

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Influencia de la atmósfera de nitrógeno en hornos de reflujo para tecnología de montaje superficial en el índice de fallas de manufactura de circuitos integrados, utilizando pasta de soldadura de estaño y antimonio”

TESIS

*QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA*

PRESENTA
Javier Montiel Villegas

Directora: Dra. Lydia Álvarez
Codirector: Dr. Benjamín Valdez

ÍNDICE

TÍTULO	6
RESUMEN	6
OBJETIVO PRINCIPAL.	6
OBJETIVOS PARCIALES.	6
HIPÓTESIS	7
JUSTIFICACIÓN	7
1. ANTECEDENTES	9
1.1 Introducción	10
1.2 El mundo de los electrónicos	10
1.3 La tecnología SMT	11
1.4 Materiales de SMT	12
1.4.1 Componentes	13
1.4.2 Sustratos	13
1.4.3 Soldadura	14
1.5 Cuestiones ambientales y tendencia “libre de plomo”	14
1.6 Procesos de ensamble	15
1.7 Impresión de soldadura	16
1.8 Montaje de componentes	17
1.9 Soldado por Reflujo	19
1.10 Limpieza de Residuos	19
1.11 La empresa SKYWORKS.	20
1.12 Condiciones de proceso actuales	21
1.13 Materiales utilizados en SMT.	24
1.14 Defectos de SMT	26
1.15 Pruebas de confiabilidad	30
1.16 Estudios Similares	31

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	33
2.1 Descripción general del proceso de soldar	34
2.2 Soldabilidad	35
2.2.1 Velocidad y ángulo de Mojado.	35
2.2.2 Tensión superficial	35
2.2.3 Termodinámica del mojado	39
2.4 Formas del menisco líquido	42
2.5 Mojado por Soldadura	44
2.5.1 Efecto de la aleación de soldadura	44
2.6 El papel de la composición de la superficie	45
2.7 El efecto de la rugosidad de la superficie	50
2.8 Histéresis del mojado	51
2.9 Grados de mojado	52
2.10 El fenómeno de desmojado	53
2.11 La necesidad de un fundente.	55
2.12 El papel de los recubrimientos soldables	56
2.13 Aleación Sn-Sb	57
2.13.1 Microestructura	57
2.13.2 Beneficios	57
2.13.3 Propiedades Mecánicas	58
2.14 Disolución de base metal y crecimiento de intermetálicos.	59
2.15 Fundentes	60
2.15.1 Clasificación	62
2.15.2 Componentes principales	63
2.15.3 Propiedades de los grupos principales.	65
2.16 Oxidación y Corrosión en SMT	71
2.17 Variables que pueden generar Oxidación antes y durante SMT	72
2.18 Contenido y condición de metales	73
2.19 Temperatura	73
2.20 Contenido del Fundente en la pasta	73
2.21 Tipo de atmósfera durante el soldado	74

2.22	Reacciones Químicas de los Fundentes y su relación con la oxidación	74
2.23	Corrosión	77
2.24	Especificaciones Industriales para los Fundentes basados en su corrosividad y su actividad	80
2.25	Formación de Compuestos Intermetálicos	83
2.25.1	Formación y Crecimiento de fases Intermedias	84
2.25.2	Cinética vs. Energética	84
3.	METODOLOGIA.	88
3.1	Identificación del mapa de materiales y procesos actuales de Skyworks	89
3.2	Definición de Efectos y Variables críticas	89
3.3	Diseño Experimental	92
3.3.1	Mojabilidad de la Pasta Actual en superficie de Cobre	93
3.3.2	Nivel de Oxidación utilizando la Pasta Actual en Cobre	94
3.3.3	Evaluación de la pasta actual sobre material característico y procesos de ensamble de Skyworks	96
3.4	Diseño de Vehículo de Prueba para evaluación de pastas en las condiciones actuales de Skyworks	100
3.4.1	Objetivos del Vehículo de Prueba	100
3.5	Metrología.	100
4.	RESULTADOS	103
4.1	Mojabilidad de la Pasta Actual en superficie de Cobre	104
4.2	Nivel de Oxidación utilizando la Pasta Actual en Cobre	106
4.3	Evaluación de la pasta actual sobre material característico y procesos de ensamble de Skyworks	108
4.4	Diseño de Vehículo de Prueba para evaluación de pastas en las condiciones actuales de Skyworks	120
4.4.1	Descripción de Pruebas	120
4.4.1.1	Expansión de Pasta	121
4.4.1.2	Expansión de Pasta en Caliente.	123
4.4.1.3	Tiempo de Vida.	124
4.4.1.4	Adherencia de los Componentes.	125
4.4.1.5	Presencia de Burbujas	127
4.4.1.6	Claridad del Residuo	128
4.4.1.7	Remoción de Residuos	130
4.4.1.8	Nivel de Defectos	131
4.4.1.9	Partículas de Soldadura.	132

4.4.1.10	Fuerza de la Aleación	.	.	.	.	.	134
4.4.1.11	Mojabilidad	.	.	.	.	.	135
4.4.2	Distribución y dimensiones del diseño	.	.	.	.	.	137
4.4.2.1	PCB	.	.	.	.	.	137
4.4.2.2	Variante 1	.	.	.	.	.	139
4.4.2.3	Variante 2	.	.	.	.	.	141
4.4.2.4	Variante 3	.	.	.	.	.	143
4.4.2.5	Variante 4	.	.	.	.	.	145
4.4.2.6	Variante 5	.	.	.	.	.	146
4.4.3	Propuesta de Fundentes a Evaluar	.	.	.	.	.	148
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES							149
REFERENCIAS							151
ABREVIATURAS Y TECNICISMOS							156
ANEXOS							159
1	Especificaciones técnicas de la soldadura actual	.	.	.	.	.	160
2	Perfil Térmico de Reflujo Actual en SMT	.	.	.	.	.	162

TÍTULO

“Influencia de la atmósfera de nitrógeno en hornos de reflujo para tecnología de montaje superficial en el índice de fallas de manufactura de circuitos integrados, utilizando pasta de soldadura de estaño y antimonio”

RESUMEN

Se evalúa el efecto que el uso de la atmósfera de nitrógeno, en hornos de reflujo para tecnología de montaje superficial (SMT, por sus siglas en inglés), tiene sobre el índice de fallas de manufactura. La evaluación se realiza primero para las condiciones actuales de proceso en la empresa Skyworks y posteriormente para distintas condiciones de proceso. Los resultados obtenidos sugieren que la atmósfera de nitrógeno es necesaria para la soldadura actual de Skyworks y que la reducción de fallas obtenida por medio de ella justifica su costo. Sin embargo los resultados muestran que la evaluación de una nueva química de fundente si pudiera ayudar a eliminarla. El estudio incluye el diseño de un vehículo de prueba así como pruebas sugeridas para la segunda fase de la investigación que pudieran ayudar a mejorar los resultados obtenidos en esta investigación.

OBJETIVO PRINCIPAL

Evaluar el efecto de la atmósfera de nitrógeno sobre el índice de fallas de manufactura en el horno de reflujo de la empresa Skyworks.

OBJETIVOS PARCIALES

1. Evaluar la calidad de la soldadura obtenida en las condiciones de proceso actuales en Skyworks.

2. Evaluar el efecto del uso de la tablilla transportadora en la calidad de la soldadura obtenida.
3. Estudiar el efecto de la atmósfera de nitrógeno en la calidad de la soldadura obtenida.
4. Diseño de Vehículo de prueba y evaluaciones sugeridas para conocer los efectos de diferentes tipos de fundentes en la calidad de la soldadura obtenida en las condiciones de ensamble de Skyworks.

