



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA SOLDABILIDAD BAJO LA NORMA AWS C3.6M DE TUBERIAS DE ALUMINIO Y COBRE CON SOLDADURA INDIRECTA DE METALES POR HORNO (FB) USADO EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN**

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

**ORDOÑEZ MENDOZA MARLON PATRICIO**

**marlon.ordonez@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: ING. DIEGO MARCELO ESPINOSA CHAUVÍN**

**diego.espinosa@epn.edu.ec**

**Quito, agosto, 2021**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **MARLON PATRICIO ORDOÑEZ MENDOZA**, bajo mi supervisión.

---

Ing. Diego Espinosa

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

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

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



---

Ordoñez Mendoza Marlon Patricio

## **DEDICATORIA**

*A Dios por concederme Vida y Salud en estos tiempos difíciles que atraviesa el mundo entero.*

*A mi querido Abuelito Gilberto Mendoza que Dios lo tenga en su Santa Gloria, dedico este logro importante en mi vida, por haberme brindarme su cariño y amor incondicional, siempre te recordaré como la gran persona que fuiste, y desde el cielo sé que me cuida a mí y a toda la familia.*

*De igual manera a mi querido Abuelito Rosalino Ordoñez, por brindarme su afecto y cariño.*

*El presente trabajo de titulación dedico a mis padres, que gracias a su apoyo y perseverancia que me han inculcado valores para ser mejor persona, y por apoyarme en este largo camino.*

**Marlon**

## **AGRADECIMIENTO**

*Primeramente, agradezco a Dios por brindarme la salud y fuerza de vivir cada día, para cumplir con las metas que uno se ha propuesto en la vida.*

*A mis padres Eduardo y Gema por brindarme su apoyo incondicional, sus consejos a lo largo de mi vida.*

*Al ingeniero Diego Espinosa por brindarme la oportunidad de realizar el presente trabajo de titulación bajo su dirección, por su tiempo, dedicación al proyecto, también al Ingeniero Gabriel Velasteguí por compartir sus conocimientos en el presente trabajo y poder desarrollar el trabajo de titulación.*

*A la Escuela Politécnica Nacional por brindarme la oportunidad de pasar por sus aulas, especialmente a la Facultad de Ingeniería Mecánica por brindarme una formación integral para ser un buen profesional.*

*A mi amigo Mario Gómez por su desinteresada cooperación en el inicio del proyecto de titulación.*

*A Don Manuel, al Ingeniero Santiago Camacho por su desinteresada colaboración en el presente proyecto siempre con la mayor cordialidad para bríndame su ayuda en la parte práctica del proyecto de investigación.*

**Marlon**

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo general .....	2
Objetivos específicos .....	2
1.    MARCO TEÓRICO .....	3
1.1.    Generalidades del aluminio .....	3
1.2    Propiedades del aluminio .....	3
1.2.1    Aleaciones del aluminio .....	4
1.2.2    Elementos aleantes del Aluminio .....	4
1.2.2.1    Serie 1000 .....	6
1.2.2.2    Serie 2000 .....	6
1.2.2.3    Serie 3000 .....	6
1.2.2.4    Serie 4000 .....	6
1.2.2.5    Serie 5000 .....	6
1.2.2.6    Serie 6000 .....	7
1.2.2.7    Serie 7000 .....	7
1.2.2.8    Serie 8000 .....	7
1.3    Generalidades del Cobre .....	7
1.3.1    Propiedades del Cobre .....	7
1.3.2    Aleaciones de Cobre .....	8
1.3.2.1    Cobre débilmente aleado .....	10
1.3.2.2    Cobre de alta aleación .....	10
1.3.2.3    Latones .....	10
1.3.2.4    Bronces .....	10
1.3.2.5    Cuproaluminio .....	11
1.3.2.6    Cuproníqueles .....	11
1.3.2.7    Alpacas .....	11
1.3.2.8    Otras aleaciones de cobre .....	11
1.4    Tubería utilizada en Sistemas de Refrigeración .....	12
1.5    Soldadura Indirecta de Metales .....	12
1.5.1    Definición de soldadura indirecta o soldadura fuerte .....	12
1.5.2    Principios de la soldadura indirecta .....	13
1.5.2.1    Capilaridad .....	13
1.5.2.2    Mojabilidad y adhesión .....	14

1.5.2.3	Difusión Molecular .....	15
1.5.3	Ventajas y desventajas del proceso de soldadura indirecta .....	15
1.5.3.1	Ventajas de la soldadura indirecta .....	15
1.5.3.2	Desventajas de la soldadura indirecta .....	16
1.5.4	Tipos de juntas para soldadura indirecta.....	17
1.5.4.1	Junta a tope .....	17
1.5.4.2	Junta a traslape o solape .....	18
1.5.5	Rango de temperatura de trabajo de soldadura indirecta .....	18
1.5.6	Selección del material de aporte .....	19
1.5.6.1	Grupos de metales de aporte para soldar cobre y sus aleaciones.....	20
1.5.6.1.1	Grupo BAg .....	20
1.5.6.1.2	Grupo RBCuZn .....	21
1.5.6.1.3	Grupo BCuP .....	22
1.5.6.2	Grupos de metales de aporte para soldar aluminio y sus aleaciones .....	22
1.5.6.2.1	Grupo BAISi.....	22
1.5.7	Selección del fundente .....	23
1.5.8	Separación de la junta .....	27
1.5.9	Clasificación de los procesos de soldadura indirecta (fuerte) de acuerdo al sistema de calentamiento. ....	28
1.5.9.1	Soldadura fuerte por soplete o antorcha (TB) .....	29
1.5.9.2	Soldadura fuerte por horno (FB).....	30
1.5.9.2.1	Descripción del proceso de soldadura fuerte por horno. ....	32
1.5.9.2.2	Clasificación de los procesos de soldadura indirecta por horno .....	32
1.5.9.2.3	Por la forma de producción .....	33
1.5.9.2.3.1	Horno continuo.....	33
1.5.9.2.3.2	Horno discontinuo o por lotes .....	33
1.5.9.2.4	Por la atmósfera protectora .....	33
1.5.9.2.4.1	Horno de atmósfera protectora.....	33
1.5.9.2.4.2	Horno de vacío.....	34
1.5.9.2.4.3	Horno al aire .....	34
1.5.9.3	Tipos de hornos en soldadura fuerte.....	34
1.5.9.3.1	Horno discontinuo o por lotes .....	35
1.5.9.3.2	Horno continuo .....	36
1.5.9.3.2.1	Horno continuo de banda transportadora de cinta metálica.....	37
1.5.9.3.2.2	Horno continuo con sistema de rodillos refractarios.....	37
1.5.9.3.3	Horno de retorta.....	37

1.5.9.3.4	Horno de vacío .....	38
1.5.9.3.4.1	Horno de vacío de pared fría .....	38
1.5.9.3.5	Ventajas y limitaciones del proceso de soldadura indirecta por horno .....	39
1.5.9.3.6	Aplicaciones del proceso de soldadura fuerte por horno .....	40
1.5.9.4	Soldadura fuerte por inducción (IB).....	41
1.5.9.5	Soldadura fuerte por resistencia (RB).....	42
1.5.9.6	Soldadura fuerte por inmersión (DB).....	44
1.5.9.7	Soldadura fuerte por infrarrojo (IRB).....	46
1.5.9.8	Soldadura fuerte por difusión (DFB) .....	47
1.5.9.9	Otros procesos de soldadura fuerte .....	48
1.5.9.9.1	Soldadura fuerte exotérmica (EXB).....	48
1.5.9.9.2	Soldadura fuerte por haz de electrones (EBB) .....	49
1.5.9.9.3	Soldadura fuerte por rayo láser (LBBW) .....	50
2.	METODOLOGÍA.....	52
2.1	Obtención del material base .....	52
2.2	Caracterización del material base.....	53
2.2.1	Descripción del ensayo de espectrometría .....	54
2.3	Soldabilidad .....	54
2.3.1	Soldabilidad Operativa .....	55
2.3.2	Soldabilidad Metalúrgica .....	55
2.3.3	Soldabilidad Constructiva .....	55
2.3.4	Aspectos que influyen en la soldabilidad.....	55
2.3.5	Soldabilidad del Aluminio .....	55
2.3.6	Soldabilidad del Cobre .....	56
2.4	Material de aporte .....	56
2.4.1	Sil-Fos 15.....	57
2.4.2	Al 822.....	58
2.4.3	Cantidad de material de aporte empleado .....	59
2.5	Fundente .....	61
2.6	Diseño de las juntas de unión para las probetas soldadas.....	61
2.7	Procedimiento de la soldadura indirecta.....	61
2.7.1	Limpieza previa y preparación de las superficies.....	62
2.7.2	Empleo del fundente en las partes .....	62
2.7.3	Ensamblado de las piezas o el conjunto .....	62
2.7.4	Colocación del metal de aporte .....	63
2.7.5	Limpieza post soldeo de las juntas .....	63



2.8	Discontinuidades comunes que se presentan en una junta soldada por soldadura indirecta .....	63
2.8.1	Porosidad y falta de llenado del metal de aporte .....	63
2.8.2	Atrapamiento de fundente .....	64
2.8.3	Filete discontinuo .....	64
2.8.4	Agrietamiento.....	64
2.8.5	Apariencia superficial deficiente .....	64
2.8.6	Erosión del metal base .....	65
2.9	Inspección y pruebas en un proceso de soldadura indirecta .....	65
2.10	Variables esenciales de la soldadura indirecta por horno según el código ASME Sección IX parte QB .....	66
2.11	Ensayos realizados para el proceso de calificación del proceso. ....	67
2.11.1	Ensayo de tracción.....	68
2.11.1.1	Procedimiento y probetas de prueba .....	68
2.11.1.2	Criterios de aceptación del ensayo de tracción .....	68
2.11.2	Ensayo de pelado.....	69
2.11.2.1	Procedimiento y probetas de prueba .....	69
2.11.2.2	Criterios de aceptación del ensayo de pelado .....	69
2.11.3	Análisis metalográfico.....	70
2.11.3.1	Macrografías.....	72
2.11.3.2	Micrografías.....	72
2.12	Análisis de costos de la soldadura indirecta por horno .....	72
2.13	Procedimiento Experimental .....	76
2.14	Determinación de la longitud adecuada de traslape teórica para juntas tubulares [Al-Cu]. ....	76
2.15	Preparación de las juntas .....	77
2.15.1	Corte las tuberías.....	77
2.15.2	Eliminación de rebabas.....	77
2.15.3	Limpieza de las superficies a soldar .....	77
2.15.4	Aplicación del fundente.....	78
2.15.5	Colocación del material de aporte.....	78
2.15.6	Introducción de las probetas en el horno .....	79
2.15.7	Enfriamiento y post limpieza .....	79
2.16	Procedimiento para la realización de la soldadura indirecta por horno. ....	80
2.16.1	Proceso experimental inicial.....	80
2.16.2	Proceso experimental optimizado .....	82
2.16.3	Equipo utilizado para la soldadura indirecta por horno.....	85

2.16.4	Especificación del procedimiento de soldadura fuerte (BPS) .....	86
2.16.5	Registro de calificación del procedimiento (PQR).....	86
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	87
3.1.	Resultado de la composición química de los materiales base. ....	87
3.2.	Ensayo de tracción realizado a las probetas soldadas. ....	88
3.2.1.	Resultados del ensayo de pelado .....	90
	(Fuente: Propia) .....	91
3.2.2.	Resultados del análisis metalográfico.....	91
3.2.3.	Resultado de las macrografías de las probetas soldadas.....	95
3.2.4.	Resultados y análisis del ensayo de microdureza. ....	96
3.3.	Discusión e interpretación de los resultados.....	97
3.3.1.	Análisis de caracterización de los materiales base .....	97
3.3.2.	Análisis del ensayo de tracción .....	98
3.3.3.	Análisis del ensayo de pelado.....	99
3.3.4.	Análisis de las metalográfico .....	99
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	101
4.1.	Conclusiones.....	101
4.2.	Recomendaciones .....	101
	Referencias Bibliográficas .....	103
	ANEXOS .....	106

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema del proceso de soldadura indirecta. ....	13
Figura 1.2 Efecto de la capilaridad en una junta soldada por soldadura indirecta. ....	14
Figura 1.3 Concepto de mojabilidad. ....	15
Figura 1.4 Incidencia del ángulo de contacto de mojado de un metal de aporte en soldadura indirecta. ....	15
Figura 1.5 Tipos de juntas para soldadura indirecta para elementos planos y tubulares. ....	17
Figura 1.6 Diseño de juntas a tope de elementos planos y tubulares. ....	17
Figura 1.7 Diseño de juntas a traslape de elementos planos y tubulares. ....	18
Figura 1.8 Rango de temperatura de trabajo del material de aporte de soldadura indirecta. ....	19
Figura 1.9 Rango típicos de temperatura de soldadura fuerte para varios metales de aporte. ....	20
Figura 1.10 Influencia de la holgura de la junta soldada sobre la resistencia mecánica. ....	27
Figura 1.11 Soldadura fuerte por antorcha de una tubería de cobre. ....	29
Figura 1.12 Descripción del proceso de soldadura fuerte por horno. ....	31
Figura 1.13 Tipos de hornos del proceso de soldadura fuerte. ....	35
Figura 1.14 Ejemplos de hornos discontinuos. ....	36
Figura 1.15 Horno continuo de cinta transportadora. ....	37
Figura 1.16 Horno de retorta para soldadura fuerte de aluminio. ....	38
Figura 1.17 Horno de vacío. ....	39
Figura 1.18 Proceso de soldadura fuerte por inducción, ideal para pequeñas piezas. ....	41
Figura 1.19 Esquemas de diseños básicos de bobinas de inducción para soldar tubería de cobre. ....	42
Figura 1.20 Soldadura fuerte por resistencia de un elemento de un estator. ....	43
Figura 1.21 Proceso de soldadura por inmersión por el método de sal fundida. ....	45
Figura 1.22 Secuencia de la soldadura fuerte por difusión. ....	47
Figura 2.1 Metales base de aluminio y cobre. ....	52
Figura 2.2 Equipo de espectrometría Bruker Q2 ION. ....	54
Figura 2.3 Diseño de una junta soldada (tubería-accesorio) y junta a traslape. ....	59
Figura 2.4 Anillo interior para el diseño de las juntas soldadas. ....	60
Figura 2.5 Pobretas para el ensayo de tracción de tuberías de diámetro pequeño para juntas de traslape y a tope. ....	68
Figura 2.6 Espécimen para el ensayo de pelado. ....	69
Figura 2.7 Obtención de muestra metalográfica. ....	70
Figura 2.8 Pulido de probetas. ....	71
Figura 2.9 De izquierda a derecha microscopio para micrografía y macrografía respectivamente. ....	72
Figura 2.10 Esquema de las probetas de Aluminio-Cobre con diseño de junta a traslape. ....	77
Figura 2.11 Probetas de cobre con las superficies listas para soldar. ....	78
Figura 2.12 Preforma en forma de anillos de los materiales de aporte para soldar Al y Cu. ....	79
Figura 2.13 Pobretas de aluminio introducidas en el horno mufla. ....	79
Figura 2.14 Probetas soldada con el proceso experimental. ....	82
Figura 2.15 Probetas soldadas en un tiempo de 6 y 2 minutos. ....	83
Figura 2.16 Probetas soldadas en un tiempo de 4 a 6 [min]. ....	84
Figura 2.17 Horno Mufla usado para efectuar el proceso de soldadura. ....	85
Figura 3.1 Resultado del ensayo de tracción de las probetas Cu-Cu. ....	88
Figura 3.2 Resultado del ensayo de tracción de las probetas Al-Cu. ....	90
Figura 3.3 Resultado del ensayo de tracción de las probetas Al-Al. ....	90

Figura 3.9 Comportamiento de las Microdurezas en las juntas soldadas.....97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades Físicas del aluminio .....	3
Tabla 1.2 Propiedades físicas del cobre.....	8
Tabla 1.3 Influencia de elementos aleantes sobre el cobre. ....	8
Tabla 1.4 Denominación de las aleaciones de cobre según la UNS. ....	9
Tabla 1.5 Composición química de metales de aporte de base plata.....	21
Tabla 1.6 Composición química de metales de aporte de Cobre-Zinc.....	22
Tabla 1.7 Composición química de metales de aporte de cobre fosfórico. ....	22
Tabla 1.8 Composición química de metales de aporte de base aluminio-silicio.....	23
Tabla 1.9 Clasificación de fundentes con su respectivo metal de aporte para soldadura fuerte. .....	25
Tabla 1.10 Fundentes para soldadura fuerte para soldad cobre y aluminio. ....	26
Tabla 1.11 Holgura recomendada para uniones a la temperatura de soldadura fuerte.....	28
Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de las tuberías de cobre utilizadas. ....	53
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de la tubería de aluminio utilizada. ....	53
Tabla 2.3 Composición química de las aleaciones de las tuberías de cobre. ....	53
Tabla 2.4 Composición química de la aleación de la tubería de aluminio 6063. ....	53
Tabla 2.5 Especificaciones del material de aporte SIL-FOS 15 (AWS BCuP-5).....	57
Tabla 2.6 Especificaciones del material de aporte Al 822. ....	58
Tabla 2.7 Diámetros teórico y real obtenidos experimentalmente .....	60
Tabla 2.8 Variables esenciales y no esenciales del proceso de soldadura fuerte por horno .....	66
Tabla 2.9 Numero de muestras requeridas para calificar el procedimiento en función del espesor del material. ....	67
Tabla 2.10 Consumo energético y costo eléctrico del proceso para soldar cada tipo de tubería. .....	74
Tabla 2.11 Costo de los materiales de aporte. ....	75
Tabla 2.12 Costos de los accesorios de cobre. ....	75
Tabla 2.13 Costos de los metales de aporte utilizados.....	75
Tabla 2.14 Costos de material por metro lineal y junta soldada. ....	75
Tabla 2.15 Costo total del proceso de soldadura indirecta por horno. ....	76
Tabla 2.16 Variables establecidas para el proceso experimental de las probetas Cu-Cu. ....	80
Tabla 2.17 Variables establecidas para el proceso experimental de las probetas Al-Al. ....	80
Tabla 2.18 Variables establecidas para el proceso experimental de las probetas Al-Cu. ....	81
Tabla 2.19 Parámetros del proceso experimental optimizado para las probetas de Cu-Cu. ....	83
Tabla 2.20 Parámetros del proceso experimental optimizado para las probetas de Al-Al y Al-Cu. .....	83
Tabla 2.21 Parámetros de temperatura y tiempo de las probetas soldadas. ....	84
Tabla 2.22 Especificaciones técnicas del horno VULCAN para el proceso de soldadura. ....	86
Tabla 3.1 Composición química de las muestras de tubería de cobre.....	87
Tabla 3.2 Composición química de la muestra de tubería de aluminio. ....	87
Tabla 3.3 Micrografías de las probetas Cu-Cu a 100x.....	92
Tabla 3.4 Micrografías de las probetas Al-Al a 100x.....	93
Tabla 3.5 Micrografías de las probetas Al-Al a 100x.....	94
Tabla 3.6 Macrografías de las probetas soldadas de Cu, Al y Cu-Al con aumento de 4x. ....	95



## RESUMEN

El presente proyecto es un estudio que tiene como objetivo primordial analizar y comparar la soldabilidad de tuberías de aluminio y cobre con aplicaciones en refrigeración con el proceso de soldadura indirecta por horno, identificando los parámetros esenciales del mismo, como el material de aporte, fundente, tiempo y temperatura del proceso, de esta forma garantizando la obtención de las juntas soldadas que posean propiedades mecánicas aceptables. Para cumplir el propósito del presente proyecto, en el documento se estableció primeramente un marco teórico de la soldadura indirecta por horno para tener idea de cómo es el proceso y todo referente al aluminio y cobre, luego se estableció un procedimiento para ejecutar las soldaduras de las tuberías de Al y Cu, de acuerdo a la bibliografía, para calificar el procedimiento se sometió a pruebas destructivas de tracción y pelado a las probetas de Al, Cu y Al-Cu de acuerdo al código ASME sección IX parte QB, todo esto complementado con un análisis metalográfico para poder analizar los resultados obtenidos de todos los ensayos realizados a los probetas y ver cuáles de los tres tipos de probetas cumplen con los requerimientos del código, para poder establecer una calificación del procedimiento realizado del soldadura indirecta que certifique una unión soldada resistente que cumpla los requerimientos para la cual fue diseñada.

**Palabras clave:** Aluminio, Cobre, horno, Tuberías, Soldadura Indirecta.

## **ABSTRACT**

This project is a study whose primary objective is to analyze and compare the weldability of aluminum and copper pipes with applications in refrigeration with the indirect welding process by furnace, identifying its essential parameters, such as filler material, flux, time and temperature of the process, thus guaranteeing the obtaining of welded joints that have acceptable mechanical properties. To fulfill the purpose of this project, the document first established a theoretical framework of indirect furnace welding to get an idea of how the process is and everything related to aluminum and copper, then a procedure was established to execute the welds of the Al and Cu pipes, according to the bibliography, to qualify the procedure, the Al, Cu and Al-Cu specimens were subjected to destructive tensile and peeling tests according to the ASME code section IX part QB, all this complemented with a metallographic analysis to be able to analyze the results obtained from all the tests carried out on the specimens and see which of the three types of specimens comply with the code requirements, in order to establish a qualification of the indirect welding procedure performed that certifies a resistant welded joint that meets the requirements for which it was designed.

**Keywords:** Aluminum, Copper, furnace Brazing, Pipeline.



# **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA SOLDABILIDAD BAJO LA NORMA AWS C3.6M DE TUBERIAS DE ALUMINIO Y COBRE CON SOLDADURA INDIRECTA DE METALES POR HORNO (FB) USADO EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.”**

## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad los sistemas de refrigeración y sus elementos deben ser diseñados de tal manera que cumplan las condiciones de servicio para la cual las uniones soldadas deben ser de calidad, el presente proyecto de titulación tiene como propósito el profundizar en la soldadura indirecta (fuerte) por horno de materiales no ferrosos, especialmente el cobre y el aluminio metales muy utilizados a lo largo de la historia y que poseen diferentes aplicaciones, dichos materiales tienen similitudes como la resistencia a la corrosión, buena maquinabilidad, etc., una de las tantas aplicaciones es el uso en refrigeración como se mencionó, las tuberías donde se transfiere el calor de manera eficiente estos dos metales son idóneos, se usan bastante debido a sus propiedades térmicas intrínsecas.

El estudio abarca el análisis de la soldabilidad de tuberías de cobre y tuberías de aluminio; existen diferentes procesos de soldadura fuerte donde varía la fuente de calentamiento, en este proyecto se utilizó tres tuberías de cobre rígida, cañería de cobre y tubería de aluminio, las dos primeras de aleación C12200 que es la que se vende en el país y la otra tubería de aleación AA6063 de aluminio. El analizar la soldabilidad de estos materiales es muy importante debido a que están sometidas a grandes presiones en las aplicaciones que se las utilice para ello se requiere estudiar los parámetros esenciales del proceso para soldar estos materiales para así garantizar una unión soldada de calidad que cumpla los requerimientos de servicio para los cuales fue concebida.

La soldadura fuerte en nuestro país en mayor parte se utiliza para soldar cobre, para soldar aluminio no se tiene estudios pertinentes en este proceso, la mayor parte de soldaduras se las realiza con soldadura fuerte por soplete, la soldadura fuerte por horno no se utiliza poco o casi nada.

Para lograr una unión soldada por medio del proceso utilizado, el presente proyecto definirá los parámetros esenciales óptimos, que nos garantice una unión soldada con propiedades mecánicas aceptables, para esto se realizó pruebas destructivas que

medirán cuantitativamente las mismas para analizar la unión soldada y calificar el procedimiento.

La selección del material de aporte, de fundente, los metales base a soldar, tipo de junta, la separación u holgura, todos estos parámetros son esenciales para realizar el proceso, pero los parámetros más importantes dentro del proceso que engloban a los mencionados anteriormente son la temperatura y el tiempo del proceso de soldadura fuerte por horno que garantizaran una buena junta soldada.

## **Objetivo general**

Analizar y comparar la soldabilidad bajo la norma AWS C3.6M de tuberías de aluminio y cobre con el proceso de soldadura Indirecta de Metales por Horno (FB) usado en sistemas de refrigeración.

## **Objetivos específicos**

- Identificar en la literatura los parámetros esenciales del proceso en los cuales se tendrá una unión aceptable para la soldadura de las probetas de prueba.
- Efectuar la soldadura de las tuberías mediante el proceso de soldadura indirecta por horno para realizar los respectivos ensayos mecánicos.
- Analizar las juntas soldadas de las tuberías en cada caso mediante análisis metalográfico para examinarlas y comparar la soldabilidad de las mismas a través de la norma AWS C3.6M-2008.
- Realizar la comparación de los resultados obtenidos entre las tuberías de Cu, Al y Cu-Al.
- Establecer los costos del proceso de soldadura utilizado

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Generalidades del aluminio

El aluminio es el tercer elemento más abundante de la corteza terrestre con un 8% presente en diversos compuestos que contienen el metal, en la naturaleza no se lo puede encontrar en estado puro, se encuentra en forma de silicatos y minerales. Sus excelentes características como su bajo peso, buena maleabilidad y alta resistencia a la corrosión hacen del aluminio un material útil en diversas aplicaciones industriales desde fabricar utensilios, envases, así como partes de maquinarias, para la obtención del aluminio se extrae de la bauxita, mineral que es la forma en la que se encuentra en la naturaleza y también el reciclado de múltiples residuos de aluminio siendo una ventaja de este metal. [21,22]

## 1.2 Propiedades del aluminio

El aluminio es un metal no ferromagnético y ultra liviano cuya densidad es 2700 kg/m<sup>3</sup>, el punto de fusión del metal es bajo esta en un intervalo de 650 a 660 [°C], posee buena conductividad eléctrica y térmica, su característica principal es la resistencia a la corrosión mediante una capa de alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que se forma naturalmente al reaccionar con el oxígeno, protegiendo al metal del entorno. Es un material blando, de fácil mecanizado y maleable, gracias a estas propiedades permite los procesos de fundición, forja, extrusión y soldadura para la obtención de diversas piezas, algunas de sus propiedades se muestran en la Tabla 1.1. [21]

Tabla 1.1 Propiedades Físicas del aluminio

Símbolo	Al
Numero atómico	13
Peso atómico	26.9815 u
Red cristalina	Cubica centrada en las caras (FCC)
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2700
Punto de fusión (° C)	660
Módulo de elasticidad (GPa)	70
Coef. De exp. Térmica 0-100° C (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	23.5
Conductividad térmica 20-100 (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	238

(fuente: <https://aluaz.com/2020/07/31/historia-y-generalidades-del-aluminio/>)

Debido a que el aluminio es un material blando y de pobres propiedades mecánicas, se varia dichas propiedades del metal de acuerdo a los requerimientos añadiendo elementos aleantes como magnesio, manganeso, cobre, zinc y silicio, incluso a veces titanio y cromo.

### 1.2.1 Aleaciones del aluminio

La adición de elementos de aleación busca mejorar las propiedades mecánicas del metal como la resistencia a la tracción, dureza, rigidez, maleabilidad y además mejora otras propiedades como la fluidez, la maquinabilidad entre otras, las aleaciones de aluminio se dividen en dos categorías en aleaciones de forja y de moldeo o fundición, las cuales se clasifican de acuerdo al aleante principal y su composición química, en este documento se tratará únicamente las aleaciones para forjado.

La clasificación de las aleaciones de aluminio ha sufrido cambios a través de últimos años existen varias sociedades científicas y de ingeniería que han establecido procedimiento para clasificarlas entre las más importantes se puede mencionar la American Association of the United States (ANSI), la International Alloy Designation System (IADS) estas asociaciones se fundamentan en la Aluminum Association of the United States, existen otras asociaciones como Organization for Standardization (ISO) y la Unified Numbering Systems (UNS), para este trabajo se hablará de las aleaciones de aluminio basadas en la (ANSI) debido a que en el país se basan en esta asociación para la manufactura de los diferentes productos de aluminio.

La ANSI designa para cada aleación trabajada un número de cuatros dígitos, el primer dígito hace referencia al elemento aleante principal de la aleación, por ello se tiene los siguientes grupos de aleaciones. [22]

### 1.2.2 Elementos aleantes del Aluminio

- **Berilio:** Se usa en aleaciones de aluminio con magnesio ayudando a reducir la oxidación a altas temperaturas.
- **Cobalto:** no es un elemento que se añade regularmente se añade en aleaciones de (Al-Si), modifica la fase beta acicular (Al, Fe, Si) a una fase más redondeada (Al, Co, Fe) mejorando resistencia y elongación,
- **Cobre:** el aditamento de cobre en aleaciones de aluminio mejora la colabilidad, reduce la resistencia a la corrosión y resistencia mecánica, también la dureza.

- **Cromo:** se presenta en una menor cantidad en el aluminio comercial, la adición de esta impureza ayuda a contrastar la estructura del grano, evitando un crecimiento del mismo, ayuda en la recristalización en aleaciones de (Al, Mg, Si) y (Al, Zn, Mg) cuando son sometidos a un tratamiento térmico.
- **Estaño:** este aleante está en composiciones de 0.03% de aleaciones forjadas y composición de 25% en aleaciones de fundición. Mejora la resistencia mecánica y a la corrosión, si hay adición de estaño excesivo provoca fisuración en caliente.
- **Estroncio:** Se encuentra en cantidades de 0.01 a 0.1 ppm en aluminio comercial.
- **Hierro:** este es uno de los aleantes más perjudiciales que presentan en el aluminio. La baja solubilidad da presencia de compuestos intermetálicos, un porcentaje de hierro mayor al 1% genera porosidad y origina formación de intermetálicos de hierro.
- **Magnesio:** está presente en aleaciones forjadas hasta un 5.5%, la adición del magnesio mejora la resistencia mecánica sin mermar la ductilidad.
- **Manganeso:** generalmente se encuentra en aleaciones de fundición, además que es un importante en aleaciones forjadas, forma fases intermetálicas con el hierro y cromo.
- **Níquel:** genera fases intermetálicas no solubles, siempre en combinación con el hierro, con un porcentaje de hasta el 2% aumenta la resistencia del aluminio de alta pureza, pero disminuye la ductilidad. El níquel se agrega a aleaciones de (Al-Cu) y aleaciones (Al-Si), aumentando la resistencia a altas temperaturas y también la dureza.
- **Plomo:** este se encuentra en porcentaje de hasta el 0.05% en las aleaciones de aluminio, mejora la maquinabilidad.
- **Silicio:** es el aleante que produce mejoras extraordinarias como la fluidez, la resistencia a la corrosión, debido a la poca solubilidad del silicio en el aluminio, se muestra formando compuestos complejos, con el hierro (AL-Fe-Si) que suelen estar en juntas de grano, reduciendo la tenacidad y ductilidad, mejora sutilmente el límite elástico.
- **Titanio:** este aleante suele encontrarse de 10 a 100 partes por millón (ppm) en el aluminio comercial, el titanio disminuye la conductividad eléctrica del aluminio, el titanio actúa como refinador de grano.
- **Zinc:** el sistema binario aluminio-zinc es susceptible a la corrosión en las aleaciones forjadas, esta aleante con aluminio, además de la adición de otros

elementos proporciona excelentes propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción en el aluminio forjado. [23]

#### **1.2.2.1 Serie 1000**

La serie 1000 contiene como elemento principal aluminio puro aun 99%, entre las características de esta aleación presenta excelente resistencia a la corrosión, buena conductividad térmica y eléctrica, mayor soldabilidad, además de excelente capacidad de conformado, entre algunas aplicaciones de esta aleación tenemos tanques de almacenamiento en la industria química.

#### **1.2.2.2 Serie 2000**

La aleación de la serie 2000 tiene como aleante principal al cobre además contiene magnesio y manganeso en menor proporción, proporcionándole excelentes propiedades mecánicas, presentan mala soldabilidad, también presentan susceptibilidad a la fisuración en caliente, puede endurecerse bajo precipitación para aumentar su resistencia, entre sus aplicaciones tenemos la industria aeronáutica para la fabricación de fuselajes unidos mediante remaches.

#### **1.2.2.3 Serie 3000**

La serie 3000 tiene como aleante principal al manganeso, es aproximadamente un 20% más resistente que la serie 1000, se puede endurecer por precipitación para aumentar su resistencia mecánica, presenta buena soldabilidad y alta plasticidad se usa ampliamente utensilios para cocina, tuberías y recipientes de presión, radiadores.

#### **1.2.2.4 Serie 4000**

Esta aleación tiene como elemento principal el silicio, posee resistencia a altas temperaturas y resistencia al desgaste posee un porcentaje de silicio de 4.5-6% entre los usos más frecuentes de dicha aleación en materiales de construcción, piezas de máquinas para forjado y materiales de soldadura.

#### **1.2.2.5 Serie 5000**

La serie 5000 posee al magnesio como aleante principal posee una resistencia mecánica entre moderada y alta, posee buena resistencia a la corrosión, al corte y excelente rendimiento al proceso de soldadura por arco se usa ampliamente en la fabricación de buques, chasis de vehículos, piezas para soldar de aviones, piezas de misiles, armadura militar.

### **1.2.2.6 Serie 6000**

La aleación posee dos elementos aleantes principales que son el magnesio y el silicio posee una buena resistencia a la corrosión, buena soldabilidad, facilidad de conformado y mecanizado se usa principalmente para la manufactura de vehículos ligeros, piezas de máquina, piezas de motor d avión, piezas de forja, tuberías, etc.

### **1.2.2.7 Serie 7000**

La serie 7000 es una aleación donde su principal aleante es el Zinc y también el cobre en menor proporción posee alta resistencia mecánica, es muy mecanizable, también tiene buena resistencia a bajas temperaturas, de todas las aleaciones de aluminio esta es la que posee la menor resistencia a la corrosión se usa frecuentemente para la fabricación de piezas estructurales de aviones, para contenedores refrigerados, aparatos de baja temperatura, entre otros.

### **1.2.2.8 Serie 8000**

La serie 8000 posee como elementos aleantes el silicio, hierro y zinc son usados para cables de baja tensión para instalaciones eléctricas principalmente por lo que posee buena conductividad y resistencia eléctrica. [22]

## **1.3 Generalidades del Cobre**

El cobre es históricamente el primer metal trabajado a nivel industrial por el hombre desde su descubrimiento. El cobre es uno de los metales más importantes (tercero) en producción y ámbito económico después del hierro y el aluminio, empleado para la fabricación de aleaciones, donde tiene un sin número de aplicaciones principalmente se utiliza en la industria eléctrica y electrónica esto gracias a sus características únicas de conductividad eléctrica y térmica también en aplicaciones donde se requiera buena transferencia de calor, además de presentar buena resistencia a la corrosión y buena maleabilidad y ductilidad.

Es un metal de color rojizo en la naturaleza se lo encuentra en forma de minerales sulfurados, también se hallan como minerales oxidados en forma de roca y también es reciclable de objetos que contengan el metal, para la producción del cobre se lo realiza por medio del proceso piro metalúrgico. [24,25]

### **1.3.1 Propiedades del Cobre**

En la Tabla 1.2 se menciona algunas propiedades físicas importantes del cobre.

Tabla 1.2 Propiedades físicas del cobre.

Símbolo	Cu
Numero atómico	29
Peso atómico	63.54 u
Red cristalina	Cubica centrada en las caras (FCC)
Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>0</sup>	8960
Punto de fusión (° C)	1083
Módulo de elasticidad (GPa)	110
Coefficiente de expansión lineal	23.1
Conductividad térmica [W/(m*K)]	400

(Fuente: <http://cesarmetalugista.blogspot.com/p/aleaciones-de-cobre.html>)

### 1.3.2 Aleaciones de Cobre

El cobre puro hemos visto que posee características únicas como lo son la alta conductividad eléctrica y térmica siendo este un metal esencial en la industria eléctrica además de su buena resistencia en ambientes corrosivos es ideal en aplicaciones donde se requiera buena transferencia de calor como intercambiadores de calor, radiadores, etc, para las características mencionadas anteriormente el cobre necesita ciertas características mecánicas por ello se adiciona elementos aleantes para mejorar las propiedades mecánicas del cobre pero disminuyen sus propiedades eléctricas y térmicas, en la Tabla 1.3 se muestran algunos elementos aleantes que suelen combinarse con el cobre y su influencia sobre el mismo.[24]

Tabla 1.3 Influencia de elementos aleantes sobre el cobre.

Elemento aleante	Influencia sobre el cobre
Hierro	Mejora la resistencia mecánica
Aluminio	Mejora la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión. Reduce la ductilidad Mejora la resistencia al desgaste
Manganeso	Aumento de la resistencia a la tracción Disminuye la ductilidad
Zinc	Aumento de la resistencia a la tracción Mejora la ductilidad
Silicio	Reduce considerablemente la conductividad eléctrica
Berilio	Mejora la dureza superficial
Cromo	Reduce la conductividad eléctrica y térmica
Arsénico	Aumenta la tenacidad

(Fuente: [17])

Al igual que el aluminio el cobre tiene sus aleaciones estandarizadas de acuerdo al tipo de cobre definen sus propiedades específicas, las normas del cobre definen de manera



correcta el tipo, la forma y el estado de la aleación, existen estándares europeos, japoneses, norteamericanos (USA), para este y el presente documento se va hablar de los estándares americanos debidos a que el Ecuador importa productos de cobre de Estados Unidos, el estándar americano usa el Sistema de Numeración Unificado (UNS) por sus siglas en ingles esta supervisado por la ASTM “Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, también por la SAE “Sociedad de Ingenieros Automoción”.

Bajo el sistema UNS, el cobre y sus aleaciones se designan con números de 5 dígitos precedidos de la letra “C”, las designaciones del sistema UNS han sido incorporados a estándares de manufactura del cobre tales como ASTM, ASME Y SAE, de igual manera como en el aluminio en el cobre existe una clasificación de aleaciones forjadas y aleaciones fundidas, para la primera se asignan desde C10000 a C79999 y para la segunda van desde C80000 hasta C99999, todas estas aleaciones se agrupan dentro de familias de aleaciones de cobre que incluyen los grupos más representativos que son los siguientes: cobre puro, cobre de alta aleación, latones, bronce, cuproníqueles y cuproaluminios además otras aleaciones que no entran en esta clasificación son aleaciones de cobre zinc. En la Tabla 1.4 se describe la mayoría de aleaciones de cobre para forja bajo la designación UNS y su composición general. [17]

Tabla 1.4 Denominación de las aleaciones de cobre según la UNS.

