

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA MOJABILIDAD DE LAS SOLDADURAS
ESTAÑO-PLOMO (Sn-Pb) y ESTAÑO-ZINC (Sn-Zn)**

JOSÉ ALEJANDRO ESCUDERO HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2013**

***ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA MOJABILIDAD DE LAS
SOLDADURAS ESTAÑO-PLOMO (Sn-Pb) y ESTAÑO-ZINC (Sn-Zn)***

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Estudiante: José Alejandro Escudero
Hernández

Teléfono(s): 300 316 8401

E-mail: jose.escudero@alfa.upb.edu.co

Cédula: 1'098'705.853

ID: 000137894

Programa: Ingeniería Mecánica

Director: Emigdio Mendoza Fandiño

Teléfono(s): 301 208 7438

E-mail: emigdio.mendoza@upb.edu.co

Cédula: 11'004.693

Empresa: Universidad Pontificia
Bolivariana

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2013**

Nota de Aceptación

Firma:
Nombre:
Presidente del Jurado

Firma:
Nombre:
Jurado

Firma:
Nombre:
Jurado

A mi familia, mi incansable compañía.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Emigdio Mendoza y Vladimir Martínez, quienes me permitieron formar parte de este trabajo de investigación con el cual finalizo mi carrera universitaria.

Al personal auxiliar de laboratorio, por su asesoría y contribución durante la etapa experimental del trabajo de investigación.

A la Universidad Pontificia Bolivariana, por el apoyo brindado a través de proyecto titulado “Estudio de fenómenos de contacto sólido-líquido en presencia de temperatura en diferentes tipos de materiales”. (Radicado 338A)

CONTENIDO

	Pág.
TABLA DE ILUSTRACIONES.....	9
LISTA DE TABLAS	11
GLOSARIO	12
RESUMEN.....	13
PALABRAS CLAVE	14
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	15
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	17
2.1 MOJABILIDAD.....	17
2.1.1 Tensión superficial	17
2.1.2 Ángulo de contacto	18
2.1.3 Modelos teóricos	20
2.1.4 Medidas en caliente.....	26
2.2 SOLDADURAS	26
2.2.1 Generalidades.....	28
2.2.2 Mojabilidad de soldaduras	34
2.2.3 Soldaduras de plomo.....	36
2.2.4 Sustitución del plomo.....	40

	7
2.2.5 Latinoamérica y Colombia.....	44
2.3 ANTECEDENTES.....	45
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	49
3.1 DISEÑO DEL DISPOSITIVO.....	49
3.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y MATERIALES.....	50
3.3 CONDICIONES DE LOS ENSAYOS.....	52
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	54
4.1 FORMACIÓN DE LA GOTA.....	54
4.2 MEDICIONES TRANSITORIAS.....	55
4.3 MEDICIONES DE ÁNGULO DE CONTACTO.....	58
4.4 CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES DE LAS MUESTRAS.....	60
4.5 APLICACIÓN DE MODELOS TEÓRICOS.....	61
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN.....	65
5.1 FORMACIÓN DE COMPUESTOS.....	65
5.2 PROPIEDADES MECÁNICAS.....	67
5.3 MOJABILIDAD DE LAS ALEACIONES.....	68
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	73
RECOMENDACIONES.....	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76

ANEXO 1 81

ANEXO 2 82

ANEXO 3 83

ANEXO 4 85

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Gotas de agua sobre diferentes superficies. Tomada de [6]	17
Ilustración 2. Tensiones superficiales en la línea trifásica. R es el radio de base de la gota y \mathfrak{R} es el radio de la gota. Tomada de [14].	20
Ilustración 3. Sección en equilibrio de una superficie curva cortada de manera aleatoria. Tomada de [8]	21
Ilustración 4. Componentes de un proceso de soldadura por fusión. Tomado de [23].	28
Ilustración 5. Proceso de soldadura manual, usando cautín y pasta de soldadura. Tomada de [27]	32
Ilustración 6. Proceso de soldadura blanda por olas. Tomada de [24].	33
Ilustración 7. PCB tras ser sometida a un proceso de soldadura blanda por reflujo. Tomada de [28].	34
Ilustración 8. Efecto de la temperatura en el AC.	36
Ilustración 9. Diseño en CAD del montaje usado.	50
Ilustración 10. Montaje completo usado durante la experimentación.....	51
Ilustración 11. Diagrama de fases de la aleación Sn-Zn [50].	52
Ilustración 12. Recinto sellado de medición con atmósfera controlada.	53
Ilustración 13. Secuencia del proceso de formación de la gota en el tiempo.....	54
Ilustración 14. Fenómeno transitorio de Sn-Pb sobre Latón.....	55

Ilustración 15. Fenómeno transitorio de Sn-Pb sobre Aluminio.....	56
Ilustración 16. Fenómeno transitorio de Sn-Zn eutéctico sobre Latón.	56
Ilustración 17. Fenómeno transitorio de Sn-Zn eutéctico sobre Aluminio.	57
Ilustración 18. Vista dentro del recinto sellado.....	58
Ilustración 19. Relación de promedios y desviaciones obtenidas para las mediciones en latón y en aluminio.....	59
Ilustración 20. Gotas formadas con aleación hipoeutéctica (izquierda) e hipereutéctica (derecha).....	60
Ilustración 21. Comportamiento de la aleación sobre sustratos de cobre. Tomada de [4]...	66
Ilustración 22. Superficie de la gota.....	67
Ilustración 23. Variación γ vs. Composición de la aleación.	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Grado de humectabilidad en función de las fuerzas de interacción S/L y L/L	23
Tabla 2. Composición de las aleaciones Sn-Zn estudiadas.....	52
Tabla 3. Tiempo en el estacionario para las mediciones experimentales.	57
Tabla 4. Datos obtenidos sobre Latón.....	58
Tabla 5. Datos obtenidos sobre Aluminio.....	59
Tabla 6. Propiedades de las aleaciones para el cálculo de γ	62
Tabla 7. γ teórica según el modelo de Butler para las tres aleaciones.	62
Tabla 8. Propiedades de la aleación Sn-Pb para el cálculo de γ	63
Tabla 9. γ teórica según el modelo de Butler para Sn-Pb.	63
Tabla 10. Trabajo de adhesión en sustratos de Latón.	64
Tabla 11. Trabajo de adhesión en sustratos de Aluminio.	64

GLOSARIO

Adhesión: unión de dos sustancias al entrar en contacto.

AWS: American Welding Society, en inglés (Sociedad Americana de Soldadura).

Capilaridad: capacidad de un fluido de subir por un tubo capilar al ser sumergido; evidencia las fuerzas intermoleculares presentes en el fluido.

Emergía: energía útil usada en las transformaciones necesarias para obtener un determinado producto o servicio.

Fundente: producto usado en los procesos de soldadura que permite una mayor limpieza del sustrato y así un mejor desempeño de la soldadura.

Humectabilidad: mojabilidad.

Línea de liquidus: línea en el diagrama de fases por encima de la cual solo existen fases líquidas.

PCB: Printed Circuit Board, en inglés (Tarjeta de circuitos impresos).

RoHS: Restriction of Hazardous Substances Directive, en inglés (Directiva para la Restricción de Sustancias Peligrosas).

Sustrato: especie química que es considerada objeto de la acción de otros reactivos.

Whiskers: bigotes de la aleación formados en la superficie

RESUMEN

Las soldaduras fabricadas de aleaciones estaño-plomo representan un componente importante en el mercado tecnológico a nivel global, siendo fundamentales en el ensamble de productos electrónicos. Sin embargo, debido a la toxicidad del plomo es de vital importancia encontrar un sustituto para estas aleaciones, de manera que se obtengan soldaduras sin plomo que cumplan con las demandas en la fabricación de conexiones soldadas de diversos tipos de dispositivos. En este trabajo se analiza la posibilidad de una sustitución, midiendo la mojabilidad sobre sustratos de aluminio y latón de algunas soldaduras Sn-Zn, en comparación con la mojabilidad de una soldadura comercial con plomo (Sn60-Pb40). Las aleaciones de Sn-Zn analizadas fueron del 4%, 9% y 14% en peso de Zn. Se llevó a cabo una comparación cuantitativa de la mojabilidad de las aleaciones usando modelos teóricos de mojabilidad a altas temperaturas. Se encontró durante el proceso experimental diferencias importantes en el ángulo de contacto entre la aleación comercial de Sn-Pb y las aleaciones de Sn-Zn estudiadas, y se valoró paralelamente la influencia de este factor en las propiedades finales de la unión y el ensamble.

PALABRAS CLAVE

MOJABILIDAD, SOLDADURA BLANDA, TOXICIDAD, CONTAMINACIÓN, PLOMO, ZINC, MICROELECTRÓNICOS, ÁNGULO DE CONTACTO, TENSIÓN SUPERFICIAL, SUSTRATOS, COBRE, DIFUSIÓN, COMPUESTOS INTERMETÁLICOS.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de soldadura con aleaciones a base de plomo y sus sustitutos, son el principal método de unión de componentes electrónicos a las tarjetas de circuitos impresos (PCBs, por sus siglas en inglés), las cuales se encuentran en innumerables tipos de dispositivos electrónicos. Aunque la cantidad de plomo usado en las aleaciones para este tipo de soldaduras es una pequeña porción del total usado en la industria en general; el principal problema en este caso se deriva de la producción de residuos electrónicos (e-waste), dado que técnicas de desechos de estos dispositivos no son comúnmente practicadas. Por esta razón la industria eléctrica y electrónica ha enfrentado por años la necesidad de sustituir las aleaciones con plomo en la fabricación de soldadura, dadas las regulaciones, principalmente en Europa, de organismos como la directiva de Restricción de Sustancias Peligrosas (RoHS); en aparatos eléctricos y electrónicos.

Aunque la Unión Europea (UE) y los países asiáticos en su mayoría ya usan aleaciones libres de plomo para soldadura, hoy en día en Colombia y Latinoamérica en general se continúa usando aleaciones plomo-estaño; pero es importante destacar también que esto se debe en parte a la baja oferta de soldadura libre de plomo existente en el mercado nacional e incluso a nivel latinoamericano. En algunas fábricas se usan, sin embargo, soldaduras libres de plomo dada la presión de clientes internacionales[1].

Se han evaluado a lo largo de los años algunos posibles sustitutos del plomo como antimonio, bismuto, cobre, plata, indio y zinc; tomando en cuenta factores como la toxicidad de las sustancias, punto de fusión, el costo, propiedades fisicomecánicas, propiedades superficiales, entre otros. En investigaciones previas[2]–[4] se ha examinado la factibilidad de las aleaciones de Estaño-Zinc como sustituto de soldaduras que contienen plomo; sin embargo, se han encontrado algunos inconvenientes tales como pobre resistencia a la oxidación en condiciones de alta humedad y temperatura, además de una baja compatibilidad con sustratos de cobre a elevadas temperaturas[4], lo que pondría en duda la viabilidad de una completa sustitución de la aleación estaño-plomo.

Un eventual reemplazo del plomo en las aleaciones para soldadura tendrá un gran impacto en áreas de la salud como la salud ocupacional, enfermedades laborales y enfermedades crónicas cancerígenas; y un impacto aún mayor en la mitigación de problemas medioambientales como el calentamiento global, debilitamiento de la capa de ozono, lluvia acida, smog fotoquímico, la calidad del agua potable y la contaminación del suelo y subsuelo[1]; por tanto es necesario la inversión de un músculo investigativo suficiente, que permita dar información específica de las propiedades de los posibles sustitutos, y de esta forma plantear la posibilidad de una transición parcial o total en la industria.

Los resultados obtenidos de esta investigación han sido planteados como un importante paso para la comunidad latinoamericana dado el objetivo anteriormente planteado, procurando dar cuenta de las sustanciales posibilidades en términos de mojabilidad, que pueden llevar a sustituir las aleaciones con plomo para soldadura por la aleación Sn-Zn, principalmente en el sector electrónico en auge. Es importante mencionar que tras la presentación del trabajo de investigación en eventos internacionales (ANEXO 1 y ANEXO 2), se tiene la intención de brindar información a la comunidad científica, de forma que sea así transmitida a la industria latinoamericana. Trabajos y desarrollos como el presente, que permitan una alternativa hacia catálogo de artículos más “verdes” dan cuenta de la apuesta por un desarrollo investigativo que permita alcanzar un desarrollo sostenible a nivel ingenieril.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 MOJABILIDAD

La mojabilidad está definida como la capacidad que tiene un cuerpo líquido de expandirse y fluir sobre uno sólido, dejando sobre él una traza [5]. De esta forma, las propiedades superficiales del sólido, del líquido y del fluido (gas o líquido) que rodee el conjunto en cuestión; tendrán gran influencia sobre la mojabilidad que se presente entre los dos cuerpos.

Aunque existen diferentes métodos para medir la mojabilidad, uno de los más usados es el ángulo de contacto que presente una gota en reposo del líquido sobre el sólido, de forma que, como se ve en la Ilustración 1, un ángulo de contacto alto será propio de una baja mojabilidad del líquido sobre el sólido, y un ángulo de contacto bajo, será propio de una alta mojabilidad. En el caso del agua, el caso A, en el cual la gota presenta un ángulo de contacto mayor a 90° se dice que la superficie es hidrofóbica; por contrario en el caso C, la superficie será hidrofílica, dado que su ángulo de contacto será mucho menor a 90° .

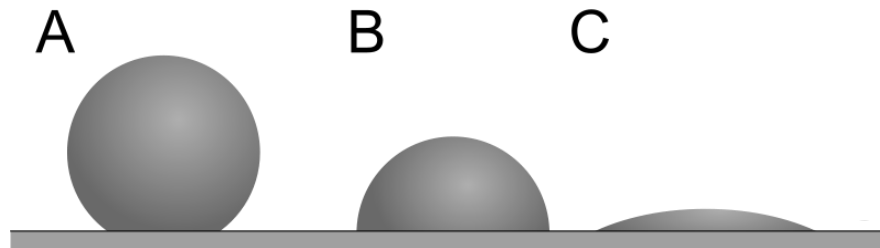


Ilustración 1: Gotas de agua sobre diferentes superficies. Tomada de [6]

2.1.1 Tensión superficial

La tensión superficial se genera cuando dos fluidos inmiscibles se encuentran en contacto, y se forma una superficie que divide las dos interfaces dadas las fuerzas intermoleculares entre las partículas en cada una de las fases, de modo que cerca de la membrana se genera una tensión entre las partículas que la conforman. Esta tensión es llamada energía de superficie libre y se puede generar entre fluidos o entre cualquier tipo de fluido y un sólido [7].

La propiedad de mojabilidad está estrechamente ligada con la tensión superficial γ , que se genera entre las diferentes fases durante la medición del ángulo de contacto, por tanto, como fue mencionado anteriormente, el comportamiento de la gota es inherente a los fluidos y sólidos que se trabajen.

En los casos para análisis de tensiones superficiales en los sistemas más comunes, γ se encuentra tabulado según las interfaces líquido-vapor [8].

2.1.2 Ángulo de contacto

El ángulo de contacto, como fue definido anteriormente, es la forma de medir la mojabilidad de un líquido sobre una interfaz sólida, sobre la cual reposa una gota. Este depende de las fuerzas intermoleculares de adhesión y **cohesión** entre las diferentes fases. Sin embargo, a pesar de su gran utilidad en la ciencia de los materiales, la medida del ángulo de contacto y su análisis ha sido en la ciencia un tema complejo a través de los años. Existen varios métodos para el análisis de esta medida, y se encuentran en constante evolución dada la cantidad de factores que afectan una medición como lo son las propiedades del material, las condiciones del entorno, el tiempo y también la “historia de mojado” [9]. Estos factores agregan incertidumbre a la medición, disminuyendo la probabilidad de encontrar ángulos de contacto reproducibles[10].

En estudios anteriores, Chau y asociados[10] han definido algunos factores principales que afectan la medición del ángulo de contacto, los cuales se encuentran a continuación:

2.1.2.1 Factor de rugosidad

La rugosidad del sólido sobre el que descansa la gota tiene un efecto importante en la medición del ángulo de contacto sobre placas planas, dado que esta conduce a variaciones de la medida, las cuales generan un rango de ángulos sobre los cuales se tendrá la medición, según la variación en la rugosidad [11]. Así, la relación entre la rugosidad del sólido y la histéresis en la medición será intrincada. Por tanto, existirán algunos elementos a tener en cuenta durante la medición del ángulo de contacto:

- **Composición de la superficie:** este proceso es inherente a la metodología empleada para la medición por cada usuario. Hay diferentes tipos de caracterización de superficies, las cuales normalmente son tomadas por imágenes, sin embargo, lo significativo es que en el proceso se asegure una similitud entre las superficies a examinar durante la experimentación.
- **Dimensión:** es importante tener en cuenta que las mediciones para el ángulo de contacto se realizan en tres dimensiones, por tanto las asperezas de la superficie en una placa no serán simétricas como indican los modelos teóricos, por la influencia de la rugosidad sobre la medición no será acotada por el coeficiente de rugosidad indicado en el modelo teórico.
- **Variación de la rugosidad:** las superficies de los materiales presentan heterogeneidad dado principalmente a su composición química y la presencia de suciedad. Por esto, al momento de realizar una medición se deben seleccionar métodos para preparación de superficies y técnicas de limpieza, de modo que la variación del ángulo de contacto por causa de este factor sea mínima.

2.1.2.2 *Coeficiente de heterogeneidad*

Es un factor inevitable cuando se realizan mediciones experimentales, dado que el control que se tendrá sobre el grado de pureza del material a examinar siempre será limitado. Siempre hay margen de error durante la fabricación de materiales, y por tanto, siempre puede haber impurezas. Más adelante se explicará como la ecuación de Cassie es aplicada, de forma que se reduzcan el error por impurezas, sin embargo, esta ecuación ha sido motivo de discusión a lo largo de los años, dado su limitado alcance. Algunas modificaciones han sido sugeridas anteriormente por Drelich y asociados[12], con respecto a la contribución de la energía libre asociada a la *línea trifásica* (línea en la que coexisten las 3 fases; sólido, líquido y gas); sin embargo un análisis más detallado será expuesto junto con el modelo teórico.

2.1.3 Modelos teóricos

A continuación se describirán los modelos teóricos que serán usados para los cálculos durante y después de la medición.

2.1.3.1 Ecuación de Young

Para el análisis de la tensión superficial, es necesario suponer una línea en que coexisten las tres fases; sólida, líquida y gaseosa. La fuerza tangencial a la gota, que parte de la *línea trifásica* Ilustración 2 será entonces la resultante de la ecuación de Young, la cual para motivos de análisis reúne los parámetros importantes en la medición de la mojabilidad y de tensión superficial que son; el ángulo de contacto de equilibrio θ , y las tres tensiones superficiales entre las tres fases: γ_{sl} (sólido-líquido), γ_{sv} (sólido-gas) y γ (líquido-gas) [13].

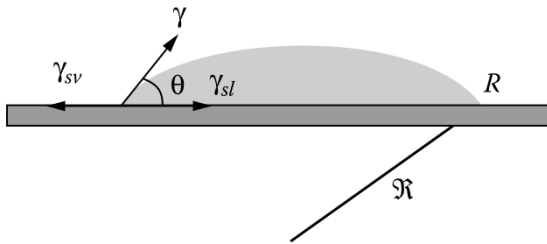


Ilustración 2. Tensiones superficiales en la línea trifásica. R es el radio de base de la gota y \mathfrak{R} es el radio de la gota. Tomada de [13].

La ecuación de Young para la tensión superficial de la gota, será de la siguiente forma:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma} \quad \text{Ecuación 1}$$

Esta es la ecuación general en condiciones ideales para el análisis de la tensión superficial, sin embargo ha sido reformulada dado su corto alcance; es preciso sin embargo, incluirla dentro del modelo teórico dada su importancia.

