado de una superficie ocurre dadas las interacciones en la frontera que delimita al sólido y al líquido. El grado de mojabilidad es determinado por el balance entre las fuerzas adhesivas y cohesivas entre dos medios en contacto. Las primeras son aquellas que hacen que un líquido se extienda sobre una superficie; las segundas son aquellas responsables de que una gota de líquido tienda a formar una esfera y evite con esto el contacto con la superficie. Es decir, las fuerzas adhesivas se dan entre dos medios diferentes y las cohesivas entre medios iguales.

El balance de energía entre las tensiones interfaciales líquido-aire, líquido-sólido y sólido-aire determina la adhesión de la superficie, además de su relación con el ángulo de contacto. Para un sistema con un solo elemento, en este caso un sólido, el trabajo necesario para separar este elemento en dos partes es:

$$w_c = 2\gamma_{sv} \quad \text{Ecuación (1)}$$

la cual es representada en la parte izquierda de la figura, a este trabajo se le conoce como: “trabajo de cohesión”.

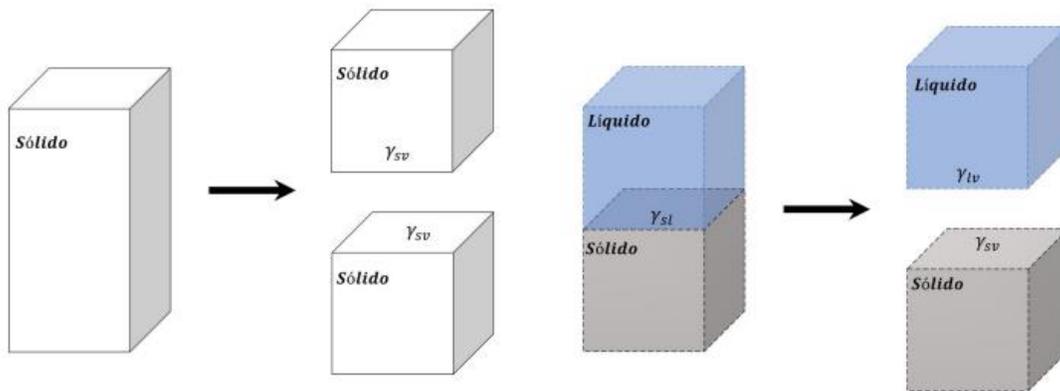


Figura 2. Trabajo por adhesión [5].

Para el sistema sólido - líquido (puros), el trabajo para separar estas dos fases es llamado “trabajo de adhesión”, representado en la figura 2 Este trabajo definido por Dupré en 1869 es dado por:

$$W_{ad} = \gamma_{sv} + \gamma_{lv} - \gamma_{sl} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

γ_{sv} = solido-vapor

γ_{lv} = liquido-vapor

γ_{sl} = solido-liquido

Cuando una gota de líquido se pone en contacto con una superficie sólida, se genera una tensión entre estos dos medios, la tensión interfacial γ_{sl} (figura 3), dependiendo de la magnitud de esta interacción, la gota adoptará un ángulo de contacto con la superficie.

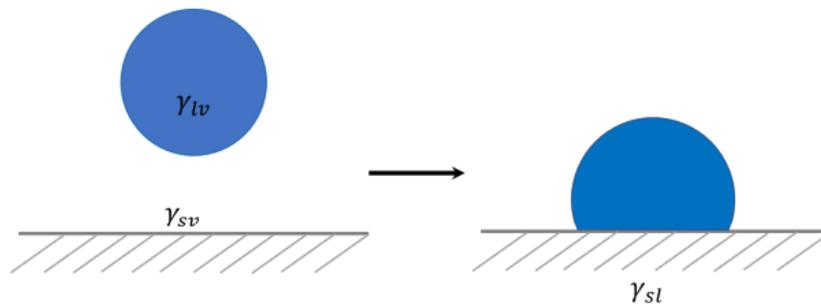


Figura 3. Tensión interfacial γ_{sl} [5].

En el mojado existen dos casos especiales, cuando el trabajo de adhesión es igual o mayor al trabajo de cohesión, es decir $W_c \geq W_{ad}$ ocurre el mojado completo o mojado espontáneo, es decir, $\theta = 0^\circ$; y cuando $W_c = 2W_{ad}$ es cuando $\theta = 90^\circ$ y la gota forma un casquete esférico sobre la superficie del sustrato. [5]

2.1.5.1 Ecuación de Young Dupre

Cuando las ecuaciones 1 y 4 se combinan, obtenemos la conocida relación de Young-Dupré.

$$W_{ad} = \gamma_{lv}(\cos \theta + 1) \quad \text{Ecuación (3)}$$

o también escrita como:

$$\cos \theta = \frac{W_{ad}}{\gamma_{lv}} - 1 \quad \text{Ecuación (4)}$$

la cual se refiere al trabajo requerido para separar una gota líquida de la superficie sólida. Para superficies superhidrófobas, $\theta = \pi$, y el $\cos \theta = -1$, con lo que se deduce que $W_{ad} = 0$, es decir, no se requiere trabajo para separar un líquido de un sólido superhidrófobo. Concretamente, la gota del líquido tenderá a rodar libremente sobre la superficie. Para el sistema sólido líquido, W_{ad} es escrito como W_{sl} [5].

2.2 Materiales Base

2.2.1 Cobre (Cu)

El cobre (del latín CŪPRUM, y éste del griego Kýpros) elemento químico de símbolo Cu y número atómico 29, es un metal de transición de color rojizo y brillo metálico que, junto con la plata y el oro, forma parte de la llamada familia del cobre, caracterizada por ser los mejores conductores de electricidad. Gracias a su alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, se ha convertido en el material más utilizado para fabricar cables eléctricos y otros componentes eléctricos y electrónicos.

El cobre forma parte de una cantidad muy elevada de aleaciones que generalmente presentan mejores propiedades mecánicas, aunque tienen una conductividad eléctrica menor. Las más importantes son conocidas con el nombre de bronce y latones. Por otra parte, el cobre es un metal duradero porque se puede reciclar un número casi ilimitado de veces sin que pierda sus propiedades mecánicas. Se caracteriza por su excelente ductilidad pues presenta una estructura cristalina BCC (cúbica centrada en el cuerpo) la cual posee doce sistemas de deslizamiento, compuestos por el plano de deslizamiento {111} y la dirección <110>. Además, posee un bajo punto de cedencia a temperatura ambiente de apenas 69 MPa. [6]

2.2.2 Propiedades físicas y mecánicas del cobre (Cu)

- Estado de la materia Sólido (diamagnético).
- Punto de fusión 1357.77 K (1084.62 °C).
- Punto de ebullición 3200 K (2927 °C).
- Entalpía de vaporización 300 KJ/mol
- Entalpía de fusión 13.1 KJ/mol

El cobre es un metal blando con un índice de dureza 3 en la escala de Mohs (50 en la escala de Vickers) y su resistencia a la tracción es de 210 MPa, con un límite elástico de 33.3 MPa. Es maleable ya que permite la producción de laminillas muy

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

delgadas, así como también es un material soldable que permite tratamiento térmico (temple y recocido). Sus propiedades mecánicas son mejoradas al formar aleaciones y es resistente a la corrosión y oxidación.

Las principales presentaciones del cobre metálico son:

- Cobre térmico tenaz; contiene 99.85% de cobre, siendo el resto oxígeno e impurezas.
- Cobre térmico de alta conductividad; es el cobre térmico que ha sido sometido a mejores condiciones de refinación que aumentan su conductividad.
- Cobre electrolítico tenaz; es un cobre refinado térmico que ha sido colado en ánodos que luego se refinan electrolíticamente. Tiene un contenido de 99.9% de cobre.
- Cobre exento de oxígeno; contiene un 99.95 % de cobre, manteniendo la misma buena conductividad. Es bastante caro y su aplicación es poco común.
- Cobre desoxidado con fósforo con bajo contenido de fósforo residual; contiene un 99.9% de cobre, 0,005 a 0,012% de fósforo (P) y tiene una conductividad de 85 a 98%.
- Cobre desoxidado con fósforo con alto contenido de fósforo residual; contiene un 99.85% de cobre, 0.013 a 0.50% de fósforo (P) y tiene una conductividad de 70 a 90%

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

2.2.3 Propiedades químicas del cobre (Cu)

En la tabla 1 nos encontramos las propiedades químicas del cobre.

Tabla 1. Propiedades químicas del cobre [7].

Número atómico	29
Valencia	1,2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1,9
Radio covalente (Å)	1,38
Radio iónico (Å)	0,69
Radio atómico (Å)	1,28
Configuración electrónica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹
Primer potencial de ionización (eV)	7,77
Masa atómica (g/mol)	63,54
Densidad (g/ml)	8,96
Punto de ebullición (°C)	2595
Punto de fusión (°C)	1083

2.3 Plata (Ag)

Elemento químico, símbolo Ag, número atómico 47 y masa atómica 107.870. Es un metal lustroso de color blanco-grisáceo. Desde el punto de vista químico, es uno de los metales pesados y nobles; desde el punto de vista comercial, es un metal precioso. En la mayor parte de sus aplicaciones, la plata se alea con uno o más metales. La plata, que posee las más altas conductividades térmica y eléctrica de todos los metales, se utiliza en puntos de contacto eléctricos y electrónicos. También se emplea mucho en joyería y piezas diversas. Entre las aleaciones en que es un componente están las amalgamas dentales y metales para cojinetes y pistones de motores.

La plata pura es un metal moderadamente suave (2.5-3 en la escala de dureza de Mohs), de color blanco, un poco más duro que el oro. Cuando se pule adquiere un lustre brillante y refleja el 95% de la luz que incide sobre ella. Su densidad es 10.5 veces la del agua.

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

Aunque la plata es el metal noble más activo químicamente, no es muy activa comparada con la mayor parte de los otros metales. No se oxida fácilmente (como el hierro), pero reacciona con el azufre o el sulfuro de hidrógeno para formar la conocida plata deslustrada. El galvanizado de la plata con rodio puede prevenir esta decoloración. La plata no reacciona con ácidos diluidos no oxidantes (ácidos clorhídrico o sulfúrico) ni con bases fuertes (hidróxido de sodio) [8].

2.3.1 Propiedades químicas de la plata (Ag)

En la tabla 2 encontramos las propiedades químicas de la plata.

Tabla 2. Propiedades químicas de la plata [9].

Número atómico	47
Valencia	1
Estado de oxidación	+1
Electronegatividad	1,9
Radio iónico (nm)	0,126
Radio atómico (nm)	0,144
Configuración electrónica	[Kr] 4d ¹⁰ 5s ¹
Primer potencial de ionización (kJ/mol)	758
Segundo potencial de ionización (kJ/mol)	2061
Potencial estándar	0,779 V (Ag ⁺ / Ag)
Masa atómica (g/mol)	107,87 g.mol ⁻¹
Densidad (g/cm ³ a 20°C)	10,5
Punto de ebullición (°C)	2212 °C
Punto de fusión (°C)	962 °C

2.4 Aleación Plata (Ag) – Cobre (Cu)

La mayoría de los metales no se usan en estado puro, sino que mezclados con otros. Este proceso, denominado aleación se basa en combinar dos o más metales para lograr que sean más duros y resistentes.

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

Las diferentes aleaciones de un metal inciden, según sus composiciones, en las características técnicas que se obtienen. Esto facilita que se puedan utilizar en numerosos objetos con aplicaciones muy variadas.

El cobre a la plata se caracteriza por una alta dureza que le permite soportar temperaturas de hasta 226° y conservar la conductibilidad eléctrica del metal rojo. Esta aleación se emplea principalmente para hacer recubrimientos de apariencia plateada sobre el cobre, con el fin de mejorar su brillo y reducir la oxidación [10].

2.4.1 Diagrama de fase

Para este proceso de soldadura ultrasónica por alta frecuencia se utilizó como material de aporte la Aleación 92% cobre 7% plata 1% otros elementos, la figura 4 muestra el diagrama de fase de la aleación.