HIPÓTESIS

Si se seleccionan apropiadamente los materiales de la soldadura en pasta y las temperaturas del horno de reflujo, es posible entonces eliminar la atmósfera de nitrógeno manteniendo bajos los ambientes de oxidación en el material.

JUSTIFICACIÓN

Desde mucho tiempo atrás, se han realizado estudios que relacionan el uso de una atmósfera de nitrógeno en el horno de reflujo con una reducción de las fallas en el proceso de manufactura, tanto para la mezcla eutéctica de estaño y plomo, como para las diversas aleaciones que han venido a reemplazar a esta soldadura tradicional [32,1].

Una de las aleaciones que más populares se han vuelto es la compuesta por un gran porcentaje de estaño y pequeñas cantidades de plata y cobre. Sin embargo, no todas las industrias han elegido esta alternativa, y la poca experiencia que se tiene en el uso de las nuevas soldaduras causa que sea aún difícil determinar cuál es la mejor opción. En la empresa Skyworks se utiliza una aleación de estaño y antimonio, con la que se han obtenido resultados satisfactorios.

Aunque hay consenso en las grandes ventajas que puede tener el uso de una atmósfera de nitrógeno sobre ciertos procesos de manufactura, también hay consenso en que estas ventajas no son siempre las mismas para distintos procesos y que para un

proceso en particular, debe evaluarse cuidadosamente si la reducción de fallas es suficientemente significativa como para justificar la inversión adicional [32].

Debido a esto, nos hemos abocado a evaluar el efecto de la atmósfera de nitrógeno en el proceso de manufactura de la empresa Skyworks, con el propósito de verificar si es posible reducir o eliminar esta atmósfera, sin que se incremente al mismo tiempo el índice de fallas en el producto. Consideramos que el posible ahorro que se obtendría de ser esto posible, justifica el esfuerzo que implica el realizar esta evaluación.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1. Introducción

Una de las partes más importantes y fundamentales dentro de la operación de la Tecnología de Montaje Superficial (SMT, *por sus siglas en inglés*) reside en sus materiales, y en específico en el tipo de soldadura que utiliza. Sus características fisicoquímicas, en combinación con los factores de proceso, marcan la pauta para determinar el nivel de defectos y la confiabilidad que los productos tendrán. Ambos puntos son de especial interés en la industria manufacturera de electrónicos por su significado económico.

Uno de los subprocesos de SMT que se relaciona directamente con la confiabilidad del producto es el del **soldado por reflujo**, el cual es un proceso térmico en el que la soldadura se funde para obtener las uniones finales de los componentes con las tarjetas electrónicas; este proceso muchas veces se lleva a cabo en una atmósfera predominante de Nitrógeno para evitar que las uniones se vean afectadas por la oxidación de los metales a altas temperaturas en presencia únicamente de aire. El consumo de Nitrógeno llega a ser uno de los principales costos dentro de SMT, por lo que evitarlo o disminuirlo sin lugar a duda representa un reto y una oportunidad muy grande en el ahorro de costos.

1.2. El mundo de los electrónicos

En el mundo de hoy los productos electrónicos están tomando cada vez mayor importancia por el gran potencial de desarrollo que representan. Tan es así, que en países industrializados no existe área en la vida diaria en donde no los encontremos. Ejemplos sobran y la lista empieza con radio-relojes alarma y cafeteras controladas por interruptores de tiempo, sistemas electrónicos en nuestros automóviles y otros medios de transporte que nos acompañan en el camino al trabajo, procesadores de datos y controladores industriales en nuestros trabajos. Muchos equipos e implantes médicos, tales como los diminutos equipos auditivos, se basan en electrónicos modernos. En muchos hogares son comunes los equipos procesadores de datos o computadoras conectados a la red global de información. La habilidad para mantenernos continuamente en comunicación se ha convertido en uno de los pilares

sobre los cuales se fundamenta la economía mundial. En el lapso de pocos años, los teléfonos celulares han pasado de ser equipos de lujo a un accesorio necesario y común para todas las edades. Y la lista puede continuar extensamente.

Todo esto, en paralelo con la capacidad de técnicas eficientes y de bajo costo de ensamble y producción se han convertido en la piedra angular de la “electronificación en masa” de la sociedad.

1.3. La tecnología SMT

Hace algunos años, la producción de electrónicos a nivel mundial pasó por un cambio revolucionario en relación a sus componentes y sus técnicas de manufactura. Inicialmente, la tecnología utilizada para el ensamble de electrónicos consistía en insertar componentes en perforaciones hechas sobre una tarjeta electrónica; hoy en día la tecnología consiste en montar los mismos, de manera automatizada, en la superficie de una tarjeta de circuitos impresa (PCB, por sus siglas en inglés) de tal forma que queden conectados mecánica y eléctricamente al paquete final. Esta es la tecnología de montaje superficial o SMT.

El método por inserción (THT, por sus siglas en inglés), llegó hace algunos años a sus límites debido a la necesidad de perforar el tablero para cada una de las terminales de los componentes; en SMT el tablero se obtiene por métodos fotolitográficos en una sola oportunidad. Es importante mencionar que el cambio no se dio de la noche a la mañana, ya que hubo que pasar por muchas evaluaciones de nuevos diseños y materiales, pero una vez que la rampa de demanda empezó, la transferencia hacia SMT se aceleró.

a) Ventajas competitivas

Los tres principales objetivos de la mayoría de los ensamblados electrónicos son la **reducción de tamaño, reducción de costos y un aumento en la confiabilidad del producto**. La SMT nos ayuda a alcanzar estos objetivos pudiendo alcanzar hasta un 40% en reducciones de tamaño y hasta un 50% en reducción de

costos de ensamble. El comportamiento de un producto obtenido en un ensamble de superficie es superior a los de los ensambles por inserción, particularmente a altas frecuencias, y la confiabilidad del producto es por lo menos igual de buena. Esto se debe a la menor inductancia, capacitancia e impedancia obtenidas.

Además de las ventajas listadas para los ensambles electrónicos a través de la implementación de SMT, también existen beneficios en el embarque y almacenamiento de los componentes y productos finales, y en los requerimientos de espacio de los equipos en el piso de producción ya que en todos ellos se requieren menores cantidades de espacio.

1.4. Materiales de SMT

Algo de historia:

La situación actual de los electrónicos es el resultado de varios desarrollos innovadores en el área. Empieza en 1947 con la invención del transistor que reemplazó el uso de los tubos de electrones con elementos semiconductores, marcando el camino hacia la miniaturización.

El desarrollo más importante en el camino hacia una producción industrial de bajo costo ocurrió en 1949 con la invención e introducción del PCB en la forma de circuitos impresos. Esto significó que las conexiones eléctricas entre los componentes no tuvieran que ser alambrados individualmente en un proceso muy tardado. De esta forma se empezaron a utilizar tableros en forma de sustratos en grandes volúmenes usando métodos fotolitográficos. Los procesos son muy similares a los que se utilizan en la impresión multi-color, de ahí que el término *printed circuit board* (tablero con circuito impreso) se utilizara y sea utilizado hoy en día. Cuando hablamos de PCBs, significa que estamos hablando de sustratos en base a resinas sintéticas o cerámica (Al_2O_3).

En 1958 el desarrollo tecnológico dio un salto grande con la invención de los circuitos integrados (IC), en los cuales muchas funciones lógicas se podían llevar a cabo en un solo componente. Doce años después, la densidad de integración en un

solo chip alcanzó los 1,000 transistores. Hoy en día se ha superado la cantidad de mil millones de ellos.