2.1.3.2 Ecuación de Young-Laplace

Fue formulada por Young y Laplace a principios del siglo XIX. Este será el modelo trabajado por el software de laboratorio para la extracción del perfil de la gota y el cálculo de la tensión superficial, dado que entre los métodos ofrecidos es el más preciso, aunque requiere más cómputo[14]. Es una relación más general que representa la ecuación básica de capilaridad. El siguiente procedimiento, fue descrito por Adamson y asociados [8], para obtener el modelo teórico:

Tomando dos radios de curvatura para una superficie R_1 y R_2 , una pequeña sección de la superficie es cortada arbitrariamente como se muestra en la Ilustración 3. Suponiendo una pieza infinitesimal de la superficie, se puede decir que los radios son constantes.

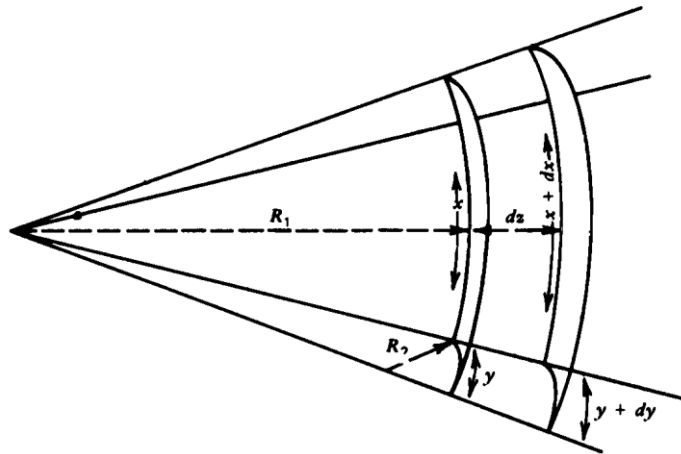


Ilustración 3. Sección en equilibrio de una superficie curva cortada de manera aleatoria. Tomada de [8]

De esta forma, si la superficie es desplazada en dirección z , como se muestra en la figura; el cambio del área será:

$$\Delta A = (x + dx)(y + dy) - xy = x dy + y dx$$

Ecuación 2

El trabajo, al formar esta nueva área será:

$$W = \gamma(x dy + y dx) \quad \text{Ecuación 3}$$

Habrà también un diferencial de presión en la superficie, este ΔP actuarà a lo largo de xy y a través de la superficie dz ; de forma que:

$$W = \Delta P xy dz \quad \text{Ecuación 4}$$

Tomando de la Ilustración 3 los dos triángulos semejantes, se puede establecer las siguientes relaciones:

$$\frac{x + dx}{R_1 + dz} = \frac{x}{R_1} \quad \text{ó} \quad dx = \frac{x dz}{R_1}$$

$$\frac{y + dy}{R_2 + dz} = \frac{y}{R_2} \quad \text{ó} \quad dy = \frac{y dz}{R_2}$$

De esta manera, como la superficie se encuentra en equilibrio mecánico, los dos términos de trabajo deben ser iguales (Ecuación 3 y Ecuación 4); así que al igualarlos, y sustituir los términos para dx y dy , tendremos:

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

ΔP , tras un análisis de capilaridad, debe ser igual a la presión hidrostática de la gota de la columna del líquido en un capilar. Así $\Delta P = \Delta \rho gh$, donde $\Delta \rho$ es la diferencia de densidad entre la fase líquida y el gas y g es la aceleración debido a la gravedad.

2.1.3.3 Ecuación de Young-Dupree

La ecuación de Young-Dupree es definida por Eustathopoulos [15] como la ecuación para el estudio del comportamiento de una “mojabilidad adhesiva”. Considera el trabajo de adhesión que realiza el metal fundido al sólido ($-W_a^0$), y corresponde al cambio de la energía superficial del sistema, el cual está descrito de la siguiente manera:

$$-W_a^0 = \gamma_{sl} - (\gamma_{sv} + \gamma) \quad \text{Ecuación 6}$$

Combinando la Ecuación 1 y la Ecuación 6, la relación que se obtendrá corresponde a la ecuación de Young-Dupree:

$$\cos \theta = \frac{W_a^0}{\gamma} - 1 \quad \text{Ecuación 7}$$

y si sustituimos los términos de $-W_a^0$ y γ por las igualdades descritas en [15], se encuentra que el ángulo de contacto en la interacción de dos metales (uno de ellos fundido), dependerá de la razón entre dos tipos de fuerzas presentes: las fuerzas de cohesión y las fuerzas de adhesión.

$$\cos \theta = \frac{\varepsilon_{SL}}{\varepsilon_{LL}/2} - 1 \quad \text{Ecuación 8}$$

De esta forma, se presentarán diferentes valores de ángulo de contacto según las fuerzas S/L y L/L.

Tabla 1. Grado de humectabilidad en función de las fuerzas de interacción S/L y L/L

Interacciones S/L	Débiles	Fuertes
Interacciones L/L		
Débiles	$0^\circ < \theta < 90^\circ$	$\theta = 0^\circ$
Fuertes	$90^\circ < \theta < 180^\circ$	$0^\circ < \theta < 90^\circ$

2.1.3.4 Ecuación de Cassie-Baxter

De la misma forma como Wenzel se encargó de relacionar la rugosidad de la superficie con la medida del ángulo de contacto, Cassie relacionó la medida sobre una superficie ideal, con la heterogeneidad y rugosidad de una superficie mediante la ecuación de Cassie en 1944 [16]. En esta ecuación se expresa que la medición del ángulo de contacto cambia de manera

bidimensional en la superficie. A pesar de su alta aplicación en experimentos a fin de predecir el ángulo de contacto sobre una superficie rugosa, ha sido también objeto de críticas e intentos de reformulación [17].

La formulación de Cassie-Baxter y Wenzel es evaluada por Bormashenko [18], en un desarrollo matemático que explica su validez, y las condiciones bajo la cual el modelo puede ser aplicado. La ecuación, en su forma más general está descrita a continuación:

$$\cos \theta_c = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2 \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde θ_c es el ángulo de contacto aparente derivado de la ecuación Cassie-Baxter, θ_1 y θ_2 son los ángulos de contacto característicos de cada componente (la formulación es precisa para superficies de dos componentes) de la superficie a evaluar, y f_1 y f_2 son las fracciones de la superficie ocupada por esos componentes respectivamente, de forma que $f_1 + f_2 = 1$.

2.1.3.5 Ecuación de Butler

La ecuación de Butler es debidamente descrita e implementada en un informe realizado por Moser y asociados [19], en el cual se dieron a la tarea de modelar el método y la influencia de variables termodinámicas, propiedades físicas y químicas, en el valor de la tensión superficial para una gran variedad de aleaciones soldaduras libres de plomo de carácter monofásico, bifásico y trifásico; diseñando un programa llamado *SURDAT* que permite ajustar los parámetros y el tipo de aleación de soldadura, y calcular el comportamiento de la aleación en diferentes tipos de condiciones y composiciones. Es de resaltar que el trabajo es formidable, en el sentido de que presta una herramienta ágil y fácil de usar. Sin embargo, como es de suponer, el modelo de Butler toma en cuenta algunas asunciones como la omisión del carácter adhesivo de los procesos de soldadura, y así de los compuestos intermetálicos formados en la unión; y suponiendo el carácter ideal en términos de composición sobre las superficies de la unión.

Para el presente trabajo se implementará la siguiente modificación de la ecuación de Butler presentada en dicho trabajo, dado que permite hallar la relación que existe en términos de

tensión superficial, para las tres aleaciones de soldadura de Sn-Zn cada una a diferentes temperaturas de trabajo. De esta forma se puede comparar un concepto de mojabilidad teórica según la ecuación de Butler, y contrastarlo con los resultados experimentales obtenidos:

$$\gamma_{AB} = \gamma_A X_A + \gamma_B X_B + \gamma_B X_B \sum_{i=0}^n (a_i + b_i T + c_i T^2)(X_A - X_B)^i \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_{Sn} X_{Sn} + \gamma_{Zn} X_{Zn} \\ &+ X_{Sn} X_{Zn} [(-727.8 + 0.59511 T - 0.0001511 T^2) \\ &+ (1440.8 - 2.48597 T + 0.0013053 T^2)(X_{Sn} \\ &- X_{Zn}) \\ &+ (-2792.2 + 6.49153 T \\ &- 0.0040674 T^2)(X_{Sn} - X_{Zn})^2 \\ &+ (-997.1 + 8.52386 T \\ &- 0.0078256 T^2)(X_{Sn} - X_{Zn})^3 \\ &+ (5103 - 24.0004 T \\ &+ 0.0199273 T^2)(X_{Sn} - X_{Zn})^4 \\ &+ (1900.4 - 19.7816 T \\ &+ 0.0194024 T^2)(X_{Sn} - X_{Zn})^5 \\ &+ (-4746.5 + 37.4526 T \\ &- 0.0354238 T^2)(X_{Sn} - X_{Zn})^6 \\ &+ (10193.7 - 6.03384 T \\ &- 0.0051557 T^2)(X_{Sn} - X_{Zn})^7 \\ &+ (-11698 + 3.61051 T \\ &+ 0.0097675 T^2)(X_{Sn} - X_{Zn})^8] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 11}$$

Desviación estándar=2.1mN/m

523 K < T < 973 K

La Ecuación 11 corresponde a la implementación correspondiente del modelo de Butler obtenido para aleaciones bifásicas, y es obtenido a partir de la Ecuación 10, en donde X_A, X_B , γ_A y γ_B son las fracciones molares y las tensiones superficiales de los dos componentes A y B en la aleación, respectivamente, y a_i, b_i , and c_i , son “parámetros de la función que describen las desviaciones de la tensión superficial calculada para los cambios lineales ($\gamma_A X_A + \gamma_B X_B$)”.

2.1.4 Medidas en caliente

Durante el proceso experimental, se medirá la mojabilidad usando el método de la gota en reposo, como antes fue mencionado, de aleaciones sobre materiales metálicos. Las mediciones de este tipo de sistemas acarrearán problemas experimentales, puesto que siempre pueden existir barreras como la formación de capas de oxidación, la difusión entre los componentes dada solubilidad y posiblemente la formación de compuestos intermetálicos en el sistema. Sin embargo, es conocido, que en el caso de metales fundidos o aleaciones fundidas sobre otros metales, se presenta una alta mojabilidad [15], usualmente con $\theta < 90^\circ$, sin importar la interacción que exista entre las sustancias.

La absorción de oxígeno durante el proceso de medición puede alterar las medidas obtenidas en decenas de grados, lo cual altera la calidad de la medición y puede también afectar la composición de los compuestos intermetálicos durante el proceso. Sin embargo, la mojabilidad parece tener mayores valores en tanto la solubilidad de los componentes del sistema es mayor, incluso hasta la formación de compuestos intermetálicos.

Es necesario considerar la amplia cantidad de factores que influenciarán la medición del ángulo de contacto en este trabajo; no solo los anteriormente mencionados durante la medición, inherentes al proceso; sino los factores que arrastran problemas a altas temperaturas. Es preciso afirmar que las mediciones que se realizarán en este caso (dado que se usaran compuestos intermetálicos de alta solubilidad sobre los sustratos de latón y aluminio), y aunque se apliquen modelos matemáticos más complejos, cargarán un alto grado de incertidumbre, el cual dejará paso a un análisis cualitativo más que cuantitativo, que para efectos de comparación, estará respaldado con un estudio estadístico posterior.

2.2 SOLDADURAS

El ensamble de productos es uno de los campos más importantes del procesado de materiales, dado que la mayoría de los artículos de hoy se componen de dos o más partes, y así de dos o más materiales. La Sociedad Americana de Soldaduras (AWS, por sus siglas en inglés),

divide entonces los procesos de unión en tres grandes ramas: soldadura, unión adhesiva y sujeción mecánica. La soldadura, dadas sus características, ocupa un lugar primordial en la tecnología de unión de componentes de máquina y esta a su vez se divide en tres categorías básicas: soldadura de fusión, soldadura en estado sólido y soldadura fuerte y blanda[20].

En la obtención de un proceso de soldadura eficiente, y uniones con altas propiedades mecánicas influyen una gran cantidad de factores, dado que es un proceso que implica altas temperaturas y condiciones determinadas. Entre estos tenemos principalmente la rapidez de la aplicación del calor, las propiedades térmicas de los materiales, la cantidad de calor, la velocidad de enfriamiento, la geometría de la unión, y la integridad química de los materiales implicados en el proceso, entre otros. De esta forma, existirán diversos tipos y procesos de soldadura, los cuales se seleccionarán según las condiciones y el tipo de unión que se pretende conseguir. Las definiciones para cada uno de los procesos de soldadura se encuentran dados en ISO 857; y una clasificación más detallada de los diferentes tipos de soldadura existentes se encuentra en [21].

Los procesos de soldadura a tratar a lo largo de la investigación abarcan soldadura de fusión y soldadura blanda, por tanto su conocimiento es menester. Kalpakjian [20] define la soldadura de fusión como “el fundir conjuntamente y coalescer materiales mediante el calor”. Entonces, el objetivo en un proceso de soldadura de fusión será unir las piezas, llevando los materiales, mediante el suministro de calor (de forma química o eléctrica), a su punto de fusión; de forma que una porción de ellos se funda en uno solo. Este proceso puede hacerse usando materiales de aporte o relleno, y consisten en materiales que se agregan a la zona de soldadura durante el proceso.

A fin de explicar la unión de dos materiales mediante un proceso de soldadura, mediante un esquema genera del mismo, se puede describir las partes que lo componen (Ilustración 4); las cuales son: 1) el material a soldar, 2) el cordón de soldadura, 3) aplicación de calor y 4) el material de relleno o de aporte.

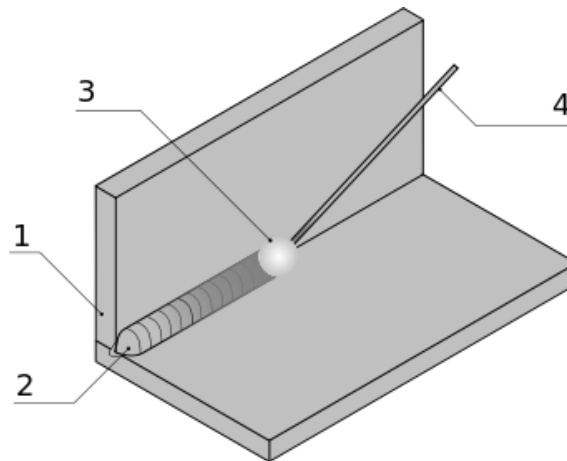


Ilustración 4. Componentes de un proceso de soldadura por fusión. Tomado de [22].

La **soldadura blanda**, por su parte, es utilizada en aquellos procesos de fabricación en los cuales las temperaturas de fusión de los materiales de aporte no pueden alcanzar las temperaturas de fusión de las piezas de trabajo; por esto son conocidos también como *soldadura de bajo punto de fusión*. Las características importantes de este tipo de soldadura son una alta capacidad de humectación y baja tensión superficial. Las fuentes de energía requeridas para este proceso no deben ser muy grandes dado que las temperaturas no alcanzan grandes magnitudes [20]. Las características de la soldadura blanda la hace ideal para procesos de unión en componentes eléctricos y electrónicos, donde las altas temperaturas pueden afectar los artículos ensamblados. Por esto, en la industria electrónica, los procesos de soldadura de artículos para el consumo comercial deben cumplir ciertas normas en el ensamblaje del artículo y así en las uniones mediante soldadura, las cuales comúnmente están automatizadas.

2.2.1 Generalidades

2.2.1.1 Historia

La unión de materiales y partes ha sido un problema desde hace miles de años, sin embargo la mayoría de estos procesos se desarrollaban por procesos artesanales en la herrería. La soldadura como es conocida hoy en día, comenzó a desarrollarse a partir del siglo XIX,

desarrollos ingenieriles como la manipulación de gases, que permitieron la formación de una llama que suministrara calor suficiente; la generación y manipulación de energía eléctrica para procesos de soldadura por arco; y posteriormente con los avances en la manipulación y suministro de calor fue posible tener materiales fundidos, que al solidificarse sirvieran para unir materiales diferentes.

Como es frecuente en los desarrollos de ingeniería, los avances más significativos en este campo se produjeron a partir de las guerras, principalmente la Primera y Segunda Guerra Mundial. Antes de esto, sin embargo, ya se conocían técnicas como la soldadura por resistencia, la soldadura por gas y la soldadura por arco; dados los desarrollos tecnológicos antes descritos [21]. Los países que ampararon desarrollo de procesos de soldadura fueron los países potencia de la época, algunos de los cuales posteriormente estarían implicados en conflictos armados, como Estados Unidos, Francia, Inglaterra, Alemania y Suecia, entre otros.

Tras la Primera Guerra Mundial, en los años treinta, se realizaron mejoras a los procesos de soldadura existentes, como la soldadura por arco sumergida. Y es en este momento en que la ingeniería militar, en especial la industria aeronáutica; apremia, requiriendo procesos de soldadura más efectivos y para nuevos materiales como el aluminio y el magnesio. La soldadura con el gas inerte Tungsteno o TIG, fue entonces desarrollada en los años cuarenta, supliendo las necesidades de la industria militar. Años más tarde, tras la guerra; se desarrollaron procesos de soldadura como el MIG (Metal Inert Gas), la soldadura por plasma, y los procesos de soldadura que son llevados a cabo a partir de haz de luz, como la soldadura por láser y por rayo de electrones.

El avance de la soldadura también estuvo ligado, como fue descrito anteriormente al desarrollo de nuevas fuentes de energía que permitían suministrar la energía necesaria para llevar a cabo el proceso de forma eficiente. Adelantos en la ingeniería eléctrica tales como los generadores, los transformadores, los rectificadores, y los inversores; permitieron un avance progresivo en la soldadura y en el procesado de materiales en general [21].

Por su parte, es también necesario tener en cuenta que algunos procesos de soldadura antes descritos como la soldadura blanda, en la cual se busca la unión de componentes a temperaturas relativamente bajas datan desde fechas tan lejanas como 4000 o 3000 a.C.[20].

2.2.1.2 Riesgos en la soldadura

La cuestión de los riesgos que implican un proceso de soldadura juega uno de los factores más importantes en lo que respecta a las normas impuestas en los procesos de fabricación. La peligrosidad de la soldadura es inherente al proceso, y existen diferentes factores a ser vigilados cuando este se lleva a cabo. Estos pueden variar según el tipo de soldadura a aplicar.

El manejo de altas temperaturas constituye es un riesgo intrínseco al proceso de fabricación, el cual en este caso está dirigido principalmente al soldador y después al entorno en el que se realiza el proceso, los cuales pueden ser susceptibles a explosiones, incendios y quemaduras[20].

Dado que una gran cantidad de procesos de soldadura usan altas fuentes eléctricas, estas constituyen un peligro importante para los operarios cercanos al proceso, los cuales están en inminente riesgo de descargas eléctricas.

Los procesos de soldadura también acarrear riesgos para algunos órganos de los sentidos, induciendo problemas en la vista, dada la formación de llamas (como en el caso de la soldadura con arco) que disminuyen la calidad de la visión tras largas exposiciones; y la audición, tras la exposición a sonidos excesivos y prolongados generado por operaciones de corte y soldadura [20], [23].

Existen también procesos de soldadura en los cuales se producen humos o residuos gaseosos que en muchos casos pueden ser tóxicos para la salud del soldador, e incluso pueden implicar un deterioro ambiental, lo cual involucra aspectos medioambientales a un proceso de soldadura, los cuales deben tenerse en cuenta al momento de aplicar el proceso.

De esta forma, los riesgos anteriormente descritos también exigen medidas de seguridad rígidas en cada uno de los casos, a fin de asegurar una completa calidad en el proceso de

soldadura. La normativa de seguridad es dependiente del tipo de soldadura empleado, sin embargo, hay lugares en los que la normativa para el uso de soldaduras no es estricta, por lo cual los procesos son susceptibles a riesgos tanto de salud para el trabajador, como de calidad del proceso y finalmente ambientales.