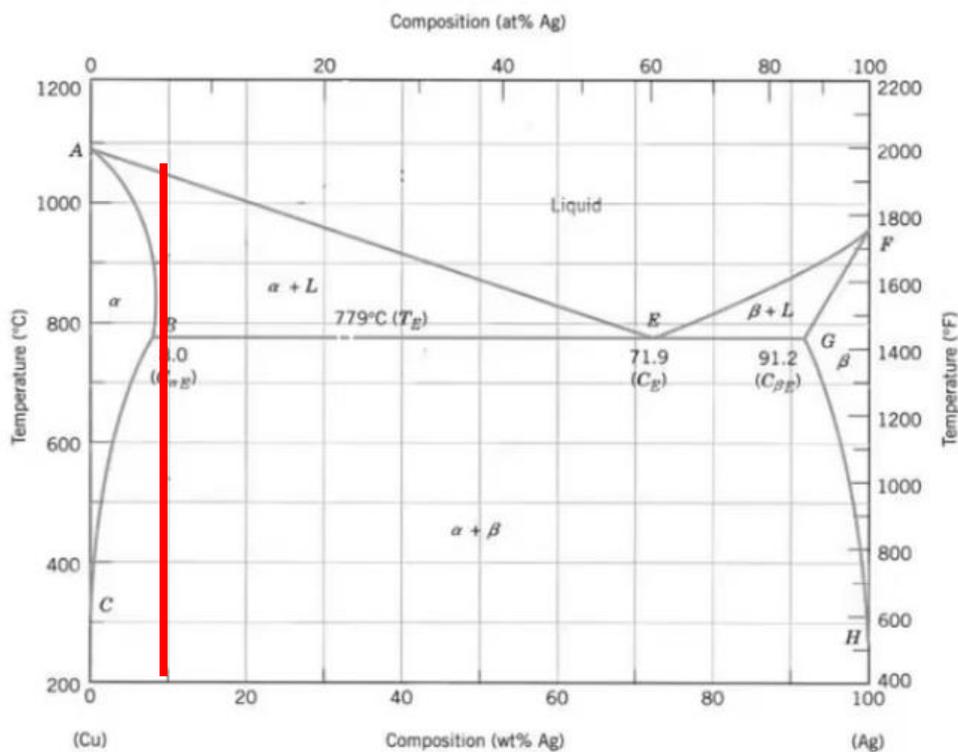


Figura 4. Diagrama de fase Plata-Cobre [11].

2.5 Lineamientos y parámetros de los perfiles de rugosidad superficial.

2.5.1 Lineamientos de los perfiles de rugosidad superficial.

Longitud de muestreo (l); es la longitud de onda nominal utilizada para separar la rugosidad y la ondulación. También conocido como Longitud de Corte o Cutoff.

Evaluación Longitud (L); es la longitud sobre la cual los valores de la superficie se evalúan los parámetros. Se recomienda que la duración de la evaluación consista en cinco longitudes de muestreo, aunque puede comprender cualquier número de longitudes de muestreo. También conocido como duración de la evaluación.

Línea media (M); es la línea de referencia sobre la cual se miden las desviaciones del perfil. La línea media del perfil de rugosidad generalmente se establece mediante filtros analógicos o digitales con el corte seleccionado correspondiente a la longitud de muestreo de rugosidad.

La irregularidad del perfil; es un pico de perfil y el valle de perfil adyacente.

Profile Peak; es el punto de máxima altura en una parte de un perfil que se encuentra por encima de la línea media y entre dos intersecciones del perfil con la línea media.

Profile Valley; es el punto de máxima profundidad en una porción de un perfil que se encuentra debajo de la línea media y entre dos intersecciones del perfil con la línea media.

2.5.2 Parámetros de los perfiles de rugosidad superficial.

El Promedio de Rugosidad (Ra); es el promedio aritmético de los valores absolutos de las alturas del perfil sobre la longitud de evaluación.

$$Ra = \frac{1}{Lm} \int_0^{Lm} |y| dx \quad \text{Ecuación (5)}$$

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

La altura de diez puntos de las irregularidades, Rz (ISO), es el valor promedio de los valores absolutos de las alturas de los cinco picos de perfil más altos y las profundidades de los cinco valles más profundos dentro de la longitud de evaluación [12].

$$Rz = \frac{1}{5} (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) \quad \text{Ecuación (7)}$$

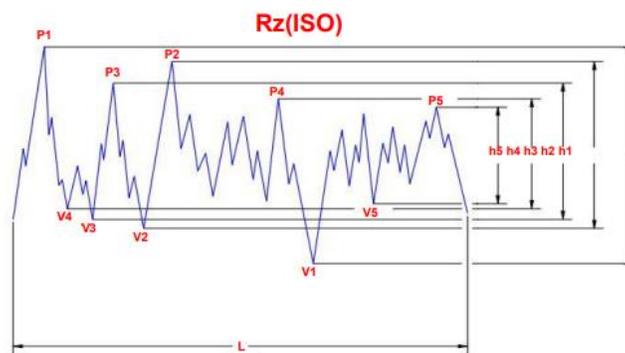


Figura 6. Rz (ISO) [12].

2.6 Dureza Rockwell

La dureza Rockwell o ensayo de dureza Rockwell es un método para determinar la dureza, es decir, la resistencia de un material a ser penetrado. [14]

La dureza Rockwell viene dada por la siguiente fórmula:

$$n \text{ HR Letra} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Dónde:

n = carga aplicada en kg

HR = identificativo del ensayo Rockwell

Letra = letra identificativa de la Escala usada

2.7 Estado del arte en los procesos de soldadura por alta frecuencia

Durante los últimos años, la soldadura ultrasónica se ha vuelto cada vez más versátil. Aunque el trabajo inicial se limitó principalmente al papel de aluminio blando, pronto se descubrió que el proceso podía usarse con éxito para unir materiales como cobre, níquel, titanio, zirconio y algunas de sus aleaciones. Los intentos de soldar combinaciones de metales disímiles dieron como resultado uniones de una calidad y resistencia sorprendentemente buenas. También es posible unir metales con no metales.

La acción de la soldadura ultrasónica es la siguiente. Dos piezas de trabajo que están sujetas entre la punta de soldadura y el yunque son frotadas una contra la otra por la punta vibrantes, esta acción provoca fricción en la interfaz de las dos piezas de trabajo. La fricción limpia la superficie de contacto al pulverizar y eliminar parcialmente los contaminantes y las capas de óxido y contribuye a la formación de pequeños puntos de soldadura hay tres variables importantes que pueden influir en la calidad de la soldadura, la fuerza de sujeción, la potencia ultrasónica y el tiempo de soldadura.

Estas variables deben ajustarse a los valores correctos para las diversas combinaciones de materiales, dimensiones y formas de las piezas a soldar. La fuerza de sujeción F es necesaria para un contacto íntimo entre las piezas de trabajo, de modo que la energía de vibración pueda ser entregado a la superficie a soldar.

Cuando la potencia ultrasónica P cambia durante la soldadura, la amplitud vibratoria cambia y, por lo tanto, también la tensión dinámica en la superficie de la soldadura. La potencia no debe ser demasiado alta ni demasiado baja. Si la potencia es demasiado alta, las tensiones interfaciales dinámicas dañarán la soldadura; si es demasiado baja, no se realizará ninguna soldadura [15].

Sachin D. Kore et col [16] realizaron la unión de combinaciones de metales disímiles como el cobre y el acero inoxidable, lo cual represento una tarea desafiante debido

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

a las grandes diferencias de las propiedades físicas y químicas para unir los componentes emplearon como técnica de unión inducción electromagnética, la cual representa una técnica potencial para varios componentes industriales. La resistencia al corte por tracción de la soldadura reveló que la soldadura por inducción electromagnética era más fuerte que los metales base, se encontró también que los valores de dureza cerca de la interface eran mayores que los del metal base debido a la compresión de los granos cerca de la interfaz de soldadura. La técnica de unión empleada es muy versátil y eficaz Ugür Cavdar y Ibrahim Gülsahin realizaron un estudio de la aplicación de polvos de metal (PM) de base hierro compactados por soldadura por inducción de ultra alta frecuencia (UFFIW). La máxima tensión y la máxima deformación de polvos de metal compactados soldados fueron determinadas por flexión en tres puntos y prueba de resistencia, los resultados muestran que la soldadura se llevó a cabo de forma exitosa, la profundidad de penetración empleada fue de 0.7 mm con un generador de inducción de 2.8 kW y una frecuencia de 900 kHz. La resistencia a la tensión obtenida fue de 110 N/mm²

Jingwei Yang et col [17] investigaron los efectos de la energía de soldadura en las características mecánicas y microestructurales de placas de cobre puro soldada por ultrasonido, observando una banda delgada de interfaces de soldaduras rectas y con una estructura de grano ultrafino. Las características de tracción de las juntas dependieron significativamente del desarrollo de la deformación plástica en la interfaz.

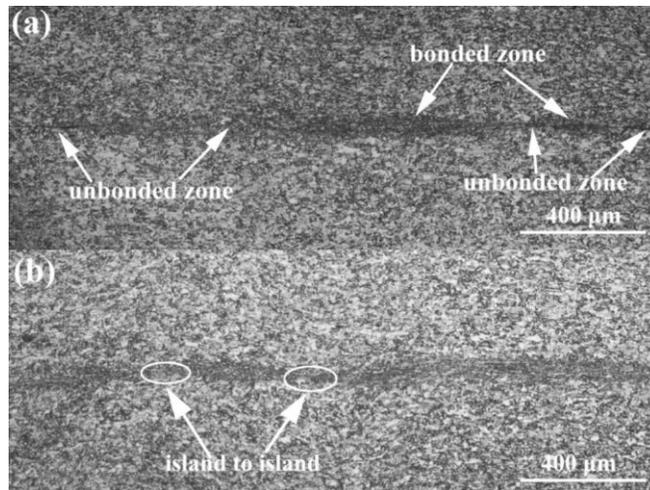


Figura 7. Microestructura en la zona de la soldadura de placas de cobre [18]

La figura 7 muestra las típicas zonas de unión en relación con la energía de soldadura, se puede observar que a medida que aumenta la energía de soldadura, esta evoluciona con la micro soldadura localizada en toda la zona y la morfología de la interfaz de soldadura cambia de un patrón interfacial recto a uno ondulado.

Han y Yu [19] realizaron estudios sobre los parámetros geométricos, así como la distribución espacial de las bobinas, junto con el efecto de la ley de frecuencia de soldadura y corriente eléctrica sobre la diferencia de temperatura de la sección transversal y el tiempo de calentamiento requerido, encontrando que la frecuencia de soldadura y la densidad de corriente se obtienen a través del análisis de elementos finitos del acoplamiento térmico electromagnético tridimensional durante un calentamiento por inducción de alta frecuencia, señala que para eliminar los fenómenos indeseables de una soldadura fría es reducir la diferencia de temperatura excesivamente grande.

Sección transversal del campo de temperatura del centro de soldadura donde se muestra el fenómeno de la distribución de la soldadura en la superficie superior e inferior, reflejándose el proceso de corrosión.



Figura 8. Metalografía de corrosión en una sección transversal [19].

Capítulo 3

Planteamiento del problema

3.1 Identificación.

Se tiene una unión soldada mediante el proceso de soldadura ultrasónica por alta frecuencia cobre a cobre, el material de aporte es una aleación plata – cobre, cuya composición corresponde al 8 y 92% respectivamente. Se busca determinar la compatibilidad del metal de soldadura de aporte con el metal base utilizado, acorde con el procedimiento de soldadura especificado. Durante el proceso de soldadura los materiales sufren modificaciones a niveles metalúrgicos ocasionando cambios en sus propiedades microestructurales, algunos de estos cambios pueden verse a simple vista en la apariencia del material, pero muchos otros son imperceptibles, es importante determinar las propiedades del material después del proceso de soldadura para conocer el comportamiento mecánico que tendrá el material y la resistencia de la unión.