Denominación común	Designación UNS	Composición
Cobre puro	C10100-C15760	>99%Cu
Cobre aleado	C16200-C19600	>96%Cu
Latón	C20500-C28580	Cu-5-46%Zn
Latones con Plomo	C31200-C38900	Cu-Zn-1-3%Pb
Latones con Estaño	C40400-C49080	Cu-Zn-Sn
Bronce	C50100-C52400	Cu-2-20%Sn-P
Bronce con Plomo	C53200-C54800	Cu-Sn-Pb-P
Aleación Cobre fosfórico y Cobre-Plata-Fósforo	C55180-C55284	Cu-P-Ag
Cuproaluminio	C64700-C66100	Cu-5-11%Al-6%(Ni-Fe)
Bronce al Si	C64700-C66100	Cu-Si-Sn
Otras aleaciones de Cu	C66400-C69900	Cu<50%
Cuproníqueles	C70000-c79900	Cu-5-44%Ni-Fe
Alpaca (Cu-Ni-Zn)	C73200-C79900	Cu-Ni-Zn

(Fuente: [17])

Las características de los grupos de las aleaciones principales del cobre como se había mencionado anteriormente existen 6 grupos principales que abarcan todas las aleaciones de cobre para forjado que son la siguientes:

#### **1.3.2.1 Cobre débilmente aleado**

Son aquellas aleaciones que posee elementos aleantes en un porcentaje menor al 1% y se utilizan cuando se requiere mejorar las propiedades del cobre puro como la resistencia mecánica a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, soldabilidad y maquinabilidad algunos elementos con los que se combina son fosforo, plata, azufre, telurio, se usa principalmente en la fabricación de tuberías, elementos de máquinas eléctricas rotativas, terminales de transformadores.

#### **1.3.2.2 Cobre de alta aleación**

Estas aleaciones se requieren cuando la conductividad eléctrica no es muy necesaria y se requiere buenas propiedades mecánicas como resistencia a la tracción, dureza, resistencia a la corrosión, algunos ejemplos de este tipo de aleaciones tenemos:

- Cobre-Cadmio
- Cobre-Cromo
- Cobre-Níquel-Silicio
- Cobre-Berilio

#### **1.3.2.3 Latones**

Los latones son aleaciones de base Cobre-Zinc donde el porcentaje de zinc varía del 5 al 46% además de otros elementos en pequeñas proporciones. El color del latón varía de acuerdo al contenido de zinc poseen buena resistencia a la corrosión y la facilidad que presenta para realizarse tratamientos superficiales, dentro del grupo de latones existen tres grupos de latones que son latones con plomo, latones binarios y latones especiales.

#### **1.3.2.4 Bronces**

El bronce es la aleación de cobre y estaño como elemento aleante principal donde su contenido en la aleación varía del 2 al 20% de estaño, los bronce poseen otros elementos como fósforo, zinc, níquel, plomo, existen dos grupos de bronce binarios y complejos, entre los binarios tenemos a los bronce para forja y bronce moldeados, en cambio para los bronce complejos existe un tercer elemento, tenemos bronce con zinc

y bronce con plomo, se usa principalmente para la fabricación de campanas, tubos flexibles, alambres, aplicaciones navales.

#### **1.3.2.5 Cuproaluminio**

Estas aleaciones son a base de cobre y aluminio con un porcentaje del 5 al 11%, también posee hierro, níquel y manganeso se caracterizan por tener buena resistencia a la corrosión, resistencia mecánica en caliente, buena soldabilidad, su uso va de acuerdo a las características anteriormente mencionadas principalmente se usa en tuberías para gases de escape, rejillas para hornos de gas, rodamientos, rotores de bombas.

#### **1.3.2.6 Cuproníqueles**

Estas aleaciones se designan cuando el porcentaje de níquel es menor al 50%, posee facilidad de conformación en frío y en caliente, facilidad de moldeo, buenas propiedades mecánicas a bajas y altas temperaturas, buena resistencia a la corrosión, poseen un aspecto plateado existen cuproníqueles binarios y complejos, se usa en la fabricación de monedas, aparatos de medida, equipos de calefacción, en cables que estén expuestos a medios altamente corrosivos

#### **1.3.2.7 Alpacas**

Las alpacas son aleaciones de cobre, níquel y zinc, en diferente proporción, sus aplicaciones son múltiples y se basan en sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, se usan principalmente en la fabricación de piezas para dispositivos de telecomunicaciones, lámparas, orfebrería, utensilios

#### **1.3.2.8 Otras aleaciones de cobre**

Existe un grupo de aleaciones de cobre se incluye algunas de poca importancia y otras de gran interés, su principal característica es que poseen un porcentaje de cobre menor al 50% por ello no se las considera aleaciones de cobre, estas aleaciones se emplean cuando se requiere buena resistencia mecánica, buena maquinabilidad y resistencia a altas temperaturas. [24]

En forma general cuando se selecciona una aleación de cobre las propiedades más importantes a considerar son:

- Resistencia a la corrosión
- Conductividad eléctrica y térmica
- Facilidad de conformado

## **1.4 Tubería utilizada en Sistemas de Refrigeración**

La mayoría de tuberías utilizadas en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado son de cobre, también se utiliza tuberías de aluminio para la fabricación de algunos componentes del evaporador y condensador, el aluminio no es tan usado en la instalación de tuberías de conexión donde circula refrigerante, debido esencialmente presenta dificultad para ser trabajado y su soldadura es más difícil en comparación con el cobre. Las tuberías de acero se utilizan en unidades de refrigeración más grandes que vienen ensambladas de fábrica.

El término tubería por lo general se entiende de elementos de pared delgada, usualmente de cobre se unen entre por si por distintos procedimientos y en cambio cuando se habla de tubo se habla de elementos de pared gruesa por lo general hierro y acero, para el dimensionamiento de las tuberías estas se relacionan en función del diámetro externo.

Las tuberías de cobre cuando son trabajada (conformadas) están suelen endurecerse, esta provoca fisuras en los extremos de la tubería al ser abocinadas, por ello en el proceso de fabricación de tuberías de cobre se las realiza un proceso de recocido, las tuberías de cobre para usos de refrigeración y aire acondicionado se las denomina ACR, las tuberías son purgadas con gas nitrógeno lo que ayuda al metal a sellarse contra el aire, la humedad y suciedad, también para los óxidos que se forman durante un proceso de soldadura fuerte. [31]

## **1.5 Soldadura Indirecta de Metales**

### **1.5.1 Definición de soldadura indirecta o soldadura fuerte**

La soldadura indirecta es denominada soldadura fuerte cuando el proceso para la unión de metales por medio de un material de aporte se lo realiza a una temperatura mayor a 450 [°C] que funde el material de aporte, pero esta temperatura debe estar por debajo de la temperatura de fusión de los metales base que se va a unir. [1,2]

Como el metal base no se funde, existe un mejor control del proceso, en general en este proceso de soldadura no se requiere una acción adicional que mejore el acabado superficial de las piezas soldadas, en procesos por soldadura indirecta no tiene mayor importancia la zona afectada por el calor con respecto a un proceso de soldadura por fusión, esto permite tener una distribución de tensiones y transferencia de calor mejor

distribuida, en estos procesos son fácilmente automatizables y son aptos para grandes lotes de producción.

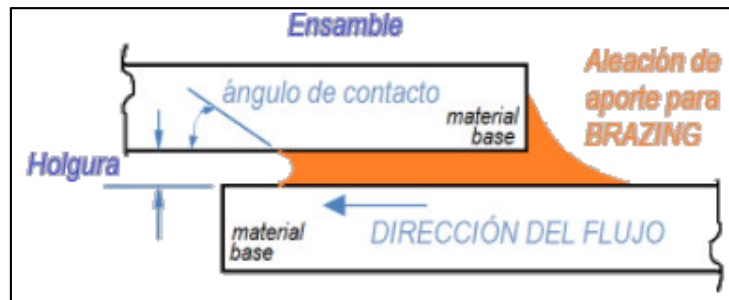


Figura 1.1 Esquema del proceso de soldadura indirecta.  
(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY, Brazing Handbook, 5º Edition, p.p. 06)

El material de aporte fluirá a través de la holgura de la junta previo aun calentamiento del área de la misma hasta llenar la junta esta acción se da por capilaridad principio fundamental de este proceso de soldadura, cabe mencionar que en este proceso no se da la fusión de los metales base como se puede observar en el Figura 1.1, en el término anglosajón a este proceso se le denomina soldadura “brazing”, en el presente documento se utilizará los términos de soldadura fuerte y brazing para poder referirse a la soldadura indirecta de metales por lo que se entenderá que se habla del mismo proceso. [1]

## 1.5.2 Principios de la soldadura indirecta

### 1.5.2.1 Capilaridad

La atracción capilar es el principio físico dominante de este proceso de soldadura, la acción se da cuando el metal de aporte fundido se introduce en las superficies paralelas de los metales base que se van a soldar, además otras características del metal de aporte se consideran como la viscosidad, gravedad, presión de vapor y las reacciones metalúrgicas entre el metal base y el metal de aporte, en la Figura 1.2 podemos ver el efecto de la atracción capilar y como actúa en una junta soldada antes, durante y después del proceso de soldadura indirecta. [1]

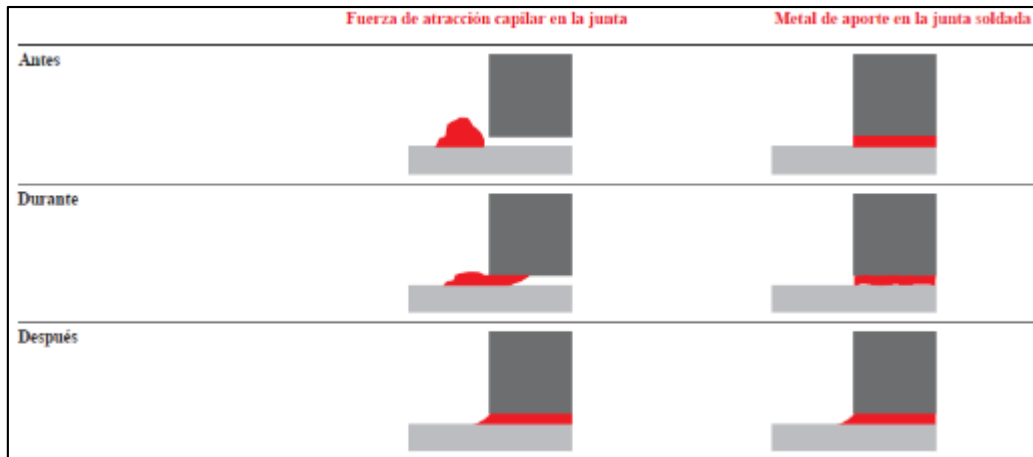


Figura 1.2 Efecto de la capilaridad en una junta soldada por soldadura indirecta.  
(Fuente: [26])

### 1.5.2.2 Mojabilidad y adhesión

La mojabilidad es la predisposición que posee un fluido a extenderse y adherirse sobre la superficie de un cuerpo sólido, un factor importante en este aspecto es el ángulo de contacto que se forma por el líquido con la superficie del cuerpo sólido al cual se adhiere, este ángulo nos permite ver la efectividad de la mojabilidad del fluido y su interacción.

El valor del ángulo de contacto dependerá principalmente de la relación que existe entre las interacciones moleculares entre ambas superficies, para que se forme la aleación y se enlace, es indispensable que el metal de aporte “moje” de manera correcta al metal base.

Para un mejor entendimiento de la mojabilidad se tiene el siguiente ejemplo, se tiene un cuerpo sólido que se sumerge en un baño líquido y se humedece, una capa delgada y continua de líquido se adhiere al sólido cuando este se retira. En términos prácticos, respecto a la soldadura fuerte la mojabilidad implica que el material de aporte líquido se disperse sobre el metal base sólido. [1]

La mojabilidad es solo un aspecto importante del proceso de soldadura indirecta, un factor importante que afecta al mojado es la limpieza de las superficies a “mojar”, las impurezas como las capas de óxido, la grasa, la suciedad y otros elementos contaminantes impiden el correcto mojado de las superficies entre el metal de aporte y el metal base. [1]

Un líquido “moja” una superficie cuando se esparce por la misma, si no ocurriera esto el metal líquido se contrae y formando una pequeña gota, consecuentemente no se adhiere a la superficie del metal como apreciamos en la Figura 1.3

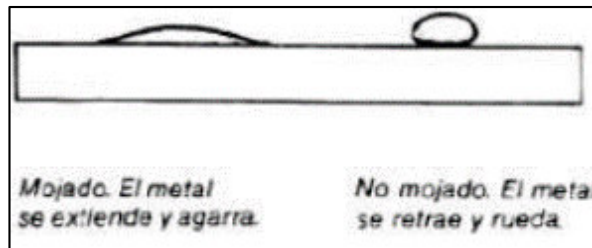


Figura 1.3 Concepto de mojabilidad.  
(Fuente: [15])

Como habíamos mencionado el ángulo de contacto influye directamente en la mojabilidad, como podemos ver la Figura 1.4 si el ángulo de contacto es menor a 90 comprendido entre la parte sólida y líquida, presenta una buena mojabilidad, en cambio cuando el ángulo es mayor a 90 presenta un mal mojado o un mojado nulo.

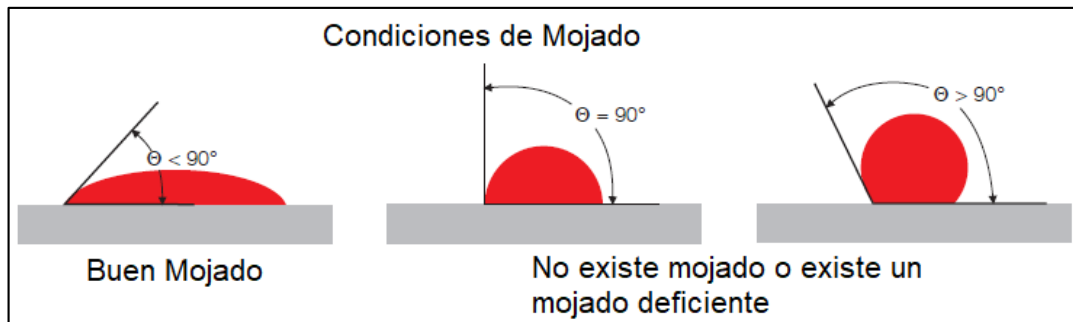


Figura 1.4 Incidencia del ángulo de contacto de mojado de un metal de aporte en soldadura indirecta.  
(Fuente: [26])

### 1.5.2.3 Difusión Molecular

Denominada simplemente difusión es el movimiento térmico de las partículas, la velocidad de este movimiento de partículas está en función de la temperatura, la viscosidad y la masa de las partículas, una vez calentada el metal base las partículas de este se empiezan a separar y el metal de aporte se fundirá e ingresa en los espacios dejados por las partículas. Una vez enfriado el conjunto en si las moléculas se vuelven a juntar y contraen al material de aporte, finalmente el metal base y material de aporte se adhieren logrando así la unión soldada. [17]

### 1.5.3 Ventajas y desventajas del proceso de soldadura indirecta

#### 1.5.3.1 Ventajas de la soldadura indirecta

El proceso de soldadura indirecta presenta múltiples ventajas cuando se requiere unir metales ferrosos y no ferrosos, así también como proceso de producción entre las que destacan las siguientes:

- Con la soldadura indirecta se puede realizar uniones de metales ferrosos y no ferrosos que presentan poca soldabilidad.
- Las uniones que se generan en este proceso de unir dos piezas metálicas, se obtienen con poco material de aporte, se obtienen uniones consistentes que suelen más resistentes que el propio metal base.
- La acción de capilaridad por parte del metal de aporte que es el principio fundamental de este proceso permite acceder en las áreas de las juntas de difícil acceso tuberías de motores, uniones de piezas de pequeño espesor pequeños soportes, etc., donde otros procesos de soldadura simplemente destruirán el material base.
- La distribución de los esfuerzos en las uniones soldadas por soldadura fuerte a diferencia de los cordones de soldadura en otros procesos se distribuye de mejor manera lo que ayuda a las uniones soldadas a tener mejor resistencia a la fatiga.
- Las uniones de soldadura fuerte son herméticas con materiales de distinto punto de fusión como el aluminio, bronce, acero, cobre y hierro.
- Las juntas de la soldadura indirecta no requieren algún proceso de mecanizado o rectificado después de haber soldado esto debido al efecto capilar se consiguen uniones simples, limpias y resistentes con excelente acabado.
- Es un proceso de producción que cuando se realiza ensambles complejos y de grandes series su costo es relativamente bajo.
- Algunos métodos de la soldadura indirecta se los puede realizar de forma rápida permitiendo trabajar a velocidades altas logrando automatizar el proceso.
- Algunos métodos de la soldadura indirecta como la soldadura indirecta por horno permiten soldar de manera simultánea varias uniones. [2]

### **1.5.3.2 Desventajas de la soldadura indirecta**

Como todo proceso de soldadura hay limitaciones las cuales hacen que el proceso no cumpla con todos los requerimientos, entre las siguientes desventajas que tiene la soldadura fuerte tenemos:

- Cuando el material de aporte fundido se introduce en el intersticio formado entre las superficies de las paredes de los tubos que se están soldando, puede existir interacciones perjudiciales de nivel intergranular entre el metal de aporte fundido y el metal base ocasionando erosión en el metal base.
- Cuando se realiza el proceso de soldadura fuerte utilizando un sistema de calentamiento por antorcha este usualmente utiliza combustibles como propano,



butano y acetileno, cuando se sobrecalienta a todo el conjunto a soldar suele producirse fases intermetálicas quebradizas en la junta soldada que afectan a la ductilidad de la junta.

- Se requiere técnicos experimentados cuando se suelda por medio de soldadura indirecta por antorcha para que se realice la operación del proceso.
- La resistencia mecánica de la junta soldada normalmente es menor a la de junta soldada por un proceso de fusión. [2]

### 1.5.4 Tipos de juntas para soldadura indirecta

En la soldadura indirecta el diseño de uniones para placas y elementos tubulares son básicamente dos: junta a tope y junta a traslape, y las variaciones de estas como podemos ver en la Figura 1.5 para elementos planos (placas) y tubulares (tuberías) para el diseño de las juntas se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones. [17]

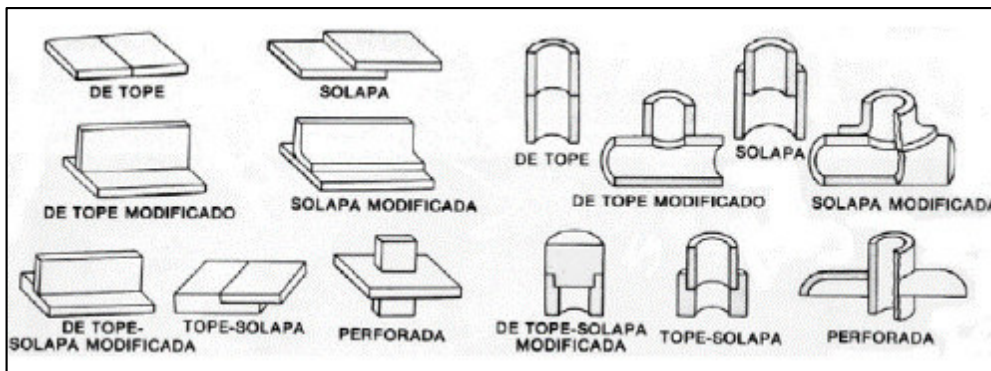


Figura 1.5 Tipos de juntas para soldadura indirecta para elementos planos y tubulares. (Fuente: [17])

#### 1.5.4.1 Junta a tope

Este tipo de junta tiene la característica de tener espesor único en la unión soldada y también en que tendrá una resistencia a la tracción de la junta soldada lo suficiente para los requerimientos de servicio en las aplicaciones que se use y donde el espesor se considera debido a que una junta a traslape produciría concentradores de esfuerzo debido a los cambios de sección. En la Figura 1.6 podemos ver ejemplos de elementos planos y tubulares con diseño de junta a tope.

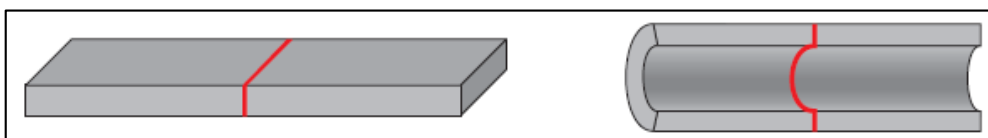


Figura 1.6 Diseño de juntas a tope de elementos planos y tubulares. (Fuente: [26])

La resistencia mecánica de las juntas a tope depende solamente de la resistencia del metal de aporte, la disposición de este tipo de juntas es difícil ya que tiene haber un correcto alineamiento entre los componentes a soldar. [17]

#### 1.5.4.2 Junta a traslape o solape

Las juntas a traslape se utilizan típicamente debido a que ofrecen juntas con máxima eficiencia y facilidad de fabricación, sin embargo, la desventaja que ofrecen es el aumento del espesor del metal en la junta lo que genera un concentrador de esfuerzos en cada extremo donde existe cambio de sección transversal.



Figura 1.7 Diseño de juntas a traslape de elementos planos y tubulares.  
(Fuente: [26])

La junta a traslape se puede variar la longitud de la superposición de modo que la junta sea tan fuerte como el metal más débil incluso con un metal de aporte de baja resistencia o también con pequeñas discontinuidades en la junta, la longitud mínima de traslape es de al menos 3 veces el espesor del elemento más delgado del conjunto a ser soldado, logrando así una buena resistencia mecánica de la junta. [17]

#### 1.5.5 Rango de temperatura de trabajo de soldadura indirecta

La temperatura de trabajo del material de aporte como se observa en la Figura 1.8, es la menor temperatura a la que se puede soldar, para que el material de aporte fluya, moje y se adhiera en la superficie, las temperaturas que están por debajo del área de trabajo de soldadura el material de aporte no funciona correctamente a pesar de estar en estado líquido, en cambio si el material de aporte está por encima de la temperatura máxima de trabajo, los componentes del metal de aporte se pulverizan, además se forman en la superficie del metal de aporte un grano basto, lo que ocasiona que el fundente y la resistencia mecánica de la junta se vean afectadas, por ello el rango de temperatura de trabajo se sitúa en la zona de trabajo de soldadura del material de aporte que se emplea. [17]

Esta zona de trabajo depende principalmente de la composición química del material de aporte, cada metal de aporte posee su rango de temperaturas de trabajo y este viene a ser su zona de trabajo en la soldadura algunas poseen un rango angosto de trabajo y

otros un amplio rango de trabajo, en este último se requiere una fuente de calor que provea una temperatura mayor, teniendo cuidado con un sobrecalentamiento de la junta.

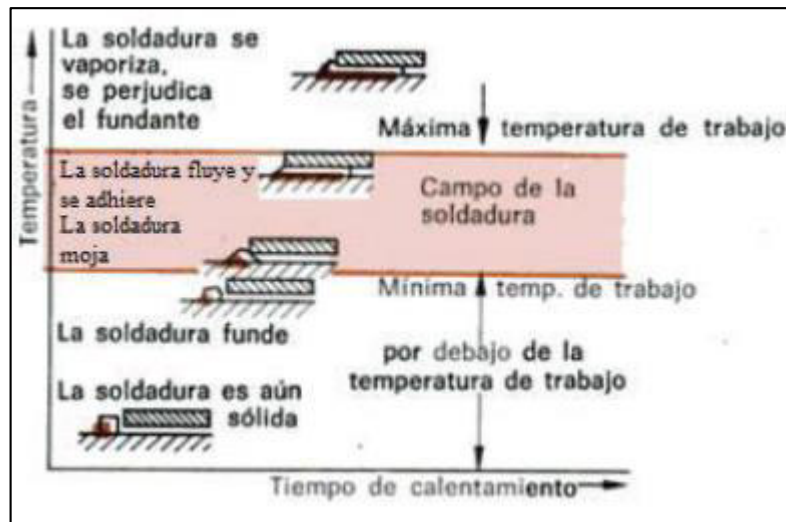


Figura 1.8 Rango de temperatura de trabajo del material de aporte de soldadura indirecta. (Fuente: [17])

### 1.5.6 Selección del material de aporte

La correcta selección del material de aporte en el proceso de soldadura indirecta, proporciona conseguir un cordón de soldadura de buena calidad y correcta interacción con el metal base, por ello se debe considerar los siguientes factores:

- Tener compatibilidad con el material base.
- Un correcto diseño de la junta a soldar.
- Características técnicas como vida útil, ciclaje térmico, distribución de esfuerzos, buena resistencia a la corrosión, estabilidad ante radiaciones y operación en vacío.
- Temperatura de fusión que vaya de acuerdo a la temperatura de soldadura indirecta, en general se opta por materiales de aporte que trabajen a baja temperatura para que no haya interacciones desfavorables entre metal de aporte y metal base.
- Sistema de calentamiento de acuerdo al proceso utilizado. [8]

En la Figura 1.9 tenemos un gráfico donde muestra el rango de temperatura de distintos metales de aporte al cual trabajan en el proceso de soldadura indirecta.

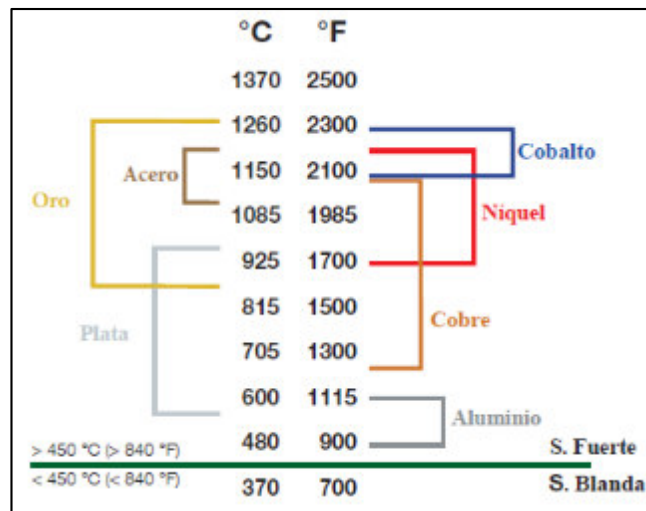


Figura 1.9 Rango típicos de temperatura de soldadura fuerte para varios metales de aporte.

(Fuente: [26])

En base a la norma de la Sociedad Americana de Soldadura AWS A5.8, “Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding”, a los materiales de aporte los clasifica por grupos de acuerdo a la composición química de los mismos, también sugiere las combinaciones factibles entre metal base y material de aporte que recomienda la norma como podemos observar en el **Anexo I**.

De acuerdo a la norma AWS A5.8, para poder soldar cobre a cobre y cobre con aleaciones de cobre, se sugiere utilizar los siguientes materiales de aportación.

- BAg (metal de aporte, base de plata)
- RBCuZn (metal de aporte, cobre-zinc)
- BCuP (metal de aporte, Cobre fosfórico)

En cambio, para soldar aluminio a aluminio y aluminio con sus aleaciones y aluminio a cobre y sus aleaciones se recomienda usar materiales de aportación de:

- BAISi (metal de aporte, base aluminio-silicio)

### 1.5.6.1 Grupos de metales de aporte para soldar cobre y sus aleaciones.

#### 1.5.6.1.1 Grupo BAg

El grupo de metales de aporte BAg (base de plata) son usados ampliamente para la unión de la mayoría de materiales ferrosos y no ferrosos, exceptuando el aluminio y el magnesio, estos metales de aporte presentan buenas propiedades en la soldadura como son la fluidez y mojado, suelen ser utilizados en elementos donde son colocados

previamente en la junta y también con alimentación manual, estos materiales de aporte se usan generalmente en elementos con juntas a traslape, también se puede usar en juntas a tope cuando los requerimientos son menores, para buena unión de los metales de aporte se sugiere una holgura de 0.025 a 0.13 [mm] entre las superficies de los metales a soldar para que la capilaridad sea eficiente, se suele recomendar la aplicación de fundente en el proceso de soldadura, en la Tabla 1.5 se muestra la composición química de este grupo de materiales de aporte (base de plata). [8]

Tabla 1.5 Composición química de metales de aporte de base plata.

Requerimientos de composición química para metales de aporte de plata										
Clasificación AWS	Número UNS	Composición, Porcentaje en peso								Total Otros Elementos
		Ag	Cu	Zn	Cd	Ni	Sn	Li	Mn	
EAg-1	F07450	44.0-46.0	14.0-16.0	14.0-18.0	23.0-25.0	—	—	—	—	0.15
EAg-1a	F07500	49.0-51.0	14.5-16.5	14.5-18.5	17.0-19.0	—	—	—	—	0.15
EAg-2	F07330	34.0-36.0	25.0-27.0	19.0-23.0	17.0-19.0	—	—	—	—	0.15
EAg-2a	F07300	29.0-31.0	26.0-28.0	21.0-25.0	19.0-21.0	—	—	—	—	0.15
EAg-3	F07501	40.0-51.0	14.5-16.5	13.5-17.5	15.0-17.0	2.5-3.5	—	—	—	0.15
EAg-4	F07400	39.0-41.0	29.0-31.0	26.0-30.0	—	1.5-2.5	—	—	—	0.15
EAg-5	F07453	44.0-46.0	20.0-31.0	23.0-27.0	—	—	—	—	—	0.15
EAg-6	F07503	49.0-51.0	33.0-35.0	14.0-18.0	—	—	—	—	—	0.15
EAg-7	F07563	55.0-57.0	21.0-23.0	15.0-19.0	—	—	4.5-5.5	—	—	0.15
EAg-8	F07720	71.0-73.0	Restante	—	—	—	—	—	—	0.15
EAg-8a	F07733	71.0-73.0	Restante	—	—	—	—	0.25-0.30	—	0.15
EAg-9	F07650	61.0-63.0	19.0-21.0	13.0-17.0	—	—	—	—	—	0.15
EAg-10	F07700	69.0-71.0	19.0-21.0	8.0-12.0	—	—	—	—	—	0.15
EAg-13	F07510	55.0-57.0	Restante	1.0-5.0	—	—	—	—	—	0.15
EAg-13a	F07560	55.0-57.0	Restante	—	—	0.5-1.5	—	—	—	0.15
EAg-18	F07600	59.0-61.0	Restante	—	—	1.5-2.5	—	—	—	0.15
EAg-19	F07923	92.0-93.0	Restante	—	—	—	9.0-10.5	—	—	0.15
EAg-20	F07901	29.0-31.0	51.0-53.0	30.0-34.0	—	—	—	0.15-0.30	—	0.15
EAg-21	F07630	62.0-64.0	27.5-29.5	—	—	2.0-3.0	5.0-7.0	—	—	0.15
EAg-22	F07490	48.0-50.0	21.0-23.0	21.0-25.0	—	4.0-5.0	—	—	7.0-8.0	0.15
EAg-23	F07850	84.0-86.0	—	—	—	—	—	—	Restante	0.15
EAg-24	F07505	49.0-51.0	19.0-21.0	20.0-30.0	—	1.5-2.5	—	—	—	0.15
EAg-26	F07250	24.0-26.0	37.0-39.0	31.0-35.0	—	1.5-2.5	—	—	1.5-2.5	0.15
EAg-27	F07251	21.0-23.0	34.0-36.0	21.5-28.5	12.0-14.5	—	—	—	—	0.15
EAg-28	F07401	39.0-41.0	29.0-31.0	26.0-30.0	—	—	1.5-2.5	—	—	0.15
EAg-33	F07252	21.0-23.0	29.0-31.0	25.5-29.5	10.0-13.5	—	—	—	—	0.15
EAg-34	F07380	37.0-39.0	31.0-33.0	26.0-30.0	—	—	1.5-2.5	—	—	0.15
EAg-35	F07351	34.0-36.0	31.0-33.0	21.0-25.0	—	—	—	—	—	0.15
EAg-36	F07454	44.0-46.0	26.0-28.0	23.0-27.0	—	—	2.5-3.5	—	—	0.15
EAg-37	F07253	21.0-23.0	30.0-32.0	21.0-25.0	—	—	1.5-2.5	—	—	0.15

(Fuente: AWS A5.8/A5.8M, (2004), p.p. 3)

### 1.5.6.1.2 Grupo RBCuZn

Este grupo de materiales de aporte de cobre-zinc se suelen utilizar para la mayoría de metales ferrosos y no ferrosos, cuando se utiliza este material de aporte se debe evitar el sobrecalentamiento en la junta puesto que puede ocasionar fusión en la junta soldada debido a vapores de zinc retenidos ocasionando fragilidad en el material, en la Tabla 1.6 se puede observar la composición química de este grupo de metales de aporte.

Tabla 1.6 Composición química de metales de aporte de Cobre-Zinc.

Clasificación AWS	Número UNS	Composición, Porcentaje en Peso											Total de otros elementos
		Cu	Ag	Zn	Sn	Fe	Mn	Ni	P	Pb	Al	Si	
RBCuZn-A	C47000	57.0-61.0 <sup>1</sup>	—	Restante	0.25-1.00	*	*	—	—	0.05*	0.01*	*	0.50 <sup>2</sup>
RBCuZn-B	C68000	56.0-60.0 <sup>1</sup>	—	Restante	0.80-1.10	0.25-1.20	0.01-0.50	0.20-0.80 <sup>2</sup>	—	0.05*	0.01*	0.04-0.20	0.50 <sup>2</sup>
RBCuZn-C	C68100	56.0-60.0 <sup>1</sup>	—	Restante	0.80-1.10	0.25-1.20	0.01-0.50	—	—	0.05*	0.01*	0.04-0.15	0.50 <sup>2</sup>
RBCuZn-D	C77300	46.0-50.0 <sup>1</sup>	—	Restante	—	—	—	9.0-11.0 <sup>2</sup>	0.25	0.05*	0.01*	0.04-0.25	0.50 <sup>2</sup>

(Fuente: AWS A5.8/A5.8M, (2004), p.p. 6)

### 1.5.6.1.3 Grupo BCuP

Este grupo de materiales de aporte pertenece a una base de cobre fosfórico se usan para la unión de cobre y sus aleaciones principalmente, su uso se ve limitado en elementos como la plata, tungsteno y molibdeno, no sirven para soldar aleaciones ferrosas y aleaciones de níquel, tampoco aleaciones de cobre- níquel que tenga un porcentaje mayor al 10% de níquel con el fin de prevenir la creación de fases intermetálicas quebradizas metal base con metal de aporte, poseen una buena resistencia a la corrosión, salvo cuando la junta entra en contacto con atmósferas sulfurosas, la soldadura fuerte de cobre, el material de aporte de cobre fosfórico presenta propiedades auto fundentes debido al pequeño porcentaje de fósforo, en la Tabla 1.7 se muestra la composición química de los materiales de aporte de cobre fosfórico.

Tabla 1.7 Composición química de metales de aporte de cobre fosfórico.

Clasificación AWS	Número UNS	Composición, Porcentaje en Peso											Total de otros elementos
		Cu	Ag	Zn	Sn	Fe	Mn	Ni	P	Pb	Al	Si	
BCuP-2	C55181	Restante	—	—	—	—	—	—	7.0-7.5	—	—	—	0.15
BCuP-3	C55281	Restante	4.8-5.2	—	—	—	—	—	5.8-6.2	—	—	—	0.15
BCuP-4	C55283	Restante	5.8-6.2	—	—	—	—	—	7.0-7.5	—	—	—	0.15
BCuP-5	C55284	Restante	14.5-15.5	—	—	—	—	—	4.8-5.2	—	—	—	0.15
BCuP-6	C55280	Restante	1.8-2.2	—	—	—	—	—	6.8-7.2	—	—	—	0.15
BCuP-7	C55282	Restante	4.8-5.2	—	—	—	—	—	6.5-7.0	—	—	—	0.15
BCuP-8	C55285	Restante	17.2-18.0	—	—	—	—	—	6.0-6.7	—	—	—	0.15
BCuP-9	C55385	Restante	—	—	6.0-7.0	—	—	—	6.0-7.0	—	—	0.01-0.4	0.15

(Fuente: AWS A5.8/A5.8M, (2004), p.p. 6)

El contenido de plata en estos metales de aporte de cobre fosfórico le presenta algunas características como capacidad de absorber esfuerzos generado por esfuerzos térmicos, altas presiones y vibraciones, debido a esto son recomendados para la soldadura fuerte de cañerías de cobre donde se usa en el transporte de fluidos que trabajan a diferentes presiones.

### 1.5.6.2 Grupos de metales de aporte para soldar aluminio y sus aleaciones

#### 1.5.6.2.1 Grupo BAISi

Este grupo de metales de aporte base aluminio- silicio se usan para unir metales base de aluminio soldables, la adición del silicio y cobre reducen el rango de fusión del aluminio, dichos elementos se agregan para producir metales de aporte aptos para soldadura fuerte, estos materiales se funden por debajo del punto de solidus de los metales soldables, la aportación de magnesio en estos metales facilita la dispersión del óxido en la soldadura fuerte en vacío, la composición química de los metales de aporte de aluminio-silicio se muestra en la Tabla 1.8

Tabla 1.8 Composición química de metales de aporte de base aluminio-silicio.

