

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE LA ALEACIÓN Sn3.8Ag
0.7Cu UTILIZANDO EL PROCESO SELECTIVO VÍA HAZ DE
LUZ**

P R E S E N T A:

LUIS ARTURO REYES OSORIO

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

CD. UNIVERSITARIA

18 / JUNIO / 2007

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE LA ALEACIÓN Sn_{3.8}Ag
0.7Cu UTILIZANDO EL PROCESO SELECTIVO VÍA HAZ DE
LUZ**

PRESENTA:

LUIS ARTURO REYES OSORIO

TESIS

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

CD. UNIVERSITARIA

18 / JUNIO / 2007

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Estudio de la soldabilidad de la aleación Sn3.8Ag0.7Cu utilizando el proceso selectivo vía haz de luz”, realizada por el alumno LUIS ARTURO REYES OSORIO, matrícula 0981594, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El comité de tesis

Asesor

Dra. Dora Irma Martínez Delgado

Revisor

Dr. Rafael Colás Ortiz

Revisor

Dr. Víctor Páramo López

Vo. Bo.

Dr. Alan Castillo Rodríguez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N. L. a 18 de Junio del 2007

DEDICATORIA

A Dios

A mis padres

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis, si bien ha requerido de esfuerzo y gran dedicación por parte de el autor y su director de tesis, su finalización no hubiese sido posible sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaré y muchas de las cuales han sido de gran soporte durante y hasta el final de mis estudios de postgrado.

A mi asesor, la Dra. Dora Irma Martínez por sus consejos, su tiempo y dedicación para la correcta realización de este trabajo de investigación.

A mi coasesor, el Dr. Rafael Colás por sus disponibilidad y sus valiosos comentarios.

A mi coasesor, el Dr. Víctor Páramo López por su gran dedicación y empeño para el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos del laboratorio de análisis de fallas de Celestica: Ismael Marín, Luis Moya, Jesica Herrera, Irma Torres y a los ingenieros Eduardo Martínez, Ramón Méndez y especialmente a Eric Gallardo por el soporte técnico.

Al CONACYT por el apoyo económico otorgado para el estudio de posgrado.

A Celestica de Monterrey por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo de investigación.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL por la formación académica a lo largo de mis estudios profesionales.

A mis compañeros de generación Javier Ortega y Felipe García.

INDICE

	Pág.
Prólogo	v
Resumen	vii
Capítulo 1	Introducción
1.1	Antecedentes. 1
1.2	Manufactura de tarjetas de circuitos impresos. 2
1.3	Ensamble de componentes en la industria electrónica. 3
1.4	Tecnología de montaje superficial 4
Capítulo 2	Soldadura y procesos de soldadura
2.1	Aleaciones para soldaduras. 6
2.2	Soldaduras plomo-estaño. 8
2.3	Soldadura de componentes de montaje superficial 11
2.3.1	Tecnología de soldadura selectiva por haz de luz. 11
2.3.2	Proceso de soldadura por reflujo 14
2.3.3	Soldadura por ola. 16
Capítulo 3	Fundamentos de soldadura
3.1	Introducción. 17
3.2	Teoría del proceso de soldadura. 18
3.2.1	Dispersión. 19
3.2.2	Disolución del metal base. 20
3.2.3	Formación y crecimiento de fases intermedias. 22
3.3	Intermetálicos. 24
3.4	Soldaduras libres de plomo. 30
3.4.1	Alternativas para soldaduras plomo-estaño. 32
3.4.2	Diagrama de fase ternario Ag-Cu-Sn 34
3.4.3	Propiedades físicas, químicas y metalúrgicas de las soldaduras libres de plomo. 36
3.4.4	Tensión superficial. 37
3.4.5	Propiedades mecánicas. 38

Capítulo 4	Procedimiento experimental	
4.1	Introducción.	40
4.2	Objetivo de la experimentación.	41
4.3	Selección de muestras.	41
4.4	Equipos de pruebas.	46
4.4.1	Equipo de soldadura por haz de luz.	46
4.4.2	Equipo de pruebas mecánicas.	48
4.5	Caracterización.	49
4.5.1	Preparación metalográfica	49
4.5.2	Microscopía óptica	51
4.5.3	Microscopía electrónica.	52
4.5.4	Tratamientos térmicos.	52
Capítulo 5	Resultados y discusión	
5.1	Introducción.	54
5.2	Inspección de las uniones.	55
5.3	Parámetros de soldadura.	57
5.4	Pruebas mecánicas.	63
5.5	Caracterización microestructural.	66
5.5.1	Tratamientos térmicos.	73
Capítulo 6	Conclusiones y recomendaciones	
6.1	Conclusiones.	82
6.2	Recomendaciones.	83
	Referencias bibliográficas.	85
	Listado de figuras.	88
	Listado de tablas.	91
	Apéndices:	
A.-	Valores de IMC y resistencia.	92
B.-	Normas IPC para la Industrial electrónica.	95

PRÓLOGO

El presente trabajo de investigación representa la continuación de diversos estudios que se han llevado a cabo en los últimos años, los cuales se han enfocado en el estudio de soldaduras libres de plomo como reemplazo de las aleaciones estaño-plomo ampliamente utilizadas en el ensamble de componentes en las industrias de manufactura electrónica. En este estudio se utilizó un equipo novedoso de soldadura selectiva en el que se evaluaron los parámetros críticos de operación que permiten la obtención de uniones de soldadura confiables. El proceso de soldadura involucra fenómenos microestructurales los cuales son gobernados principalmente por características físicas y químicas de los compuestos intermetálicos presentes tanto en el volumen así como en las interfases, la formación y evolución de estas fases a través de la operación del producto tiene un efecto notable en las propiedades mecánicas de las uniones.

La comprensión del efecto de los parámetros del proceso de soldadura sobre las propiedades del producto permite la manufactura de uniones con excelente integridad. El autor Arturo Reyes Osorio inicia con una disertación planteando una hipótesis clara y directa: la variación de los diferentes parámetros tales como: potencia, velocidad de alimentación de soldadura, rapidez de desplazamiento del haz y el acabado superficial, poseen un rol importante en la confiabilidad de las uniones de soldadura. Se realizaron tratamientos térmicos para estudiar el crecimiento de los compuestos intermetálicos en las interfases y su efecto en la resistencia en cada una de las condiciones evaluadas.

Los resultados obtenidos a través de este trabajo de investigación exponen la evolución de las fases intermedias generadas durante la operación de soldadura de componentes electrónicos y sus efectos sobre las propiedades mecánicas de las uniones.

Así mismo, las pruebas de envejecimiento realizadas proporcionaron información concluyente respecto al efecto de los compuestos intermetálicos, principalmente la fase Cu_6Sn_5 , sobre la integridad de las uniones de soldadura. Los resultados de la evaluación de los compuestos intermetálicos muestran un cambio de morfología nodular a morfología plana para las condiciones tratadas térmicamente. Se encontró una relación entre la resistencia a la tensión y el grosor de la capa intermetálica.

El conocimiento generado contribuyó significativamente en el entendimiento y control de las condiciones operativas óptimas del proceso de soldadura. Invito a los profesionistas que están trabajando con aleaciones libres de plomo, a los estudiantes y al lector en general a estudiar el presente trabajo. No solo contribuirá a la solución de problemas prácticos, sino que será de gran interés para aquellos interesados en los últimos avances de la ciencia en general y desarrollo tecnológico.

MARIO MORENO CORRAL
Director de Ingeniería
Celestica de Monterrey

RESUMEN

El interés ambiental sobre el uso de soldaduras Estaño-Plomo en aplicaciones electrónicas ha sido la fuerza conductora para el desarrollo de soldaduras libres de plomo ambientalmente benignas. En esta investigación se evaluaron las uniones soldadura elaboradas mediante la aleación ternaria libre de plomo Sn3.8Ag0.7Cu por medio del proceso de soldadura selectiva por haz de luz. Así mismo, se analizó la variación de los parámetros de proceso tales como; potencia, velocidad del haz y velocidad de alimentación de soldadura. Este análisis tuvo como finalidad obtener los parámetros óptimos del proceso. Inicialmente todas las uniones de soldadura fueron inspeccionadas visualmente para cuantificar y obtener las condiciones con menor cantidad de defectos, además, las condiciones seleccionadas fueron inspeccionadas metalográficamente por medio de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y analizadas cuantitativamente por medio de espectroscopia de energía dispersiva. Se midieron los espesores de los compuestos intermetálicos presentes en las interfaces entre soldadura y metal conductor y se determinó la máxima resistencia a la tensión de las condiciones seleccionadas. Adicionalmente, se realizaron tratamientos térmicos para estudiar el crecimiento de los compuestos intermetálicos en las interfases y su efecto en la resistencia en cada una de las condiciones evaluadas. Los resultados de la evaluación de los compuestos intermetálicos muestran un cambio de morfología nodular a morfología plana para las condiciones tratadas térmicamente. Se encontró una relación entre la resistencia a la tensión y el grosor de la capa intermetálica, inicialmente la resistencia aumenta a medida que el compuesto intermetálico crece y después la resistencia disminuye mientras el compuesto intermetálico continua creciendo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las soldaduras a base de plomo, particularmente las soldaduras plomo-estaño, han sido utilizadas por más de 50 años en la industria electrónica. Esto, debido principalmente a su bajo costo, su rango de temperatura de fusión y sus propiedades físicas, mecánicas, metalúrgicas y de resistencia a la fatiga [1]. Sin embargo, la preocupación sobre la toxicidad del plomo ha llevado al incremento en los controles y las legislaciones sobre el uso de este elemento. Aunque el uso de soldaduras a base de plomo no ha sido prohibido a nivel mundial hasta ahora, las fuertes tendencias en la Unión Europea por el uso de materiales ecológicos han conducido a la industria electrónica hacia el desarrollo de soldaduras alternativas libres de plomo [2]. El objetivo de la presente investigación se basa en la determinación de los parámetros de proceso del equipo de soldadura selectiva por haz de luz para la aleación libre de plomo Sn3.8Ag 0.7Cu mediante la evaluación de las propiedades mecánicas y el análisis microestructural de las uniones soldadas. La mayoría de las investigaciones realizadas en la soldadura de componentes electrónicos se han enfocado en los procesos de soldadura por reflujo y soldadura por ola.

La combinación del proceso de soldadura selectiva por haz de luz con el uso de aleaciones libres de plomo es un proceso poco usual, por tal motivo, fue necesario primeramente optimizar este proceso determinando los parámetros críticos que afectan la integridad de las uniones soldadas.

Debido a que no se tiene conocimiento de alguna investigación referente al trabajo expuesto, es notoria la factibilidad del desarrollo de un proyecto el cual pueda proporcionar información valiosa sobre las condiciones óptimas de este proceso de soldadura para la producción de uniones confiables bajo condiciones operacionales.

La hipótesis de este estudio sostiene que la variación de los diferentes parámetros tales como: potencia, velocidad de alimentación de soldadura, rapidez de desplazamiento del haz y el acabado superficial, poseen un rol importante en la confiabilidad de las uniones de soldadura.

1.2 Manufactura de tarjetas de circuitos impresos

Las tarjetas de circuito impreso (PCB, printed circuit board) son piezas compuestas principalmente de fibra de vidrio y resina, las cuales contienen un patrón conductor a base de cobre y frecuentemente forman parte de un panel de varios circuitos los cuales contienen un determinado espaciamiento conductivo. Una vez que todos los componentes han sido montados y soldados en las PCB, el circuito individual puede ser probado mecánica y eléctricamente. La aplicación final de la tarjeta tiene un efecto significativo en su diseño y la selección de los materiales base y acabos superficiales los cuales, a su vez, se ven afectados por el diseño inicial del circuito [3].

La tarjeta de circuito impreso es la base para el ensamble de componentes electrónicos, entre sus principales funciones se encuentran las señaladas a continuación:

- Soporte mecánico para los componentes ensamblados.
- Conexiones punto a punto en el circuito para pistas de baja resistencia.
- Aislamiento eléctrico entre puntos que no deberán conectarse.
- Un medio de confiabilidad, automatización y manufactura de circuitos con alta densidad de componentes.
- Un medio de dispersión y disipación de calor.
- Pistas con impedancia controlada.

1.3 Ensamble de componentes en la Industria electrónica

Existen dos procesos comúnmente utilizados para el montaje de componentes electrónicos, los cuales son: el montaje de componentes denominado “Through -Hole”, donde las terminales de los componentes son insertadas a través de huecos de interconexión ubicados en las PCB y soldadas en el lado opuesto de la tarjeta. El otro proceso es conocido como “tecnología de montaje superficial (SMT)”, en este las terminales son soldadas directamente sobre las pistas conductoras (PADs) situadas en la superficie de la tarjeta. La selección así como la variedad de componentes son factores determinantes en el proceso de soldadura y la secuencia de ensamble que serán utilizados [3].

En la figura 1.0 se puede observar una tarjeta de circuito impreso en la cual, los componentes electrónicos han sido ensamblados por medio de la tecnología de montaje superficial.

Las principales etapas en el desarrollo del proceso de ensamble de componentes 'Through-Hole' se describen a continuación.

1. Selección e inserción de componentes en la tarjeta.
2. Aplicación de fundente y precalentamiento de la tarjeta.
3. Aporte de soldadura para formar el enlace metalúrgico entre el circuito y la terminal del componente.
4. Limpieza de la tarjeta.

Las fases del proceso de ensamble de componentes por montaje superficial se presentan en orden consecutivo a continuación:

1. Aporte de pasta de soldadura en las áreas a soldar.
2. Adhesión de componentes en los depósitos de pasta de soldadura.
3. Aplicación de energía térmica para formar un enlace permanente entre el circuito y la terminal del componente y de esta forma llevar acabo el reflujo de la soldadura.
4. Limpieza de la tarjeta.

1.4 Tecnología de montaje superficial

La tecnología de montaje superficial (SMT) ha sido un cambio revolucionario en la industria electrónica moderna, durante las primera mitad de 1960, las primeras etapas de SMT emergieron debido a la ventaja de ser capaz de colocar componentes en ambos lados de las PCB, sin embargo, la tecnología SMT no prevaleció sino hasta después de 15 años. Durante los últimos años de 1970 la tecnología de ensamble de componentes 'Through-Hole' (THT) exhibió dificultades debido a la necesidad de mayores densidades de componentes, y principalmente debido al costo de barrenado de un mayor número de

orificios para la colocación de terminales con diámetros cada vez menores [4].

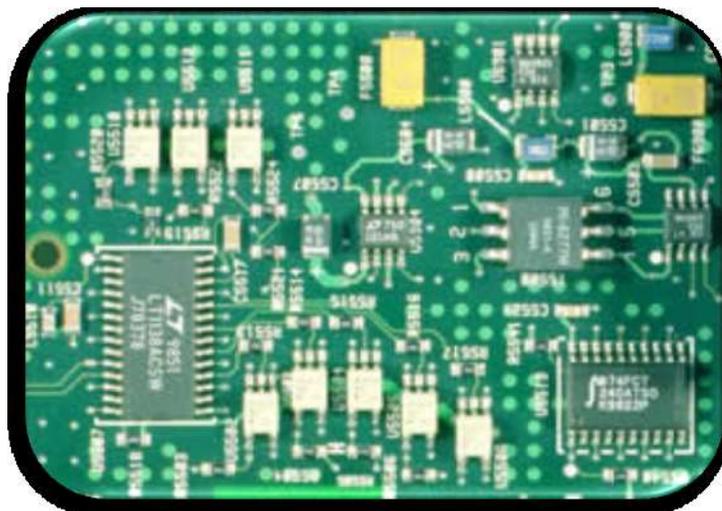


Figura 1.0 Ensamble de componentes por medio de la tecnología de montaje superficial [3].

El montaje de componentes con o sin terminales, opuesto al convencional THT, permitió a la tecnología de montaje superficial un mayor grado de automatización, mayor densidad de circuitos, mejor desempeño, menores volúmenes y notables reducciones en los costos de manufactura.

Los componentes de montaje superficial pueden ser ensamblados en una PCB mediante los procesos de soldadura por reflujo, soldadura por ola, procesos de soldadura selectiva y por medio del curado de adhesivos, todos estos procesos excepto el último serán discutidos en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 2

SOLDADURA Y PROCESOS DE SOLDADURA

2.1 Aleaciones para soldaduras

Todos los sistemas de aleaciones utilizados en soldaduras para aplicaciones electrónicas se basan en combinaciones de dos o más constituyentes seleccionados de los nueve elementos comunes: antimonio, bismuto, cadmio, oro, indio, plomo, plata, estaño y cinc.

Actualmente las aleaciones para soldaduras a base de plomo empleadas en tuberías han sido prohibidas, esto ha motivado el desarrollo de soldaduras libres de plomo para aplicaciones de fontanería [5]. Estas soldaduras contienen un 95% de estaño y un balance de uno o más elementos, tales como plata, antimonio, bismuto, cobre, níquel y cinc

Las soldaduras de alto punto de fusión contienen oro o plomo como principales constituyentes. La mayoría de las soldaduras de bajo punto de fusión ($T_m < 150^\circ\text{C}$) se clasifican en dos grupos tomando en consideración si el constituyente principal de la aleación es el plomo o indio.

Frecuentemente, el mojado de un componente por soldadura líquida resulta en la formación de compuestos intermetálicos, ya sea en el cuerpo de la soldadura o en las interfaces entre soldadura y metal base. Estas fases intermetálicas tienen un efecto significativo en las propiedades mecánicas presentes en las uniones soldadas.

Los elementos indio y estaño tienen un importante rol en la determinación del compuesto intermetálico que se formará por reacción con los componentes a ensamblar. Cuando ambos elementos están presentes en el sistema, la composición del metal base determinará cual de estos elementos será el constituyente dominante del compuesto intermetálico resultante.

El estaño es el principal constituyente de muchos sistemas de aleaciones para soldaduras, debido a que este confiere fluidez, beneficia la mojabilidad, mejora las propiedades físicas y mecánicas y posee una baja presión de vapor. Después del plomo, cadmio y cinc, el estaño es el elemento más económico utilizado en aleaciones para soldaduras.

El indio y el plomo son los constituyentes más blandos y dúctiles utilizados en aleaciones para soldaduras, a pesar de sus propiedades mecánicas deficientes, las soldaduras con alta concentración de plomo poseen bastas aplicaciones, debido a su costo y sus buenas propiedades en comparación con las soldaduras de alto punto de fusión disponibles.

Las soldaduras a base de indio en conjunto con el oro, son particularmente atractivas como acabados superficiales, debido a su lenta velocidad de disolución y debido a que las fases formadas mediante estos elementos son generalmente dúctiles [2].

2.2 Soldaduras plomo-estaño

Las aleaciones plomo-estaño forman aproximadamente el 95% de las uniones de soldadura producidas globalmente. Se estima que más de 60,000 toneladas por año de esta soldadura son utilizadas en la industria de ensamble de componentes electrónicos [2]. Las aleaciones plomo-estaño ofrecen las siguientes ventajas con respecto a otros sistemas de aleaciones.

- a) Poseen características superiores de mojado y dispersión comparadas con las demás soldaduras especialmente aquellas que contienen bismuto, antimonio e indio.
- b) Las soldaduras plomo-estaño son comparativamente económicas en producción y utilización, en particular, comparadas con otros metales para soldadura tales como bismuto, indio y plata.
- c) Las soldaduras plomo-estaño poseen gran versatilidad, estas son capaces de mojar un gran número de metales para generar uniones de soldadura con una erosión mínima en el sustrato utilizado.
- d) Tienen aplicaciones como recubrimiento de componentes, presentan propiedades mecánicas satisfactorias para muchas aplicaciones. En términos de resistencia mecánica, rigidez y resistencia a la fatiga, las soldaduras a base de plata presentan propiedades superiores a las aleaciones plomo- estaño.

En muchas otras propiedades, tales como resistencia a la corrosión, conducción eléctrica y conducción térmica hay poca diferencia entre las aleaciones plomo-estaño y la mayoría de las soldaduras de bajo punto de fusión.

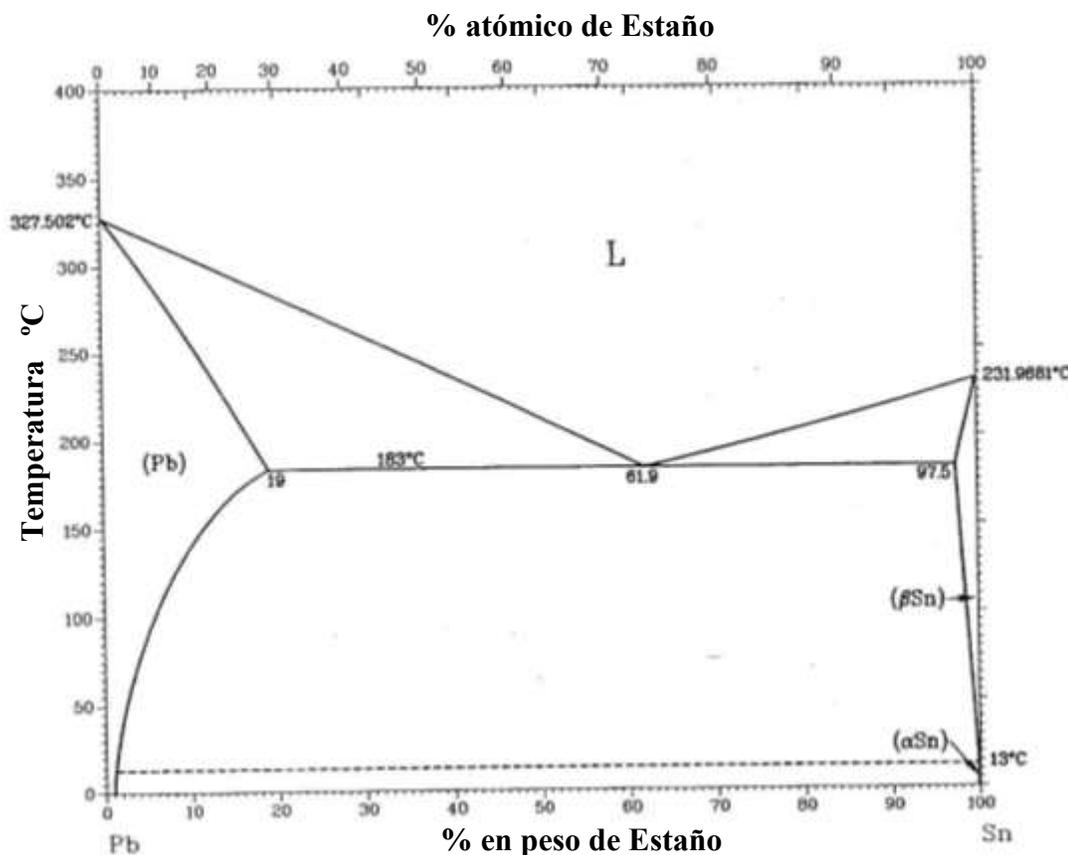


Figura 2.1 Diagrama de fase binario plomo (Pb)- estaño (Sn).