3.2 Justificación.

Uno de los procesos más importantes dentro de la unión de dos o más materiales metálicos es la soldadura, la cual permite la unión permanente entre las piezas, ya sea por fusión de las mismas o por acción de un tercero (material de aporte) convirtiéndose en una sola unidad. De hecho, la zona de unión es igual o más fuerte que los metales que se han unido. Una unión completamente sólida es aquella en la que el 100 % del área de la unión es mojada por el material de aporte y además está completamente llena de él. Para el material base se deben contemplar, sus temperaturas de fusión, el correcto mojado de los mismos y la posibilidad de que se produzca corrosión o compuestos Inter metálicos que reduzcan las propiedades mecánicas de la unión. El Tipo de soldadura afectará principalmente a la forma del

material de aporte, los materiales más sencillos de usar, son aquellos con un alto contenido en plata, y de fácil fluidez, debido a que combinan una baja temperatura de soldeo junto con un estrecho rango de temperaturas de fusión [20]. La soldadura de alta frecuencia (o ultrasónica) es un proceso de soldadura en estado sólido que suelda por la aplicación de vibraciones de energía de alta frecuencia mientras las piezas están siendo sujetadas a presión, debido a la alta calidad de la soldadura y a la resistencia de la unión, la soldadura de alta frecuencia es uno de los métodos más usados.

3.3 Alcance.

Se pretende determinar las propiedades mecánicas de la soldadura cobre a cobre con la aleación plata cobre como material de aporte en la unión, realizando diferentes ensayos destructivos como; ensayo de flexión, ensayo de tensión y ensayo de dureza, y no destructivos como el análisis termodinámico, la obtención de los perfiles de rugosidad superficial y la metalografía del material.

Capítulo 4 Objetivos

4.1 Objetivo General

Determinar el comportamiento mecánico de una soldadura cobre a cobre empleando un material de aporte (92% Cu – 8% Ag) mediante la técnica de soldadura ultrasónica (USW) de alta frecuencia.

4.2 Objetivos Específicos

1. Realizar los análisis termodinámicos correspondientes a la aleación (Cu 92% - Ag 8%) y a la soldadura cobre a cobre.
2. Analizar la metalografía del cobre (Cu) utilizando el microscopio óptico Velab [®] VE-407.
3. Realizar los perfiles de rugosidad en la unión soldada mediante un rugosímetro Mitutoyo [®] SJ301.
4. Realizar un perfil de dureza mediante un equipo Mitutoyo [®] HR-200 tomando como referencia la norma ASTM E18-11 en las siguientes zonas; 1. Zona de la unión, 2. Zona afectada térmicamente (ZAT), 3. Metal base.
5. Evaluar la resistencia a la tensión de la soldadura cobre a cobre en la máquina de ensayos universales ETM – 100KN bajo la norma ISO 6892-1-2016.
6. Evaluar la resistencia de corte de la soldadura en la máquina de ensayos universales ETM – 100KN bajo la norma GBT 1452-93.
7. Analizar la metalografía del tipo de fractura de la soldadura (Cu) utilizando el microscopio óptico Velab [®] VE-407.

Capítulo 5 Metodología

5.1 Diseño de probetas

La composición de la probeta consta de cobre como material base, el material de aporte corresponde a la aleación (Cobre 92% - Plata 8%), su geometría se basa en un cilindro hueco con una longitud de 75 mm, un diámetro exterior de 6 mm, diámetro interior de 4 mm, y un espesor de 2 mm, en la figura 9 se observa el diseño de la geometría de la probeta realizado en el software Solid Works [21] y la composición de los materiales.

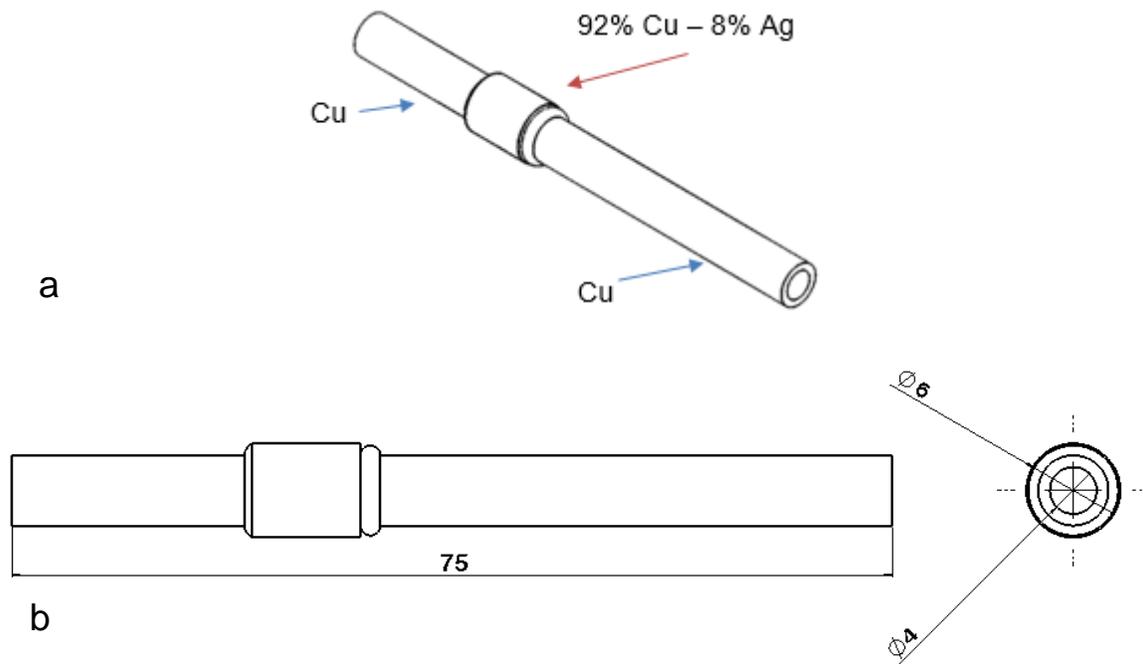


Figura 9. a) Composición del material la probeta. b) Croquis.

5.1.2 Elaboración de las probetas

Para la unión de los materiales se utilizó soldadura por alta frecuencia (HF) siguiendo los principios y métodos de soldadura 27.12 MHz con un rango de potencia de 0.1 a 100 Kw, en la figura 10 se observa la probeta con la unión correcta de los materiales.



Figura 10. Probeta

5.2 Micrografía del cobre

5.2.1 Preparación metalográfica de las probetas

Para realizar la caracterización micro-estructural de la unión mediante microscopía óptica fue necesario preparar metalográficamente las probetas, se cortaron a la mitad con una pulidora utilizando un disco de corte para metal de 0.45" en la figura 11 se observan las probetas cortadas por la mitad transversalmente, esto con la finalidad de poder analizarlas en su interior y poder ver las zonas afectadas térmicamente por la soldadura, defectos y tener otra perspectiva de la zona de la unión de los materiales.



Figura 11. Probetas cortadas por la mitad para comenzar con su preparación metalográfica.

Siguiendo con la preparación metalográfica de las probetas se limaron con diversas lijas de diferentes rugosidades, se comenzó con la #180, #240, #400, #600, la finalidad es llegar al termino espejo para poder someterlas a un ataque químico antes de hacer el análisis microestructural, en la figura 12 se observan las probetas durante su proceso de limado, el color del cobre ha cambiado y se ve ven más uniformes.



Figura 12. Proceso de limado a) Vista Interior. b) Vista exterior.

Para obtener la metalografía del material cobre (Cu 99.99%) y el tipo de fractura de la soldadura, las probetas fueron analizadas mediante el microscopio Velab VE-407 con el lente objetivo 40/0.60. En la figura 13 se observa la probeta siendo analizada en el microscopio.



Figura 13. Probeta siendo analizada en el microscopio.

5.3 Ensayos de rugosidad

Se determino la rugosidad superficial mediante un equipo Mitutoyo SJ-301 bajo la norma JIS-2001. Con los siguientes parámetros; Perfil R, L = 0.16 in, N = 5, $\lambda_c = 0.03$ in, $\lambda_s = 100 \mu$ in, velocidad = 0.01 in/s. Las mediciones se realizaron en 3 zonas diferentes de la probeta; Zona de la unión, Zona afectada térmicamente (ZAT) y en el metal base.

En la figura 14 se puede observar una sección de la probeta correspondiente al metal base.

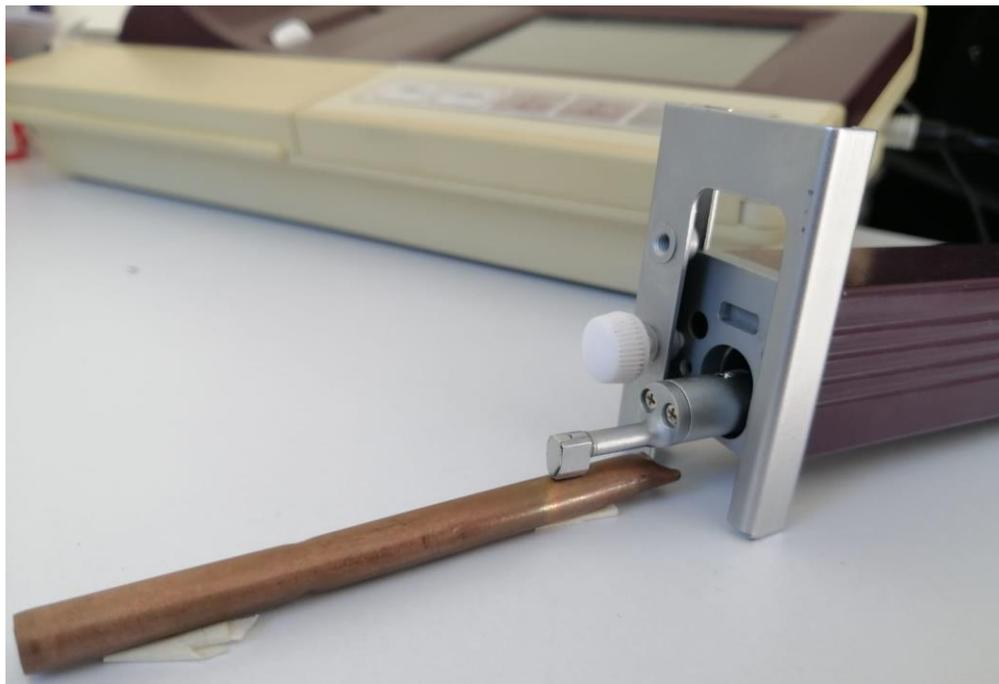


Figura 14. Probeta sometida al ensayo de rugosidad.

5.4 Evaluación Mecánica

5.4.1 Ensayos de dureza.

Con la finalidad de determinar la dureza del material se utilizó un equipo Mitutoyo HR-200, tomando como referencia la norma ASTM E18-11 [22], mediante las siguientes condiciones punta de diamante, tiempo de permanencia de 10s por medición y 60 Kg de carga se tomaron 3 mediciones por zona (Zona afectada térmicamente ZAT, zona de la unión y la zona correspondiente al metal base) todas las mediciones se realizaron a temperatura ambiente, en la figura 15 se puede observar la probeta posicionada correctamente en el porta muestras del durómetro y la punta de diamante tocando la superficie del material.



Figura 15. Probeta sometida al ensayo de dureza.

5.4.2 Resistencia a la tensión.

Para la Evaluación de la resistencia a la tensión de la soldadura cobre a cobre las probetas fueron sometidas a pruebas de tensión en la máquina de ensayos universales ETM – 100KN bajo la norma ISO 6892-1-2016 [23], shape (Pipe outer diameter = 6 mm * inter diameter = 4 mm), $A=15.7 \text{ mm}^2$ $L_0 = 75 \text{ mm}$ y una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente, en la figura 16 se observa la probeta posicionada correctamente en las mordazas de la máquina con los extensómetros en la parte central de la probeta, lista para ser sometida al ensayo.