Requerimientos de composición para metales de aporte de Aluminio y Magnesio														
Composición, Porcentaje en peso														
Clasificación AWS	Número UNS	Si	Cu	Mg	Bi	Fe	Zn	Mn	Cr	Ni	Ti	Be	Al	Otros Elementos
BAISI-2	A94343	6.8-8.2	0.25	-	-	0.8	0.2	0.1	-	-	-	-	Restante	0.15
BAISI-3	A94145	9.3-10.7	3.3-4.7	0.15	-	0.8	0.2	0.15	0.15	-	-	-	Restante	0.15
BAISI-4	A94047	11.0-13.0	0.3	0.1	-	0.8	0.2	0.15	-	-	-	-	Restante	0.15
BAISI-5	A94045	9.0-11.0	0.3	0.05	-	0.8	0.1	0.05	-	-	0.2	-	Restante	0.15
BAISI-7	A94004	9.0-10.5	0.25	1.0-2.0	-	0.8	0.2	0.1	-	-	-	-	Restante	0.15
BAISI-9	A94147	11.0-13.0	0.25	0.10-0.50	-	0.8	0.2	0.1	-	-	-	-	Restante	0.15
BAISI-11	A94104	9.0-13.0	0.25	1.0-2.0	0.02-0.20	0.8	0.2	0.1	-	-	-	-	Restante	0.15
BMg-1	M19001	0.05	0.05	Restante	-	0.05	1.7-2.3	0.15-1.5	-	0.005	-	0.002-0.008	8.3-9.7	0.3

(Fuente: AWS A5.8/A5.8M, (2004), p.p. 5)

### 1.5.7 Selección del fundente

En este proceso de soldadura y como muchos otros que trabajan a altas temperaturas durante la soldadura, siempre existe esa posibilidad de reaccionar con la atmósfera en la que se encuentran expuestos, los óxidos son las principales reacciones que se producen, también suelen formarse nitruros y carburos. [2]

Para contrarrestar estas reacciones se utiliza el fundente que es un compuesto químico que contiene sales inorgánicas y ácidas, se emplea en la junta soldada antes o mientras se realiza el proceso de soldadura, el fundente debe crear una barrera que evite que los óxidos y demás contaminantes que se puedan formar en el proceso interactúen con el metal de aporte, por ello debe cumplir con tres funciones principales este elemento que son las siguientes:

- Remover y eliminar óxidos presentes en las superficies de los metales a soldar y también los óxidos que se forman durante el calentamiento.
- Tener una mejor fluidez por parte del metal de aporte reduciendo la tensión superficial con la finalidad de tener una buena capilaridad en el espacio de las paredes de las superficies a soldar.
- Prevenir las reacciones desfavorables que se producirían entre el metal base y metal de aporte.

Cuando se aplique el fundente se lo debe realizar de manera uniforme en toda el área de contacto donde fluirá el metal de aporte. En el ámbito comercial los fundentes se encuentran en diversas formas como son líquido, polvo, pasta, cada una de estas presentaciones tiene su forma de aplicación ya sea de forma manual con algún elemento como cepillo o brocha, rociado o inmersión de ser el caso. [2]

Cuando se usa fundentes en polvo, se aplica sumergiendo la varilla del metal de aporte caliente del ser el caso, para tener una excelente adherencia al mismo. Siguiendo a esto la varilla es acercada a la unión de la junta soldada previamente calentada consiguiendo la fusión del fundente y metal de aporte, esto ingresa a la holgura de la junta.

En el mercado existen diversos tipos de materiales de aporte algunos con características auto fundentes, con núcleo fundente y con revestimiento fundente, en el caso de metales de aporte para soldar cobre a cobre el grupo BCuP, la adición de fósforo le da esa característica "auto fundente" por ello con estos materiales de aporte no se requiere la aplicación de fundente. [2]

Para que la aplicación del fundente sea efectiva y cumpla con su función, las superficies de los metales base deben estar completamente limpias, esto ayudara a que metal de aporte fluya fácilmente, si no se tiene una superficie completamente limpia el fundente formara grumos y la soldadura se va efectuar de manera correcta.

Para una correcta selección del fundente va a depender del metal base y el metal de aporte que se vaya a utilizar, para escoger un correcto fundente, la norma AWS A5.31 (Specification for fluxes for brazing and braze welding) sugiere y recomienda los fundentes para soldadura indirecta de acuerdo al metal de aporte que se use, de acuerdo a la Tabla 1.9 se puede ver una clasificación de los fundentes en base a los metales de aporte. [2]



Tabla 1.9 Clasificación de fundentes con su respectivo metal de aporte para soldadura fuerte.

<b>Clasificación de fundentes con metales de aporte para soldadura fuerte</b>				
Clasificación AWS del fundente	Forma	Tipo de metal de aporte	Actividad del rango de temperatura	
			°C	°F
FB1-A	Polvo	BAISi	580-615	1080-1140
FB1-B	Polvo	BAISi	560-615	1040-1140
FB1-C	Polvo	BAISi	540-615	1000-1140
FB2-A	Polvo	BMg	480-620	900-1150
FB3-A	Pasta	B <sub>Ag</sub> and B <sub>CuP</sub>	565-870	1050-1600
FB3-C	Pasta	B <sub>Ag</sub> and B <sub>CuP</sub>	565-925	1050-1700
FB3-D	Pasta	B <sub>Ag</sub> , B <sub>Cu</sub> , B <sub>Ni</sub> , B <sub>Au</sub> , and B <sub>BCuZn</sub>	760-1205	1400-2200
FB3-E	Líquido	B <sub>Ag</sub> and B <sub>CuP</sub>	565-870	1050-1600
FB3-F	Polvo	B <sub>Ag</sub> and B <sub>CuP</sub>	650-870	1200-1600
FB3-G	Suspension	B <sub>Ag</sub> and B <sub>CuP</sub>	565-870	1050-1600
FB3-H	Suspensión	B <sub>Ag</sub>	565-925	1050-1700
FB3-I	Suspensión	B <sub>Ag</sub> , B <sub>Cu</sub> , B <sub>Ni</sub> , B <sub>Au</sub> , and B <sub>BCuZn</sub>	760-1205	1400-2200
FB3-J	Polvo	B <sub>Ag</sub> , B <sub>Cu</sub> , B <sub>Ni</sub> , B <sub>Au</sub> , and B <sub>BCuZn</sub>	760-1205	1400-2200
FB3-K	Líquido	B <sub>Ag</sub> and B <sub>BCuZn</sub>	760-1205	1400-2200
FB3-L	<i>Pasta dispensable</i>	<i>B<sub>Ag</sub> and B<sub>CuP</sub></i>	<i>565-870</i>	<i>1050-1600</i>
FB3-M	<i>Pasta dispensable</i>	<i>B<sub>Ag</sub> and B<sub>CuP</sub></i>	<i>565-925</i>	<i>1050-1700</i>
FB3-N	<i>Pasta dispensable</i>	<i>B<sub>Ag</sub>, B<sub>Cu</sub>, B<sub>Ni</sub>, B<sub>Au</sub>, and B<sub>BCuZn</sub></i>	<i>760-1205</i>	<i>1400-2200</i>
FB4-A	Pasta	B <sub>Ag</sub> and B <sub>CuP</sub>	595-870	1100-1600

(Fuente: AWS A5.31M/A5.31, (2012), p.p. 3)

De acuerdo a lo visto en la Tabla 1.9 podemos ver que usar metales de aporte de base BCuP y BAISi, se usarían para soldar tuberías de cobre, aluminio y cobre- aluminio se recomiendan fundentes FB3-A, FB3-C, FB3-E, FB3-F, FB3-G y FB4-A para soldar cobre y para soldar aluminio se sugiere FB1-A, FB1-B, FB1-C Y FB2-A, a continuación, en la Tabla 1.10 se presentan algunos de los fundentes que se recomiendan utilizar para soldar cobre, aluminio por medio de soldadura fuerte.

Tabla 1.10 Fundentes para soldadura fuerte para soldad cobre y aluminio.

Fundentes para soldadura fuerte						
Fundente	Forma	Metal de aporte	Composición	Aplicación	Rango de temperatura (°C)	Metales
						Base
FB1-A	Polvo	BAISi	Fluoruros Cloruros	Soldadura fuerte por antorcha y horno	560-615	Todas las aleaciones soldables de aluminio
FB1-B	Polvo	BAISi	Fluoruros Cloruros	Soldadura fuerte por horno	560-615	Todas las aleaciones soldables de aluminio
FB1-C	Polvo	BAISi	Fluoruros Cloruros	Soldadura fuerte por inmersión	540-615	Todas las aleaciones soldables de aluminio
FB3-A	Pasta	BAg, BCuP	Boratos Fluoruros	Se usa para la mayoría de aleaciones ferrosas y no ferrosas, excepto Al, bronce	565-870	Todos los metales ferrosos y no ferrosos soldables, excepto Al y Mg, carburos.
FB3-C	Pasta	BAg, BCuP	Boratos Fluoruros Boro	Similar al FB3-A, pero con capacidad de tiempo de calentamiento prologando mediante uso de aditivos desoxidantes	565-925	Todos los metales ferrosos y no ferrosos soldables, excepto Al y Mg, carburos
FB3-E	Líquido	BAg, BCuP	Boratos Fluoruros	Fundente líquido para soldar joyas o aumentar la atmosfera de la soldadura fuerte por horno	565-870	Todos los metales ferrosos y no ferrosos soldables, excepto Al y Mg, carburos
FB3-F	Polvo	BAg, BCuP	Boratos Fluoruros	Es similar al FB3-A pero en forma de polvo	650-870	Todos los metales ferrosos y no ferrosos soldables, excepto Al y Mg, carburos
FB3-G	Suspensión	BAg, BCuP	Boratos Fluoruros	Similar al FB3-C pero en forma de suspensión	565-870	Todos los metales ferrosos y no ferrosos soldables, excepto Al y Mg, carburos

(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY, Brazing Handbook, 5ª Edition, p.p. 106)

### 1.5.8 Separación de la junta

Un factor importante en el diseño de juntas de soldadura fuerte es la separación u holgura entre las superficies a soldar esto influye de manera importante en las propiedades mecánicas de una junta soldada, esto se aplica a todo tipo de juntas y bajo cualquier tipo de carga, el efecto que causa la holgura en la junta a soldar y en sus propiedades mecánicas para el uso que se requiera.

- El efecto mecánico del impedimento del flujo plástico del material de aporte por un metal base de mayor resistencia mecánica.
- Existe la probabilidad de que exista la presencia de pequeñas aberturas.
- Probabilidad de atrapamiento de escoria.
- La relación existente entre la separación u holgura y las fuerzas de adhesión capilar que gobierna la distribución en el metal de aporte.
- La cantidad de material de aporte que se requiere esparcir en el metal base se suelda por soldadura fuerte por difusión. [17]

La junta soldada no tiene imperfecciones como (restos de fundente, porosidades, área no soldada), la resistencia mecánica dependerá del espesor de la junta soldada.

En la Figura 1.10 se observa como la resistencia mecánica de la junta depende de la separación de las superficies a soldar.

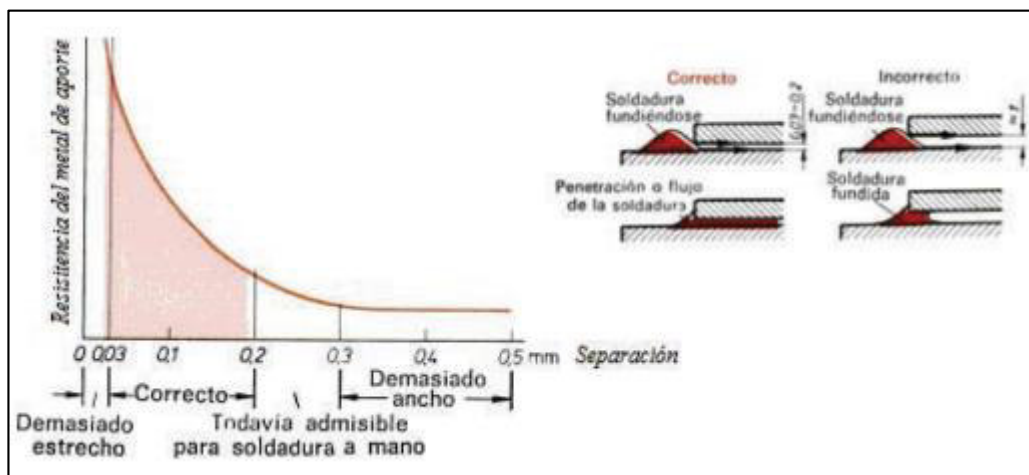


Figura 1.10 Influencia de la holgura de la junta soldada sobre la resistencia mecánica. (Fuente: [17])

Las juntas soldadas diseñadas con una menor holgura, poseen una mayor resistencia mecánica. Una menor separación favorece la acción capilar del metal de aporte. En la Tabla 1.11 se tiene las holguras recomendadas de los diferentes metales de aporte para soldadura indirecta.

Tabla 1.11 Holgura recomendada para uniones a la temperatura de soldadura fuerte.

Clasificación de los metales de aporte para soldadura fuerte según AWS	Pulgadas	milímetros	Separación u holgura de la unión
Grupo BAISi	0.000-0.002	0.000-0.051	Se usan en soldadura indirecta en horno de vacío
	0.002-0.008	0.051-0.20	Para longitudes de traslape menores a 6.35 mm
	0.008-0.010	0.20-0.25	Para longitudes de traslape mayores a 6.35 mm
Grupo BCuP	0.001-0.005	0.025-0.127	Para longitudes de juntas con uso de fundente menor a 25.4 mm
	0.007-0.015	0.178-0.38	Para longitudes de juntas con uso de fundente mayor a 25.4 mm
Grupo BAg	0.002-0.005	0.025-0.127	Se usa en soldadura indirecta con fundente
	0.000-0.002	0.000-0.051	Se usa en soldadura indirecta con atmósfera
Grupo BAu	0.002-0.005	0.025-0.127	Se usa en soldadura indirecta con fundente
	0.000-0.002	0.000-0.051	Se usa en soldadura indirecta con atmósfera
Grupo BCu	0.000-0.002	0.000-0.051	Se usa en atmósfera protectora
Grupo BCuZn	0.002-0.005	0.051-0.127	Para soldadura indirecta con uso de fundente.
Grupo BMg	0.004-0.010	0.102-0.254	Para soldadura indirecta con uso de fundente.
Grupo BNi	0.002-0.005	0.051-0.127	Aplicaciones generales (uso de fundente/atmósfera)
	0.000-0.002	0.000-0.051	Soldadura indirecta en atmósfera

(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY, Brazing Handbook, 5<sup>o</sup> Edition, p.p. 26)

### 1.5.9 Clasificación de los procesos de soldadura indirecta (fuerte) de acuerdo al sistema de calentamiento.

En el presente apartado hablaremos de los procesos de soldadura fuerte más utilizados en la industria, pero se describe detalladamente el proceso de soldadura fuerte por horno debido a que es el proceso que se utiliza en el presente proyecto de titulación y es uno de los más utilizados en la industria.

La clasificación de los procesos de soldadura indirecta va de acuerdo al sistema del calentamiento o la fuente de calor de donde se genera, para calentar las piezas esta puede ser obtenida de reacción química de un gas o también de forma eléctrica, todos los métodos de calentamiento son usados industrialmente y gozan de gran importancia en ciertas aplicaciones específicas, tenemos los siguientes métodos de calentamiento.

[2]

- Soldadura fuer por soplete o antorcha.

- Soldadura fuerte por horno
- Soldadura fuerte por inducción
- Soldadura fuerte por resistencia
- Soldadura fuerte por inmersión
- Soldadura fuerte por infrarrojo
- Soldadura fuerte por haz de electrones
- Soldadura fuerte por rayo laser
- Soldadura fuerte exotérmica

### 1.5.9.1 Soldadura fuerte por soplete o antorcha (TB)

El proceso de soldadura fuerte con soplete permite la unión de piezas utilizando un gas combustible que reacciona con el oxígeno, se usa acetileno, hidrógeno, gas natural o propano para producir la llama que calentara los componentes a unir. [1]

El proceso se lo realiza primero calentando de manera uniforme la unión a soldar con el soplete cuando este alcance la temperatura adecuada se deposita el metal de aporte en forma de varilla, alambre o también puede estar previamente colocado en la unión en forma de anillo, lamina, en forma cilíndrica, en forma de pasta, que son opciones aceptables en este proceso de soldadura, en la Figura 1.11 se observa el proceso.



Figura 1.11 Soldadura fuerte por antorcha de una tubería de cobre.  
(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY, Brazing Handbook, 5ª Edition, p.p. 238)

La soldadura fuerte con soplete se lo realiza en una atmósfera no controlada sin la necesidad de usar gas protector, a veces puede que requiera el uso de fundente dependiendo del metal de aporte y los materiales base a soldar.

Entre las ventajas del proceso soldadura fuerte con soplete tenemos las siguientes:

- Se puede fabricar el número de juntas que se requiera desde pequeñas cantidades hasta grandes cantidades manualmente y automatizado.
- Los equipos de este proceso son portátiles, fáciles de transportar por lo que facilita el trabajo en campo.
- El calentamiento de la antorcha es más práctico para ensambles complejos como unidades de aire acondicionado donde se requiere soldar múltiples juntas tubulares en distintos puntos, además que presenta un calentamiento focalizado en la junta a soldar.
- La variedad de uso de los gases combustibles dependiendo del costo, disponibilidad y calor que se requiera.

Entre las limitaciones que tiene este proceso de soldadura fuerte tenemos las siguientes:

- Este proceso de soldadura fuerte se lo realiza en un ambiente oxidante esto implica una limpieza posterior al proceso de la soldadura para eliminar residuos de fundente.
- Cuando se va a soldar grandes cantidades por medio de este proceso no resulta económico debido al excesivo tiempo de calentamiento del soplete que se necesitaría.
- No se pueden soldar todos los metales base como el titanio y Circonio con soldadura fuerte de soplete, ya que estos metales reaccionan con facilidad.
- Los metales de aportación que contienen cadmio no son aptos para la soldadura fuerte con soplete debido a que son perjudiciales para salud.

### **1.5.9.2 Soldadura fuerte por horno (FB)**

El proceso de soldadura fuerte por horno data desde 1920 y se comercializó por primera vez alrededor de 1930 en hornos discontinuos que tenían atmósferas exotérmicas y endotérmicas esto fue un gran avance hacia la soldadura fuerte por horno sin fundente.

La soldadura fuerte por horno es un proceso para unir piezas metálicas pequeñas o de difícil acceso a la unión, el calentamiento se da en la cámara del horno básicamente, el metal de aporte se coloca previamente en la junta a soldar puede estar en forma de alambre, láminas, limaduras, polvo, pasta o preformas y también el fundente (si se emplea), este proceso es apropiado para la producción media y alta de piezas, hay tres tipos de hornos, horno con cámara de aire, horno de atmósfera controlada y de vacío, el primer horno mencionado por lo general es del tipo horno discontinuo y los de dos últimos pueden ser hornos discontinuos y continuos. [1]

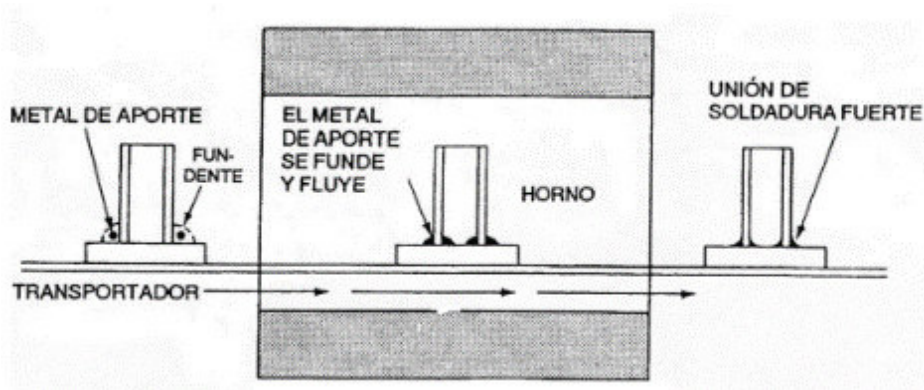


Figura 1.12 Descripción del proceso de soldadura fuerte por horno.  
(Fuente: [15])

Las piezas a soldar deben ser autoajustables o fijas y ensambladas, el metal de aporte y fundente debe estar previamente colocado cerca en las juntas, luego se calienta en el interior del horno hasta que las piezas alcancen la temperatura de soldadura fuerte, se mantiene un tiempo establecido y se efectúa la unión, en la Figura 1.12 podemos ver un esquema del proceso, luego de esto se enfría lentamente bajo la acción de una atmósfera controlada o al aire libre dependiendo el caso. [1]

El tiempo del proceso de soldadura depende del espesor de las piezas a soldar y de la carga total que se vaya a soldar, el control de la temperatura y el tiempo son esenciales en este proceso, el tiempo de soldadura tiene que ser mínimo para que metal de aporte fluya hacia al interior del espacio de la junta a soldar, con la finalidad de impedir demasiada interacción entre el metal de aporte y el metal base, por lo general se necesita de 1 a 4 minutos a la temperatura de soldadura fuerte del metal de aporte para obtener la unión soldada. [2]

Además del control de la temperatura en la soldadura fuerte por horno se debe controlar el ambiente donde se sueldan el conjunto específicamente la atmósfera es importante en el proceso, la temperatura del horno debe ser más alta que la temperatura de fusión del metal de aporte que se utilice, la velocidad de calentamiento del horno deberá acoplarse de acuerdo al número de juntas a soldar para que alcancen la temperatura al mismo tiempo, el uso de la atmósfera puede ser inerte o reductora, algunos hornos son de vacío, esto permite la eliminación del uso del fundente.

Entre las ventajas de este proceso se tiene, la gran capacidad de soldar un alto número de piezas y a la vez varias uniones de un mismo conjunto al mismo tiempo, esto implica un bajo costo, otra ventaja es que elimina el proceso de limpieza post soldeo esto es gracias a la atmósfera protectora de acuerdo al horno que se use. [2]

El principal obstáculo de este tipo de proceso es la alta inversión inicial, e implementación de este proceso, ya que requiere una gran demanda energética para calentar las piezas, esto puede perjudicar de manera indirecta a los metales que no pertenecen a la junta.

#### **1.5.9.2.1 Descripción del proceso de soldadura fuerte por horno.**

El proceso de soldadura fuerte por horno es un proceso en el que los componentes del conjunto a soldar son ensamblados, como se ha mencionado anteriormente el metal de aporte es previamente colocado luego se cargan en el horno. Dependiendo del tipo de horno se purga con una atmósfera neutra o reductora, o se evacua el aire y se calienta a la temperatura del proceso, generalmente esta se encuentra por el encima de la temperatura de fusión del metal de aporte, pero a su vez por debajo del punto de fusión de los metales base a soldarse. Una vez efectuado el proceso, el conjunto soldado se enfría a una velocidad adecuada para minimizar la distorsión térmica para poder tener una junta soldada con propiedades que satisfagan los requerimientos. Todo este ciclo está diseñado para producir la fusión y solidificación del metal de aporte requerido para los unir los elementos sin fundir o dañar los metales base.

El principal elemento de este proceso es la cámara del horno, en el proceso suelen ocurrir reacciones químicas entre el gas de la atmósfera protectora y el conjunto a soldar, esto favorece a la eliminación de impurezas y óxidos generados en las superficies de las piezas, esto permite que el metal de aporte fluya de manera libre, sin obstáculos. Las juntas obtenidas de este proceso de soldadura poseen características como gran resistencia mecánica y hermeticidad, en este proceso los elementos se calientan de manera uniforme en todo el conjunto, ayudando a que no haya distorsión alguna. [2]

#### **1.5.9.2.2 Clasificación de los procesos de soldadura indirecta por horno**

La clasificación del proceso de soldadura indirecta por horno va de acuerdo a dos aspectos básicamente: de acuerdo a la forma de producción existen dos tipos de hornos que son hornos discontinuos que procesan lotes de trabajo de mediana producción y hornos continuos que usan banda transportadora estos logran un mayor volumen de producción.

El otro aspecto es la atmósfera protectora que se da al proceso mientras dura el calentamiento entre las atmosferas que suelen tener es aire, atmosfera controlada (gases inertes) y de vacío. [2]



### **1.5.9.2.3 Por la forma de producción**

#### **1.5.9.2.3.1 Horno continuo**

El conjunto a soldarse se transporta a largo de un túnel a través de una banda transportadora en el interior del horno donde se efectúa el precalentamiento, la unión y el posterior enfriamiento, esto ocasiona que existan diferentes zonas de temperatura, aquí la velocidad se debe controlar para proporcionar el tiempo apropiado a la temperatura de soldadura fuerte.

Entre las ventajas que presenta este tipo de horno es que se tiene una alta producción, por lo general no se usa fundente por ello no requiere limpieza posterior y cuando las piezas se van a soldar en un horno en vacío no se requiere una gran limpieza una desventaja de este equipo es que tiene un alto costo no tanto, así como los hornos en vacío. [2]

#### **1.5.9.2.3.2 Horno discontinuo o por lotes**

En un horno discontinuo todos los conjuntos a soldar son cargados de forma manual en el horno, la carga se lo realiza desde la parte superior, lateral o inferior del horno, los tiempos de ciclo son de 15 aproximadamente, esto ayuda a que puedan producir cientos de soldaduras al día. El tipo más simple de horno discontinuo es el horno tipo mufla, el suministro de calor se puede dar por combustión de un gas, una resistencia eléctrica o la combinación de estos.

Algunas de las ventajas que presentan estos hornos tenemos que se pueden soldar piezas de gran tamaño que, en un horno continuo, no se suele usar fundente por lo que no requiere limpieza posterior, entre las desventajas que presenta este tipo de horno, las etapas de precalentamiento, de soldadura y enfriamiento duras más, es un proceso energético deficiente y no es recomendable para altas temperaturas. [2]

### **1.5.9.2.4 Por la atmósfera protectora**

#### **1.5.9.2.4.1 Horno de atmósfera protectora**

En este caso se utiliza atmósferas de gases reductores como son (nitrógeno, óxido de carbono, hidrógeno, metano, entre otros), en lugar de fundentes, esto evita que se generen óxidos, se usan tanto para hornos continuos y discontinuos.

Entre algunas de las ventajas de este proceso se tiene una unión soldada limpia y de buen acabado superficial por lo que no requiere acciones posteriores al proceso, no requiere el uso del fundente en la mayoría de casos, entre las desventajas tenemos que

se debe tener un estricto control de los factores de la atmósfera protectora, los equipos suelen ser costosos, se debe tener cuidado en los parámetros de temperatura y tiempo de trabajo. [2]

#### **1.5.9.2.4.2 Horno de vacío**

En este proceso el vacío cumple la misma función que una atmósfera protectora mantener limpias las piezas y evitar las posibles reacciones del oxígeno presente en el aire con los metales base que se estén soldando, también permite que el metal de aporte fluya de manera correcta, e igualmente no se requiere el uso del fundente.

Las ventajas que presenta este proceso son que se pueden soldar metales reactivos como son el Aluminio y el Titanio, además provee un control minucioso de la etapa de calentamiento, al igual que en los anteriores procesos, las desventajas son: el equipo es costoso, las piezas deben estar libres de impurezas antes de soldarse, no se puede soldar materiales volátiles, por lo general se sueldan piezas pequeñas. [2]

#### **1.5.9.2.4.3 Horno al aire**

Este proceso en cambio es necesario la aplicación de fundente de las piezas que se vayan a soldar para evitar la oxidación de los metales base, una vez untado el fundente en las superficies de la unión, las piezas se introducen en el horno para efectuar la soldadura.

Entre las ventajas que presenta este proceso es simple y económico, además que se pueden soldar piezas de gran volumen, la principal desventaja es la oxidación a la que exponen las piezas a soldarse, además que si el proceso se alarga el fundente pierde su efectividad. [2]

### **1.5.9.3 Tipos de hornos en soldadura fuerte**

Un horno característico consta de cámaras de calentamiento y enfriamiento, la fuente de energía, control de temperatura y presión en ciertos equipos, sistema auxiliar, el generador de atmósfera para proveer protección en el horno o un su caso un dispositivo de vacío.

La temperatura se controla por medio de un potenciómetro que esta acoplado a termopares y válvulas de control, la mayor parte de hornos el calor se genera por resistencia eléctrica, donde se emplea elementos como carburo de silicio, níquel-cromo o algún elemento refractario como (Molibdeno, Tantalio o Wolframio), en caso de que el calor se genere por la combustión de un gas, la flama no debe caer directamente sobre las piezas. [2]

Los hornos que se utilizan en la soldadura fuerte son los siguientes:

- Hornos discontinuos, ya sea con atmósfera protectora o con aire.
- Hornos continuos, ya sea con atmósfera protectora o con aire.
- Hornos de retorta con atmósferas protectora.
- Hornos de vacío.

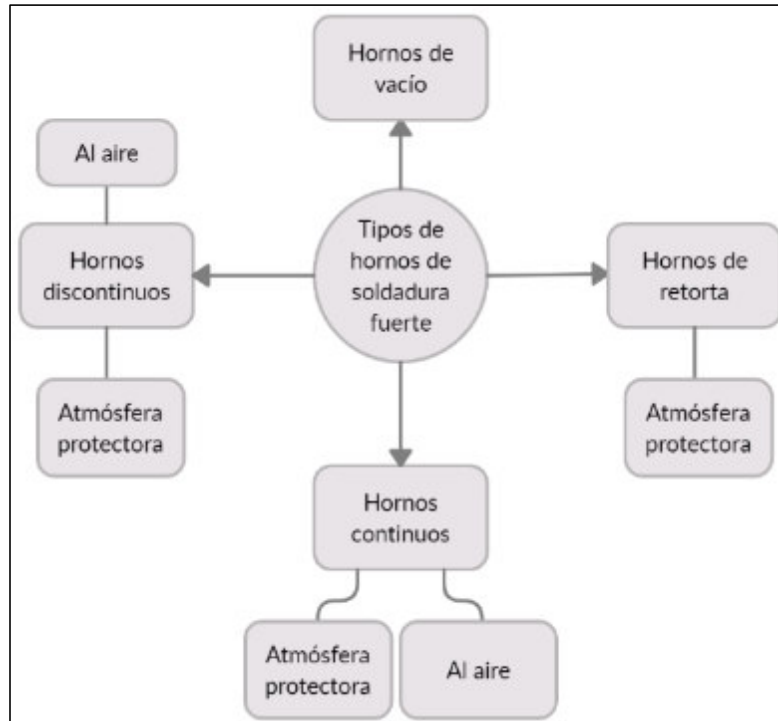


Figura 1.13 Tipos de hornos del proceso de soldadura fuerte.  
(fuente: propia)

### 1.5.9.3.1 Horno discontinuo o por lotes

Como se ha mencionado anteriormente estos tipos de hornos se utilizan para soldar piezas por lotes o de forma discontinua, cada conjunto a soldar se carga de manera individual, la capacidad de los hornos se distribuye por etapas o ciclos, un ciclo dura de 15 a 20 minutos, esto va de acuerdo al tipo de horno que se use, la masa de los elementos a soldar, si están requieren precalentamiento o no, antes de meterlas al horno. Estos hornos presentan un proceso simple, económico y donde se pueden realizar varias piezas al día. Los hornos por lotes van de acuerdo a la disposición de la carga que son arriba, lateral o por debajo, en cambio cuando las piezas son de tamaño considerable o son demasiadas piezas el horno baja hacia el lote, este se denomina horno de campana. Los hornos discontinuos que usan la combustión de un gas requieren el uso del fundente, en cambio en la mayoría de hornos discontinuos que

funcionan eléctricamente suelen poseer un sistema de calefacción para tener una atmósfera protectora. [2]

En la Figura 1.14 podemos observar algunos ejemplos de hornos discontinuos en la Figura 1.14 (a) tenemos horno tipo cámara de carga vertical y en la Figura 1.14 (b) tenemos el horno tipo mufla, el más sencillo de los hornos discontinuos.



Figura 1.14 Ejemplos de hornos discontinuos.

(fuente: <https://www.directindustry.es/prod/carbolite-gero/product-28278-1780269.html>)

### 1.5.9.3.2 Horno continuo

En esta clase de hornos trabajan de manera continua para ello utilizan mecanismos de bandas, bandejas y otros elementos donde se depositan las piezas a soldar, todos estos elementos suelen estar conectados a un sistema de movimiento para poder trasladar las piezas, también suelen accionarse por un sistema de rodillos, se denominan bandas transportadoras y se mueven a lo largo del horno atravesando sus diferentes zonas, la fuente de energía para generar el calor necesario se la obtiene de la combustión de un gas, o calefacción eléctrica, estos clase de equipos tienen tres zonas de trabajo que son:

- Zona de precalentamiento, donde los conjuntos o piezas a soldar se precalientan a una temperatura uniforme.
- Zona de soldadura, esta zona está a mayor temperatura, aquí es donde se efectúa el proceso de soldadura.
- Zona de enfriamiento, esta última zona es donde se enfría los conjuntos ya soldados aquí suelen estar bajo una atmósfera, hasta enfriarse a la temperatura ambiente para luego ser retirados del horno, logrando uniones soldadas limpias y libres de óxidos.

El éxito de este tipo de hornos depende de la masa de los conjuntos, la velocidad de la banda transportadora y la temperatura establecida para efectuar el proceso de soldadura fuerte correcto. [2]

Existe dos tipos de hornos continuos los de banda o cinta metálica y de los rodillos refractarios:

#### **1.5.9.3.2.1 Horno continuo de banda transportadora de cinta metálica**

Este horno tiene ciclos de calentamiento y tiempo de permanencia son automáticos, además de ser un proceso de alta capacidad de producción y exactitud.

#### **1.5.9.3.2.2 Horno continuo con sistema de rodillos refractarios**

Este tiene características que es útil para cargas y dimensiones considerables, como todo horno continuo sirve para altas producciones, en la Figura 1.15 tenemos un horno continuo.



Figura 1.15 Horno continuo de cinta transportadora.  
(fuente: <https://www.directindustry.es/prod/solo-swiss-borel-swiss/product-18259-1893291.html>)

#### **1.5.9.3.3 Horno de retorta**

Los hornos de retorta a igual que hornos continuos son hornos con un recipiente interior (retorta) están hechos de una aleación resistente al calor. La retorta se sella del aire exterior y demás contaminantes para evitar la contaminación de la atmósfera protectora que contenga la cámara, existen diferentes tipos de hornos de retorta como son horno de retorta rotatorio, de retorta con cámara de vacío, retorta vertical, algunos de estos poseen cámaras de precalentamiento, de soldadura y enfriamiento. [2]

Una vez cargada el lote dentro de la cámara, se sella y se procede a purgar para no contaminar la atmósfera protectora (generalmente hidrógeno), se realizan los ciclos de precalentamiento, soldadura y enfriamiento en las distintas cámaras dependiendo del horno retorta que se utilice, una vez finalizado el proceso se espera a una temperatura de enfriamiento oportuna y se retira los conjuntos soldados y se vuelve a repetir el ciclo. [2]

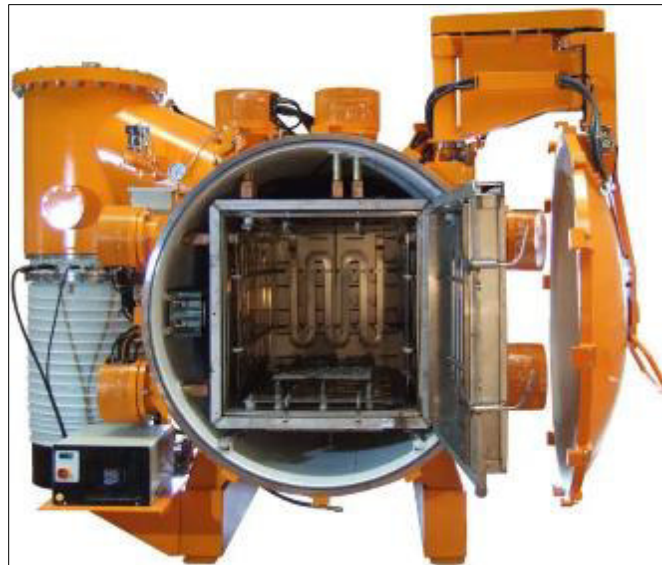


Figura 1.16 Horno de retorta para soldadura fuerte de aluminio.  
(fuente: <https://www.bmi-fours.com/es/productos/hornos-baja-temperatura/ba5-soldadura-aluminio.html>)

#### **1.5.9.3.4 Horno de vacío**

Los hornos de vacío son del tipo discontinuo o por lote, en la cámara del horno se genera el vacío durante el proceso de la soldadura, esta generación de vacío suele ser durante todo el proceso.

Los hornos suelen poseer configuraciones para la carga de los lotes están pueden ser carga lateral, superior e inferior, el área de soldeo suele ser rectangular para uno de carga lateral, mientras para uno de carga inferior y superior suele ser un área circular. [2]

Existen dos tipos de hornos de vacío: los de pared fría y de pared caliente.

##### **1.5.9.3.4.1 Horno de vacío de pared fría**

Estos hornos presentan una configuración de doble pared y su refrigeración es por agua, son los más populares para el uso en la soldadura fuerte poseen configuración de carga horizontal, vertical y lateral. Pueden alcanzar temperaturas de hasta 2205 [°C] y el vacío generado puede llegar al orden de 0.00013 [MPa].

El horno de vacío de pared fría es un horno completamente aislado en el que la carga de trabajo se calienta directamente por radiación. La radiación es generada por elementos calefactores eléctricos que están alrededor de la carga de trabajo. Los materiales pueden estar hechos de metales como molibdeno, tungsteno o de materiales no metálicos como carbono, grafito o carburo de silicio. [2]

El blindaje de calor se fabrica con diversas capas de láminas de molibdeno, níquel, acero inoxidable o tantalio el tipo de material depende de la capacidad del horno el molibdeno se usa para el escudo interior del horno, este se refuerza con acero inoxidable. En el caso del aislamiento térmico en los hornos se emplea material de aislamiento fibroso como alúmina y grafito esto ayuda aún mejor aislamiento y minimizar la susceptibilidad a la contaminación. [2]

El principal obstáculo de estos equipos es la alta inversión inicial, sin embargo, la versatilidad, la seguridad y la calidad que ofrece el horno de vacío en las juntas soldadas obtenidas en estos equipos son algunas de las ventajas que ofrece el horno de vacío.

Para generar el vacío se usa un sistema de cuatro etapas con una bomba mecánica, sopladores en cascada, bomba de retención y difusión la cual debe generar un vacío del orden  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  [Pa]. Bombear un vacío adecuado y mantenerlo durante el proceso de soldadura sin fugas es esencial durante el ciclo de soldadura, esto también depende de los materiales que se vaya soldar. [2]



Figura 1.17 Horno de vacío.