1.4.1 Componentes

Existen muchos tipos de componentes que pueden ser montados sobre un PCB, y van desde componentes pasivos, como resistencias, capacitores e inductores, hasta Circuitos Integrados.

En algunos ensambles en los que se utiliza la mezcla de tecnologías THT y SMT, mejor conocidos como ensambles híbridos, las resistencias y algunos capacitores forman parte de la gruesa capa del circuito impreso; para los ensambles puramente SMT se utilizan componentes muy pequeños y sin terminales, los cuales son montados sobre los PCB. Todos los componentes de SMT tienen la conveniencia de ser manejados, probados y ensamblados de manera automatizada. Estos se pueden entregar en formatos de cartuchos o plásticos estándar en una máquina de ensamble, a una cabeza de levantamiento y posicionamiento.

En todos los casos estos dispositivos ofrecen menor ruido y mejor respuesta en frecuencia debido a la disminución de la longitud de las terminales de los componentes.

1.4.2 Sustratos

La esencia del SMT es que los componentes electrónicos se monten en la superficie de los tableros de circuitos impresos (PCB). Dichos tableros se pueden fabricar en laminados de cubierta de cobre y fibra de vidrio-epóxico.

Varias son las necesidades que los sustratos para SMT deben cubrir para evitar daños y mejorar la funcionalidad de los productos finales; dos de los principales son:

- Los componentes grandes y sin terminales que se sueldan directamente en un PCB normal, no tienen la compatibilidad necesaria de absorber las tensiones y evitar daños y fallas durante los cambios térmicos como los que tienen terminales. Debido a esto, se han estado desarrollando nuevos

sustratos más flexibles y con un coeficiente de expansión térmica muy similar al de los componentes.

- Una segunda necesidad para los nuevos tipos de sustratos es la de permitir una adecuada disipación del calor del circuito. SMT permite alcanzar mayores densidades de componentes, lo que origina mayores problemas de la disipación del calor. Normalmente para evitar esto se utiliza una capa metálica en la que los componentes se conectan directamente para tener un mejor efecto disipante de calor.

1.4.3 Soldadura

Existen varios tipos de soldadura según sea la aplicación. En el caso específico de SMT en electrónicos la más utilizada es en forma de pasta.

La soldadura en pasta es una mezcla cremosa de polvo de soldadura con fundente. Su forma cremosa permite su fácil manejo a través de equipos automáticos de deposición de pasta, sea impresión o dispensador, permitiendo así prácticas de producción de alto volumen y ciclos de producción muy cortos.

- El tipo de aleación dependerá también del tipo de materiales en el producto, así como las temperaturas de reflujo máximas permitidas.
- El tamaño de partículas de soldadura dependerá de la aplicación final a la cual será sometida, por ejemplo, si el producto final tiene componentes muy pequeños se requerirán tamaños de partículas muy pequeños.
- El fundente tiene dos funciones: remover los óxidos metálicos para permitir un mejor mojado en los metales y como vehículo para el polvo de soldadura haciéndolo homogéneo. La selección del fundente será muy específica y dependerá de las condiciones especiales de los materiales y el proceso sometido.

1.5. Medio ambiente y tendencia “libre de plomo”

Uno de los principales problemas hoy en día con respecto a los electrónicos es el efecto adverso que éstos tienen en el medio ambiente una vez que han sido

desechados. El plomo es uno de los componentes principales de la soldadura con la que fueron ensamblados, ya que la soldadura prevaeciente hasta hace unos años se conforma de 63% Sn y 37% Pb. Este metal se infiltra a los mantos acuíferos provocando graves problemas de salud si es ingerido por seres vivos debido a su alta toxicidad.

En la actualidad existen varias legislaciones alrededor del mundo para regular o eliminar el uso de metales tóxicos como el plomo; dos de las más importantes a la fecha son las directivas WEEE (Desperdicios de Equipo Eléctrico y Electrónico, por sus siglas en inglés) y la directiva RoHs (Restricción de Sustancias Riesgosas en Productos Electrónicos, por sus siglas en inglés) cuyo campo de acción está en Europa y Asia. Esta última establece límites máximos de metales como el plomo de hasta 1,000 ppm permitidos en equipos electrónicos. Esta ley empezará a actuar a partir de Julio 1 de 2006.

La tendencia “libre de plomo” se ha desarrollado debido a estas legislaciones, ya que de no cumplir con el reglamento esto puede representar pérdida de clientes además de altas multas.

1.6. Procesos de Ensamble

Los componentes de SMT se pueden unir a un PCB utilizando un adhesivo conductivo, pero la mayoría de los ensamblajes utilizan soldadura. Existen básicamente dos tipos diferentes de soldado, Soldadura por ola (*Wave Soldering*) y soldadura por reflujo (*Reflow Soldering*). En el **soldado por Ola** cada componente se pega al sustrato usando una pequeñísima cantidad de adhesivo que luego se cura. El tablero se voltea y con los componentes hacia abajo, se aplica el fundente para después soldarlo por Ola. Todos los componentes pasan a través de la soldadura. En **soldado por reflujo** se utiliza soldadura en pasta, la cual es una mezcla de pequeñísimas partículas de soldadura combinada con fundente. La pasta luego se imprime en un tablero sin popular para después colocar los componentes. La adherencia de la pasta evita que los componentes se muevan mientras todo el material se calienta a temperaturas típicamente 30-50°C arriba del punto de fusión de la aleación de la pasta. Existen muchas maneras de suministrar el calor necesario, tales como platos

calientes, radiación IR, láser IR e inmersión en un fluido caliente. La elección depende del tipo de sustrato y de los componentes, el diseño del tablero y el volumen de producción.

El proceso de SMT puede esquematizarse como se muestra en la figura 1.1:

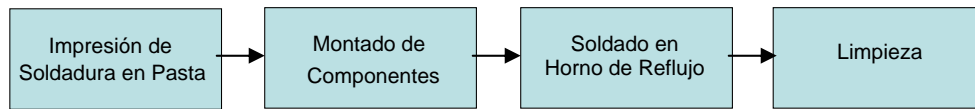


Figura 1.1.- Proceso de tecnología de montaje superficial

1.7. Impresión de soldadura

El proceso de impresión de soldadura es complejo y puede ser definido en esencia como la extrusión de un rollo de pasta de soldadura, formado por la acción de mover unas navajas, a través de las aberturas de un esténcil de metal muy delgado sobre una tarjeta electrónica (figura 1.2). Una vez que la soldadura pasa a través de las aberturas, el esténcil y la tarjeta se separan mecánicamente.