El diagrama de fases binario para el sistema Sn-Pb puede observarse en la figura 2.1, donde la composición eutéctica se presenta a 61.9%Sn y 38.1%Pb, a esta composición la aleación se transformara de estado liquido a sólido de manera instantánea a 183°C, ya que el Pb actúa como agente nucleante requiriendo un subenfriamiento de 1 °C, así mismo, su viscosidad será mínima comparada con las composiciones adyacentes.

Las soldaduras plomo-estaño rara vez se presentan en forma pura, estas contienen frecuentemente impurezas o adiciones deliberadas de elementos, los cuales proporcionan propiedades específicas al sistema de aleación. Los elementos metálicos generalmente presentes en el sistema plomo-estaño son antimonio, bismuto y plata.

El antimonio está presente generalmente a una concentración máxima de alrededor de 1%, este elemento mejora las propiedades mecánicas de las uniones por solución sólida.

El bismuto es añadido por razones funcionales similares a las del antimonio, la máxima concentración está limitada usualmente a 3%, concentraciones mayores tienen como resultado un incremento significativo del rango de fusión, así como la reducción de las propiedades de mojado y dispersión de la soldadura.

Los sistemas plomo-plata-estaño poseen aplicación como recubrimientos superficiales. La adición de 2% plata en la aleación eutéctica plomo-estaño tiene un gran efecto en la disminución de la erosión de recubrimientos de plata. Además, la presencia de plata en las soldaduras plomo-estaño deriva en la formación de una dispersión fina del compuesto intermetálico Ag_3Sn , estos precipitados de plata son ordinariamente dúctiles.

La adición de pequeñas cantidades de cobre y oro tienen un efecto benéfico sobre la resistencia de las soldaduras plomo-estaño, sin embargo, estos elementos no son agregados normalmente, debido a que son incorporados al sistema automáticamente al llevar a cabo el proceso de soldadura con componentes a base de cobre y cuyos recubrimientos superficiales son a base de oro.

Los elementos aditivos para las soldaduras plomo-estaño que fueron mencionados en los párrafos anteriores, cuando son agregados en pequeñas cantidades incrementan la resistencia de las uniones soldadas, debido a su aleación preferencial con el estaño, estos elementos tienen un efecto reductor en el espesor de las fases intermetálicas Cu-Sn, las cuales pueden disminuir las propiedades mecánicas de las uniones [2].

2.3 Soldadura de componentes de montaje superficial.

2.3.1 Tecnología de soldadura selectiva

El equipo de soldadura por haz de luz emplea una lámpara de xenón como fuente de calor para soldar el área requerida, esta lámpara irradia un haz de luz hacia una dirección y a una posición seleccionada libremente mediante la utilización de una fibra óptica que dirige la fuente lumínica. En la figura 2.2 se describen las partes principales del equipo de soldadura por haz de luz.

Este proceso de soldadura es utilizado para soldar componentes los cuales no pueden ser manipulados con métodos de soldadura en grupo como el proceso de soldadura por ola y los procesos por reflujo.

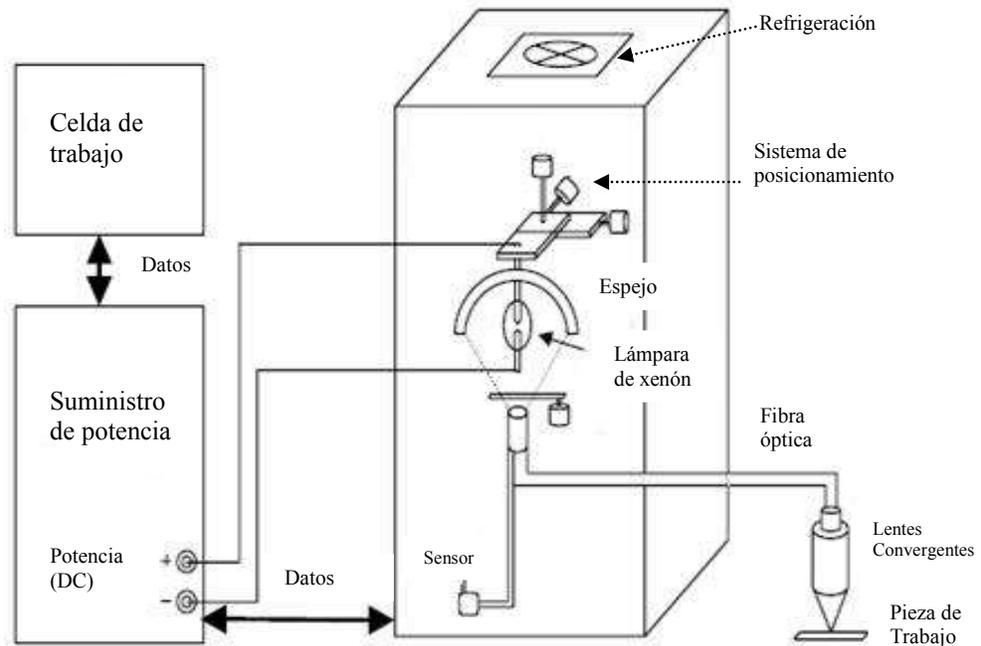


Figura 2.2 Configuración del equipo de soldadura por haz de luz [5].

Las principales características del equipo de soldadura por haz de luz son las siguientes:

- a) Función de retroalimentación de salida óptica.
- b) Función de control de enfoque automático.
- c) Señales de entrada/salida las cuales permiten un control preciso del nivel de salida óptica, tiempo de irradiación y el alcance de un calentamiento estable a cualquier posición.

Algunas de las ventajas de este equipo se mencionan continuación:

- a) Proceso de soldadura de componentes sin contacto.
- b) Eliminación de deformación de los componentes debido a que el proceso se realiza sin contacto de componentes.
- c) Control de energía con respuesta de transición de alta velocidad.
- d) Sistematización e incorporación a líneas de producción debido al empleo de fibras ópticas.

Los principales métodos de micro-soldadura convencional se describen en la Tabla 2.1. Entre estos métodos, el más utilizado es el denominado “Cautín o Soldering iron”, algunos procesos realizados con este cautín han sido automatizados por medio de robots, sin embargo la mayoría de ellos dependen en las habilidades de los operadores [6].

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de los métodos de soldadura convencional.

Método	Ventajas	Desventajas
Cautín	Operación simple, bajo costo	Calentamiento por contacto, mantenimiento diario, cantidad limitada de uniones soldadas por minuto
Barra caliente	Obtención de homogeneidad en terminales.	Calentamiento por contacto, mantenimiento diario
Ola selectiva	Bajos ciclos de tiempo, buena transferencia de calor.	No permite aplicación de soldadura en ambos lados de las PCB, requiere aplicación de precalentamiento, gran cantidad de uniones por minuto
Reflujo	Calentamiento sin contacto, bajo costo	Control de proceso complejo, calentamiento generalizado.
Flama por hidrogeno	Calentamiento sin contacto, altas temperaturas de operación	No permite retroalimentación de temperatura, no permite generación de calor de manera localizada.

2.3.2 Proceso de soldadura por reflujo

El proceso de soldadura por reflujo fue integrado a la tecnología de montaje superficial (SMT) para eliminar las dificultades derivadas del ensamble de componentes soldados por el proceso de ola.

En el proceso de soldadura por reflujo se emplea pasta de soldadura para llevar a cabo la operación de soldadura de componentes, esta pasta es una mezcla de partículas de soldadura y del compuesto orgánico denominado fundente. Este compuesto tiene dos funciones sobre la pasta de soldadura, la primera y principal función es servir como agente de ayuda en el proceso de soldadura removiendo óxidos de metal e impurezas. La segunda función del fundente es servir como un vehículo para las partículas de soldadura.

Tanto la soldadura y el fundente son premezclados para formar una pasta cuya reología está formulada para facilitar su deposición. La pasta es depositada a través de un estencil de impresión o dispensador en las pistas del PCB donde los componentes son colocados de manera subsiguiente.

La tarjeta de circuito impreso con componentes ensamblados, es calentada por arriba de la temperatura de "liquidus" de la soldadura para poder refluirla completamente, a esta temperatura, el fundente reacciona y remueve los óxidos presentes, lo cual permitirá la generación de una buena unión de soldadura.

Algunos métodos generalmente utilizados para refluir pasta de soldadura son los métodos de reflujo por infrarrojo, por fase vapor, por convección, por conducción, por haz de luz y el método de soldadura por láser [4].

La pasta de soldadura es el principal material utilizado en el proceso de soldadura por reflujo en SMT. El uso de esta pasta proporciona ciertas ventajas sobre la tecnología de soldadura por ola, las cuales se describen en seguida.

- La pasta no sólo se emplea como material para soldar, sino como un pegamento antes de llevar a cabo el proceso.
- La deposición de pasta es conducida usualmente por medio de un estencil o pantalla de impresión.
- Los procesos de reflujo en forma masiva permiten un perfil de calentamiento graduado, de esta manera se evita el daño potencial de los componentes debido al choque térmico causado en la soldadura por ola.
- El uso de pasta permite el desarrollo de un proceso por etapas.
- El desempeño de la pasta no es sensible al tipo de máscara utilizada en el PCB (para el proceso de soldadura por ola una máscara con un acabado uniforme puede generar problemas provocados por la coalescencia de soldadura generando imperfecciones en la unión y puentes entre terminales los cuales forman cortos eléctricos en el sistema).

2.3.3 Soldadura por ola

Los dos principales procesos de soldadura involucrados en la tecnología de montaje superficial son: el proceso de soldadura por ola y el proceso de soldadura por reflujo. El proceso de soldadura por ola es un proceso que involucra el flujo continuo de soldadura en el cual, la tarjeta de circuito impreso pasa a través de un domo líquido de soldadura llamado ola, este proceso tuvo sus inicios desde la tecnología pasante (TH por through hole). Las tarjetas con componentes TH adheridos se les aplica fundente, después de esta operación, estos pasarán sobre una ola laminar de soldadura.

Este proceso no es adecuado para soldar componentes de montaje superficial, debido a que el lado inferior de la tarjeta interfiere con el flujo laminar de soldadura y resulta consecuentemente en un efecto de oscurecimiento. Para minimizar el efecto de oscurecimiento se utiliza una ola dual, en la cual una ola turbulenta precede a una ola laminar.

La ola turbulenta asegura el mojado de todas las terminales mientras que la subsiguiente ola laminar remueve el exceso de soldadura, de esta manera se consigue minimizar el efecto de puentes de soldadura entre terminales. El choque térmico de las PCB puede controlarse implementando suficiente precalentamiento antes de llevar a cabo el proceso de soldadura [4].

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS DE SOLDADURA

3.1 Introducción

De forma breve se puede decir que la soldadura es un medio de unión metalúrgica en el que metal fundido es utilizado para impregnar las superficies de unión y formar un enlace entre dos partes metálicas. La comprensión de los fundamentos básicos del proceso de soldadura es determinante para la consecución de uniones con características y propiedades satisfactorias.

La principal distinción entre la soldadura utilizada en la manufactura electrónica tiene como base la temperatura de fusión del metal de aporte, la cual debe ser menor a 450°C. Para las soldaduras que funden a mayor temperatura, el proceso de unión se denomina “latonado” [7]. La tecnología de soldadura en la industria electrónica involucra dos niveles de interconexión, el primer nivel implica la interconexión de circuitos impresos, mientras que el segundo nivel comprende el montaje de componentes electrónicos en tarjetas de circuito impreso.

Aunque el proceso la soldadura ha sido utilizado por la humanidad desde hace varios cientos de años (algunos historiadores aseveran que este fue utilizado en la épocas del imperio romano) el entendimiento de sus fundamentos se traslada hasta épocas recientes [4].

3.2 Teoría del proceso de soldadura

El proceso de soldadura con fusión del material de aporte puede ser dividido en las siguientes etapas [8]:

- Dispersión.
- Disolución del metal base.
- Formación y crecimiento de compuestos intermetálicos.
- Solidificación.

Cada una de estas etapas tiene gran relevancia en la consecución de uniones de soldadura con buenas propiedades, las que permitan un desempeño adecuado durante operación [4]. El bosquejo de cada una de estas fases se muestra en la figura 3.1.

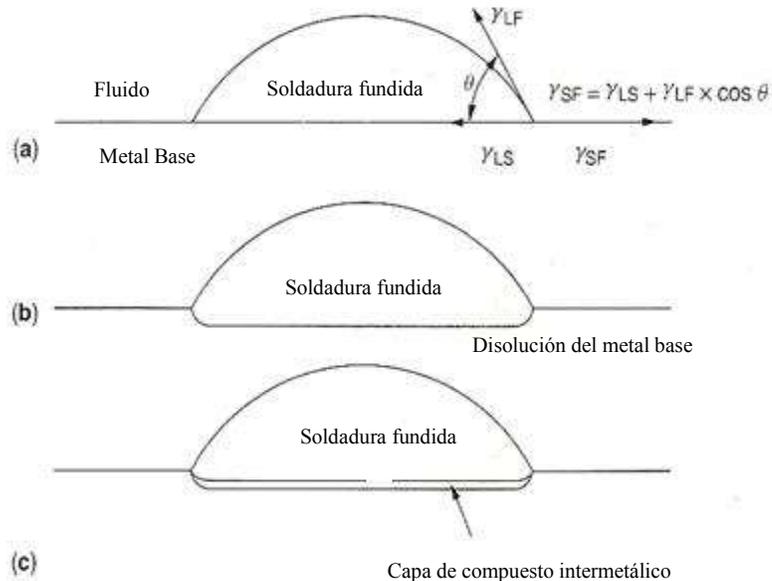


Figura 3.1 Etapas del proceso de soldadura, a) mojado de soldadura en el metal base, b) disolución del metal base, c) formación de compuesto intermetálico en la interfase.

3.2.1 Dispersión

Para llevar a cabo el proceso de soldadura, el material de aporte tiene que ser calentado hasta su temperatura de fusión, de esta manera la soldadura en estado líquido puede mojar la superficie del material base. Así como cualquier otro fenómeno de mojado, el mojado de soldadura líquida sobre un metal tiene que cumplir con las leyes físicas de balance de tensión entre interfaces representadas por la siguiente ecuación.

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cos \theta \quad (1)$$

Donde:

γ_{SF} = es la tensión entre el metal base y el fluido,

γ_{LS} = es la tensión entre el metal base y la soldadura líquida,

γ_{LF} = es la tensión entre la soldadura líquida y el fluido,

θ = representa el ángulo de contacto entre soldadura líquida y el substrato.

La ecuación anterior asume que la dispersión de un líquido en una superficie sólida alcanzará un estado de equilibrio estable cuando el ángulo de contacto alcance un valor θ donde los dos vectores de fuerza opuestos γ_{SF} y $\gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cos \theta$ permanezcan en forma balanceada.

La soldadura para la industria electrónica requiere la formación de una unión con un filete apropiado, cuya finalidad es minimizar la concentración de esfuerzos en la unión. Para desarrollar uniones de soldadura con estas características se requiere un valor del ángulo θ menor o igual 60° , este valor es necesario para asegurar el buen mojado superficial.

Un ángulo θ con estas características se puede obtener ya sea mediante un enfoque físico o mediante un enfoque químico, el enfoque físico incluye la manipulación de la tensión superficial de los materiales involucrados en el proceso de soldadura, las condiciones de estos materiales se enumeran a continuación.

- 1) Una baja tensión superficial del fundente.
- 2) Una alta tensión superficial o alta energía superficial del sustrato.
- 3) Una baja tensión superficial de la soldadura la cual permita la formación de un ángulo de contacto bajo.

Para la soldadura, el balance de tensiones entre interfaces es solamente una de las fuerzas promotoras que determinan el fenómeno de mojado superficial. En el transcurso de este fenómeno, generalmente el metal base se disuelve y reacciona con la soldadura y debido a que el proceso de soldadura se presenta de forma muy rápida y en condiciones fuera de equilibrio, factores tales como la viscosidad del fluido, disolución metálica y la reacción química entre soldadura y el metal base son de gran relevancia para el buen desarrollo de este proceso.

3.2.2 Disolución del metal base

El enlace metalúrgico necesario para desarrollo de una buena unión de soldadura requiere algo más que el mero flujo y dispersión de soldadura líquida. Para formar este enlace, tanto la soldadura y el metal base deben estar mezclados a un nivel atómico en su interfase. Este proceso va acompañado típicamente por la disolución del metal base en soldadura a un nivel microscópico menor a 100 μm [7].

En la industria electrónica, los procesos de soldadura se realizan a temperaturas bajas (menores a 220°C) y ciclos de tiempo muy cortos, frecuentemente algunos segundos o minutos, por tal motivo, la disolución de metal base debe ser razonablemente fácil y de forma rápida.

Para la aleación plomo-estaño, la principal aleación utilizada para soldadura de componentes en las pasadas décadas, algunos metales base o metalizaciones empleados con frecuencia son el Sn, Pb, Au, Ag, Cu, Pd, Pt y Ni. La velocidad de disolución (dC/dt) de algunas de estas metalizaciones para el sistema 60Sn/40Pb en función de la temperatura se presentan en la figura 3.2.

La velocidad de disolución puede ser representada por medio de la relación de Arrhenius, tal como se presenta en la figura 3.1 [7,9]. Donde C es la concentración del metal base, E es la energía de activación, k es la constante de Boltzman y T es la temperatura en grados Kelvin.

$$dC/dt \propto \exp[-E/(kt)] \quad (2)$$

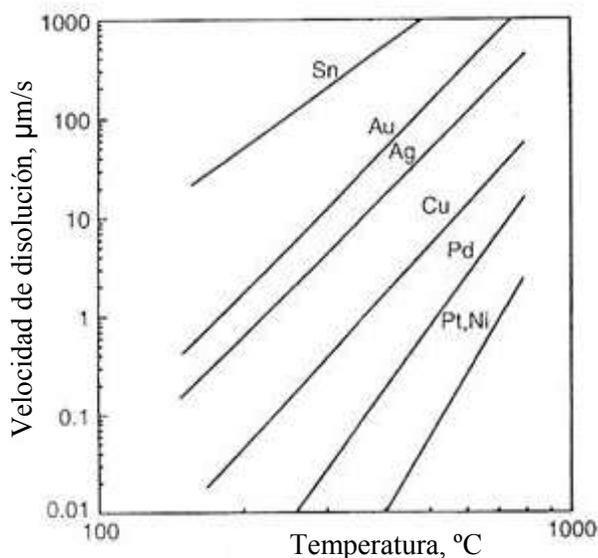


Figura 3.2 Velocidad de disolución de metales y metalizaciones comúnmente utilizados para la aleación 60Sn-40Pb en función de la temperatura [7].

La velocidad de disolución del metal base en soldadura también puede ser representada en función del tiempo, tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$dC/dt = KA(Cs-C)/V \quad (3)$$

Donde:

C : es la concentración del metal base.

Cs : es el límite de concentración del metal disuelto en
Soldadura líquida a cualquier temperatura dada.

T : es el tiempo.

K : constante de velocidad de disolución.

A : área superficial de mojado.

V : volumen de soldadura fundida.

La velocidad de disolución del metal base en soldadura líquida no solamente esta en función del tiempo, la temperatura y el tipo de metal base, ésta también involucra el tipo de aleación utilizada [9].

3.2.2 Formación y crecimiento de fases intermedias

El proceso de soldadura no sólo comprende la disolución física del metal base en soldadura fundida, también involucra productos de reacción química entre el metal base y los componentes soldados. Los productos de reacción típicamente son compuestos intermetálicos (IMC) los cuales se forman en las interfaces entre la soldadura y el metal base, tal como se mostró en la figura 3.1

La formación de estos compuestos en soldadura incluye los siguientes efectos:

- Incremento de la mojabilidad de la soldadura en el metal base.
- Disminución de la velocidad de disolución del metal base en soldadura debido a sus características de barrera difusiva.
- Susceptibilidad a la oxidación.

A continuación se detalla cada uno de los efectos generados debido a la generación de estos compuestos.

Incremento de mojabilidad.

La mojabilidad del metal incrementa con el aumento de la velocidad de formación de intermetálicos y este comportamiento está en función de su velocidad de formación.

El primer compuesto intermetálico en formarse a través de la interfase soldadura-metal base puede ser pronosticado calculando el equilibrio meta-estable entre metal y soldadura en fase líquida y de esta forma derivar la fuerza promotora de formación de las fases individuales.

La disolución del metal base y la velocidad de formación de intermetálicos están en función del tiempo de reacción, temperatura de operación, acabado superficial y del tipo de soldadura utilizada.

Barrera difusiva

En general los IMCs poseen un punto de fusión mayor a la temperatura alcanzada durante el proceso de soldadura. En muchos sistemas estos compuestos generalmente forman una capa continua entre metal base y soldadura [10], ocasionando la disminución de la velocidad de difusión de átomos del metal base a través de los IMC. Este fenómeno se atribuye a que el proceso de difusión en estado sólido es menor, aproximadamente en dos órdenes de magnitud, a las reacciones generadas en los estados solido-líquido.

No todos los compuestos intermetálicos forman estructuras uniformes. Por ejemplo, el intermetálico Cu_6Sn_5 presente entre la soldadura eutéctica Sn-Pb y el metal base cobre, tiene un crecimiento de grano en forma curvada (nodular) a través de la interfase soldadura-cobre.

3.3 Intermetálicos

Cuando dos elementos metálicos tienen una limitada solubilidad entre ellos, la aleación resultante puede formar nuevas fases al momento de solidificar. Estas nuevas fases no se encuentran en solución sólida y son conocidas como fases intermedias, compuestos intermetálicos (IMC) o simplemente como intermetálicos [12].

Los intermetálicos pueden ser categorizados como compuestos estequiométricos y no estequiométricos [7] y sus propiedades metálicas son caracterizadas por la densidad de electrones que unen conjuntamente los átomos del compuesto.

Un compuesto exactamente estequiométrico tiende a formarse cuando uno de los dos elementos es fuertemente metálico y el otro tiene un carácter significativamente menor. Las estructuras cristalinas formadas frecuentemente poseen baja simetría, lo cual restringe la dirección del flujo plástico ocasionando compuestos frágiles y duros. Las interfases entre estos compuestos y otras fases tienden a ser débiles, ejemplos de tales compuestos intermetálicos incluyen Cu_3P , Cu_3Sn , Cu_6Sn_5 .

Los compuestos no-estequiométricos son referidos como compuestos que son estables sobre un rango de composiciones [7]. Estos compuestos tienden a ser moderadamente dúctiles y presentan estructuras cristalinas de alta simetría, así mismo poseen un efecto despreciable en las propiedades de la unión soldada. Ejemplos de estos compuestos incluyen la fase rica en plata Ag_3Sn , la cual es estable sobre un rango de composiciones de 3% a 20% Ag a temperatura ambiente.

Los compuestos intermetálicos (IMC) estequiométricos presentan una baja resistencia a la tensión y al cortante [13] así como una deficiente mojabilidad de soldadura, por tal motivo, el crecimiento de este tipo de compuesto debe ser restringido de los sistemas de aleaciones en soldaduras.