2.2.1.3 Soldadura en elementos microelectrónicos

Como se mencionó anteriormente, un caso común en el uso de soldadura de bajo punto de fusión es el caso de la industria eléctrica y electrónica. De esta misma forma, el caso más común dentro de esta rama de la ingeniería es la soldadura de juntas electrónicas en tarjetas de circuitos integrados (PCB), mencionadas anteriormente; en donde se requieren materiales y condiciones especiales que permitan llevar a cabalidad el proceso de forma eficiente.

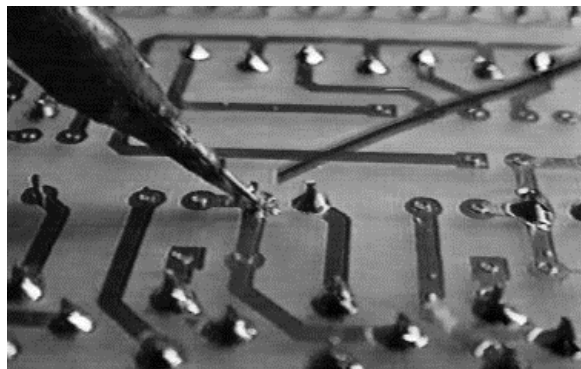
El avance en la industria electrónica en la segunda mitad del siglo XX y en el siglo XXI ha estado ligada estrechamente al uso de las soldaduras en la industria, por esto siempre ha sido un blanco a optimizar durante el proceso de producción. La soldadura en PCBs es un factor crítico durante la fabricación del artículo electrónico, por tanto es indispensable que el proceso se realice con la mayor precisión y exactitud posible durante la aplicación; garantizando así la calidad del producto para el cliente.

El principal factor que determina el tipo de soldadura aplicar y los materiales a usar, es la temperatura. Como es sabido, la temperatura de fusión del material de aporte con el que se realizará la junta no debe estar cerca a la temperatura de fusión de la matriz, las cuales generalmente se encuentran fabricadas en materiales compuestos, generalmente de matriz polimérica y reforzantes cerámicos como fibra de vidrio [24].

Las propiedades mecánicas para este tipo de soldaduras no son un factor determinante, dado que se encuentran sometidas a bajas magnitudes de cargas.[20]. Los materiales usados, sin embargo, juegan un papel importante en la industria electrónica, no solo por sus propiedades térmicas, sino también por propiedades como resistencia a la oxidación, reactividad con los materiales de trabajo, capacidad de humectación y conductividad eléctrica.

Los procesos de manufactura más comunes en la industria para la aplicación de soldadura blanda en artículos electrónicos se encuentran ampliamente descritos en la bibliografía. Para objeto de la investigación, es preciso presentar una breve descripción de los mismos; Groover [23] hace una descripción de los mismos, presentada a continuación:

- **Soldadura manual:** consiste, simplemente, en la unión de las partes mediante la aplicación manual del material de aportación, realizando la conexión necesaria. Se usan usualmente fundentes, con los cuales se humecta la superficie y que permiten aislar el material de contacto con el aire, prevenir la formación de óxidos y favorecer la humectación del material de aportación [25]; el cual se calienta hasta su temperatura de fusión y es directamente aplicado sobre la superficie de la PCB. Aunque el proceso se refiere a un procedimiento manual, hay ocasiones en las cuales el proceso de calentamiento del material de relleno se hace de forma mecánica.



**Ilustración 5. Proceso de soldadura manual, usando caudín y pasta de soldadura.
Tomada de [26]**

- **Soldadura blanda en olas:** permite la soldadura de múltiples alambres de plomo a la tarjeta de circuitos, mediante la aplicación de una ola de soldadura blanda fundida. El proceso consiste básicamente en un tablero de circuitos impreso que se encuentra ensamblado con todos sus componentes, el cual es posteriormente sometido a un baño de soldadura líquida por el otro lado de la tarjeta, de forma que los alambres de plomo

terminen, luego del proceso de enfriamiento, unidos a la tarjeta de circuitos (Ilustración 6).

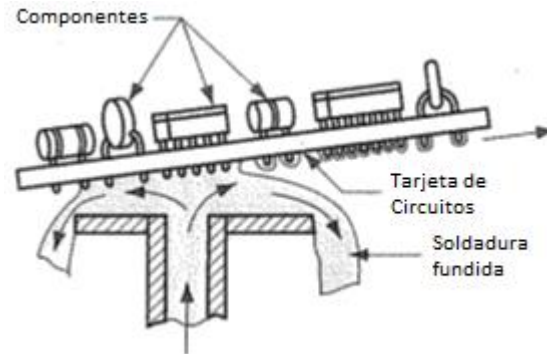


Ilustración 6. Proceso de soldadura blanda por olas. Tomada de [24].

- **Soldadura blanda por reflujo:** es también ampliamente usado en el ensamble de aparatos electrónicos, sin embargo requiere mayor precisión, pero se asegura una mejor soldadura en el proceso. Consiste en aplicar una pasta para soldadura diluida en un aglutinante sobre las áreas en las que se piensa realizar la soldadura. Posteriormente se deben ubicar los componentes que se quieren fijar a la PCB, y finalmente se somete el tablero a la temperatura de fusión de la soldadura, de forma que se produzca la unión mecánica y eléctrica tras el enfriamiento de la pasta. Los métodos de calentamiento y enfriamiento varían según el tipo de acabado y las características finales que se quieren obtener de la soldadura.

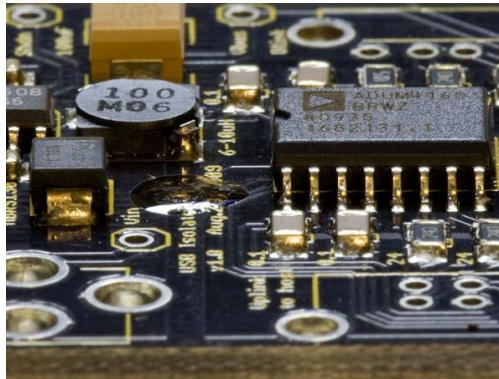


Ilustración 7. PCB tras ser sometida a un proceso de soldadura blanda por reflujo. Tomada de[27].

Entre los defectos más comunes en la aplicación de soldaduras está la formación de porosidad y de oxidación de la soldadura dada una incorrecta limpieza del material base o una incorrecta aplicación de la capa de fundente, en algunos casos; falta o exceso de material de aportación que usualmente viene derivado también de errores metodológicos como parámetros de soldadura no adecuados, diseño inapropiado de la unión y manejo incorrecto de los tiempos de trabajo del proceso[25].

2.2.2 Mojabilidad de soldaduras

La mojabilidad para el caso de las soldaduras durante un proceso de fabricación y por tanto a altas temperaturas relativas, no difiere en gran manera de la mojabilidad a temperatura ambiente de un sistema líquido-sólido-gas. Los factores anteriormente mencionados para mojabilidad a altas temperaturas también juegan un papel importante en la medición de la humectabilidad y del ángulo de contacto de gotas de soldadura; a saber, rugosidad, temperatura de trabajo, heterogeneidad de la superficie, formación de compuestos, solubilidad y resistencia a la corrosión de los materiales. Sin embargo, hay algunos otros factores a tener en cuenta.

Debido a las diferentes técnicas de soldadura, la propiedad de mojabilidad para las aleaciones de soldadura debe ser similar durante cualquiera de los métodos para soldadura suave antes descritos; soldadura manual, soldadura por reflujo y soldadura por olas. Es decir, que habrán

nuevas variables que influirán en la mojabilidad de la soldadura, propias del proceso; como lo son: el tipo de soldadura, la temperatura de fusión de la soldadura, la composición química de la soldadura, el fundente (Flux, en inglés), y el tiempo de mojado[28].

La clave para la formación de una junta de soldadura, es que la aleación pueda mojar el sustrato sobre el cual se hará la unión de manera significativa. Tras de esto se definen dos aspectos principales, el primero es que la tensión superficial para el trabajo de la mojabilidad debe ser la menor posible, de forma que la mojabilidad sea mayor; y el segundo es la limpieza de la superficie, que juega un papel imperativo en el proceso de humectación de una soldadura sobre una superficie. Es importante durante el proceso de soldadura, que el nivel de impurezas, provenientes desde la fabricación de la pasta y durante el proceso de soldadura sea mínimo. De esta forma, se esperaría que el ángulo de contacto ideal para un proceso de soldadura sea 0° , sin embargo, en la práctica, este ideal nunca es alcanzado[29].

Otro concepto al momento de estudiar la mojabilidad de las soldaduras es la soldabilidad, definido como una medida de la habilidad de un material a ser soldado; es decir, que tanto puede ser mojado por una aleación de soldadura. Sin embargo, este concepto ha sido relegado últimamente a la definición de las propiedades superficiales del material, las cuales, como sabemos pueden alterar las facultades de mojabilidad del material, por esto su estudio no es exhaustivo [29].

A fin de minimizar la influencia de la variación de temperatura en los resultados obtenidos, se debe tener en cuenta que el flujo de un metal sobre otro metal se presenta cuando la temperatura del mismo supera la temperatura de liquidus, y dado que es normal que se presenten bajas viscosidades en los procesos de soldadura, la temperatura podría alterar el comportamiento reológico del material. En un complejo estudio realizado en Japón por Mayappan y asociados[30], dedican una exhaustiva investigación en términos de la composición química de las aleaciones y de la mojabilidad de las mismas, a la influencia de la temperatura en los resultados obtenidos para uniones de soldadura; encontrando que este factor es enteramente influyente en la medición del ángulo de contacto al superar valores de temperatura de 300°C para aleaciones Sn-Zn, y que para las aleaciones de Sn-Pb significa

una variación mayor, alterando notablemente el AC a medida que se aumenta la temperatura de la muestra, como se puede observar en la Ilustración 8.

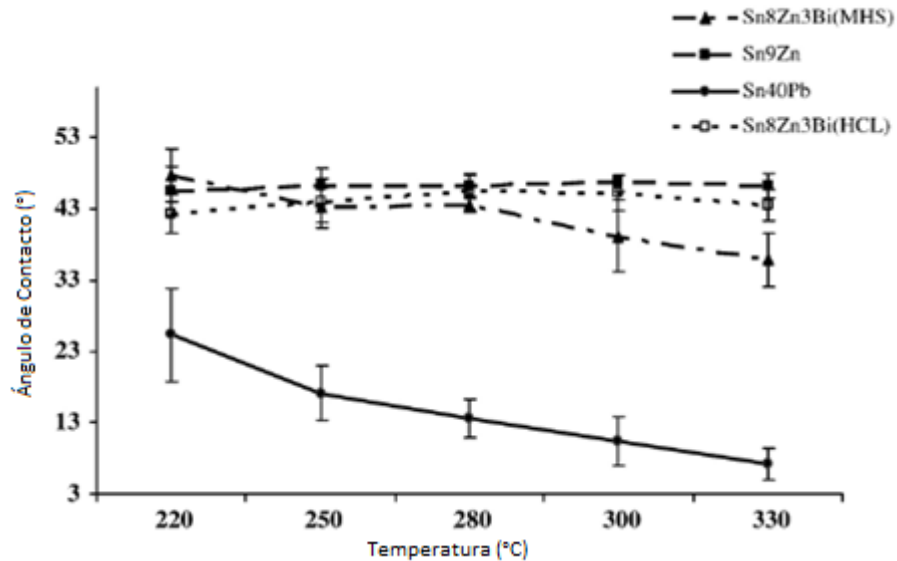


Ilustración 8. Efecto de la temperatura en el AC.

Es menester, al realizar un proceso de soldadura, predecir y conocer el comportamiento que tendrá la aleación de soldadura en el ambiente en el cual será llevado a cabo, los materiales con los que tendrá contacto, el tipo de proceso, y así poder asegurar la calidad de la unión soldada. Por esto es importante conocer las características químicas finales que tendrá la unión, como las anteriormente expuestas para el caso de las soldaduras Sn-Pb y Sn-Zn. Con miras al control de estas características se realizan procedimientos de control de atmósferas, acabados superficiales y fundentes previos.

2.2.3 Soldaduras de plomo

2.2.3.1 Generalidades

Como fue anteriormente descrito, la soldadura con plomo ha sido usada por el ser humano hace al menos un par de milenios, sin embargo su desarrollo ha sido escaso. Fue usado en aleación con estaño desde los tiempos de los romanos para realizar soldaduras de tuberías de

agua, en aquel tiempo y ahora se conoce, que las propiedades fisicoquímicas de estas aleaciones son ideales para un proceso de soldadura.

Una de las principales ventajas que proporciona el uso de las soldaduras de plomo, es su bajo rango de puntos de fusión según su composición. Aún más, cuando esta aleación es usada en el eutéctico (aproximadamente 62% wt Sn/38% wt. Pb) para soldaduras, dado que se registra la menor temperatura de fusión posible para la aleación, cercana a 183 °C[29]. Esta característica implica diferentes ventajas en el proceso de soldadura como lo son; bajo consumo de energía, mayor facilidad para manipular el proceso de soldadura, y menor costo en el proceso de fabricación dado el precio relativo de la aleación con respecto a otras aleaciones para soldadura blanda. Sin embargo, el estaño es un material costoso en comparación con el plomo, por tanto se encuentran aleaciones comerciales con menor cantidad de estaño, lo cual reduce el precio de la soldadura pero aumenta la cantidad de calor necesaria para llegar al punto de fusión, es aquí donde un análisis de costos debe ser realizado a fin de conseguir la aleación que haga el proceso de soldadura más eficiente.

Un análisis detallado en torno a las características y propiedades de la soldadura Sn-Pb en función de su composición es presentado por Judd y Brindley [29]. De aquí es posible extraer información importante para algunas propiedades mecánicas de esta aleación. Para la resistencia a la tracción y al cortante podemos decir que aunque el punto eutéctico no es la composición que logra la mayor resistencia mecánica, representa un punto alto en la gráfica de esfuerzos contra composición. El módulo de elasticidad de la aleación ronda los 30.000 MPa. En términos de tensión superficial, la cual está estrechamente relacionada con la propiedad de humectabilidad o mojabilidad de la aleación; el plomo posee mayores facultades de mojabilidad que el estaño, lo cual indicaría que una mayor cantidad de plomo tendrá una menor tensión superficial, sin embargo al estar en contacto con el cobre, fenómeno que es menester en esta investigación; la tensión superficial aumenta significativamente, por lo cual la composición eutéctica se considera la mejor opción. Finalmente, en términos de resistividad y conductibilidad termina las aleaciones Sn-Pb no presentan ningún problema significativo, especialmente cuando se hacen ensambles de objetos electrónicos cuyas cantidades de pasta de soldadura son mínimas.

2.2.3.2 Toxicidad e impacto ambiental

La manipulación y el uso del plomo ha sido un problema que data de cientos de años, las aleaciones con plomo, entre ellas las Sn-Pb han sido ampliamente usadas en diferentes campos de la ingeniería como la soldadura de tuberías de agua subterráneas [31], el empaque de alimentos y también su constante uso en los artículos electrónicos de uso diario [3]. Están tan arraigados en la industria moderna que son algunos de los elementos no ferrosos más usados en la tierra [32].

El plomo y el estaño son metales tóxicos. En el caso del estaño, a principal preocupación surge a partir de la formación de compuestos orgánicos con estaño, los cuales presentan mayor deterioro ambiental y riesgo para la salud. Para este caso los efectos en la salud a largo plazo pueden variar desde depresión hasta daño cerebral, según el tipo de exposición que se tenga al compuesto[33]. Para el caso del plomo, la toxicidad, siendo un elemento de uso frecuente en la industria, ha llamado la atención de la comunidad internacional durante un largo tiempo. El envenenamiento por exposición al plomo en la ocupación laboral se conoce hace cientos de años, y se han identificado diferentes patologías producidas por la sobreexposición a este elemento. Entre las más antiguas se encuentran anemia, cólicos, enfermedades neurológicas y esterilidad. Hoy en día se tiene un conocimiento mucho mayor sobre el fenómeno, sus causas y sus consecuencias, y se han generado políticas en torno a la prevención del envenenamiento con plomo, pero, a pesar de esto es hoy en día uno de los problemas más representativos en el área de la salud ocupacional[32].

Existe una gran cantidad de ocupaciones e industrias que se encuentran diariamente en contacto con compuestos de plomo, entre ellas; la industria química, fabricación de baterías, construcción, demolición, joyería, minería, fabricación de pinturas, industria de los plásticos, soldadura, manejo de residuos, entre otras; lo cual nos indica que es significativa la cantidad de trabajadores que se encuentran en riesgo de envenenamiento con plomo.

El envenenamiento con plomo se produce principalmente por dos vías, la ingestión por vías gastrointestinales y la respiración de humos y gases con plomo. Es fácilmente absorbido por

el cuerpo humano y transportado a través del sistema sanguíneo, sin embargo es un metal que no es fácilmente eliminado ni segregado. Los principales mecanismos de expulsión son la sudoración, la eliminación por vías renales y por las uñas[32].

El impacto ambiental que se deriva del uso de soldaduras Sn-Pb es también revelador, la producción de gases nocivos durante los procesos de soldadura es un problema a solucionar; así como el manejo de residuos electrónicos (*e-waste*) y el reciclaje de componentes electrónicos en la industria. Aunque el porcentaje de plomo usado en la industria electrónica representa solo 1.5-2.5 % del total del consumo de plomo, los desechos electrónicos representan el 40% del plomo en los vertederos de basura, lo cual es casi la mitad del plomo desechado en el mundo [34]. Esto demuestra que el manejo de desechos electrónicos está siendo un problema que acarrea altos grados de contaminación y problemas medioambientales, puesto que escasas medidas para la reutilización o reciclaje de estos elementos son tomadas en cuenta en la industria [3]. Estudios llevados a cabo por Townsend et al. [35] nos brindan un panorama general sobre el nivel de contaminación vía lixiviados de diferentes tipos de soldaduras en tarjetas de circuitos impresos que pueden ser llevadas a vertederos, y se evidencia, que el nivel de lixiviados generado por las soldaduras Sn-Pb es superior al nivel generado por otro tipo de soldaduras con cobre, bismuto y plata.

Sin embargo, el problema ambiental que causan las soldaduras no acaba ahí, este un problema, como fue mencionado anteriormente, inherente al proceso. Estudios de ciclos de vida para utilización de diferentes soldaduras han sido llevados a cabo, en los cuales se tienen en cuenta factores que involucran todo el proceso de producción, uso y disposición final de los artículos electrónicos[36]. Algunos de estos factores son: cáncer ocupacional, debilitamiento de la capa de ozono, calentamiento global, calidad del agua, smog fotoquímico, espacio en los vertederos de basura, energías renovables, entre otros[34]. El deterioro ambiental que genera el uso de soldaduras está arraigado al proceso, y es entonces necesario realizar un análisis de este tipo, tomando en cuenta el impacto general de la soldadura en el medioambiente.

2.2.4 Sustitución del plomo

Dado el impacto ambiental que han generado las aleaciones de plomo, y principalmente la aleación Sn-Pb, y dado su extenso uso; encontrar un sustituto total para estas aleaciones ha sido y es, uno de los grandes problemas de la ingeniería de materiales. Como se describió antes, sus características la convierten en la aleación ideal, especialmente para las operaciones de soldadura descritas.

Una gran cantidad de opciones han sido planteadas tras investigaciones, evaluadas y reevaluadas a través de los años, principalmente en el transcurso del siglo XXI ([1], [3], [4], [37]–[39], entre otras); de forma que el material bibliográfico existente es significativo en torno a la sustitución del plomo.

Se ha planteado la posibilidad de una sustitución del plomo por elementos como cobre, indio, plata, zinc, y bismuto, para nombrar algunos; y diversos tipos de propiedades y características para el proceso de soldadura han sido evaluadas a través de los años. A pesar del músculo investigativo que ha sido aplicado para la solución de este problema, la discusión en torno al sustituto ideal de la aleación Sn-Pb continúa.