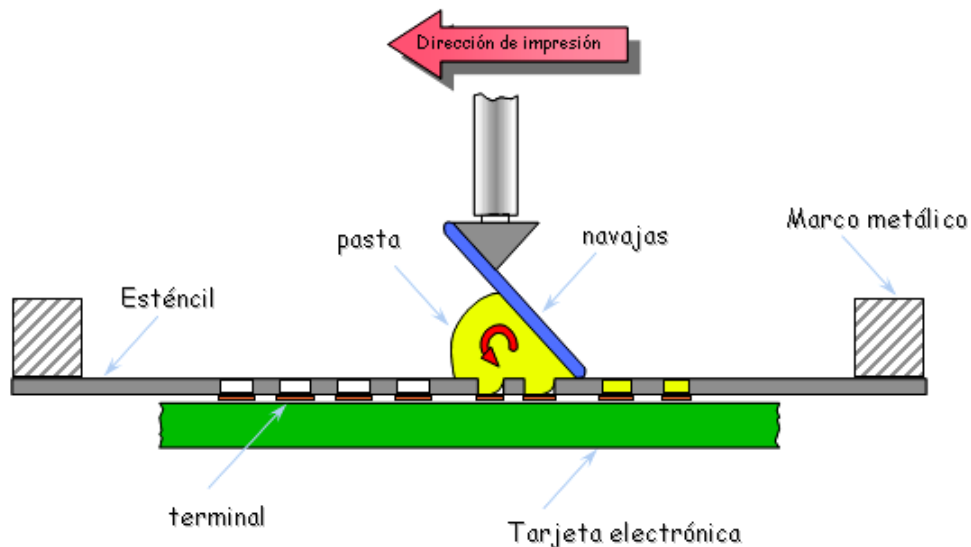


Figura 1.2.- Proceso de impresión de soldadura.

El proceso de impresión de pasta es el más crítico dentro del ensamble de tarjetas electrónicas utilizando componentes de SMT. Los expertos de la industria

coinciden que los defectos de soldadura se originan principalmente por una impresión de pasta pobre. Alrededor del 60% de los defectos se atribuyen a esta operación, y es por eso que la precisión y repetitibilidad de la impresora utilizada deben ser los adecuados durante el proceso de manufactura.

1.8. Montaje de componentes

Existen varios métodos de montaje de componentes que se utilizan en SMT: Montado manual (Figura 1.3) y Montado automático (Figura 1.4), que puede ser secuencial o simultáneo.

El montaje manual es usado predominantemente en muestras de laboratorio, prototipos, retrabajos y para producciones muy pequeñas. Para llevarlo a cabo pueden utilizarse pinzas o lápices de vacío. No es recomendable para producciones grandes o componentes pequeños ya que este proceso es muy lento, no es preciso y el costo por componente es muy alto.

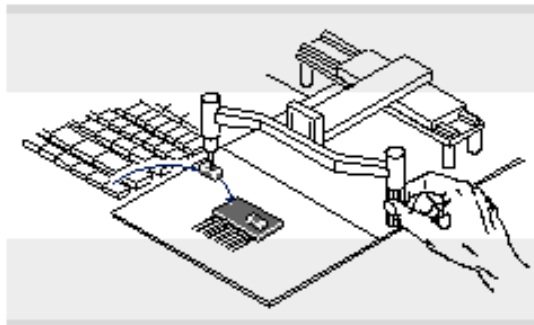


Figura 1.3.- SMT Montaje manual

El montaje automático secuencial consiste en levantar los componentes de un alimentador de uno por uno y colocarlos sobre la tarjeta electrónica. Estos sistemas se caracterizan por su gran flexibilidad en cuanto a cantidades y tipos de componentes que se pueden ensamblar. Se pueden distinguir dos métodos: el primero, levantar y posicionar, en donde el equipo levanta un componente del alimentador y lo coloca sobre la tarjeta a la vez; el segundo, coleccionar y posicionar, en donde el equipo levanta varios

componentes a la vez y luego los posiciona en las tarjetas, acelerando la velocidad de posicionado.

El montaje automático simultáneo se lleva a cabo en equipos que cuentan con varias cabezas de levantado de componentes, de tal manera que no todos los componentes se colocan por una sola cabeza sino que los componentes se distribuyen y cada cabeza levanta y coloca sólo los componentes que están dentro de su rango de viaje. Este método puede alcanzar velocidades de hasta 140,000 componentes por hora.

Los equipos automáticos se controlan a través de una pequeña computadora vía *software*.

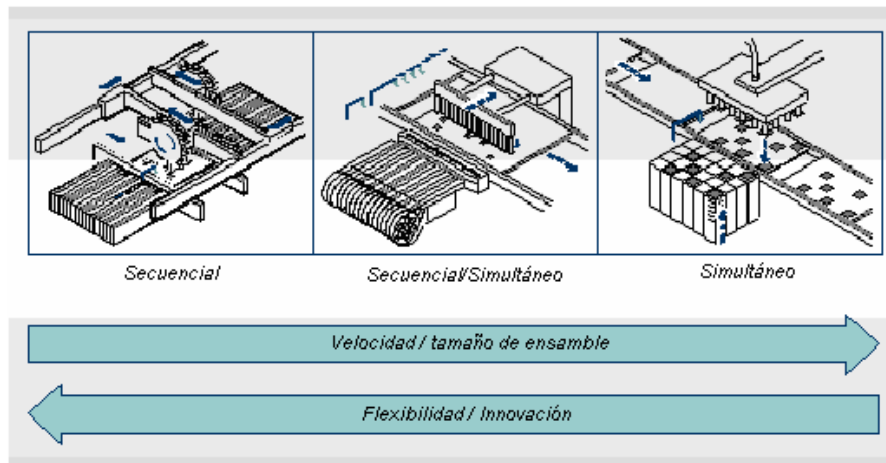


Figura 1.4.- SMT Montaje automático

Hoy en día existen muchos equipos que ofrecen un alto desempeño y flexibilidad a un costo muy bajo por componente; sin embargo existen varias condiciones que deben de considerarse antes de seleccionar el adecuado:

- o tamaño de la tarjeta electrónica que se ensamblará
- o tipos de tarjetas y tamaños de ensamblajes a manejarse
- o facilidad de programación del equipo
- o tipo y número de componentes
- o tipo de empaque de los componentes
- o velocidad de ensamble
- o precisión del posicionamiento
- o costo de ensamble

- flexibilidad

1.9. Soldado por Reflujo

En el proceso de soldado en horno de reflujo los componentes montados sobre la soldadura en pasta son calentados hasta la temperatura de fusión de la aleación y luego enfriados hasta que la soldadura se solidifica y crea una capa permanente intermetálica entre las terminales del componente y los pads del PCB. Las condiciones térmicas del horno deben ser específicas para cada aplicación y se conocen como perfiles térmicos.

El proceso puede llevarse a cabo en una atmósfera de aire o de Nitrógeno. Normalmente se recomienda utilizar una atmósfera inerte para evitar la oxidación generada en presencia de aire y favorecer la vida útil de los productos finales.

Hay muchos trabajos técnicos realizados a la fecha referente a cuestiones generales del efecto de soldar bajo una atmósfera inerte de nitrógeno para evitar los niveles de oxidación; sin embargo, y debido a que las condiciones de cada compañía difieren, es recomendable hacer un estudio específico para determinar el tipo de atmósfera recomendable.

1.10. Limpieza de Residuos

Como se describió anteriormente, uno de los constituyentes de la soldadura utilizada en SMT es el fundente. Después de que los materiales son sometidos a altas temperaturas en el horno y que el fundente ha cumplido su función, pueden quedar residuos del mismo sobre las tarjetas electrónicas. Dependiendo de la naturaleza del fundente será la cantidad de residuo y los efectos secundarios que éstos puedan provocar sobre la tarjeta. Existen algunos fundentes que producen pocos residuos y otros que son llamados “libre de limpieza” ya que éstos no producen efectos secundarios en el ensamble si son dejados en la misma. Sin embargo existen algunos cuyos residuos pueden provocar problemas de corrosión debido a la agresividad química de los mismos y que pueden provocar la falla total del circuito y/o problemas eléctricos, debido a la contaminación iónica por los mismos residuos de fundente y de sus productos de corrosión.