La morfología de los IMC depende fuertemente de sus condiciones de formación. Steen [14] ha reportado que la forma y crecimiento de IMC formados entre el metal base y soldadura líquida dependen del espesor y el estado del flujo de la soldadura líquida, como se muestra en la figura 3.3.

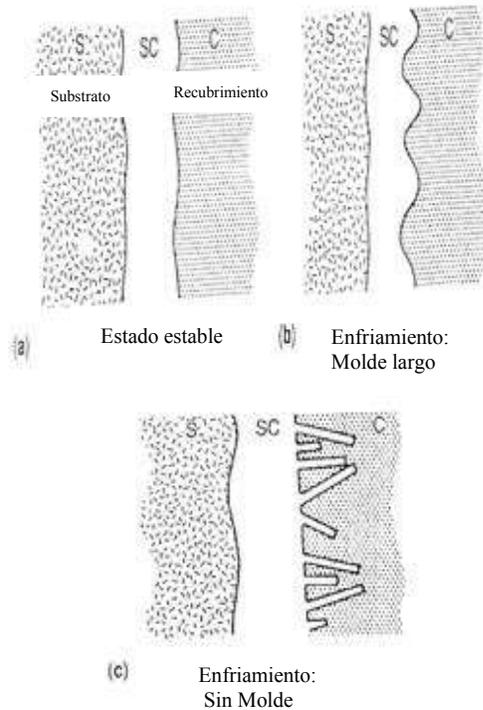


Figura 3.3 Diagrama esquemático mostrando el crecimiento de IMC en contacto con soldadura líquida Sn-Pb, a) estado estable, b) enfriamiento mediante molde de soldadura, b) enfriamiento sin molde [14].

La superficie de la capa de IMC es relativamente plana bajo condiciones de flujo estable, como se muestra en la figura 3.3(a). Durante el enfriamiento que se muestra en las figuras 3.3 (b) y (c), la exclusión de otras especies tales como el plomo e impurezas de la soldadura Sn-Pb resultan en una estructura nodular o una estructura dendrítica dependiendo en la velocidad de enfriamiento y la habilidad de la soldadura líquida para minimizar el gradiente de concentración en la interfase.

Los compuestos intermetálicos encontrados comúnmente en la industria electrónica son los compuestos binarios Cu_3Sn y Cu_6Sn_5 . La fase Cu_6Sn_5 se forma a todas las temperaturas y tiene una estructura de grano relativamente burda. Para temperaturas mayores de 60°C la fase Cu_3Sn comenzará a crecer en la interfase $\text{Cu-Cu}_6\text{Sn}_5$ [15,16]. Los factores que afectan el espesor del IMC incluyen el tiempo, temperatura, tipo de metalización del metal base y la composición de la soldadura [17].

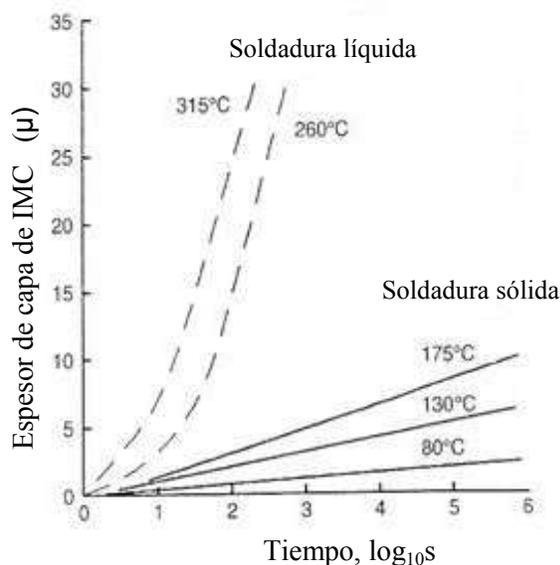


Figura 3.4 Velocidad de crecimiento del intermetálico Cu/Sn en Cu mojado por la aleación $63\text{Sn}37\text{Pb}$ [13].

Debido a que el IMC es el producto de la reacción entre dos metales, su velocidad de formación se ve afectada por la temperatura y tiempo de reacción. La figura 3.4 muestra el crecimiento de intermetálicos binarios Cu-Sn en cobre impregnado por la aleación $63\text{Sn}37\text{Pb}$, el crecimiento de estas fases está en función del tiempo y temperatura [13].

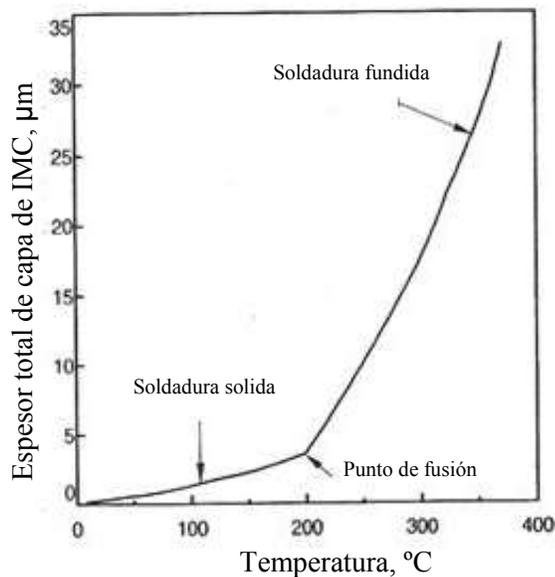


Figura 3.5 Crecimiento de intermetálicos Cu-Sn en contacto con cobre a diferentes temperaturas para la aleación 63Sn37Pb [13].

La velocidad de crecimiento del IMC tiene una fuerte dependencia con el estado de agregación presente, tal como se muestra en la figura 3.5, la velocidad de crecimiento incrementa ligeramente de manera inicial con el aumento de temperatura antes de alcanzar la temperatura de fusión de la soldadura. Por arriba de la temperatura de fusión, la velocidad de crecimiento del IMC se desarrolla mucho más rápidamente.

La gran velocidad de formación de IMC para soldaduras con alto contenido de estaño, sugiere que estas fases pueden presentar un efecto importante en las soldaduras libres de plomo como remplazo de la aleación eutéctica 63Sn37Pb. La figura 3.6 muestra el efecto del espesor del compuesto intermetálico Cu-Sn sobre la resistencia a la tensión de la unión de soldadura.

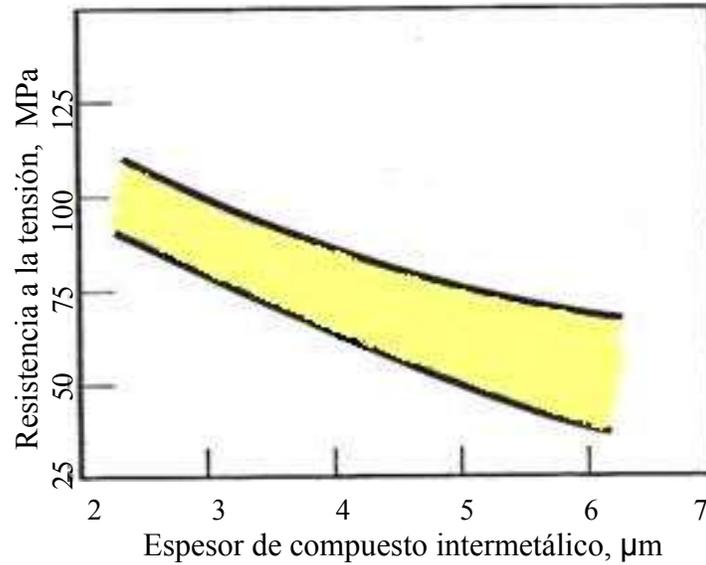


Figura 3.6 Efecto del espesor del compuesto intermetálico Cu-Sn sobre la resistencia a la tensión para la aleación 63Sn37Pb a temperatura ambiente [13].

Algunas soluciones para minimizar la formación de compuestos intermetálicos son: llevar a cabo el proceso de soldadura a bajas temperaturas y por periodos de tiempo cortos, emplear barreras metálicas para restringir la evolución de los compuestos y el uso de soldaduras con contenidos de estaño no muy elevados [4].

3.4 Soldaduras libres de plomo

Los principios que rigen a las soldaduras libres de plomo no son fundamentalmente diferentes a los principios que gobiernan las soldaduras plomo-estaño. Los procesos de soldadura mediante el uso de aleaciones libres de plomo son hoy en día una realidad comercial, y en el transcurso de unos cuantos años, es probable que la vasta mayoría de productos electrónicos y opto-electrónicos sean manufacturados utilizando esta nueva tecnología.

En 1998, la unión Europea introdujo un directiva de seguimiento (precursor de una ley) enfocada hacia los desechos de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE por sus siglas en inglés), la cual tiene como objetivo la eliminación del uso de plomo en sistemas electrónicos, excepto para el uso automotriz, a partir del primero de enero del 2004. La directiva WEEE intenta prohibir la venta, importación y exportación de equipos eléctricos y electrónicos que contengan plomo.

Así mismo, la asociación Japonesa para el desarrollo electrónico industrial (JEIDA) y el instituto Japonés para el empaquetamiento electrónico (JIEP) presentaron una propuesta para la implementación de la tecnología libre de plomo a partir de abril del 2001.

Los efectos combinados de estas propuestas tuvieron un gran efecto en el resto del mundo en el seguimiento y generación de una amplia investigación en los procesos de soldadura, equipos y desarrollo de materiales. Durante la década de 1990 se llevo acabo una gran cantidad de investigación y desarrollo sobre aleaciones libres de plomo.

Aunque los esfuerzos realizados no tuvieron la coordinación necesaria, las conclusiones de estos estudios fueron remarcablemente similares.

Sin embargo, las penalizaciones de las legislaciones actuales han sido revocadas y la unión europea ha expandido la categoría de excepciones así como el aplazamiento de la fecha de implementación de 2006 ó 2008 (la fecha no esta firmemente definida).

No obstante, la mayoría de las compañías han aceptado la tarea de manufacturar productos no dañinos hacia el medio ambiente. La mayoría del trabajo desarrollado en soldaduras libres de plomo se ha concentrado en la necesidad de encontrar un remplazo para la aleación eutéctica plomo-estaño, mientras que este intento ha sido exitoso, no ha habido alternativas exitosas para remplazar la familia de aleaciones plomo-estaño de alto punto de fusión (alrededor de 300°C) reconociendo este hecho, las legislaciones han exentado de la agenda a las soldaduras de alto punto de fusión.

La aleación eutéctica plomo-estaño tiene muchas características significativas, entre estas: un excelente comportamiento de mojado, dispersión y un rango de propiedades físicas de gran relevancia. Sin embargo, debido a que las industrias electrónicas y lumínicas se han desarrollado alrededor de este sistema de aleación, todos los materiales asociados, componentes y procesos subsecuentes fueron implementados para ser compatibles con sus propiedades y limitaciones.

El principal objetivo del trabajo realizado sobre soldaduras libres de plomo ha tenido como base la búsqueda de un remplazo para la aleación plomo-estaño que pudiera ser utilizada a la misma temperatura de proceso de esta aleación, con los mismos equipos, substratos y fundentes y que pudiera proporcionar una confiabilidad comparable a éstas. Sin embargo, esto no era técnicamente posible, y en cambio, hoy en día existen varias familias de soldaduras libres de plomo, cada una adecuada para un grupo diferente de aplicaciones y compatible con un limitado número de metalizaciones y procesos [2,4].

3.4.1 Alternativas para soldaduras plomo-estaño

En la primera mitad de 1990 se estimó que la industria electrónica utilizaba aproximadamente 60,000 toneladas de soldadura plomo-estaño cada año y la industria lumínica una cantidad algo mayor. Esta aleación se utiliza para hacer aproximadamente 10^{13} uniones de soldadura por año [18]. Cualquier aleación para ser considerada como soldadura en la industria electrónica, debe presentar cualidades específicas sobre los siguientes criterios:

- rangos de fusión: La soldadura alternativa debe tener una ventana de proceso suficientemente baja para que los componentes electrónicos no sean dañados por el proceso de soldadura.

- Características físicas y químicas: las nuevas soldaduras libre de plomo deben poseer un buen mojado y dispersión en los materiales ingenieriles comúnmente utilizados, tales como; el oro, plata, platino, paladio, níquel, estaño, cobre y hierro. Idealmente, la soldadura debe ser compatible con la tecnología de fundente existente. La soldadura también debe ser suficientemente inerte para resistir ambientes corrosivos asociados con equipos electrónicos.
- Aspectos de seguridad, salud y ambientales: la aleación y sus componentes no deben presentar toxicidad, esto automáticamente descarta el uso de aleaciones que contengan cadmio, talio y mercurio. La toxicidad intrínseca de estos materiales los restringe de ser considerados constituyentes de las nuevas aleaciones libres de plomo.

Consideraciones similares aplican para las formulaciones de fundente para su uso con estas nuevas soldaduras y los químicos utilizados para remover los residuos de fundente del ensamble después de fabricación. Una consideración aún mayor es la contaminación y el daño ambiental que surge del incremento en extracción de los ingredientes de aleación en respuesta a la nueva demanda.

Para que una aleación sea considerada como un remplazo potencial de las soldaduras plomo-estaño, sus constituyentes deben ser suficientemente abundantes, esta condición de disponibilidad es necesaria para asegurar que la aleación o aleaciones no estén sujetas a restricciones de suministro o precio, lo cual pudiera prevenir su adopción a nivel global.

Considerando las cuestiones de disponibilidad, costo, punto de fusión y asuntos ambientales; deja al estaño como el único elemento con el que las nuevas soldaduras libres de plomo pueden ser desarrolladas.

Debido a que el estaño funde a 232°C (450°F), se hace necesaria la adición de elementos de aleación para disminuir la temperatura de *líquidus* y preferiblemente, reducir el costo, debido a que el estaño es relativamente costoso en comparación con el plomo. Casi sin excepción, las soldaduras libres de plomo se basan en el eutéctico plata-cobre-estaño con pequeñas adiciones opcionales de bismuto, antimonio, indio y cinc. La mayoría de las nuevas aleaciones libres de plomo tienen contenidos de 94 a 97% de estaño.

El bismuto es recomendado frecuentemente como un aditivo para las soldaduras libres de plomo, debido a sus efectos en el punto de fusión y sus propiedades mecánicas [2].

3.4.2 Diagrama de fase ternario plata-cobre-estaño

De las aleaciones libres de plomo comúnmente utilizadas en la industria electrónica, las aleaciones ternarias Sn-Ag-Cu son las más extensamente utilizadas, debido a sus propiedades mecánicas y su relativamente bajo punto de fusión. Estas aleaciones pueden contener adiciones menores de elementos modificadores para mejorar algunas propiedades físicas.

La composición de la soldadura deberá tener el menor punto de fusión posible, aunque este se encontrará arriba del rango de la aleación eutéctica plomo-estaño. El principal componente será el estaño, con un punto de fusión de 231.9°C. El segundo componente es la plata, con un punto de fusión mayor de 960.5°C.

Sin embargo, en pequeñas adiciones, la plata disminuye el punto de fusión aproximadamente 11°C. El tercer elemento es el cobre, con un punto de fusión de 1083°C, este elemento al igual que la plata disminuye el punto de fusión de la aleación aproximadamente 5°C. Las composiciones probables estarán entre plata de 2.5% a 5.0%, cobre de 0.25% a 3.0% y el resto estaño.

La mayoría de las aleaciones candidatas como remplazo para la aleación eutéctica plomo-estaño contienen mas del 90% de estaño, lo cual sugiere que las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las aleaciones libres de plomo propuestas estarán fuertemente influenciadas por las propiedades del estaño.

La importancia de las aleaciones Sn-Ag-Cu en la tecnología de soldaduras libre de plomo, hace necesaria la determinación confiable de la constitución del diagrama de fase plata-cobre-estaño mediante la ayuda de técnicas analíticas modernas, las relaciones de fases en este sistema han sido revisadas y determinadas de manera precisa recientemente. En la actualidad se considera generalmente que la composición del eutéctico ternario bajo condiciones de equilibrio es 3.5Ag0.9Cu95.6Sn, con un punto eutéctico a 217.1°C. Una proyección completa de la zona de *liquidus* del sistema ternario se muestra en la figura 3.7.

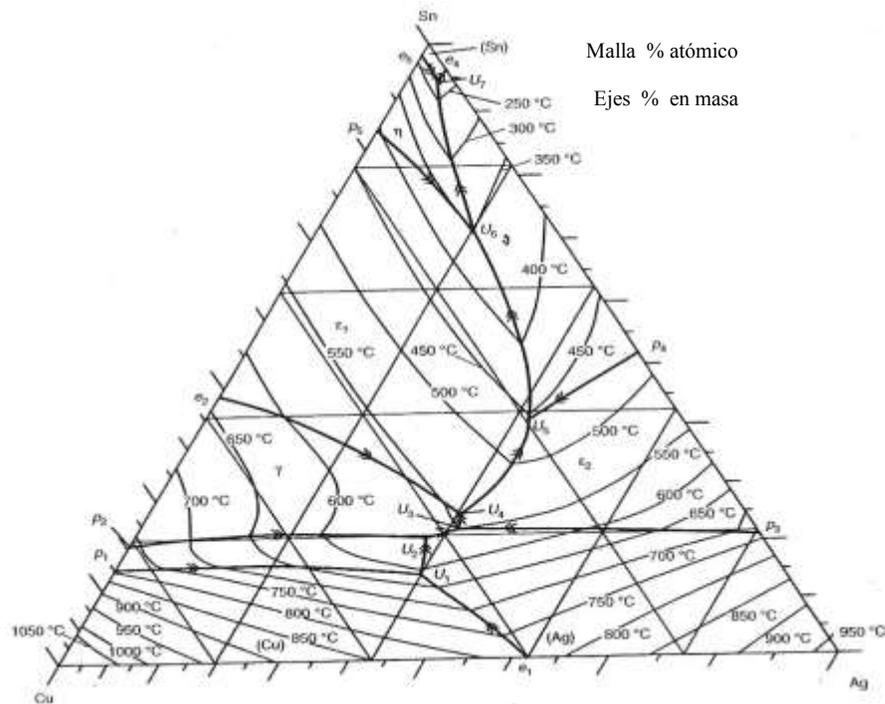


Figura 3.7 *Liquidus* del sistema Ag-Cu-Sn [19].

3.4.3 Propiedades físicas, químicas y metalúrgicas de las soldaduras libres de plomo

La mayoría de las soldaduras libres de plomo candidatas tienen una composición eutéctica binaria o ternaria, puesto que la composición eutéctica proporciona ciertos beneficios tales como menor temperatura de fusión de todas las aleaciones que comprenden el sistema y la capacidad de fundir a temperatura constante durante el calentamiento.

Las características microestructurales de una aleación eutéctica, tales como la fracción volumétrica, la distribución y el tamaño o espaciamiento de cada fase, determinan las propiedades físicas y mecánicas de una unión de soldadura.

La microestructura de la aleación eutéctica Sn-Ag-Cu es influenciada significativamente por la velocidad de enfriamiento durante la operación de soldadura, por consiguiente, sus propiedades mecánicas y físicas son influenciadas de manera notable por la velocidad de enfriamiento.

Las propiedades físicas, químicas y metalúrgicas de las soldaduras libres de plomo no son particularmente diferentes a las propiedades de las demás soldaduras. Las soldaduras libres de plomo presentan características de mojabilidad, dispersión y otras propiedades que tiene gran similitud [20].

3.4.4 Tensión superficial

La tensión superficial del estaño puede aumentar o disminuir por la adición de otros elementos en menor proporción. El plomo, bismuto y antimonio causan una reducción de la tensión superficial, mientras que la plata y el cobre la incrementan. Algunos valores de tensión superficial se muestran en la Tabla 3.1, los valores de tensión superficial de soldaduras expuestas al aire son típicamente menores que los presentes en una atmósfera inerte, debido a que la oxidación reduce la energía superficial de la soldadura fundida [2].

Tabla 3.1 Valores medidos de tensión superficial para soldaduras de aleaciones binarias en aire y nitrógeno [2].

Aleación	Tensión superficial mN / m	
	Aire	Nitrógeno
Bi-43Sn	319	349
Sn-9Zn	518	487
Pb-62Sn	417	464
Ag-96Sn	431	493
Cu-99Sn	491	461
Sb-95Sn	468	495

Condiciones de prueba: Temperatura, 250°C (482 °F); sustrato politetrafluoroetileno; SNMA. (Fuente: RMA)

3.4.5 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas son extremadamente sensibles a la velocidad de deformación, debido a que poseen gran dependencia con tamaño de grano, las dimensiones de la unión y el efecto de aleación entre los materiales base y metalizaciones. Por tales motivos las mediciones de estas propiedades resultan un tanto desafiantes. La Tabla 3.2 muestra las propiedades de varios sistemas de aleación medidos a una velocidad de deformación particular.

Tabla 3.2 Propiedades mecánicas comparativas de sistemas de soldaduras seleccionadas a temperatura ambiente [2].

Aleación	Modulo elástico GPa	Resistencia última* MPa	Resistencia al corte* MPa	Elongación* %
Pb-62Sn	39	50	35	50
Ag-96Sn	50	60	30	70
Bi-43Sn	42	70	30	10
In-49Sn	24	20	10	100

(*)· Medidos a una velocidad de deformación de 0.001 s^{-1}

Para las aleaciones que están compuestas principalmente de una mezcla de dos metales puros, el módulo elástico puede ser estimado mediante la regla de las mezclas, tomando como base la fracción de volumen de cada una de las fases. Únicamente para la aleación indio-estaño el módulo elástico no puede ser determinado en base a información de sus respectivos metales, debido a que el eutéctico indio-estaño está formado entre dos compuestos intermetálicos de indio en estaño.

La capacidad de elongación es una propiedad importante para las soldaduras debido a que una elevada ductilidad aumenta la resistencia del material a la fatiga de bajo ciclo [2].

CAPÍTULO 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción

El ensamble de componentes electrónicos (particularmente, conectores de montaje superficial) mediante el uso aleaciones de plomo, se ha llevado a cabo con gran éxito durante los últimos años. Sin embargo, como se mencionó en los capítulos anteriores, existe una tendencia a nivel mundial sobre el uso de aleaciones libres de plomo para el ensamble de componentes en tarjetas de circuito impreso. Para el caso de estudio que se expone en este capítulo, se utilizó la aleación ternaria libre de plomo Sn-Ag-Cu en forma de alambre de soldadura con un núcleo de fundente al 2%, para llevar a cabo la evaluación de las condiciones establecidas.

Un método experimental fue desarrollado para cumplir con el objetivo del presente estudio y de esta manera poder hacer la evaluación de las condiciones establecidas en base a las técnicas disponibles.

4.2 Objetivo de la experimentación

El objetivo de la experimentación se basa en la determinación de los parámetros críticos que afectan el proceso de soldadura selectiva por haz de luz, la determinación de estos parámetros se llevó a cabo mediante la evaluación de las uniones soldadas por medio de técnicas metalográficas y mediante equipos de análisis ópticos y electrónicos.