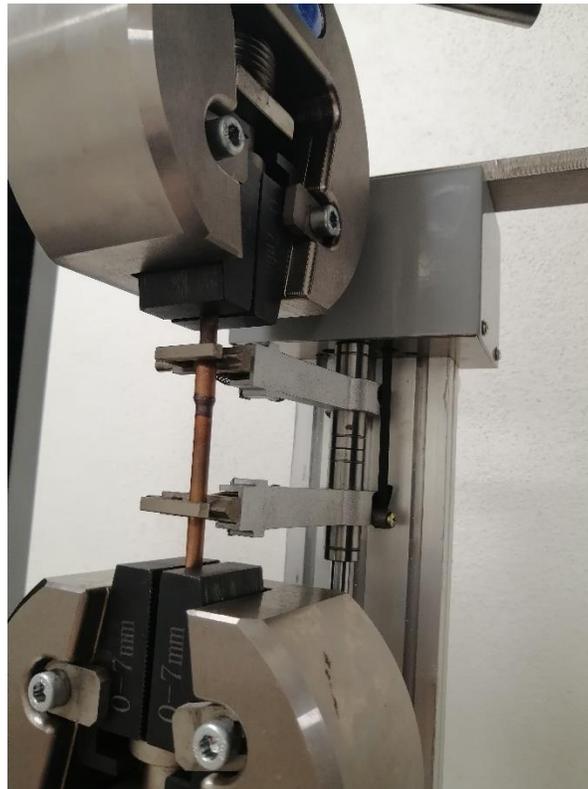


Figura 16. Probeta lista para ser sometida al ensayo de tensión en la máquina de ensayos universales ETM – 100KN.

5.4.3 Resistencia a la flexión.

Para la evaluación de la resistencia a la flexión, 3 de las probetas fueron sometidas a pruebas de flexión de 3 puntos en la máquina de ensayos universales ETM – 100KN bajo la norma GBT 1452-93 con los siguientes parámetros $d = 6\text{mm}$, $\text{Span} = 50\text{mm}$, velocidad de desplazamiento de 5mm/min , velocidad de la carga = 1KN/s , en la figura 17 se observa la probeta posiciona en las barras fijas de la máquina.



Figura 17. Probeta lista para ser sometida al ensayo de flexión en la máquina de ensayos universales ETM – 100KN.

Capítulo 6 Resultados

6.1 Diseño de las probetas

A continuación, se presenta el área total, el volumen y la densidad obtenida de la geometría de las probetas, la figura 18 muestra las medidas de los diámetros exterior ($d_2 = 6\text{ mm}$) e interior ($d_1 = 4\text{ mm}$), la altura ($h = 75\text{ mm}$), y el peso de la probeta ($m = 12\text{ g}$).

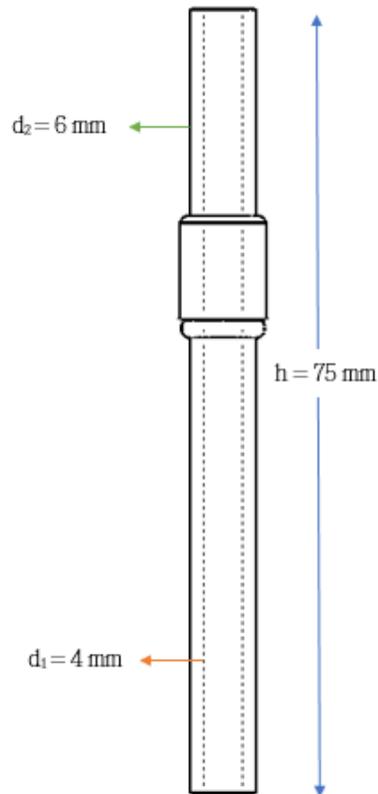


Figura 18. Geometría de la probeta.

6.1.2 Área total de la probeta.

$$A_t = A_{L1} + A_{L2} + 2(A_{B1} - A_{B2})$$

$$A_t = 2\pi r_1 * h + 2\pi r_2 * h + 2(\pi * r_1^2 - \pi * r_2^2)$$

$$A_t = 2\pi(2mm) * 75mm + 2\pi(3mm) * 75mm + 2(\pi * (2mm)^2 - \pi * (3mm)^2)$$

$$A_t = 471.24 mm^2 + 1,413.71mm^2 + (-31.42mm^2)$$

$$A_t = 1853.53 mm^2$$

6.1.3 Volumen de la probeta.

$$v = v_1 - v_2$$

$$v = \pi r^2 h$$

$$v = (\pi * 3mm^2 * 75mm) - (\pi * 2mm^2 * 75mm)$$

$$v = 2,120.57 mm^3 - 942.47 mm^3$$

$$v = 1,178 mm^3$$

$$v = 1.178 cm^3$$

6.1.4 Densidad de la probeta.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$\rho = \frac{12g}{1.178cm^3}$$

$$\rho = 10.18 g/cm^3$$

6.2 Análisis termodinámico

6.2.1 Análisis termodinámico de la aleación (Cu 92% - Ag 8%)

Con la finalidad de predecir los posibles productos de reacción durante el proceso de soldadura a condiciones de temperatura y atmosfera de trabajo, se realizó un estudio termodinámico en condiciones de equilibrio empleando el software FatSage Education [25] en el modo equilib. Se considero la reacción del metal de aporte 72% cobre y 8 % de plata ambos porcentajes en peso, dicha reacción se llevó a cabo en presencia de aire estequiométrico (78% N₂ y 21%O₂). La ecuación de reacción y los productos en equilibrio se muestran en la tabla 4. Es posible identificar la formación de un óxido de cobre Cu₂O el óxido de cobre tiene una estructura cubica (estructura de cuprita), con parámetro de red $a= 4.27\text{\AA}$ y una distancia interplanar de 1.84Å. de acuerdo a la literatura [26] los átomos de cobre están colocados en la cara de la estructura y el átomo de oxígeno se encuentra en la parte central de la red. El óxido de Cu₂O se caracteriza por tener buena resistencia física y química, además de tener un gran potencial en algunas aplicaciones tecnológicas, debido a sus propiedades electrónicas y ópticas.

Tabla 4. Productos formados en la aleación cobre-plata.

Cu + Ag +O ₂			
$\Delta G= -3.73934 \times 10^5 \text{ J/mol}$			
78 gr	Cu	Aleación Cobre-Plata	
21 gr	Ag	81.06	Cu ₂ O
32 gr	O ₂	7.99	Ag

Capítulo 6. Resultados y análisis.

Se simuló el enfriamiento desde la temperatura de trabajo 1200°C hasta la temperatura ambiente, resultando como producto 90.128 grs CuO (Tenorita) y 8.59 grs Ag₂O con un $\Delta G = -1.56796 \times 10^5$ J/mol, es muy importante mencionar que se pueden el cambio de energía libre muestra que la reacción es espontánea por lo tanto puede llevarse a cabo dicha reacción, sin embargo, no se puede estimar la cinética de la reacción, es decir que tan rápido puede ocurrir la formación de esos productos.

6.2.2 Análisis termodinámico de la soldadura

Para el análisis termodinámico de los tubos de cobre se consideró los productos previamente formados durante la simulación de la aleación Ag-Cu y cobre grado electrolítico (99.99%Cu) bajo las mismas condiciones de trabajo, en la tabla 5 se muestran los posibles productos de reacción.

El análisis termodinámico incluye el proceso de enfriamiento desde la temperatura de trabajo hasta la temperatura ambiente durante la simulación del enfriamiento, no fue posible observar algún cambio significativo en la formación de un nuevo compuesto o del cambio hacia una nueva estructura, las únicas transiciones ocurren a las temperaturas de fusión 1084°C para el cobre el cual pasa del estado líquido al estado sólido y a los 960°C transformación de fase de la plata de líquido a sólido mostrando un cambio en la energía de Gibbs de -1.23215×10^6 y de -1.18870×10^6 respectivamente.

Tabla 5. Productos formados durante la soldadura.

Cu ₂ O + Ag + Cu				Energía libre (G)
$\Delta G = -1.2775 \times 10^6 \text{ J/mol}$				
81.06 gr	Cu ₂ O	200	Cu (l)	$-2.55128 \times 10^5 \text{ J}$
7.96 gr	Ag	81.06	Cu ₂ O (s)	$-2.22030 \times 10^5 \text{ J}$
200.0 gr	Cu	7.99	Ag (l)	$-7.15492 \times 10^6 \text{ J}$

Macroscópicamente fue posible identificar diferencias de tonalidades en la zona afectada térmicamente, tal diferencia es asociada a los productos de oxidación formados en la superficie. Es importante mencionar que durante el proceso de soldadura no se empleó ningún tipo de atmosfera protectora resultando en los productos previamente mencionados.

6.3 Análisis microestructural del cobre (Cu)

Con la finalidad de conocer la forma y tamaño de grano, así como la influencia en la resistencia mecánica de la unión, se sometió a desbaste mecánico la superficie de cobre grado electrolítico (99.99% Cu), para ello se empleó papel abrasivo de carburo de silicio desde el grado 180 al 1500, la muestra fue terminada a espejo posteriormente se sometió a limpieza con alcohol y secado con aire caliente, para después ser atacada químicamente durante 10 segundos con una solución de 5 gr de cloruro férrico, 50 ml de ácido clorhídrico y 100 ml de agua, la forma y tamaño de grano del cobre es característico de un material que posee muy buena ductilidad y maleabilidad, resultando en un material blando (50 en la escala de Vickers) y una resistencia a la tracción de 50 MPa, además el cobre presenta una alta conductividad eléctrica lo cual no hace muy compatible con todos los materiales aislantes modernos, además de presentar muy buena resistencia a la corrosión. En la figura 19 se muestra la visualización microestructural del cobre.

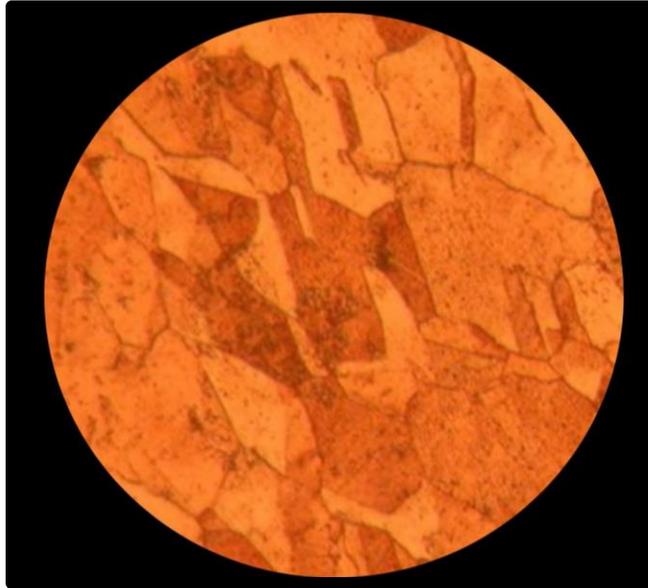


Figura 19. Visualización microestructural del cobre obtenida con el microscopio óptico

6.4 Rugosidad Superficial

Puesto que el fenómeno capilar que gobierna el esparcimiento del líquido del metal de aporte entre las contrapartes depende de la textura superficial, se procedió a realizar la caracterización de las superficies mediante estudios de rugosidad empleando un rugosímetro marca Mitutoyo SJ-301. Las mediciones fueron realizadas en distintas zonas de las probetas; zona de la unión, zona afectada térmicamente (ZAT) y la zona correspondiente al metal base.

6.4.1 Rugosidad Superficial Zona de la unión.

En la figura 20 observamos el perfil de rugosidad en la zona de la unión donde encontramos la aleación Cobre 92% - Plata 8%, esta zona presenta un buen nivel de rugosidad, a simple vista no hay errores micro geométricos.