La complejidad del problema de la sustitución del plomo descansa en la cantidad de parámetros que interfieren en un proceso de soldadura, en la calidad de la soldadura que se quiere lograr, en la inversión necesaria para realizar una transición; pero principalmente, se basa en la incertidumbre que se tiene en la industria acerca de la sustitución del plomo en las aleaciones de soldadura, como solución al problema ambiental planteado por el proceso. Es decir, se discute el hecho de que el desplazamiento del plomo en aleaciones de soldadura disminuye riesgos medioambientales y de envenenamiento, pero acarrea costos energéticos y de capital mayores [1]. Como fue anteriormente descrito, el impacto ambiental debe ser analizado desde un punto de vista general (ciclo de vida), de los productos fabricados con soldaduras Sn-Pb y sus sustitutos, y el impacto ambiental de estos previo, durante y posterior a su fabricación; y su disposición final.

Un modelo del tipo de análisis a realizar para la sustitución del plomo en la soldaduras, es descrito por Almeida y asociados [1], en el cual se usa síntesis de emergía y el indicador DALY (*Disability Adjusted Life Years*), a fin de evaluar la eficacia de la sustitución de soldaduras con plomo por soldaduras libres de plomo. Un hecho revelador indica que la total sustitución de soldaduras con plomo puede llevar a un incremento en el uso de recursos y de emisiones durante la etapa de extracción y procesado; y este estudio sigue inclinando la balanza a favor de las soldaduras Sn-Pb, tras un análisis de ciclo de vida.

2.2.4.1 Soldadura Sn-Zn

A lo largo de los años la soldadura estaño-zinc ha sido propuesta como posible sustituto de las soldaduras con plomo en general. Es sabido que un sustituto factible debe llenar una cantidad de requisitos significativa a fin de llegar incluso a ser estudiado.

La aleación Sn-Zn plantea una cantidad considerable de ventajas, sin embargo puede presentar problemas durante el trabajo experimental. Entre las ventajas, la más llamativa es la temperatura de fusión de la aleación, la cual se encuentra por debajo de todas las aleaciones estudiadas cuando está en el eutéctico; y puede ser tan baja como la del Sn-Pb en su composición eutéctica. Es entonces aquí donde se evalúan ventajas de la aleación en temas como; el posible incremento de los costos durante la transición dada la necesidad de modificaciones a las líneas de producción existentes, que para el caso de la soldadura Sn-Zn es mínimo dados los rangos de temperatura de fusión de la aleación; la influencia de un cambio de material en la vida útil de los ensambles; y el establecimiento de técnicas y sistemas confiables para el proceso de soldadura [4]. Las aleaciones Sn-Zn han sido también conocidas por proporcionar integridad mecánica al ensamble de artículos electrónicos en estudios anteriores [3], [39], [40]. El otro gran beneficio es su bajo costo, el cual es significativamente menor a sus principales contendientes a sustitutos del plomo que son la plata y el cobre, lo cual fue descrito anteriormente[3]. La mojabilidad de la soldadura Sn-Zn también ha sido evaluada en estas investigaciones anteriores, para efectos de la sustitución por soldaduras con plomo, arrojando resultados satisfactorios. En general, todos estos

factores suprimen en gran manera los costos de adoptar una transición a soldaduras sin plomo en la industria, en el caso de la soldadura Sn-Zn.

Además de los factores anteriormente descritos, ha sido descubierto que la adición de bismuto a la aleación Sn-Zn en pequeñas proporciones aumenta significativamente sus propiedades mecánicas y así como su mojabilidad; y disminuye también la temperatura de fusión de la aleación[4]. Es posible de esta forma, conseguir una aleación comercial de Sn-Zn y Sn-Zn-Bi en las proporciones Sn-9Zn y Sn-8Zn-3Bi, respectivamente.

A pesar de sus sustanciales ventajas, han sido encontrados, como fue mencionado anteriormente, algunos inconvenientes con las aleaciones Sn-Zn durante procedimientos experimentales. Las principales son pobre resistencia a la oxidación en ambientes de alta humedad y temperatura, y baja compatibilidad con sustratos de cobre a altas temperaturas. Las grandes fábricas y ensambladoras de artículos electrónicos, han hallado la manera de superar estas deficiencias sistemáticamente por medio de herramientas de testeo estandarizadas, bases de datos confiables y guías de procesos [4], que permiten un desarrollo óptimo de la operación de soldadura en las líneas de producción.

2.2.4.2 Reglamentación

A fin de proteger el ambiente y prevenir los riesgos de envenenamiento, a través de los años la regulación y el control en el uso de sustancias tóxicas y de perjuicio medioambiental, ha sido promocionado a nivel internacional.

Hoy en día, aun la regulación es deficiente en el manejo de sustancias tóxicas alrededor del mundo. La primera restricción fue impuesta en Europa por la RoHS, la cual consiste en la prohibición total a partir de 2006, del uso de determinadas sustancias tóxicas (mercurio, cadmio, plomo, cromo VI, polibromobifenilos y polibromodifenil-éteres) en artículos electrónicos, a fin de eliminar los lixiviados tóxicos tras la disposición final de los artículos electrónicos. Para los países asiáticos la regulación en la producción de artículos electrónicos es también laxa y se sigue trabajando en su fortalecimiento [34], sin embargo son conocidos, junto con los países europeos, como los primeros en sustituir el plomo en aleaciones para

soldadura, en uso a gran escala [1]. En países con gran producción de artículos electrónicos como Estados Unidos y Brasil, no se tienen regulaciones a nivel nacional para las soldaduras en productos electrónicos, sin embargo dada la presión de clientes internacionales e iniciativas de algunos estados, se han hecho algunos avances, a fin de alcanzar una sustitución para estas sustancias tóxicas [34].

2.2.4.3 Soldadura libre de plomo en la industria

Dada la intención de transición hacia el uso de materiales más limpios que se está conservando a nivel general en la ingeniería y la industria en general, los sectores industriales, principalmente los de tecnología de punta se han preocupado por realizar una conversión rápida, que no altere los ingresos y que además contribuya con la preservación de la salud y del medio ambiente.

Desde algunos años atrás, se encuentra en la industria un catálogo amplio de productos libres de plomo y de excelente calidad [41]. Como fue anteriormente descrito, en la producción de artículos electrónicos en la UE ha sido eliminado totalmente el plomo de las aleaciones de soldadura, han tomado su lugar aleaciones con plata, zinc y cobre, principalmente; y varían según las necesidades del fabricante. Las multinacionales europeas también han ejercido presión sobre fabricantes fuera de Europa, a fin de realizar un cambio hacia soldaduras más limpias. En los países asiáticos, especialmente en China, que como es sabido proporciona una gran cantidad de mano de obra a nivel mundial en la industria electrónica, también se ha ejecutado una transición con éxito, y sus líneas de producción, en su mayoría, han adoptado soldaduras libres de plomo y otros agentes de gran toxicidad [42]. Las aleaciones adoptadas en la transición asiática han sido principalmente aleaciones con plata y con zinc. En Estados Unidos también hay una reciente tendencia al acogimiento de soldaduras libres de plomo en la industria [34], y a nivel nacional se patrocina con empeño la transición en general, brindando estudios que proporcionen información a los fabricantes de productos electrónicos [36].

2.2.5 Latinoamérica y Colombia

No hay duda que el desarrollo y la expansión del sector electrónico y de tecnología en Latinoamérica ha llamado la atención de los últimos años, aunque no se encuentra en un lugar privilegiado en la producción de artículos electrónicos a nivel mundial como China, Japón, Europa o Estados Unidos, el crecimiento del sector ha sido de forma exponencial. Aunque las cifras para la comercialización opacan las cifras de producción de artículos electrónicos, el crecimiento de la manufactura de productos electrónicos dada la creación de nuevas empresas o la inversión de capital extranjero ha sido significativa.

La industria electrónica en general, se descansa en los esfuerzos de los mercados de Brasil, Argentina, México, Colombia, Chile, Perú, Venezuela y Ecuador, los cuales representan el 78% del producto interno bruto de toda Latinoamérica. En general, el presupuesto de estos países se encuentra distribuido en el ensamble, investigación y desarrollo de productos electrónicos [43].

Sin embargo, regresando al tema del uso de soldaduras con plomo en Latinoamérica, poca información se tiene en la bibliografía. Se sabe que uno de los principales productores de artículos electrónicos es Brasil, y aquí todavía el uso de Sn-Pb para el ensamble de productos es extenso, excepto en casos en que los clientes para exportación demandan productos más limpios [1]. Regulación alguna, por parte de las instituciones reguladores para el sector electrónico, en Latinoamérica no existen. El contacto con plomo se conoce por ser nocivo, y existen regulaciones en el campo de la salud ocupacional respecto del contacto con plomo en el ambiente de trabajo en diferentes sectores como minería, metalurgia, fabricación de pigmentos, entre otros[44]; sin embargo, debido a que la fuerza producción de artículos electrónicos en Latinoamérica se encuentra en crecimiento, el tema no ha sido debidamente tratado, dado que la incertidumbre sobre el tema a nivel mundial, como fue antes expuesto, todavía tiene lugar en la industria.

2.3 ANTECEDENTES

Dada la extensión del tema, la complejidad, y la variedad de factores que afectan el proceso de soldaduras; la cantidad de estudios y perspectivas que se han tomado a lo largo de los años, principalmente los últimos 15 años, para el estudio de sustitutos de la aleación Sn-Pb; es diversa. Hoy en día, el problema de la sustitución de soldaduras no está acentuado por la falta de información bibliográfica, como hace algunos años; o por la deficiencia de investigación acerca del tema; y el musculo investigativo invertido en el tema sigue en crecimiento dado el compromiso en relación con la salud y con el medio ambiente.

Se han realizado diferentes tipos de investigaciones, en las cuales se estudian una cantidad significativa de compuestos a fin de encontrar una respuesta en el tema de la aleación ideal para reemplazar Sn-Pb. En el año 2000, Mulugeta y Guna[38] hablaban de más de 70 aleaciones propuestas para sustitutos de las aleaciones de plomo en la soldadura. Había una gran cantidad de trabajo investigativo por hacer para este nuevo reto que proponía la ciencia de materiales. Con el trabajo de investigación que se ha llevado a cabo en el siglo XXI, las aleaciones que más se ajustan a los requerimientos han salido a la luz, en incluso encontrado su lugar en la industria[34], [36], [42], [45]. Posteriormente, el análisis ha estado encausado hacia la investigación de algunos compuestos en especial como las aleaciones Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn, entre otras. La importancia y urgencia del tema ha llevado incluso a conclusiones encontradas acerca del mismo, respecto a la aleación más propicia como sustituto. En una publicación de Wu y asociados [28], incluso se estudia la posibilidad de adicionar elementos tierras raras a las aleaciones, a fin de conseguir aleaciones con mejores propiedades.

Como base para la selección del Zinc como objeto de estudio de esta investigación, se cuenta con trabajos de referencia importantes en el de las propiedades de las soldaduras Sn-Zn como soldaduras de baja temperatura. Sukanuma y asociados [4], en un estudio ya citado, llevaron a cabo en 2006 una investigación que recopila una cantidad significativa de referencias bibliográficas existentes hasta el momento. Se analizan las ventajas y desventajas de la aleación durante el proceso de soldadura, haciendo énfasis en las propiedades que aporta el zinc al comportamiento químico de la junta mecánica y en la interacción y reacción entre los

materiales durante la soldadura. También brinda un panorama general sobre las propiedades físicas y mecánicas, mojabilidad y propiedades de resistencia a la corrosión de la aleación. Se plantea finalmente la factibilidad del uso de Sn-Zn como aleaciones para soldadura en elementos electrónicos a nivel industrial, sin embargo, se remarca que a nivel práctico, diferentes fenómenos deben tenerse en cuenta durante el proceso de soldadura.

Un análisis más detallado presentan Islam y asociados [3], en un estudio conjunto entre varios investigadores pertenecientes a diferentes universidades alrededor del mundo. Aquí se realizan varias pruebas de mojabilidad para soldaduras comerciales de Sn-Pb, Sn-Zn y Sn-Zn-Bi; y son sometidas a estudios comparativos. Parámetros como la temperatura de reflujo y el tiempo de calentamiento son variados a fin de lograr un estudio minucioso. Para el procedimiento experimental se realizaron varias pruebas de mojabilidad como el análisis tridimensional de la gota en reposo, esparcimiento de la gota y procedimientos más elaborados como el “slumping test”. Pruebas de microdureza para las aleaciones también fueron llevadas a cabo. Para los resultados, se obtuvo que el comportamiento de la aleación de zinc y estaño, en términos de la mojabilidad, se comporta de manera similar a la aleación con plomo tras superar los 160°C, y como es esperado, el ángulo de contacto disminuye al aumentar la temperatura, superando a la aleación Sn-Pb en una temperatura cercana a los 250°C. Para la microdureza de las aleaciones se encontraron dos diferentes comportamientos. Para las aleaciones antes mencionadas al aumentar la temperatura de reflujo del proceso se encontró que la dureza decae suavemente, siendo el comportamiento contrario para la aleación que contiene bismuto, aumentando al aumentar la temperatura de reflujo para el proceso. En general, se concluyó que el comportamiento de mojabilidad y mecánico de las aleaciones Sn-Zn y Sn-Zn-Bi estudiadas, puede ser comparable al de la aleación Sn-Pb a una temperatura de reflujo cercana a los 240°C, y que la aleación Sn-9Zn podría ser escogida como la gota en reemplazo de la aleación con plomo, según los resultados obtenidos.

Para el caso de la evaluación de las propiedades mecánicas se encuentra en varios estudios realizados que la respuesta a la tracción de las aleaciones Sn-Zn es excelente [4], [38], realizando una comparación incluso con una soldadura de zinc a la que se le agregó un porcentaje mínimo de bismuto, y explicando que (como fue anteriormente expuesto) al

agregar Bi a la aleación en un porcentaje no mayor al 3% en peso, se encuentra un aumento de la resistencia a la tracción cercano al 80%, y paralelamente la elongación de la muestra disminuye [46]. Para la velocidad de deformación de las muestras, Suganuma obtiene aplicando una correlación derivada de la ley de potencia, que la constante para el esfuerzo obtenida en las aleaciones de Sn-Zn-Bi es la mayor de las soldaduras libres de plomo evaluadas, llegando al 75% del comportamiento obtenido para las aleaciones Sn-Pb. Con respecto al comportamiento ante la fatiga se tienen también resultados satisfactorios, consiguiendo un comportamiento proporcional al número de ciclos sobre desplazamiento relativo obtenido para las muestras de soldadura con plomo. Sin embargo, se encuentra que en contraposición del comportamiento anterior, al agregar bismuto a las aleaciones Sn-Zn, se acelera el proceso de oxidación de la aleaciones, agilizando la formación de la fase ZnO en la superficie, lo que genera el crecimiento acelerado de *whiskers* como respuesta a la necesidad de liberar el esfuerzo generado en la capa externa de la unión. De esta forma se puede decir que es posible intensificar el comportamiento mecánico de las aleaciones de zinc mientras agregamos un porcentaje mínimo de bismuto a la aleación, pero al realizar lo anterior se altera el comportamiento químico de la misma, y la obtención de una unión de soldadura químicamente estable exigiría mayor precisión en el proceso de fabricación. Empero, es importante tener en cuenta que este fenómeno no se presenta solamente en las soldaduras que contiene Zn, también está presente en las aleaciones de soldadura Sn-Pb y Sn-Ag.

En la década de los 90 se realizaron ya varios estudios de las propiedades mecánicas de las aleaciones libres de plomo como Sn-Zn y Sn-Ag, gran parte de estos estudios realizados por McCormack y Jin, de los laboratorios de AT&T [47], [48]. Normalmente la mejora significativa de las propiedades mecánicas de las aleaciones de soldadura viene de la mano de adiciones de otros elementos químicos como bismuto, indio y plata. De estos estudios realizados se tiene un importante conocimiento de las excelentes propiedades de las aleaciones de soldadura de tres fases, lo cual ha llevado a la experimentación con las aleaciones de soldaduras libres de plomo más comunes y adiciones de elementos químicos. Posteriormente, en un interesante artículo Wu y asociados [28] realizan un estudio del

comportamiento mecánico y físico de diferentes aleaciones libres de plomo al adicionar pequeños porcentajes de tierras raras en su composición. Para el comportamiento obtenido en este estudio de las aleaciones Sn-Zn, los resultados obtenidos demuestran que al agregar Cerio y Lantano aumentan las propiedades a tracción y las características de mojabilidad, mientras disminuyen la ductilidad y la resistencia a la fluencia.

Finalmente, en el 2009 se llevó a cabo un estudio similar a fin de comparar el comportamiento de mojabilidad y propiedades mecánicas de aleaciones de Sn-Zn y Sn-Pb en su punto eutéctico. El estudio fue llevado a cabo por García y asociados [40], de la Universidad de Campinas, Brasil. Se analizaron aleaciones de estaño-zinc hipereutécticas, hipoeutécticas y en el eutéctico, a fin de encontrar las diferencias en el comportamiento de algunas propiedades mecánicas (resistencia última y elongación) y mojabilidad (área de esparcimiento y ángulo de contacto). Las superficies analizadas durante la fase experimental fueron acero de bajo carbono y cobre. Los resultados para el comportamiento de las aleaciones, cuando hay variaciones de temperaturas fueron similares al estudio anterior entre los 230° y 250°C. Los resultados para la mojabilidad de las aleaciones fueron comparados según una temperatura de sobrecalentamiento relativa, es decir, temperaturas por encima del punto de fusión; y se encontró que las variaciones en el ángulo de contacto son mínimas. Sin embargo, el factor distintivo del trabajo es el énfasis que se hace sobre cómo se puede controlar el comportamiento de las aleaciones de soldadura por medio de la manipulación de las variables de solidificación y controlando la tasa de enfriamiento; de forma que se puedan producir componentes que combinen razonablemente mojabilidad y propiedades mecánicas, y que pueda sustituir a las aleaciones plomo estaño durante la fabricación de artículos electrónicos.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 DISEÑO DEL DISPOSITIVO

Para definición del procedimiento experimental que se llevaría a cabo durante el trabajo de investigación, sería necesario primero que todo definir las condiciones de trabajo y el conocer el comportamiento que tendrían los equipos, sustratos y soldaduras durante el mismo; y posteriormente diseñar un sistema que permitiera la recolección de datos de forma óptima y confiable.

En primer lugar se realizó un estudio de la preparación de las superficies, mediante la experimentación y la evaluación de los acabados obtenidos tras diferentes tratamientos con abrasivos a diferentes granulometrías. Posteriormente se realizaron mediciones con el equipo de laboratorio en frío usando agua, estudiando así el comportamiento de la gota sobre la superficie.

Se seleccionó la aleación de soldadura Sn-Pb dentro de un grupo de soldaduras comerciales, y como criterio de evaluación se tuvo la cantidad de fundente en la aleación, el tipo de fundente, y la calidad de la gota obtenida sobre las superficies de estudio. Las aleaciones se sometieron a mediciones de ángulo de contacto sobre las superficies de latón y de aluminio, se estudió la influencia de la temperatura y del ambiente sobre la calidad de la gota desde el punto de vista experimental, a fin de comparar posteriormente la calidad de la misma bajo condiciones ambientales controladas. Así se analizó el comportamiento del sistema y los requerimientos del dispositivo a diseñar para la obtención de los datos de ángulo de contacto para aleaciones de soldadura en condiciones ambientales controladas.

Para el desarrollo del trabajo, se diseñó un sistema que garantizara una hermeticidad confiable de una cámara de calentamiento que permitiera el control de la atmosfera, de forma que la filtración de oxígeno a la atmósfera interna fuera mínima, para controlar de esta forma la influencia de las condiciones ambientales sobre la medida de ángulo de contacto entre el

metal y la soldadura de estudio. El montaje fue diseñado usando SolidEdge® y se encuentra esbozado en la Ilustración 9.