4.3 Selección de muestras

La primera etapa de la experimentación está dedicada a la recolección, selección y clasificación de 24 tarjetas de circuito impreso y de 24 conectores que se ensamblaron mediante el equipo de soldadura por haz de luz. Los conectores son montados superficialmente en el borde de la tarjeta, para posteriormente ser unidos por medio del equipo de soldadura selectiva, estos conectores son soldados tanto por el lado primario así como por el lado secundario de la tarjeta de circuito impreso. En la figura 4.1 se puede observar el montaje del conector sobre el borde de la tarjeta de circuito impreso, mientras que en la figura 4.2 se presenta una vista lateral de la unión de soldadura.

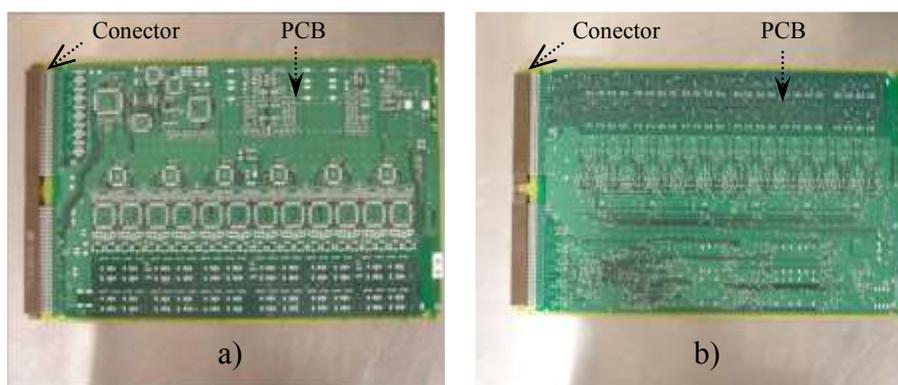


Figura 4.1 Tarjeta de circuito impreso con conector ensamblado, a) lado primario, b) lado secundario.

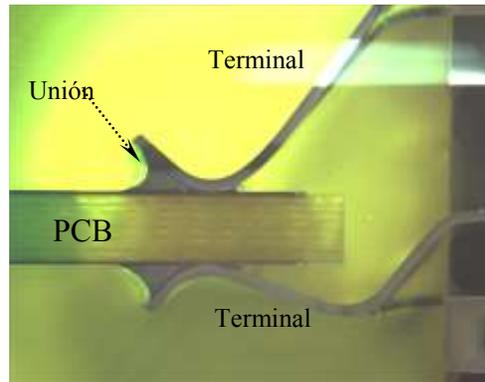


Figura 4.2 Conector montado superficialmente en el borde de la tarjeta de circuito impreso.

Tal como se mencionó en el párrafo anterior, la experimentación consistió en la evaluación de 24 condiciones, en la Tabla 4.1 se muestra cada una de las condiciones evaluadas. Por cada condición fue necesario soldar las doscientas terminales de cada conector para su montaje superficial en cada tarjeta.

El acabado superficial del conector aplicado a las terminales comprende una capa de estaño sobre una superficie recubierta por níquel, mientras que para las tarjetas de circuito impreso el acabado superficial es a base de plata aplicada por inmersión (comúnmente referido como ImmAg). Tal como se discutió anteriormente, estos acabados superficiales tienen la finalidad de disminuir la velocidad de disolución del metal base.

Tabla 4.1. Parámetros seleccionados para cada condición soldada por el equipo de haz de luz mediante la aleación Sn3.8Ag0.7Cu.

Condición	Con o sin fundente	Potencia (W)	Velocidad de alimentación de soldadura (mm/s)	Rapidez del haz (mm/s)
A1	SIN	34	4	2
A2	SIN	34	6	2
A3	SIN	34	4	4
A4	SIN	34	6	4
A5	SIN	30	4	2
A6	SIN	30	6	4
A7	SIN	30	4	4
A8	SIN	30	6	2
A9	SIN	38	8	6
A10	SIN	42	4	6
A11	SIN	40	6	4
A12	SIN	40	6	6
B1	CON	34	4	2
B2	CON	34	6	2
B3	CON	34	4	4
B4	CON	34	6	4
B5	CON	30	4	2
B6	CON	30	6	4
B7	CON	30	4	4
B8	CON	30	6	2
B9	CON	38	8	6
B10	CON	42	4	6
B11	CON	40	6	4
B12	CON	40	6	6

Las condiciones presentadas en la Tabla 4.1 muestran los parámetros de evaluación de potencia, velocidad de alimentación de soldadura y rapidez de posicionamiento del haz, así mismo se agrega otro factor el que hace referencia a la adición o a la falta de adición de fundente. Como se mencionó en la sección 4.1, el alambre de soldadura utilizado contenía un núcleo de fundente por lo que cuando se hace referencia a la adición de este, se entiende como una adición extra. La aplicación de fundente se llevó a cabo de forma manual para cada uno de los conectores ensamblados.

Una vez desarrollado el proceso de soldadura de cada una de las 24 condiciones, se procedió a la evaluación y selección de las condiciones que presentaron mejores resultados, estas condiciones serán discutidas en el siguiente capítulo.

Hasta ahora sólo se han mencionado los primeros pasos de la experimentación, para exhibir una visión más general de todas las etapas involucradas es conveniente la presentación de un diagrama de flujo de experimentos que represente la secuencia de eventos de forma sistemática, tal como se muestra en la figura 4.2.

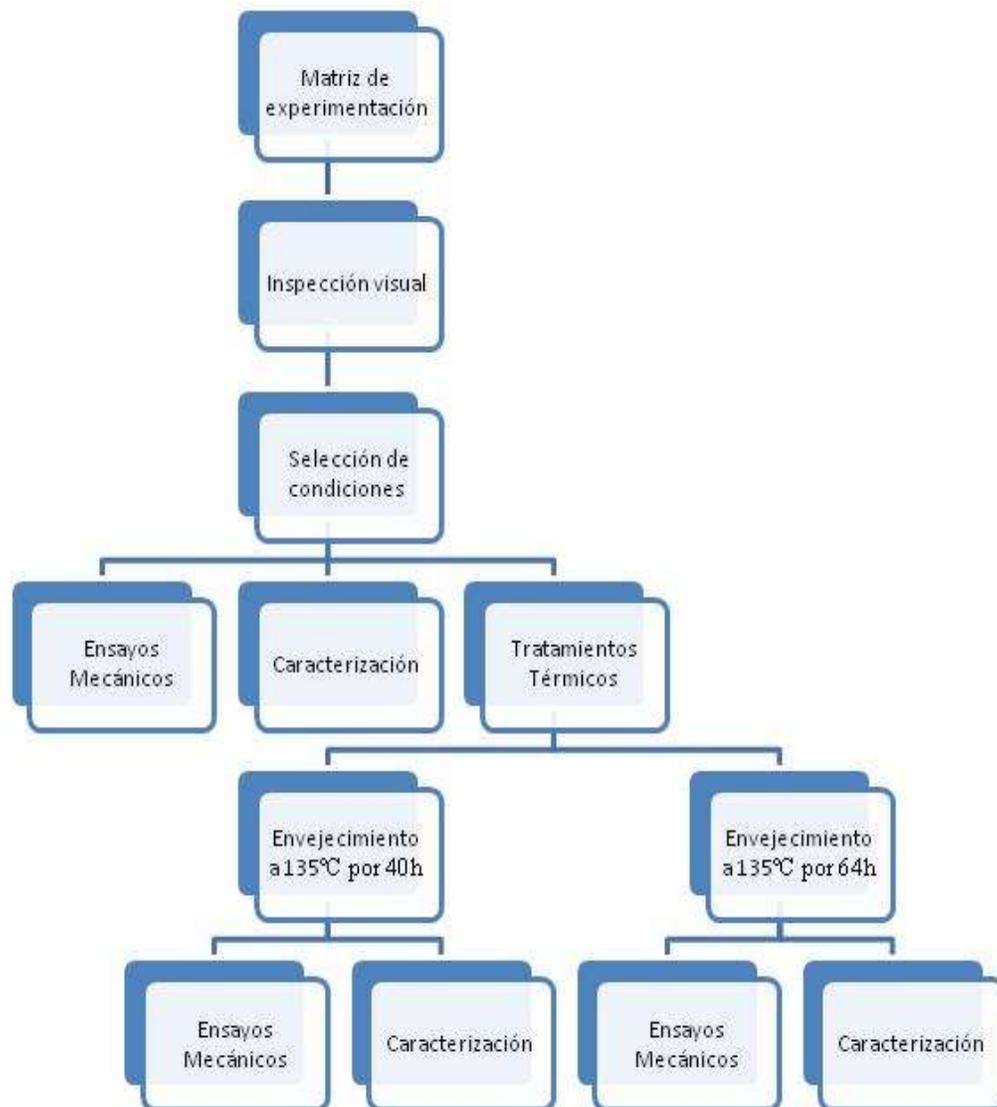


Figura 4.2 Diagrama de flujo de la etapa experimental.

4.4 Equipos de pruebas

4.4.1 Equipo de soldadura por haz de luz

La operación de soldadura de las 24 condiciones a evaluación fue desarrollada mediante el equipo de soldadura selectiva por haz de luz, ver figura 4.3. Los parámetros de proceso a evaluación fueron, la potencia del haz, la rapidez de posicionamiento del haz y la velocidad de alimentación del alambre de soldadura. Para el parámetro de potencia se tomaron valores de 30 a 42 W, para la velocidad de alimentación de soldadura fueron de 4 a 8 mm/s y la rapidez de posicionamiento del haz de 2 a 6 mm/s.



Figura 4.3 Equipo de soldadura por haz de luz, a) lado frontal, b) lado lateral.

Después de que los 24 conectores fueron soldados, se procedió a inspeccionar cada uno de ellos por microscopía estereoscópica, registrando la presencia de defectos tales como insuficiencia de soldadura, cortos entre terminales, marcas de quemaduras en el sustrato, exceso de soldadura y soldadura fría. Este último defecto es generado debido a la insuficiencia térmica la cual no permite alcanzar la temperatura de fusión en algunas localidades específicas. La serie de defectos mencionados anteriormente no son aceptables, debido a que pueden causar fallos eléctricos o mecánicos en las uniones soldadas. En la figura 4.4 se muestra el equipo de microscopía estereoscópica utilizado, además de las características de los defectos registrados a través de la experimentación.

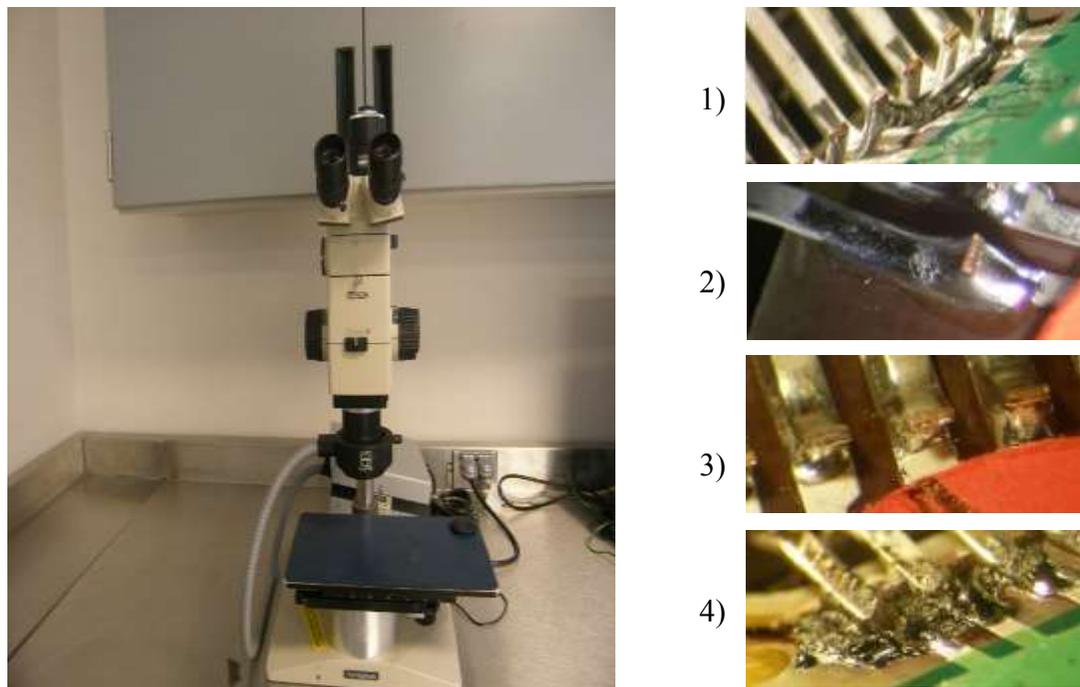


Figura 4.4 Microscopio estereoscópico y características de los defectos registrados a través de la experimentación: 1) cortos, 2) exceso de soldadura, 3) insuficiencia de soldadura, 4) soldadura fría.

La evaluación realizada en cada una de las condiciones mencionadas, permitió seleccionar las cinco condiciones con menor cantidad de defectos, los resultados se presentan en el siguiente capítulo.

4.4.2 Equipo de pruebas mecánicas

Los ensayos de resistencia a la tensión se llevaron a cabo mediante el equipo INSTRON modelo 4443, ver figura 4.5(a). Inicialmente, las tarjetas fueron seccionadas para separar la región de interés (esta región es referida como el conector) y después se procedió a retirar el cuerpo del componente de la tarjeta, dejando solamente las terminales unidas a la PCB, tal como se muestra en la figura 4.5(c). Un total de veinte terminales fueron ensayadas para cada una de las condiciones seleccionadas, diez de ellas para el lado primario y las diez restantes para el lado secundario de la tarjeta.



Figura 4.5 (a) Equipo electromecánico utilizado para llevar a cabo los ensayos de tensión de las condiciones seleccionadas, (b) seccionado de la PCB, (c) operación del ensayo.

El equipo electromecánico utilizado posee dos celdas de carga, una de 100 N y otra de 1000 N, para el desarrollo de los ensayos de tensión se utilizó la de 100 N, esta celda proporciona la fuerza necesaria para la realización de los ensayos con una mayor exactitud. La velocidad de desplazamiento en la ejecución de las pruebas se mantuvo a 10 mm/min, procurando un ángulo de 90° entre la tarjeta de circuito impreso y la dirección de tensión.

4.5 Caracterización

4.5.1 Preparación metalográfica.

Una vez concluida la operación de soldadura de las 24 condiciones expuestas en la Tabla 4.1, las muestras fueron seccionadas y montadas mediante resina epoxica para su posterior análisis metalográfico, en la figura 4.6 se puede observar el equipo utilizado para el seccionado y esmerilado de las muestras a evaluar.



Figura 4.6. Equipo utilizado para el seccionado y esmerilado de las muestras.

Después de la operación de montaje de muestras y del tiempo pertinente para su solidificación, las muestras fueron sometidas a un desbaste grueso, por medio del uso de técnicas estándar de lijado con papel de carburo de silicio, este desbaste se llevó a cabo mediante lija número 120 de tamaño de grano. Después de esta operación, las muestras fueron sometidas a un desbaste fino mediante lijas de tamaño de grano número 200, 400, 600, 800, 1200, 2400 y 4000. Los equipos utilizados para la preparación metalografica son mostrados en las figuras 4.7.



Figura 4.7. Equipo utilizado para el lijado grueso y fino de las muestras evaluadas.

Una vez concluido el lijado grueso y fino de las muestras, éstas fueron pulidas mediante pasta de diamante con tamaño de partícula de $1 \mu\text{m}$, y con sílice coloidal con partícula de $0.05 \mu\text{m}$, con esta última operación de pulido se logró revelar las fases intermedias presentes entre las interfases soldadura-metal base y soldadura terminal. Los equipos utilizados en la preparación metalografica de las muestras son expuestos en la figura 4.8.



Figura 4.8. Equipo empleado para el pulido final de las muestras evaluadas.

4.5.2 Microscopía óptica.

Una vez concluida la preparación metalográfica de las muestras, se procedió a su análisis, para este motivo, fue utilizado el equipo de microscopía óptica OLYMPUS modelo BX51 que se muestra en la figura 4.9. Se analizaron las uniones de soldadura a varias magnificaciones, para la observación del buen formado del filete de soldadura y la evaluación de los compuestos intermetálicos presentes en las interfaces, la medición de estas fases fue exitosamente llevada a cabo por este equipo a 2500 magnificaciones.



Figura 4.9. Equipo de microscopía óptica utilizado para la evaluación de las uniones preparadas metalográficamente.

4.5.3 Microscopía Electrónica.

La composición química de los compuestos intermetálicos presentes tanto en las interfases, así como en el volumen de las uniones soldadas fue obtenida por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM), mediante el dispositivo JEOL modelo JSM-5600 equipado con espectroscopia de energía dispersiva (EDS) equipo OXFORD modelo INCA 350. En la figura 4.10 se observar el microscopio electrónico utilizado.



Figura 4.10. Equipo de microscopía electrónica de barrido equipado con EDS utilizado para la evaluación cuantitativa de las fases Intermetálicas.

4.5.4 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos fueron realizados de manera isotérmica a 135°C por 40 y 64 horas para las condiciones seleccionadas dentro de las 24 condiciones evaluadas.

Después de haber concluido estos tratamientos, se procedió a la evaluación mecánica de las uniones soldadas por medio de ensayos de resistencia a la tensión, en la que fueron probadas veinte terminales por cada condición. Una vez concluida la evaluación mecánica de las condiciones, se procedió con la medición del espesor de los compuestos Intermetálicos presentes, para ello una vez mas, fueron utilizadas técnicas estándares para su preparación Metalográfica, tal como se describe en la sección 4.5.1.

Los espesores de los compuestos intermetálicos fueron comparados con los espesores de muestras a las cuales se les aplicó el tratamiento térmico, la medición y cuantificación de estos compuestos se llevó acabo por medio de microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido.

La finalidad de los tratamientos térmicos efectuados fue estudiar el crecimiento del espesor de los IMC y su efecto en la resistencia a la tensión en las cinco condiciones seleccionadas. El equipo empleado para la operación de envejecimiento fue el horno ISOTEMP MOD 285A FISHER SCIENTIFIC, el cual se muestra a en la figura 4.11.



Figura 4.11. Equipo utilizado para la realización de los tratamientos térmicos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Introducción

Este capítulo está dedicado a la presentación y discusión de los resultados conseguidos mediante las diferentes pruebas y evaluaciones realizadas sobre las uniones de soldadura. El análisis de los compuestos intermetálicos y su efecto sobre la resistencia de las uniones es presentado a través de los diversos gráficos de este capítulo. Para la determinación de la máxima resistencia de las uniones fue necesario someter a tratamientos térmicos algunas condiciones seleccionadas, los resultados adquiridos permiten observar un incremento de resistencia a medida que estos compuestos aumentan su grosor, sin embargo, existe un punto a partir del cual las propiedades de la unión disminuyen a medida que el grosor de los compuestos continúa incrementándose. La secuencia de exposición de los datos se realizará siguiendo el orden establecido en la metodología experimental descrita en el figura 4.2, Para facilitar la interpretación y discusión de los valores obtenidos, estos se representarán a través de tablas y gráficos.

5.2 Inspección de las uniones.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la inspección visual para las 24 condiciones establecidas, ver Tabla 5.1. Los defectos considerados fueron evaluados de acuerdo a las normas IPC de la industria electrónica, los cuales son mostrados en el Apéndice B.

Tabla 5.1 Resultados de la evaluación visual de las condiciones ensambladas por medio del equipo de soldadura por haz de luz.

Condición	Sol. Frías	Cortos	Insuficiencia	Excesos	Total Defectos
A1	8	7	16	0	31
A2	0	0	20	0	20
A3	2	1	2	1	6
A4	1	2	2	1	6
A5**	50	50	55	0	155
A6	36	51	9	0	96
A7	3	20	3	5	31
A8	2	10	50	0	62
A9	0	0	0	1	1
A10***	0	0	4	1	5
A11	0	0	1	0	1
A12 ***	0	0	3	2	1
B1	1	1	2	0	4
B2	0	0	6	0	6
B3	0	0	0	0	0
B4	0	0	2	0	2
B5*	68	99	79	0	246
B6**	4	2	3	0	9
B7	9	1	1	0	11
B8	1	30	0	0	31
B9	1	0	0	1	2
B10 ***	0	0	5	1	6
B11*	0	0	0	2	2
B12***	0	0	1	1	2

Condiciones: (*) contaminado con fundente, (**) defectos continuos, (***) substrato quemado.

De la información presentada en la tabla anterior se puede observar que las condiciones A5 y B5 exhibieron la mayor cantidad de defectos, debido principalmente a la acción conjunta entre la potencia de 30 W y la rapidez de posicionamiento del haz de 2 mm/s, de acuerdo a la Tabla 4.1. Estas variables no permitieron el buen desempeño de la operación de soldadura, la primera debido a la falta de energía para poder llegar completamente a la temperatura de fusión de la soldadura y la segunda debido a la baja velocidad de posicionamiento, lo cual fue el causante de la gran cantidad de cortos entre terminales. Para las condiciones A12 y B12 se puede observar que aunque presentaron pocos defectos, el substrato sufrió quemaduras considerables, debido a la alta potencia generada por el haz.

Una vez concluida la evaluación, se procedió a la selección de las condiciones que exhibieron mejores resultados en cuanto al número de defectos presentes, contaminación de la tarjeta y a la formación de un buen filete de soldadura.

Tabla 5.2 Condiciones seleccionadas de la evaluación visual por microscopia estereoscópica.

Condición	Con o sin fundente	Potencia (W)	Rapidez del haz (mm/s)	Alimentación (mm/s)
B4	Con	34	4	6
A11	Sin	40	6	8
B3	Con	34	4	4
B9	Con	38	6	8
A9	Sin	38	6	8

De las condiciones expuestas en la Tabla 5.2 únicamente las condiciones A11 y A9 no requirieron aplicación adicional de fundente, los valores de potencia de salida tuvieron un rango de 34 a 40 W, los valores de rapidez del haz fueron de 4 y 6 mm/s y la velocidad de alimentación del alambre de soldadura tuvo un valor máximo y mínimo de 8 y 4 mm/s respectivamente.

5.3 Parámetros de soldadura

En esta sección se exponen y se discuten los resultados de los parámetros del proceso de soldadura por haz de luz para las 24 condiciones evaluadas de acuerdo a la matriz de experimentación, ver Tabla 4.1. Estos parámetros serán relacionados con los resultados de la medición del grosor promedio de las capas de compuesto intermetálico, esta relación servirá para poder determinar si estas variables tiene un rol predominante en la confiabilidad de las uniones soldadas.

Los parámetros a consideración son: la potencia, la rapidez de posicionamiento del haz, la velocidad de alimentación del alambre de soldadura y la adición manual de fundente hacia la región de interés. Cada una de estas variables será representada en forma gráfica manteniendo constante las mediciones promedio de las capas de compuesto intermetálico presentes entre las interfaces de las uniones de soldadura.