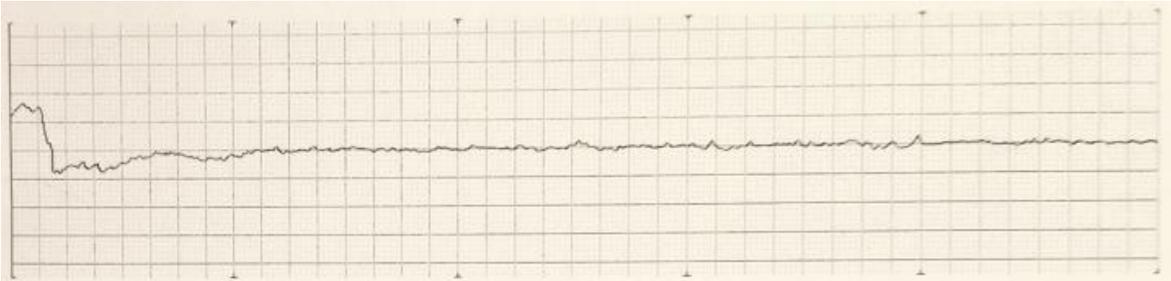


Figura 20. Perfil de rugosidad zona de la unión.

En la tabla 6 tenemos los parámetros de la rugosidad superficial tomados en cuenta en el perfil correspondiente a la zona de la unión, el valor de Ra se encuentra en el grado N8 en la escala de rugosidad.

Tabla 6. Mediciones de rugosidad zona de la unión.

Ra	3.66014 μ m
Rz	19.5834 μ m
Rq	4.7117 μ m

6.4.2 Rugosidad Superficial Metal base.

La figura 21 muestra el perfil de rugosidad en la zona correspondiente al metal base cuya composición del material es 99% Cobre, en la lectura se pueden observar algunos picos de tamaño considerable, pero todos se encuentran dentro del mismo rango, presenta un perfil compuesto entre ondulación y rugosidad. Se puede concluir que el metal base de la probeta es un material que presenta poca rugosidad.

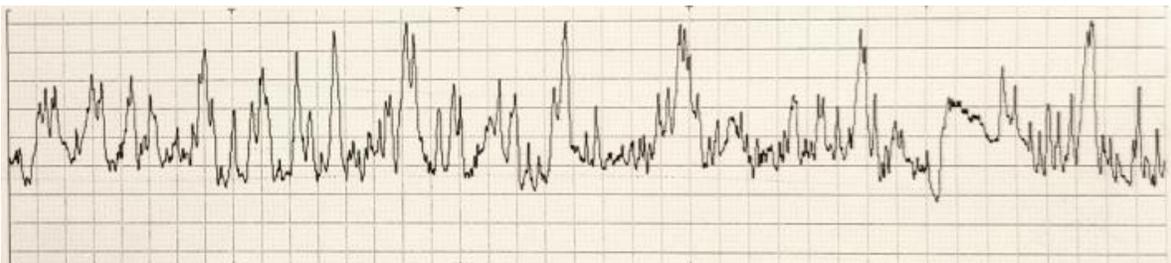


Figura 21. Perfil de rugosidad metal base.

Capítulo 6. Resultados y análisis.

En la tabla 7 tenemos los parámetros de la rugosidad superficial tomados en cuenta en el perfil correspondientes al metal base. El valor de Ra se encuentra en el grado N6 en la escala de rugosidad.

Tabla 7. Mediciones de rugosidad metal base.

Ra	0.9144 μ m
Rz	5.54736 μ m
Rq	1.14046 μ m

6.4.3 Rugosidad Superficial Zona afectada térmicamente (ZAT).

La figura 22 muestra el perfil de rugosidad correspondiente a la zona afectada térmicamente (ZAT), esta es el área de la probeta que se afectó cuando se realizó el proceso de soldadura, En la lectura se pueden apreciar 2 picos que sobresalen del rango de altura de todos los demás, sin embargo, no tienen mucha relevancia, esta zona de la probeta carece de rugosidad.

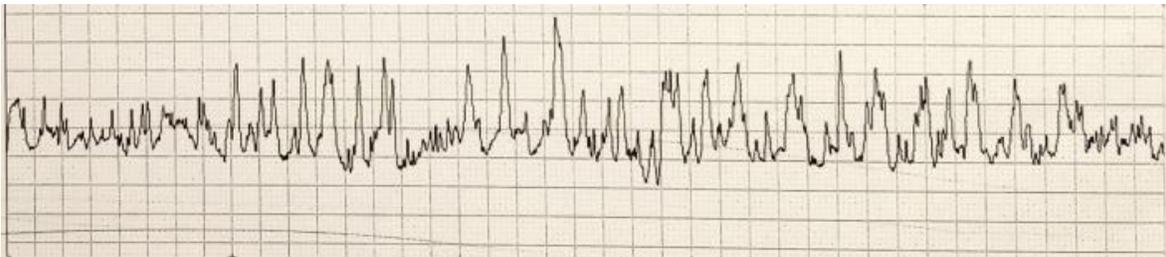


Figura 22. Perfil de rugosidad ZAT.

En la tabla 8 tenemos los parámetros de la rugosidad superficial tomados en cuenta en el perfil correspondientes a la zona afectada térmicamente. El valor de Ra se encuentra en el grado N5 en la escala de rugosidad.

Tabla 8. Mediciones de rugosidad ZAT.

Ra	0.68834 μ m
Rz	3.98018 μ m
Rq	0.85344 μ m

La variación en los parámetros de rugosidad con respecto al metal base es debido a la reacción química y por lo tanto la formación de compuestos superficiales principalmente óxidos de cobre y plata, estos compuestos presentan características mecánicas y químicas distintas al metal base es por ello en esta región. Cruz-González et [24]. Realizaron un análisis cualitativo de la diferencia en el acabado superficial químico y mecánico de una soldadura de acero inoxidable ferrítico, donde los valores obtenidos mediante perfilometría tridimensional fueron más altos en las superficies tratadas químicamente, con un valor promedio de 13 μ m, señalando que la rugosidad química en realidad consiste de valles distribuidos uniformemente por toda la superficie, por otra parte la rugosidad mecánica induce marcas aleatorias con diferente profundidad y ancho resultando en una mayor resistencia mecánica de 20.69 MPa con respecto a 12.67 MPa obtenida en el acabado químico.

6.5 Medición de las propiedades mecánicas

6.5.1 Ensayos de dureza

La medición de la dureza superficial es muy importante porque nos ayuda a comprender y predecir la zona de fractura de la unión, es importante tener en cuenta que cuando se somete un material a altas temperaturas, se puede provocar un cambio muy significativo en la microestructura y por lo tanto en las propiedades mecánicas. Por lo tanto, a continuación, se muestran los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en el equipo Mitutoyo HR-200. En la figura número 23 podemos observar la probeta dividida en 4 secciones; la zona 1 corresponde a la unión de los materiales donde se realizó la soldadura, la zona 2, llamada zona

Capítulo 6. Resultados y análisis.

intermedia, la zona 3 corresponde a la zona afectada térmicamente (ZAT) y por último la zona 4 corresponde al metal base.

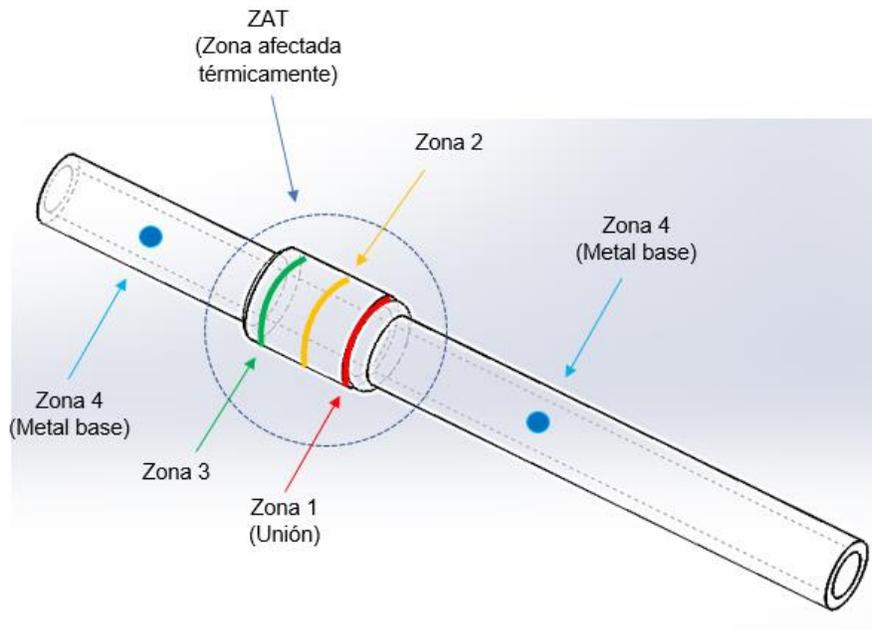


Figura 23. Zonas ensayos de dureza.

Se sometieron a ensayos de dureza por duplicado, donde se realizaron 4 mediciones por zona. La tabla número 9 nos muestra los valores obtenidos de las mediciones realizadas por el durómetro en la probeta número 1.

Tabla 9. Mediciones y desviación estándar de los resultados obtenidos en la probeta 1.

Probeta 1	Zona 1	Zona 2	Zona 3
1	78	76	72
2	82	77.5	72.5
3	82	78	74
4	82.5	78	74.5
Desviación estándar	1.81	0.77	1.02

Capítulo 6. Resultados y análisis.

La tabla número 10 nos muestra los valores obtenidos de las mediciones realizadas por el durómetro en la probeta número 2.

Tabla 10. Mediciones y desviación estándar de los resultados obtenidos en la probeta 2.

Probeta 2	Zona 1	Zona 2	Zona 3
1	78	65	62
2	78	68	68
3	78	71	72
4	81	72	72.5
Desviación estándar	1.29	1.36	4.19

En la figura 24 tenemos una gráfica donde se representa la comparación de la desviación estándar de las mediciones de dureza por duplicado en sus diferentes zonas.

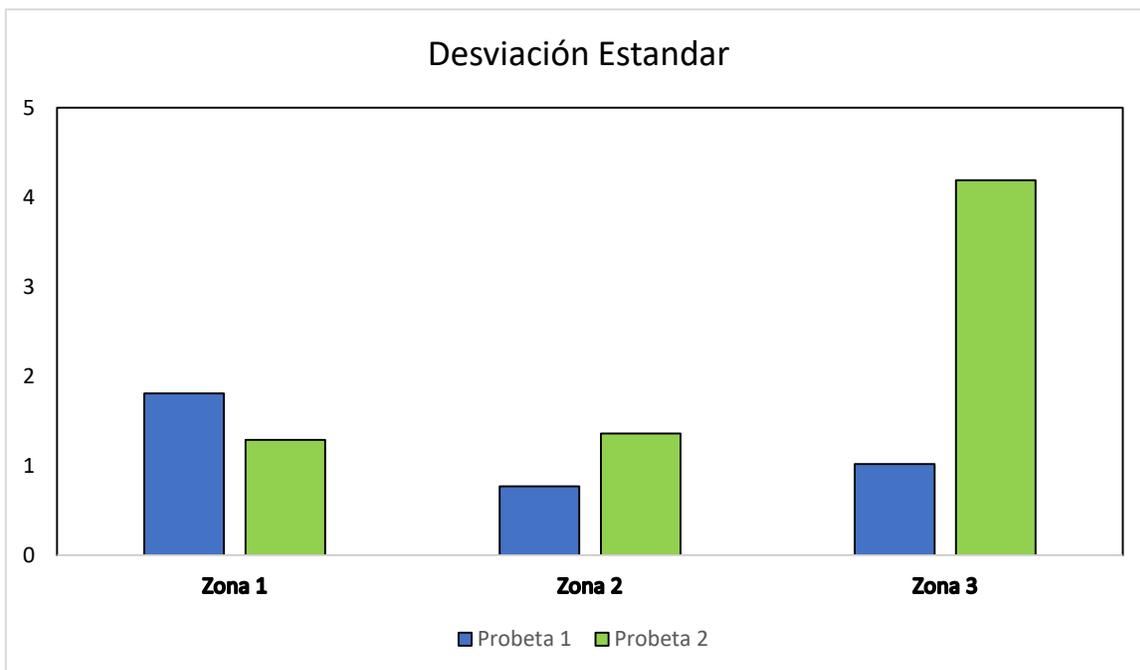


Figura 24. Grafica de desviación estándar de los ensayos de dureza.