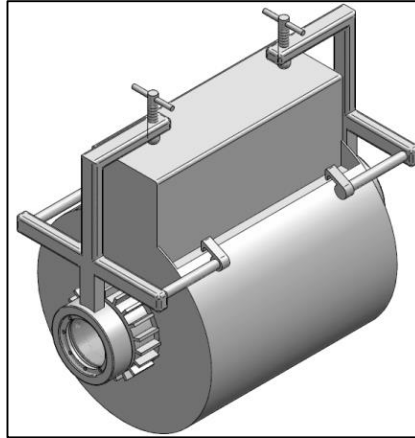


Ilustración 9. Diseño en CAD del montaje usado.

El diseño preliminar del dispositivo se realizó teniendo en cuenta condiciones ambientales, adaptabilidad al equipo de laboratorio disponible para la experimentación, condiciones de carga y temperatura extremas, y finalmente una optimización tanto de espacio como de costos. Posterior al diseño preliminar se esquematizó el dispositivo en SolidEdge®. Finalmente, el equipo fue fabricado usando aleaciones de aluminio y duraluminio. La cámara de medición está compuesta de un tubo de cuarzo, lo que asegura la estabilidad del sistema a altas temperaturas, y el horno eléctrico fue proporcionado por el laboratorio de la universidad.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y MATERIALES

La caracterización del nivel de mojado entre dos sistemas, se realiza a partir de la medición del ángulo de contacto [7]. A nivel experimental y para el caso de interés, se utilizó el método de la gota en reposo usando un tensiómetro óptico OCA-15 Plus, integrado a un software de digitalización y video SCA-20 de Dataphysics®. El montaje completo del equipo usado durante el proceso experimental se presenta en la Ilustración 10.



Ilustración 10. Montaje completo usado durante la experimentación.

Sustratos de aleaciones comerciales, aluminio 1100 y latón C385, con áreas aproximadas a 3 cm x 2 cm, fueron sometidos a un proceso de preparación superficial usando la secuencia de papel abrasivo con granulometría 240, 320, 400 y 600; y finalmente un acabado final usando Alúmina (Al_2O_3) de 5 micras sobre paño. Posteriormente, los sustratos fueron limpiados usando Acetona antes de ser sometidos a las mediciones de ángulo de contacto, con las diferentes aleaciones de soldadura a altas temperaturas. La preparación de la superficie permitió alcanzar un acabado especular y homogéneo, antes del proceso posterior de caracterización del ángulo de contacto. Este procedimiento fue realizado sobre todos los sustratos.

Se prepararon tres aleaciones de Sn-Zn, una hipoeutéctica, una eutéctica y una hipereutéctica; cuya composición se lista en la Tabla 2. Las aleaciones fueron preparadas en un horno eléctrico a condiciones atmosféricas, con una agitación continua para lograr una completa homogenización de cada una de las aleaciones Sn-Zn formuladas, y que pueden ser identificadas a partir del diagrama de fases en la Ilustración 11.

Tabla 2. Composición de las aleaciones Sn-Zn estudiadas.

Aleación	Composición
Eutéctica	Sn-9wt.%Zn
Hipereutéctica	Sn-14wt.%Zn
Hipoeutéctica	Sn-4wt.%Zn

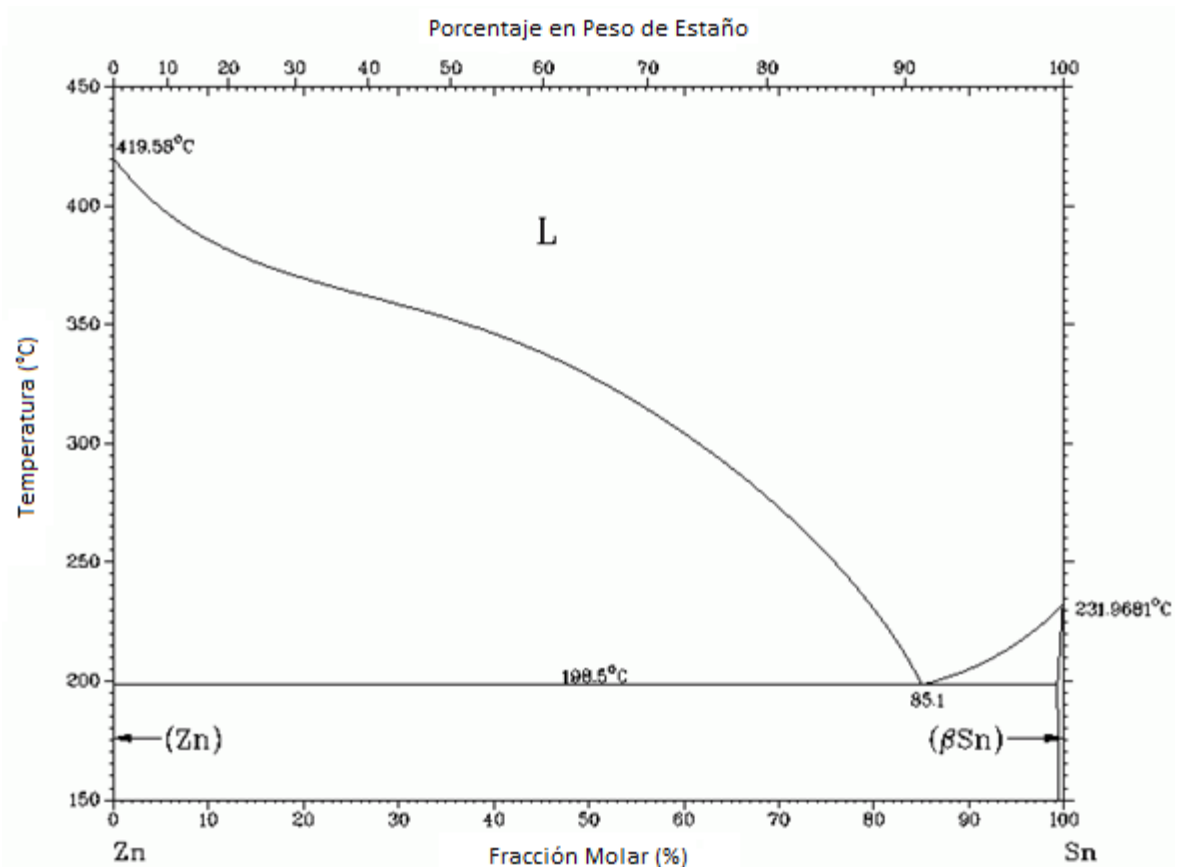


Ilustración 11. Diagrama de fases de la aleación Sn-Zn [49].

3.3 CONDICIONES DE LOS ENSAYOS

Para las mediciones experimentales del ángulo de contacto entre las soldaduras y los sustratos se tomaron muestras de 0.2 g y se mantuvo constante el “sobrecalentamiento” (temperatura por encima del punto de fusión de cada una de las soldaduras), para lo cual se usaron temperaturas de 80°C sobre la temperatura en el eutéctico o sobre la línea de *liquidus*, según

correspondiese. De esta forma, teniendo en cuenta la información expuesta en el numeral 2.2.2, se puede afirmar que los resultados obtenidos en este estudio, no se encontrarían significativamente influenciados por variaciones de temperatura, dado que los valores estudiados (con referencia a la temperatura de liquidus de cada una de las muestras) se encontrarían en el límite de trabajo expuesto en [30].

El control de la atmosfera se realizó usando Argón, a un el flujo de 5 ml/s, esto con el fin de evitar la formación excesiva de óxidos en la superficie de la gota y formar así una gota homogénea en cada uno de los ensayos realizados. El gas fue seleccionado dadas las características inertes del gas superior a las de otros gases como el nitrógeno, lo que aseguraría una confiabilidad mayor en el proceso experimental.



Ilustración 12. Recinto sellado de medición con atmósfera controlada.

En todos los casos estudiados, tanto para la aleación Sn-Pb, como para las diferentes aleaciones Sn-Zn se utilizó Fundente de Colofonia disponible comercialmente. En el caso de la aleación comercial Sn-Pb, la cantidad de fundente era cercana al 2%. Esta misma cantidad aproximada de fundente se mantuvo para las aleaciones de Sn-Zn fabricadas, a fin de tener un material con características similares a las soldaduras comerciales, para la realización del análisis comparativo. Se tomaron 8 mediciones para cada aleación sobre cada uno de los dos sustratos obteniendo un promedio del ángulo para cada uno de los casos.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 FORMACIÓN DE LA GOTA

El ángulo de contacto, como ha sido expuesto anteriormente, es indispensable en los procesos de soldadura blanda, y define la afinidad de la aleación con el sustrato sobre el cual se realiza el proceso de fabricación. La unión en la soldadura es en gran manera dependiente de la mojabilidad de la aleación sobre el sustrato, así como también sus propiedades mecánicas [3]. De esta forma, durante el proceso experimental fue indispensable el estudio del proceso de formación de la gota de soldadura desde forma de alambre como se consigue comercialmente. Para esto, se depositó una masa anteriormente descrita de soldadura sobre el sustrato y se sometió a calentamiento dentro de la capsula herméticamente sellada. Se debió también, durante todo el proceso experimental, tener en cuenta que el sustrato se encontrara totalmente a nivel horizontal. Para que los procesos de histéresis no afectaran sustancialmente las mediciones de ángulo de contacto. Una ilustración del proceso de formación de la gota se encuentra expuesto en la Ilustración 13.

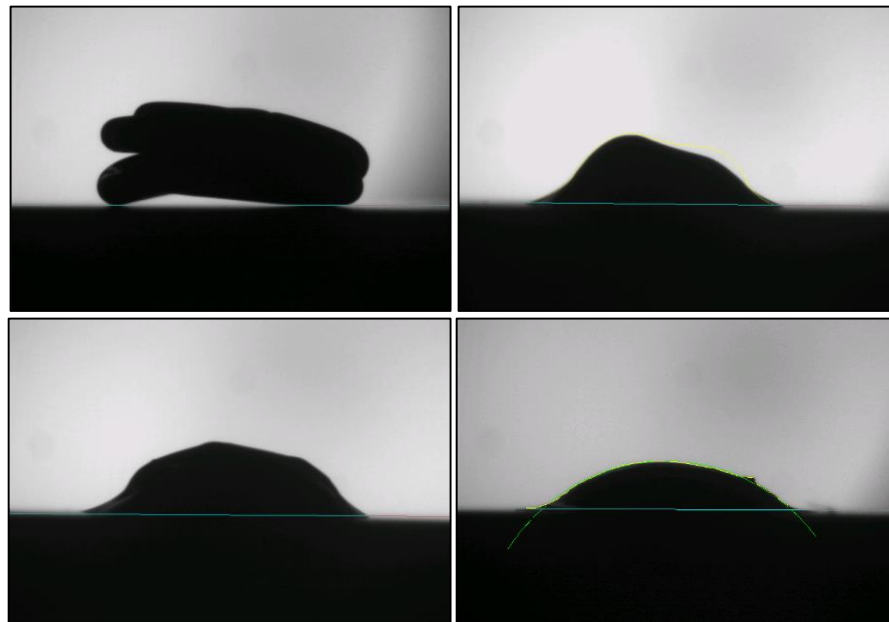


Ilustración 13. Secuencia del proceso de formación de la gota en el tiempo

4.2 MEDICIONES TRANSITORIAS

De manera preliminar, se realizaron tres ensayos usando la función *Dynamic Tracking* (medición transitoria), para calcular el tiempo en que el ángulo de contacto llega a un estado estable, estas medidas fueron obtenidas a 300°C en una atmósfera controlada de Argón, utilizando como referentes 0.2g de la aleación eutéctica de Sn-Zn (Sn-9wt. %Zn) y de una soldadura de plomo comercial (Sn-40wt. %Pb), medidas sobre los sustratos de Aluminio y Latón.

Se determinó el tiempo de fusión de la aleación y el tiempo de formación de una gota con un ángulo de contacto estable. El registro de la medición del ángulo de contacto para cada una de las superficies y aleaciones se determinó luego de que la gota alcanza un estado semiestacionario.

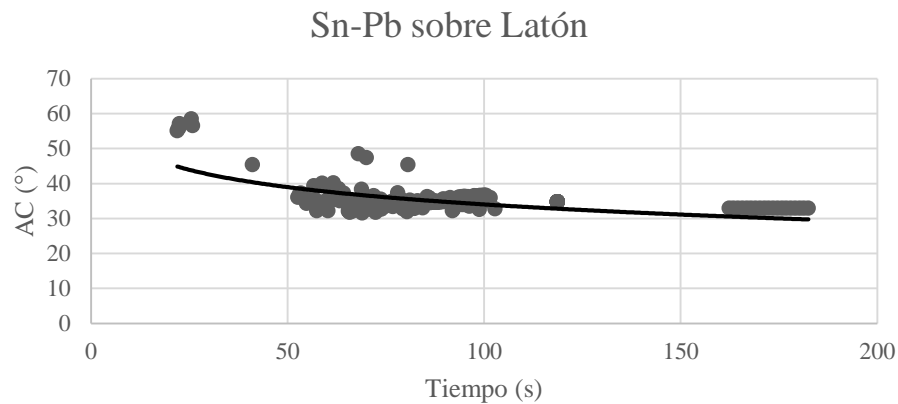


Ilustración 14. Fenómeno transitorio de Sn-Pb sobre Latón.

En las Ilustración 14 a la Ilustración 17 se expone el comportamiento y los resultados obtenidos durante la estabilización o formación de la gota, donde se observa el cambio del valor del ángulo de contacto en el tiempo durante el proceso experimental. La gota alcanza un ángulo de contacto estable, lo que se podría plantear como un estado semiestacionario del sistema en estudio.

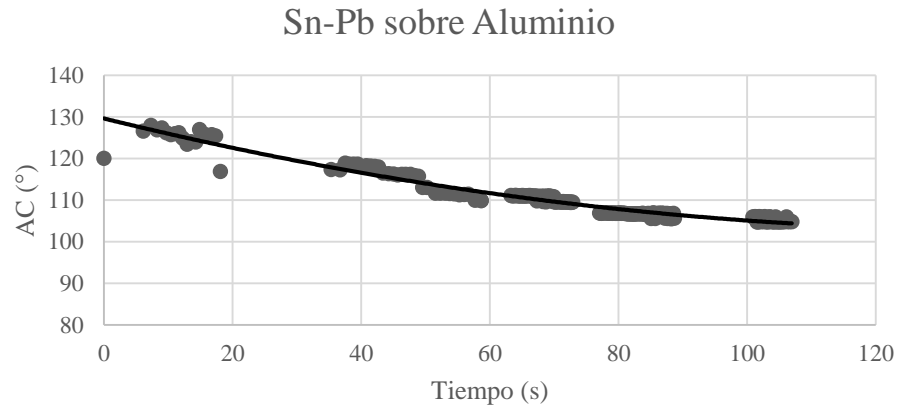


Ilustración 15. Fenómeno transitorio de Sn-Pb sobre Aluminio.

La función *Dynamic Tracking* permite al usuario obtener datos de ángulo de contacto medidos automáticamente y de forma periódica por el sistema. Esta información permitió realizar una gráfica de los puntos y un ajuste a curvas, encontrando un comportamiento exponencial en las curvas de las superficies de Latón, mientras que las curvas de las mediciones sobre Aluminio mostraron un mejor ajuste con una interpolación polinómica de segundo orden.

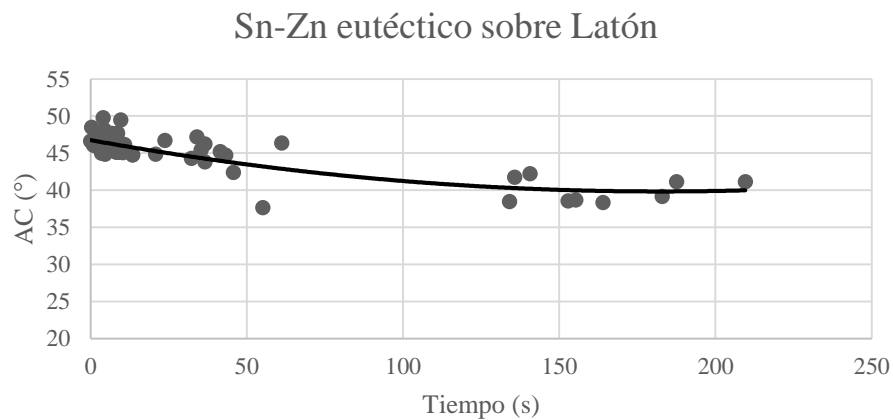


Ilustración 16. Fenómeno transitorio de Sn-Zn eutéctico sobre Latón.

Como se puede evidenciar en las gráficas de los puntos, dada la irregularidad de la gota durante el proceso de formación de la misma, en la etapa principal de la formación de la gota se encuentran importantes desviaciones con respecto a la línea de tendencia, de esta forma, podríamos afirmar que se identifica mediante esta función una gota óptima, cuando la desviación entre las mediciones obtenidas y las líneas de tendencias es mínima; caso que aplica para las gráficas obtenidas.

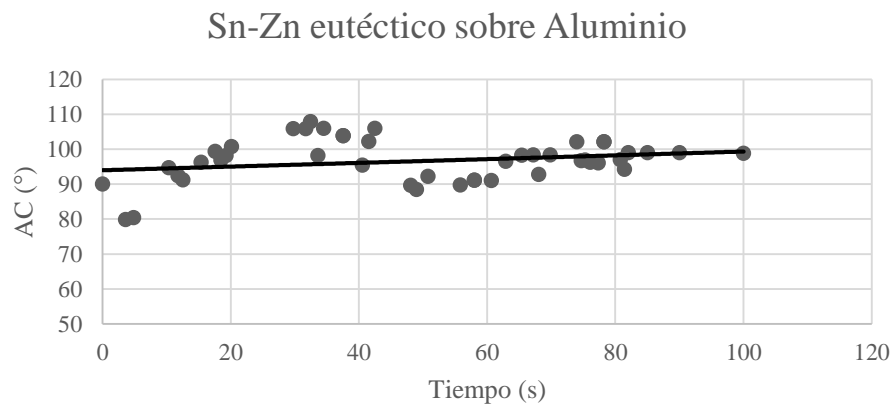


Ilustración 17. Fenómeno transitorio de Sn-Zn eutéctico sobre Aluminio.

Como se encuentra en la Tabla 3, el tiempo de estabilización del ángulo de contacto o punto semiestacionario varía considerablemente principalmente para soldadura Sn-Zn sobre latón, lo que podría significar un mayor gasto energético al momento de realizar el proceso de fabricación de componentes con este tipo de soldaduras y este tipo de sustratos.

Tabla 3. Tiempo en el estacionario para las mediciones experimentales.

Aleación/Sustrato	Latón	Aluminio
Sn-Pb	100 s	90 s
Sn-Zn eutéctica	170 s	80 s

Analizando este fenómeno se deben tener en cuenta dos cosas: primero que la afinidad entre aleaciones de Sn-Zn con sustratos de cobre a alta temperatura y con altos niveles de humedad es baja, y también la influencia de la alta reactividad del zinc durante el proceso de formación

de la gota [3]. Esto podría explicar el incremento en el tiempo de estabilización de la gota de Sn-Zn sobre latón. Para el caso del aluminio, por el contrario, la diferencia entre los tiempos de estabilización de la gota fue aproximadamente el 15%.



Ilustración 18. Vista dentro del recinto sellado.

4.3 MEDICIONES DE ÁNGULO DE CONTACTO

A partir de las diferentes mediciones experimentales realizadas se obtuvo un promedio para cada uno de los casos evaluados, este promedio junto con la desviación media del mismo se lista en la Tabla 4 y la Tabla 5. Por otra parte, los resultados para los promedios obtenidos del ángulo de contacto de las diferentes aleaciones sobre el sustrato de latón y aluminio expuestos en un histograma para efectos de comparación, se encuentran expuestos en la Ilustración 19.