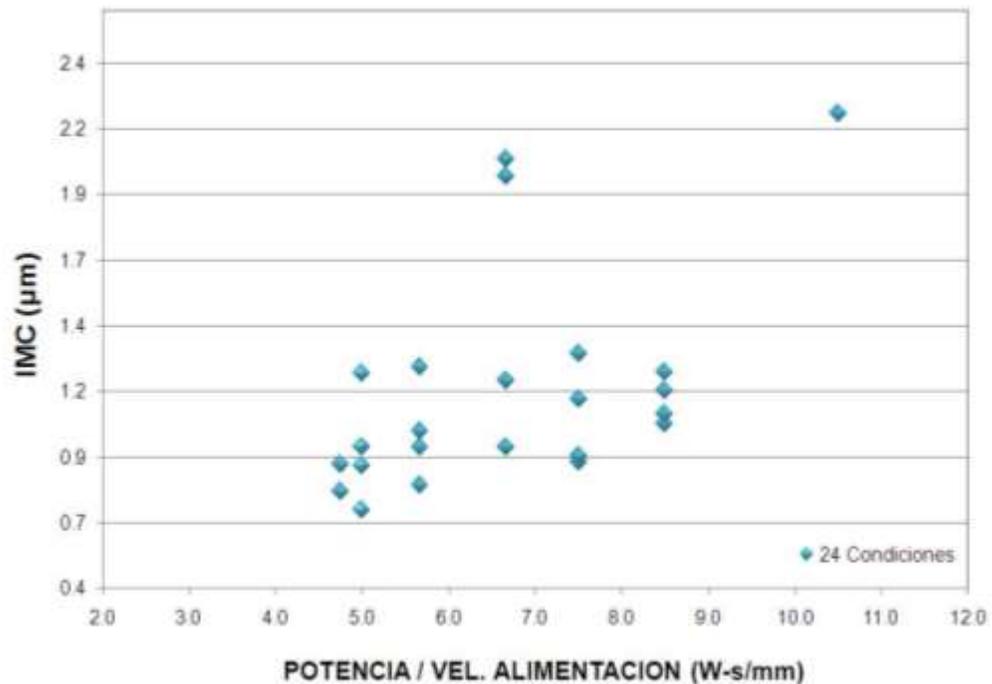


Figura 5.1 Medición del grosor del compuesto intermetálico contra la relación entre potencia y velocidad de alimentación del alambre de soldadura.

La figura 5.1 muestra los resultados derivados de la medición promedio de las capas de compuesto intermetálico y su dependencia entre la relación potencia / velocidad de alimentación. Se puede observar que a medida que aumenta el valor de la relación potencia/ alimentación, el valor promedio del grosor de las capas de compuesto intermetálico también tiende incrementarse, esto se debe a la acción térmica, la cual activa el crecimiento de estas fases. El efecto de la velocidad de alimentación también es notorio, debido a que a menores valores de velocidad de alimentación es posible lograr un mayor tiempo para que se lleve a cabo la reacción entre soldadura y los metales de unión. El efecto separado de cada una de estas variables será expuesto en las figuras 5.2 y 5.4.

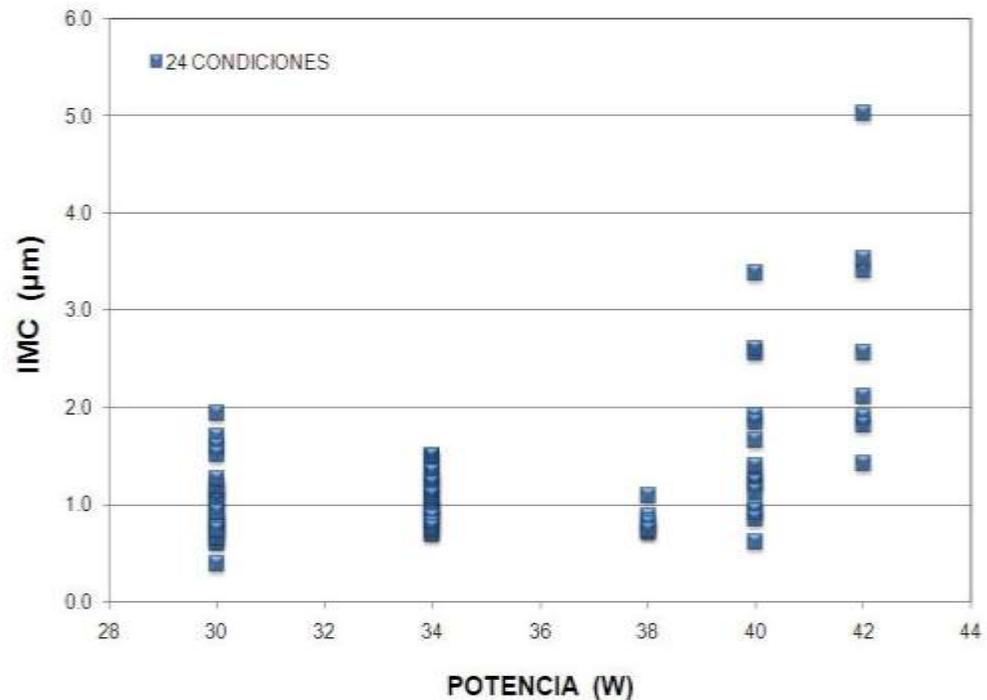


Figura 5.2 Efecto de la potencia de salida del haz sobre el grosor del IMC.

Como se mencionó en el párrafo anterior la formación de los IMC depende del tiempo, la temperatura, el tipo de metalización y la aleación empleada, estas dos últimas permanecen constantes dentro de la experimentación, por tal motivo sólo las variables tiempo y temperatura serán discutidas en esta sección.

El tiempo requerido para llevar a cabo el proceso de soldadura selectiva, se verá influenciado por los parámetros de rapidez de posicionamiento del haz y por la velocidad de alimentación de la soldadura, mientras que la temperatura estará influenciada por la potencia de salida del haz de luz. En la figura 5.2 se muestra el efecto de esta última con respecto a la evolución de las fases intermedias.

El grosor de la capa intermetálica obtenida en reflujo (SMT) y procesos de ola es aproximadamente el doble de los valores obtenidos por el proceso de soldadura selectiva, esto debido a que el proceso soldadura selectiva ocurre en periodos de tiempo muy cortos (un segundo o fracción) resultando en la generación de grosores de compuestos intermetálicos menores.

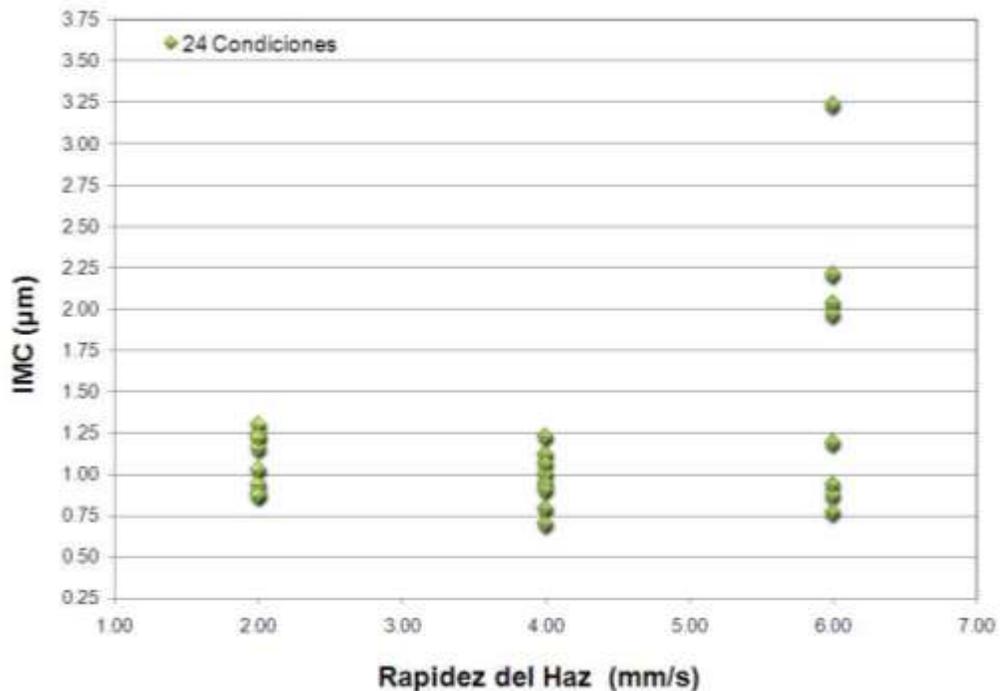


Figura 5.3 Efecto de la rapidez de posicionamiento del haz sobre el grosor del IMC.

La figura 5.3 permite observar el efecto de la rapidez de posicionamiento del haz de luz sobre el grosor de las capas de compuesto intermetálico, donde para los valores superiores de rapidez de posicionamiento corresponden con los mayores grosores de intermetálicos, esto en principio parecería contradictorio, pues se esperaría que a valores menores de rapidez de posicionamiento del haz, se presentaran mayores grosores de intermetálico.

El efecto de esta situación básicamente se debe a que los valores superiores de rapidez de posicionamiento corresponden a las condiciones con valores de mayor potencia, siendo esta última determinante en la evolución y crecimiento de estos compuestos.

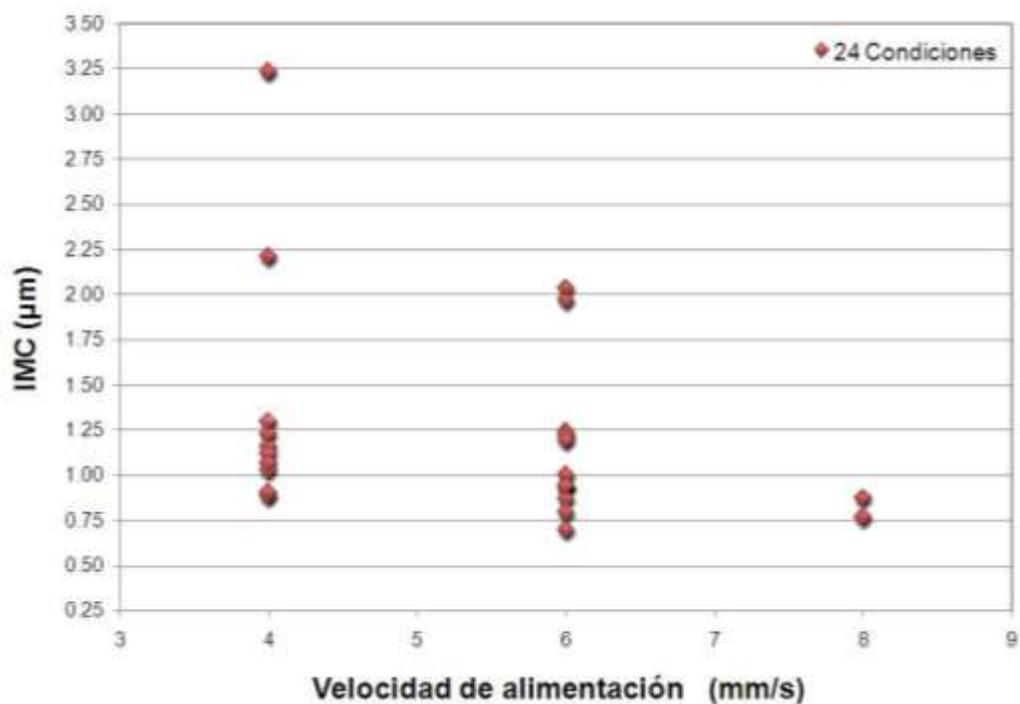


Figura 5.4 Efecto de la velocidad de alimentación de soldadura sobre los valores de grosor de IMC registrados.

El efecto que posee la velocidad de alimentación de soldadura sobre el crecimiento de las capas de compuesto intermetálico, se manifiesta en la figura 5.4, donde los valores superiores de velocidad de alimentación corresponden con los valores menores del grosor promedio de Intermetálicos. Así mismo, los valores mayores para el grosor de las capas de intermetálico corresponden con los valores inferiores de velocidad de alimentación de soldadura.

Los valores inferiores de velocidad de alimentación reportados en la figura 5.4 permiten una mayor estancia en la región a soldar, logrando de esta manera aumentar el tiempo necesario para el crecimiento de los compuestos intermetálicos, el caso opuesto se presentará en los valores superiores de velocidad de alimentación, donde el menor tiempo de estancia en la región restringirá la evolución de las fases intermetálicas.

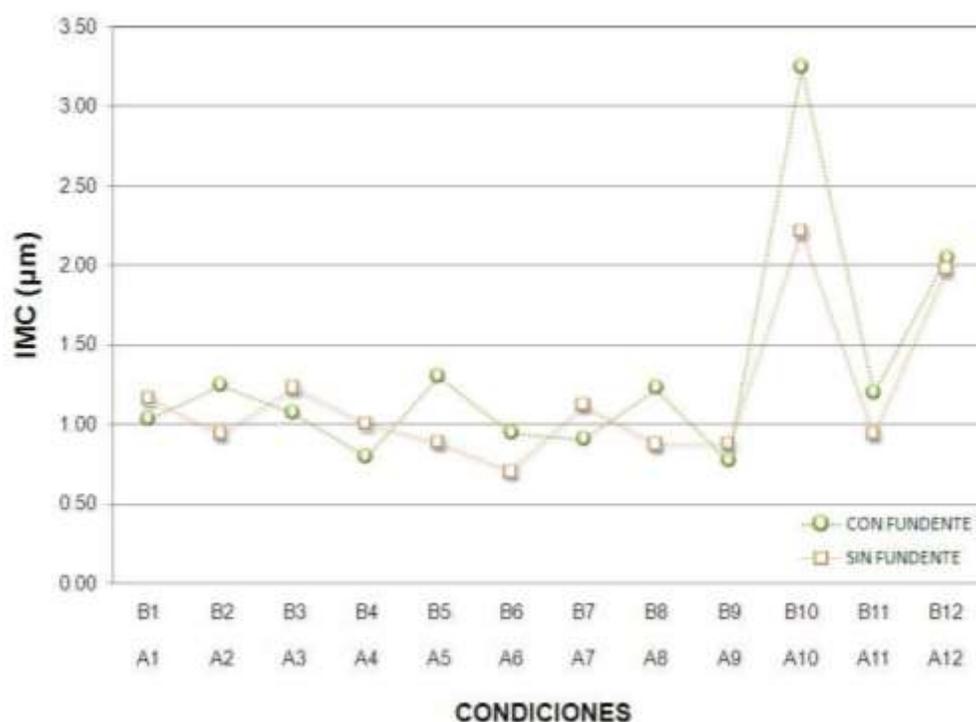


Figura 5.5 Comparación del efecto del contenido o carencia de fundente sobre el grosor de los IMC registrados.

La última variable de análisis en el proceso de soldadura, se expone en la figura 5.5, donde son desplegadas cada una de las 24 condiciones de evaluación, este gráfico consta de dos situaciones de interés, la primera hace referencia a aquellas condiciones las cuales presentaron una adición extra de fundente y la segunda para aquellas condiciones sin este, cabe señalar que el alambre de soldadura utilizado para la evaluación de este experimento contenía un núcleo de fundente al 2%, de ahí que se haga referencia a la adición extra de fundente como una variable de análisis.

El gráfico anterior permite observar el resultado de las condiciones con y sin adición de fundente sobre el grosor de la capas de compuesto intermetálico, los resultados muestran que no hay una diferencia significativa entre ambas condiciones sobre el crecimiento de estas fases intermedia.

Sin embargo, la adición de fundente tiene un efecto sobre los defectos presentes en las uniones de soldadura, sobre todo en las condiciones B1 a B4 mostradas en la Tabla 5.1, en comparación con sus respectivas condiciones A1-A4, el mayor defecto presente en estas últimas es ocasionado por la insuficiencia de soldadura en la unión, el porque las condiciones B1 a B4 no sufrieron este tipo de defecto, se debe a que una de las tareas primordiales del fundente es aumentar la mojabilidad de la soldadura sobre el metal base.

5.4 Pruebas mecánicas

En esta sección se exponen los resultados adquiridos de los ensayos de tensión efectuados a las condiciones seleccionadas, ver Tabla 5.2. Estos valores serán relacionados con los resultados derivados de la medición del grosor promedio de las capas de compuesto intermetálico presentes en cada una de estas condiciones. Finalmente, la información conseguida en está sección será comparada con los resultados de la última sección de este capítulo, la cual esta dedicada a la exposición de los resultados de los tratamientos térmicos realizados a estas condiciones y su efecto sobre las propiedades mecánicas de la uniones soldadas.

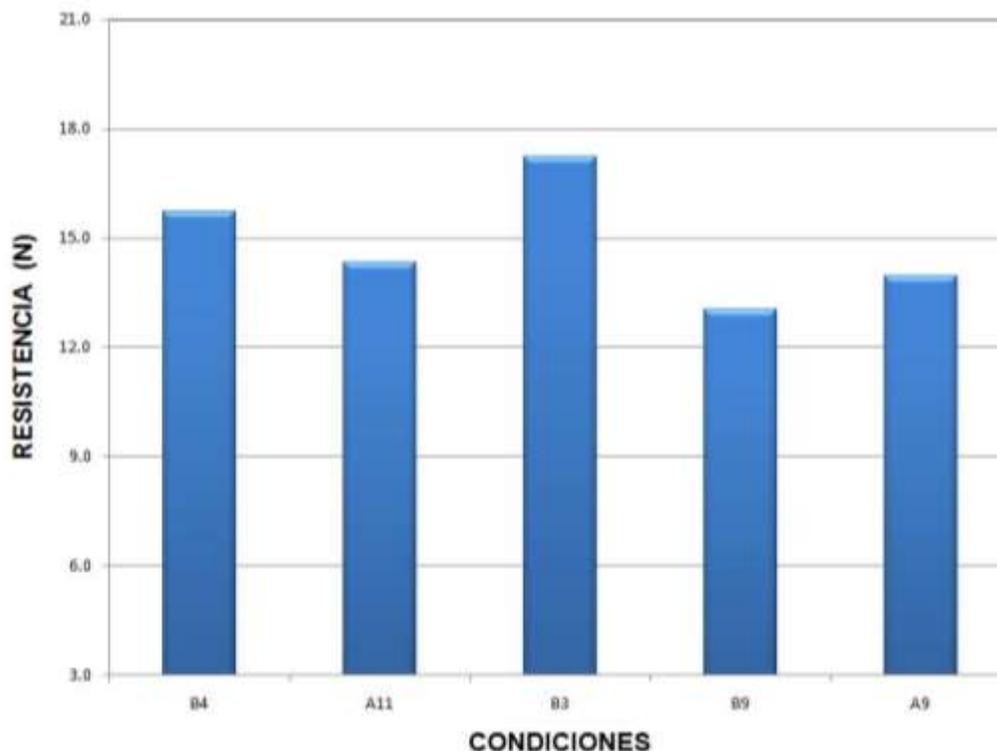


Figura 5.6. Ensayos de tensión para evaluación del proceso de soldadura por haz de luz considerando 5 Condiciones de operación.

Para la realización de esta prueba se ensayaron veinte terminales para cada una de las condiciones evaluadas, logrando así el ensayo total de cien terminales, los resultados adquiridos en esta prueba se presentan en la figura 5.6, estos valores tienen un rango de resistencia que va desde 13.01N para la condición B9 a 14.84 N para la condición B3, teniendo un promedio general de 14.84 N en las cinco condiciones analizadas, los valores individuales de cada una de las condiciones son expuestos en el Apéndice A al final de este escrito.

La figura 5.7 muestra el efecto del grosor promedio de los compuestos intermetálicos sobre la resistencia a la tensión de cada una de las condiciones evaluadas, de este gráfico se deduce que la mayor resistencia generada se presenta en las condiciones las cuales poseen los valores mayores de grosor del intermetálico.

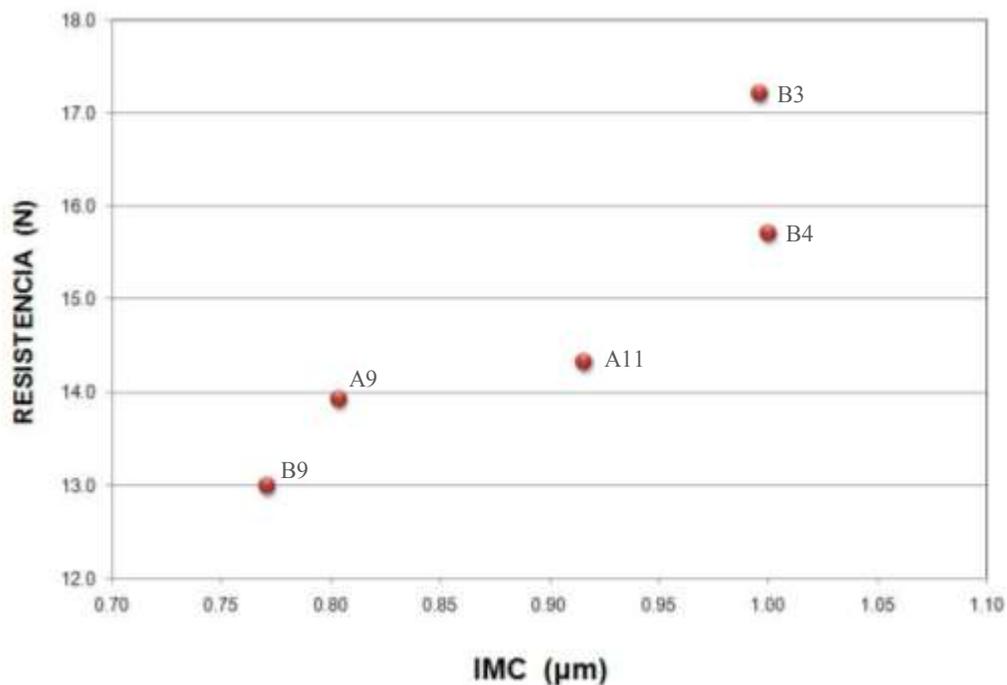


Figura 5.7. Efecto del grosor de IMC sobre la resistencia a la tensión de las condiciones evaluadas.

La formación de una capa gruesa de intermetálicos tiene como resultado la formación de uniones de soldadura con menor resistencia, situación mostrada en la figura 3.6 del Capítulo 3. Sin embargo, dicha figura parte de espesores de IMC mayores a 2 μm .

5.5 Caracterización microestructural

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización microestructural realizada para las condiciones sin tratamiento térmico. El equipo de microscopía óptica, así como el equipo de microscopía electrónica de barrido fueron utilizados para el desarrollo de esta etapa de la investigación.