En caso de que los residuos representen un riesgo para la funcionalidad de los materiales es muy importante llevar a cabo la remoción de los mismos utilizando un solvente. El tipo de solvente y las condiciones del proceso de limpieza pueden ser muy variados y dependerán de la naturaleza química del fundente, los casos más comunes son el agua para los fundentes solubles en agua y solventes orgánicos para los fundentes cuya base son resinas orgánicas. Lo importante aquí es que la remoción sea efectiva.

1.11. La empresa SKYWORKS

Skyworks Solutions Inc. es una compañía de semiconductores inalámbricos enfocada a sistemas de radiofrecuencia (RF) y soluciones de sistemas semiconductores para aplicaciones de comunicación móvil. Tiene oficinas centrales en Woburn, MA, y en Irvine, CA, dentro de los Estados Unidos Americanos y una planta de manufactura localizada en Mexicali, B.C., México.

El portafolio de productos de Skyworks para las soluciones de comunicación móvil incluye la flexibilidad de desarrollar familias completas de productos inalámbricos, desde productos de bajo costo y grandes volúmenes de producción hasta los más sofisticados del mercado. Dichos productos dan la capacidad a los clientes de incluir las opciones más sofisticadas en sus productos, tales como pantallas de color, acceso a Internet de alta velocidad, juegos en línea, cámara digital, video MPEG, conexión bluetooth, audio digital y GPS entre otros. (Figura 1.5)



Figura 1.5. Productos para la comunicación móvil manufacturados por Skyworks Solutions Inc.

1.12. Condiciones de proceso actuales

Dentro de las instalaciones de la planta manufacturera localizada en Mexicali, B.C. y de entre varios procesos de ensamble encontramos el proceso de SMT que se muestra en la figura 1.6, y el cual será el área de enfoque de este estudio.

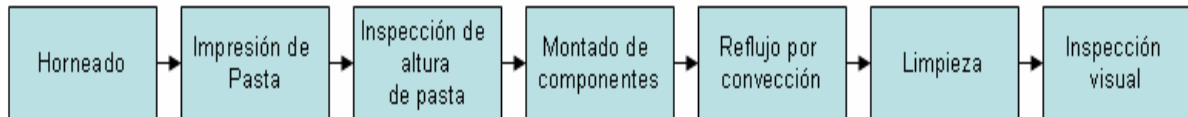
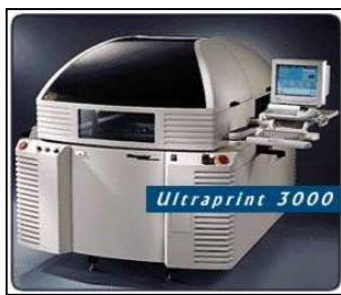
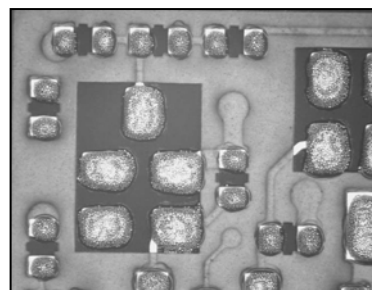


Figura 1.6. Flujo de SMT para los procesos de manufactura en Skyworks.

- Horneado: La operación consiste en someter las tarjetas electrónicas a una temperatura de 125°C durante 8 horas. La finalidad de este paso es la de eliminar toda la humedad que pueda estar contenida en el material y eliminar los defectos relacionados con ella en operaciones posteriores. Se utilizan hornos de proceso tipo “por lote”.
- Impresión de Pasta: La impresión de pasta se lleva a cabo automáticamente en equipos conectados en “línea” y son utilizados estenciles de 4 milésimas de espesor. Estos equipos utilizan una bomba automática que aplica la soldadura en pasta por medios neumáticos. La figura 1.7 a), muestra el equipo utilizado para imprimir y la figura 1.7 b), muestra una tarjeta electrónica con soldadura recién impresa.



a)



b)

Figura 1.7.- a) equipo para imprimir y b) tarjeta con soldadura recién impresa.

- Inspección de Altura de pasta: Consiste en un muestreo de la línea de producción en donde se monitorea la altura de la pasta aplicada en el paso anterior. El equipo es automático e inspecciona utilizando sensores láser.

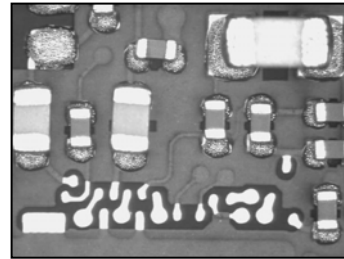


Figura 1.8.- Equipo utilizado para inspeccionar

- Montado de componentes: Se utilizan equipos de montaje automático simultáneo. Cuentan con 4 cabezas de levantado que pueden colocar hasta 60,000 componentes por hora, componentes tan pequeños como los 01005 (0.4mm x 0.2mm x 0.2mm) y precisiones de ± 85 micrómetros.



a)



b)

Figura 1.9.- a) Equipo utilizado para colocar componentes y b) Tarjeta electrónica con componentes recién colocados sobre pasta fresca.

- Horno de Reflujo: El proceso de soldado se lleva a cabo en línea en hornos de reflujo por convección. Los hornos contienen 10 zonas de calentamiento y 3 de enfriamiento. Se utiliza una atmósfera inerte de Nitrógeno (1000 ppm de O_2) y el perfil térmico se define considerando la tarjeta electrónica más el medio de transporte del material llamado *pallet* o tablilla (ver siguiente sección).



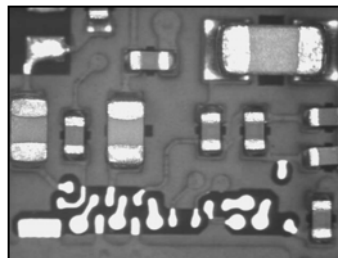
Figura 1.10.- Horno de reflujo

- Limpieza de Residuos: Aunque el tipo de soldadura actual contiene un fundente del tipo “Libre de limpieza”, se utiliza ciclohexano como solvente para remover dichos residuos. El equipo contiene una cámara sellada con dos tanques de solvente en donde el material se limpia por inmersión ayudada por ultrasónicos a 68 KHz y agitación vertical.



Figura 1.11.- Equipo utilizado para limpiar residuos.

- Inspección visual: Al final del proceso, el material se inspecciona 100% con el uso de microscopios a una magnificación de 7X.



La figura 1.12.- Tarjeta electrónica con componentes soldados al final del proceso.

Como referencia general, los procesos subsecuentes a SMT para la manufactura de microcircuitos en Skyworks continúan con el siguiente flujo:

1. Trazado de Obleas de Silicio (Individualización de los circuitos integrados)
2. Pegado de componentes (adherencia de los CIs a la tarjeta con epóxicos)
3. Alambrado (conexiones de los CI a la tarjeta con alambre de oro)
4. Moldeado (Encapsulado de CI con resinas epóxicas)
5. Marcado (Identificación de los productos)
6. Singulado (Individualizado de CI moldeados)

1.13. Materiales utilizados en SMT

- o Tarjetas Electrónicas: Las tarjetas utilizadas para todos los productos son de las mismas dimensiones: 186 x 60 x 0.5 mm (figura 1.13). Están fabricadas con resina tipo FR-4 y las terminales metálicas son de cobre recubiertas por una capa de 5 micrómetros de Níquel (deposición autocatalítica) y 0.5 micrómetros de oro.