Tabla 4. Datos obtenidos sobre Latón

Aleación	Promedio (°)	Desviación Media (°)
Sn-Pb	37.1	0.37
Sn-Zn Hipoeutéctica	30.6	0.71
Sn-Zn Eutéctica	41.1	0.82
Sn-Zn Hipereutéctica	33.4	0.96

Tabla 5. Datos obtenidos sobre Aluminio

Aleación	Promedio (°)	Desviación Media (°)
Sn-Pb	105.2	1.37
Sn-Zn Hipoeutética	103.3	0.57
Sn-Zn Eutética	89.4	0.56
Sn-Zn Hipereutética	82.6	1.12

Para los resultados obtenidos, se encontró que las aleaciones hipoeutéticas e hipereutéticas depositadas sobre las superficies de latón presentan un ángulo de contacto inferior en comparación con la aleación Sn-Pb, lo cual nos indica que la humectabilidad de dichas aleación es óptima para la superficie mencionada, y aunque las aleaciones eutéticas presentan valores de ángulo de contacto superiores en un 10%, los resultados obtenidos son también satisfactorios.

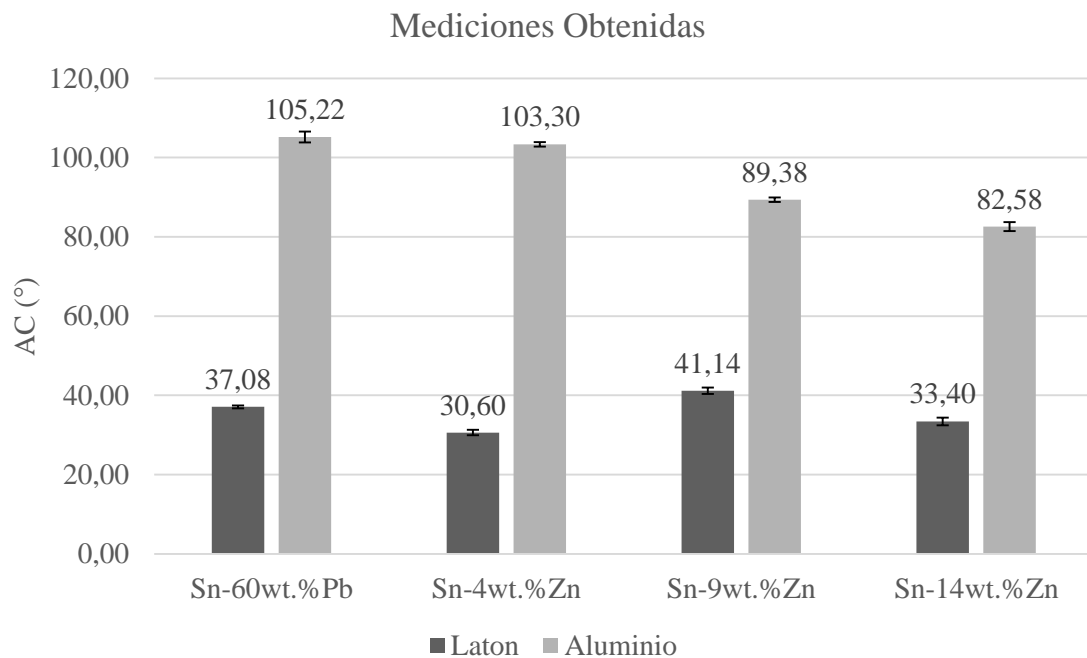


Ilustración 19. Relación de promedios y desviaciones obtenidas para las mediciones en latón y en aluminio.

Por otra parte se observa que no hay relación evidente para la superficie de latón, entre el ángulo de contacto y la cantidad de zinc presente en la aleación, lo cual puede ser dado la alta reactividad de zinc y el comportamiento irregular que puede ocasionar al reaccionar con este sustrato.

4.4 CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES DE LAS MUESTRAS

Un punto importante que se evaluó de forma cualitativa durante la experimentación fue las características físicas de la gota durante el proceso de formación y tras el enfriamiento de la misma. Es un factor indispensable a estudiar dado que influencia el comportamiento mecánico de la unión y evidencia el comportamiento químico que presenta la soldadura durante el proceso de fabricación.



Ilustración 20. Gotas formadas con aleación hipoeutéctica (izquierda) e hipereutéctica (derecha).

Realizando el procedimiento experimental, se encontró que la aleación de Sn-Zn hipereutéctica, presentó mayor formación de compuestos superficiales, y que en el caso de la soldadura hipoeutéctica y eutéctica fue todo lo contrario, como se evidencia en la Ilustración 20; para este último caso la forma de la gota fue más uniforme, y la capa de compuestos sobre la gota fue mínima.

La variación de los valores en el ángulo de contacto indica que la cantidad de zinc presente en la aleación, y la variación del ángulo de contacto en función de esta, es un tema de estudio

interesante, que probablemente podría estar más ligado al comportamiento químico y la reactividad de los compuestos, que a las propiedades superficiales de los mismos.

Como es sabido, en las mediciones realizadas se obtuvo que las soldaduras de alto contenido de Zinc muestran un mayor grado de formación de compuestos en la superficie, probablemente óxidos y otros compuestos que se generan a pesar del control de la atmósfera durante el proceso de formación de la gota, incluso a pesar de que se usó un gas totalmente inerte (lo cual, de nuevo, da noción de la alta reactividad de las aleaciones a medida que incrementa el porcentaje de Zn en la aleación).

4.5 APLICACIÓN DE MODELOS TEÓRICOS

Para realizar un estudio del comportamiento en términos de la mojabilidad de una aleación en su interacción con un sustrato y un ambiente gaseoso es importante tener en cuenta modelos de cálculo como al ecuación de Young-Dupree, que nos permiten acercarnos en términos cuantitativos al fenómeno, y optimizar los factores de influencia, de forma que se beneficie la calidad del proceso de fabricación.

Teniendo en cuenta el modelo de Young-Dupree (expuesto en 2.1.3.3) como base preliminar para la evaluación de la mojabilidad de soldaduras, se deduce que se presentarán diferentes valores de ángulo de contacto según las fuerzas S/L y L/L. Para el primer caso en estudio, en el cual el cual se analizan aleaciones de soldadura altamente reactivas sobre superficies de latón en atmósferas inertes, se tiene una alta interacción S/L y L/L, lo que llevará, como ha sido explicado anteriormente, a obtener valores cercanos a $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$. Para el caso de las mediciones llevadas a cabo sobre la aleación de aluminio las interacciones S/L serán más débiles, lo cual causará que los ángulos de contacto que se obtengan sean mayores, alrededor de los 90° . Lo anterior se encuentra evidenciado en la información obtenida durante el procedimiento experimental expuesta en el numeral 4.3.

De esta forma, si se extrae la información acerca de las tensiones superficiales de los componentes de cada una de las aleaciones Sn-Pb y Sn-Zn, presentes en la tabla de

mediciones experimentales de tensión superficial para los metales más comunes en su estado puro (ANEXO 3) [15], teniendo la composición de cada una de las aleaciones y la temperatura de trabajo para las mismas, se obtendrá un comparativo para las tensiones superficiales de cada una de las aleaciones que han sido analizadas como sustituto de la aleación Sn-Pb y esta misma.

Tabla 6. Propiedades de las aleaciones para el cálculo de γ

Aleación (wt. %)	Tipo	Temperatura del análisis(K)	Fracción Molar [Sn] (%) Aprox.	Fracción Molar [Zn] (%) Aprox.
Sn-4Zn	Hipoeutética	563.00	0.92	0.08
Sn-9Zn	Eutética	551.50	0.85	0.15
Sn-14Zn	Hipereutética	593.00	0.77	0.23

Tabla 7. γ teórica según el modelo de Butler para las tres aleaciones Sn-Zn.

Aleación (wt. %)	Tensión Superficial [Sn] (mN/m)	Tensión Superficial [Zn] (mN/m)	Tensión Superficial de la aleación (mN/m)
Sn-4Zn	563.62	834.00	579.38
Sn-9Zn	564.89	836.88	580.47
Sn-14Zn	560.32	826.50	575.55

Como el análisis comparativo entre las aleaciones Sn-Pb y Sn-Zn es menester a lo largo de este trabajo, se realizó el mismo proceso de cálculo para la tensión superficial teórica de la aleación eutética usando un modelo de cálculo similar descrito por Moser [19], usando la información para Sn-Pb del ANEXO 3. Para esta aleación se obtuvo la Tabla 9.

Tabla 8. Propiedades de la aleación Sn-Pb para el cálculo de γ

Aleación	Tipo	Temperatura del análisis(K)	Fracción Molar [Sn] (%) Aprox.	Fracción Molar [Pb] (%) Aprox.
Sn-Pb	Eutéctica	536.00	0.76	0.25

Como se puede observar en la Tabla 9, el factor diferencial con respecto a los resultados obtenidos para la tensión superficial teórica de las soldaduras comparadas en el presente trabajo es altamente influenciado dadas las características de mojabilidad propias del plomo y del zinc en ambas aleaciones. Para este caso, al presentar el Pb un valor de γ menor, la humectabilidad para esta aleación será mayor.

Tabla 9. γ teórica según el modelo de Butler para Sn-Pb.

Aleación	Tensión Superficial [Sn] (mN/m)	Tensión Superficial [Pb] (mN/m)	Tensión Superficial de la aleación (mN/m)
Sn-Pb	566.59	469.15	503.38

Como fue expuesto, la ecuación de Young Dupree es una de las herramientas más importantes en el análisis de mojabilidad de diferentes tipos de sistemas a alta temperatura, dado que presenta una aproximación del trabajo de adhesión que realiza la partícula. De esta forma, con los datos recopilados para el ángulo de contacto de las diferentes aleaciones, que se encuentran expuestos en el CAPÍTULO 4 del presente trabajo, y con el análisis anterior a partir de la ecuación de Butler, en el cual se obtuvo la tensión superficial; se modificó la Ecuación 7 correspondiente al modelo de Young-Dupree, para encontrar el **trabajo de adhesión** realizado por cada una de las muestras sobre el sustrato:

$$W_a^0 = \gamma(\cos \theta + 1) \quad \text{Ecuación 12}$$

Este término ayudó a calificar cuantitativamente la calidad de la unión sobre la superficie en que fue realizada y bajo las condiciones en que se presentó el trabajo de experimentación,

teniendo en cuenta la similitud de las condiciones de las muestras y de la atmosfera durante el mismo; es decir el *desempeño* de todo el sistema trabajado. Es importante recordar que el análisis se realiza bajo las asunciones de Butler expuestas anteriormente.

La Tabla 10 y Tabla 11 listan los resultados obtenidos para ambas superficies, sin embargo dada la baja calidad de la unión sobre los sustratos de aluminio es claro que las aleaciones Sn-Zn, al igual que las aleaciones Sn-Pb **NO** brindan una unión efectiva en este sistema.

Tabla 10. Trabajo de adhesión en sustratos de Latón.

<i>Ensayos sobre Latón</i>				
Aleación (wt. %)	γ (mN/m)	θ_{prom} (°)	W^0 (J/m ²)	%
Sn-Pb	503,38	37,1	0,90	
Sn-4Zn	579,38	30,6	1,08	120%
Sn-9Zn	580,47	41,1	1,02	113%
Sn-14Zn	575,55	33,4	1,06	117%

Con este análisis realizado a partir de los modelos de Butler y Young-Dupree, se tiene una herramienta de bastante utilidad en términos comparativos-cuantitativos, dado que como se detalla en la Tabla 10 y Tabla 11, hay un término que cobija todo el proceso de soldadura y que da razón de la mojabilidad de las aleaciones Sn-Zn en las diferentes composiciones estudiadas en comparación con la aleación Sn-Pb.

Tabla 11. Trabajo de adhesión en sustratos de Aluminio.

<i>Ensayos sobre Latón</i>				
Aleación (wt. %)	γ (mN/m)	θ_{prom} (°)	W^0 (mJ/m ²)	%
Sn-Pb	503,38	105,2	0,37	
Sn-4Zn	579,38	103,3	0,45	121%
Sn-9Zn	580,47	89,4	0,59	159%
Sn-14Zn	575,55	82,6	0,65	176%

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

5.1 FORMACIÓN DE COMPUESTOS

Aunque dada la alta reactividad del zinc se pueden obtener comportamientos diferentes en la interacción de la aleación con el sustrato, se tomará como referencia el estudio realizado por Suganuma y Kim [4], para explicar el comportamiento químico del proceso de soldadura usando Sn-Zn, el cual consta de diferentes fases: en primer lugar la reacción del Zn se hace a nivel interfacial, obteniendo sobre sustratos de cobre diferentes capas de compuestos de cobre y zinc, los cuales serán inestables a temperaturas superiores a 150°C (factores que coinciden en gran manera con la metodología usada en el presente trabajo). La difusión del Zn (causada por la alta difusividad del Zn en matrices de estaño) desde la aleación de soldadura hacia la interfaz Cu-Zn y asimismo del cobre hacia la matriz de Sn, ocasiona la creación de compuestos Cu_5Zn_8 y Cu_6Sn_5 ; posteriormente se presentará la difusión del estaño sobre la matriz de cobre, formando la unión de soldadura. Durante la reacción y la alta difusión de partículas se evidencia un fenómeno importante y que definitivamente influirá en la calidad y las propiedades de la unión: la formación de vacíos de Kirkendall. El efecto Kirkendall se genera por diferencias en la velocidad de difusión de partículas entre dos sustancias que reaccionan, esto cuando hay difusión por vacantes; de forma que se generan vacíos en aquella sustancia con mayor constante de difusividad [50].

Los vacíos de Kirkendall se generan entre la aleación de soldadura y la capa Cu-Zn (Ilustración 21), y son causados dada la alta tasa de migración de átomos de zinc dentro de la matriz de cobre-zinc. Es natural que durante la formación de una unión de soldadura, un manejo irregular de temperaturas genere mayor presencia de vacíos, dado que la difusión de las partículas es dependiente de la temperatura de trabajo; añadiendo así otro factor importante a vigilar al momento de usar aleaciones de soldadura con Zn. A fin de no degradar la calidad de la unión, es importante “conocer las características y el comportamiento de esta interfaz, y el tratamiento requerido para aplicaciones a alta temperatura de esta aleación de soldadura”.

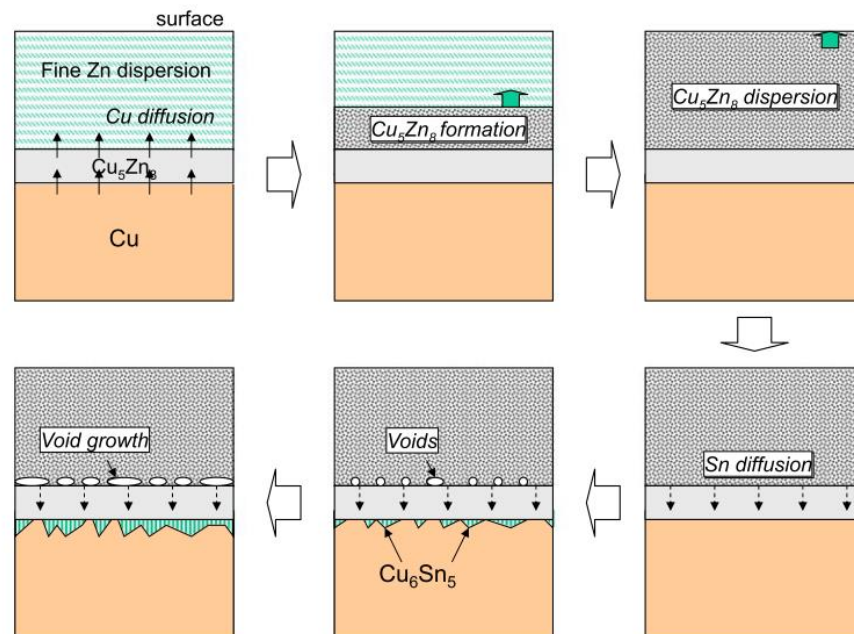


Ilustración 21. Comportamiento de la aleación sobre sustratos de cobre. Tomada de [4].

De la misma forma como hay difusión de átomos de Zn hacia la interfaz Cu-Zn, se generará oxidación del Zn dado el movimiento de partículas hacia la superficie causado por las elevadas temperaturas. Y aunque no es claro el comportamiento en la degradación de esta soldadura, dado el procedimiento experimental llevado a cabo, se puede hablar de corrosión galvánica en la superficie, representada en la generación ocasional de bigotes, que representan partículas de estaño (“whiskers”) en la superficie de la aleación (Ilustración 22), y que a su vez podrían generar irregularidades tanto en la calidad de la unión como en las características mecánicas de la misma.

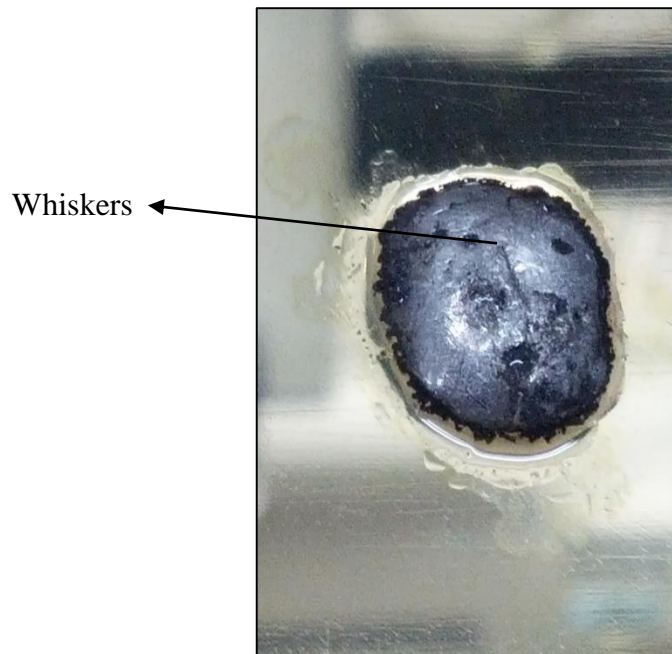


Ilustración 22. Superficie de la gota.

5.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

El análisis de las propiedades mecánicas que presenten las aleaciones de soldadura es sin duda uno de los pasos más importantes previo a la implementación. Es por esto que grandes esfuerzos se han realizado en la literatura con el fin de definir cómo la transición de una aleación de soldadura mecánicamente estable y conocida (Sn-Pb), a una nueva aleación de soldadura afectará tanto las propiedades mecánicas de la soldadura como el desempeño del ensamble.

Al momento de analizar las características mecánicas de la unión es importante tener en cuenta factores de gran influencia como lo son: la temperatura de trabajo, el tipo de proceso de fabricación (soldadura) que se realizará, los materiales y la atmósfera circundante, el fundente usado, las características químicas de la reacción, velocidad de enfriamiento, y sin duda también influirá la calidad del procedimiento aplicado.

Diferentes ensayos mecánicos se han implementado a fin de evaluar la calidad de la aleación de Sn-Zn, en comparación con aleaciones Sn-Pb en procesos de soldadura. La mayoría de estos ensayos requiere una importante infraestructura y equipos, a fin de obtener resultados exactos, dada la ligera diferencia entre las propiedades de este tipo de aleaciones. Las principales pruebas realizadas sobre estas aleaciones de soldadura son: microdureza, tracción (tensión), velocidad de deformación elástica y plástica, resistencia a la fatiga, resistencia a la fluencia, entre otras [3], [4], [40].

Lo anterior daría a pensar que podría ser una efectiva solución para las grandes compañías de dispositivos electrónicos apostar por la investigación de las propiedades de las aleaciones de soldadura, tanto mecánicas como físicas y químicas, que requieren los productos manufacturados, de esta forma se optimiza la calidad del proceso de fabricación, y se puede apuntar hacia la sustitución parcial de las aleaciones de soldadura con plomo.