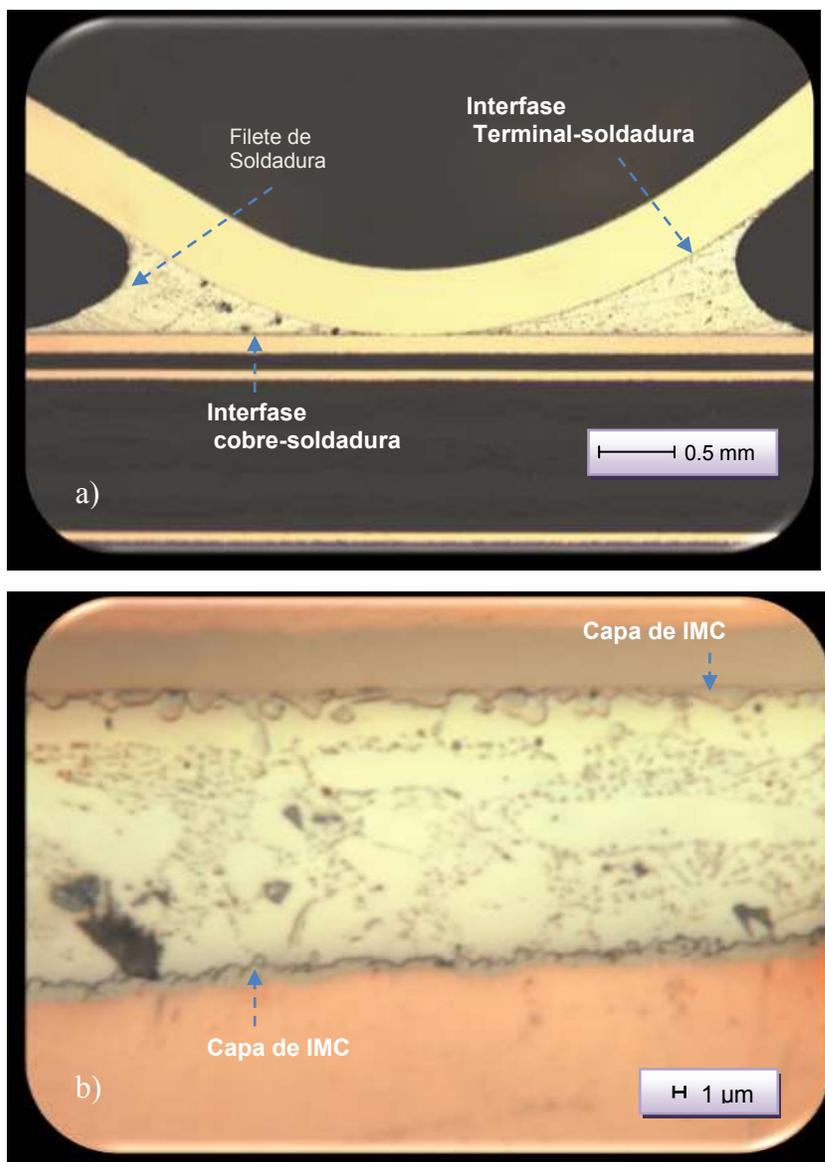


Figura 5.8 Micrografías tomadas por microscopía óptica de la condición A9 sin tratamiento térmico, a) 20x, b) 2500x.

La figura 5.8 presenta dos micrografías tomadas por microscopía óptica, la imagen a) muestra básicamente una unión de soldadura con la formación de un buen filete de soldadura, mientras que en la imagen b) se presenta una micrografía tomada a 2500 aumentos donde pueden observarse las capas de compuesto intermetálico presentes tanto en la interfase soldadura-metal base, así como en la interfase terminal-soldadura.

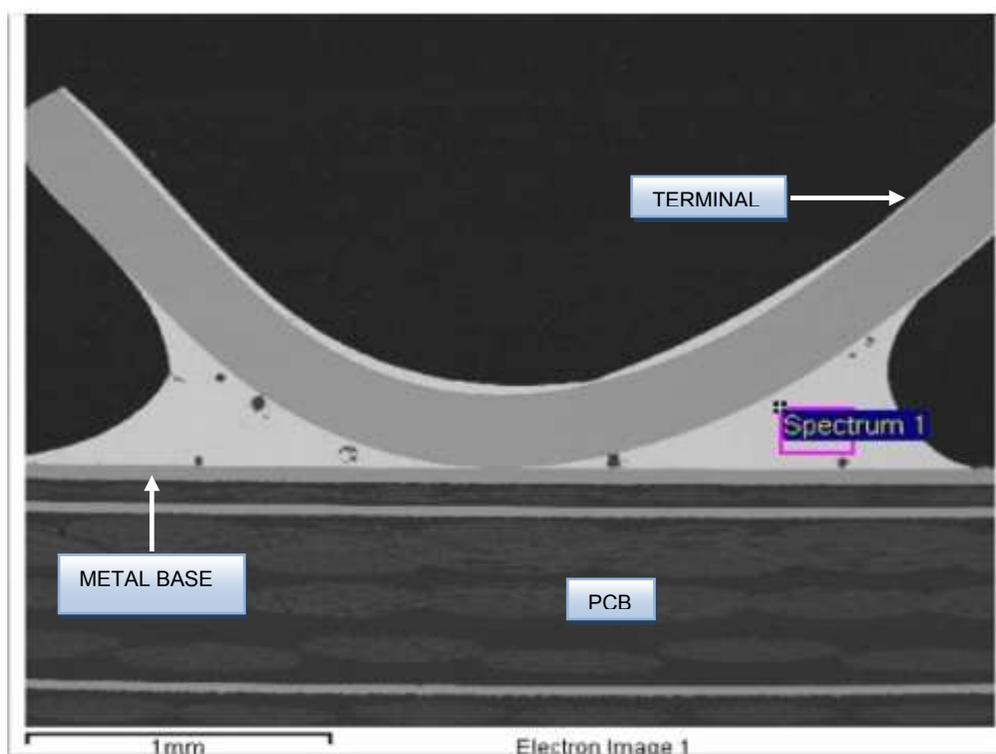


Figura 5.9 Micrografía de la unión de soldadura perteneciente a la condición A11 adquirida por microscopía electrónica de barrido.

La figura 5.10 muestra el espectro de rayos x de un punto de la unión de soldadura perteneciente a la condición A11, ver figura 5.9. El análisis del espectro permite conocer la composición de la región, Tabla 5.3, en la que es notorio el aumento del cobre debido a la disolución generada durante la reacción de la soldadura y metal base, considerando el valor original de la aleación Sn3.8Ag0.7Cu.

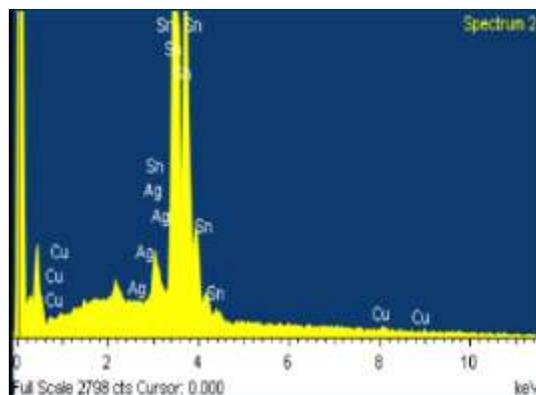


Figura 5.10 Espectro EDS de la unión de soldadura perteneciente a la condición A11 de operación.

Tabla 5.3 Composición química de la unión de soldadura perteneciente a la condición A11 de operación, adquirida por SEM EDS.

Elemento	% En peso	% Atómico
Cu	1.38	2.55
Ag	3.22	3.49
Sn	95.39	93.96
Total	100.00	

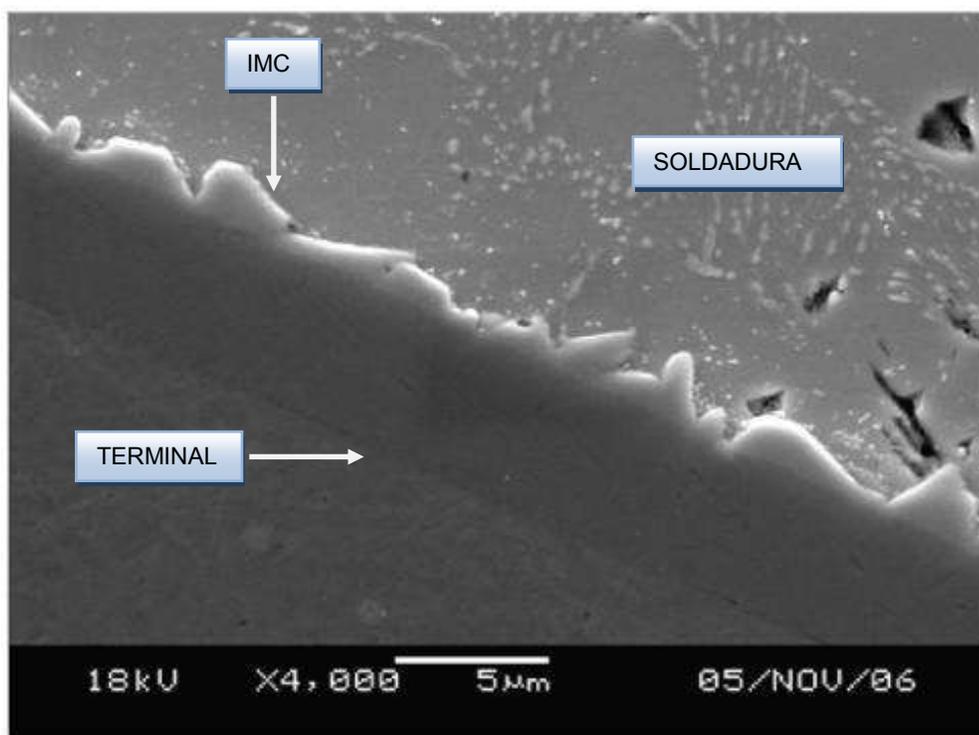


Figura 5.11 Micrografía de la interfase terminal-soldadura de la condición B3 adquirida por microscopía electrónica de barrido a 4000x.

La morfología irregular del compuesto intermetálico presente en la interfase terminal-soldadura puede ser observada en la figura 5.11, en esta imagen es posible observar la presencia de una capa continua de compuesto intermetálico a través de la interfase. Así mismo, para la interfase metal base-soldadura expuesta en la figura 5.12 se observan las mismas características de los IMC reportados en la figura anterior.

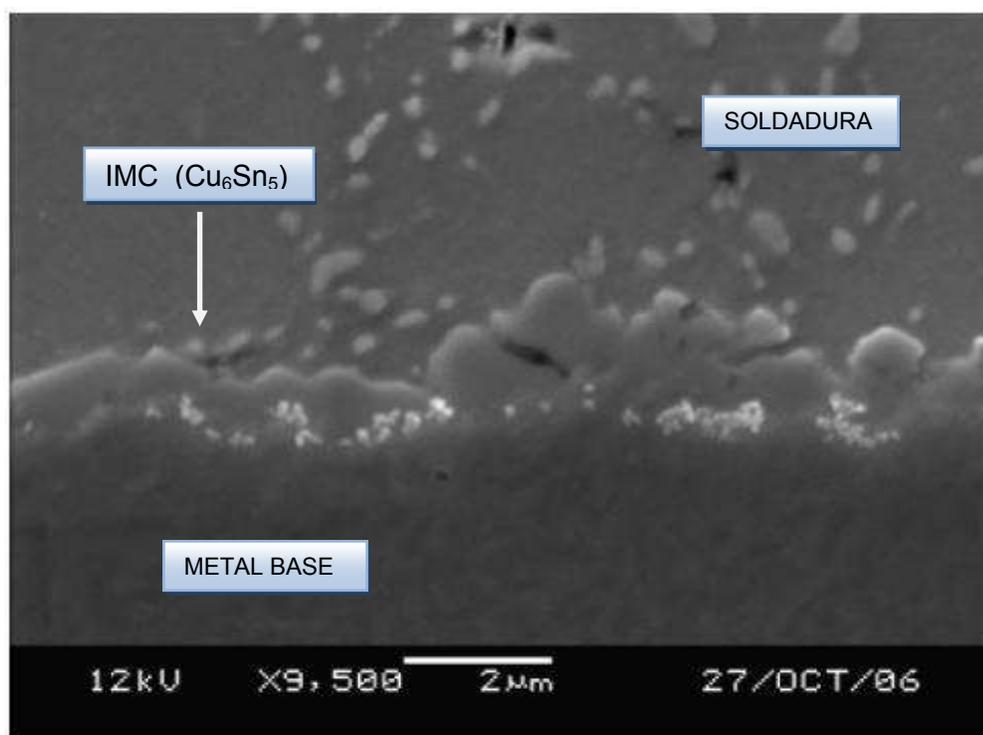


Figura 5.12 Micrografía de la interfase cobre-soldadura de la condición B3 adquirida por microscopía electrónica de barrido a 9500x.

Los resultados del análisis del espectro de rayos x para el compuesto intermetálico mostrado en figura 5.12 corresponden con la estequiometría de la fase intermetálica Cu_6Sn_5 , ver figura 5.13. Los porcentajes aproximados de cada uno de sus elementos constitutivos se exponen en la Tabla 5.4.

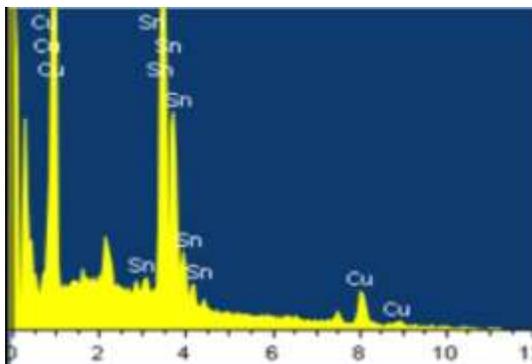


Figura 5.13 Espectro EDS del compuesto intermetálico localizado en la interfase cobre-soldadura de la condición B3 de operación.

Tabla 5.4 Composición química del compuesto intermetálico localizado en la interfase cobre-soldadura de la condición B3 de operación, adquirida por SEM EDS.

Elemento	% En peso	% Atómico
Cu	42.47	57.96
Sn	57.53	42.04
Total	100.00	100.00

La figura 5.14 permite observar los precipitados presentes en la unión de soldadura correspondiente a la condición A11, donde las fases registradas mediante SEM EDS mostradas en la figura 5.15 y la Tabla 5.5 corresponden al compuesto intermetálico de plata Ag_3Sn .

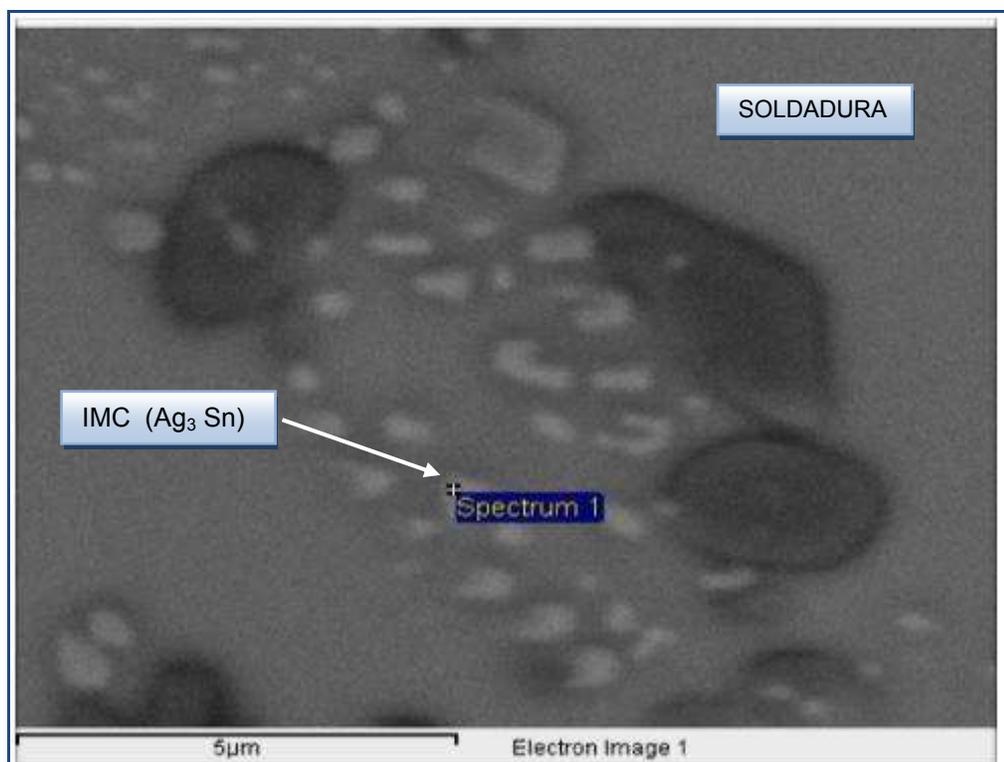


Figura 5.14 Micrografía de la soldadura de la condición A11, adquirida por microscopia electrónica de barrido a 9500x.

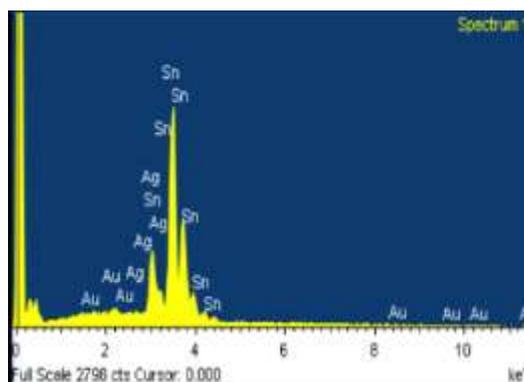


Figura 5.15 Espectro EDS de los precipitados localizados en la soldadura perteneciente a la condición A11.

Tabla 5.5 Composición química adquirida por SEM EDS de los precipitados localizados en la soldadura de la condición A11.

Elemento	% En peso	% Atómico
Ag L	17.27	18.32
Sn L	82.73	81.68
Total	100.00	

5.5.1 Tratamientos Térmicos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las muestras sometidas a tratamientos térmicos a 135°C por 40 y 64 horas. Tal como se mencionó en el capítulo anterior, la finalidad de estas pruebas es evaluar la evolución en estado sólido de los compuestos intermetálicos y su efecto en la resistencia a la tensión de las terminales. Los resultados obtenidos mediante estos tratamientos son comparados con las muestras las cuales no fueron sometidas a tratamiento térmico.

Las micrografías mostradas en la figura 5.16 permiten observar la evolución de los compuestos intermetálicos a través de los tratamientos térmicos realizados, estas imágenes muestran un engrosamiento de los IMC en comparación con las condiciones sin tratamiento térmico. El mayor crecimiento de IMC fue registrado en las condiciones envejecidas a 135°C por 64 horas.

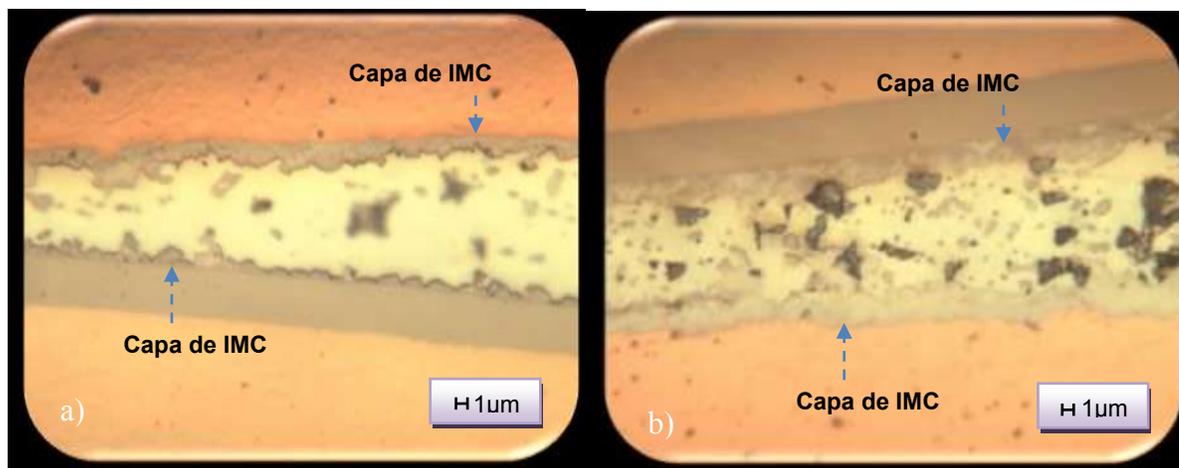


Figura 5.16 Micrografías adquiridas por microscopía óptica a 2500 aumentos, para las condiciones A9 tratadas térmicamente, a) 135°C 40hrs, b) 135°C 64hrs.

A medida que aumenta el tiempo de envejecido de las condiciones analizadas, se puede observar un cambio morfológico, al crecer la capa de compuesto intermetálico adquiere una morfología más plana, esta situación puede ser observada en la figura 5.17.

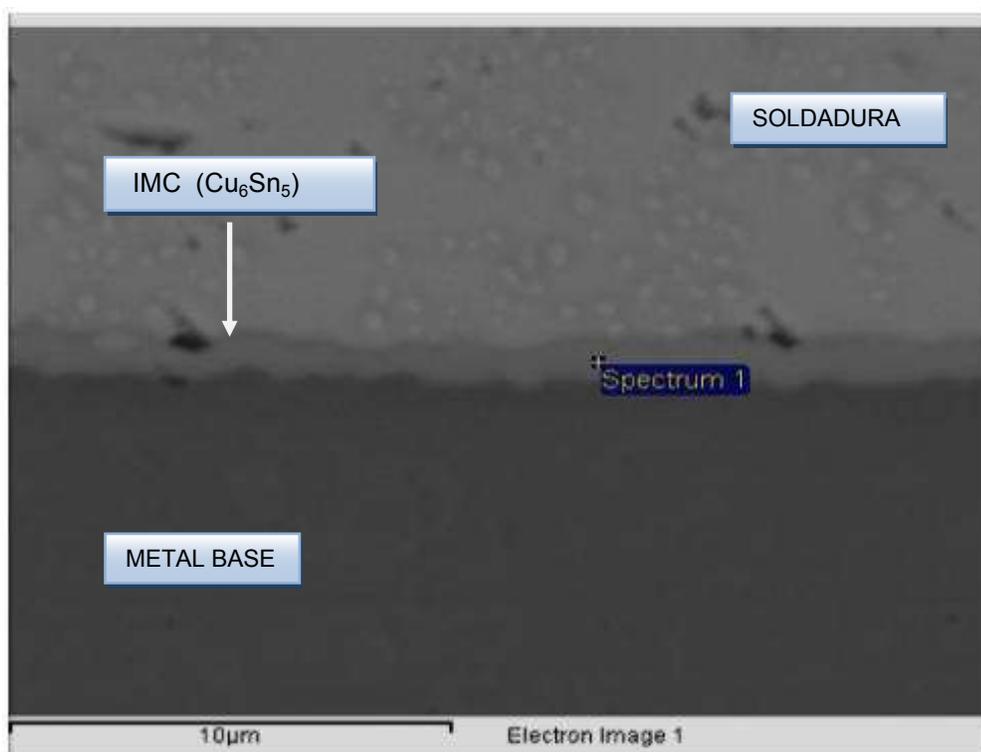


Figura 5.17. Micrografía de la interfase cobre-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 40h, adquirida por microscopía electrónica de barrido a 9500x.

La composición química aproximada del compuesto intermetálico perteneciente a la condición A11 envejecida de manera isotérmica por 40 horas es presentada en la Tabla 5.6, donde los valores de composición química adquiridos por EDS al igual que para las condiciones sin tratamiento térmico, correlacionan con la estequiometría de la fase intermetálica Cu_6Sn_5 para la interfase soldadura-metal base, ver figura 5.18.