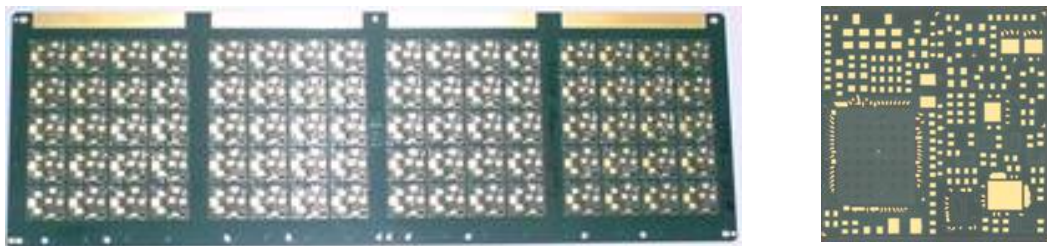


Figura 1.13.- Tarjetas electrónicas.

- o Componentes: Los componentes más comunes utilizados son componentes pasivos, esto es, capacitores, resistencias e inductores. Los tamaños de los componentes pueden ir desde 2 x 2 x 1 mm hasta 0.4 x 0.2 x 0.2 mm. Dichos componentes tienen terminales que pueden ser de Plata o Cobre, con deposiciones de Níquel-Estaño para facilitar el soldado del material. (figura 1.14)

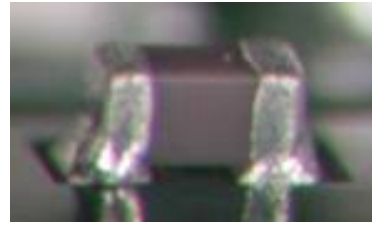
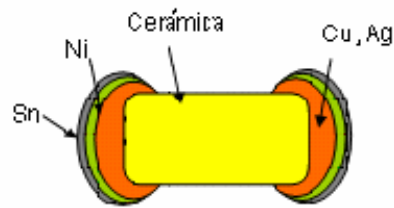


Figura 1.14.- Componentes comúnmente utilizados en el proceso de fabricación de tarjetas.

- Soldadura: Se utiliza una soldadura “libre de plomo” de aleación 95% Sn y 5% Sb, con un fundente del tipo “libre de limpieza”. El metal tiene el 90% del peso y el resto el fundente. El tamaño de partícula manejado es del tipo 3 (tamaño de partícula de 25 a 45 micrómetros de diámetro) pero se está evaluando actualmente la tipo 4 (con tamaño de partícula de 15 a 25 micrómetros de diámetro) para soldar componentes 01005.
- Tablillas: Las tarjetas electrónicas son transportadas a través de todo el proceso sobre unas tablillas de fibra de vidrio (figura 1.15); esto facilita el manejo de materiales en el área. El perfil térmico del horno está hecho para la tarjeta electrónica considerando la masa de la tablilla dentro del horno.

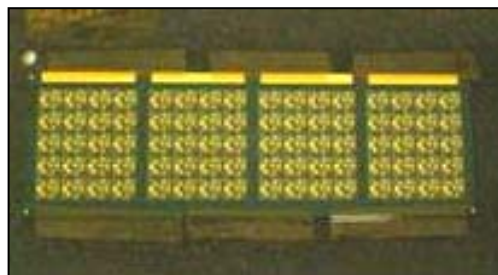


Figura 1.15.- Tablillas de fibra de vidrio para transporte de tarjetas electrónicas.

- Nitrógeno: Dentro del horno de convección se utiliza Nitrógeno como atmósfera inerte 99.99% pureza.
- Solventes: Se utiliza ciclohexano en el equipo de limpieza de residuos con la finalidad de remover los residuos del fundente sobre la tarjeta.

1.14. Defectos de SMT

Existen diferentes tipos de defectos en el área generadores de fallas eléctricas o de confiabilidad. Los principales y que están relacionados con este estudio son los siguientes:

- Puentes de Soldadura: Son las uniones de soldadura formadas entre dos o más terminales vecinas. Puede formarse por exceso de pasta, incapacidad del fundente para mantener la forma impresa de la soldadura y por presión excesiva de montaje del componente, entre otros. (figura 1.16)

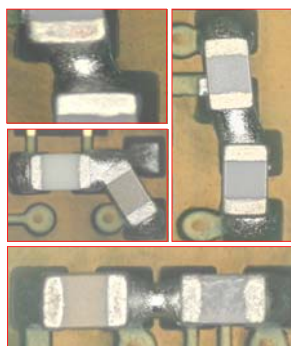


Figura 1.16.- Uniones con soldadura

- Reflujo incompleto: cuando las uniones formadas dan señales de pasar por un reflujo incompleto, puede tener apariencia granulosa, irregular o una coalescencia incompleta de las esferas de soldadura. Las causas principales son: temperatura insuficiente, interferencia de la contaminación superficial en las actividades del fundente, incapacidad del fundente, entre otros.



Figura 1.17.- Defectos en soldadura.

- Falta de mojado: Es la falta de cobertura de la soldadura en la terminal metálica de la tarjeta electrónica o del componente. Algunas causas comunes

de este defecto pueden ser la presencia de impurezas en las terminales y/o en la soldadura, actividad del fundente no suficiente o por un perfil térmico no adecuado, entre otros.

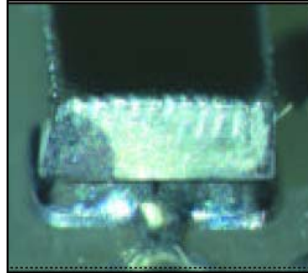


Figura 1.18.- Soldadura con problemas de falta de humectación.

- Burbujas en soldadura: Puede ser *atribuido* a la contracción de la soldadura durante la solidificación, por los gases liberados de la tarjeta electrónica o por gases de fundente atrapados, entre otros. Se utilizan rayos X o análisis de fallas transversal para detectarlo (Figura 1.19).

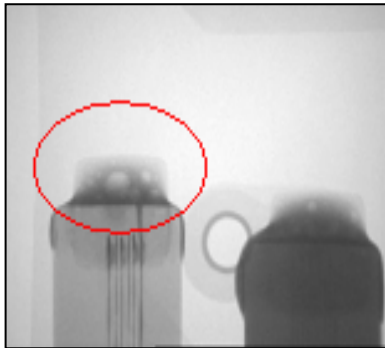


Figura 1.19.- Radiografía que muestra el problema de burbuja en soldaduras.

- Tombstone: Cuando una de las terminales del componente no hace contacto con la tarjeta electrónica. Es producido cuando el mojado de las terminales no está en balance. Entre los causantes referenciados en este estudio pueden influir la velocidad de mojado del fundente, el nivel de liberación de gases del fundente, un perfil térmico inadecuado o un posicionamiento incorrecto del componente en la tarjeta electrónica. (Figura 1.20)

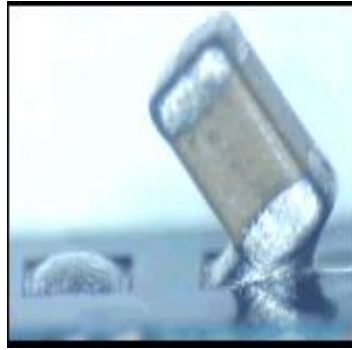


Figura 1.20.- Problema conocido como tombstone.

- Componente faltante: Es la ausencia de un componente en donde debiera estar. Las causas pueden ir desde un posicionamiento incorrecto o la falta de una buena adherencia del fundente hacia el componente. (figura 1.21)

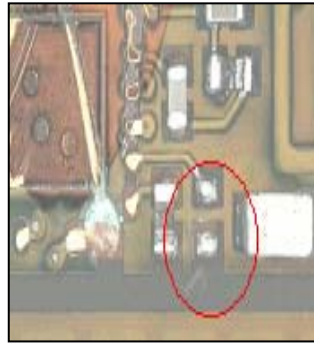


Figura 1.21.- Falla por ausencia de componente.