6.5.2 Resistencia a la tensión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del ensayo de tensión por duplicado realizado en la máquina de ensayos universales ETM – 100KN bajo la norma ISO 6892-1-2016, El objetivo es determinar la resistencia a la rotura y las principales propiedades mecánicas de la soldadura cobre a cobre cuando se somete a esfuerzos de tracción. En la figura 25 podemos ver ambas probetas fracturas después del ensayo de tensión. La probeta 1, la cual se encuentra marcada por el inciso a, se fracturo justo por debajo de la zona de la unión. Mientras la probeta 2 (b) se fracturo en la zona correspondiente a la zona afectada térmicamente (ZAT).

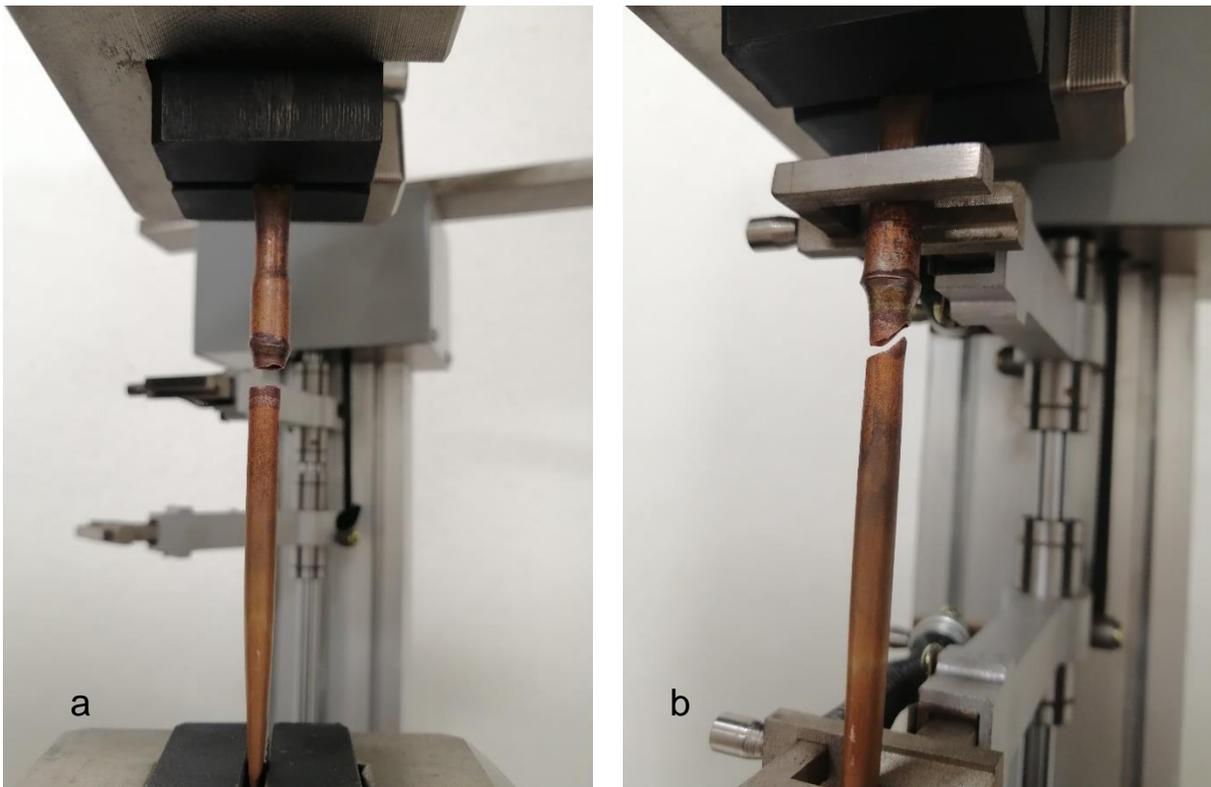


Figura 25. Probetas llegando a la fractura después de ser sometidas al ensayo de tensión, a) Probeta 1. b) Probeta 2.

La figura 26 nos representa la gráfica realizada con los datos arrojados por el software después de realizar los ensayos de tensión, en el eje de las y encontramos

Capítulo 6. Resultados y análisis.

la carga representada en Newtons (N), mientras en el eje de las x tenemos el desplazamiento expresado en milímetros (mm). La línea azul representa la probeta número 1, la cual tiene un valor máximo de 90 N, la línea roja representa la probeta número 2, la cual tiene un valor máximo de 100 N, con esta gráfica podemos sustentar el comportamiento de las probetas a los esfuerzos de tracción durante el ensayo.

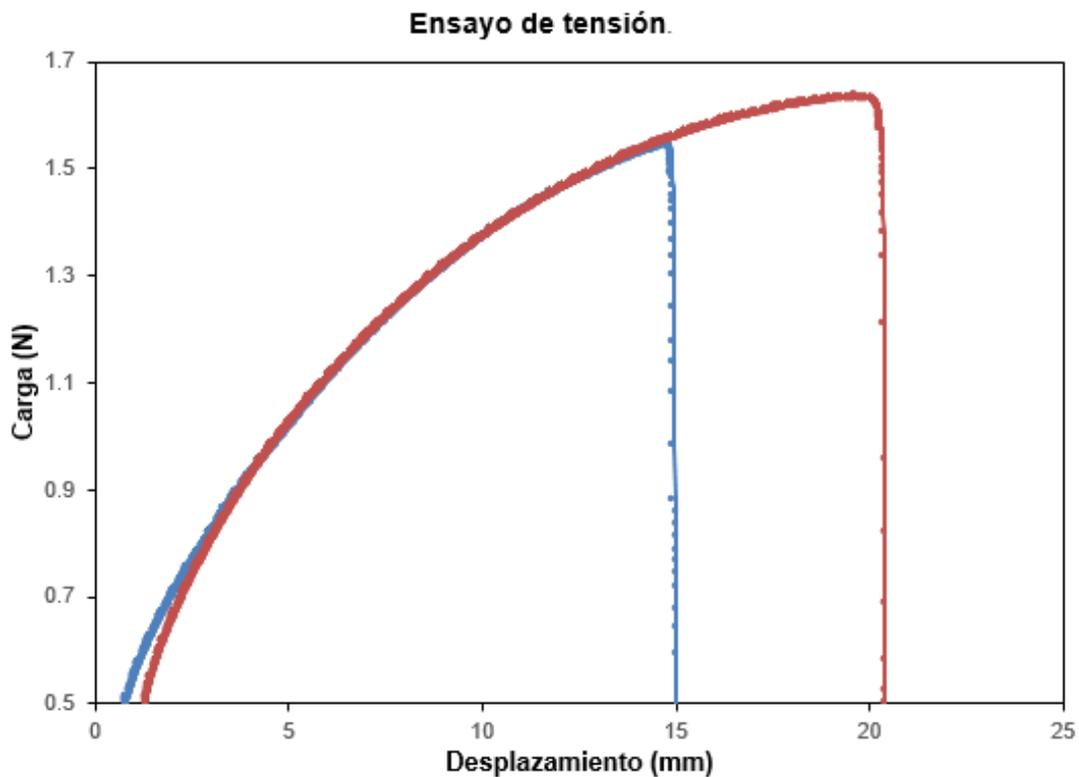


Figura 26. Curvas obtenidas en la gráfica esfuerzo-deformación de las probetas sometidas al ensayo de tensión.

A continuación, se presentan los esfuerzos reales de la unión mediante la siguiente ecuación;

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde:

Capítulo 6. Resultados y análisis.

σ = Esfuerzo

F = Fuerza

A = Área

El valor de la fuerza corresponde a la carga aplicada a la probeta el cuál es variable durante el ensayo, estos valores fueron tomados del software del equipo, mientras el área tiene un valor constante de 15.70 mm² sustituyendo dichos valores en la ecuación 9 se obtuvo la siguiente grafica de esfuerzo-deformación (Figura 27);

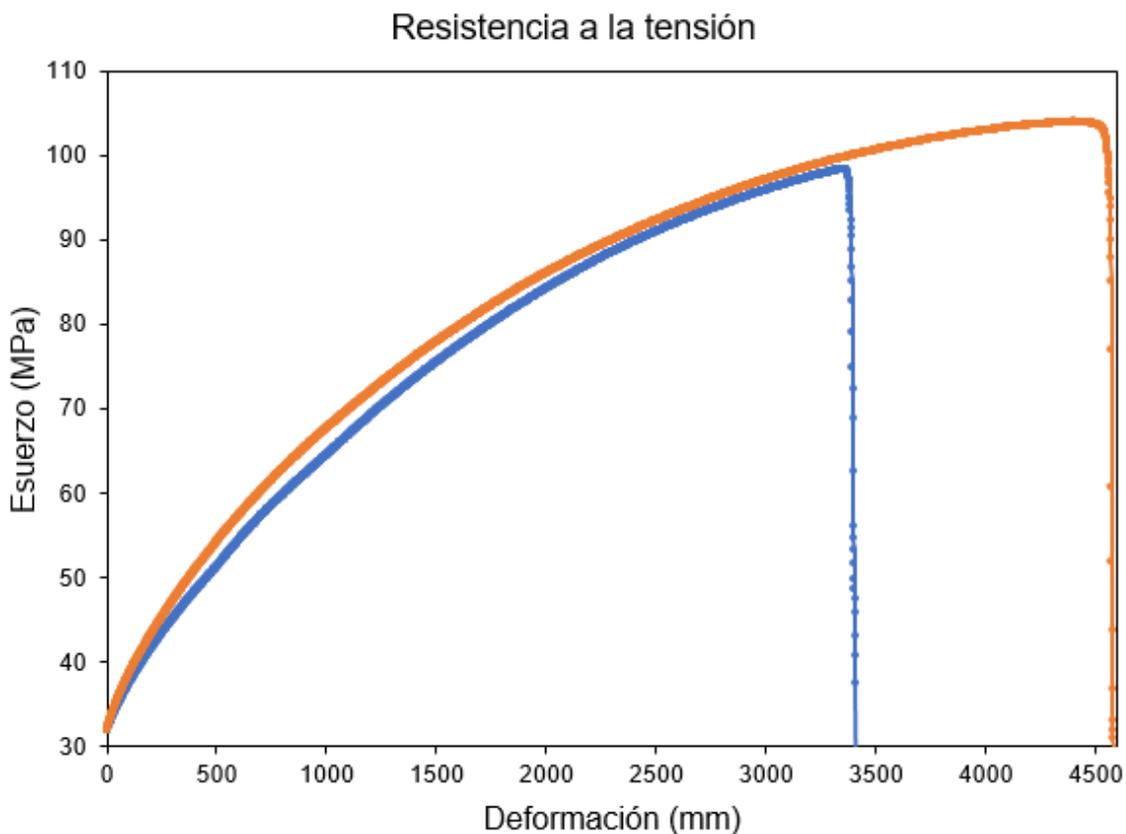


Figura 27. Esfuerzos reales ensayos de tensión.

En el eje de las y encontramos el esfuerzo expresado en MPa, mientras en el eje de las x, tenemos la deformación expresada en mm, la línea azul representa la probeta número 1 y tiene un valor de 95 MPa, la línea roja representa la probeta número 2 y tiene un valor de 105 MPa. A simple vista podemos observar que la gráfica presenta el mismo comportamiento de la gráfica presentada en la figura 26.

De acuerdo a lo observado en ambas gráficas se tiene que el comportamiento para ambos casos es muy similar, que caracteriza a un material dúctil el cual al inicio se tiene una alta deformación elástica, seguida de la deformación plástica y posteriormente la falla, tal y como era de esperarse la falla ocurre en un sitio diferente a la soldadura, de acuerdo a Mike Groover [1] el efecto sobre las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor es negativo y con frecuencia es en esta región donde ocurren fallas, tal como se observa en la figura 25.