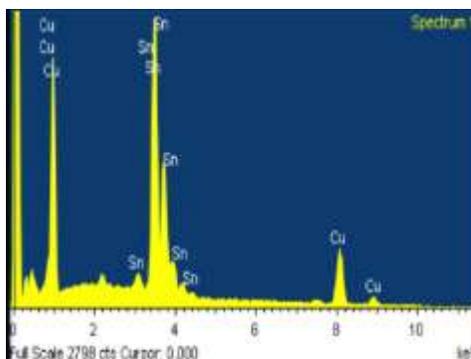


Figura 5.18 Espectro EDS del compuesto intermetálico localizado en la interfase cobre-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 40h.

Tabla 5.6 Composición química del compuesto intermetálico localizado en la interfase cobre-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 40h, adquirida por SEM EDS.

Elemento	% En peso	% Atómico
Cu	44.86	60.31
Sn	55.14	39.69
Total	100.00	

En la figura 5.19 se expone el efecto del grosor promedio de los compuestos intermetálicos sobre la resistencia a la tensión de cada una de las condiciones tratadas térmicamente a 135°C por 40 horas, de este gráfico se puede discernir que la mayor resistencia está en aquellas condiciones que poseen los valores mayores de grosor de intermetálico. El rango de resistencia varía de 19.89 N a 30.18 N con un promedio general de 25.65 N, mientras que el rango de IMC oscila entre 1.37 μm y 1.60 μm con un promedio general de 1.44 μm .

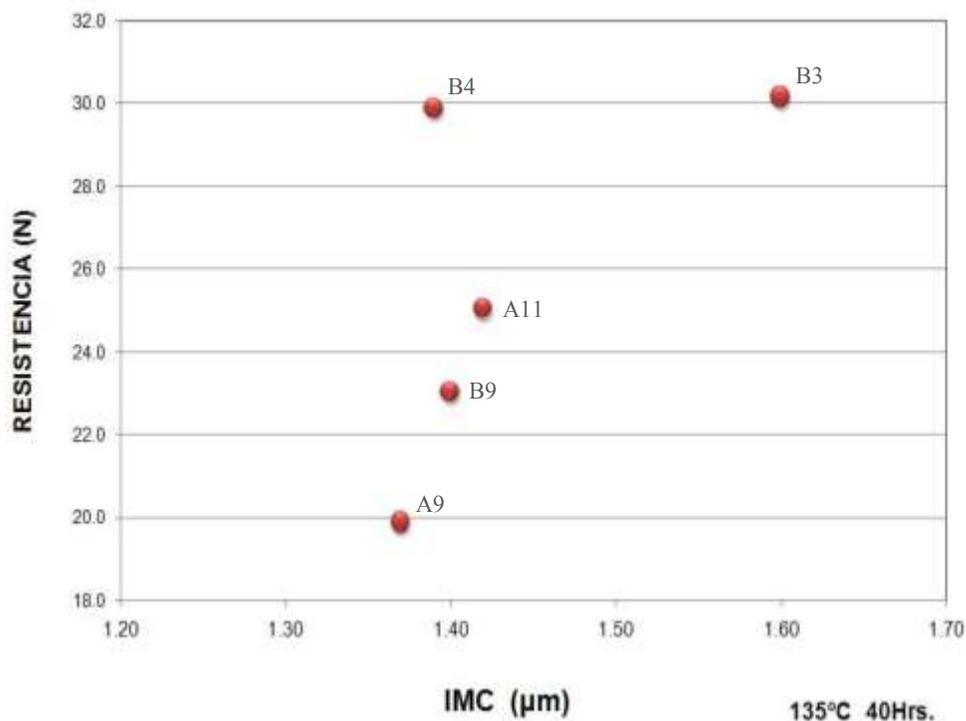


Figura 5.19. Efecto de la evolución del IMC sobre la resistencia a la tensión de las condiciones envejecidas a 135°C por 40 horas.

La morfología del compuesto intermetálico presente en la interfase terminal-soldadura de la condición A11 puede ser observada en la figura 5.20, en esta imagen, al igual que para las muestras sin tratamiento térmico es posible observar la presencia de una capa continua de compuesto intermetálico a través de la interfase.

La composición química del compuesto intermetálico perteneciente a la condición A11 envejecida de manera isotérmica por 64 horas, se muestra en la Tabla 5.7, donde los valores de composición química adquiridos por EDS corresponden con la estequiometría de la fase intermetálica ternaria $[\text{Cu}, \text{Ni}]_6\text{Sn}_5$, ver figura 5.21. La formación de esta fase se debe al recubrimiento superficial de níquel que posee la terminal.

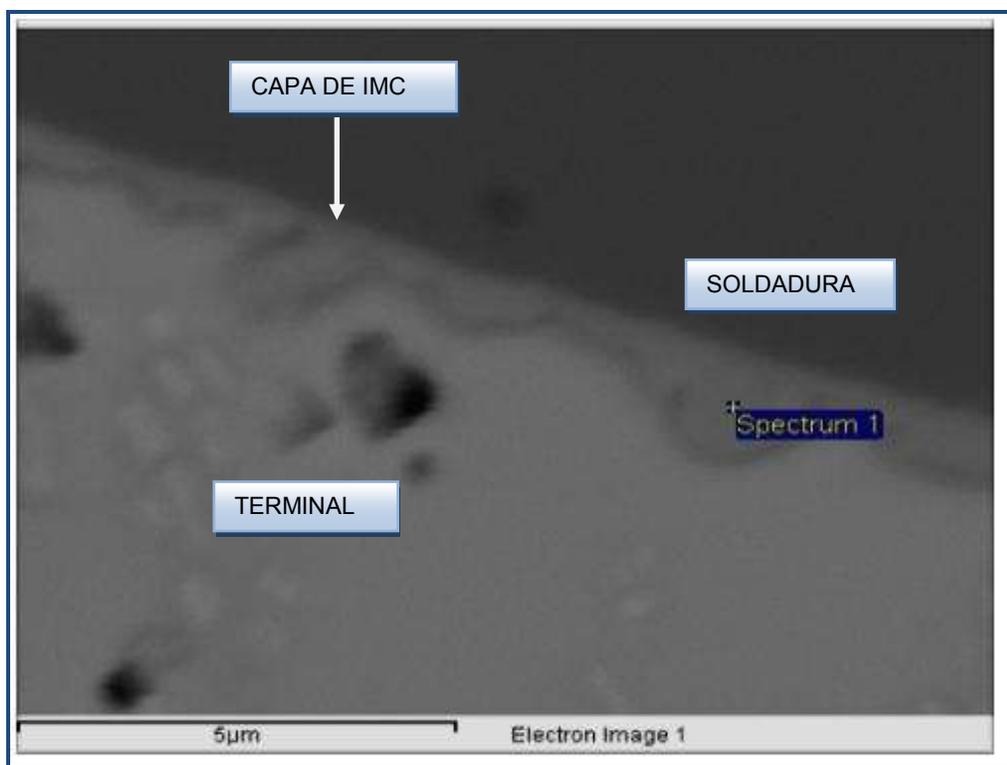


Figura 5.20 Micrografía de la interfase terminal-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 64h, adquirida por microscopia electrónica de barrido a 9500x.

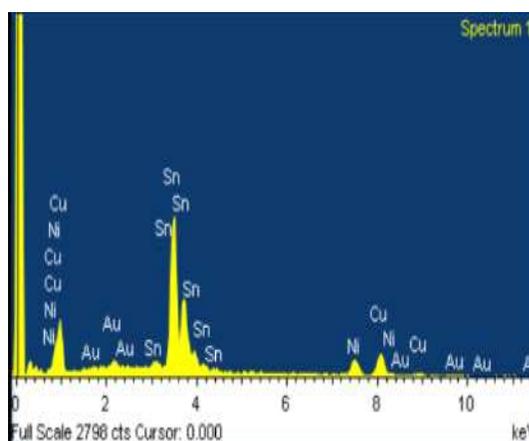


Figura 5.21 Espectro EDS del compuesto intermetálico localizado en la interfase terminal-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 64 horas.

Tabla 5.7 Composición química del compuesto intermetálico localizado en la interfase terminal-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 64h, adquirida por SEM EDS.

Elemento	% En peso	% Atómico
Ni	13.24	19.04
Cu	24.64	33.65
Sn	62.12	46.29
Total	100.00	

El efecto del grosor promedio de los IMCs sobre la resistencia a la tensión para las condiciones envejecidas a 135°C por 64 horas puede verse de la figura 5.22, en este gráfico la mayor resistencia se presenta en aquellas condiciones las cuales poseen los menores valores de grosor de intermetálico, este comportamiento es opuesto a los resultados registrados en las condiciones envejecidas por 40 horas, así como para las condiciones sin tratamiento térmico.

El rango de resistencia para las condiciones envejecidas a 135°C por 64 horas varía de 16.01 N a 20.65 N con un promedio general de 18.16 N, mientras que su rango de IMC oscila entre 1.69 μm y 2.80 μm con un promedio general de 2.2 μm .

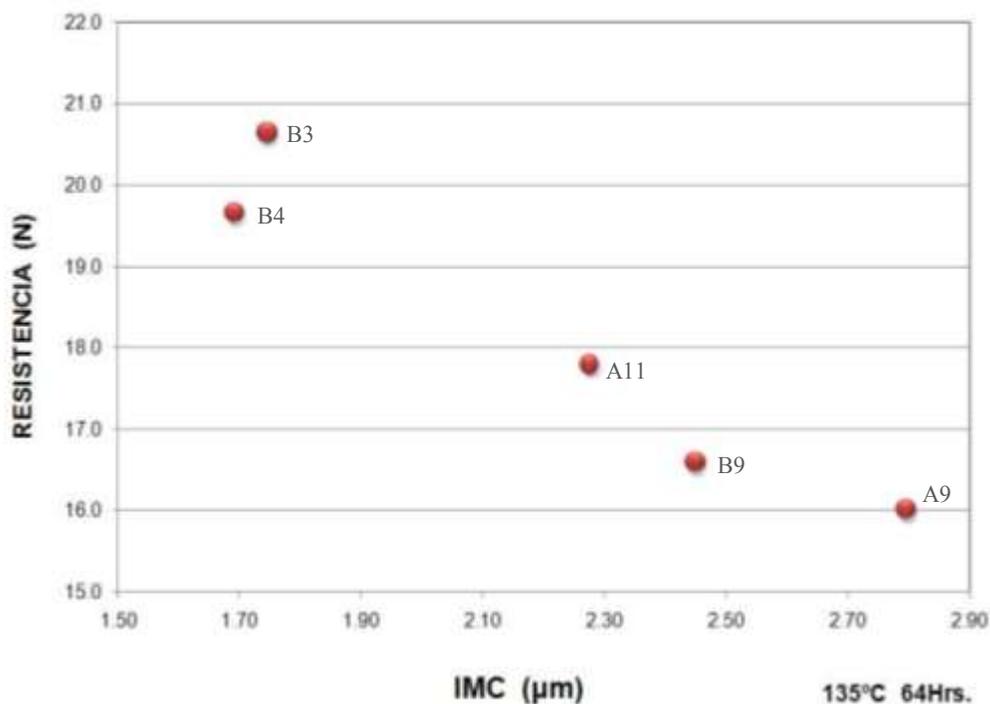


Figura 5.22 Efecto de la evolución del IMC sobre la resistencia a la tensión de las condiciones envejecidas a 135°C por 64 horas.

La tendencia descendente de la resistencia respecto al grosor de intermetálico, mostrada en la figura 5.22, es similar a la tendencia registrada en la figura 3.6 del Capítulo 3, en esta figura se observa claramente como a medida que el grosor de intermetálico aumenta las propiedades mecánicas de la unión son afectadas.

El hecho de que las figuras 5.22 y 3.6 presenten tendencias similares, se debe a que los valores de intermetálico registrados se encuentran en rangos superiores a 1 μm de espesor, mientras que para las figuras 5.7 y 5.19, donde se presenta una tendencia opuesta, los grosores de intermetálico registrados se encuentran en rangos inferiores a 2 μm .

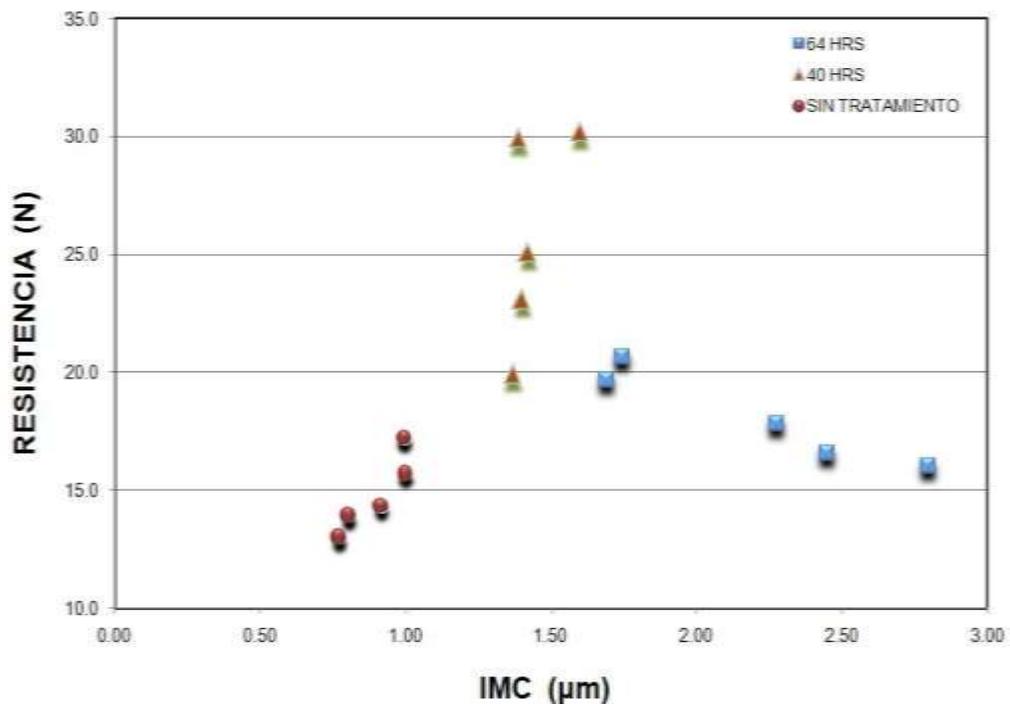


Figura 5.23 Efecto de la evolución del IMC sobre la resistencia a la tensión para las condiciones con y sin tratamiento térmico.

La figura 5.23 representa una compilación de los resultados derivados de las condiciones analizadas, tanto para las condiciones que fueron sometidas a tratamiento térmico, así como para las condiciones sin este efecto. Se puede observar una relación entre la resistencia a la tensión y el grosor de los compuestos Intermetálicos presentes, Inicialmente, la resistencia se incrementa a medida que el grosor de intermetálico aumenta y después la resistencia decrece a medida que el compuesto intermetálico continua creciendo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- El parámetro de potencia del proceso de soldadura por haz de luz tiene un mayor efecto sobre la evolución y crecimiento de los compuestos intermetálicos, en comparación con los parámetros de rapidez de posicionamiento y velocidad de alimentación.
- Las condiciones con y sin adición de fundente de la matriz de experimentación no presentaron una diferencia significativa sobre el grosor de las capas de compuesto intermetálico generadas a través de éstas.
- La adición extra de fundente en algunas condiciones mejora la calidad de las uniones de soldadura, sin embargo en otras la aplicación manual de este fluido no permite la generación de uniones confiables.
- Se observó una capa continua de compuesto intermetálico a través de las interfases de unión analizadas.

- Se encontró una relación entre la resistencia a la tensión y el espesor de los compuestos intermetálicos presentes. Inicialmente, la resistencia se incrementa mientras el grosor de intermetálico aumenta y después la resistencia decrece a medida que el compuesto intermetálico continúa creciendo. El punto de quiebre se encuentra alrededor de 1.5 μm .

- Fue posible observar una transformación morfológica en los compuestos intermetálicos. Para las muestras sin tratamiento térmico fue notoria la presencia de una morfología nodular, pero, a medida que se aumentaba el tiempo de envejecido se logró percibir una morfología más plana en los compuestos, particularmente, en las muestras envejecidas a 135°C por 64 horas.

- Las cinco condiciones seleccionadas tienen propiedades similares y son aceptables, por tal motivo, las dos condiciones sin adición de fundente líquido son recomendables para el proceso de soldadura selectiva por haz de luz.

6.2 Recomendaciones

Los resultados obtenidos a través de este trabajo de investigación exponen la evolución de las fases intermedias generadas durante la operación de soldadura de componentes electrónicos y sus efectos sobre las propiedades mecánicas de las uniones. Así mismo, las pruebas de envejecimiento realizadas proporcionaron información concluyente respecto al efecto de los compuestos intermetálicos, principalmente la fase Cu_6Sn_5 , sobre la integridad de las uniones de soldadura.

Algunas de las recomendaciones como trabajo de investigación posterior en base a los resultados adquiridos en este estudio son las siguientes:

- Analizar los diferentes acabados superficiales y su efecto sobre los compuestos intermetálicos, tanto para el espacio conductivo así como para las terminales de unión.
- Definir diferentes temperaturas de envejecimiento para analizar la evolución de la fase intermetálica Cu_3Sn y sus efectos sobre la integridad mecánica de las uniones soldadas.
- Proponer una ecuación que proporcione información acerca de la resistencia de las uniones soldadas en base a las variables involucradas tales como: módulos de la aleación, material de fabricación de las tarjetas, grosor de intermetálico y el área superficial de soldadura.
- Evaluar la porosidad de la soldadura y su efecto sobre la integridad mecánica de las uniones, así como el efecto del fundente y el uso de atmósferas inertes en el proceso de soldadura.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] John H. Lau, C. P. Wong, Ning Cheng Lee, S.W. Ricky Lee, "Electronics Manufacturing with Lead Free, Halogen-Free & conductive-Adhesive Materials", Mc Graw Hill Handbooks, 2003

[2] Giles Humpston, David M. Jacobson, "Principles of Soldering", ASM International, 2004

[3] Department of Computing & Electronic Technology, University of Bolton, online course, "Advanced Microelectronics for Industrialists", Electronic Page, http://www.ami.ac.uk/courses/ami4945_dpb/supplementary/fapo/index.html

[4] Ning Cheng Lee, "Reflow Soldering and Troubleshooting SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies", Newnes, 2001.

[5] B. Irving, "Host of New Lead Free Solders Introduced", Weld. J., Vol. 71 No. 10, pp. 47-49, 1992

[6] Masaharu Takagi, Toshikazu Yamaji, Steve Bellavia, Matsushita Industrial Equipment Co., Ltd., Panasonic Factory Automation Co. Toyonaka, Osaka, 561, Japan, Franklin Park, IL, USA, Soldering Process using light Beam Technology.

[7] G. Humpston and D. M. Jacobson, Principles of Soldering and Brazing, ASM International, Materials Park, OH, 1993

[8] C. Lea, "A Scientific Guide to Surface Mount Technology", Electrochemical Publications Ltd, 1988

[9] R. J. Klein Wassink, "Soldering in Electronics", Electrochemical Publications Ltd, 1984

- [10] M. E. Warwick and S. J. Muckett, "Observation on the Growth and Impact of Intermetallic Compounds on Tin-coated Substrates", *Circuit World*, Vol. 9, No. 4, pp. 5-11, 1983
- [11] F.G. Yost, F. M. Hosking, and D. R. Frear, "The Mechanics of Solder Alloy – Wetting & Spreading", Van Nostrand Reinhold, New York, 1993
- [12] Manko, Howard H "Solder and Soldering", Mc Graw Hill, 2001
- [13] S.F. Dirnfeld and J.J. Ramon, "Microstructure Investigation of Copper-Tin Intermetallics and the Influence of the Layer Thickness on Shear Strength", *Welding Research Supplement*, pp. 373s-377s, October, 1990
- [14] H.A.H. Steen, "Aging of Component Leads and Printed Circuit Boards", Research Report IM-1716, Swedish Institute for Metals Research, 1982
- [15] Anon, "Copper-Tin Intermetallics", *Circuits Manufacturing*, Vol. 20 No. 9, pp 56-64, 1980
- [16] B. G. Le Fevre and R. A. Barczykowski, "Intermetallic Compound Growth on Tin and Solder Platings on Cu Alloys", *Wire Journal International*, Vol.18, No.1, pp. 66-71, 1985
- [17] P. J. Kay and C. A. Mackay, Barrier Layers against Diffusion, Paper 4", in *proc. of 3rd Brazing Soldering Conference*, London, 1979
- [18] J. H. Vincent and G. Humpston, "Lead Free Solder for Electronic Assembly", *GEC J. Res.*, Vol. 11 No. 2, p 76-89, 1994

[19] Petzow, G. and Effenberg, G., "Ternary alloys", Vol. 2, VCH, 1988

[20] Glazer J., "Metallurgy of Low Temperature Lead Free Solders for Electronic Assembly, Int. Mater. Rev., Vol. 40, No 2, pp 65-93, 1990

LISTADO DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
<i>Figura 1.0 Ensamble de componentes por medio de la tecnología de montaje superficial.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.1 Diagrama de fase binario plomo (Pb)- estaño (Sn).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.2 Configuración del equipo de soldadura por haz de luz.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3.1 Etapas del proceso de soldadura, a) mojado de soldadura en el metal base, b) disolución del metal base, c) formación de compuesto intermetálico en la interfase.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.2 Velocidad de disolución de metales y metalizaciones comúnmente utilizados para la aleación 60Sn-40Pb en función de la temperatura.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 3.3 Diagrama esquemático mostrando el crecimiento de IMC en contacto con soldadura líquida Sn-Pb, a) estado estable, b) enfriamiento mediante contenedor de soldadura, b) enfriamiento sin contenedor.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.4 Velocidad de crecimiento del intermetálico Cu/Sn en Cu mojado por la aleación 63Sn37Pb.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.5 Crecimiento de intermetálicos Cu-Sn en contacto con cobre a diferentes temperaturas para la aleación 63Sn37Pb.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.6 Efecto del espesor del compuesto intermetálico Cu-Sn sobre la resistencia a la tensión para la aleación 63Sn37Pb a temperatura ambiente... ..</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.7 Zona liquidus del sistema Ag-Cu-Sn.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.1 Tarjeta de circuito impreso con conector ensamblado, a) lado primario, b) lado secundario.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.2 Conector montado superficialmente en el borde de la tarjeta de circuito impreso.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.2 Diagrama de flujo de experimentos.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.3 Equipo de soldadura por haz de luz, a) lado frontal, b) lado lateral.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.4 Microscopio estereoscópico y características de los defectos registrados a través de la experimentación: 1) cortos, 2) exceso de soldadura, 3) insuficiencia de soldadura, 4) soldadura fría.....</i>	<i>47</i>