(fuente: <https://www.directindustry.es/prod/sabe-forni/product-191048-1950682.html>)

#### **1.5.9.3.5 Ventajas y limitaciones del proceso de soldadura indirecta por horno**

Como he visto el proceso de soldadura fuerte por horno es muy versátil y existen diversos tipos de hornos para aplicaciones específicas y como todo proceso tiene ventajas y limitaciones entre las cuales destacan las siguientes:

#### Ventajas

- Los costos por unión soldada son relativamente bajos tanto para hornos continuos como discontinuos debido a su alta capacidad de producción.
- Debido a sus altas prestaciones para mediana y altas producciones pueden reemplazar a otros procesos de soldadura fuerte, especialmente los de hornos continuos.
- Brindan una distribución de la temperatura homogénea en todo el conjunto a soldar.
- En este proceso se pueden soldar varias uniones de un conjunto en una sola operación.
- Debido al uso de atmósferas protectoras, se elimina la post limpieza después del proceso, las uniones soldadas poseen un buen acabado superficial.
- La mayoría de equipos son automatizables para un mejor control del proceso.

#### Limitaciones

- La inversión inicial del equipo es alta.
- El precio es elevado por unión soldada cuando se realiza pocas unidades.
- Se debe tener un buen diseño de las uniones.
- Elevado consumo de energía por parte de los equipos.
- Se debe tener cuidado en el ciclo de calentamiento ya que si se lo ejecuta de manera incorrecta puede afectar a las propiedades de las piezas a soldar.
- Se debe tener mayor control en el mantenimiento de estos equipos para que cumplan las condiciones de servicio y operación.

#### **1.5.9.3.6 Aplicaciones del proceso de soldadura fuerte por horno**

Las aplicaciones de este proceso van de acuerdo al horno requerido cada uno se utiliza para aplicaciones particulares entre las cuales tenemos las siguientes:

##### Horno de atmósfera protectora

- Para hornos continuos se utilizan bastante para soldar acero al carbono con aleaciones de cobre.
- Para hornos por lotes se usan en la industria eléctrica y electrónica.



Horno de vacío

- En la industria aeroespacial y nuclear, para soldar metales reactivos.
- Se sueldan metales como acero inoxidable, aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio, níquel, cromo, entre otros.
- Metales resistentes a la corrosión y a altas temperaturas.

Horno con atmosfera de aire

- Se emplean para pequeñas producciones por lo general trabajan en un rango de bajas temperaturas.

#### 1.5.9.4 Soldadura fuerte por inducción (IB)

El calentamiento en este proceso se consigue gracias al flujo de una corriente eléctrica alterna (CA) inducida a través de una bobina de alta frecuencia por la cual circula, las piezas se colocan dentro o cerca de la bobina como podemos observar en la figura 1.18 el proceso de soldadura fuerte por inducción.



Figura 1.18 Proceso de soldadura fuerte por inducción, ideal para pequeñas piezas.  
(Fuente: Revista Metal actual, Brazing, Uniones de Calidad, p.p.49)

El material de aporte es colocado previamente en la unión a soldar, se tiene cuidado en el diseño de la junta y en la bobina para garantizar que los elementos de la junta a soldar se calienten de manera uniforme y simultánea, se usa fundente a excepción de cuando se usa atmósfera que cumpla la función del fundente.

Se usan dos tipos de generadores que son de estado sólido y osciladores de tubos de vacío, los valores de las frecuencias del primero oscilan entre 10 a 485 [kHz] y también existen osciladores que trabajan en alta frecuencia hasta los 15 [MHz] los de osciladores de tubo trabajan en un rango de 150 A 450 [kHz] mientras los osciladores de tubo de alta frecuencia trabajan en rango de 2 a 8 [MHz], para ambos tipos de generadores los que

trabajan en baja frecuencia [kHz] son para aplicaciones de soldadura fuerte y especiales en cambio para los de alta frecuencia [MHz] se usan para soldar elementos de sección transversal muy pequeñas. [2]

Existen diferentes diseños de bobinas de inducción de acuerdo a la aplicación requerida en la figura 1.19 podemos ver algunas de las configuraciones de este elemento principal, figura (A) es una bobina externa, la (B) es una bobina tipo plato, la (C) una bobina móvil, la (D) es una bobina dividida, la (E) es bobina de contacto y la (F) es una bobina interna, todas correspondientes a la figura 1.19.

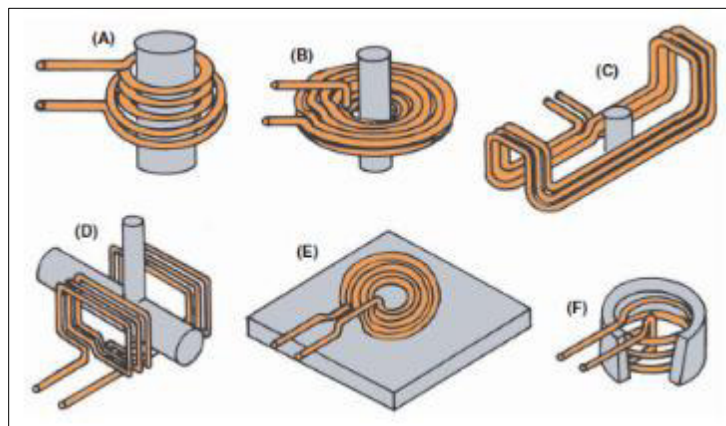


Figura 1.19 Esquemas de diseños básicos de bobinas de inducción para soldar tubería de cobre.

(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY, Brazing Handbook, 5<sup>o</sup> Edition, p.p. 263)

Entre las ventajas que ofrece la soldadura fuerte por inducción tenemos las siguientes:

- Proporciona un calentamiento rápido, uniforme y localizado.
- Existe un mayor control del calor en el proceso.
- Este proceso presenta adaptabilidad al procesamiento de la línea de producción.
- Producción de juntas soldadas uniformes, limpias y precisas.
- Es un proceso con una tecnología no contaminante, limpia y segura.

En cuanto a las limitaciones de la soldadura fuerte por inducción tenemos las siguientes:

- No se puede soldar elementos de geometría compleja.
- Para soldar este proceso se requiere que los elementos tengan un ajuste perfecto para que se tenga una buena junta soldada.
- Se requiere una inversión inicial alta.
- Se necesita personal con conocimientos especializados.

#### 1.5.9.5 Soldadura fuerte por resistencia (RB)

En la soldadura fuerte por resistencia el calor generado se consigue de la resistencia al flujo de la corriente eléctrica que fluye en un circuito donde los componentes forman parte del mismo a diferencia de la soldadura fuerte por inducción. El calor generado en el proceso se desarrolla en los componentes debido a los electrodos que entran en contacto con los componentes a unir, de igual manera el metal de aporte se coloca previamente en la junta a soldar o en algunos casos se alimenta durante el proceso. La aplicación de fundente es primordial ya que deben ser húmedos para que actúen de manera correcta si son secos no permite el paso de la corriente debido a que actúa como aislante. [2]

Los elementos a unir deben estar limpios de igual manera se ensambla todos los componentes, se fija el metal de aporte aplicando presión, una vez iniciado el proceso la corriente fluye hasta un rojo vivo y empiezan a fundirse, produciéndose la unión. [2]



Figura 1.20 Soldadura fuerte por resistencia de un elemento de un estator.  
(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY, Brazing Handbook, 5<sup>o</sup> Edition, p.p. 338)

Tanto para los procesos de soldadura fuerte de resistencia e inducción logran ciclos de calentamientos más eficientes y su uso es más para unir elementos relativamente pequeños donde se requiere un calentamiento rápido y localizado, este proceso usa principalmente en productos eléctricos que por general se usan metales base de cobre y plata. [2]

Como hemos visto todos los procesos de soldadura fuerte son importantes, algunos tienen aplicaciones específicas y este proceso tiene sus ventajas y limitaciones entre las cuales tenemos:

Ventajas

- El proceso de soldadura fuerte por resistencia es económico cuando se tiene que soldar bastantes uniones pequeñas un equipo grande (motor, rotor, estator), gracias a que se tiene un calentamiento localizado.
- Este proceso es útil para aplicar en áreas pequeñas, por lo general al tamaño del electrodo, esto ayuda a un calentamiento rápido y localizado que se limita al área de la junta, evitando un calentamiento excesivo en los demás componentes adyacentes de la junta.
- Es un proceso en que la corriente y el tiempo de duración de la misma se puede controlar con mayor precisión.
- Es un proceso en el que se puede tener altas tasas de producción con un equipo con resistencia estándar y personal medianamente capacitado.
- Los equipos son portátiles facilitando las operaciones del ensamblaje del conjunto por ende la reparación en campo es sencilla.

#### Limitaciones

- Los componentes a soldar al menos uno debe ser un elemento eléctricamente conductivo.
- Los conjuntos grandes que tengan una área o espesor considerables no es factible soldar debido a que se necesitaría una gran corriente para poder calentarlo y alcanzar la temperatura de soldadura fuerte, y no se lograría un calentamiento uniforme.
- La junta que tenga elementos mecánicamente frágiles presenta dificultad de mantenerlos en la posición de soldadura debido a que no poseen la resistencia suficiente a la temperatura de soldadura fuerte para poder soportar la presión del electrodo.
- Debido a la gran diferencia entre la temperatura del electrodo y junta a soldar, como depende del calor que genera el electrodo para que sea conducido a la junta, este proceso se limita a bajas temperaturas de trabajo.

#### **1.5.9.6 Soldadura fuerte por inmersión (DB)**

El calentamiento en la soldadura fuerte por inmersión se consigue a través de la inmersión, existe dos métodos básicos que son inmersión en metal fundido e inmersión en sal fundida en ambos se sumergen el conjunto a soldar en un recipiente de calentamiento, y la temperatura del baño está por debajo de la temperatura de solidus del metal base, pero por encima de la temperatura de liquidus del metal de aporte. [2]

En el método de sal fundida, es una mezcla que contiene como ingredientes fundentes y el metal de aporte se coloca previamente en el ensamble en cambio el baño de metal fundido como su nombre lo indica tiene al metal de aportación en estado líquido donde la acción capilar actúa una vez que el ensamble se haya sumergido, en cambio el método de metal fundido existe dos formas de sumergir las piezas a fundir, la primera es que el ensamble se recubra con fundente rociando o sumergiendo las piezas a soldar y una vez seco el fundente se coloca en el baño de metal de aporte fundido, la otra manera primero sumergir el conjunto en un baño de fundente fundido y posterior en el de metal de aporte fundido, ambas técnicas el metal de aporte fluye hacia las juntas ensambladas debido a la acción capilar cubriendo en su totalidad al conjunto a soldar. [2]

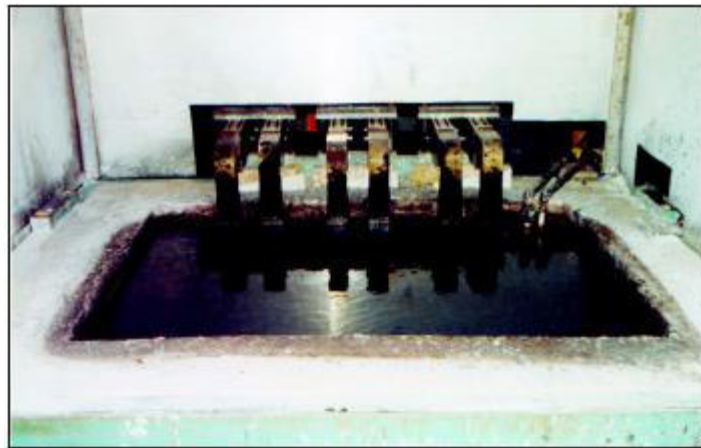


Figura 1.21 Proceso de soldadura por inmersión por el método de sal fundida.  
(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY, Brazing Handbook, 5ª Edition, p.p. 317)

La aplicación del método de metal fundido se usa principalmente en la industria electrónica donde se sueldan componentes pequeños y en cambio el método de sal fundida se usa ampliamente para soldadura fuerte de aluminio, cobre y aleaciones ferrosas, los parámetros importantes en este proceso son el tiempo de inmersión y la temperatura. [2]

Entre las ventajas y limitaciones que tiene el proceso de soldadura fuerte por inmersión de sal fundida por ser el más usado, y se utiliza principalmente en la industria electrónica entre las cuales tenemos las siguientes:

#### Ventajas

- Las juntas que se obtienen son resistentes, presentan cualidades estéticas aceptables.
- Se puede soldar gran cantidad de uniones en un conjunto de manera simultánea.

- Se puede soldar metales como el aluminio de espesores bastante delgados que van desde los 0.05 [mm] a 63.5 [mm] de espesor.
- Las velocidades de calentamiento son rápidas y uniformes.
- Las superficies metálicas están protegidas de la oxidación durante el proceso gracias a la lámina de sal.
- La velocidad de calentamiento en horno de baño de sal es 4 a 5 veces más rápido que un horno atmosférico, esto se traduce en tener ciclos de tiempo más cortos y calentamiento más rápido.

Limitaciones:

- Algunas de las desventajas que presenta el proceso se contrarresta con un buen diseño de juntas, un correcto ensamblaje y un adecuado control de los parámetros del proceso.
- Para ensamblajes que flotarían debido a su geometría, o algún otro factor es difícil que se suelde.
- Los equipos de soldadura fuerte por inmersión deben mantenerse a la temperatura de funcionamiento y requieren un mantenimiento periódico para que el proceso sea lo mejor posible.
- Se requiere una limpieza posterior al proceso de soldadura fuerte de la sal que se queda en los elementos soldados.

#### **1.5.9.7 Soldadura fuerte por infrarrojo (IRB)**

La soldadura fuerte por infrarrojo emplea el calor que es producido por la radiación infrarroja para poder efectuar la soldadura, se usa una lámpara infrarroja de cuarzo de alta intensidad, ciertos dispositivos son capaces de generar hasta los 5000 [W] de energía en forma de calor, este es un proceso de soldadura fuerte reciente utilizado hasta el desarrollo de la lámpara de cuarzo de infrarrojo. [2]

La energía que emite la lámpara es absorbida por el conjunto a soldar. El calor varía con el cuadrado de la distancia entre el conjunto a soldar y la fuente, no necesita que las lámparas sigan al contorno del ensamble a soldar para que el calor se distribuya de mejor manera se usan reflectores que concentran el calor. Se puede usar campanas de vidrio o de retorta que permita que haya un proceso en vacío o también de atmósfera controlada. [2]

### 1.5.9.8 Soldadura fuerte por difusión (DFB)

La soldadura fuerte por difusión es una modificación del proceso de soldadura fuerte normal, este cambia algunas propiedades de la junta soldada como aumento de la resistencia de la junta, aumentar la ductilidad, reducir la dureza del metal de aporte y aumentar la temperatura de fusión todo esto a la junta soldada. [2]

El termino de soldadura fuerte por difusión es definido por la AWS (Sociedad americana de soldadura) como “un proceso de soldadura fuerte donde existe coalescencia de metales calentándolos a la temperatura de soldadura fuerte.

La soldadura fuerte por difusión difiere de la soldadura por difusión en que la primera usa un metal de aporte líquido para soldadura fuerte en la unión donde el metal de aporte se esparce por el metal base, en cambio en la soldadura fuerte por difusión no existe fase líquida, este proceso de soldadura es un proceso en estado sólido en donde la difusión se produce entre dos metales base.

Durante el proceso de soldadura fuerte por difusión, el metal de aporte se distribuye por toda junta a través de la acción capilar como se aprecia en la Figura 1.22, el metal de aporte de soldadura fuerte se difunde posteriormente con el metal base a una temperatura adecuada y tiempo necesario para obtener una junta soldada con propiedades físicas apropiadas. Durante el ciclo de calentamiento de soldadura fuerte por difusión, el metal de aporte se solidifica isotérmicamente a la temperatura de soldadura fuerte por difusión. [2]

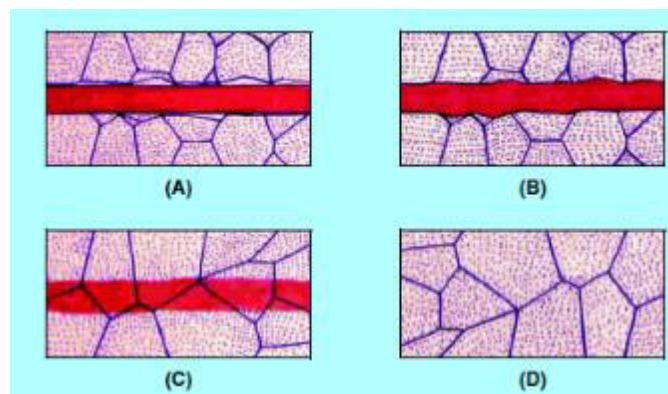


Figura 1.22 Secuencia de la soldadura fuerte por difusión.  
(Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY, Brazing Handbook, 5º Edition, p.p. 343)

Las variables principales de la soldadura fuerte por difusión son la temperatura soldadura fuerte, el tiempo de permanencia del conjunto a soldarse a la temperatura de soldadura fuerte, la cantidad de metal de aporte de soldadura fuerte que va en la junta

(holgura) empleada para efectuar el proceso y el grado de solubilidad entre metal de aporte y metal base, la velocidad de difusión es directamente proporcional al tiempo a la temperatura de difusión, al grado de solubilidad entre metal base y metal de aporte, a la temperatura de difusión es inversamente proporcional a la cantidad de metal de aportación de soldadura (espacio libre de la junta). [2]

La mayoría de metales base se pueden soldar por el proceso de soldadura fuerte por difusión, la principal condición que se requiere para soldar de manera óptima por este proceso es encontrar un metal de aporte de soldadura fuerte que posea una gran solubilidad entre el metal base a soldar, algunas de las combinaciones de metal de aporte- metal base más destacadas en este proceso tenemos las siguientes:

- Metal base de cobre soldado con un metal de aporte base de plata (BAg).
- Aceros de bajo carbono y aceros de baja aleación soldados con metal de aporte de cobre para soldadura fuerte (BCu).
- Acero inoxidable 410 soldado con metal de aporte de cobre o níquel (BCu, BNi).
- Aceros inoxidable serie 300 soldado con metal de aporte de cobre o níquel para soldadura fuerte (BCu, BNi).
- Níquel y otros metales aleados con níquel soldado con metal de aporte de níquel (BNi).

Existen más combinaciones entre metal de aporte-metal base para soldadura fuerte que también sirven para efectuar el proceso de soldadura fuerte por difusión.

### **1.5.9.9 Otros procesos de soldadura fuerte**

En este apartado mencionaremos de manera breve algunos procesos de soldadura fuerte donde usan cualquier fuente de calor que pueda subir la temperatura de todos los elementos que forman el conjunto para producir la unión en la junta soldada, factores como el costo, la tasa de producción y calidad de la junta son importantes a la hora de seleccionar el mejor proceso para una determinada aplicación, algunos de estos procesos son prácticos comercialmente, de hecho algunos no se usan mucho y han sido relegados debido a que son procesos poco eficientes, entre estos procesos tenemos soldadura fuerte exotérmica, de haz de electrones, por rayo láser, soldadura fuerte en flujo, soldadura fuerte en bloque, a continuación describiremos algunos de los procesos mencionados anteriormente.

#### **1.5.9.9.1 Soldadura fuerte exotérmica (EXB)**

En un proceso exotérmico es donde se desprende calor de una reacción química, este proceso de soldadura utiliza un compuesto exotérmico como fuente de calor para fundir



el metal de aporte, los compuestos que se suelen utilizar son a base de circonio, aluminio y óxidos de cromo y hierro, estos materiales cuando desprenden el calor sirve para calentar tanto el metal base y metal de aporte y llevarlo a la temperatura de soldadura fuerte requerida.

La selección de una mezcla exotérmica adecuada para que no produzca fases metálicas o cerámicas que afecten a la junta, también que no ataque al metal base, también debe proteger la unión soldada con una cantidad mínima de material exotérmico. [2]

Algunas ventajas y limitaciones que presenta este proceso las mencionamos a continuación:

Ventajas:

- El calor que se transfiere al conjunto a soldar es localizado, eliminado así tratamientos térmicos posteriores a la soldadura, distorsión de las piezas y oxidación.
- El tiempo que dura el proceso es muy corto que puede ser desde los 20 hasta los 30 segundos, lo que ayuda que no haya reacciones indeseables que se relacionan con el tiempo y la temperatura.
- El equipo de soldadura fuerte exotérmica es de fácil transportación lo que permite soldar juntas de sistemas grandes y complejos.

Limitaciones:

- Si bien el proceso no presenta mayor dificultad, los operarios debe poseer gran experiencia para poder realizarlo de forma segura.
- Con respecto a los materiales de aporte para este proceso de soldadura fuerte es restringido.
- El manejo y uso de materiales exotérmicos hace que este proceso se ponga atención en la seguridad.

#### **1.5.9.9.2 Soldadura fuerte por haz de electrones (EBB)**

Este proceso de soldadura fuerte que tiene aplicaciones limitadas, los componentes a unirse se calientan locamente hasta la temperatura de soldadura fuerte adecuada mediante la dispersión de haz de electrones. Este proceso se realiza en una cámara de vacío ( $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  torr), este haz de electrones se dispersa en un punto de haz relativamente grande evitando derretir el metal base. [2]

Como todo proceso de soldadura tiene sus ventajas y limitaciones estas refieren a la soldadura fuerte de haz de electrones en cámara de vacío entre las que tenemos los siguientes:

Ventajas:

- En el proceso de soldadura fuerte de haz de electrones no necesita fundente que asegure el flujo del metal de aporte.
- Se evita la necesidad de la limpieza posterior a la soldadura debido a no usar fundente.
- Las juntas soldadas se mantienen libres de oxidación, gracias al calentamiento muy localizado y la distorsión térmica es mínima.
- Con este proceso se logra soldar componentes de diferentes espesores hasta elementos de espesor muy delgado.
- El ciclo de calentamiento es rápido un tiempo de 2 a 4 minutos como máximo, esto hace que sea repetible.

Limitaciones:

- Los componentes a unir están limitado al tamaño de la cámara de vacío a utilizarse.
- El personal que opere el equipo debe estar altamente capacitado.
- Debido a que el proceso se lo realiza en una cámara cerrada es esencial un control estricto del espacio libre y de la calidad de la junta.
- El tiempo total del ciclo de calentamiento depende especialmente del vacío requerido, debido a que es necesario bombear la cámara antes de soldar.
- Metales que posean alta presión de vapor, como el zinc no se pueden unir debido que se volatilizan en el vacío durante el proceso.

#### **1.5.9.9.3 Soldadura fuerte por rayo láser (LBBW)**

Este proceso de soldadura fuerte utiliza energía térmica generada por rayos láser para producir juntas soldadas localizadas en uniones críticas de paredes delgadas, su principal ventaja sobre los otros procesos de soldadura fuerte es el calentamiento localizado de la superficie de la junta a soldar con mayor precisión sin necesidad de calentar todo el conjunto hasta la temperatura de fusión del metal de aporte, esto limita el flujo del metal de aporte sobre el área calentada por el rayo láser e impide cualquier flujo debido a la acción capilar. [2]

Es un proceso que se utiliza cada vez más, particularmente en aplicaciones automotrices ya que se ha determinado que las juntas soldadas son más resistentes que por el proceso de soldadura por puntos de resistencia.

Es un proceso costoso, como resultado este proceso es usado en aplicaciones específicas donde se requiera una resistencia de juntas soldadas, pero no puedan soportar las distorsiones térmicas de las técnicas convencionales de soldadura fuerte. [2]

La gran mayoría de juntas soldadas por soldadura fuerte de rayo láser se produce mediante una serie de soldaduras puntuales superpuesta, por lo general el metal de aporte va previamente colocado y la junta ensamblada se coloca debajo del rayo láser. El uso o no de fundente depende del uso de una atmósfera controlada, por lo general se proporciona una atmósfera de argón o también en vacío para no utilizar fundente. [2]

La soldadura fuerte de rayo de láser es cara, pero es útil en determinadas aplicaciones dadas a las siguientes características que presenta:

- Es útil para soldar ensamblajes pequeños que pueden ser distorsionados por el calor de las técnicas de soldadura fuerte convencional.
- Debido a su calentamiento localizado hacia la junta a soldar, se puede soldar metales base con espesores muy delgados de 0.01 mm y menores a este.
- Se puede soldar juntas en el interior de sólidos transparentes, como tubos sellados de vidrio o cuarzo.

## 2. METODOLOGÍA

En el presente apartado se especifica el procedimiento para la obtención de las muestras del material base y el proceso para obtener las uniones soldadas de los materiales para su posterior análisis por medio de ensayos destructivos, micrografías y macrografías que permitan evaluar la calidad de las juntas soldadas.

### 2.1 Obtención del material base

Para el presente proyecto se utiliza como materiales base tuberías de cobre y aluminio de preferencia tuberías que se usen en refrigeración para el caso del cobre se usaron dos tipos de tuberías tipo flexible y rígida, en cambio para la tubería de aluminio solamente rígida, de lo disponible en el mercado ecuatoriano las tuberías de cobre existen variedad en calidad por lo que se escogió para la tubería rígida tipo L marca NACOBRE y para la tubería flexible de cobre se escogió marca METAL PURE, para la tubería de aluminio 6063 se escogió tubería fabricada por la empresa CEDAL, debido a que en el país no se fabrican ni importan tuberías de aluminio para uso en refrigeración, por eso se escogió la tubería de aluminio de CEDAL, todas las tuberías son de diámetro nominal de media pulgada como podemos ver en la Figura 2.1 los materiales base escogidos.

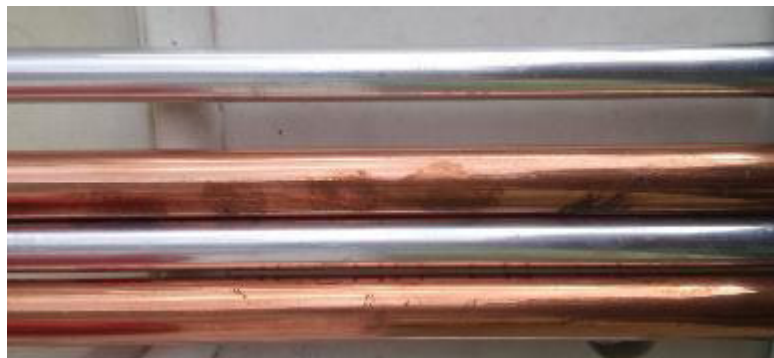


Figura 2.1 Metales base de aluminio y cobre.  
(Fuente: propia)

En la Tabla 2.1 indica las propiedades mecánicas de las tuberías de cobre y en la Tabla 2.2 se indica las propiedades de las tuberías de aluminio utilizadas en el presente proyecto.

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de las tuberías de cobre utilizadas.

Forma	Designación de temple		Resistencia a la tracción mínima		Elongación en 2 [in] mínima	Dureza Vickers
	Standard	Estado anterior	[ksi]	[MPa]	[%]	[HV]
Longitud enrollada	O60	Recocido suave	30	205	40	45-55
Longitud recta	H58	Propósito general	36	250	---	

(Fuente: [11])

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de la tubería de aluminio utilizada.

Aleación	Temple	Resistencia a la tracción [ksi]	Limite elástico [ksi]	Elongación en 50 mm [%]	Dureza Vickers [HV]
6063	T-5	22.0	16.0	8	70

(Fuente: [30])

Tabla 2.3 Composición química de las aleaciones de las tuberías de cobre.

Elemento	Designación UNS		
	C10200	C12000	C12200
Cobre	99.95	99.90	99.9
Fósforo	----	0.004-0.012	0.015-0.040

(Fuente: [11])

Tabla 2.4 Composición química de la aleación de la tubería de aluminio 6063.

Grupo	Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
AlMgSi	6063	0.2-0.6	0.35	0.10	0.10	0.45-0.90	0.10	0.10	0.10	0.05	resto

(Fuente: [13])

## 2.2 Caracterización del material base

La caracterización de los materiales base es importante ya implica conocer la composición química de los mismos, para ello existen diversos métodos, uno de estos es el ensayo de espectrometría de emisión atómica por chispa el cual fue realizado en el Laboratorio de Fundición de la EPN, este método determina de manera cualitativa las cantidades de los elementos presentes en cada una de las aleaciones de las tuberías escogidas, para la caracterización se utilizó el equipo que se indica en la Figura 2.2, el equipo es un Bruker Q2 ION, siendo un equipo muy compacto y ligero para el análisis de metales por espectrometría de emisión por chispa. (Bruker,2020)



Figura 2.2 Equipo de espectrometría Bruker Q2 ION.  
(Fuente: Propia)

### **2.2.1 Descripción del ensayo de espectrometría**

La espectrometría de emisión atómica es un método de análisis químico que usa la intensidad de luz producida de diferentes maneras como un plasma, un arco o chispa eléctrica o llama a una determinada longitud de onda para determinar las cantidades de los elementos en una muestra. Esta longitud de onda característica del espectro atómico nos permite identificar los elementos de una muestra y la intensidad de luz emitida nos proporciona la cantidad de átomos de los elementos de la muestra.

Para el análisis de las muestras se calibra el equipo con un patrón estándar de una composición conocida en este caso para la probeta de aluminio se usó el método Al 120 Al-Si y para las muestras de cobre se usó el método Cu 160 Cu-SnPb, las dimensiones de las probetas de los materiales base son en promedio de 25 mm x 25 mm, se coloca la muestra en el equipo y se procede a ejecutar el análisis.

El análisis se lo realiza cuando se hace pasar un arco eléctrico o chispa por medio de un electrodo hacia la muestra calentando a alta temperatura que logre excitar a los electrones de la misma, para cada muestra se realiza de 2 a 3 mediciones diferentes para tener un análisis correcto.

## **2.3 Soldabilidad**

La soldabilidad de un material de la misma o diferente naturaleza, es la capacidad del material que presenta mayor o menor facilidad para unirse bajo condiciones impuestas mediante un proceso de soldadura y una técnica adecuada que garantice la calidad de la soldadura para la cual fue diseñada y cumpla con los requerimientos de servicio

prescritos. La soldabilidad para entenderla mejor se divide en tres aspectos que son los siguientes. [32]

- Soldabilidad operativa
- Soldabilidad metalúrgica
- Soldabilidad constructiva

### **2.3.1 Soldabilidad Operativa**

Este aspecto de la soldabilidad analiza la ejecución del proceso de soldadura, analiza las condiciones tecnológicas de efectuar las uniones bajo cualquier proceso de soldadura.

### **2.3.2 Soldabilidad Metalúrgica**

Este aspecto tiene que ver con las transformaciones que puede presentar la junta soldada y afecta a sus propiedades físico-químicas, esta afectación puede sufrir el metal o aleación.

### **2.3.3 Soldabilidad Constructiva**

Determina las propiedades y condiciones que debe poseer el metal base como como la dilatación y contracción esto ocasiona deformaciones y tensiones, lo cual origina agrietamiento en la unión soldada.

### **2.3.4 Aspectos que influyen en la soldabilidad**

La soldabilidad se orienta a garantizar una soldadura que cumpla con los requerimientos de servicio para la cual fue diseñada, por ello se debe considerar los parámetros que se deben tener en cuenta cuando se efectúa una unión soldada:

- Material base
- Material de aporte adecuado
- Influencia de los elementos aleantes
- Diseño de junta y proceso de soldadura
- Calor suministrado
- Velocidad de enfriamiento
- Temperatura de precalentamiento

### **2.3.5 Soldabilidad del Aluminio**

La oxidación es el principal problema del aluminio, el óxido que se forma es uno de los factores físico-químico que complica el proceso de soldadura del aluminio, el aluminio reacciona fácilmente con el oxígeno para formar la alúmina, cuando la temperatura aumenta la tasa de oxidación también aumenta, la presencia del óxido de aluminio obliga al uso de elementos fundentes que cumplen la función de eliminar los óxidos e impurezas. [32]

Un fenómeno que suele ocurrir en aleaciones ligeras y que afecta en muchos aspectos es la formación de porosidades y sopladuras. El problema es de menor repercusión en el aluminio puro, pero cuando se trata de las aleaciones de aluminio, se debe poner mayor atención, especialmente en aleaciones (Al-Mg).

La principal causa de estos defectos se puede atribuir a la presencia de hidrógeno, este elemento con escasa solubilidad en el aluminio en estado sólido, pero cuando se encuentra en estado líquido la solubilidad aumenta drásticamente y aumenta la temperatura. [32]

### **2.3.6 Soldabilidad del Cobre**

El cobre cuando se lo calienta se oxida fácilmente formando óxidos  $\text{CuO}$  y  $\text{Cu}_2\text{O}$  siendo este último más estable se distribuye en las periferias de los límites de los granos esto genera grietas en caliente esto debido a que su temperatura de fusión es menor a la del cobre puro, el oxígeno que está presente en forma inclusiones aisladas óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ).[32]

El cobre que contenga oxígeno cuando este se calienta se expone a la “llamada enfermedad del hidrógeno” esto radica en que el cobre si se calienta en un entorno que posea hidrógeno genera una difusión del mismo en el cobre y este a su vez reacciona con óxido cuproso. Generando vapor de agua a una alta presión en las discontinuidades del metal creando grietas, afectando considerablemente las propiedades mecánicas particularmente a altas temperaturas.

La presencia de los óxidos en el cobre como se ha mencionado genera defectos considerables cuando se va a soldar con cualquier proceso de soldadura. El cobre libre de óxidos, al no tener oxígeno, está libre de defectos y por lo tanto es soldable. [32]

## **2.4 Material de aporte**

La selección de los metales de aporte se lo realiza tomando en cuenta los siguientes factores como la holgura de la junta, los metales base a soldar, el tipo de soldadura



fuerte que se va a ejecutar, todo esto con el fin de obtener unas buenas propiedades en la junta soldada.

En base al análisis realizado de los diferentes metales de aporte para este proceso y que se encuentran descrito en la norma AWS A5.8, tomando en cuenta las características de los metales de aporte necesarios para soldar aleaciones de cobre y aluminio, se escoge los metales de aporte para realizar el proceso de soldadura indirecta por horno.

En la norma AWS A5.8 nos suministra la información necesaria de cual metal de aporte es ideal para la aplicación requerida, para soldar los tubos de cobre y aluminio tenemos metales de aporte de la serie BCuP, BAg, RbCuZn y BAISi mencionados en el apartado 1.5.6.1 y 1.5.6.2 respectivamente.

Dentro de los materiales para soldar cobre y aluminio, se debe tomar en consideración lo disponible en el mercado local y de acuerdo al análisis realizado de los materiales de aporte se escogió los siguientes materiales de aporte:


#### 2.4.1 Sil-Fos 15

Se escogió este material de aporte ya cumple con las condiciones para el proceso, dada la aplicación que se requiere que son tuberías de transporte de fluidos a presiones elevadas que soportan altas temperaturas superiores a los 100 [°C], esto genera elevados esfuerzos mecánicos, para esto las uniones soldadas por el material de aporte deben soportar por ello deben poseer propiedades físicas y mecánicas para condiciones de servicio requeridas. [19]

El metal sil-fos 15 es un metal del grupo (BCuP) de cobre-fosfórico con cierto porcentaje de plata, permite absorber esfuerzos, producido por las altas presiones, fatiga térmica y vibraciones, el metal de aporte seleccionado cumple con todos estos requerimientos y es recomendado para aplicaciones de refrigeración, el metal de aporte sil-fos 15 pertenece al grupo del (AWS BCup-5 varilla metálica de cobre-fósforo con 15% de plata), ese pequeño porcentaje de fósforo permite al metal de aporte ser auto fundente solamente si se va a solar cobre, son usados para soldar tuberías de cobre de gas, refrigeración y de aire acondicionado las especificaciones del material se muestran en la Tabla 2.5 y la hoja técnica del material se muestra en el ANEXO IV.

Tabla 2.5 Especificaciones del material de aporte SIL-FOS 15 (AWS BCuP-5)

Lucas Milhaupt (Sil-Fos 15) AWS BCuP-5	
Composición Nominal	Ag: 14.5-15.5 [%]
	Cu:79-81 [%]

	P: 4.8-5.2 [%]	
	Otros elem.: 0.15 [%] max	
Punto de fusión:	643 [°C]	
Punto de fluidez:	705 [°C]	
Rango de trabajo:	705 a 815 [°C]	
Densidad:	0.31 [lb/pulg3]	
Resistencia a la tracción:	30 a 35 [ksi]	
Resistencia a la tracción:	15.8 [ksi] a 800 [°C]	

(Fuente: Lucas Milhaupt)

## 2.4.2 Al 822

El metal de aporte Al 822 de Lucas Milhaupt es un material de aporte para soldadura fuerte de aluminio de uso general para soldar la mayoría de aleaciones de aluminio y grados de aluminio cuando se usan métodos de calentamiento al aire libre, está compuesto por zinc y aluminio principalmente, este material tiene la característica de poseer núcleo fundente en la varilla. [19]

Dentro de las formas disponibles de este material se encuentran en forma de varillas, anillos, alambre, pasta, polvo, en el mercado local la encontramos en forma de varilla, sin bien este material sirve para un proceso de soldadura fuerte y para soldar aluminio a aluminio y aluminio a cobre, según la hoja de especificaciones, las propiedades de la unión soldada dependen de varios parámetros como el metal base, la interacción metalúrgica del metal base y metal de aporte, diseño de la junta, con respecto a una clasificación según la norma AWS A5.8 no está definida a que grupo de metales de aporte pertenece el metal de aporte escogido. Las especificaciones se indican en la Tabla 2.6. Su hoja Técnica se muestra en el Anexo V.

Tabla 2.6 Especificaciones del material de aporte Al 822.

Lucas Milhaupt (Al 822)		
Composición Nominal	Al: 21.0-23.0 [%]	
	Zn: Resto	
	Otros elem. (c/u): 0.05	
	Otros elem.: 0.15 [%] max	
Punto de fusión:	441 [°C]	
Punto de fluidez:	482 [°C]	
Rango de trabajo:	482 a 537 [°C]	
Densidad:	0.19 [lb/pulg3]	
Resistencia a la tracción:	18 [ksi]	
Holgura recomendada	0.076 a 0.127 [mm]	

(Fuente: Lucas Milhaupt)

En base a las especificaciones de los metales de aporte seleccionados se tiene un rango de temperaturas de trabajo que para el metal de aporte Sil-Fos 15 va desde 700 a 800 [°C], en cambio el metal de aporte Al 822 su rango de temperaturas de trabajo es de 482 a 537 [°C] en estas temperaturas se logra una fusión del metal de aporte y este fluya en la junta.