6.5.3 Resistencia a la flexión.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del ensayo de flexión por triplicado realizado en la máquina de ensayos universales ETM – 100KN bajo la GBT 1452-93, el objetivo del ensayo de flexión es determinar algunas de las propiedades y el comportamiento del material más cercano a la superficie de la probeta, para este caso particular, evaluar la resistencia al corte de la soldadura. La figura 28 muestra las probetas después de ser sometidas al ensayo de flexión, Podemos observar que la probeta marcada con el inciso a) presenta una grieta de tamaño considerable justo por debajo de la zona de la unión, mientras las probetas marcadas por el inciso b) y c), a pesar de haber llegado a su punto máximo de flexión no presentaron grietas ni fracturas.

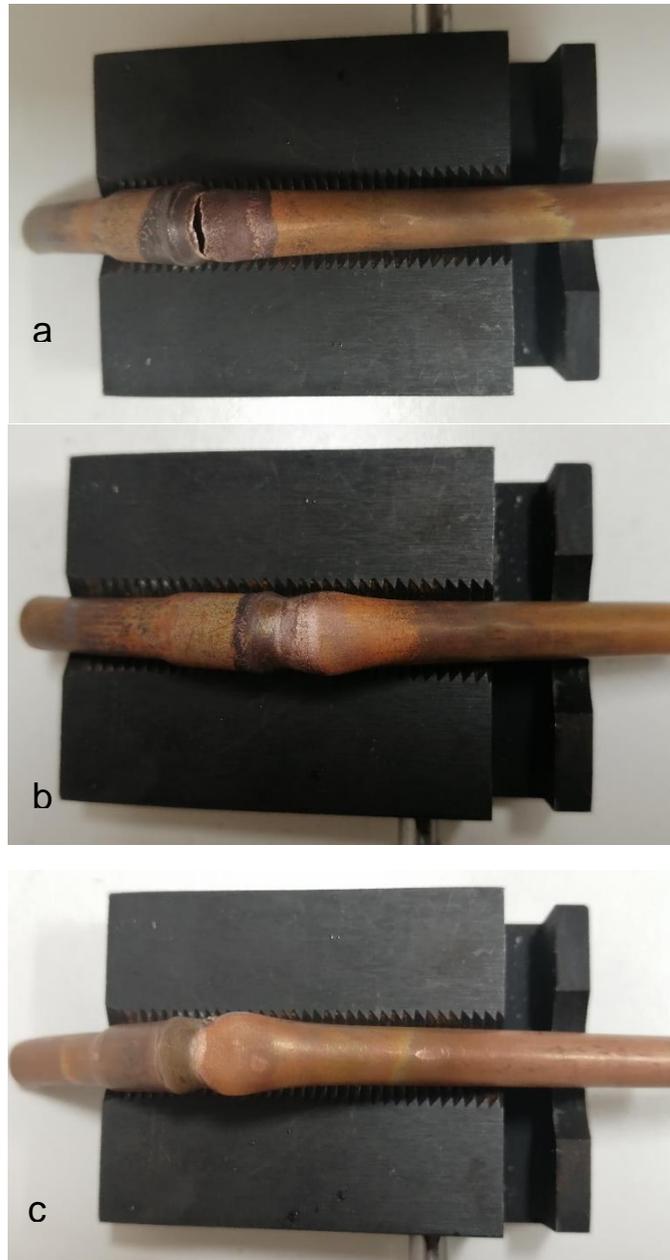


Figura 28. Estado final de las probetas después de ser sometidas al ensayo de flexión. a) Probeta 1, b) Probeta 2, Probeta 3.

Capítulo 6. Resultados y análisis.

En la figura 29 tenemos el comportamiento por triplicado de las probetas durante el ensayo de flexión, en el eje de las y encontramos la carga expresada en N y en el eje de las x el desplazamiento expresando en mm, la línea azul corresponde a la probeta número 1, con un valor de 0.310 N, la línea morada a la probeta número 3 con un valor de 0.220 N y por último la línea verde a la probeta número 2 con un valor de 0.301 N.

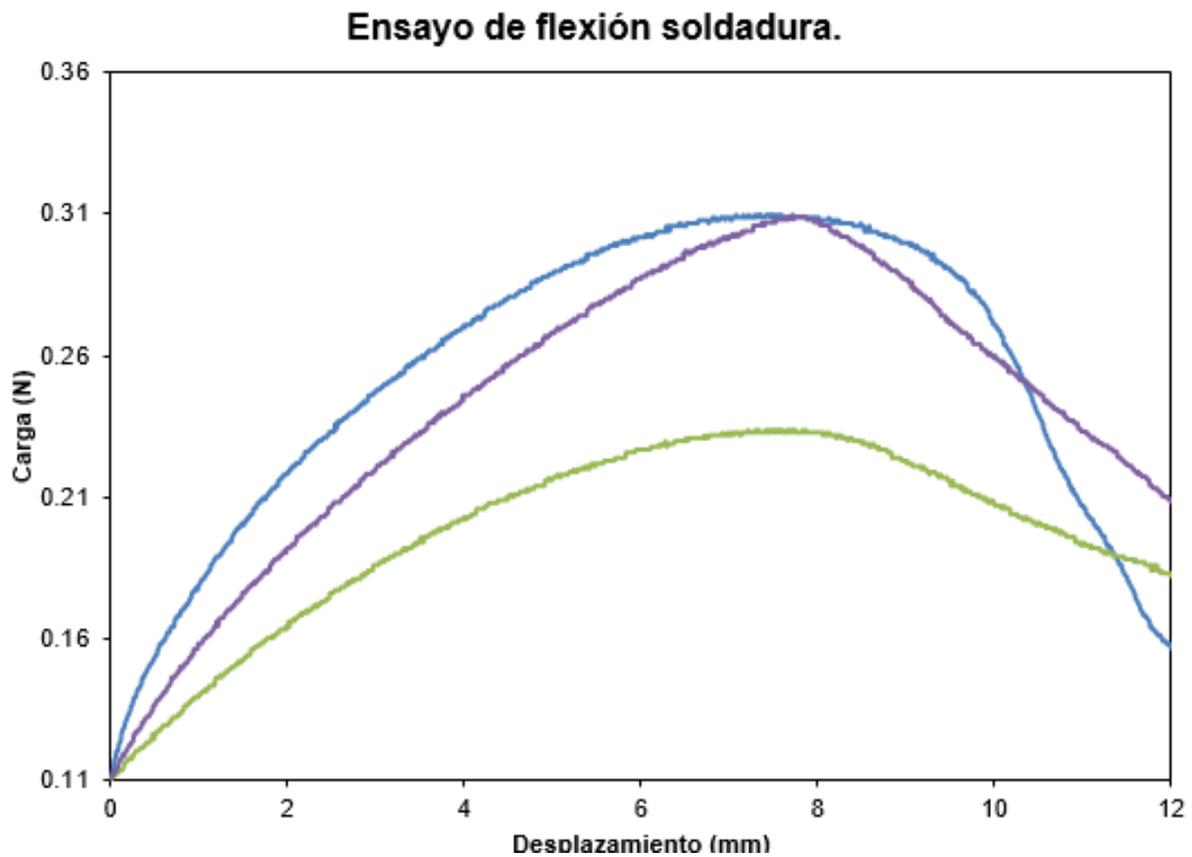


Figura 29. Curvas obtenidas de la gráfica esfuerzo-deformación de las probetas sometidas al ensayo de flexión.

A continuación, se presentan los esfuerzos reales dados por la siguiente ecuación;

$$S = \frac{3PL}{2bd^2} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde;

Capítulo 6. Resultados y análisis.

S = Resistencia

P = Carga

L = Distancia entre los puntos.

b = Espesor

d = Diámetro

El valor de la carga es variable durante el ensayo, este valor se obtuvo de los datos arrojados por el software del equipo, La distancia entre los puntos, el espesor y el diámetro son constantes y corresponden a los siguientes valores; L = 50 mm, b = 1 mm, d = 6² respectivamente. La figura 30 nos muestra la resistencia a la tensión de la unión en el eje de las y tenemos la resistencia expresada en MPa, en el eje de las x observamos la deformación expresada en mm, la línea azul corresponde a la probeta número 1, con un valor de 700 MPa, la línea gris a la probeta número 3 con un valor de 690 MPa y por último la línea amarilla a la probeta número 2 con un valor de 500 MPa.

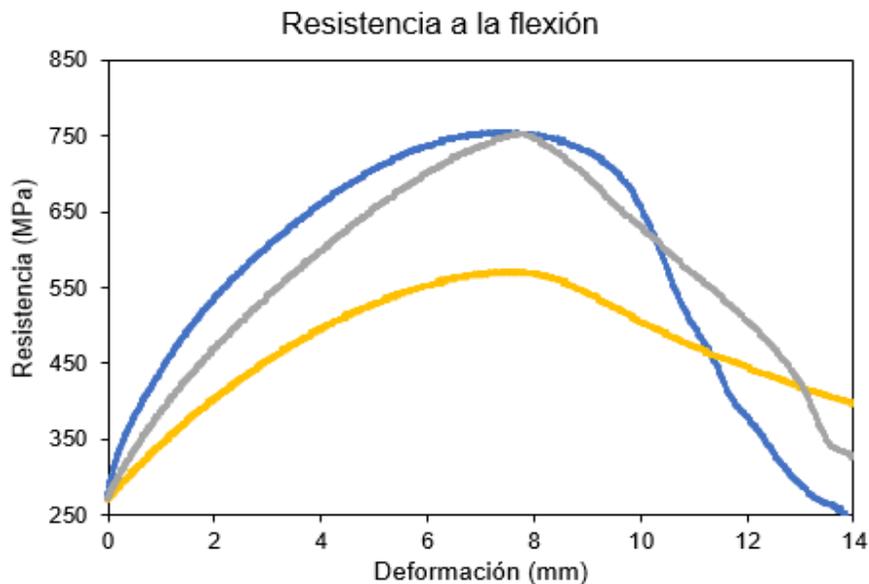


Figura 30. Resistencia real de las probetas en el ensayo de tensión.

6.6 Microscopia óptica del tipo de fractura.

La falla originada por una fractura es uno de los problemas principales entre los materiales metálicos. Una fractura se puede definir como la separación de un sólido que es sometido a un esfuerzo en dos o más partes. Para nuestro caso particular se evaluó la fractura de la probeta por microscopia óptica después de ser sometida al ensayo de tensión.

Se obtuvo una fractura dúctil la cual ocurrió después de que la probeta fuera sometida a una deformación plástica excesiva. La carga máxima y la carga de fractura no es la misma, esto se debe a que el material se deforma plásticamente alcanza su carga máxima y después empieza a ceder hasta el punto de fracturarse. En la figura 31 se observa la fractura de la probeta y la vista microscópica del borde de la probeta donde sucedió la fractura.

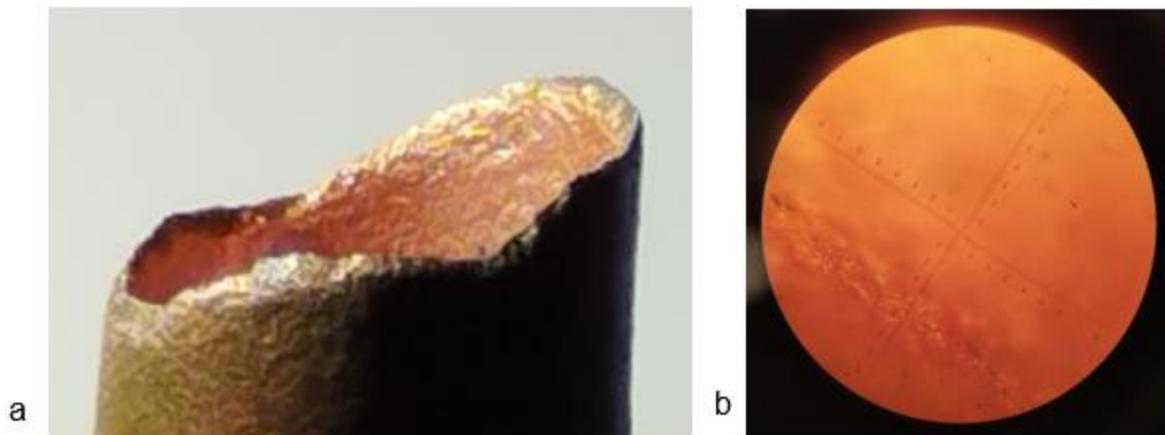


Figura 31. a) Fractura de la probeta. b) vista microscópica del borde de la probeta donde se presentó la fractura.