<i>Figura 4.5 (a) Equipo electromecánico utilizado para llevar acabo los ensayos de tensión de las condiciones seleccionadas, (b) seccionado de la PCB, (c) operación del ensayo.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.6. Equipo utilizado para el seccionado y esmerilado de las muestra.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.7. Equipo utilizado para el lijado grueso y fino de las muestras evaluadas...</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.8. Equipo empleado para el pulido final de las muestras evaluadas.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.9. Equipo de microscopía óptica utilizado para la evaluación de las uniones preparadas metalográficamente.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.10. Equipo de microscopía electrónica de barrido equipado con EDS utilizado para la evaluación cuantitativa de las fases intermetálicas.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.11. Equipo utilizado para la realización de los tratamientos térmicos.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.1 Medición del grosor del compuesto intermetálico contra la relación entre potencia y velocidad de alimentación del alambre de soldadura.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.2 Efecto de la potencia de salida del haz sobre el grosor del IMC.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.3 Efecto de la rapidez de posicionamiento del haz sobre el grosor de IMC...</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.4 Efecto de la velocidad de alimentación de soldadura sobre los valores de grosor de IMC registrados.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.5 Comparación del efecto del contenido o carencia de fundente sobre el grosor de los IMC registrados.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.6. Ensayos de tensión para evaluación del proceso de soldadura por haz de luz considerando 5 Condiciones de operación.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.7. Efecto del grosor de IMC sobre la resistencia a la tensión de la condiciones evaluadas.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 5.8 Micrografías tomadas por microscopía óptica de la condición A9 sin tratamiento térmico, a) 20x, b) 2500x.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.9 Micrografía de la unión de soldadura perteneciente a la condición A11 adquirida por microscopia electrónica de barrido.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.10 Perfil EDS de la unión de soldadura perteneciente a la condición A11 de operación.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.11 Micrografía de la interfase terminal-soldadura de la condición B3 adquirida por microscopia electrónica de barrido a 4000x.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.12 Micrografía de la interfase cobre-soldadura de la condición B3 adquirida por microscopia electrónica de barrido a 9500x.....</i>	<i>70</i>

<i>Figura 5.13 Perfil EDS del compuesto intermetálico localizado en la interfase cobre-soldadura de la condición B3 de operación.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.14 Micrografía de la soldadura de la condición A11, adquirida por microscopía electrónica de barrido a 9500x.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.15 Perfil EDS de los precipitados localizados en la soldadura perteneciente a la condición A11.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.16 Micrografías adquiridas por microscopía óptica a 2500 aumentos, para las condiciones A9 tratadas térmicamente, a) 135°C 40hrs, b) 135°C 64hrs.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.17. Micrografía de la interfase cobre-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 40h, adquirida por microscopía electrónica de barrido a 9500x.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.18 Perfil EDS del compuesto intermetálico localizado en la interfase cobre-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 40h.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.19. Efecto de la evolución del IMC sobre la resistencia a la tensión de las condiciones envejecidas a 135°C por 40 horas.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.20 Micrografía de la interfase terminal-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 64h, adquirida por microscopía electrónica de barrido a 9500x.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.21 Perfil EDS del compuesto intermetálico localizado en la interfase terminal-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 64h.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.22 Efecto de la evolución del IMC sobre la resistencia a la tensión de las condiciones envejecidas a 135°C por 64 horas.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.23 Efecto de la evolución del IMC sobre la resistencia a la tensión para las condiciones con y sin tratamiento térmico.....</i>	<i>80</i>

LISTADO DE TABLAS

	<i>Pág</i>
<i>Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de los métodos de soldadura convencional.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 3.1 Valores medidos de tensión superficial para soldaduras de aleaciones binarias en aire y nitrógeno.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3.2 Propiedades mecánicas comparativas de sistemas de soldaduras seleccionadas a temperatura ambiente.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4.1. Parámetros seleccionados para cada condición soldada por el equipo de haz de luz mediante la aleación Sn3.8Ag0.7Cu.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5.1 Resultados de la evaluación visual de las condiciones ensambladas por medio del equipo de soldadura por haz de luz.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 5.2 Condiciones seleccionadas de la evaluación visual por microscopía estereoscópica.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 5.3 Composición química de la unión de soldadura perteneciente a la condición A11 de operación, adquirida por SEM EDS.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 5.4 Composición química del compuesto intermetálico localizado en la interfase cobre-soldadura de la condición B3 de operación, adquirida por SEM EDS.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 5.5 Composición química adquirida por SEM EDS de los precipitados localizados en la soldadura de la condición A11.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 5.6 Composición química del compuesto intermetálico localizado en la interfase cobre-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 40h, adquirida por SEM EDS.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 5.7 Composición química del compuesto intermetálico localizado en la interfase terminal-soldadura de la condición A11 envejecida a 135°C por 64h, adquirida por SEM EDS.....</i>	<i>78</i>

APENDICE A. VALORES DE IMC Y RESISTENCIA

Condiciones sin envejecimiento										
No.	B4		A11		B3		B9		A9	
	I	II								
1	14.68	11.92	17.66	12.14	10.63	10.85	11.65	9.96	16.19	8.90
2	13.34	10.68	13.83	9.12	13.75	9.30	14.77	19.39	13.30	11.34
3	16.01	15.75	11.03	18.15	14.77	18.02	11.57	8.36	15.79	12.72
4	16.41	16.99	10.68	13.92	16.95	16.10	16.68	10.76	18.55	10.05
5	16.06	13.92	13.70	23.71	21.75	25.04	14.95	11.79	16.81	15.57
6	11.43	11.61	11.79	12.50	14.59	23.53	10.90	17.79	9.47	12.90
7	17.61	24.95	13.26	20.06	15.30	29.36	11.21	9.65	18.95	14.77
8	17.79	19.35	12.28	14.81	15.39	21.26	13.52	11.48	13.17	13.61
9	16.37	20.28	10.63	19.75	11.52	12.14	13.12	17.57	14.23	12.90
10	12.28	16.55	12.14	15.52	17.66	26.60	11.17	13.88	16.86	12.68
Prom.	15.20	16.20	12.70	15.97	15.23	19.22	12.95	13.06	15.33	12.54
Promedio sección	15.70 N		14.33 N		17.23 N		13.01 N		13.94 N	
Promedio General	14.84 N									

Condiciones con envejecimiento (135°C 40 horas)										
No.	B4		A11		B3		B9		A9	
	I	II								
1	34.07	25.44	18.46	28.56	32.43	23.80	23.58	22.24	21.35	19.62
2	33.81	37.85	16.77	37.32	32.65	21.35	14.41	19.44	15.92	21.57
3	27.45	37.68	17.97	25.53	30.56	39.32	28.07	25.00	15.08	27.58
4	19.93	30.03	23.31	24.33	27.62	29.36	16.90	29.40	14.59	27.85
5	32.87	30.60	23.53	38.48	26.47	37.32	15.03	27.62	16.37	18.42
6	18.50	40.61	24.64	30.07	26.87	36.56	24.78	25.89	14.46	25.76
7	24.51	36.48	22.86	37.50	30.43	30.56	19.62	30.65	15.97	28.60
8	20.82	41.72	18.59	27.18	34.03	26.82	18.82	27.67	15.30	19.97
9	24.51	30.34	18.02	27.71	23.44	28.87	14.86	31.72	16.86	25.98
10	20.42	31.23	15.70	25.18	27.80	37.32	19.53	27.67	16.37	20.19
Promedio	25.69	34.20	19.99	30.19	29.23	31.13	19.56	26.73	16.23	23.55
Promedio sección	29.94 N		25.09 N		30.18 N		23.14 N		19.89 N	
Promedio General	25.65 N									

Condiciones con envejecimiento (135°C 64 horas)										
No.	B4		A11		B3		B9		A9	
	I	II								
1	13.88	16.37	21.08	13.43	34.61	17.93	10.41	15.79	10.45	9.12
2	14.37	14.01	13.61	14.95	28.07	21.40	13.17	15.92	13.48	16.01
3	21.04	12.28	22.77	9.56	23.35	9.61	10.54	20.46	15.92	11.79
4	14.63	28.60	16.90	21.89	25.71	15.12	16.86	13.57	8.90	11.48
5	20.73	13.57	13.57	15.12	31.63	22.42	13.83	9.52	14.10	19.75
6	20.06	14.23	8.45	10.99	15.48	12.10	11.70	14.86	11.25	9.92
7	25.00	10.59	7.70	12.46	39.23	10.59	7.25	10.59	11.52	12.14
8	21.75	25.89	11.97	14.86	23.71	10.94	11.08	18.33	11.43	10.90
9	29.05	7.70	8.90	19.13	36.48	34.83	8.90	8.50	10.41	11.25
10	28.91	10.59	15.44	10.01	43.86	11.57	9.65	10.28	13.21	22.29
Prom.	20.94	15.38	14.04	14.24	30.21	16.65	11.34	13.78	12.07	13.46
Promedio sección	18.16 N		14.14 N		23.43 N		12.56 N		12.77 N	
Promedio General	16.21 N									

Condiciones sin envejecimiento						
Condición	Lado Primario (μm)		Lado Secundario (μm)		Promedio	
	Pad	Terminal	Pad	Terminal		
B4	1.31	1.25	0.79	0.97	1.08	1.00
	0.86	1.16	0.87	0.81	0.92	
A11	0.93	0.69	0.72	0.84	0.79	0.91
	1.28	0.77	0.98	1.12	1.04	
B3	1.11	0.92	0.69	---	0.90	0.98
	0.93	0.79	1.02	1.50	1.06	
B9	0.71	1.03	0.61	0.46	0.70	0.77
	0.72	0.84	0.94	0.88	0.84	
A9	0.63	0.93	0.73	0.85	0.78	0.80
	0.88	0.85	0.83	0.72	0.82	
Promedio	0.94	0.92	0.82	0.91	0.90	0.90
Interfase	0.88		0.92			
Promedio Total	0.90 μm					

Condiciones con envejecimiento (135°C 40 horas)					
Condición	Lado Primario (μm)		Lado Secundario (μm)		Promedio
	Pad	Terminal	Pad	Terminal	
B4	1.75	1.37	1.37	1.05	1.39
A11	1.80	1.05	1.56	1.28	1.42
B3	1.46	1.68	1.72	1.57	1.60
B9	1.90	1.19	1.42	1.10	1.40
A9	1.85	1.18	1.53	0.94	1.37
Promedio	1.75	1.29	1.52	1.19	1.44
Interfase	1.63		1.24		
Promedio Total	1.44 μm				

Condiciones con envejecimiento (135°C 64 horas)					
Condición	Lado Primario (μm)		Lado Secundario (μm)		Promedio
	Pad	Terminal	Pad	Terminal	
B4	1.60	1.79	2.10	1.28	1.69
A11	2.35	2.18	2.33	2.24	2.28
B3	1.80	1.93	1.69	1.57	1.75
B9	2.79	2.17	2.46	2.37	2.45
A9	2.58	3.17	3.21	2.23	2.80
Promedio	2.22	2.25	2.36	1.94	2.20
Promedio Pad	2.29 μm				
Promedio Terminal	2.09 μm				
Promedio General	2.20 μm				

APENDICE B. NORMA IPC PARA LA INDUSTRIA ELECTRONICA

IPC-A-610D SP Aceptabilidad de Ensamblés Electrónicos

5 Soldadura

Esta sección establece requerimientos de aceptabilidad para uniones de soldadura de todos los tipos, por ejemplo SMT, terminales de poste, de orificios, etc. Aunque las aplicaciones y condiciones de campo han sido consideradas como clases 1, 2 y 3, el proceso natural de soldadura podría dictar que una unión aceptable tenga las mismas características para todas las tres clases, mientras que una unión inaceptable será rechazada para todas las tres clases. El proceso de soldadura ha sido dirigido específicamente al criterio descrito, este criterio se aplicará sin importar cual de los siguientes métodos de soldadura haya sido utilizado:

- Cautín
- Aparatos soldadores de resistencias
- Soldador de inducción de ola o soldador de arrastre
- Soldadura de reflujo.
- Soldadura intrusa

Como excepción a lo descrito anteriormente, existen acabados de soldadura especializada, (por ejemplo, estaño inmerso, paladio, oro, etc.) los cuales requieren la creación de criterios especiales de aceptación aparte de los que son expuestos en esta sección. El criterio estará basado en el diseño, la capacidad del proceso y los requisitos de desempeño final del producto.

El mojado de soldadura no puede ser juzgado por su apariencia superficial. La amplia gama de aleaciones para soldadura pueden exhibir ángulos de contacto desde cerca de cero hasta casi 90°. Una unión de soldadura aceptable debe evidenciar un buen mojado, así como una correcta adherencia entre soldadura y la superficie a soldar.

El ángulo de mojado de la unión de soldadura (soldadura al componente y soldadura al PCB) no deberá de exceder 90° (Figura 5-1 A, B). Como excepción, una unión de soldadura para una terminación puede exhibir un ángulo de mojado que exceda 90° (Figura 5.1 C, D) cuando el contorno de soldadura se extienda sobre los bordes del área de terminación de soldadura.

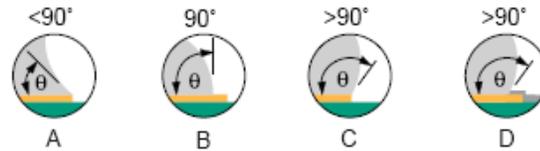


Figura 5.1 ángulos de mojado de soldadura.

La diferencia más notoria entre las uniones de soldadura creadas mediante aleaciones de estaño-plomo y libres de plomo se relaciona a la apariencia visual de la soldadura. Este estándar provee un criterio visual para inspección de estas dos aleaciones. Las uniones soldadas mediante aleaciones libre de-plomo serán identificadas con el símbolo: 

Las uniones aceptables formadas mediante soldaduras libres de plomo y soldaduras estaño-plomo pueden exhibir apariencias similares pero las aleaciones libres de plomo poseen superficies más ásperas (granulada o mate) y mayores ángulos de mojado.

Para estas aleaciones, los criterios respecto al filete de soldadura son equivalentes. Las uniones típicas de estaño-plomo poseen un lustre de brillante a mate, generalmente su apariencia es lisa y exhiben un mojado parecido a un menisco cóncavo entre los objetos que han sido soldados.

El proceso de re-trabajo de soldadura se llevará a cabo con precaución para evitar problemas adicionales y de esta forma lograr uniones con un criterio de soldabilidad aceptable.

5.2.4 Anomalías de Soldadura – No-Mojado

El IPC-T-50 define el no-mojado como la inhabilidad de la pasta soldadura para formar una unión metálica con el metal base. Así mismo, esta carencia de mojado incluye los diversos acabados de superficies.

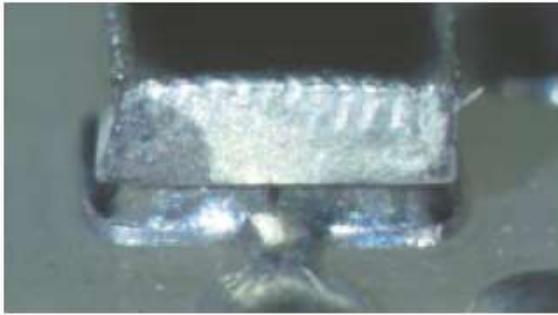


Figura 5-36

Defectos - Clase 1, 2, 3

- La soldadura no ha mojado a la pista o la terminación (TDC) donde se requiere.
- La cobertura de la soldadura no cumple con los requisitos para el tipo de terminación.



Figura 5-39

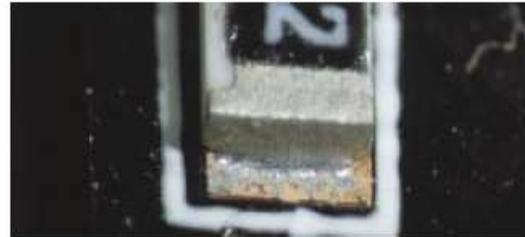


Figura 5-40

5.2.5 Anomalías de Soldadura – Des-Mojado

El IPC-T-50 define el efecto del Des-Mojado como una condición que resulta cuando la pasta de soldadura cubre una superficie y luego se retracta, dejando un monto irregular de soldadura que está separada por áreas cubiertas con una película delgada de soldadura y con el metal base o el acabado de la superficie no expuesto.

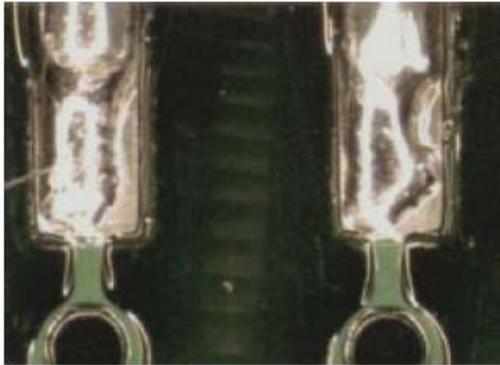


Figura 5-41

Defecto - Clase 1, 2, 3

- Evidencia de Des-Mojado que causa que las uniones de soldadura no cumplan con los requisitos de filete de SMT o tecnología de orificios con soporte (PTH).

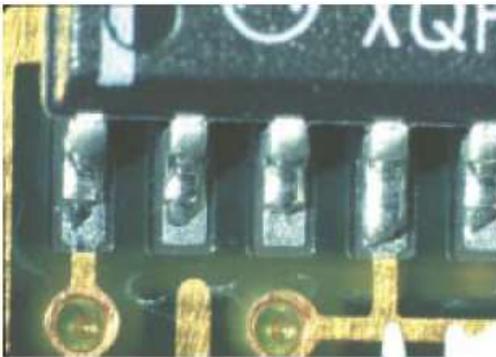


Figura 5-42

5.2.6 Anomalías De Soldadura – Exceso de Soldadura**5.2.6.1 Anomalías de Soldadura – Exceso de Soldadura – Bolas de Soldadura/Partículas de Soldadura**

Bolas de Soldadura son esferas de soldadura que permanecen después del proceso de soldadura. Las Partículas de Soldadura son comúnmente bolas pequeñas de la misma pasta de soldadura original procedentes de estencil que han salpicado alrededor de la unión durante el proceso de reflujo.

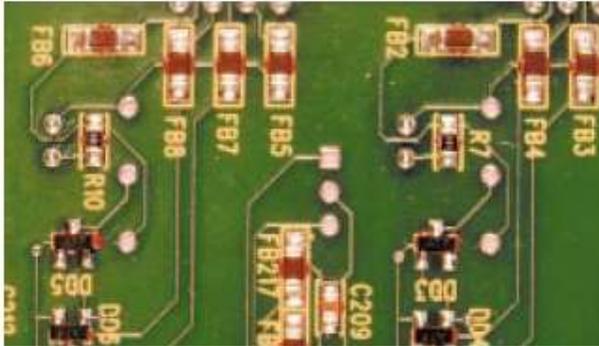


Figura 5-44



Figura 5-45

Nota: Atrapadas/Encapsuladas/adheridas significa que en servicio normal y en su debido ambiente, el producto no provocará que la bola de soldadura se desprenda.

5.2.6.1 Anomalías de Soldadura – Exceso de Soldadura

Bolas de Soldadura/Partículas de Soldadura (cont.)



Figura 5-46

Condición Ideal - Clase 1,2, 3

- No hay evidencia de Bolas de Soldadura en la tarjeta de circuito impreso (PCB).

Aceptable - Clase 1, 2, 3

- Bolas de Soldadura están atrapadas/encapsuladas y no violan el espacio eléctrico mínimo.

Defecto - Clase 1, 2, 3

- Bolas de Soldadura violan el espacio eléctrico mínimo.
- Bolas de Soldadura no están atrapadas en residuo de fundente de no-limpieza (no-clean) o encapsuladas con película protectora o no están adheridas a una superficie metálica, vea la Figura 5-46.

5.2.6.2 Anomalías de Soldadura – Exceso de Soldadura – Puentes/Cortos

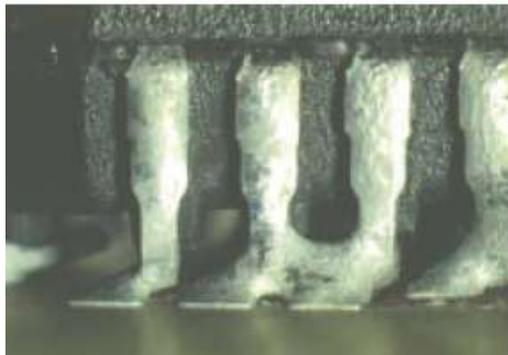


Figura 5-50

Defecto - Clase 1, 2, 3

- Una unión de soldadura que cruza un conductor que no debería estar unido.
- La soldadura ha puentado a conductores ó componentes adyacentes no comunes.

5.2.6.3 Anomalías de Soldadura – Exceso de Soldadura – Salpicadas

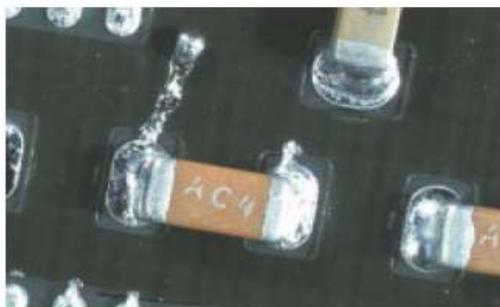


Figura 5-54

Defecto - Clase 1, 2, 3

- Salpicado de Soldadura.

5.2.7 Anomalías de Soldadura – Soldadura Disturbada

La apariencia de la superficie tiene líneas de enfriamiento como se muestra en la condición de aceptación en la Figura 5-56, esta condición es más probable que suceda en aleaciones de soldaduras libres de plomo, aunque no sea una condición de Soldadura Disturbada.

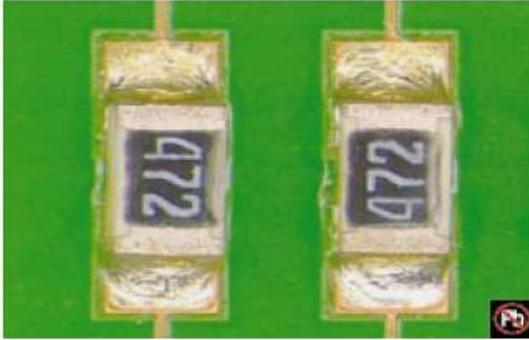


Figura 5-56



Figura 5-59



Figura 5-57

Defecto - Clase 1, 2, 3

- Unión de Soldadura Disturbada que se caracteriza por líneas de estrés por el movimiento en la conexión (TDC).

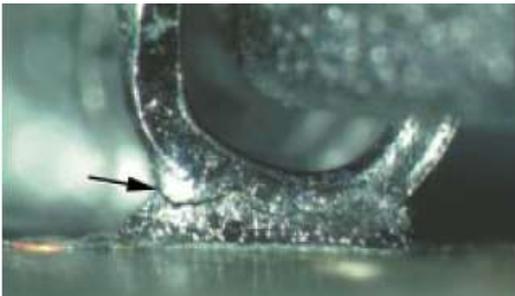
5.2.8 Anomalías de Soldadura – Soldadura Fracturada

Figura 5-62

Defecto - Clase 1, 2, 3

- Soldadura Fracturada o Agrietada.