### 2.4.3 Cantidad de material de aporte empleado

Para determinar el metal de aporte necesario en el proceso de soldadura indirecta para una unión de tubería soldada con su accesorio, según fabricantes, bibliografía de la soldadura indirecta la cantidad necesaria es tres veces el diámetro externo de la tubería a soldar, con eso se cubre el intersticio formado entre las superficies a soldar, esto quiere decir que si se soldara manualmente se utilizaría una longitud de la varilla de aporte de tres veces el diámetro de la tubería a soldar. [29]

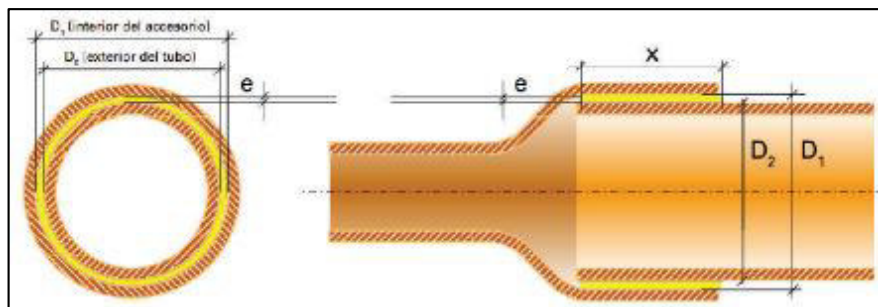


Figura 2.3 Diseño de una junta soldada (tubería-accesorio) y junta a traslape. (Fuente: [29])

Los parámetros considerados en el diseño de las juntas soldadas son:  
 e: separación entre pared interna del accesorio y pared externa [mm].  
 D1: diámetro interior del accesorio o acople [mm].  
 D2: diámetro exterior de la tubería [mm].  
 X= longitud traslapada [mm].

Para las tuberías utilizadas de cobre tipo L, cañería de cobre y tubería de aluminio se presentan a continuación.

Tubería	Cobre rígida	Cobre flexible	Aluminio
Diámetro nominal [mm]	15.87	12.7	12.7
Longitud necesaria [mm]	47.61	38.1	38.1

(Fuente: Propia)

Como son elementos tubulares existen varias formas de colocar el material de aporte para poder efectuar el proceso de soldadura indirecta por horno como en forma de anillo interior, exterior a la tubería, limallas, lámina, pasta, entre otros.

En nuestro caso se escogió la forma de anillo interior como se puede apreciar en la Figura 2.4.

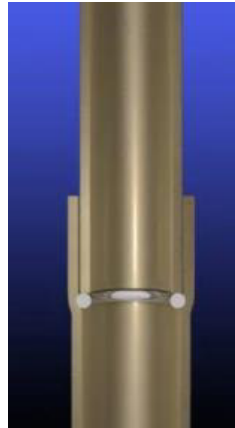


Figura 2.4 Anillo interior para el diseño de las juntas soldadas.  
(Fuente: Lucas Milhaupt)

La longitud necesaria en cada caso vendría a hacer el perímetro del diámetro interior de la tubería.

$$P = 2 \cdot \pi \cdot r$$

De acuerdo a esto los diámetros obtenidos a partir de la longitud necesaria se muestran en la Tabla 2.7 y también los diámetros obtenidos mediante un proceso

Tabla 2.7 Diámetros teórico y real obtenidos experimentalmente

Tubería	Cobre rígido	Cobre flexible	Aluminio
Diámetro teórico [mm]	15.15	12.13	12.13
Diámetro obtenido experimentalmente [mm]	15.38	12.62	12.62

(Fuente: Propia)

El diámetro obtenido experimentalmente se logró mediante un proceso de enrollado de las varillas de los metales de aporte mediante fijar un eje adecuado y la varilla a una entenalla, tomando en cuenta el diámetro interior de los accesorios de las tuberías de cobre, aluminio y para las probetas de aluminio-cobre, el diámetro interior del abocinado de la tubería de cobre como se puede ver en la Figura 2.8 del apartado 2.1.1.5

## **2.5 Fundente**

Habíamos mencionado que el fundente cumple la función de remover los óxidos que se forman en el proceso de soldadura debido a las altas temperaturas, precisamente para las tuberías de cobre se forma una fina capa de óxido cuproso permaneciendo a la temperatura ambiente, al aumentar la temperatura siguen formándose más óxidos siendo estos de baja energía de formación, por lo que limpiar las superficies a soldar y aplicar el fundente es suficiente y con el porcentaje de fósforo es más que suficiente para que el metal de aporte fluya.

En los manuales de soldadura indirecta, en las normas relacionadas al proceso, libros y los mismos fabricantes de los metales de aporte, refieren que cuando se realiza uniones de cobre a cobre, no es necesario el uso de fundente, gracias al contenido de fósforo. En el presente proyecto seguimos las sugerencias y por lo tanto no se usó fundente.

En cambio, para la soldadura de aluminio, el metal de aporte escogido ya trae fundente en el interior de la varilla de su metal de aporte, el aluminio generalmente forma óxidos como la alúmina de forma natural, esta pequeña capa de óxido suele dar inconvenientes al momento de soldar aluminio y obtener soldaduras adecuadas, esto se soluciona con una correcta limpieza antes de efectuar la soldadura.

También se debe tomar en cuenta que el aluminio al estar en contacto con otros metales se convierte en ánodo con la mayoría de metales, por lo que al estar un tiempo prologando seria el metal más afectado y se tendría problemas de corrosión, por ello se de realizar un correcto proceso de la soldadura teniendo en cuenta que el aluminio es un metal difícil de soldar.

## **2.6 Diseño de las juntas de unión para las probetas soldadas**

## **2.7 Procedimiento de la soldadura indirecta**

Para la realización de un proceso de soldadura indirecta se debe seguir una secuencia de pasos que permitan y garanticen conseguir una unión soldada de una calidad aceptable, los pasos esenciales para el proceso son los siguientes:

- Limpieza previa y preparación de superficies.
- Empleo del fundente.
- Ensamblado de las piezas o el conjunto.
- Colocación del metal de aporte.
- Limpieza post soldeo de las juntas soldadas.

### **2.7.1 Limpieza previa y preparación de las superficies**

El primer paso que debe realizar es eliminar las impurezas como grasa, aceite y óxidos que se encuentran en las superficies a soldar, ya que esto permitirá que el metal de aporte fluya libremente, que tenga una buena adherencia y la capacidad de acción del fundente, entre los disolventes que se utiliza para realizar esta acción tenemos:

- Disolvente a base petróleo
- Desengrasantes
- Agentes humectantes como jabones, detergentes
- Abrasivos ligeros, aspersion de arenas como sílice, alúmina y otros abrasivos no metálicos.
- Eliminación de impurezas mediante la inmersión de elementos químicos como ácido sulfúrico, nítrico y clorhídrico.

La correcta selección del disolvente depende del metal base y de la impureza presente en la superficie del mismo. La ejecución de la soldadura indirecta se debe ejecutar en el menor tiempo posible una vez realizado la limpieza de las superficies de las piezas a soldar para evitar que se vuelvan a ensuciar. [20]

### **2.7.2 Empleo del fundente en las partes**

La aplicación del fundente dependerá exclusivamente del material de aporte utilizado debido a que en ciertos casos no es necesario su aplicación se lo realiza dependiendo si es en forma de polvo, líquido, pasta o suspensión en el apartado 1.5.7 se especificó las clases de fundentes.

El fundente debe aplicarse de manera uniforme generando una delgada capa que se extienda por toda la superficie de las partes a soldar, el exceso de fundente debe ser removido para evitar la formación de grumos ya que esto impide que el metal de aporte fundido fluya libremente. La consistencia del fundente va en función del tipo de metal de aporte a utilizar y también el ciclo de calentamiento a la cual la junta está sometida, si en el diseño de la junta se debe bloquear el paso del flujo de metal de aporte o fundente a ciertas áreas, se utiliza suspensiones de aluminio, cromo, titanio y magnesio que se mezclan con agua o aglomerantes orgánicos. [20]

### **2.7.3 Ensamblado de las piezas o el conjunto**

El ensamblaje de las juntas se lo realiza después de haber aplicado el fundente en las superficies a soldar, debido a que el fundente se seca lo que ocasiona que se formen

películas de óxido e impurezas, en el caso de la soldadura indirecta por horno se utilizan accesorios para fijar el ensamble usualmente suelen ser cerámicos también existen metálicos estos permiten que este fijado el ensamble también suele suceder que actué por gravedad se suelen acoplar y fijar las juntas. [20]

#### **2.7.4 Colocación del metal de aporte**

El metal de aporte suele añadirse a la junta esto depende especialmente del proceso de soldadura indirecta que utilice, en los procesos manuales como la soldadura fuerte por soplete se alimenta directamente el metal de aporte en forma de varilla, en otros procesos de soldadura como la soldadura fuerte por horno, el metal de aporte ya va colocado en el conjunto a soldar, este puede estar en diferentes preformas esto depende de los elementos que se vaya a soldar si son placas o elementos tubulares, puede ser en forma de varillas, anillos, láminas, etc., para que durante el proceso de calentamiento el material de aporte alcance su temperatura de fusión y llene el intersticio por medio de la capilaridad.[20]

#### **2.7.5 Limpieza post soldeo de las juntas**

Una vez ejecutado el proceso de soldadura fuerte se debe realizar un proceso de limpieza especialmente los restos del fundente, se suele encontrar restos de óxidos debido a la alta temperatura a la que se encuentra puede ocasionar una interacción con los metales base, para la remoción del fundente haya varias formas como sumergir el ensamble en ácidos nítrico o clorhídrico, de manera mecánica mediante el uso de elementos abrasivos, también mediante cepillos metálicos o a su vez el uso de agua caliente. [20]

### **2.8 Discontinuidades comunes que se presentan en una junta soldada por soldadura indirecta.**

Como todo proceso de soldadura no es “perfecto” siempre hay la presencia de imperfecciones en las juntas soldadas debido a una serie de factores como mal planteo de los parámetros del proceso o mala ejecución del proceso de soldadura.

En el proceso de soldadura indirecta existen discontinuidades o imperfecciones que se presentan en las juntas soldadas, algunas de las imperfecciones que se tiene en este proceso son porosidades, falta de llenado, atrapamiento de fundente, filete discontinuo, agrietamiento, erosión del metal base y apariencia superficial deficiente. [17]

#### **2.8.1 Porosidad y falta de llenado del metal de aporte**

La falta de flujo del metal de aporte en la junta soldada se debe a factores como una limpieza inadecuada, así como una holgura inadecuada, metal de aporte insuficiente, gas atrapado y también la expansión térmica diferencial debido a cuando el metal de aporte está en estado líquido, estas discontinuidades reducen la resistencia mecánica de la junta al reducir el área de carga esto ocasiona que la hermeticidad de la junta se vea afectada.

### **2.8.2 Atrapamiento de fundente**

Este problema que suelen presentar las juntas soldadas se debe especialmente a un exceso de aplicación del fundente en la junta y también a un rango de temperatura errónea esto se debe a la falta de aporte de calor o exceso de aporte de calor a la junta, el fundente atrapado evita el flujo del metal de aporte hacia el área de la unión donde debe fluir este, esto ocasiona una pérdida de la resistencia mecánica de la junta, provocando falta de hermeticidad y reduciendo la vida útil de la junta.

### **2.8.3 Filete discontinuo**

Los filetes discontinuos son áreas donde el filete es irregular en la superficie de la junta, esto provoca concentradores de esfuerzos, esto se debe a la falta de metal de aporte, la cantidad es insuficiente para tener un área de la junta homogénea, esta discontinuidad puede ser o no aceptable todo depende de los requisitos de servicio para en cual fue diseñado.

### **2.8.4 Agrietamiento**

Durante el proceso de soldadura indirecta suelen existir tensiones residuales esto ocasiona la creación de grietas, estas tensiones residuales se dan por mal diseño de juntas, las grietas en filetes grandes con exceso de metal de aporte pueden no ser perjudiciales si no se propagan a la junta, en cambio las grietas en pequeños filetes se pueden propagar a la junta, en ocasiones las grietas se encuentran en los metales base debido a la fragilización del líquido.

### **2.8.5 Apariencia superficial deficiente**

Este defecto se debe a una excesiva aportación del metal de aporte, generando superficies ásperas, el flujo del metal de aporte sobre el metal base es perjudicial por varias razones además de estéticas, pueden actuar como concentradores de esfuerzos y pueden ser puntos de inicios de corrosión.



### **2.8.6 Erosión del metal base**

La erosión del metal base es una condición causada por la disolución del metal de aporte fundido en este, esto suele ocurrir cuando no se selecciona correctamente un metal de aporte para soldar un determinado metal base, esto acontece posterior al proceso de soldadura y da como resultado una reducción en el espesor del metal base afectando sus propiedades mecánicas.

## **2.9 Inspección y pruebas en un proceso de soldadura indirecta**

La inspección o el control de calidad de las juntas soldadas, es un requisito indispensable para garantizar el procedimiento realizado, para ello existen códigos regulatorios o normas donde se especifican las pruebas a las que se deben someter los especímenes, la inspección se efectúa a probetas o muestras de un elemento o también en algunos casos la inspección del conjunto soldado.

Las discontinuidades de soldadura fuerte se asocian a tres tipos de discontinuidad:

- Las que asocian a requisitos dimensionales.
- Las que se asocian a discontinuidades estructurales de la junta o unión soldada.
- Las que asocian al metal del aporte de la soldadura indirecta

Las pruebas que se realizan a los especímenes, pueden ser del tipo destructivas o no destructivas. La prueba no destructiva tiene como objetivo localizar discontinuidades u obtener rastros para determinar las posibles causas de las anomalías en un proceso de fabricación, en cambio las pruebas destructivas permiten evaluar al conjunto o al espécimen soldado para conocer si satisfacen los requisitos mínimos para el cual fueron destinados.

Entre las pruebas no destructivas más comunes que se realizan a este proceso tenemos las siguientes:

- Inspección visual
- Prueba de fugas
- Prueba de ultrasonido
- Tintas penetrantes
- Radiografía industrial

Para pruebas destructivas entre las más comunes tenemos:

- Prueba de tracción

- Prueba de pelado
- Prueba de torsión
- Prueba de doblado guiado
- Prueba de corte
- Análisis metalográfico

## 2.10 Variables esenciales de la soldadura indirecta por horno según el código ASME Sección IX parte QB

Para poder ejecutar un proceso de soldadura indirecta por horno, se requiere establecer los parámetros esenciales, que garanticen un buen proceso de las juntas soldadas y que estas cumplan para las condiciones de servicio para las cuales fueron diseñadas.

El código ASME SECCION IX PARTE QB nos brinda información para poder establecer los requerimientos para el procedimiento de soldadura fuerte (BPS), la calificación del procedimiento de soldadura fuerte (PQR) para el proceso en el cual se lo realizó.

Además, este código nos permite determinar qué factores se toman en cuenta para el proceso de soldadura fuerte, técnicas y las pautas para evaluar y calificar el procedimiento de soldadura fuerte por horno.

Las variables de soldadura fuerte por horno se dividen en esenciales y no esenciales, las primeras son aquellas en que, si hay algún cambio, afecta directamente en las propiedades mecánicas de la junta soldada y se describe en el BPS.

En cambio, las variables no esenciales son aquellas en que, si hay un cambio, se detalla en el BPS.

Para en el caso de la soldadura fuerte por horno se describe a continuación las variables esenciales y no esenciales en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Variables esenciales y no esenciales del proceso de soldadura fuerte por horno

Soldadura fuerte por horno (FB)		
	Variables esenciales	Variables no esenciales
Metal Base	Si se cambia el metal base con otro se designa con otro número P y también se cambia el espesor del metal base calificado.	
Metal de aporte	Si se cambia un metal de aporte con otro se cambia el numero F. cambio de metal de aporte y de una forma a otra.	
Fundente, gas o atmósfera	Si añade o cambie el fundente, un cambio en la atmosfera o también de gas.	

Posición de flujo	Si añade otras posiciones de soldadura fuerte en aquellas ya calificadas, si el metal de aporte es pre colocado o alimentado.	
Diseño de junta	Un cambio en el tipo de junta, cambio en la longitud de la junta si es a traslape, o en su holgura, se registra en el PQR y se especifica en el BPS.	
Tratamiento térmico post soldadura	Si se cambia la temperatura en el T.T. si se lo realiza, para cada proceso realizado se requiere un PQR separado.	
Técnica		Se especifica el método de limpieza: Limpieza previa al proceso. Limpieza después del proceso.

(Fuente: Código ASME Sección IX PARTE QB, p.p. 198)

Para realización de los BPS y PQR se basan en los lineamientos definidos en el código ASME IX parte QB y todas las variables van de acuerdo a la tabla 2.8

## 2.11 Ensayos realizados para el proceso de calificación del proceso.

Para realizar los ensayos de tracción y pelado de las probetas soldadas, el tipo y número de probetas a ensayar y calificar el procedimiento de soldadura fuerte por horno está en función del grosor de las tuberías como se indica en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Numero de muestras requeridas para calificar el procedimiento en función del espesor del material.

Espesor T de la muestra de prueba, pulg. (mm)	Rango de espesores de materiales calificados para placa y tuberías de pruebas, pulg (mm)		Tipo y número de especímenes de prueba requeridos	
	Mínimo	Máximo	Tracción	Pelado
menor a 1/8 (3)	0.5 T	2T	2	2
1/8 a 3/8 (3 a 10) incluido	1/16 (1.5)	2T	2	2
mayor a 3/8	3/16 (5)	2T	2	2

(Fuente: Código ASME Sección IX QB, p.p. 215)

Las tuberías utilizadas en el proyecto poseen un espesor que varía entre 1.0 a 1.8 [mm] para las tuberías de cobre rígida, en cambio para las tuberías de aluminio y cobre flexible 1.20 a 1.40 [mm] para ambas tuberías, se encuentran en el caso del espesor menor a 3 [mm], se sometió para el ensayo de tracción a 4 probetas de aluminio-aluminio, cobre-cobre y aluminio cobre dando un total de 12 probetas, en cambio para el ensayo de

pelado se sometió a 2 probetas de cada tipo dando un total de 6 probetas sometidas a dicho ensayo.

### 2.11.1 Ensayo de tracción

Este ensayo permite obtener la resistencia ultima a la tracción de las juntas soldadas ya sea a tope o traslape del proceso de soldadura fuerte por horno.

#### 2.11.1.1 Procedimiento y probetas de prueba

Las probetas de sección tubular (tuberías) para efectuar el ensayo de tracción de las tuberías soldadas deben ser dimensionadas de acuerdo al apartado QB-462.1 (c) del código ASME en este caso es de tubería menor a 3 pulgadas de diámetro.

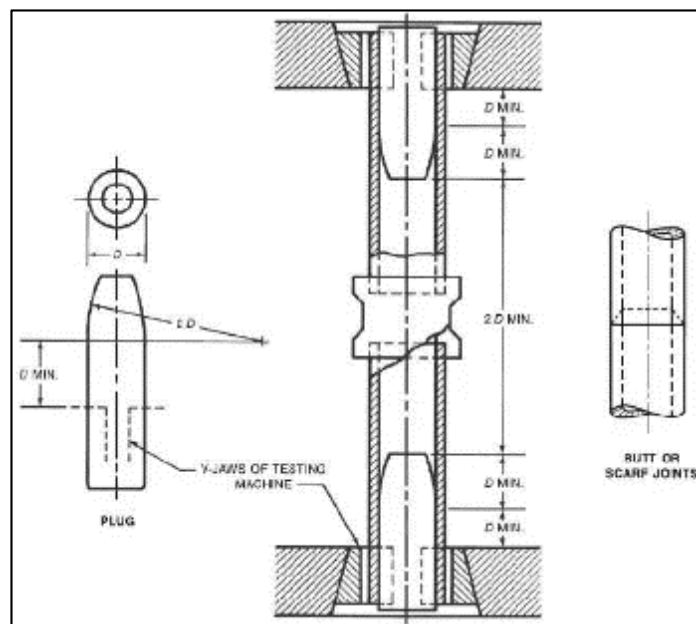


Figura 2.5 Probetas para el ensayo de tracción de tuberías de diámetro pequeño para juntas de traslape y a tope.

(Fuente: Código ASME Sección IX PARTE QB, p.p. 219)

La probeta sometida al ensayo de tracción va sujeta por unas mordazas en sus extremos y acoplados en ejes en su interior para no dañar la tubería, la carga es sometida a lo largo del eje longitudinal de la probeta, la resistencia se la obtiene al dividir la carga máxima a la cual se rompe la probeta para la sección de la tubería inicial.

#### 2.11.1.2 Criterios de aceptación del ensayo de tracción

Los valores mínimos de la resistencia a la tracción del metal base para calificación del procedimiento, se encuentran las tablas 2.1 y 2.2 para el material base cobre y aluminio respectivamente.

Para superar el ensayo de tracción, la muestra deberá tener una resistencia que no sea menor que:

- La resistencia a la tracción mínima del metal base especificada en la condición de recocido.
- La resistencia a la tracción mínima especificada del metal más débil, en caso de metales base diferentes.
- Si la probeta se fractura en el metal base externo a la junta soldada, la prueba será validada como que reúne los requerimientos, siempre y cuando la resistencia no sea menor al 5% de la resistencia a la tracción mínima especificada del metal base en condición de recocido.

## 2.11.2 Ensayo de pelado

Este ensayo nos permite analizar la calidad de la junta soldada a traslape del proceso realizado.

### 2.11.2.1 Procedimiento y probetas de prueba

Las probetas para sección tubular (tuberías) para realizar un ensayo de pelado, van de acuerdo a las siguientes dimensiones.

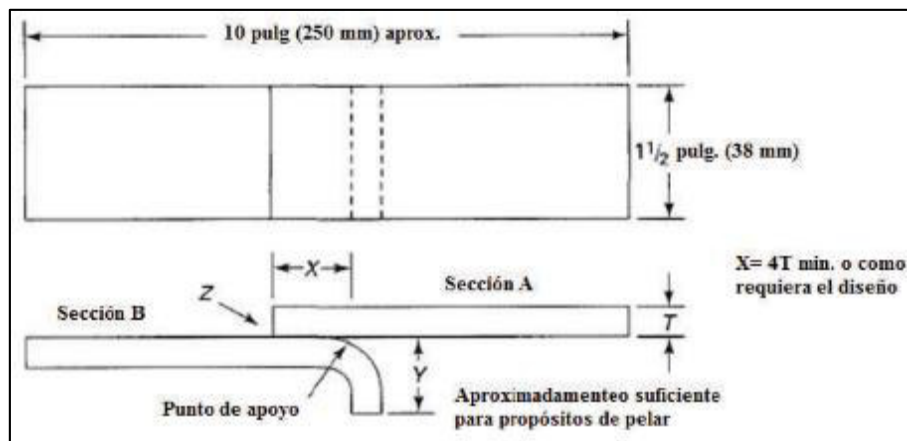


Figura 2.6 Especimen para el ensayo de pelado.  
(Fuente: Código ASME Sección IX PARTE QB, p.p. 222)

La probeta para el ensayo de pelado será separada o pelada ya sea en la sección A o en la sección B como se indica en la Figura 2.6 con una herramienta adecuada para que se tenga un doblado en el punto de apoyo, a su vez separar las secciones en una máquina idónea para el caso.

### 2.11.2.2 Criterios de aceptación del ensayo de pelado

Para aprobar el ensayo de pelado, las probetas deben mostrar certeza del material de aporte de soldadura fuerte a lo largo de cada extremo de la junta. Las superficies de contacto separadas deben poseer lo siguientes criterios:

- El área total de defectos (área no soldada, inserciones de fundente, etc.) no debe superar el 25% del área total de cualquier superficie que empata.
- La adición de las longitudes de los defectos medida sobre cualquier línea en la dirección del traslape no debe superar el 25% del traslape.
- Ningún defecto se extenderá de manera continua de un extremo de la junta a otro, sin importar el defecto.

Si cualquier probeta no cumple con los criterios de aceptación mencionados, la probeta se la considera fallida.

Cuando se analiza que causa la falla de la probeta, no se relaciona con los parámetros de soldadura, se puede realizar una nueva probeta con los mismos parámetros de soldadura fuerte especificados.

Cuando se ha establecido que la causa de la falla de la probeta es originada por una variable esencial o más, una nueva probeta puede ser soldada con los cambios respectivos en la o las variables correspondientes pueden haber ocasionado la falla de la prueba, en este caso si la probeta supera la prueba debe registrarse en el PQR.

### **2.11.3 Análisis metalográfico**

Para realizar las muestras metalográficas se debe seguir un orden sistemático para obtener las probetas, se escogen los especímenes a analizar, se extrae los mismos de la junta soldada para cada caso, como se observa en la Figura 2.7 y se obtiene la probeta para la metalografía.



Figura 2.7 Obtención de muestra metalográfica.  
(Fuente: propia)

Para obtener las micrografías y macrografías de cada muestra de las probetas soldadas se realiza el montaje de las muestras colocándolas en un molde cilíndrico hueco de PVC y aquí se vierte la mezcla de resina (metil-etil-cetona) y octoato de cobalto, una vez obtenido las muestras, se realiza un desbaste grueso y fino, el primero es para eliminar imperfecciones de la muestra cilíndrica.

Para el desbaste fino y posterior pulido se lo realizó en una pulidora automática que se indica en la Figura 2.8, se utilizaron lijas de agua de 150,240,320, 400, 600, 1200 y 2000, luego de esto se realizó

El pulido para obtener una superficie lo más regular posible, quitando las imperfecciones de la probeta para ello se utilizó un paño de 1 y 3 micras con suspensión de diamante para así obtener una superficie tipo espejo para poder apreciar en el microscopio la microestructura.



Figura 2.8 Pulido de probetas.  
(Fuente: propia)

Una vez correctamente pulidas las probetas se efectúa el ataque químico empleando el reactivo químico con el reactivo 34b, este nos permite ver la microestructura tanto para las juntas soldadas de cobre, de aluminio y en tanto para las probetas de aluminio-cobre no se requirió ataque químico.

El ataque químico se lo puede realizar de dos formas con algodón empapado de reactivo o sumergiendo la probeta en el reactivo, esto se lo realiza de forma inmediata alrededor de dos segundos como máximo, posterior a esto se lava inmediatamente con agua y alcohol industrial, y se las seca a las probetas.

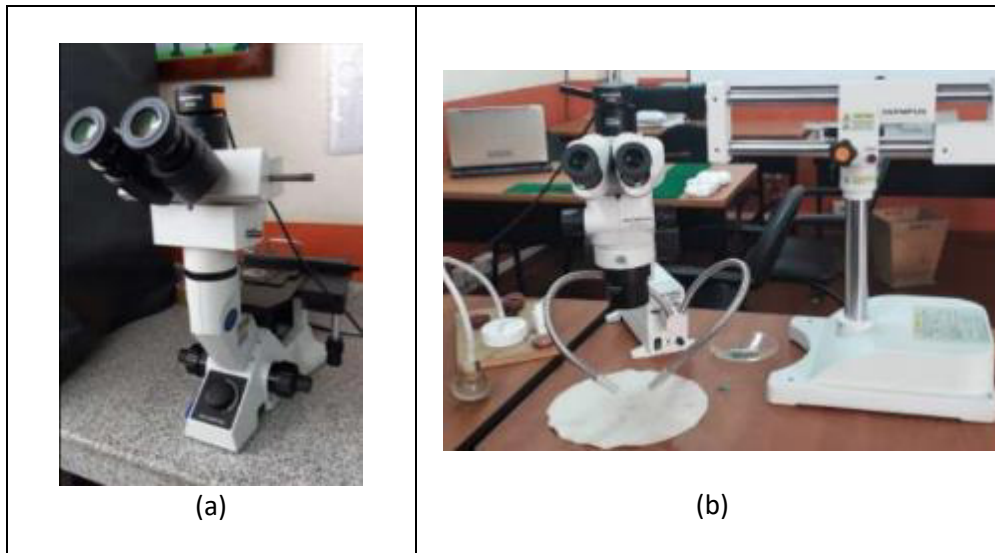


Figura 2.9 De izquierda a derecha microscopio para micrografía y macrografía respectivamente.  
(Fuente: Propia)

### 2.11.3.1 Macrografías

La macrografía permite observar la penetración del material de aporte, la difusión, inclusiones, impurezas, etc. Para obtener las macrografías se coloca en el microscopio mostrado en la Figura 2.9 (b) a una distancia apropiada se posiciona los lentes en la zona analizar para visualizar con precisión y se realiza la captura para las probetas de cobre, aluminio y aluminio-cobre realizadas bajo el proceso de soldadura fuerte por horno. En nuestro caso es la parte de la junta soldada de todas las probetas aun aumento de 4x.

### 2.11.3.2 Micrografías

La micrografía nos permite observar los cambios en la microestructura del material base y material de aporte. Para obtener las micrografías se coloca en la porta probetas del microscopio de la Figura 2.9 (a) a una distancia apropiada se posiciona el lente en la zona analizar para visualizar con precisión para ver la microestructura y se realiza la captura para las probetas de cobre, aluminio y aluminio-cobre realizadas bajo el proceso de soldadura fuerte por horno. En nuestro caso es la parte de la junta soldada de todas las probetas aun aumento de 100x.

## 2.12 Análisis de costos de la soldadura indirecta por horno

En la industria un factor importante para poder realizar un proceso son los costos, en nuestro caso el proceso de soldadura fuerte por horno, como se había mencionado en este proceso de soldadura sirve también como soldadura de mantenimiento, y para este



proceso debemos analizar el costo del proceso para realizar uniones y también para mantenimiento.

La soldadura de mantenimiento tiene como fin recuperar las áreas desgastadas por medio de los procesos de soldadura.

Esto será factible siempre que:

- El costo de restauración no sobrepase el valor de una pieza nueva.
- Las propiedades mecánicas del elemento a reparar no se pierdan.

Para poder desarrollar el análisis de costos del proceso realizado, se debe considerar factores como el costo de la energía eléctrica en este caso del sector industrial para nuestro país el costo es 0.093 [USD] por cada [kW-h] el consumo de energía que se ejecuta durante el proceso del equipo utilizado, en este caso se debe considerar la potencia, voltaje, la corriente, todos estos factores técnicos del equipos se encuentran descritos en la tabla 2.21 correspondiente a las especificaciones técnicas del horno VULCAN utilizado.

Para obtener la energía utilizada para soldar las juntas de cobre, aluminio y aluminio-cobre, tenemos los siguientes tiempos,

Para soldar probetas de cobre: tiempo 57 [min]

Para soldar probetas de aluminio, cobre-aluminio 37 [min]

En la ecuación 1 tenemos lo siguiente:

$$E = P * t \quad ec. 1$$

Donde:

E: energía consumida del horno [kW-h]

Potencia: la potencia del horno [kW]

Tiempo (t): tiempo de ejecución del proceso [h]

Para determinar el costo eléctrico por el tiempo de uso del horno el valor (E) en el proceso de soldadura se multiplica la energía consumida por el valor (C) valor tarifario del kilovatio-hora, en la ecuación 2 tenemos el cálculo:

$$CE = E * C \quad ec. 2$$

Donde:

- CE: costo eléctrico del proceso [USD]
- E: consumo energético del horno [kW-h]
- C: costo del kilovatio-hora en el sector industrial [USD/kW-h]

Para determinar el costo total (CT) del proceso de soldadura fuerte, se suman el costo eléctrico del proceso y los costos directos que corresponden a las tuberías de cobre y aluminio, accesorios metales de aporte, fundentes, mano de obra, equipo y herramientas.

En el mercado local tenemos una infinidad de variedad de insumos para realizar el proceso de soldadura fuerte a continuación ponemos la descripción de los insumos necesarios y sus costos para poder calcular el costo de metro soldadura fuerte.

$$CT = CE + CI \quad ec. 3$$

Donde:

- CT: costo total del proceso de soldadura [USD]
- CI: costos de insumos (directos) [USD]
- A continuación, se describe los cálculos para obtener los costos de soldadura.

Primeramente, se calcula la energía utilizada tanto para soldar la tubería de cobre, aluminio y aluminio-cobre.

$$E = \frac{1440 \cdot 0.95}{1000} = 1.368 [kW - h]$$

$$CE = 1.368 \cdot 0.093 = 0.127 [USD]$$

En las siguientes tablas se presentan los insumos (costos directos) como material base, metal de aporte, etc.

Tabla 2.10 Consumo energético y costo eléctrico del proceso para soldar cada tipo de tubería.

Tipo de tubería	Consumo energético del horno	Costo del proceso [USD]
Para soldar tuberías de cobre	1.368 [Kw-h]	0.127
Para soldar tuberías de Al, Al y Cu	0.88704 [Kw-h]	0.082

(Fuente: Propia)

Tabla 2.11 Costo de los materiales de aporte.

<b>Tuberías de cobre</b>	Cantidad [U]	Precio [USD]	Precio [USD/m]
Tubo de 1/2x3m Tipo L	1	14.16	4.72
Tubo de 1/2x3m Tipo M	1	10.09	3.36
Cañería de cobre de 1/2 x15 m	1	33.43	3.23
<b>Tubería de aluminio</b>	Cantidad [U]	Precio [USD]	Precio [USD/m]
Tubo de ½ x 6m	1	5	1.20

(Fuente: Propia)

Tabla 2.12 Costos de los accesorios de cobre.

<b>Accesorios de cobre</b>	Cantidad [U]	Precio [USD]
Codo 1/2x90	1	0.39
Unión 1/2 Cu	1	0.35
Unión 3/8	1	1.00

(Fuente: Propia)

Tabla 2.13 Costos de los metales de aporte utilizados.

<b>Metales de aporte</b>	Cantidad [U]	Precio [USD]
Metal de aporte para soldar aluminio AL 822	1	14.87
Metal de aporte para soldar cobre Sil-fos 15	1	4.80
Fundente 4 onzas	1	2.44

(Fuente: Propia)

Tabla 2.14 Costos de material por metro lineal y junta soldada.

<b>Descripción</b>	Unidad	CANTIDAD	Precio unitario	Precio total (C=A*B)
Tubería tipo L 1/2 más accesorios	m	1.05	4.72	4.95
Tubería de aluminio 1/2 más accesorios	m	1.05	1.20	1.26
Tubería de Al-Cu de 1/2	m	1.05	4.43	4.65
Metal de aporte Sil Fos15	U	0.2	4.80	0.96
Metal de aporte Al 822	U	0.2	14.87	2.97
<b>Subtotal Cu-Cu (P)</b>				<b>5.91</b>
<b>Subtotal Al-Al (Q)</b>				<b>4.23</b>
<b>Subtotal Al-Cu (T)</b>				<b>7.62</b>

(Fuente: Propia)

El costo total de los para soldar tuberías de aluminio y cobre que se determinó es por metro de tubería, esto implica conocer el tiempo de uso del horno y cuál es su costo eléctrico, también de conocer el precio de todos los insumos utilizados y las cantidades

utilizadas, este análisis de costos no contempla la mano de obra porque este proceso no requiere personas experimentadas, solo basta conociendo el proceso y sus fundamentos, tampoco se contempla el precio del equipo, porque se debe al tipo de horno que se utilizaría.

Como se mencionó antes este proceso es de bajo costo para soldar grandes producciones de uniones soldadas y es caro para un número de unidades pequeñas.

El costo total del proceso para cada tipo de probeta se menciona en la tabla 2.15 siguiendo la ecuación tres que suma el valor del costo eléctrico y el costo de los insumos utilizados.

Tabla 2.15 Costo total del proceso de soldadura indirecta por horno.

Tipo de tubería	Costo total [USD]
Para soldar tuberías de cobre	<b>6.04</b>
Para soldar tuberías de Al, Al y Cu	<b>4.31</b>
Para soldar tuberías de Al y Cu	<b>7.62</b>

(Fuente: Propia)

## 2.13 Procedimiento Experimental

Como habíamos mencionado para efectuar el proceso de soldadura indirecta se realiza unos pasos previos para la preparación de las juntas soldadas que mencionaremos a continuación:

## 2.14 Determinación de la longitud adecuada de traslape teórica para juntas tubulares [Al-Cu].

Para determinar la longitud adecuada de traslape se considera las propiedades mecánicas de los metales base y metal de aporte a usarse, también factores geométricos de las tuberías en este caso que son los siguientes:

X: Longitud del área traslapada.

W: Espesor del elemento de menor resistencia.

D: Diámetro del elemento traslapado.

T: Resistencia a la tracción del elemento de menor resistencia.

C: Factor de integridad para la unión de 0.8

L: Resistencia al cizallamiento del metal de aporte de soldadura indirecta (fuerte). [20]

$$X = \frac{W * (D - W) * T}{C * L * D}$$
$$X = \frac{1.3[mm] * (12.7 - 1.3)[mm] * 22.5 [ksi]}{0.8 * 18 [ksi] * 12.7[mm]} = 1.82 [mm]$$

Como vemos la longitud traslapada corresponde a 2 [mm] este valor es teórico porque en la realidad la longitud fue aproximadamente 9 [mm]. Todos los valores corresponden al aluminio porque es el elemento más débil de esta unión a soldar. En la Figura 2.10 se indica un esquema de las probetas aluminio-cobre.

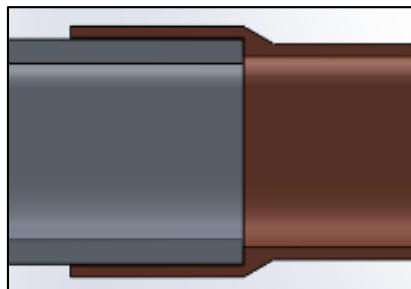


Figura 2.10 Esquema de las probetas de Aluminio-Cobre con diseño de junta a traslape.  
(Fuente: Propia)

## 2.15 Preparación de las juntas

### 2.15.1 Corte las tuberías

Para cortar las tuberías se utilizó un cortatubo este aparato permite tener un corte limpio y perpendicular. Se debe ser minucioso en la exactitud de la longitud que se vaya a cortar la tubería para tener las medidas correctas.

### 2.15.2 Eliminación de rebabas

La siguiente operación que se realiza es remover las rebabas en el interior de la tubería que se generan al realizar el corte, esto se lo puede realizar con una lima, en este caso se lo realizó con un escariador del propio cortador, esta acción es fundamental para así tener una zona limpia en la tubería y es necesario para el correcto uso de la tubería para el cual fue destinado.