Capítulo 7

Conclusiones.

- Se realizaron 2 análisis termodinámicos, en el primero se evaluó la aleación (Cu 92% - Ag 8%) con la finalidad de predecir los posibles productos de reacción durante el proceso de soldadura a condiciones de temperatura y atmosfera de trabajo donde se identificó la formación de un óxido de cobre Cu₂O el óxido de cobre tiene una estructura cubica (estructura de cuprita), con parámetro de red $a = 4.27 \text{ \AA}$ y una distancia interplanar de 1.84Å. El producto resultante es 90.128 grs CuO (Tenorita) y 8.59 grs Ag₂O con un $\Delta G = -1.56796 \times 10^5 \text{ J/mol}$, El cambio de energía libre muestra que la reacción es espontanea por lo tanto puede llevarse a cabo. En el segundo análisis se evaluó la soldadura de los tubos de cobre, se consideró los productos previamente formados durante la simulación de la aleación Ag-Cu y cobre grado electrolítico (99.99%Cu) bajo las mismas condiciones de trabajo donde no fue posible observar algún cambio significativo en la formación de un nuevo compuesto o del cambio hacia una nueva estructura, las únicas transiciones ocurren a las temperaturas de fusión 1084°C para el cobre el cual pasa del estado líquido al estado sólido y a los 960°C transformación de fase de la plata de líquido a sólido mostrando un cambio en la energía de Gibbs de -1.23215×10^6 y de -1.18870×10^6 respectivamente.
- La caracterización micro-estructural de la unión realizada mediante microscopia óptica se determinó la forma y tamaño de grano, así como la influencia en la resistencia mecánica de la unión, donde se observó que la forma y tamaño de grano del cobre es característico de un material que posee muy buena ductilidad y maleabilidad, resultando en un material blando (50 en la escala de Vickers) y una resistencia a la tracción de 50 MPa, además el cobre presenta una alta conductividad eléctrica lo cual no lo hace muy compatible con todos los materiales aislantes modernos, además de presentar muy buena resistencia a la corrosión.

- Los perfiles de rugosidad obtenidos de las 3 diferentes zonas de la probeta evaluadas; Zona de la unión, Zona afectada térmicamente (ZAT) y la zona correspondiente al metal base, presentan diferencias significativas. La zona de la unión donde encontramos la aleación (Cu 92% - Ag 8%) presentó un nivel considerable de rugosidad, el valor de $R_a = 3.66014 \mu m$, según la escala de rugosidad de la norma DIN 4769 se encuentra en el N8 de grado de rugosidad, esto se debe al proceso de soldadura al que fue sometido, dejando una superficie con irregularidades considerados como errores micro geométricos. La zona afectada térmicamente corresponde al material de la probeta que fue afectado por el calor durante el proceso de soldadura causando daños a niveles metalúrgicos, el valor de $R_a = 0.9144 \mu m$, N6 de grado de rugosidad que comparándolo con el valor obtenido del metal base, $R_a = 0.68834 \mu m$, N5 de grado de rugosidad, no sufrió daños considerables en la superficie, presentando errores macro geométricos los cuales dependen de la forma o textura del material.
- Los perfiles de dureza en la escala Rockwell se obtuvieron siguiendo la misma división por zonas de la probeta que se utilizó para obtener los perfiles de rugosidad; zona de la unión, zona afectada térmicamente (ZAT), y la zona correspondiente al metal base. Estos perfiles se hicieron por duplicado, realizando 3 mediciones por zona, para después obtener la desviación estándar, obteniendo los siguientes valores; Probeta 1 (Zona 1 = 1.81, Zona 2 = 0.77, Zona 3 = 1.02), Probeta 2 (Zona 1 = 1.29, Zona 2 = 1.36, Zona 3 = 4.19). En la zona 1 correspondiente a la zona de la unión tiene una dureza aceptable, la resistencia del material aumento gracias al material de aporte (Cu 92% - Ag 8%). La zona afectada térmicamente presenta afectaciones metalúrgicas como la nitruración la cual puede aumentar la dureza del metal, haciéndolo más frágil y, por el contrario, un sobrecalentamiento que provoca debilitamiento en el material. El metal base (99.99% Cu) es frágil y tiene poca resistencia, es considerado como metal blando, la medición de la dureza

Capítulo 7. Conclusiones y trabajo a futuro.

coincide con las especificaciones del material, teniendo un valor de dureza = 60 en la escala rockwell.

- El ensayo destructivo para determinar la resistencia a la tensión de la soldadura cobre a cobre se realizó sometiendo las probetas a ensayos de tensión por duplicado en la máquina de ensayos universales, en ambos ensayos la probeta llegó a su deformación plástica presentando la fractura en la zona afectada térmicamente por debajo de la zona de la unión, como se esperaba la soldadura soportó los esfuerzos de tensión llegando a esfuerzos máximos de 95 MPa y 105 MPa respectivamente. La unión es resistente y el proceso de soldadura utilizado es confiable para estos materiales.
- El ensayo destructivo para determinar la resistencia de corte de la soldadura cobre a cobre se realizó sometiendo a ensayos de flexión por triplicado en la máquina de ensayos universales, de las 3 probetas solo 1 presentó un agrietamiento en la zona de la unión esto se debe a la fragilización del material, consecuencia del calor durante el proceso de soldadura que provocó cambios metalúrgicos al material ocasionando el debilitamiento del mismo, en los otros dos casos las probetas no presentaron grietas durante el ensayo, la unión es resistente a los esfuerzos de flexión, los esfuerzos máximos antes de que el material cediera fueron; 500 MPa, 690 MPa y 700 MPa respectivamente.
- El análisis realizado mediante la microscopía óptica del tipo de fractura se determinó que el material presentó una fractura dúctil la cual ocurrió después de que la probeta fuera sometida a una deformación plástica excesiva. La carga máxima y la carga de fractura no es la misma, esto se debe a que el material se deforma plásticamente alcanza su carga máxima y después empieza a ceder hasta el punto de fracturarse.

Referencias bibliográficas

- [1] M. P. Groover, *Fundamentos de Manufactura moderna*, Tercera Ed. Ciudad de México: Mc Graw Hill Interamericana, 2007.
- [2] H. Rodríguez-Galbarro, “Soldadura Fuerte y Blanda.” <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn49.html> (accessed Oct. 11, 2022).
- [3] Permanet Steel Manufacturing PMC, “Método de soldadura de alta frecuencia y sus ventajas y desventajas,” Nov. 30, 2020. <https://www.permanentsteel.com/es/m/newsshow/high-frequency-welding-method-and-its-advantages-and-disadvantages.html> (accessed Aug. 24, 2022).
- [4] Rps sonic, “Parámetros de soldadura ultrasónica ,” Jul. 29, 2019. <https://es.rps-sonic.com/Cómo-elegir-los-parámetros-de-soldadura-ultrasónica-id3967474.html> (accessed Oct. 11, 2022).
- [5] A. Salvador, N. Mtz, and S. L. Potos, “Estudio Del Feómeno De Mojado De Una Gota De Líquido En Superficies Poliméricas Estructuradas,” *Univ. Autónoma San Luis Potosí Fac. ciencias*, pp. 1–111, 2019.
- [6] Dianelys Ondarse Álvarez, “Cobre - Propiedades, usos y aplicaciones,” *Cobre*, Jun. 15, 2021. <https://concepto.de/cobre/> (accessed Jul. 28, 2022).
- [7] Lenntech B.V., “Cobre (Cu).,” 2021. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm> (accessed Jul. 28, 2022).
- [8] Lenntech B.V, “Plata (Ag) ,” 2022. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ag.htm> (accessed Jul. 28, 2022).
- [9] Lenntech B.V, “Plata (Ag) ,” 2022. .
- [10] Codelco Educa, “Aleaciones del cobre ,” 2018. <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/aleaciones.html> (accessed Jul. 28, 2022).
- [11] Codelco Educa, “Aleaciones del cobre ,” 2018. .
- [12] S. Length *et al.*, “Machine Translated by Google SURFACE ROUGHNESS TERMINOLOGY AND PARAMETERS heights over the evaluation length R_t , R_{ti} , R_z , R_z (DIN) , R_{max} R_z (ISO) R_{3z} Machine Translated by Google SURFACE ROUGHNESS TERMINOLOGY AND PARAMETERS tp R_k , R_{pk} , R_{vk} , $Mr1$.”
- [13] H. Taylor, “Procesos de Fabricación: Rugosidad superficial,” *Man. del Rugosímetro Surtronic 3 Plus*, pp. 1–16, 2015, [Online]. Available:

Referencias bibliográficas.

- <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>.
- [14] Quimica.es, “Dureza Rockwell,” Sep. 25, 2021. https://www.quimica.es/enciclopedia/Dureza_Rockwell.html#Escalas_de_dureza_Rockwell (accessed Sep. 25, 2022).
- [15] F. Tomiyasu and K. Takahashi, “Ultrasonic Welding,” *J. Japan Weld. Soc.*, vol. 32, no. 4, pp. 361–367, 1963, doi: 10.2207/qjws1943.32.361.
- [16] S. D. Kore *et al.*, “Application of electromagnetic impact technique for welding copper-to-stainless steel sheets,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 54, no. 9–12, pp. 949–955, 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2981-z.
- [17] J. Yang, B. Cao, and Q. Lu, “The effect of welding energy on the microstructural and mechanical properties of ultrasonic-welded copper joints,” *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 2, 2017, doi: 10.3390/ma10020193.
- [18] J. Yan *et al.*, “Effect of yttrium on the oxide scale adherence of pre-oxidized silicon-containing heat-resistant alloy,” *Corros. Sci.*, vol. 53, no. 11, pp. 3588–3595, 2011, doi: 10.1016/j.corsci.2011.07.002.
- [19] Y. Han and E. L. Yu, “Numerical analysis of a high-frequency induction welded pipe,” *Weld. J.*, vol. 91, no. 10, pp. 270–277, 2012.
- [20] Y. Zamrodah, “~~濟無~~No Title No Title No Title,” vol. 15, no. 2, pp. 1–23, 2016.
- [21] I. avanzadas Talentum, “SOLIDWORKS,” Jan. 20, 2020. <https://talentumdigital.cl/2020/01/20/por-que-elegir-solidworks/> (accessed Apr. 14, 2022).
- [22] ASTM, “Astm: E18-11,” *ASTM Int.*, 2021, doi: 10.1520/E0018-15.2.
- [23] ISO, “International Standard International Standard,” *61010-1 © Iec2001*, vol. 2014, p. 13, 2014.
- [24] C. E. Cruz-González, J. D. Mosquera-Artamonov, S. D. Santillán, and H. Gámez-Cuatzin, “Influence of the roughening method, joint configuration and adhesive thickness on the shear strength of ferritic stainless steel surfaces joined by methyl methacrylate,” *Rev. Metal.*, vol. 54, no. 2, 2018, doi: 10.3989/revmetalm.120.
- [25] C. W. Bale *et al.*, “FactSage thermochemical software and databases - recent developments,” *Calphad Comput. Coupling Phase Diagrams Thermochem.*, vol. 33, no. 2, pp. 295–311, 2009.
- [26] I. S. Brandt, M. A. Tumelero, S. Pelegrini, G. Zangari, and A. A. Pasa, “Electrodeposition of Cu₂O: growth, properties, and applications,” *J. Solid State Electrochem.*, vol. 21, no. 7, pp. 1999–2020, 2017, doi: 10.1007/s10008-017-3660-x.

Anexos.

Anexos.