- Falta de Soldadura: La cantidad de soldadura en las terminales es muy poca. Se ocasiona generalmente cuando las propiedades del fundente no son las adecuadas para hacer fluir correctamente la pasta durante la impresión de la misma. (figura 1.22)

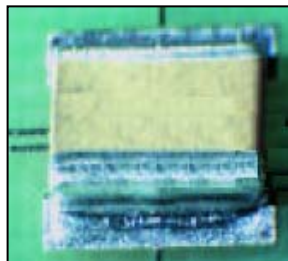


Figura 1.22.- Falla por falta de soldadura en unión.

- Componente girado: Es el movimiento del componente resultando en un alineado incorrecto durante el reflujo. Se origina por un desbalance en la tensión superficial de la soldadura fundida en las terminales de los componentes. Puede decirse que es una fase previa al problema de *tombstone*, así que los factores que lo provocan pueden ser los mismos, además de una pobre soldabilidad de las terminales del componente. (Figura 1.23)

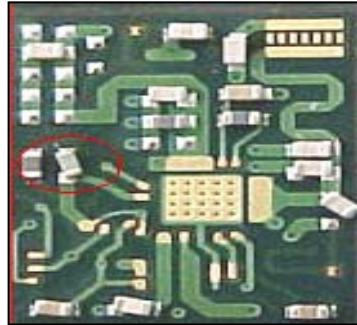


Figura 1.23.- Alineación incorrecta de componente por desbalance en la tensión superficial de la soldadura.

- Esferas de Soldadura: Es la presencia de partículas esféricas de soldadura de diferentes diámetros en las afueras de la masa principal de soldadura aplicada en las terminales de la tarjeta. Puede ser originado por una impresión de pasta incorrecta, por la incapacidad del fundente de mantener la soldadura en la figura de impresión original, una pobre soldabilidad de las terminales metálicas, presencia de humedad o solventes no adecuados en la soldadura, un perfil térmico inadecuado que pueda provocar dispersión de la pasta, entre otros. (figura 1.24)

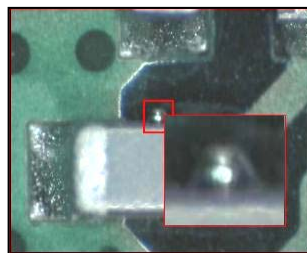


Figura 1.24.- Defecto por presencia de esferas de soldadura

- Salpicamiento: Ocurre durante el reflujo y es el salpicamiento del fundente que puede alcanzar algunos milímetros de distancia. El salpicamiento puede ser únicamente de fundente o de fundente con soldadura provocando manchas o dejando residuos en superficies metálicas de la tarjeta eléctrica. Se puede originar por la absorción de humedad de la soldadura, por otros solventes con mucha polaridad en el fundente, por un fundente con rapidez de mojado, por un perfil térmico con rampa lineal sin zona de evaporación de volátiles, entre otros. (figura 1.25)

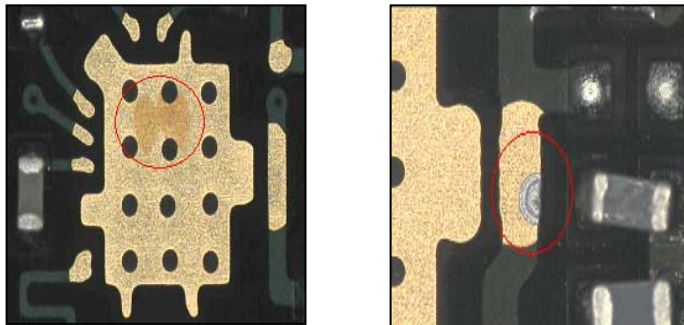


Figura 1.25.- Falla en soldadura por salpicado.

1.15. Pruebas de confiabilidad

Todos los productos existentes en Skyworks y cada cambio en el proceso o materiales en producción son avalados a través de pruebas de confiabilidad para verificar que cumplan con los límites mínimos de vida del producto o para determinar la tasa de fallas para los mismos.

Existen diversas tipos de pruebas que están definidas en documentos oficiales de Skyworks que se tienen que cumplir para poder calificar los cambios propuestos; en el caso de este estudio las pruebas requeridas son las siguientes:

1. C-sam (Microscopía de barrido acústico)
2. Pre-acondicionamiento de las piezas, en base a [18] y [19]:
 - a. Horneado 24 hrs a 125°C
 - b. Cámara de Humedad: 60 HR/60°C por 40 horas

c. Reflujo a 260°C por triplicado

3. C-sam (Microscopía de barrido acústico)

La muestra en el caso de Skyworks es de 77 unidades por condición a evaluar y está fundamentada en un LTPD $\leq 3\%$ de acuerdo al tamaño de lotes de producción.

Las pruebas de confiabilidad se complementan con pruebas de manufacturabilidad, que no son otra cosa sino verificar que las respuestas de proceso actuales de los procesos afectados por el cambio no se vean modificadas respecto a las condiciones actuales. En el caso de la propuesta de SMT se necesitarán conocer las siguientes variables respuestas:

Área	Variable	Muestra/condición
SMT	Fuerza de adherencia del componente	30 unidades
Pegado de Dados	Fuerza de adherencia del dado	30 unidades
Alambrado	Fuerza de rompimiento de alambre en piso	30 unidades

1.16. Estudios Similares

Debido a la gran explosión y demanda por los electrónicos hoy en día y a la gran necesidad del cambio de materiales para eliminar el uso del plomo en ellos, desde hace algunos años ha habido estudios similares enfocados a SMT, sobre todo con la finalidad de encontrar la soldadura libre de plomo más adecuada.

Hay algunos estudios realizados en donde se justifica el uso de atmósferas inertes como medio de reducción de defectos cuando se utilizan soldaduras libre de plomo [1,2,7,17], sin embargo la tecnología en la fabricación de fundentes ha ido cambiando y mejorando conforme avanza el tiempo y es importante reconsiderar el estudio del tipo de atmósfera en combinación con los nuevos fundentes como una alternativa viable a la reducción de costos.

Es importante mencionar también que la mayoría de las industrias electrónicas que están migrando a nuevas soldaduras están seleccionando la aleación Sn-Ag-Cu o mejor conocida como SAC, ya que ésta es la que menor punto de fusión tiene (217 °C) de entre las que mejores resultados se han observado; es por eso que la mayoría de los estudios recientes están enfocados a este tipo de aleaciones [13] y es raro encontrar referencias sobre la aleación aquí estudiada de Sn-Sb.

Otro punto importante a considerar es que Skyworks se reconoce por ser una industria de liderazgo tecnológico y sus productos se apegan a la tendencia de “miniaturización” en SMT; pocos son los estudios hechos en condiciones tan agresivas, de hecho la mayoría de las industrias apenas están evaluando utilizar componentes tan pequeños como el 0201 [6] y apenas hay publicaciones de evaluaciones preliminares del uso de componentes 01005 [4]. Este estudio incluye recomendaciones relacionadas con componentes 01005.

En relación a estudios relacionados con caracterización de soldaduras podremos encontrar varias referencias [5, 8-11, 14-16] y algunas más sobre fundentes [7,12].