### 2.15.3 Limpieza de las superficies a soldar

Las superficies de las uniones a soldar deben estar completamente libres de impurezas como grasa, aceite, óxido del metal, para que el material de aporte fluya de una manera libre en la unión a soldar.

Para realizar esta operación se realiza con abrasivos ligeros, como lo son lijas (por lo general de 320 a 1000) como se observa en la Figura 2.11 se debe realizar la limpieza en la parte interior y exterior de la tubería, estos abrasivos son sugeridos ya que el desprendimiento del material es poco, luego de esta acción se limpia con alcohol industrial o thinner con un paño húmedo que complementa esta operación para tener las superficies listas para la colocación de fundente y metal de aporte.



Figura 2.11 Probetas de cobre con las superficies listas para soldar.  
(Fuente: Propia)

#### **2.15.4 Aplicación del fundente**

En este punto habíamos mencionado que no se utilizó fundente para las tuberías de cobre-cobre, solamente para las aluminio-aluminio y aluminio-cobre que ya venía en el interior del material de aporte (núcleo fundente).

#### **2.15.5 Colocación del material de aporte**

Como es un proceso de soldadura fuerte por horno, el material de aporte debe estar colocado previamente en la unión a soldar, en este caso como son elementos tubulares (tuberías) y los metales de aporte escogidos vienen en forma de varilla pues simplemente se le dio una preforma a esas varillas en forma de anillos con el diámetro interior de la tubería que se vaya a colocar como podemos apreciar en la Figura 2.12.

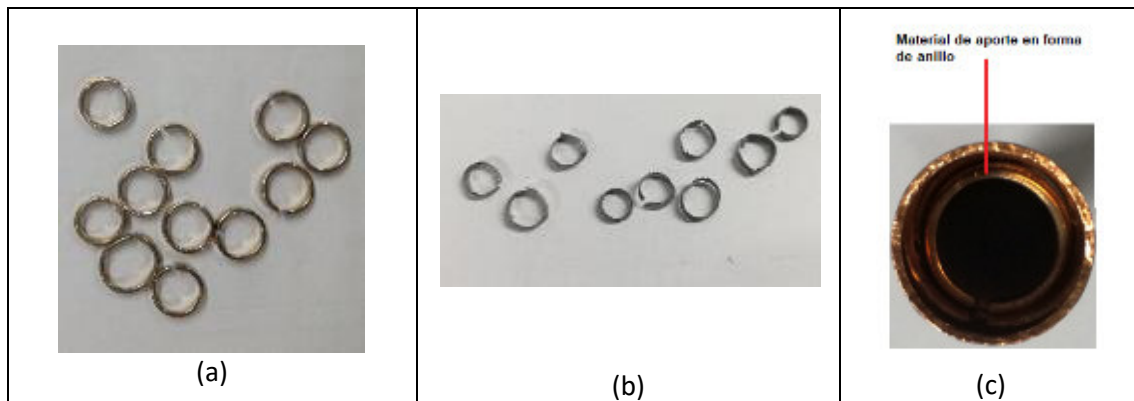


Figura 2.12 Preforma en forma de anillos de los materiales de aporte para soldar Al y Cu.  
(Fuente: Propia)

### 2.15.6 Introducción de las probetas en el horno

Una vez realizado todo el proceso de la preparación de las juntas mencionado anteriormente, se procede a meter las probetas al horno, cabe mencionar que el horno ya debe estar previamente encendido y en el caso del cobre debe estar la temperatura alrededor de los 500 [°C] para introducir las probetas para precalentarlas y en el caso de las probetas de aluminio y aluminio-cobre, de unos 300 [°C]. En la Figura 2.13 podemos observar probetas de aluminio introducidas en el horno.



Figura 2.13 Probetas de aluminio introducidas en el horno mufla.  
(Fuente: Propia)

### 2.15.7 Enfriamiento y post limpieza

Una vez finalizado el proceso de soldadura se procede a apagar el horno o detener el calentamiento y dejándolo el menor tiempo, se procedía a sacar las probetas para que se enfríen al aire, luego de esto se limpiaba la junta de los óxidos formados debido a las altas temperaturas especialmente en las probetas de cobre interna y externamente, en las probetas de aluminio no se requería mucho esta operación.

## 2.16 Procedimiento para la realización de la soldadura indirecta por horno.

### 2.16.1 Proceso experimental inicial

El proceso de soldadura indirecta por horno realizado, donde se soldó las probetas de cobre-cobre y aluminio-aluminio con un accesorio de unión simple, esto permitió acoplar los tramos de las tuberías de cobre y aluminio con su respectivo acople de acuerdo a las medidas de cada tubería, en cambio para las tuberías de aluminio-cobre no se necesitó ningún accesorio porque se diseñó una junta a traslape con la inserción de la tubería de aluminio en la de cobre como lo indica en el **apartado 2.14**.

Para poder encontrar el procedimiento óptimo del proceso de soldadura indirecta por horno, se varió el rango de temperaturas en el que se ejecuta el proceso y el tiempo, variables esenciales, ya que estos factores principales garantizan la calidad de la unión soldada, así como poder verificar el rango de temperaturas de los metales de aporte y el tiempo idóneo para nuestro proceso que según la revisión bibliográfica está en un tiempo de 2 a 4 minutos.

Para efectuar el proceso de soldadura indirecta por horno de las probetas a soldar se siguió los pasos del apartado 2.13 y las variables establecidas son las siguientes de acuerdo a cada tipo de probeta.

Tabla 2.16 Variables establecidas para el proceso experimental de las probetas Cu-Cu.

Variable	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
Probetas Cu-Cu					
Metal base	Cobre rígido	Cobre rígido	Cobre rígido	Cobre rígido	Cobre rígido
Metal de aporte	BCuP-5	BCuP-5	BCuP-5	BCuP-5	BCuP-5
Holgura [mm]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
To [°C]	815	815	815	815	815
Tcai [°C]	730	720	715	760	750
Tf [°C]	815	815	815	815	815
to [min]	1h04 min	1h04 min	1h04 min	1h04 min	1h04 min
tsub [min]	11	13	11	10	11
tsol [min]	4	4	4	4	4

(Fuente: Propia)

Tabla 2.17 Variables establecidas para el proceso experimental de las probetas Al-Al.

Variable	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
Probetas Al-Al					
Metal base	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio
Metal de aporte	Al822	Al822	Al822	Al822	Al822



Holgura [mm]	0.05	0.08	0.1	0.11	0.09
To [°C]	537	537	537	537	537
Tcai [°C]	415	430	450	400	420
Tf [°C]	537	537	537	537	537
to [min]	47	47	47	47	47
tsub [min]	13	12	9	14	11
tsol [min]	4	4	4	4	4

(Fuente: Propia)

Tabla 2.18 Variables establecidas para el proceso experimental de las probetas Al-Cu.

Variable	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
Probetas Al-Cu					
Metal base	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio
	Cobre flexible	Cobre flexible	Cobre flexible	Cobre flexible	Cobre flexible
Metal de aporte	Al822	Al822	Al822	Al822	Al822
Holgura [mm]	0.06	0.05	0.1	0.11	0.12
To [°C]	537	537	537	537	537
Tcai [°C]	430	450	470	480	440
Tf [°C]	537	537	537	537	537
to [min]	47	47	47	47	47
tsub [min]	13	12	10	8	11
tsol [min]	4	4	4	4	4

(fuente: Propia)





Figura 2.14 Probetas soldada con el proceso experimental.  
(Fuente: Propia)

El análisis de las probetas soldadas en cada caso se soldó en el intervalo de temperaturas recomendadas por el fabricante y en un tiempo de soldadura estimado de 4 minutos y se determinó lo siguiente:

Para las probetas de cobre el metal de aporte interactúa de más desparramándose en el metal base y no formaba un filete continuo, también se lograba ver una falta de fusión en un 10 % aproximadamente de toda la junta.

Para las probetas de aluminio-aluminio y aluminio-cobre se encontró distorsión, falta de fusión en cada caso.

### 2.16.2 Proceso experimental optimizado

En este proceso se varió dos parámetros importantes en el proceso de soldadura indirecta por horno el tiempo y la temperatura de soldeo a la cual fueron sometidas las probetas.

Para las probetas de cobre se cambió los siguientes parámetros.

Tabla 2.19 Parámetros del proceso experimental optimizado para las probetas de Cu-Cu.

Temperatura de soldadura indirecta [°C]	815	
Tiempo del proceso de soldadura indirecta [min]	4-6	2-3

(Fuente: Propia)

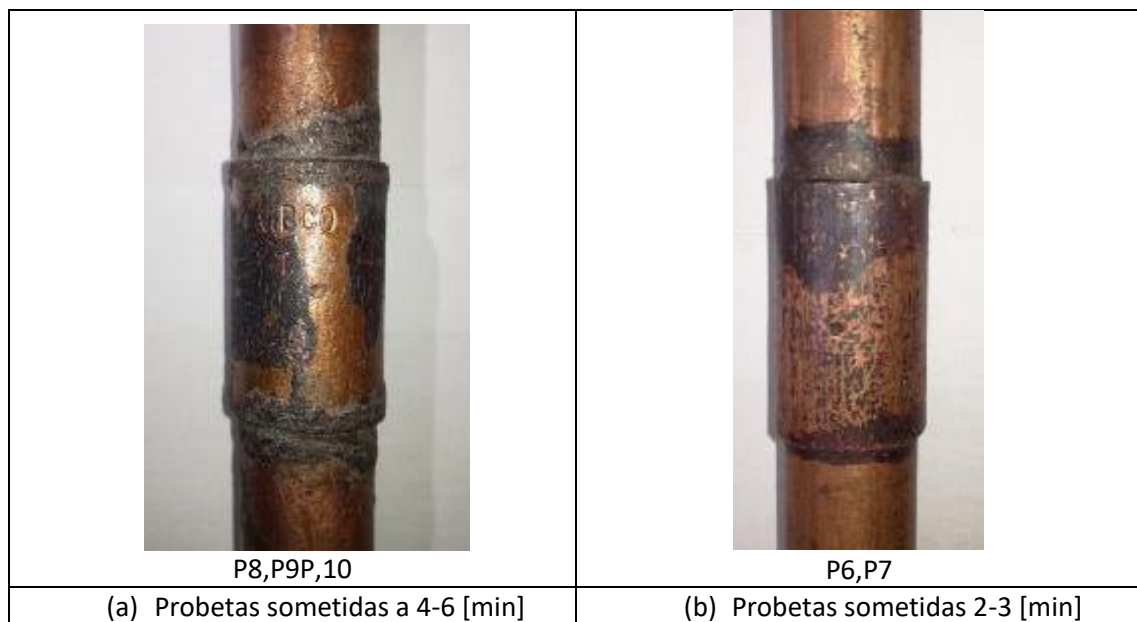


Figura 2.15 Probetas soldadas en un tiempo de 6 y 2 minutos.

(Fuente: Propia)

En cambio, para las probetas de aluminio-aluminio y aluminio-cobre se cambió los parámetros de temperatura y el tiempo del proceso de soldadura para ambos casos.

Tabla 2.20 Parámetros del proceso experimental optimizado para las probetas de Al-Al y Al-Cu.

Temperatura de soldadura indirecta [°C]	537
Tiempo del proceso de soldadura indirecta [min]	4-6

(Fuente: Propia)



Figura 2.16 Probetas soldadas en un tiempo de 4 a 6 [min].  
(Fuente: Propia)

En el caso del proceso optimizado para las probetas de cobre el tiempo de soldeo de 4-6 [min] se evidencia una mejor soldadura, sigue desparramándose, forma un filete continuo, en cambio en el intervalo de 2-3 [min] se observa una junta con mejor apariencia, filete continuo en su totalidad, una correcta interacción entre metal de aporte y metal base.

Para las probetas de aluminio-aluminio y aluminio-cobre con los parámetros establecidos ya no hubo distorsión alguna, existió mejor apariencia en el cordón de soldadura, aunque había una ligera interacción normal del metal base y metal de aporte.

En la tabla 2.21 se muestran los parámetros de temperatura y tiempo bajo las cuales fueron soldadas las probetas del presente estudio.

Tabla 2.21 Parámetros de temperatura y tiempo de las probetas soldadas.

Probetas	Tipo de probeta					
	Cu-Cu		Al-Al		Cu-Al	
	Parámetros de trabajo de las probetas soldadas					
	Temp. [°C]	Tiempo [min]	Temp. [°C]	Tiempo [min]	Temp. [°C]	Tiempo [min]
P1	705-815	4	480-537	4	482-537	4
P2	705-815	4	480-537	4	480-537	4
P3	705-815	4	480-537	4	480-537	4
P4	705-815	4	480-537	4	480-537	4
P5	705-815	4	480-537	4	480-537	4
P6	815	2-3	537	4	537	4

P7	815	2-3	537	4	537	4
P8	815	4-6	537	4-6	537	4-6
P9	815	4-6	537	4-6	537	4-6
P10	815	4-6	537	4-6	537	4-6

(Fuente: Propia)

### 2.16.3 Equipo utilizado para la soldadura indirecta por horno

El horno para la ejecución del proceso de soldadura, es el principal equipo donde se realizará el proceso de soldadura para la obtención de las juntas soldadas, debido a que se trabajará con temperaturas relativamente altas, el horno debe garantizar un control adecuado de la temperatura, pero además del sensor de la temperatura del propio horno se contó con una termocupla para un mayor control de este parámetro muy importante en el proceso por ello se escogió el horno tipo mufla MARCA VULCAN del laboratorio de tratamientos térmicos, según la teoría vista es un horno tipo discontinuo o por lotes como podemos apreciar en la Figura 2.17, las características del horno se describen a continuación.



Figura 2.17 Horno Mufla usado para efectuar el proceso de soldadura.  
(Fuente: <https://www.amazon.com/-/es/neytech-9493308-Vulcan-550-CU-3-Stage-programable/dp/B00NG2KK4A>)

Las características del horno VULCAN son:

- El rango de la temperatura de trabajo va desde los 50 [°C] hasta los 1100 [°C]
- Puerta elevadora de baja fuerza de acción vertical, y acción rotatoria permitiendo acceso máximo con mínimo espacio vertical.
- Control programable con programa de tres etapas
- Amplio rango de la tasa de temperaturas lineal que va de 0.1 a 40 [°C/min]
- Equipo de fácil operar y programar con una interfaz de usuario gráfico.

Tabla 2.22 Especificaciones técnicas del horno VULCAN para el proceso de soldadura.

Especificaciones técnicas	
Rango de temperatura [°C]	50 a 1100
Rango de velocidad de la rampa [°C/min]	0 a 40
Precisión de la temperatura	± 5° C
Voltaje [V]	120
Frecuencia [Hz]	50/60
Corriente [A]	12
Potencia [w]	1440
Dimensiones internas (LxWxH) [mm]	180x230x230
Dimensiones externas (LxWxH) [mm]	630x410x430

(Fuente: <https://www.yumpu.com/es/document/view/51570386/vulcan-box-furnace-dentsply>)

#### **2.16.4 Especificación del procedimiento de soldadura fuerte (BPS).**

Es un documento escrito donde se establece el procedimiento, calificado, que nos indica y garantiza de forma completa de cómo hacer una unión soldada. El BPS nos brinda la información de las variables esenciales y no esenciales para un procedimiento de soldadura fuerte. Puede estar en cualquier formato mientras brinde la información necesaria de las variables de acuerdo a las necesidades de cada cliente y sea de forma clara y concisa. Para el presente proyecto de titulación los BPS correspondientes se encuentran en el Anexo VI.

#### **2.16.5 Registro de calificación del procedimiento (PQR)**

Este documento donde se registra los parámetros para soldar especímenes de prueba, también se incluyen los resultados de los ensayos realizados a dichas muestras, el número de muestras a ensayarse lo define la norma o código que se use para dicho proceso, para realizar un proceso de soldadura fuerte de producción se establecen dentro de un rango que garantiza una unión soldada para las condiciones para cual fue diseñado.

Cada fabricante llevará un registro de los resultados que se obtengan en las calificaciones del procedimiento de soldadura fuerte y además de calificaciones de habilidad del operador o soldador que realice el proceso, dichos registros serán registrados certificados por el fabricante. Para el presente proyecto los PQR están en el anexo VII.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados empezando con la caracterización química de los materiales base a través del ensayo de espectrometría de emisión atómica por chispa, posteriormente a las probetas soldadas se les efectuó ensayos de tracción, ensayo de pelado, un análisis metalográfico y por último el ensayo de micro dureza, a través de estos ensayos se pretende estudiar la soldabilidad de estos materiales y analizar su comportamiento mecánico luego del proceso de soldadura fuerte.

#### 3.1. Resultado de la composición química de los materiales base.

Los resultados de la caracterización química de los metales base de cobre y aluminio utilizados en el presente proyecto se presenta en la Tabla 3.1 y 3.2 respectivamente.

Tabla 3.1 Composición química de las muestras de tubería de cobre.

Muestras de cobre		
Elemento	M2-[Cu]	M3-[Cu]
	Composición [%]	
Zinc [Zn]	0.12	0.117
Estaño [Sn]	0.12	0.141
Fosforo [P]	0.016	0.0074
Hierro [Fe]	0.020	0.0076
Níquel [Ni]	0.024	--
Aluminio [Al]	0.015	0.0086
Arsénico [As]	0.054	0.0076
Cobre [Cu]	99.63	99.71
Total	100.00	99.99

(Fuente: Laboratorio de fundición)

Tabla 3.2 Composición química de la muestra de tubería de aluminio.

Muestra de Aluminio			
Elemento	M1-[Al]	Elemento	M1- [Al]
	Composición [%]		Composición [%]
Silicio [Si]	2.919	Titanio [Ti]	0.041
Hierro [Fe]	0.397	Plomo [Pb]	0.189
Cobre [Cu]	0.104	Estaño [Sn]	0.157
Manganeso [Mn]	0.087	Vanadio [V]	>0.108

Magnesio [Mg]	1.578	Estroncio [Sr]	0.040
Cromo [Cr]	0.054	Circonio [Zr]	0.032
Níquel [Ni]	0.0410	Cobalto [Co]	0.095
Zinc [Zn]	0.270	Aluminio [Al]	93.86
<b>Total</b>			<b>99.97</b>

(Fuente: Laboratorio de fundición)

### 3.2. Ensayo de tracción realizado a las probetas soldadas.

Los resultados obtenidos del ensayo de tracción se lo realizaron a cuatro probetas de cada tipo de acuerdo al código ASME Sección IX (parte QB soldadura fuerte apartado 462.1) y los mismos se detallan en la tabla 3.3.

En las Figuras 3.1,3.2 y 3.3 se observan los resultados del ensayo de tracción de las probetas soldadas de Cu-Cu, Al-Cu y Al-Al respectivamente, la línea roja corresponde a la resistencia a la tracción del material base, mientras que la gris corresponde a la resistencia a la tracción del material de aporte utilizado.

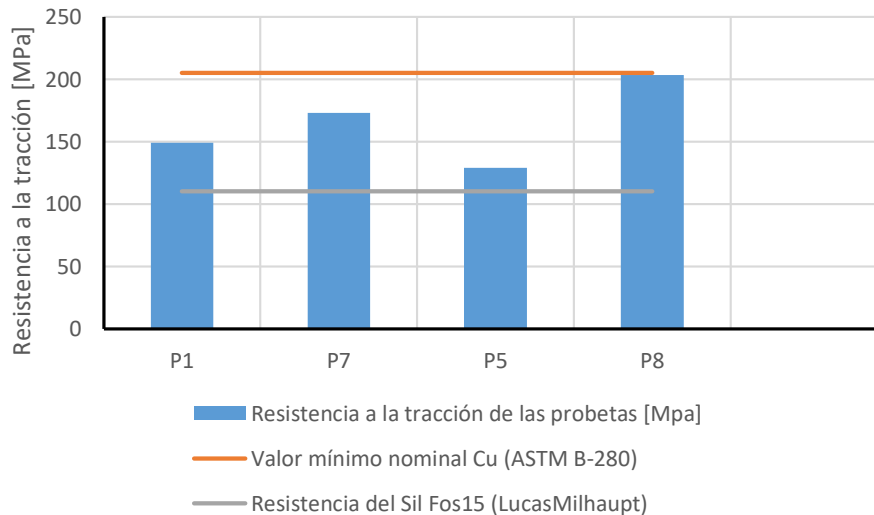


Figura 3.1 Resultado del ensayo de tracción de las probetas Cu-Cu.  
(Fuente: Propia)



Tabla 3.3 Resultado del ensayo de tracción de las probetas soldadas.

Probeta	Diámetro ext. Promedio	Espesor promedio	Carga máxima		Resistencia a la tracción	Obs.
	[mm]	[mm]	[Lbf]	[N]	[MPa]	
Probetas Soldadas de Cobre-Cobre						
P1	15.86	0.92	1450	6449	149.3	FMB
P7	16.04	1.42	2537	11287	173.1	FMB
P5	16.03	0.93	1282	5701	129.2	FJS
P8	15.89	1.13	2397	10662	203.5	FMB
Probetas Soldadas de Aluminio-Cobre						
P4	12.76	1.01	1195	5316	142.6	FMB (Cobre)
P7	12.78	0.99	686	3050	83.2	FJS
P2	12.85	1.05	457	2034	52.3	FJS
P5	12.93	1.06	1316	5853	148.1	FMB (Cobre)
Probetas Soldadas de Aluminio-Aluminio						
P1	12.96	1.39	237	1056	20.9	FJS
P4	12.92	1.41	497	2211	43.4	FJS
P7	12.96	1.64	753	3352	57.5	FJS
P8	13.13	1.5	1012	4500	82.1	FJS

(Fuente: LAEV)

\*FMB: Falla en el material base.

\*FJS: Falla en la junta soldada.

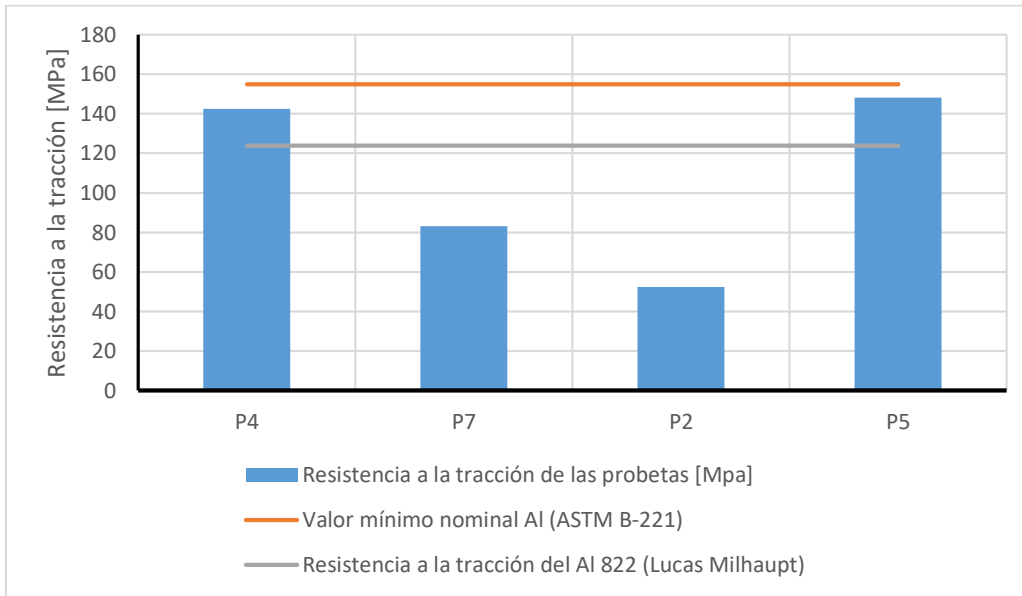


Figura 3.2 Resultado del ensayo de tracción de las probetas Al-Cu.  
(Fuente: Propia)

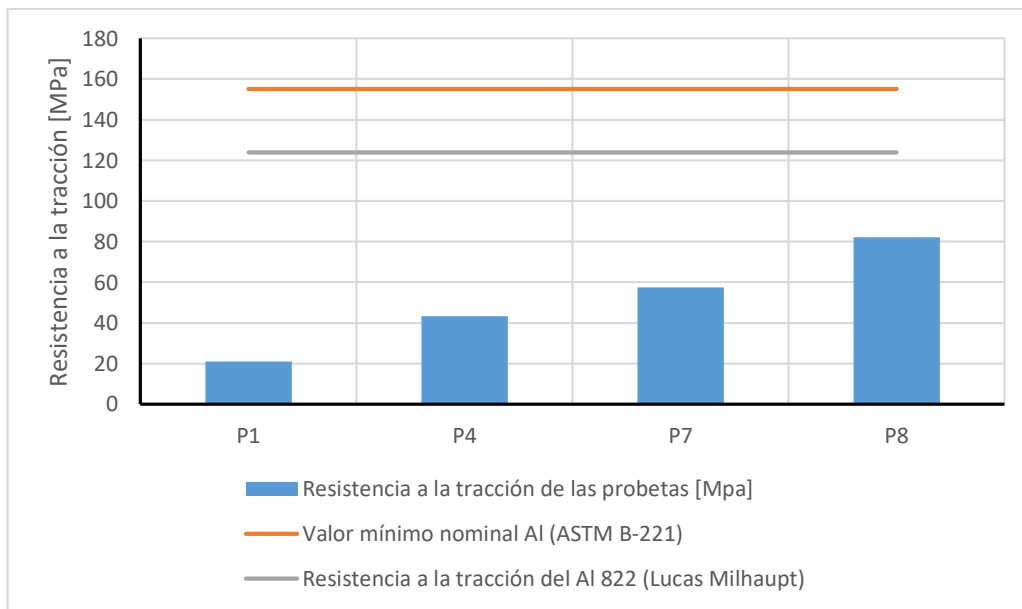







Figura 3.3 Resultado del ensayo de tracción de las probetas Al-Al.  
(Fuente: Propia)

### 3.2.1. Resultados del ensayo de pelado

En la tabla 3.4 se muestra los resultados de las probetas sometidas al ensayo del pelado donde se especifica área traslapada, no soldada y el porcentaje de la misma. Se prepararon dos probetas de cada tipo de acuerdo al código ASME Sección IX (parte QB apartado 462.4).

Tabla 3.4 Resultados del ensayo de pelado de las probetas soldadas.

Resultados del ensayo de pelado de las juntas soldadas				
Muestra	Fotografía	Área Traslapada [mm <sup>2</sup> ]	Área no soldada [mm <sup>2</sup> ]	Porcentaje de área no soldada [%]
Cu-Cu		339.22	48.32	14.24
		496.76	66.2	13.33
AL-Cu		374.05	374.05	100
		163.1	163.1	100
Al-Al		184.74	184.74	100
		166.18	166.18	100

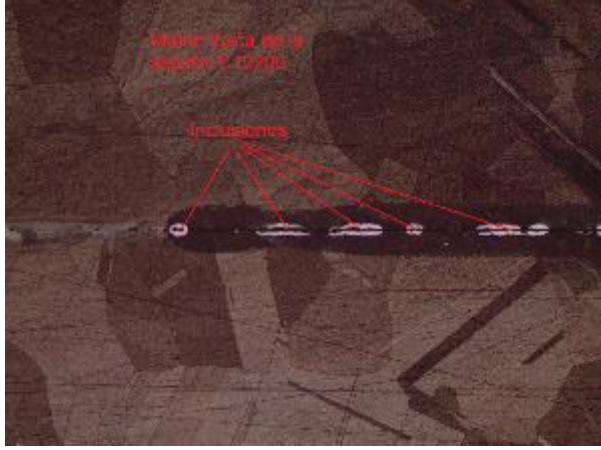
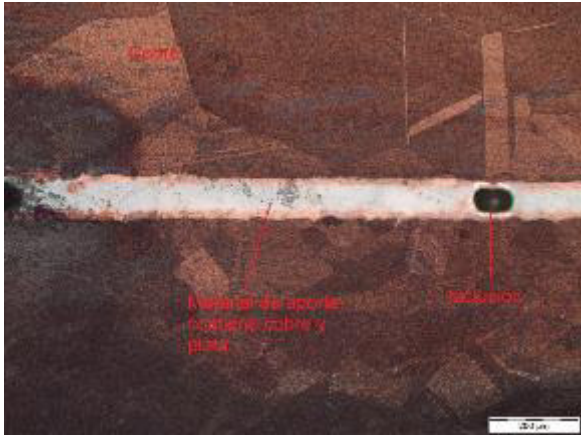
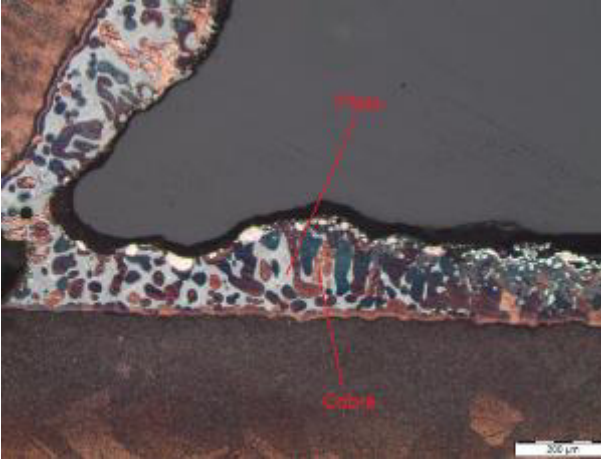
(Fuente: Propia)

En la tabla 3.4 se muestran los resultados del ensayo de pelado, las probetas de cobre tienen rotura incompleta, mientras las probetas de aluminio y las probetas de aluminio-cobre tienen rotura completa, y de acuerdo al apartado 462.4 del código ASME solamente cumplen el criterio las probetas de cobre y las demás probetas no cumplen.

### 3.2.2. Resultados del análisis metalográfico

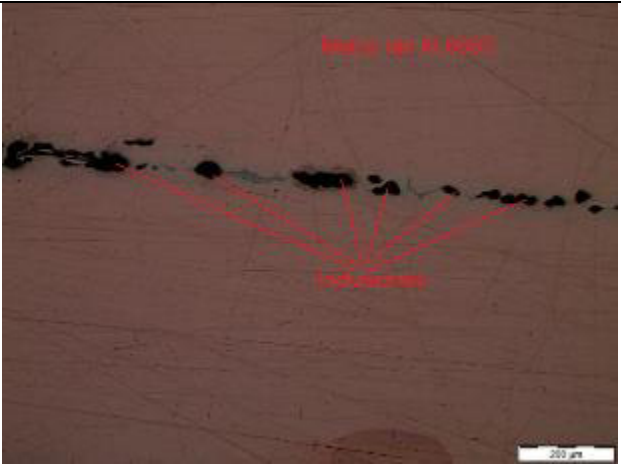
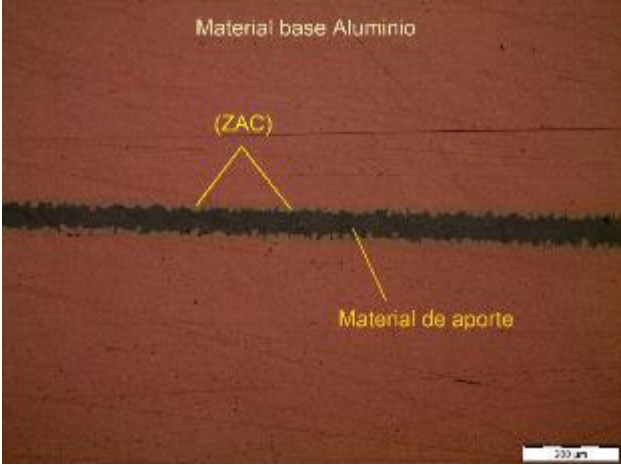
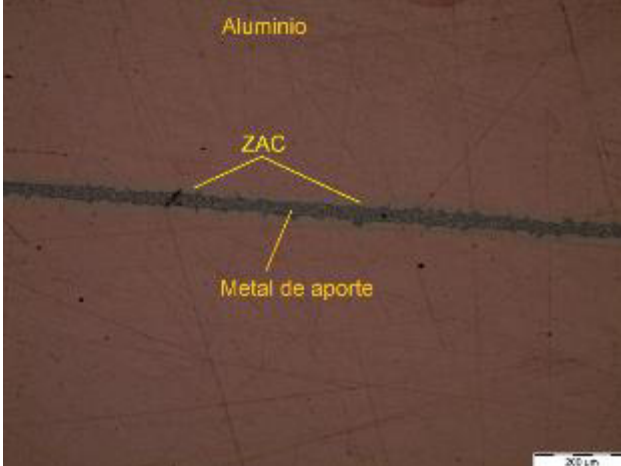
En las tablas 3.3 se muestra los resultados de las micrografías de las probetas de cobre, aluminio y aluminio-cobre con un aumento de 100x.

Tabla 3.3 Micrografías de las probetas Cu-Cu a 100x.

Micrografías de las muestras extraídas con aumento de 100x		
Muestra (Cu-Cu)		Observaciones
1-C	 <p>(a)</p>	En la figura (1-c) se observa la matriz homogénea característica de la aleación de cobre C12200, esas pequeñas manchas alargadas pueden ser óxido de cobre, las partes más oscuras de la matriz probablemente sea óxido fosfórico, debido a que el material se oxida internamente.
2-C	 <p>(b)</p>	En la figura (2-c) se observa la matriz homogénea de la aleación de cobre C12200 y también se puede evidenciar la continuidad en su mayoría del material de aporte con pequeñas inclusiones.
3-C	 <p>(c)</p>	En la figura (3-C) se observa el material de aporte, así como sus componentes de plata y cobre y se observa que existe una buena difusión entre el material de aporte y el metal base en la probeta de cobre.

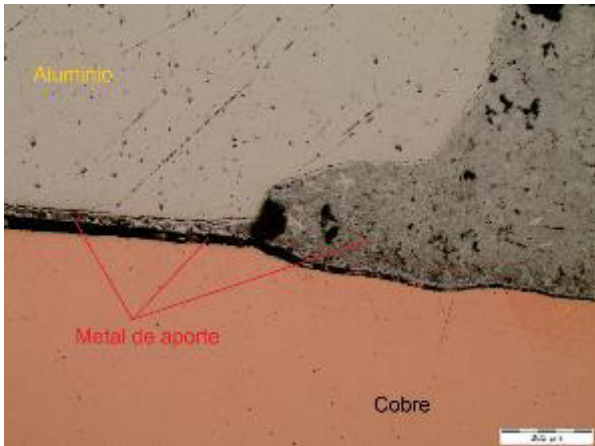
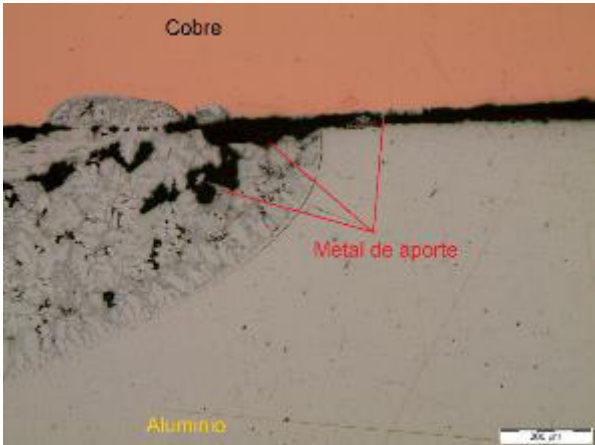
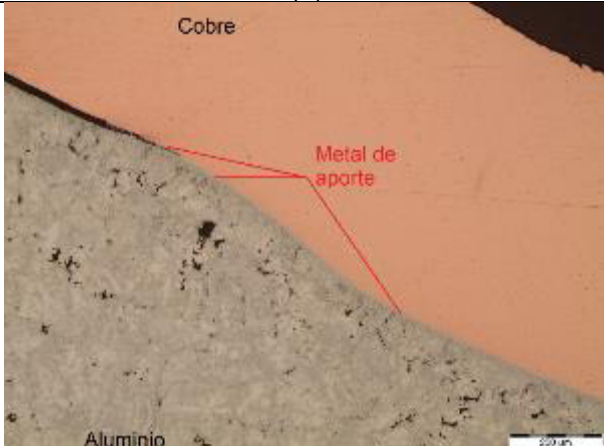
(Fuente: Propia)

Tabla 3.4 Micrografías de las probetas Al-Al a 100x.

Micrografías de las muestras extraídas con aumento de 100x		
Muestra (Al-Al)	Micrografías	Observaciones
1-Al	 <p>(a)</p>	<p>En la figura (1-Al) se puede observar la matriz de la aleación de aluminio 6063 típica con el precipitado <math>Mg_2Si</math> que son los puntos oscuros, metal de aporte, algunas inclusiones en el cordón, falta de penetración que se puede atribuir a fundente atrapado durante el proceso.</p>
2-Al	 <p>(b)</p>	<p>En la figura (2-Al) se observa la matriz de la aleación de aluminio 6063, un cordón de soldadura más uniforme con mejor penetración, la formación de los precipitados <math>Mg_2Si</math> están alejados de la ZAC.</p>
3-Al	 <p>(c)</p>	<p>En la figura (3-Al) se puede ver la matriz de la aleación de aluminio 6063, un cordón de soldadura con una regular difusión entre el metal base y metal de aporte, igualmente en la ZAC esta libre de precipitados <math>Mg_2Si</math>. (metals handbook volumen 9, pag. 749)</p>

(Fuente: Propia)

Tabla 3.5 Micrografías de las probetas Al-Al a 100x.

Micrografías de las muestras extraídas con aumento de 100x		
Muestra (Al-Cu)	Micrografías	Observaciones
1-Al-Cu	 <p>(a)</p>	En la figura (1Al-Cu) se observan los dos materiales disímiles, algunas inclusiones en la parte superior, existe buena difusión entre el Al y el metal de aporte, en cambio con el Cu hay poca difusión.
2-Al-Cu	 <p>(b)</p>	En la figura (2Al-Cu-) se observa ver los dos metales disímiles, algunas inclusiones, falta de penetración, en general no existe una buena difusión tanto para el aluminio y el cobre.
3-Al-Cu	 <p>(c)</p>	En la figura (3Al-Cu-) se observa al aluminio y al cobre, alguna inclusión, existe una buena difusión en la mayoría de unión soldada y solo una pequeña falta de penetración.