5.3 MOJABILIDAD DE LAS ALEACIONES

Para un análisis de los resultados obtenidos sobre las superficies de aluminio, es preciso decir que la calidad de la unión que presentó la gota sobre el sustrato fue mínima, lo que evidencia la relación directa entre bajos valores de ángulo de contacto y uniones mecánicamente eficientes (como en el caso del latón). Para este caso, al contrario del latón, la relación entre cantidad de Zn presente en la aleación y la mojabilidad de la aleación es inversamente proporcional, incluso al punto de describir un comportamiento cercano a una línea recta con pendiente negativa, como se evidencia en la Ilustración 19, y es esperado que si la aleación hipereutéctica presenta una cantidad superior a la cantidad de Zn estudiada, el comportamiento seguirá marcando esta tendencia. Todas las aleaciones de zinc estudiadas sobre la superficie de aluminio presentaron un valor de ángulo de contacto inferior al obtenido para las aleaciones Sn-Pb, lo cual muestra que definitivamente las aleaciones Sn-Zn serían más eficientes como aleaciones de soldadura blanda sobre superficies de aluminio, pero a pesar de esto la calidad de la unión sería baja.

Es importante también mencionar, que como se evidencia en la Ilustración 19, la precisión de las mediciones tomadas da fe de la confiabilidad de los resultados obtenidos para el ángulo de contacto sobre ambos sustratos estudiados.

A partir de la Tabla 7 se puede extraer un análisis interesante acerca del comportamiento obtenido durante el proceso experimental para las tres aleaciones de soldadura de diferente composición de Sn-Zn examinadas en este proyecto. Es claro dados los datos de aquí expuestos, que en términos de mojabilidad las tres aleaciones presentarán comportamientos similares, dado que las magnitudes teóricas de la tensión superficial, obtenidas de modelo de Butler, no presentan variaciones si quiera superiores al 1% entre ellas. Sin embargo, se pueden señalar dos aspectos significativos. Dados los valores para γ se evidencia que hay una mayor diferencia entre la aleación hipereutéctica con respecto a la eutéctica y a la hipoeutéctica. Aunque la diferencia es mínima en términos cuantitativos, se ha evidenciado a lo largo del trabajo que al llevarlas al proceso experimental estas diferencias se ven influenciadas por los aspectos propios de la metodología. Para el caso de la mojabilidad sobre aluminio sin embargo se presentó un comportamiento similar al descrito en la Tabla 7 (Ilustración 19), en que la humectabilidad sobre dicha superficie fue mayor para la aleación hipereutéctica. Otro aspecto a resaltar es cómo a pesar de lo expuesto en el numeral 2.2.2 la diferencia entre las temperaturas de las tres muestras pudo influir significativamente en el cálculo de la tensión superficial de la aleación, de forma que la amplia diferencia entre la temperatura del experimento para la muestra hipereutéctica puede ser razón de una alteración mínima en la tensión superficial.

También se ha realizado el ejercicio de extrapolar la información expuesta en la Tabla 7, de forma que se pueda obtener una curva teórica para la tensión superficial de la aleación Sn-Zn, manteniendo las mismas condiciones de sobrecalentamiento y variando la composición de las aleaciones. Este comportamiento se encuentra graficado en la Ilustración 23, y la tabla completa para los puntos tomados en la extrapolación de la gráfica se lista en el ANEXO 4.

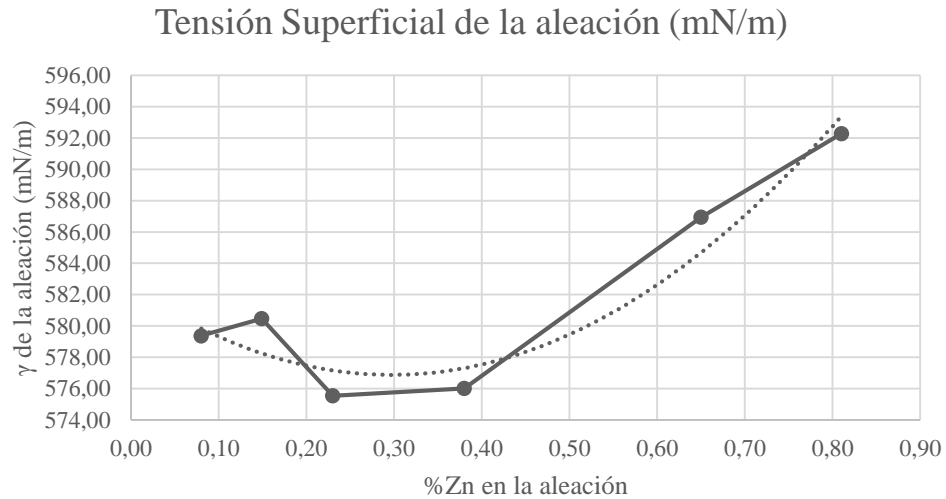


Ilustración 23. Variación γ vs. Composición de la aleación.

Al analizar la gráfica se puede detectar un comportamiento similar al de una parábola para los valores de γ , de forma que en comparación con la Ilustración 11 y las características de composición analizadas, se puede decir que la menor tensión superficial se presenta cerca del cambio de curvatura en la línea de liquidus para una aleación hipereutéctica, debido a que al parecer la tendencia con respecto a las aleaciones hipoeutécticas es que la magnitud de γ disminuya a medida disminuye la fracción Zn la aleación de soldadura Sn-Zn.

Puesto que las mediciones se realizaron en atmosfera controlada, es preciso tener en cuenta que la variación de las mediciones de ángulo de contacto (y por lo tanto de tensión superficial) realizadas con respecto a los valores reportados en la literatura se encuentra reportada en atmosferas de aire. Para un estudio de lo anterior se analizó un la investigación llevada a cabo por Saravanan y asociados [51], en la cual se ensaya la influencia de la atmósfera y de la temperatura (largos rangos) sobre las medidas de la tensión superficial de una muestra de un metal fundido sobre un sustrato. En este caso se estudian las atmósferas de argón y nitrógeno, y tras mediciones experimentales realizadas, se encuentra que las pendientes que definen el comportamiento de la tensión superficial con respecto a la temperatura de análisis son -0.15 y -0.19, respectivamente; concluyendo que el comportamiento de la muestra en estos dos

gases será muy similar dada la mínima variación de la pendiente en un rango de temperaturas superior a los 200°C. De esta forma se podría asegurar que el comportamiento de las muestras en estos dos gases será congruentes dado sus carácter inerte y la mínima reacción que se presenta sobre la superficie de las gotas de Sn-Zn y de Sn-Pb en el proceso experimental.

En la literatura se encuentran valores aproximados, tomados experimentalmente para la tensión superficial de una aleación eutéctica Sn-9Zn como la tomada en el presente trabajo [38]. Esta fue realizada usando el mismo método, y en un ambiente inerte. La temperatura de la medición fue 50°C sobre la temperatura de liquidus. Este dato podría ser significativo en términos comparativos, teniendo en cuenta que los resultados obtenidos durante la experimentación arrojaron que la aleación eutéctica presentó ángulos de contacto superiores en un 10% a los ángulos obtenidos para la aleación Sn-Pb, y que la influencia de la diferencia entre las temperaturas de “sobrecalentamiento” de las aleaciones eutécticas en la tensión superficial de las mismas podría ser despreciable.

$$\gamma_{Sn-Zn} = 487 \text{ mN/m}$$

Para la mayoría de las aleaciones estudiadas, la tensión superficial sobre atmósferas inertes presentó un valor mayor de tensión superficial [38]; esto es debido a que la formación de óxidos sobre la muestra “disminuye la energía libre de la superficie del líquido”. Sin embargo hay que resaltar que para el caso de la aleación Sn-Zn se presentó un comportamiento contrario, en el cual la medición en aire fue cerca un 6% mayor a la medición en nitrógeno. Este tipo de variaciones es común en procesos de fabricación en que la cantidad de variables que influencia la medición es importante, y es aquí es donde se evidencia la inestabilidad de las mediciones de mojabilidad y tensión superficial en este tipo de aleaciones.

Como se evidencia en la Tabla 10 y Tabla 11, para todos los casos estudiados dada la una menor tensión superficial de la aleación con plomo, el trabajo de adhesión realizado en el sistema es significativamente menor, por lo que ninguna de las muestras analizadas mejoraría las características de humectabilidad de la aleación Sn-Pb, al menos sobre las superficies de latón y aluminio. Se puede observar que las magnitudes para las aleaciones libres de plomo

presentarían una capacidad de humectabilidad de cerca del 90% de la humectabilidad de la aleación Sn-Pb sobre sustratos de latón. Al observar que el trabajo realizado por las gotas de las aleaciones Sn-Zn disminuye, la capacidad de humectabilidad será menor, y es aquí donde la energía proporcionada (en forma de calor) durante el proceso de aplicación juega un papel importante, dado que sumaría energía al sistema y permitiría un desempeño mayor en el proceso de fabricación, sin embargo es aquí donde los sobrecostos energéticos y la integridad de los productos entrarían en juego.

Un punto importante a destacar es que se evidenció a partir de cálculos matemáticos la razón por la cual las aleaciones con zinc, en especial la aleación eutéctica (Sn-9Zn), **presentan un desempeño destacable** como aleaciones de soldadura blanda, y que su comportamiento es similar al de las aleaciones Sn-Pb en términos de mojabilidad. Son sin duda una opción a considerar bajo todo punto de vista a fin de lograr una sustitución de las soldaduras con plomo, sin embargo es importante ampliar la información de los fenómenos tanto químicos como físicos y termodinámicos que se presentarían durante el proceso de soldadura.

Planteado lo anterior, la solución, en aras de conseguir un mejor desempeño de la aleación de soldadura, es realizar investigaciones exhaustivas que permitan encontrar composiciones de esta aleación y elementos que permitan mejorar las propiedades de interés de la misma, como ha sido ampliamente encontrado en la literatura [3], [12], [28], [48], [52]–[55].

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Las diferencias entre los resultados obtenidos para los dos sustratos analizados son significativas, y el comportamiento de mojabilidad de las aleaciones analizadas sobre aluminio y latón, puede variar dada la alteración de diferentes factores como la temperatura y la atmosfera de medición. La totalidad de las aleaciones estudiadas resultaron ser altamente afines con los sustratos de latón, obteniendo ángulos de contacto con valores entre los 30° y los 41° aproximadamente; y produciendo uniones de excelente calidad, dada a la alta reactividad del zinc en ambos, la aleación y el sustrato analizados. En el caso del latón, los resultados de mojabilidad obtenidos para las aleaciones Sn-Zn, y las temperaturas de trabajo para las mismas, podrían resultar efectivos en el caso de una sustitución por la aleación Sn-Pb, sin embargo es evidente que el desempeño de la aleación Sn-Zn no llena la totalidad de características de la soldadura con plomo. El caso de la aleación eutéctica es importante, presentando un bajo ángulo de contacto, baja tensión superficial, una temperatura de fusión cercana a los 198° y buen acabado superficial en la unión.

Las aleaciones analizadas no presentan unión alguna con el sustrato de aluminio analizado. Las aleaciones con zinc sobre aluminio presentaron resultados de ángulo de contacto inferiores al de la aleación Sn-Pb, con tendencia decreciente; y según el comportamiento observado se dará al aumentar la cantidad de zinc en la aleación se obtendrían menores ángulos de contacto; sin embargo, en este caso, la formación de compuestos metálicos sobre la junta sería excesiva.

La capa de compuestos formada sobre la superficie de la gota fue evidente solo en el caso la aleación hipereutéctica. Esto indica que durante los procesos de fabricación a nivel industrial se pueden obtener resultados satisfactorios para mojabilidad de las aleaciones, principalmente sobre sustratos de latón, cuando se realiza la soldadura de los componentes microelectrónicos. Es importante tener en cuenta también, que como fue observado, ligeras variaciones en la composición de las aleaciones de Sn-Zn producen cambios importantes en los resultados de mojabilidad, por tanto es importante en la implementación de los procesos de soldadura tener total control sobre la fabricación de las aleaciones.

La mojabilidad de las aleaciones Sn-Zn sobre sustratos de cobre presentan resultados satisfactorios en comparación con la aleación comercial de Sn-Pb analizado, mostrando un comportamiento similar en términos de mojabilidad; sin embargo, es menester la ejecución de un análisis posterior de las propiedades de la junta de soldadura luego de la solidificación de la gota, todo esto a fin de evaluar la factibilidad de la sustitución en términos de efectividad de la unión soldada y calidad del producto fabricado.

La información disponible en la literatura sobre mediciones de ángulo de contacto de aleaciones de soldadura libres de plomo es aún poco confiable, y comparaciones totalmente dicientes entre las aleaciones estudiadas y las reportadas por otros autores no serían precisas. Es necesario establecer un procedimiento experimental normalizado que permita someter a comparación las diferentes aleaciones de soldadura libres de plomo, a fin de realizar una comparación efectiva. Incluso los reportes de la variación del comportamiento del ángulo de contacto según la temperatura es variada en la literatura, y no se conoce de manera detallada el funcionamiento del sistema.

RECOMENDACIONES

- Es importante en trabajos posteriores la implementación de una evaluación de las propiedades mecánicas de las uniones realizadas tras el enfriamiento de las muestras, así los resultados obtenidos brindarán información específica que permita comparar las aleaciones estudiadas.
- Se deben tomar en cuenta otros aspectos influyentes en la evaluación de una posible sustitución de las soldaduras con plomo no evaluados en este trabajo; algunos relacionados con los procesos de manufactura, como lo son: costo, disponibilidad y variedad de proveedores, factibilidad de fabricación de la aleación, etc.; y otros relacionados con el desempeño de la aleación como conductividad eléctrica, conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica, entre otras propiedades.
- La implementación de metodologías normalizadas para procedimientos de medición de mojabilidad de compuestos intermetálicos permitirá un análisis más extenso y detallado del proceso, dando cuenta de los pros y contras al momento de implementar la sustitución de las aleaciones Sn-Pb.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. M. V. B. Almeida, M. a. Madureira, S. H. Bonilla, and B. F. Giannetti, “Assessing the replacement of lead in solders: effects on resource use and human health,” *J. Clean. Prod.*, pp. 1–8, Sep. 2012.
- [2] S. Amore, E. Ricci, G. Borzone, and R. Novakovic, “Wetting behaviour of lead-free Sn-based alloys on Cu and Ni substrates,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 495, no. 1–2, pp. 108–112, Nov. 2008.
- [3] R. A. Islam, Y. C. Chan, W. Jillek, and S. Islam, “Comparative study of wetting behavior and mechanical properties (microhardness) of Sn–Zn and Sn–Pb solders,” *Microelectronics J.*, vol. 37, no. 8, pp. 705–713, Aug. 2006.
- [4] K. Suganuma and K.-S. Kim, “Sn–Zn low temperature solder,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 18, no. 1–3, pp. 121–127, Sep. 2006.
- [5] E. Lévy, *Diccionario Akal de Física*, 1st ed. Madrid, España.: Ediciones AKAL, S.A., 1992, p. 537.
- [6] Wikipedia, “Mojabilidad,” 2010. [Online]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Mojabilidad>. [Accessed: 24-Mar-2013].
- [7] E. C. Donaldson and A. Waqi, “Wettability,” in in *Wettability*, 1st ed., Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2008, pp. 2–55.
- [8] A. W. Adamson and A. P. Gast, “Capillarity,” in in *Physical Chemistry of Surfaces*, 6th ed., New York: John Wiley & Son, Inc., 1997, pp. 4–43.
- [9] A. Gajewski, “Contact angle and sessile drop diameter hysteresis on metal surfaces,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 51, no. 19–20, pp. 4628–4636, Sep. 2008.
- [10] T. T. Chau, W. J. Bruckard, P. T. L. Koh, and a V Nguyen, “A review of factors that affect contact angle and implications for flotation practice,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 150, no. 2, pp. 106–15, Sep. 2009.
- [11] A. Adamson and A. Gast, “The Solid-Liquid Interface-Contact Angle,” in in *Physical Chemistry of Surfaces*, 6th ed., New York: John Wiley & Son, Inc., 1997, pp. 347–383.

- [12] S. L. City, "The Effect of Drop (Bubble) Size on Advancing and Receding Contact Angles for Heterogeneous and Rough Solid Surfaces as Observed with Sessile-Drop and Captive-Bubble Techniques," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 179, no. 2, pp. 37–50, 1996.
- [13] V. M. Starov, M. G. Velarde, and C. J. Radke, "Surface Forces and the Equilibrium of Liquids on Solid Substrates," in in *Wetting and Spreading Dynamics*, 1st ed., M. J. Schick and A. T. Hubbard, Eds. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007, pp. 1–30.
- [14] Dataphysics, "Operating manual Dataphysics OCA." DataPhysics Instruments GmbH, Filderstadt, p. 121, 2002.
- [15] N. Eustathopoulos, M. G. Nicholas, and B. Drevet, *Wettability at High Temperatures*, 1st ed., vol. 3. Oxford: Elsevier Science, 1999, p. 195.
- [16] A. B. D. Cassie and S. Baxter, "WETTABILITY OF POROUS SURFACES," *Trans. Faraday Soc.*, vol. 40, no. 0, pp. 546–551, 1944.
- [17] L. Gao and T. J. McCarthy, "How Wenzel and cassie were wrong.," *Langmuir*, vol. 23, no. 7, pp. 3762–5, Mar. 2007.
- [18] E. Bormashenko, "Why does the Cassie–Baxter equation apply?," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 324, no. 1–3, pp. 47–50, Jul. 2008.
- [19] J. P. Z. Moser, W. Gąsior, A. Dębski, "DATABASE OF LEAD - FREE SOLDERING MATERIALS SURFACE TENSION , DENSITY AND." Institute of Metallurgy and Materials Science, Polish Academy of Sciences, Kraków,, pp. 1–105, 2007.
- [20] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, "Procesos y equipos para unir," in in *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Cuarta Edi., New Jersey: Pearson Educación, 2002, pp. 771–863.
- [21] K. Weman, "Introduction to Welding," in in *Welding processes handbook*, 2nd ed., Cambridge: Woodhead Publishing, 2012, pp. 1–12.
- [22] Wikipedia, "Soldadura," 2012. [Online]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura>. [Accessed: 30-Mar-2013].
- [23] M. P. Groover, "Procesos de unión y ensamble," in in *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas*, 1st ed., W. Stenquist, Ed. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación, 1997, pp. 712–803.

- [24] J. J. H. Rodríguez, “Sustitución de la aleación Sn/Pb por una aleación libre de plomo en fabricación de circuito impreso,” Universidad Autónoma de Barcelona, 2010.
- [25] G. Hernández, “Soldeo Fuerte y Blando,” in in *Manual del Soldador*, 14th ed., Madrid, España.: CESOL, 2007, pp. 388–402.
- [26] Francia, “Mantenimiento de Equipos de Cómputo,” *Soldadura*, 2010. [Online]. Available: <http://franciael.blogspot.com/2010/05/soldadura-consiste-en-unir-las-partes.html>. [Accessed: 30-Mar-2013].
- [27] I. T. Network, “Hack n Mod,” *How to: Reflow Surface Mount (SMD) Soldering Tutorial*, 2010. [Online]. Available: <http://hacknmod.com/hack/diy-reflow-surface-mount-soldering-smd-tutorial/>. [Accessed: 30-Mar-2013].
- [28] C. M. L. Wu and Y. W. Wong, “Rare-earth additions to lead-free electronic solders,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 18, no. 1–3, pp. 77–91, Sep. 2006.
- [29] M. Judd and K. Brindley, “Solder,” in in *Soldering in Electronics Assembly*, Second Edi., Leicestershire: Elsevier Ltd, 1999, pp. 51–56.
- [30] R. Mayappan, A. B. Ismail, Z. A. Ahmad, T. Ariga, and L. B. Hussain, “Effect of sample perimeter and temperature on Sn–Zn based lead-free solders,” *Mater. Lett.*, vol. 60, no. 19, pp. 2383–2389, Aug. 2006.
- [31] K. S. Subramanian, V. S. Sastri, M. Elboudjaini, J. W. Connor, and A. B. C. Davey, “Water Contamination: Impact of tin-lead solder,” *Water Res.*, vol. 17, no. 8, p. 10, 1995.
- [32] K. C. STAUDINGER and V. S. ROTH, “Occupational Lead Poisoning,” *Am Fam Physician*, 1998. [Online]. Available: <http://www.aafp.org/afp/1998/0215/p719.html>. [Accessed: 30-Mar-2013].
- [33] Lenntech, “Water Treatment Solutions Lenntech,” *Estaño (Sn) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente*, 2012. [Online]. Available: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/sn.htm>. [Accessed: 31-Mar-2013].
- [34] X. Zhou, H. Nixon, O. a. Ogunseitan, A. a. Shapiro, and J. M. Schoenung, “Transition to Lead-Free Products in the US Electronics Industry: A Model of Environmental, Technical, and Economic Preferences,” *Environ. Model. Assess.*, vol. 16, no. 1, pp. 107–118, Jun. 2010.
- [35] T. Townsend, S. Musson, B. Dubey, and B. Pearson, “Leachability of printed wire boards containing leaded and lead-free solder,” *J. Environ. Manage.*, vol. 88, no. 4, pp. 926–31, Oct. 2008.