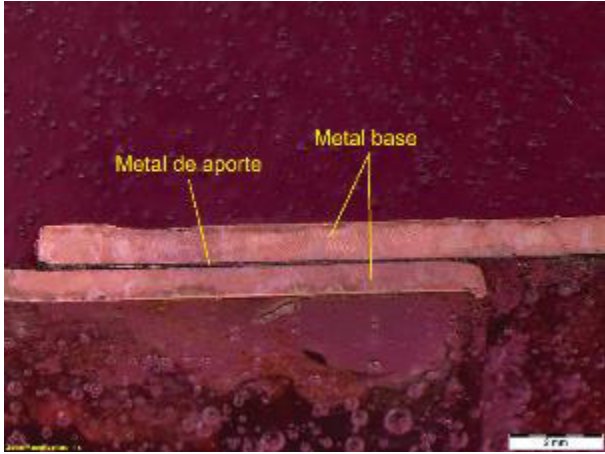
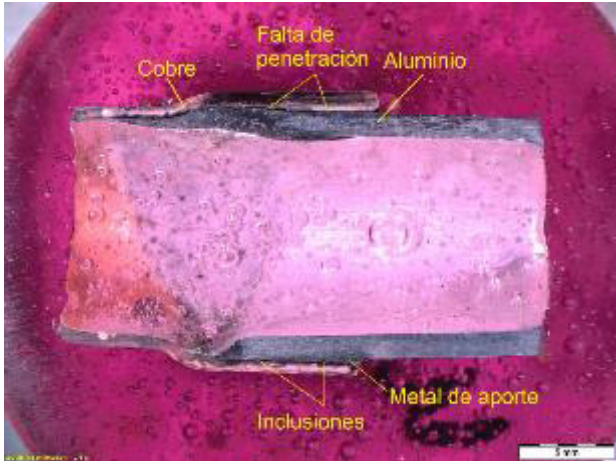
(Fuente: Propia)

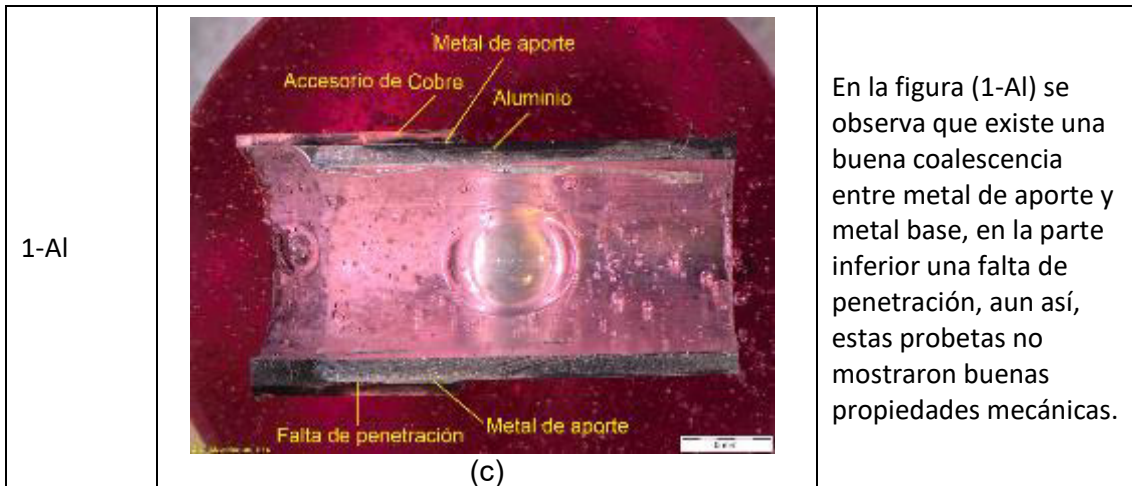


### 3.2.3. Resultado de las macrografías de las probetas soldadas

En soldadura indirecta (fuerte) por horno se generan diversas discontinuidades en la unión soldada, las macrografías permiten observar dichas discontinuidades, en la tabla 3.6 se observa el cordón de soldadura de las 3 mejores probetas soldadas de cada tipo.

Tabla 3.6 Macrografías de las probetas soldadas de Cu, Al y Cu-Al con aumento de 4x.

Macrografías de las muestras extraídas con aumento de 4x		
Muestra (Cu-Cu)	Macrografía	Observaciones
3-C	 <p>(a)</p>	<p>En la figura (3-C) se observa que la sección de la tubería de cobre existe una buena penetración del material de aporte con pequeñas inclusiones, con ello el cordón de soldadura presenta buenas propiedades mecánicas.</p>
3-Al-Cu	 <p>(b)</p>	<p>En la figura (3-Al-Cu) se observa una falta de penetración en la parte superior y en la parte inferior pequeñas inclusiones, la mala capilaridad seguro se debe a fundente atrapado.</p>

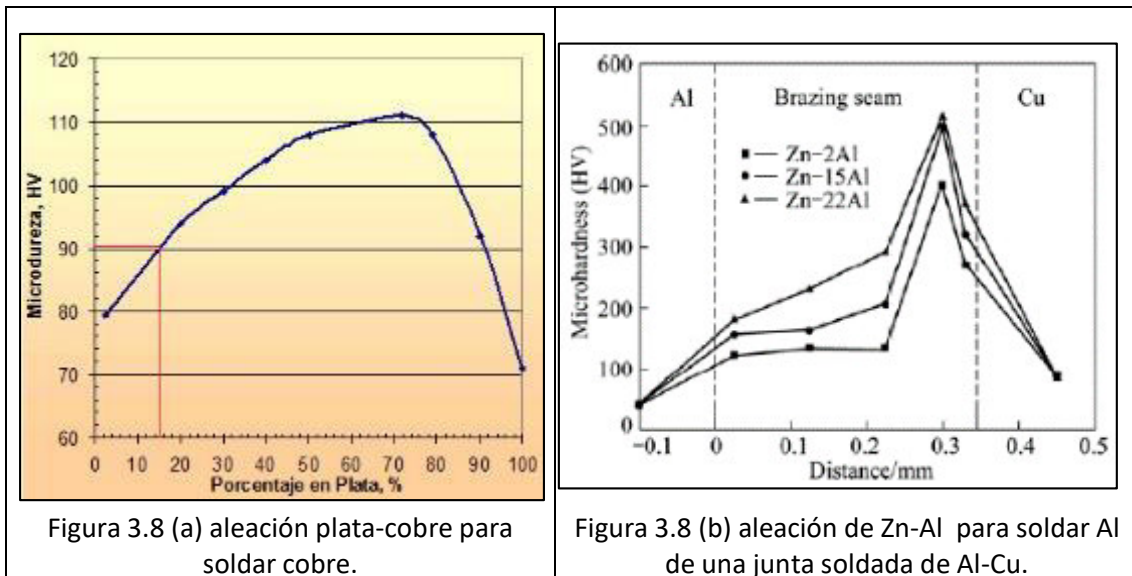


(Fuente: Propia)

### 3.2.4. Resultados y análisis del ensayo de microdureza.

Los resultados de dureza Vickers obtenidos de las probetas seleccionadas posterior al proceso de soldadura realizado se muestran en la Tabla 3.5, además para comprender mejor el comportamiento de este ensayo en la junta soldada se muestran las indentaciones y el valor de la misma como se puede apreciar en la Figura 3.8.

En las Tablas 2.1 y 2.2 del **apartado 2.1** se presentan los valores de dureza nominales de los metales base y además en la Figura 3.8 se muestran los valores de dureza de las aleaciones de los metales de aporte utilizados.



(Fuente: [27])



Tabla 3.5 Resultados del ensayo de microdureza de las probetas soldadas.

Indentaciones	Probeta de Cu	Probeta de Al	Probeta Cu-Al
	Dureza Vickers [HV]		
1	77.87	59.31	64.39
2	136.46	49.57	101.53
3	88.02	75.05	96.15
4	84.44	216.84	92.47
5	--	44.66	253.93
6	--	55.68	212.08
7	--	--	63.77

(Fuente: Laboratorio de Metalografía)

Los valores obtenidos en el ensayo de dureza Vickers de las probetas soldadas y observando la Figura 3.9 (a y b) las tres soldaduras presentan algo en común: los mayores valores son en la junta soldada y disminuyen en los metales base, para la probeta de aluminio-cobre tiene la misma tendencia en la junta soldada están los máximos valores de dureza. Los valores que se obtienen de los materiales de aporte son similares con los valores referenciados en la figura 3.8 y los valores de los metales son similares con los valores nominales por lo que el proceso de soldadura fue realizado de manera correcta.

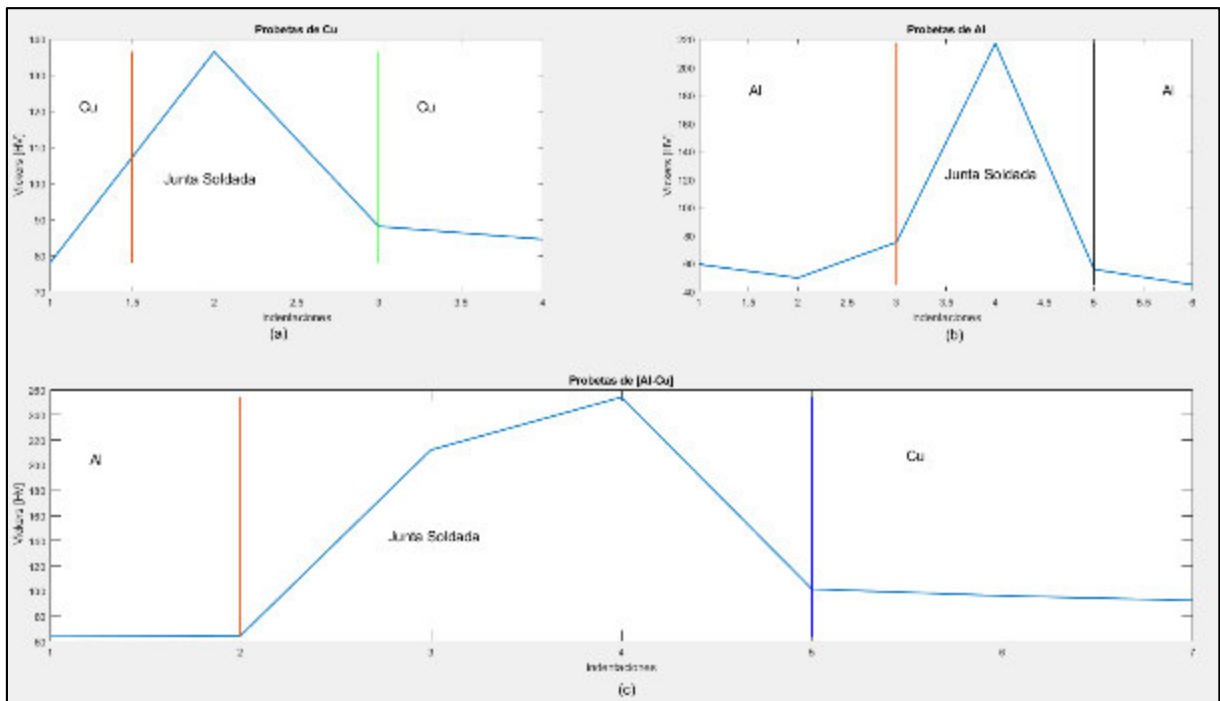


Figura 3.4 Comportamiento de las Microdurezas en las juntas soldadas.  
(Fuente: Propia)

### 3.3. Discusión e interpretación de los resultados

#### 3.3.1. Análisis de caracterización de los materiales base

El análisis de espectrometría por chispa realizado a los materiales base de cobre y aluminio mostrados en las Tablas 2.3 y 2.4 indican que la composición química nominal de los elementos aleantes del material de cobre están dentro de los valores nominales según la norma ASTM B-280.

En cambio, para la tubería de aluminio la mayoría de elementos aleantes están dentro de los valores nominales excepto el silicio que está excedido en más del 100% respecto al valor nominal de acuerdo a la norma ASTM B-221, para ello pueden existir varias causas como: la mala calibración del equipo o falta de la matriz del aluminio para realizar la comparación, o que el chispazo cayó justo en una zona rica en silicio.

### **3.3.2. Análisis del ensayo de tracción**

Los resultados del ensayo de tracción de las probetas soldadas se muestran en las Figuras (3.1, 3.2 y 3.3) que corresponden a las probetas soldadas de (Cu-Cu, Al-Cu y Al-Al), analizando los resultados se observa en la Figura 3.1 que todas las probetas superan la resistencia a la tracción del material de aporte, de acuerdo a los criterios de aceptación para este ensayo, el apartado Q-462.1 del código ASME concede un 5% menos de la resistencia nominal del material base cuando este falla, de acuerdo a esto la probeta 8 cumple con el requerimiento, ya que la junta soldada tiene un valor de 196.5 [MPa] como mínimo, dicha probeta tuvo parámetros de tiempo y temperatura de 4 a 6 minutos y una temperatura de 815 [°C] esto puede deberse a que hubo mejor capilaridad, las superficies “mojaron” de manera uniforme, se debe tomar en cuenta que la falla se origina en el metal base mas no en la junta.

Para las probetas aluminio-cobre se observa que la probeta P4 y P5 superan la resistencia a la tracción del material de aporte, no así las probetas P7 y P2, y de acuerdo al apartado Q-462.1 del código ASME concede un 5% menos de la resistencia nominal del material base más débil por lo tanto la probeta P5 cumple con el requerimiento esta tuvo parámetros de tiempo y temperatura de 4 minutos y 537 [°C]. Las probetas que cumplieron el código posiblemente tuvieron una mejor capilaridad esto implica que tuvieron una holgura adecuada, en cambio con las probetas que no cumplieron puede deberse a que hubo mala capilaridad, esto debido a que el material no “mojó” bien las superficies, una holgura inadecuada y atrapamiento de fundente, se encuentran las posibles causas.

Para las probetas de aluminio-aluminio como se puede observar en la figura 3.3 sus valores de resistencia a la tracción son bajos no superan ni el valor de resistencia a la tracción del material de aporte por lo tanto ninguna probeta soldada cumple con el

apartado del código ASME, esto básicamente a que no existe una buena difusión entre el material base y metal de aporte, existe poca o nula adherencia, esto se traduce a que no existió una correcta capilaridad.

### **3.3.3. Análisis del ensayo de pelado**

Los resultados del ensayo de pelado de las probetas soldadas que se muestran en la Tabla 3.4 y de acuerdo al apartado QB-172 del código ASME, las probetas sometidas a dicho ensayo, que cumplen los requerimientos del mismo únicamente son las probetas soldadas de cobre-cobre con una área no soldada menor al 25% esto debido a que poseen capilaridad uniforme, buena difusión, existe buena mojabilidad, mientras las probetas de Al-Cu y Al-Al poseen un área no soldada del 100% estas no cumplen debido a una capilaridad inadecuada, falta de difusión entre metal base y metal de aporte, esto implica que no tienen buena mojabilidad entre las superficies por esto no cumplen los criterios de aceptación del código.

Las probetas de cobre a pesar que posee pequeñas inclusiones y falta de mojado no ven afectadas sus propiedades mecánicas, dichas probetas presentaban dificultad de separación de la unión soldada, esto debido especialmente que existe buena difusión y una mojabilidad adecuada entre las superficies.

En cambio, para las probetas de aluminio y Al-Cu al momento de ensayar las probetas la separación de la unión soldada no presentó resistencia a la separación de la junta. En dichas probetas se puede apreciar que el metal de aporte no ha “mojado bien” y se ha desparramado, por esto no existe una buena capilaridad, y además no hay buena adherencia en la unión soldada.

Entonces de acuerdo a los resultados expuestos únicamente las probetas de cobre calificarían para el proceso y las demás no califican.

### **3.3.4. Análisis de las metalográfico**

El análisis metalográfico permite observar la microestructura y si sufrió algún cambio debido a que las probetas estuvieron expuestas a altas temperaturas en el caso de las probetas de Cu, en 800 [°C] y las de Al, Cu-Al fueron expuestas a unos 500 [°C].

En la tabla 3.3 de manera general se observa en todas las imágenes una matriz homogénea de la aleación de cobre C12200, estas a pesar que poseen pequeñas inclusiones (figura 3.4,1-C) sus propiedades mecánicas no son afectadas de manera drástica.

En la tabla 3.5 para la aleación de aluminio 6063 se puede observar que poseen varias inclusiones, en la figura (3.5,2-Al) y (3.5,3-Al) se puede observar una buena difusión entre el material base y material de aporte. Las propiedades mecánicas de las probetas de aluminio se ven muy afectadas, la zona afectada por el calor reduce las propiedades del metal base debido a que los precipitados  $Mg_2Si$  que se forman se desplazan de la unión soldada hacia el material base, tal como se observa en la figura (2-Al) esto debido a la temperatura a la que se encuentran expuestas. El siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ) brinda la característica de endurecimiento y es por eso que estas probetas tienen las peores propiedades mecánicas de todas.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- El presente trabajo de análisis de soldabilidad se cumplió con los objetivos propuestos, se analizó todos los parámetros indicados en el trabajo, todas las combinaciones de soldaduras Al-Al, Cu-Cu y Al-Cu, el proceso que presenta facilidad es la soldadura de cobre y las restantes presentan dificultad en el proceso especialmente la soldadura de aluminio.
- La disposición de las probetas en el horno influye de manera sustancial en la acción del flujo capilar en la junta a soldar en el caso de las tuberías la mejor es la disposición horizontal.
- Otro factor importante determinado en el presente estudio en la soldadura indirecta se ve afectado por la holgura o separación de la junta lo cual influye en la acción del flujo capilar.
- Las probetas de cobre presentan las mejores propiedades mecánicas con un incremento del 10% con respecto a la norma para el ensayo de tracción.
- Las probetas de aluminio no presentaron buenas propiedades mecánicas debido a que estaban con un 40% debajo de lo que establece la norma, presentaron defectos como porosidades, falta de capilaridad que imposibilitaron esta mejora.
- El diseño de juntas para soldadura indirecta en tuberías de cobre con junta traslape-tope son las que mejores resultados presenta para este proceso.
- En el caso de las probetas de cobre se obtuvo uniones soldadas de calidad sin la necesidad del uso de fundente, mientras que para las otras probetas el fundente que viene en el metal de aporte no es suficiente para el proceso de soldadura fuerte por horno.
- Las probetas obtenidas de la soldadura de cobre presentan las mejores propiedades mecánicas esto debido a que hubo buena capilaridad, humectación y mojabilidad el proceso posiblemente influya en estas características.
- En las probetas de aluminio pudo haber influenciado la microestructura de los precipitados de  $Mg_2Si$  haciéndolo al material más susceptible a las fracturas esto se refleja en el comportamiento mecánico de las probetas.

### 4.2. Recomendaciones

- Para tener una mejor predisposición de las tuberías y estas no se muevan se la coloca en forma horizontal dentro de la mufla sobre elementos refractarios esto permitirá que los metales no estén en contacto directo con la cámara para no dañar la misma.
- Para obtener un proceso de soldadura óptimo se debe realizar un proceso de limpieza a los elementos a soldar como se menciona en el presente documento y también tomar las precauciones necesarias durante el proceso de soldadura.
- Debido a que este proceso se trabaja con temperaturas superiores a 500 [°C] se debe tener un equipo personal de protección la persona que este manipulando el equipo durante todo el proceso.
- Se debe tener en cuenta un correcto ensamblaje del conjunto a soldar esto incluye a los elementos a soldar, a los materiales de aporte en este caso al anillo interior que se coloca en el interior de las tuberías, debido a que puede haber una incorrecta capilaridad al momento de fluir el material de aporte.
- En el caso de utilizar sujetadores que mantengan al conjunto a soldar estos pueden ser de acero o materiales similares ya que soportan altas temperaturas mayor a la del cobre y aluminio.
- Viendo los resultados del presente trabajo se podría sugerir realizar un análisis de la soldabilidad del aluminio con el proceso de soldadura estudiado ya que este fue el que no presento buenos resultados, realizando un mayor análisis de los factores que deberían correlacionarse para poder tener un procedimiento aceptable con este material.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Mel M. Schwartz (2003). *Brazing*, (2ª ed.) Ohio: ASM INTERNATIONAL, Materials Park.
- [2] American Welding Society "AWS". (2007). *Brazing Handbook*, (5ª edición) Miami: N.W. LeJeune Road.
- [3] ASME-IX (1998). *Qualification standard for welding, brazing and fusing procedures; welders; brazers; and welding, brazing and fusing operators*. NY, USA.
- [4] Pilla Tituaña, Cristian F. y Mendoza Chanatasig Medardo A. (2009). Trabajo de titulación: Soldadura Indirecta en tuberías de cobre para instalaciones de agua potable. Quito, EPN. Recuperado de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1544>
- [5] AWS American Welding Society (2008), AWS C3.6M/C3.6:2008 "Specification for Furnace Brazing", (3ª edición), USA.
- [6] AWS American Welding Society (2011), AWS C3.7M/C3.7:2011 "Specification for Aluminium Brazing", (4ª edición), USA.
- [8] AWS American Welding Society (2004), AWS A5.8/A5.8M "Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding". USA.
- [9] AWS American Welding Society (2012), AWS A5.31M/A5.31 "Specification for Filler Fluxes for Brazing and Braze Welding", (2ª edición), USA.
- [10] ASTM-E8/E8M (2013). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. USA.
- [11] ASTM B280 (2013). *Standard Specification for Seamless Copper Tube for Air Conditioning and Refrigeration Field Service*. USA.
- [12] ASTM B88 (2020). *Standard Specification for Seamless Copper Water Tube*. USA.
- [13] ASM Handbook (1992). *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials* (Vol. 2). The Materials Information Company.
- [14] ASM Handbook (2004). *Metallography and Microstructures* (Vol. 9). The Materials Information Company.
- [15] Guamangallo Mendoza Juan C. y Villarroel Ricaurte Edison G. (2012). Trabajo de titulación: Análisis de la soldadura indirecta por horno (FB) en aceros al carbono. Quito, EPN. Recuperado de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5429>
- [16] Pérez Chapués Soraya V. y Reyes Delgado Ana M. (2014). Trabajo de titulación: Soldabilidad y análisis del comportamiento de la soldadura blanda al horno en aceros AISI 1035 Y ASTM A36. Quito, EPN. Recuperado de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8212>
- [17] Guanuchi Chávez Esteban A. (2015). Trabajo de titulación: Análisis y determinación del rango de temperatura óptimo para la soldadura Brazing con soplete de la tubería de cobre aleación C12200 Tipo K, L Y M, Quito, EPN. Recuperado de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/12438>
- [18] Sandoval Asimbaya José A. y Túqueres Cevallos Edison B. (2015). Trabajo de titulación: Análisis y Caracterización de la soldabilidad del Aluminio Estructural

AA6061 y AA6063 mediante el proceso Brazing con soplete (TB), Quito, EPN.  
Recuperado de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11012>

- [19] Lucas Milhaupt. (2015). The Brazing book. Recuperado de: <https://lucasmilhaupt.com/ES/Resource-Library/Metal-Joining-Welding-vs.-Brazing-vs.-Soldering.htm>
- [20] Lucas Milhaupt. (2015). "Principios básicos de la soldadura fuerte: como realizar una soldadura fuerte en 6 pasos". Recuperado de: <https://lucasmilhaupt.com/ES/Brazing-Academy/Brazing-Fundamentals.htm>
- [21] Aluaz somos aluminio. "Historias y generalidades del aluminio". Recuperado de: <https://aluaz.com/2020/07/31/historia-y-generalidades-del-aluminio/>
- [22] KNIGHT GROUP. (2017). "Aleaciones de aluminio". Recuperado de: <https://www.knight-group.co.uk/wp-content/uploads/PM%20Files/Spanish/Materials/PMQR76%20Spanish%20Knight%20Group%20Aluminium.pdf>
- [23] Salvador Ortolá. (2009). "Manual del aluminio y sus aleaciones". Blog de ingeniería de materiales. Recuperado de: <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>
- [24] Metalurgia y materiales. "Aleaciones de cobre". Recuperado de: <http://cesarmetalugista.blogspot.com/p/aleaciones-de-cobre.html>
- [25] Rodríguez Pérez Osmundo H. (2018). Soldadura del cobre. Recomendaciones tecnológicas. Ciencias Holguín. Vol. 24. Recomendado de: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/1815/181555444001/181555444001.pdf>
- [26] Oerlikon Metco. (2015). "An Introduction to Brazing, Fundamentals, Materials, Processing". Recuperado de: [https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon\\_BRO-0010.4\\_Introduction\\_to\\_Brazing\\_EN.pdf&download=1](https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_BRO-0010.4_Introduction_to_Brazing_EN.pdf&download=1)
- [27] Ji Feng, XUE Song-bai, LOU Ji-yuan, LOU Yin-bin, WANG Shui-ying (2011). Microstructure and properties of Cu/Al joints brazed with Zn-Al filler metals, China. School of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1003632611611722>
- [28] Galbarro, H.R. (2014). Propiedades físicas-químicas del cobre. Recuperado de: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn112.html#seccion22>
- [29] CEDIC. (2000). Manual de tubo y accesorios de cobre. Madrid. Jacomil S.L.
- [30] ASTM B221 (2020). Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles, and Tubes. USA.
- [31] Hernandez G. Willfrido. (2016). "Tuberías de refrigeración". Blog de refrigeración. Recuperado de: <http://cetis146c05.blogspot.com/2016/05/14-tuberia-para-refrigeracion.html>
- [32] SENA (1970). Soldadura No Ferrosas. (Colombia). Recuperado de: [https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/3993/3684\\_soldaduras\\_no\\_ferrosas.pdf;jsessionid=0C33267B8A0FA26F7204C6AA78797296?sequence=1](https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/3993/3684_soldaduras_no_ferrosas.pdf;jsessionid=0C33267B8A0FA26F7204C6AA78797296?sequence=1)
- [33] Palas Zúñiga Maria Alejandra del Rosario. (2012). Trabajo de titulación: Reconocimiento de Fases en aleaciones de aluminio en estado modelado,



Universidad de Piura. Recuperado de:  
[https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1726/IME\\_163.pdf](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1726/IME_163.pdf)

## ANEXOS

### ANEXO I. Combinaciones de los metales de aporte-metales base para el proceso de soldadura fuerte.

Combinación de metal de aporte y metal base para soldadura fuerte											
Metal de aporte	Metales Base										
	Aluminio y sus aleaciones	Aceros al carbono ya ceros de baja aleación	Hiero fundido	Cerámicos	Cobalto y sus aleaciones	Cobre y sus aleaciones	Magnesio y sus aleaciones	Níquel y sus aleaciones	Acero Inoxidable	Titanio y sus aleaciones	Acero de herramientas
Base Aluminio-Silicio [BAISi]	●								●	●	
Base Cobalto [BCo]					●			●	●		
Cobre(puro) [BCu]	●	●				●		●	●		●
Cobre fosfórico [BCuP]						●					
Cobre-zinc [BCuZn]	●	●				●		●			●
Base Accero	●							●	●		●
Base Oro [BAu]	●	1				●		●	●		●
Base Magnesio [BMg]						●					
Base Níquel [BNi]	●	●			●	●			●		●
Base Plata [BAg]	●	●		●		●		●	●	●	●
BaseTitanio				●					●		

<sup>1</sup> las aplicaciones son limitadas

(Fuente: [26])

**ANEXO II.** Informe técnico del ensayo de espectrometría por chispa.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

**INFORME TÉCNICO**

**Solicitado por:** Ing. Diego Espinosa

**Tipo de Trabajo:** Espectrometría por chispa

**Fecha:** 20 de octubre del 2020

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

**Descripción:** Ensayo de espectrometría por chispa en dos probetas

**1. ANTECEDENTES.**


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

Se solicita realizar el ensayo con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas.

**2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.**

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

Nombre	Identificación de la probeta	Fotografía
Muestras de material metálico	Muestra M1-AL	
	Muestra M2-CU	

Muestras de material metálico	Muestra M3-CU	
-------------------------------	---------------	--

### 3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

#### 3.1. Probeta de Aluminio

a) **Limpieza Superficial:** Según norma ASTM E1251 – 17a Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry

b) **Método:** Al 120 Al-Si

#### 3.2. Probeta de Cobre

a) **Limpieza Superficial:** Según la norma EN 15079: 2015 “Copper and copper alloys Analysis by spark optical emission spectrometry (S - OES)”

- Apparatus for sample surface preparation: Apartado 5.2

- Surface preparation: Apartado 7.1

b) **Método:** Cu 160 Cu-SnPb

### 4. VALORES OBTENIDOS

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

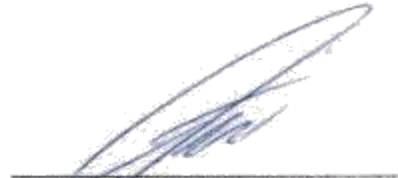
Muestra de Aluminio M1-AL	
Elemento	Valor [%]
Silicio [Si]	2,919
Hierro [Fe]	0,397
Cobre [Cu]	0,104
Manganeso [Mn]	0,087
Magnesio [Mg]	1,578
Cromo [Cr]	0,054
Níquel [Ni]	0,041
Zinc [Zn]	0,270
Titanio [Ti]	0,041
Plomo [Pb]	0,189
Estaño [Sn]	0,157
Vanadio[V]	>0,108
Estroncio[Sr]	0,040
Circonio[Zr]	0,032
Cobalto[Co]	0,095
Aluminio [Al]	93,86 *
<b>Total</b>	<b>99,97</b>

Muestras de Cobre		
Elemento	M2-CU	M3-CU
	Valor [%]	Valor [%]
Zinc [Zn]	0,120	0,117
Estaño[Sn]	0,120	0,141
Fosforo [P]	0,016	0,0074
Hierro [Fe]	0,020	0,0076
Níquel [Ni]	0,024	--
Aluminio [Al]	0,015	0,0086
Arsénico [As]	0,054	0,0076
Cobre [Cu]	99,63	99,71
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>99,99</b>



Ing. Luis G. Huilca

**Técnico Responsable**



Ing. Oscar Sotomayor Msc.

**Jefe del Laboratorio de  
Fundición.**



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración.

**Bruker Analysis Report**



Sample: M1-AL

Analysis Time: 13.10.2020 10:18:33

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	2,919	0,397	0,104	0,087	1,578
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,054	0,041	0,270	0,041	0,189
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	0,167	>0,108	0,040	0,032	0,095
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0100	93,86			

**Bruker Analysis Report**



Sample: M2-CU

Analysis Time: 13.10.2020 10:58:45

Method: Cu160

	Zn [%]	Pb [%]	Sn [%]	P [%]	Mn [%]
∅	0,120	<0,0100	<0,800	0,016	<0,0020
	Fe [%]	Ni [%]	Al [%]	S [%]	As [%]
∅	0,020	0,024	0,015	<0,0020	0,054
	Sb [%]	Cu [%]			
∅	<0,0100	99,63			

## Bruker Analysis Report



Sample: M3-CU

Analysis Time: 20.10.2020 08:29:54

Method: Cu160

---

	<b>Zn [%]</b>	<b>Pb [%]</b>	<b>Sn [%]</b>	<b>P [%]</b>	<b>Mn [%]</b>
∅	0,117	<0,0100	<0,800	0,0074	<0,0020
	<b>Fe [%]</b>	<b>Ni [%]</b>	<b>Al [%]</b>	<b>S [%]</b>	<b>As [%]</b>
∅	0,0076	<0,0100	0,0086	<0,0020	0,0076
	<b>Sb [%]</b>	<b>Cu [%]</b>			
∅	<0,0100	99,71			



**ANEXO III. Informe técnico del ensayo de tensión.**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
MECÁNICA**



**LABORATORIO DE ANÁLISIS  
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES**

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

<b>INFORME</b>	
LAEV - M20.073	
Quito, 15 de diciembre de 2020	
Solicitado por:	Ing. Diego Espinosa
Persona de contacto:	Marlon Ordoñez
Teléfono:	0989116766
Correo:	marlon.ordonez@epn.edu.ec
Fecha de recepción:	25/11/2020
Fecha de ejecución:	25/11/2020-10/12/2020
ORDEN DE TRABAJO N°:	DM-OT0088-2020

**1. MUESTRAS:** Doce (12) probetas soldadas para ensayo de tracción y tres (3) probetas de material base para ensayo de tracción.

**2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:**

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

**Título de la tesis:** ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA SOLDABILIDAD BAJO LA NORMA AWS C3.6M DE TUBERÍAS DE ALUMINIO Y COBRE CON SOLDADURA INDIRECTA DE METALES POR HORNO (FB) USADO EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras

Id. cliente	Id. LAEV
P1, P8, P5, P7 (Cobre-Cobre)	M20.073.01 - M20.07.04
P4, P7, P2, P5 (Cobre-Aluminio)	M20.073.05 - M20.07.08
P1, P4, P7, P8 (Aluminio-Aluminio)	M20.073.09 - M20.07.12
M1 Material base aluminio	M20.073.13
M2, M3 Material base cobre	M20.073.14 - M20.073.15

**3. CONDICIONES AMBIENTALES:**

Temperatura:  $23,4 \pm 3,5$  °C

Humedad relativa:  $37,6 \pm 12,1$  %



#### 4. ENSAYO DE TRACCIÓN EN JUNTAS SOLDADAS

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla 2. Ensayo de tracción.

Id.	Díametro ext.	Espesor	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	Promedio	Promedio	lbf	N	ksi	MPa	
	mm	mm					
M20.073.01	15,86	0,92	1.450	6.449	21,7	149,3	FMB
M20.073.02	16,04	1,12	2.537	11.287	35,1	178,1	FMB
M20.073.03	16,03	0,93	1.282	5.701	18,7	129,2	FJS
M20.073.04	15,89	1,13	2.397	10.662	29,5	203,5	FMB
M20.073.05	12,76	1,01	1.195	5.316	20,7	142,6	FMB (Cobre)
M20.073.06	12,78	0,99	686	3.050	12,1	83,2	FJS
M20.073.07	12,85	1,05	457	2.034	7,6	52,3	FJS
M20.073.08	12,93	1,06	1.316	5.853	21,5	148,1	FMB (Cobre)
M20.073.09	12,96	1,39	237	1.056	3,0	20,9	FJS
M20.073.10	12,92	1,41	497	2.211	6,3	43,4	FJS
M20.073.11	12,96	1,64	753	3.352	8,3	57,5	FJS
M20.073.12	13,13	1,5	1.012	4.500	11,9	82,1	FJS

\*FMB = Falla en el material base

\*FJS = Falla en la junta soldada

#### 5. ENSAYO DE TRACCIÓN MATERIAL BASE


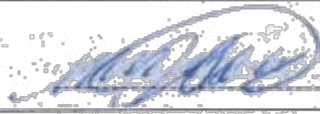
En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla 3. Ensayo de tracción a material base

Id.	Díametro ext.	Espesor	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	Promedio	Promedio	lbf	N	ksi	MPa
	mm	mm				
M20.073.13	12,95	1,41	7.121	9.435	25,8	184,6
M20.073.14	12,95	0,98	1.421	6.321	24,0	171,5
M20.073.15	15,94	1,23	4.685	20.839	53,2	366,6

**Nota.** Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV).

Además, los valores de fuerza que se omiten en el presente documento corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamin
Cargo:	ESPECIALISTA DE LABORATORIO	JEFE
LABORATORIO DE ANALISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		

ANEXO IV. Hoja de especificaciones técnicas del Metal de aporte SIL-FOS 15.



**SIL-FOS® 15**  
(SILVALOY® 15, SILVALOY® 15 EXCEL)

**COMPOSICIÓN NOMINAL**

Plata	15,0% ± 0,5%
Cobre	80,0% ± 1,0%
Fósforo	5,0% ± 0,2%
Otros elementos (total)	0,15% Máx.

**PROPIEDADES FÍSICAS**

Color	Gris
Punto de fusión (estado sólido)	643°C (1190°F)
Punto de fluidez <sup>(1)</sup>	705°C (1300°F)
Rango de temperatura de soldadura fuerte	705°C a 815°C (1300°F a 1500°F)
Densidad relativa	8,44
Densidad (lb/pulg <sup>3</sup> )	0,31
Conductividad eléctrica (%IACS) <sup>(2)</sup>	9,90
Resistividad eléctrica (Microhmios-cm)	17,4

<sup>(1)</sup> El estado líquido verdadero para Sil-Fos 15 es a 802°C (1475°F). La aleación fluirá libremente y hará uniones resistentes a 705°C (1300°F).  
<sup>(2)</sup> IACS = Estándar Internacional de Cobre Recocido

**USOS DEL PRODUCTO**

Sil-Fos 15 ha sido desarrollado principalmente para usarse en cobre, pero su uso se ha extendido a otras aleaciones a base de cobre no ferrosas. Se utiliza ampliamente en unidades de refrigeración, aparatos de aire acondicionado, conductores eléctricos, conectores y otros equipos de cobre y latón.

**CARACTERÍSTICAS DE LA SOLDADURA FUERTE**

Sil-Fos 15 es un metal de aporte rico en cobre que es autofundente en el cobre gracias a su contenido de fósforo. La propiedad autofundente de este metal de aporte es eficaz únicamente en el cobre. Con aleaciones basadas en cobre, como el latón o el bronce las uniones deben fundirse con Handy Flux®. Sil-Fos 15 no debe usarse en aleaciones basadas en níquel o en hierro, debido a que el fósforo reacciona con el níquel o el hierro para formar compuestos frágiles en la interfaz de las uniones.

Sil-Fos 15 es altamente propenso a licuarse (p. ej., separarse en componentes de alta y baja fusión) si se calienta lentamente en su rango de fusión, como normalmente ocurre en la soldadura por horno. Esto resulta en que deja un "esqueleto" de aleación sin fundir que puede ser inaceptable desde el punto de vista de su apariencia. En la soldadura fuerte por horno es preferible colocar previamente las aleaciones dentro de la unión donde el esqueleto no sea visible.

**PROPIEDADES DE UNIONES CON SOLDADURA FUERTE**

Las propiedades de una unión con soldadura fuerte dependen de muchos factores, incluidas las propiedades del metal base, diseño de la unión, interacción metalúrgica entre metal base y metal de aporte. No obstante, la siguiente información debe servir como guía para calcular los resultados que se pueden obtener con Sil-Fos 15 o Sil-Fos 5 en cobre y aleaciones basadas en cobre.

Tabla 1. Uniones de casquillo soldado probadas a temperatura ambiente

	Resistencia a la tensión (lb/pulg <sup>2</sup> -)	% pulg de alargamiento 2 pulg
Cobre	30.000 a 35.000	15,0 a 20,0
Latón	35.000 a 40.000	20,0 a 25,0
Niquel-Plata	35.000 a 40.000	2,00 a 5,00

Tabla 2. Uniones de casquillo soldado probadas a temperaturas elevadas obtuvieron los siguientes valores promedio (pruebas de corto tiempo)

	Temperatura de prueba		Resistencia a la Tensión (lb/pulg <sup>2</sup> -)	% pulg de alargamiento 2 pulg
	°F	°C		
Cobre	200	95	32.050	32,8
	300	150	29.500	31,2
	400	205	28.100	28,1
	500	260	23.600	24,5
	600	315	22.700	24,2
	700	370	17.700	12,5
Latón	800	425	15.800	9,40
	200	95	34.000	19,2
	300	150	34.700	28,1
	400	205	30.700	28,1
	500	260	28.500	19,2
	600	315	22.500	13,0
	700	370	16.700	6,80
	800	425	11.600	2,90

**RESISTENCIA A LA CORROSIÓN**

Normalmente, la resistencia a la corrosión de Sil-Fos 15 es la misma que la del cobre, pero bajo determinadas condiciones puede corroerse más rápidamente. Sil-Fos 15 no debe ser usado donde las uniones están expuestas a compuestos de azufre, especialmente en gases o aceites a temperaturas que exceden la temperatura ambiente normal. Debido a que la corrosión por azufre es acumulativa, aún en porcentajes muy pequeños tarde o temprano causará fallas en la unión por desintegración. La exposición a vapor presurizado también puede resultar en corrosión acelerada.



**RESISTENCIA A LA CORROSIÓN (continuación)**

La siguiente table indica los resultados de pruebas de corrosión realizadas en uniones de cobre soldado en varios medios.

Solución	Temp. de prueba	Condiciones	Pérdida de peso Mg/Día
10 % ácido acético	Cuarto	Inmersión constante	31.1
10 % ácido acético	100°C (212°F)	Inmersión constante	243.0
5 % ácido hidroclicó	Cuarto	Inmersión constante	50.6
5 % ácido hidroclicó	100°C (212°F)	Inmersión constante	395.0
5 % ácido láctico	Cuarto	Inmersión alterna	48.4
5 % ácido láctico	55°C (130°F)	22 veces por minuto Inmersión alterna	381.0
Cloruro de sodio (N/10)	Cuarto	22 veces por minuto Inmersión constante	9.1
Cloruro de sodio (N/10)	100°C (212°F)	Inmersión constante	143.0
5 % ácido sulfúrico	Cuarto	Inmersión constante	36.3
5 % ácido sulfúrico	100°C (212°F)	Inmersión constante	178.0

**FORMAS DISPONIBLES**

Alambre, tira, preformas de diseño, preformas especiales de acuerdo a especificaciones del cliente, polvo y pasta

**ESPECIFICACIONES**

La aleación Sil-Fos 15 conforma con las siguientes especificaciones:

- Sociedad Estadounidense de Soldadura (AWS) A5.8/A5.8M BCuP-5
- Código de Calderas y Contenedores a Presión de ASME, Sec II-C, SFA-5.8 BCuP-5
- Especificación Federal QQ-B-654 BCuP-5

**CÓDIGO(S) DE PRODUCTO APLICABLE**

El o los códigos de producto aplicables Lucas-Milhaupt para esta hoja de datos técnicos: 71-150, 7153, 29538, 35528

Num. de pieza de distribución: 95150, 95161, 95168, 95177, 95166, 95162, 95151, 95152, 95154, 95158, 98700, 98701, 98702, 98703, 98704, 98705, 98706, 99710, 93090

**INFORMACION DE SEGURIDAD**

La operación y mantenimiento del equipo o planta de soldadura fuerte debe conformar con las disposiciones de Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI) Z49.1, "Seguridad en Soldadura y Corte". Si necesita más información consulte la Hoja de Datos de Seguridad de Materiales para Sil-Fos 15.

**Hoja de Datos Técnico**

**CLÁUSULA DE GARANTÍA**

Lucas-Milhaupt, Inc. cree que la información aquí contenida es confiable. No obstante, la información es proporcionada por Lucas-Milhaupt, Inc. sin cargo y el usuario deberá usar dicha información bajo su propio riesgo y discreción. Esta información es proporcionada "COMO ES" Y "COMO ESTÁ DISPONIBLE" y Lucas-Milhaupt, Inc. específicamente renuncia a las garantías de cualquier tipo, expresas o implícitas, incluido pero no limitado a, garantías de título o garantías implícitas de comerciabilidad o aptitud para un propósito en particular. Ningún consejo verbal o escrito, o información entregada por medios electrónicos por parte de Lucas-Milhaupt, Inc., o cualquiera de sus funcionarios, directivos, empleados o agentes, creará una garantía. Lucas-Milhaupt, Inc. no se hace responsable por los resultados obtenidos o por los daños incurridos por el uso parcial o total de dicha información.

ZAMBA CORP. 2015  
 7500 ROUTE 100  
 BRIDGEVILLE, PA 15103

**2015-01-15**

---

ZAMBA CORP. 2015  
 7500 ROUTE 100  
 BRIDGEVILLE, PA 15103

**2015-01-15**

---

ZAMBA CORP. 2015  
 7500 ROUTE 100  
 BRIDGEVILLE, PA 15103

**2015-01-15**

---

ZAMBA CORP. 2015  
 7500 ROUTE 100  
 BRIDGEVILLE, PA 15103

**2015-01-15**

---

ZAMBA CORP. 2015  
 7500 ROUTE 100  
 BRIDGEVILLE, PA 15103

**2015-01-15**

---

ZAMBA CORP. 2015  
 7500 ROUTE 100  
 BRIDGEVILLE, PA 15103

**2015-01-15**

---

ZAMBA CORP. 2015  
 7500 ROUTE 100  
 BRIDGEVILLE, PA 15103

**2015-01-15**

---

ZAMBA CORP. 2015  
 7500 ROUTE 100  
 BRIDGEVILLE, PA 15103

**2015-01-15**

---

ZAMBA CORP. 2015  
 7500 ROUTE 100  
 BRIDGEVILLE, PA 15103

**2015-01-15**

---

ZAMBA CORP. 2015  
 7500 ROUTE 100  
 BRIDGEVILLE, PA 15103

**2015-01-15**

---

ZAMBA CORP. 2015  
 7500 ROUTE 100  
 BRIDGEVILLE, PA 15103

**2015-01-15**



**ANEXO V. Hoja de especificaciones técnicas del Metal de aporte Al822.**



**AL 822**

**COMPOSICIÓN NOMINAL**

Aluminio	22.0% ± 1.0%
Cinc	Resto
Otros elementos (Cu)	0.05% Max
Otros elementos (total)	0.15% Max

**PROPIEDADES FÍSICAS**

Color	Grisáceo-blanco
Punto de fusión (estado sólido)	441°C (800°F)
Punto de fluidez (estado líquido)	482°C (900°F)
Rango de soldadura fuerte	482°C a 537°C (900°F a 1000°F)
Densidad (Lb / pulg <sup>3</sup> )	5.39
Conductividad eléctrica (%IACS) <sup>(1)</sup>	N/A
Resistividad eléctrica (Microohmios-cm)	N/A

<sup>(1)</sup>IACS = Estándar Internacional de Cobre Recocido

**USOS DEL PRODUCTO**

AL 822 es un metal de aporte de soldadura fuerte de aluminio de uso general para unir todos los grados de soldar de aluminio y aleaciones de aluminio cuando se utilizan métodos de calentamiento al aire libre.

**PROPIEDADES DE UNIONES CON SOLDADURA FUERTE**

Las propiedades de una unión con soldadura fuerte dependen de muchos factores, incluidas las propiedades del metal base, diseño de la unión, interacción metalúrgica entre metal base y metal de aporte. Los intersticios de unión de 0.076 a 0.127 mm (0.003 a 0.005 pulg) de cada lado son óptimos para obtener la más alta resistencia de unión. Las uniones con intersticios mayores también pueden ofrecer resistencia de unión adecuada dependiendo de las condiciones operativas finales. Las aleaciones basadas en cinc ofrecen la más alta resistencia en comparación con otras aleaciones de soldadura fuerte de baja temperatura disponibles a nivel comercial, superando frecuentemente resistencias al cortamiento de 18,000 PSI, siempre y cuando se implementan técnicas apropiadas en el diseño de la unión.

**FORMAS DISPONIBLES**

Alambre, preformas de diseño, preformas especiales de acuerdo a especificaciones del cliente, polvo y pasta.

**ESPECIFICACIONES**

La aleación AL 822 conforma con las siguientes especificaciones: N/A.

**CÓDIGO(S) DE PRODUCTO APLICABLE**

El o los códigos de producto aplicables Lucas Milhaupt para esta hoja de datos técnicos: 62-822.

**INFORMACIÓN DE SEGURIDAD**

La operación y mantenimiento del equipo o planta de soldadura fuerte debe conformar con las disposiciones de Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI) Z49.1, "Seguridad en soldadura y corte". Si necesita más información consulte la Hoja de Datos de Seguridad de Materiales para AL 822.

**CLÁUSULA DE GARANTÍA**

Lucas-Milhaupt, Inc. cree que la información aquí contenida es confiable. No obstante, la información es proporcionada por Lucas-Milhaupt, Inc. sin cargo y el usuario deberá usar dicha información bajo su propio riesgo y discreción. Esta información es proporcionada "COMO ES" Y "COMO ESTÁ DISPONIBLE" y Lucas-Milhaupt, Inc. específicamente renuncia a las garantías de cualquier tipo, expresas o implícitas, incluido pero no limitado a, garantías de título o garantías implícitas de comerciabilidad o aptitud para un propósito en particular. Ningún consejo verbal o escrito, o información entregada por medios electrónicos por parte de Lucas-Milhaupt, Inc., o cualquiera de sus funcionarios, directivos, empleados o agentes, creará una garantía. Lucas-Milhaupt, Inc., no se hace responsable por los resultados obtenidos o por los daños incurridos por el uso parcial o total de dicha información.

Lucas-Milhaupt, Inc. cree que la información aquí contenida es confiable. No obstante, la información es proporcionada por Lucas-Milhaupt, Inc. sin cargo y el usuario deberá usar dicha información bajo su propio riesgo y discreción. Esta información es proporcionada "COMO ES" Y "COMO ESTÁ DISPONIBLE" y Lucas-Milhaupt, Inc. específicamente renuncia a las garantías de cualquier tipo, expresas o implícitas, incluido pero no limitado a, garantías de título o garantías implícitas de comerciabilidad o aptitud para un propósito en particular. Ningún consejo verbal o escrito, o información entregada por medios electrónicos por parte de Lucas-Milhaupt, Inc., o cualquiera de sus funcionarios, directivos, empleados o agentes, creará una garantía. Lucas-Milhaupt, Inc., no se hace responsable por los resultados obtenidos o por los daños incurridos por el uso parcial o total de dicha información.

Lucas-Milhaupt, Inc. cree que la información aquí contenida es confiable. No obstante, la información es proporcionada por Lucas-Milhaupt, Inc. sin cargo y el usuario deberá usar dicha información bajo su propio riesgo y discreción. Esta información es proporcionada "COMO ES" Y "COMO ESTÁ DISPONIBLE" y Lucas-Milhaupt, Inc. específicamente renuncia a las garantías de cualquier tipo, expresas o implícitas, incluido pero no limitado a, garantías de título o garantías implícitas de comerciabilidad o aptitud para un propósito en particular. Ningún consejo verbal o escrito, o información entregada por medios electrónicos por parte de Lucas-Milhaupt, Inc., o cualquiera de sus funcionarios, directivos, empleados o agentes, creará una garantía. Lucas-Milhaupt, Inc., no se hace responsable por los resultados obtenidos o por los daños incurridos por el uso parcial o total de dicha información.

Lucas-Milhaupt, Inc. cree que la información aquí contenida es confiable. No obstante, la información es proporcionada por Lucas-Milhaupt, Inc. sin cargo y el usuario deberá usar dicha información bajo su propio riesgo y discreción. Esta información es proporcionada "COMO ES" Y "COMO ESTÁ DISPONIBLE" y Lucas-Milhaupt, Inc. específicamente renuncia a las garantías de cualquier tipo, expresas o implícitas, incluido pero no limitado a, garantías de título o garantías implícitas de comerciabilidad o aptitud para un propósito en particular. Ningún consejo verbal o escrito, o información entregada por medios electrónicos por parte de Lucas-Milhaupt, Inc., o cualquiera de sus funcionarios, directivos, empleados o agentes, creará una garantía. Lucas-Milhaupt, Inc., no se hace responsable por los resultados obtenidos o por los daños incurridos por el uso parcial o total de dicha información.

Lucas-Milhaupt, Inc. cree que la información aquí contenida es confiable. No obstante, la información es proporcionada por Lucas-Milhaupt, Inc. sin cargo y el usuario deberá usar dicha información bajo su propio riesgo y discreción. Esta información es proporcionada "COMO ES" Y "COMO ESTÁ DISPONIBLE" y Lucas-Milhaupt, Inc. específicamente renuncia a las garantías de cualquier tipo, expresas o implícitas, incluido pero no limitado a, garantías de título o garantías implícitas de comerciabilidad o aptitud para un propósito en particular. Ningún consejo verbal o escrito, o información entregada por medios electrónicos por parte de Lucas-Milhaupt, Inc., o cualquiera de sus funcionarios, directivos, empleados o agentes, creará una garantía. Lucas-Milhaupt, Inc., no se hace responsable por los resultados obtenidos o por los daños incurridos por el uso parcial o total de dicha información.

Lucas-Milhaupt, Inc. cree que la información aquí contenida es confiable. No obstante, la información es proporcionada por Lucas-Milhaupt, Inc. sin cargo y el usuario deberá usar dicha información bajo su propio riesgo y discreción. Esta información es proporcionada "COMO ES" Y "COMO ESTÁ DISPONIBLE" y Lucas-Milhaupt, Inc. específicamente renuncia a las garantías de cualquier tipo, expresas o implícitas, incluido pero no limitado a, garantías de título o garantías implícitas de comerciabilidad o aptitud para un propósito en particular. Ningún consejo verbal o escrito, o información entregada por medios electrónicos por parte de Lucas-Milhaupt, Inc., o cualquiera de sus funcionarios, directivos, empleados o agentes, creará una garantía. Lucas-Milhaupt, Inc., no se hace responsable por los resultados obtenidos o por los daños incurridos por el uso parcial o total de dicha información.

Lucas-Milhaupt, Inc. cree que la información aquí contenida es confiable. No obstante, la información es proporcionada por Lucas-Milhaupt, Inc. sin cargo y el usuario deberá usar dicha información bajo su propio riesgo y discreción. Esta información es proporcionada "COMO ES" Y "COMO ESTÁ DISPONIBLE" y Lucas-Milhaupt, Inc. específicamente renuncia a las garantías de cualquier tipo, expresas o implícitas, incluido pero no limitado a, garantías de título o garantías implícitas de comerciabilidad o aptitud para un propósito en particular. Ningún consejo verbal o escrito, o información entregada por medios electrónicos por parte de Lucas-Milhaupt, Inc., o cualquiera de sus funcionarios, directivos, empleados o agentes, creará una garantía. Lucas-Milhaupt, Inc., no se hace responsable por los resultados obtenidos o por los daños incurridos por el uso parcial o total de dicha información.

Lucas-Milhaupt, Inc. cree que la información aquí contenida es confiable. No obstante, la información es proporcionada por Lucas-Milhaupt, Inc. sin cargo y el usuario deberá usar dicha información bajo su propio riesgo y discreción. Esta información es proporcionada "COMO ES" Y "COMO ESTÁ DISPONIBLE" y Lucas-Milhaupt, Inc. específicamente renuncia a las garantías de cualquier tipo, expresas o implícitas, incluido pero no limitado a, garantías de título o garantías implícitas de comerciabilidad o aptitud para un propósito en particular. Ningún consejo verbal o escrito, o información entregada por medios electrónicos por parte de Lucas-Milhaupt, Inc., o cualquiera de sus funcionarios, directivos, empleados o agentes, creará una garantía. Lucas-Milhaupt, Inc., no se hace responsable por los resultados obtenidos o por los daños incurridos por el uso parcial o total de dicha información.

**ANEXO VI. Especificaciones del procedimiento de soldadura fuerte (BPS).**

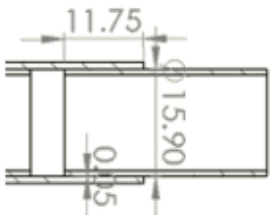
BPS De las probetas de Cu

<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA INDIRECTA BPS No. EPN- EG- 001						
Nombre de la Compañía:		EPN	Revisión:		0.1	
PQR de soporte No.:		EPN-GE-001	Fecha de revisión:		10/08/2021	
Según norma:		ASME IX Parte QB	Realizado por:		Ordoñez Marlon	
<b>JUNTA UTILIZADA</b>			<b>TÉCNICA DE SOLDADURA</b>			
Tipo de junta:		Traslape	Proceso de soldadura: Indirecta por horno			
Longitud de traslape :		11.75 [mm]	Tipo de soldadura: Manual: [ ]			
Holgura:		0.05[mm]	Automática: [ ]			
			Semiautomática: [ x ]			
<b>METAL BASE</b>			<b>MÉTODO DE CALENTAMIENTO</b>			
Especificación:		ASTM B88	Horno: Vulcan, tipo mufa discontinuo			
Tipo:		C12200	Atmósfera protectora: N/A			
Número P:		107	Velocidad de calentamiento: 35 [°C/min]			
Espesor calificado:		Max: 2.04 [mm]				
		Min: 0.51 [mm]				
Diámetro nominal:		12.7 [mm] (1/2")				
<b>METAL DE APORTE</b>			<b>POSICION DE FLUJO</b>			
Especificación:		AWS A5.8	Posición de flujo: Horizontal			
Denominación AWS:		BCuP-5	Progresión: Arrastre			
Casa comercial :		Lucas Milhaupt	Técnica: Un pase: [X]			
Varilla:		1.3 X 3.2 [mm]	Varios pases: [ ]			
Longitud:		510[mm]				
Preforma:		Anillo				
Número F:		103				
<b>FUNDENTE</b>			<b>TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA</b>			
Fundente:		SI [ ] NO [X]	Tratamiento: N/A			
Denominación comercial:			<b>TECNICA DE LIMPIEZA</b>			
<b>TEMPERATURA DE SOLDADURA FUERTE</b>			Limpieza previa: Lija 400/600			
Orden de temperaturas:		700-815 ± 20 [°C]	Limpieza posterior: Alcohol industrial			
Tiempo del proceso:		2-4 [min]				
N° pase	Metal de aporte		Fundente	Velocidad de avance [mm/min]	Técnica de soldadura	
	Clase	Platina [mm]			Oscilado	Recto
1	BCuP-5	1.3 x 3.2	N/A	N/A		
<b>Revisado por</b>						
Ing. Diego Espinosa				Firma:		
				Fecha:		



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

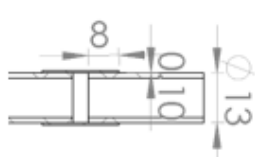
## ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA INDIRECTA BPS No. EPN- EG- 002

Nombre de la Compañía:	EPN	Revisión:	0.1			
PQR de soporte No.:	EPN-GE-001	Fecha de revisión:	10/08/2021			
Según norma:	ASME IX Parte QB	Realizado por:	Ordoñez Marlon			
<b>JUNTA UTILIZADA</b>		<b>TÉCNICA DE SOLDADURA</b>				
Tipo de junta:	Traslape	Proceso de soldadura:	Indirecta por horno			
Longitud de traslape :	11.75 [mm]	Tipo de soldadura:	Manual: [ ] Automática: [ ] Semiautomática: [ x ]			
Holgura:	0.05[mm]					
<b>METAL BASE</b>		<b>MÉTODO DE CALENTAMIENTO</b>				
Especificación:	ASTM B88	Horno:	Vulcan, tipo mufla discontinuo			
Tipo:	C12200	Atmósfera protectora:	N/A			
Número P:	107	Velocidad de calentamiento:	35 [°C/min]			
Espesor calificado:	Max: 2.04 [mm] Min: 0.51 [mm]					
Diámetro nominal:	12.7 [mm] (1/2")					
<b>METAL DE APORTE</b>		<b>POSICION DE FLUJO</b>				
Especificación:	AWS A5.8	Posición de flujo:	Horizontal			
Denominación AWS:	BCuP-5	Progresión:	Arrastre			
Casa comercial :	Lucas Milhaupt	Técnica: Unpase:	[X]			
Varilla:	1.3 X 3.2 [mm]	Varios pases:	[ ]			
Longitud:	510[mm]					
Preforma:	Anillo					
Número F:	103					
<b>FUNDENTE</b>		<b>TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA</b>				
Fundente:	SI [ ] NO [X]	Tratamiento:	N/A			
Denominación comercial:						
<b>TEMPERATURA DE SOLDADURA FUERTE</b>		<b>TECNICA DE LIMPIEZA</b>				
Orden de temperaturas:	815 ± 20 [°C]	Limpieza previa:	Lija 400/600			
Tiempo del proceso:	2-4 [min]	Limpieza posterior:	Alcohol industrial			
						
N° pase	Metal de aporte		Fundente	Velocidad de avance [mm/min]	Técnica de soldadura	
	Clase	Platina [mm]			Oscilado	Recto
1	BCuP-5	1.3 x 3.2	N/A	N/A		
				<b>Revisado por</b>		
				Ing. Diego Espinosa	Firma:	
					Fecha:	

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA INDIRECTA**  
**BPS No. EPN- EG- 003**

Nombre de la Compañía: EPN		Revisión: 0.1				
PQR de soporte No.: EPN-GE-001		Fecha de revisión: 10/06/2021				
Según norma: ASME IX Parte QB		Realizado por: Ordoñez Marlon				
<b>JUNTA UTILIZADA</b>		<b>TÉCNICA DE SOLDADURA</b>				
Tipo de junta: Traslape		Proceso de soldadura: Indirecta por horno				
Longitud de traslape : 11.75 [mm]		Tipo de soldadura: Manual: [ ]				
Holgura: 0.05[mm]		Automática: [ ]				
		Semiautomática: [ x ]				
<b>METAL BASE</b>		<b>MÉTODO DE CALENTAMIENTO</b>				
Especificación: ASTM B88		Horno: <del>Vulcan</del> tipo mufia discontinuo				
Tipo: C12200		Atmósfera protectora: N/A				
Número P: 107		Velocidad de calentamiento: 35 [°C/min]				
Espesor calificado: Max: 2.04 [mm]						
Min: 0.51 [mm]						
Diámetro nominal: 12.7 [mm] (1/2")						
<b>METAL DE APORTE</b>		<b>POSICION DE FLUJO</b>				
Especificación: AWS A5.8		Posición de flujo: Horizontal				
Denominación AWS: BCuP-5		Progresión: Arrastre				
Casa comercial : Lucas <del>Milwaukee</del>		Técnica: Unpase: [X]				
Varilla: 1.3 X 3.2 [mm]		Varios pases: [ ]				
Longitud: 510[mm]						
Preforma: Anillo						
Número F: 103						
<b>FUNDENTE</b>		<b>TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA</b>				
Fundente: SI [ ] NO [X]		Tratamiento: N/A				
Denominación comercial:						
<b>TEMPERATURA DE SOLDADURA FUERTE</b>		<b>TECNICA DE LIMPIEZA</b>				
Orden de temperaturas: 815 ± 20 [°C]		Limpieza previa: Lija 400/600				
Tiempo del proceso: 4-6 [min]		Limpieza posterior: Alcohol industrial				
N° pase	Metal de aporte		Fundente	Velocidad de avance [mm/min]	Técnica de soldadura	
	Clase	Platina [mm]			Oscilado	Recto
1	BCuP-5	1.3 x 3.2	N/A	N/A		
				<b>Revisado por</b>		
				Ing. Diego Espinosa	Firma:	
					Fecha:	

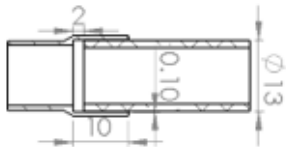
BPS de las probetas de Aluminio.

<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b>							
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA INDIRECTA							
BPS No. EPN- EG- 001							
Nombre de la Compañía:		EPN		Revisión:		0.1	
PQR de soporte No.:		EPN-GE-001		Fecha de revisión:		10/08/2021	
Según norma:		ASME IX Parte QB		Realizado por:		Ordoñez Marlon	
JUNTA UTILIZADA				TÉCNICA DE SOLDADURA			
Tipo de junta:		Traslape		Proceso de soldadura:		Indirecta por horno	
Longitud de traslape :		7.75 [mm]		Tipo de soldadura:		Manual: [ ]	
Holgura:		0.1[mm]				Automática: [ ]	
						Semiautomática: [ X ]	
METAL BASE				MÉTODO DE CALENTAMIENTO			
Especificación:		ASTM B221		Horno:		Vulcan, tipo mufia discontinuo	
Tipo:		AA6063 T5		Atmósfera protectora:		N/A	
Número P:		N/A		Velocidad de calentamiento:		35 [°C/min]	
Espesor calificado:		Max: N/A [mm]					
		Min: N/A [mm]					
Diámetro nominal:		12.7 [mm] (1/2")					
METAL DE APORTE				POSICION DE FLUJO			
Especificación:		AWS A5.8		Posición de flujo:		Horizontal	
Denominación AWS:		N/A-BCuP-5		Progresión:		Arrastre	
Casa comercial :		Lucas Milhaupt		Técnica:		Unpase: [ X ]	
Varilla:		Diámetro 2.3 [mm]		Varios pases:		[ ]	
Longitud:		510[mm]					
Preforma:		Anillo					
Número F:		N/A-103					
FUNDENTE				TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA			
Fundente:		SI [X] NO [ ]		Tratamiento:		N/A	
Denominación comercial:							
TEMPERATURA DE SOLDADURA FUERTE				TECNICA DE LIMPIEZA			
Orden de temperaturas:		482-537 ± 20 [°C]		Limpieza previa:		Lija 400/600	
Tiempo del proceso:		2-4 [min]		Limpieza posterior:		Alcohol industrial	
							
N° pase	Metal de aporte		Fundente	Velocidad de avance [mm/min]	Técnica de soldadura		
	Clase	Varilla [mm]			Oscilado	Recto	
1	N/A	2.3	N/A	N/A			
				<b>Revisado por</b>			
				Ing. Diego Espinosa		Firma:	
						Fecha:	

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA INDIRECTA**  
**BPS No. EPN- EG- 002**

Nombre de la Compañía: EPN		Revisión: 0.1				
PQR de soporte No.: EPN-GE-001		Fecha de revisión: 10/08/2021				
Según norma: ASME IX Parte QB		Realizado por: Ordoñez Marlon				
<b>JUNTA UTILIZADA</b>		<b>TÉCNICA DE SOLDADURA</b>				
Tipo de junta: Traslape		Proceso de soldadura: Indirecta por horno				
Longitud de traslape : 7.75 [mm]		Tipo de soldadura: Manual: [ ]				
Holgura: 0.1[mm]		Automática: [ ]				
		Semiautomática: [X]				
<b>METAL BASE</b>		<b>MÉTODO DE CALENTAMIENTO</b>				
Especificación: ASTM B221		Horno: Vulcan, tipo mufia discontinuo				
Tipo: AA6063 T5		Atmósfera protectora: N/A				
Número P: N/A		Velocidad de calentamiento: 35 [°C/min]				
Espesor calificado: Max: 2.04 [mm]						
Min: 0.51 [mm]						
Diámetro nominal: 12.7 [mm] (1/2")						
<b>METAL DE APORTE</b>		<b>POSICION DE FLUJO</b>				
Especificación: AWS A5.8		Posición de flujo: Horizontal				
Denominación AWS: N/A		Progresión: Arrastre				
Casa comercial : Lucas Milhaupt		Técnica: Unpase: [X]				
Varilla: Diámetro 2.3 [mm]		Varios pases: [ ]				
Longitud: 510[mm]						
Preforma: Anillo						
Número F: N/A						
<b>FUNDENTE</b>		<b>TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA</b>				
Fundente: SI [X] NO [ ]		Tratamiento: N/A				
Denominación comercial:						
<b>TEMPERATURA DE SOLDADURA FUERTE</b>		<b>TECNICA DE LIMPIEZA</b>				
Orden de temperaturas: 537 ± 20 [°C]		Limpieza previa: Lija 400/600				
Tiempo del proceso: 4-6 [min]		Limpieza posterior: Alcohol industrial				
N° pase	Metal de aporte		Fundente	Velocidad de avance [mm/min]	Técnica de soldadura	
	Clase	Varilla [mm]			Oscilado	Recto
1	N/A	2.3	N/A	N/A		
				<b>Revisado por</b>		
				Ing. Diego Espinosa	Firma:	
					Fecha:	

BPS de las probetas de Aluminio-Cobre.

<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b>						
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA INDIRECTA						
BPS No. EPN- EG- 001						
Nombre de la Compañía:		EPN	Revisión:		0.1	
PQR de soporte No.:		EPN-GE-001	Fecha de revisión:		10/08/2021	
Según norma:		ASME IX Parte QB	Realizado por:		Ordoñez Marlon	
JUNTA UTILIZADA			TÉCNICA DE SOLDADURA			
Tipo de junta:		Traslape	Proceso de soldadura: Indirecta por horno			
Longitud de traslape :		7.75 [mm]	Tipo de soldadura: Manual: [ ]			
Holgura:		0.1[mm]	Automática: [ ]			
			Semiautomática: [ X ]			
METAL BASE			MÉTODO DE CALENTAMIENTO			
Especificación:		ASTM B22-ASTMB 280	Horno: <del>Vulcan</del> tipo mufia discontinuo			
Tipo:		AA6063 T5-C12200	Atmósfera protectora: N/A			
Número P:		N/A-31	Velocidad de calentamiento: 35 [°C/min]			
Espesor calificado:		Max: N/A [mm]				
		Min: N/A [mm]				
Diámetro nominal:		12.7 [mm] (1/2")				
METAL DE APORTE			POSICION DE FLUJO			
Especificación:		AWS A5.8	Posición de flujo: Horizontal			
Denominación AWS:		N/A	Progresión: Arrastre			
Casa comercial :		Lucas <del>Milhaul</del>	Técnica: Unpase: [X]			
Varilla:		Diámetro 2.3 [mm]	Varios pases: [ ]			
Longitud:		510[mm]				
Preforma:		Anillo				
Número F:		N/A-103				
FUNDENTE			TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA			
Fundente:		SI [X] NO [ ]	Tratamiento: N/A			
Denominación comercial:						
TEMPERATURA DE SOLDADURA FUERTE			TECNICA DE LIMPIEZA			
Orden de temperaturas:		482-537 ± 20 [°C]	Limpieza previa: Lija 400/600			
Tiempo del proceso:		2-4 [min]	Limpieza posterior: Alcohol industrial			
						
N° pase	Metal de aporte		Fundente	Velocidad de avance [mm/min]	Técnica de soldadura	
	Clase	Varilla [mm]			Oscilado	Recto
1	N/A	2.3	N/A	N/A		
<b>Revisado por</b>						
				Ing. Diego Espinosa	Firma:	
					Fecha:	

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA INDIRECTA**  
**BPS No. EPN- EG- 002**

Nombre de la Compañía:	EPN	Revisión:	0.1			
PQR de soporte No.:	EPN-GE-001	Fecha de revisión:	10/06/2021			
Según norma:	ASME IX Parte QB	Realizado por:	Ordoñez Marlon			
<b>JUNTA UTILIZADA</b>		<b>TÉCNICA DE SOLDADURA</b>				
Tipo de junta:	Traslape	Proceso de soldadura:	Indirecta por horno			
Longitud de traslape :	7.75 [mm]	Tipo de soldadura:	Manual: [ ]			
Holgura:	0.1[mm]		Automática: [ ]			
			Semiautomática: [X]			
<b>METAL BASE</b>		<b>MÉTODO DE CALENTAMIENTO</b>				
Especificación:	ASTM B22-ASTMB 280	Horno:	Vulcan, tipo mufla discontinuo			
Tipo:	AA6063 T5-C12200	Atmósfera protectora:	N/A			
Número P:	N/A-31	Velocidad de calentamiento:	35 [°C/min]			
Espesor calificado:	Max: N/A [mm]					
	Min: N/A [mm]					
Diámetro nominal:	12.7 [mm] (1/2")					
<b>METAL DE APORTE</b>		<b>POSICION DE FLUJO</b>				
Especificación:	AWS A5.8	Posición de flujo:	Horizontal			
Denominación AWS:	N/A	Progresión:	Arrastre			
Casa comercial :	Lucas <del>Milhaupt</del>	Técnica: Un pase:	[X]			
Varilla:	Diámetro 2.3 [mm]	Varios pases:	[ ]			
Longitud:	510[mm]					
Preforma:	Anillo					
Número F:	N/A-103					
<b>FUNDENTE</b>		<b>TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA</b>				
Fundente:	SI [X] NO [ ]	Tratamiento:	N/A			
Denominación comercial:						
<b>TEMPERATURA DE SOLDADURA FUERTE</b>		<b>TECNICA DE LIMPIEZA</b>				
Orden de temperaturas:	537 ± 20 [°C]	Limpieza previa:	Lija 400/600			
Tiempo del proceso:	4-6 [min]	Limpieza posterior:	Alcohol industrial			
N° pase	Metal de aporte		Fundente	Velocidad de avance [mm/min]	Técnica de soldadura	
	Clase	Varilla [mm]			Oscilado	Recto
1	N/A	2.3	N/A	N/A		
				<b>Revisado por</b>		
				Ing. Diego Espinosa	Firma:	
					Fecha:	

**ANEXO VII.** Registro de calificación del procedimiento (PQR).

<b>REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PQR</b>						
<b>ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO</b>						
<b>Norma:</b> ASME IX PARTE QB <b>Nombre de la compañía:</b> TESIS-EPN <b>Nº de identificación:</b> 01 <b>Especificación del material:</b> ASTM B88 <b>Proceso de soldadura:</b> Brazing (FB) <b>Posición del flujo:</b> Flujo horizontal <b>Especificación del metal de aporte:</b> BCuP-5				<b>Fundente:</b> N/A <b>Temperatura de soldadura fuerte:</b> 815 [°C] <b>Tiempo del proceso:</b> 4-6 [min]		
<b>INSPECCIÓN VISUAL</b>						
<b>Apariencia:</b> Buena <b>Porosidad:</b> Poca Porosidad <b>Capilaridad:</b> Buena						
<b>PRUEBA DE TRACCIÓN</b>						
Nº Probeta	Id.	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Carga máxima [lbf]	Resistencia [ksi]	Observación
1	P1	15.86	0.92	1450	21.7	FMB
2	P7	16.04	1.42	2537	25.1	FMB
3	P5	16.03	0.93	1282	18.7	FJS
4	P8	15.89	1.13	2397	29.5	FMB
<b>PRUEBA DE PELADO</b>						
Probeta	Id.	Área traslapada [mm <sup>2</sup> ]	Área no soldada [mm <sup>2</sup> ]	Porcentaje de área no soldada [%]	Aprueba	
1	P2	339.22	48.32	14.24	SI	
2	P9	496.76	66.2	13.33	SI	
<b>Límites de calificación</b>						
El procedimiento de soldadura es habilitado para soldadura indirecta con flujo horizontal del metal de aporte. El proceso de soldadura fuerte utilizado: FB (Soldadura Fuerte con horno).						
<b>Certificación</b>						
Se certifica que las declaraciones vertidas en este registro son correctas y las muestras de prueba se prepararon, se soldaron y se ensayaron de acuerdo al código ASME SECCIÓN IX PARTE QB.						
Realizado por:		Revisado por:		Aprobado por:		
Marlon Ordoñez		Ing. Diego Espinosa		_____ Ing. Diego Espinosa		

REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PQR						
ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO						
<b>Norma:</b> ASME IX PARTE QB <b>Nombre de la compañía:</b> TESIS-EPN <b>Nº de identificación:</b> 02 <b>Especificación del material:</b> ASTM B221-ASTM B280 <b>Proceso de soldadura:</b> Brazing (FB) <b>Posición del flujo:</b> Flujo horizontal <b>Especificación del metal de aporte:</b> AL822				<b>Fundente:</b> N/A <b>Temperatura de soldadura fuerte:</b> 537 [°C] <b>Tiempo del proceso:</b> 4 [min]		
INSPECCIÓN VISUAL						
<b>Apariencia:</b> Buena <b>Porosidad:</b> Poca Porosidad <b>Capilaridad:</b> Buena						
PRUEBA DE TRACCIÓN						
Nº Probeta	Id.	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Carga máxima [lbf]	Resistencia [ksi]	Observación
1	P4	12.76	1.01	1195	20.7	FMB (Cobre)
2	P7	12.78	0.99	686	12.7	FJS
3	P2	12.85	1.05	457	7.6	FJS
4	P5	112.93	1.06	1316	21.5	FMB (Cobre)
PRUEBA DE PELADO						
Probeta	Id.	Área traslapada [mm <sup>2</sup> ]	Área no soldada [mm <sup>2</sup> ]	Porcentaje de área no soldada [%]	Aprueba	
1	P2	374.05	374.05	100	NO	
2	P9	163.1	163.1	100	NO	
Límites de calificación						
El procedimiento de soldadura es habilitado para soldadura indirecta con flujo horizontal del metal de aporte. El proceso de soldadura fuerte utilizado: FB (Soldadura Fuerte con horno). <b>Nota:</b> Ensayo de tracción Si Aprueba						
Certificación						
Se certifica que las declaraciones vertidas en este registro son correctas y las muestras de prueba se prepararon, se soldaron y se ensayaron de acuerdo al código ASME SECCIÓN IX PARTE QB.						
Realizado por:		Revisado por:		Aprobado por:		
Marlon Ordoñez		Ing. Diego Espinosa		_____ Ing. Diego Espinosa		



## **ORDEN DE EMPASTADO**