- [36] J. R. Geibig and M. L. Socolof, "Solders in Electronics: A Life-Cycle Assessment Summary," Knoxville, 2005.
- [37] C.-C. Fu and C. Chen, "Investigations of wetting properties of Ni–V and Ni–Co alloys by Sn, Sn–Pb, Sn–Cu, and Sn–Ag–Cu solders," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 42, no. 2, pp. 350–355, Mar. 2011.
- [38] M. Abtew and G. Selvaduray, "Lead-free Solders in Microelectronics," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 27, no. 5–6, pp. 95–141, Jun. 2000.
- [39] S. Yu, H. Lin, M. Hon, T. Road, and M. Wang, "Effects of process parameters on the soldering behavior of the eutectic Sn-Zn solder on Cu substrate," vol. 1, pp. 461–471.
- [40] L. R. Garcia, W. R. Osório, L. C. Peixoto, and A. Garcia, "Wetting Behavior and Mechanical Properties of Sn-Zn and Sn-Pb Solder Alloys," *J. Electron. Mater.*, vol. 38, no. 11, pp. 2405–2414, Aug. 2009.
- [41] C.-W. Hwang, K.-S. Kim, and K. Suganuma, "Interfaces in lead-free soldering," *J. Electron. Mater.*, vol. 32, no. 11, pp. 1249–1256, Nov. 2003.
- [42] X. Tong, J. Shi, and Y. Zhou, "Greening of supply chain in developing countries: Diffusion of lead (Pb)-free soldering in ICT manufacturers in China," *Ecol. Econ.*, vol. 83, pp. 174–182, Nov. 2012.
- [43] IPC, "Latin America: Regional Outlook for the Electronics Industry," Bannockburn, 2013.
- [44] N. F. Albiano, *Toxicología Laboral. Criterios para la Vigilancia de los Trabajadores Expuestos a Sustancias Químicas Peligrosas*. Argentina: SRT, 2011, p. 358.
- [45] M. Fuse and K. Tsunemi, "Assessment of the effects of the Japanese shift to lead-free solders and its impact on material substitution and environmental emissions by a dynamic material flow analysis," *Sci. Total Environ.*, vol. 438, pp. 49–58, Nov. 2012.
- [46] M. N. Islam, Y. C. Chan, M. J. Rizvi, and W. Jillek, "Investigations of interfacial reactions of Sn–Zn based and Sn–Ag–Cu lead-free solder alloys as replacement for Sn–Pb solder," *J. Alloys Compd.*, vol. 400, no. 1–2, pp. 136–144, Sep. 2005.
- [47] and S. J. M. McCORMACK, H.S. CHEN, G.W. KAMMLOTT, "Significantly Improved Mechanical Properties of Bi-Sn Solder Alloys by Ag-Doping," *J. Electron. Mater.*, vol. 26, no. 8, pp. 954–958, 1997.

- [48] M. McCormack, S. Jin, T. B. Laboratories, and M. Hill, "New , Lead-Free Solders," *J. Electron. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp. 635–640, 1994.
- [49] Himikatus.ru, "Фазовая диаграмма системы Sn-Zn," 2012. [Online]. Available: <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Sn-Zn.gif>.
- [50] H. K. D. H. Bhadeshia, "The Kirkendall Effect," *Materials Science & Metallurgy, University of Cambridge*, 2010. [Online]. Available: <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/kirkendall.html>. [Accessed: 21-Sep-2013].
- [51] E. L. R. A. SARAVANAN, J. M. MOLINA, J. NARCISO, C. GARCÍA-CORDOVILLA, "Surface tension of pure aluminum in argon / hydrogen and nitrogen / hydrogen atmospheres at high temperatures," *J. Mater. Sci. Lett.*, vol. 21, pp. 309–311, 2002.
- [52] M. Abtew and G. Selvaduray, "Lead-free Solders in Microelectronics," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 27, no. 5–6, pp. 95–141, Jun. 2000.
- [53] C. M. L. Wu, C. M. T. Law, D. Q. Yu, and L. Wang, "The wettability and microstructure of Sn-Zn-RE alloys," *J. Electron. Mater.*, vol. 32, no. 2, pp. 63–69, Feb. 2003.
- [54] C. M. L. Wu, D. Q. Yu, C. M. T. Law, and L. Wang, "The properties of Sn-9Zn lead-free solder alloys doped with trace rare earth elements," *J. Electron. Mater.*, vol. 31, no. 9, pp. 921–927, Sep. 2002.
- [55] C. M. L. Wu, D. Q. Yu, C. M. T. Law, and L. Wang, "Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 44, no. 1, pp. 1–44, Apr. 2004.



CERTIFICADO

Análisis comparativo de la mojabilidad de soldaduras Sn-Pb y Sn-Zn

Cuyos autores son:

José Escudero Hernández, Vladimir Martínez Tejada, Patricia Fernández Morales, Emigdio Mendoza Fandiño

Ha sido presentado en el 13^{er} Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales, realizado en la ciudad de Puerto Iguazú, Argentina del 20 al 23 de Agosto de 2013.

Dr. Carlos Enrique Schvezov
Presidente Comisión Organizadora
XIII SAM-CONAMET, Iguazú 2013

A-28

ANEXO 2

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA MOJABILIDAD DE SOLDADURAS Sn-Pb y Sn-Zn ⁽¹⁾José Escudero Hernández ⁽¹⁾, Vladimir Martínez Tejada ⁽¹⁾, Patricia Fernández Morales ⁽²⁾ y Emigdio Mendoza Fandiño ⁽¹⁾⁽¹⁾Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.⁽²⁾Facultad de Ingeniería Industrial. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

Correo Electrónico: emigdio.mendoza@upb.edu.co

INTRODUCCIÓN

La soldadura Sn-Pb ha sido a lo largo de los años, un material importante en la fabricación de dispositivos electrónicos, sin embargo, es indispensable encontrar aleaciones que sustituyan el plomo en las aleaciones de soldadura, dado su alto grado de toxicidad aunque sea mínima la cantidad de plomo usada por esta industria, ya que el grado de lixiviados tóxicos generados es importante [1]. Diferentes países establecen prohibiciones impuesta por la RoHS (Restriction of Hazardous Substances) en Europa, para el uso de sustancias tóxicas (mercurio, cadmio, plomo y cromo VI). En algunos países como USA y Brasil aun no se tienen ningún tipo de regulación, pero se usan soldaduras libres de plomo dada la presión de clientes internacionales [2].

Se han estudiado como posibles sustitutos del Pb, elementos como el cobre, zinc, indio, plata y bismuto, donde el principal requerimiento es la temperatura de fusión de la aleación, puesto que ninguna otra aleación es conocida por tener un punto de fusión menor a la aleación Sn-Pb. En las soldaduras, la mojabilidad sobre el sustrato es una propiedad fundamental y esta relacionada con las propiedades mecánicas de la unión. El zinc y la plata han jugado un papel importante en la sustitución del Pb, sin embargo, en términos comparativos el zinc proporciona grandes ventajas. La principal es su baja temperatura de fusión, la cual se encuentra cercana a la aleación Sn-Pb, estando alrededor de los 199°C en su composición eutéctica [3-5].

El objetivo de este trabajo es comparar la mojabilidad de diferentes composiciones de la aleación Sn-Zn (eutéctica, hipereutéctica e hipoeutéctica) y una aleación comercial de Sn-Pb, usando el método de la gota en reposo.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La medición del ángulo de contacto se realizó por el método de la gota en reposo usando un tensiómetro óptico OCA-15 Plus, integrado a un software de digitalización y video SCA-20 de Dataphysics®. El conjunto del equipo usado durante el proceso experimental se presenta en la Figura 1.



Figura 1. Montaje completo usado durante la experimentación

Sustratos de aleaciones comerciales, aluminio 1100 y latón C385, fueron sometidos a un proceso de preparación superficial usando una secuencia de papel abrasivo con granulometría 100, 240, 320, 400, 600 y finalmente se dio un acabado final con paño usando Alúmina (Al_2O_3) de 5 micras. Posteriormente, los sustratos fueron limpiados con acetona antes de ser sometidos a las mediciones de ángulo de contacto, con las diferentes aleaciones de soldadura.

Se prepararon tres aleaciones de Sn-Zn, una hipoeutéctica, una eutéctica y una hipereutéctica, cuya composición se lista en la Tabla 1. Las aleaciones fueron preparadas en un horno eléctrico a condiciones atmosféricas, con una agitación continua para lograr una completa homogenización de cada una de las aleaciones Sn-Zn formuladas.

Tabla 1. Composición de las aleaciones Sn-Zn estudiadas.

Aleación	Composición
Eutéctica	Sn-9wt.%Zn
Hipereutéctica	Sn-14wt.%Zn
Hipoeutéctica	Sn-4wt.%Zn

Para las mediciones experimentales del ángulo de contacto entre las soldaduras y los sustratos, se tomaron muestras de 0.2 g de soldadura y se sobre calentó por encima del punto de fusión de cada una de las soldaduras, para lo cual se usaron incrementos de temperaturas de 80° sobre la temperatura de la eutéctica o sobre la línea de *liquidus*, según correspondiese. El control de la atmosfera se realizó usando Argón, a un el flujo fue de 5 ml/s. En todos los casos estudiados, tanto para la aleación Sn-Pb, como para las diferentes aleaciones Sn-Zn se utilizó resina natural como fundente

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El registro de la medición del ángulo de contacto para cada una de las superficies y aleaciones se determinó luego de que la gota alcanza un estado semiestacionario. Una ilustración del proceso de formación de la gota se encuentra ilustrado en las Figura 2.

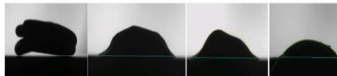


Figura 2. Ilustración del proceso de formación de la gota en el tiempo de la aleación de Sn-Zn (Sn-9wt.%Zn)

En la Figura 3 se ilustra el cambio del valor del ángulo de contacto en el tiempo, la gota formada alcanza a estabilizar el ángulo de contacto entre la gota y la superficie, lo que podríamos plantear como un estado semiestacionario del sistema en estudio.

Tabla 2. Valores de ángulos de contacto obtenidos sobre Latón y Aluminio

	LATÓN	ALUMINIO
Sn-Pb	33.40° ± 0.41°	105.20° ± 1.37°
Sn-Zn	30.60° ± 0.82°	82.60° ± 0.62°
Hipoeutéctico	37.10° ± 1.00°	89.40° ± 0.80°
Eutéctica	41.10° ± 1.36°	103.30° ± 1.51°
Hipereutéctica		

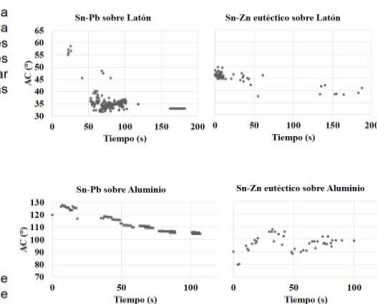


Figura 3. Fenómeno transitorio Sn-Pb sobre y eutéctico Sn-Zn sobre Latón y Aluminio.

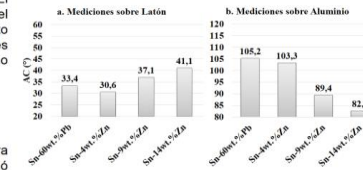


Figura 4. Histogramas de medición de ángulo de contacto de las aleaciones estudiadas sobre los sustratos de latón y aluminio

CONCLUSIONES

La mojabilidad de las aleaciones analizadas sobre aluminio y latón, presentan líneas de tendencia opuestas al momento de aumentar la concentración de zinc en la aleación.

Las aleaciones Sn-Zn son altamente afines con los sustratos de latón, produciendo posiblemente uniones de excelente calidad.

Se encontró baja mojabilidad de las soldaduras estudiadas con los sustratos de aluminio, aunque se aprecia que al aumentar la cantidad de zinc en la aleación se obtienen menores ángulos de contacto; sin embargo, la formación de compuestos sobre la junta incrementa.

REFERENCIAS

- [1] T. Townsend, S. Musson, B. Dubey, and B. Pearson, "Leachability of printed wire boards containing leaded and lead-free solder," *Journal of environmental management*, vol. 88, no. 4, pp. 926-31, Oct. 2008.
- [2] X. Zhou, H. Nixon, D. a. Ogunshehin, A. a. Shapiro, and J. M. Schoenung, "Transition to Lead-Free Products in the US Electronics Industry: A Model of Environmental, Technical, and Economic Preferences," *Environmental Modeling & Assessment*, vol. 16, no. 1, pp. 107-118, Jun. 2010.
- [3] R. A. Islam, Y. C. Chan, W. Jilek, and S. Islam, "Comparative study of wetting behavior and mechanical properties (microhardness) of Sn-Zn and Sn-Pb solders," *Microelectronics Journal*, vol. 37, no. 8, pp. 705-713, Aug. 2006.
- [4] C.-C. Fu and C. Chen, "Investigations of wetting properties of Ni-V and Ni-Co alloys by Sn, Sn-Pb, Sn-Cu, and Sn-Ag-Cu solders," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 42, no. 2, pp. 350-355, Mar. 2011.
- [5] K. Suganuma and K.-S. Kim, "Sn-Zn low temperature solder," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 18, no. 1-3, pp. 121-127, Sep. 2006.



ANEXO 3

Table 4.1. Experimental values of σ_{LV} vs temperature, T, taken from the compilation of Eustathopoulos et al. (1999) and values of σ'_{LV} calculated according to (Eustathopoulos et al. 1998) for Fe and Si, for class B metals except Te and for class A metals for which experimental values have not been measured ($\sigma_{LV}(T) = \sigma_{LV}(T_F) + \sigma'_{LV}[T - T_F]$ where T_F is the melting temperature).

Element	T_F (K)	Class	Experimental data $\sigma_{LV}(T)$ (mJ.m ⁻²)	Calculated data σ'_{LV} (mJ.m ⁻² .K ⁻¹)
Ag	1234	A	910 - 0.17 (T - T_F)	
Al	933	A	867 - 0.15 (T - T_F)	
Au	1336	A	1138 - 0.19 (T - T_F)	
Ba	1002	B	267 - 0.07 (T - T_F)	-0.06
Be	1560	B	1320	-0.25
Bi	544	A	374 - 0.08 (T - T_F)	
Ca	1112	A	366 - 0.11 (T - T_F)	
Cd	594	B	642 - 0.20 (T - T_F)	-0.16
Ce	1071	B	794 - 0.07 (T - T_F)	-0.09
Co	1768	A	1884 - 0.37 (T - T_F)	
Cr	2130	B	1628 - 0.20 (T - T_F)	-0.33
Cs	302	A	69 - 0.06 (T - T_F)	
Cu	1357	A	1355 - 0.19 (T - T_F)	
Dy	1682	B	648 - 0.13 (T - T_F)	-0.15
Er	1795	B	637 - 0.12 (T - T_F)	-0.16
Eu	1090	B	264 - 0.05 (T - T_F)	-0.16
Fe	1809	A	1855 - 0.23 (T - T_F) 1844 - 0.5 (T - T_F)	-0.29
Ga	303	A	708 - 0.07 (T - T_F)	
Gd	1585	B	664 - 0.06 (T - T_F)	-0.13
Ge	1210	A	587 - 0.105 (T - T_F)	
Hf	2500	A	1490	-0.19
Hg	234	A	500 - 0.215 (T - T_F)	
Ho	1743	B	650 - 0.12 (T - T_F)	-0.15
In	430	A	555 - 0.12 (T - T_F)	
Ir	2716	A	2140	-0.18
K	336	A	112 - 0.08 (T - T_F)	
La	1193	B	737 - 0.11 (T - T_F)	-0.09
Li	454	B	404 - 0.16 (T - T_F)	-0.14
Lu	1936	B	940 - 0.07 (T - T_F)	-0.21
Mg	922	B	583 - 0.15 (T - T_F)	-0.16
Mn	1517	B	1219 - 0.35 (T - T_F)	-0.23
Mo	2890	B	1915	-0.23
Na	371	A	192 - 0.095 (T - T_F)	
Nb	2740	A	1840	-0.19
Nd	1289	B	689 - 0.09 (T - T_F)	-0.11
Ni	1726	A	1838 - 0.42 (T - T_F)	
Os	3300	B	2500	-0.29

Pb	601	A	462 - 0.11 (T - T _F)	
Pd	1825	B	1475 - 0.28 (T - T _F)	-0.24
Pr	1204	B	743 - 0.09 (T - T _F)	-0.14
Pt	2042	A	1707	-0.29
Pu	913	B	550	-0.13
Rb	313	B	85 - 0.07 (T - T _F)	-0.05
Re	3453	A	2520	-0.21
Rh	2233	B	2000	-0.24
Ru	2523	B	2180	-0.28
Sb	904	B	366 - 0.04 (T - T _F)	-0.10
Sc	1812	B	939 - 0.12 (T - T _F)	-0.21
Se	494	B	103 - 0.09 (T - T _F)	
Si	1685	B	827 - 0.48 (T - T _F)	-0.19
			749 - 0.15 (T - T _F)	
Sm	1345	B	430 - 0.07 (T - T _F)	-0.10
Sn	505	A	570 - 0.11 (T - T _F)	
Sr	1041	A	289 - 0.075 (T - T _F)	
Ta	3287	A	2010	-0.24
Tb	1630	B	669 - 0.06 (T - T _F)	-0.16
Te	723	B	178	
Th	2028	B	978	-0.14
Ti	1943	B	1525	-0.28
Tl	577	A	461 - 0.09 (T - T _F)	
U	1405	B	1550 - 0.14 (T - T _F)	-0.16
V	2175	A	1855	-0.26
W	3653	A	2310	-0.20
Y	1799	B	872 - 0.09 (T - T _F)	-0.11
Yb	1097	B	320 - 0.10 (T - T _F)	-0.17
Zn	693	B	815 - 0.25 (T - T _F)	-0.22
Zr	2125	A	1435	-0.19

ANEXO 4

Aleación	Sn-70Zn	Sn-50Zn	Sn-25Zn	Sn-14Zn	Sn-9Zn	Sn-4Zn
Tipo	Hipereutéctica	Hipereutéctica	Hipereutéctica	Hipereutéctica	Eutéctica	Hipoeutéctica
Temperatura del análisis(K)	728,00	703,00	653,00	593,00	551,50	563,00
Fracción Molar [Sn] (%) Aprox.	0,19	0,35	0,62	0,77	0,85	0,92
Fracción Molar [Zn] (%) Aprox.	0,81	0,65	0,38	0,23	0,15	0,08
Tensión Superficial [Sn] (mN/m)	545,47	548,22	553,72	560,32	564,89	563,62
Tensión Superficial [Zn] (mN/m)	792,75	799,00	811,50	826,50	836,88	834,00
Tensión Superficial de la aleación (mN/m)	592,28	586,94	576,02	575,55	580,47	579,38