El enfoque de este estudio incluye pruebas de confiabilidad en producto real de Skyworks, evaluaciones similares son difíciles de encontrar debido a que la mayoría de los productos SMT no son encapsulados como los de Skyworks.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Descripción general del proceso de Soldadura

El proceso de soldadura utiliza metal fundido para mojar las superficies de una unión y formar lazos metalúrgicos entre dos partes metálicas. Normalmente la temperatura de fusión de un metal para soldar es menor a 450°C. Para materiales con puntos de fusión mayores, el proceso de unión se clasifica como “brazing”. El proceso de soldar involucra tecnología de interconexión vital para los procesos de la industria electrónica de hoy en día, sea en el nivel de ensamble tipo I (empaquetamiento de circuitos integrados) o en el nivel de ensamble tipo II (montaje de componentes electrónicos en tarjetas electrónicas). Por lo tanto, para alcanzar altos niveles de calidad y de eficiencia en el proceso de soldar, es esencial entender los fundamentos de la soldadura y el proceso de soldar.

Aunque el proceso de soldar se ha utilizado por los seres humanos por varios miles de años, el conocimiento de este proceso ha sido mínimo hasta hace poco. El proceso de soldar se ilustra en la figura 2.1 y puede ser generalizado en tres pasos principales: (a) expansión, (b) disolución de la terminal metálica y (c) formación de una capa de compuesto intermetálico. En esta ilustración el fluido puede ser o fundente o atmósfera de soldadura, y la terminal metálica es el sustrato.

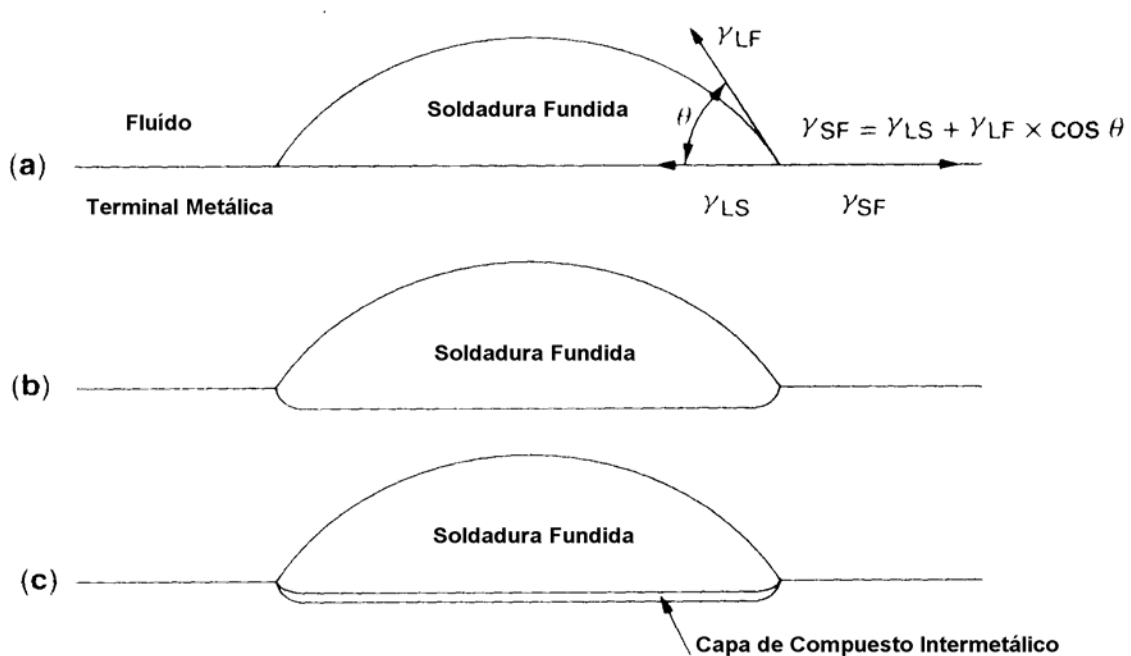


Figura 2.1.- Proceso de soldadura.

2.2. Soldabilidad

La soldabilidad se define como la capacidad de un componente de ser soldado por el método deseado. Existen tres aspectos importantes para la soldabilidad: 1) la demanda térmica, 2) el grado de mojado y 3) la resistencia al calor de soldado.

Las propiedades térmicas de los componentes deben permitir a las áreas en donde se formarán las uniones de soldadura, ser calentadas a la temperatura requerida para el proceso de soldado en el tiempo disponible para dicha operación. Las superficies a soldar deben permitir a la soldadura fundida mojar y dispersarse durante el tiempo disponible sin problemas secundarios. El calor del proceso de soldado y los esfuerzos térmicos inducidos no deben afectar el funcionamiento de los componentes dentro de los límites especificados. Cada una de estas propiedades se pueden manejar para satisfacer las necesidades específicas de ciertas aplicaciones con sólo seleccionar correctamente los materiales de sus componentes. De las tres propiedades mencionadas, el grado de mojado es la más crítica y que afecta más durante el proceso de soldar.

2.2.1 Velocidad y ángulo de mojado

Cuando se discuten las características de mojado de un componente por la soldadura derretida, hay dos aspectos que son igual de importantes. El ángulo de mojado, esto es, que tan lejos se esparce la soldadura, es una situación de equilibrio gobernada por las leyes de la termodinámica y dependiente de la superficie y tensiones interfaciales involucradas en el frente líquido y sólido. La velocidad de mojado, esto es, que tan rápido la soldadura moja y se esparce, es gobernada por la demanda térmica del sistema, la habilidad de la fuente de calor para abastecer ese calor, la eficacia del fundente y las reacciones químicas que ocurren en las interfases

2.2.2 Tensión superficial

La tensión superficial de un líquido es igual a la cantidad de energía necesaria para alargar el área de la superficie del líquido. Tiene dimensiones de $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$

Dentro del líquido la atracción molecular es uniforme en todas direcciones. En la superficie, debido al menor número de átomos vecinos en el ambiente circundante, la atracción exterior es más pequeña y existe una fuerza resultante que actúa hacia adentro

perpendicular a la superficie y consecuentemente una presión a través de la superficie. Esta presión jala los átomos de la superficie al interior del líquido más rápidamente que su reemplazo por otras moléculas que se mueven hacia fuera de tal modo que la superficie se contrae a un área mínima para el volumen particular del líquido. Termodinámicamente hablando, el sistema se esfuerza en obtener un valor mínimo de su energía libre, y esto lo hace minimizando su área superficial. Una gota flotante por tanto asume la forma de una esfera ya que una esfera tiene el mínimo cociente entre superficie y volumen.

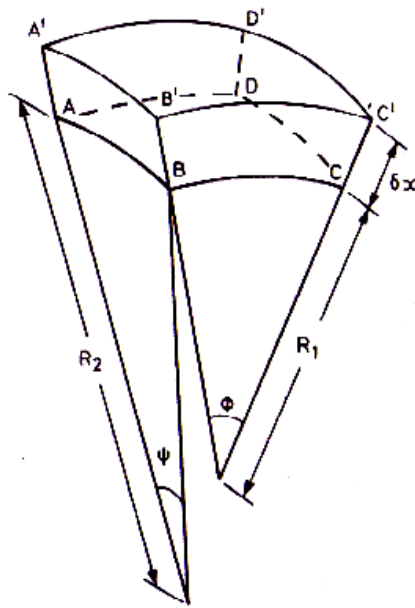


Figura 2.2.- Superficie líquida curvada

La Figura 2.2, es parte de una superficie líquida curvada, que tiene radios principales de curvatura R_1 y R_2 . Si γ es la tensión superficial, la energía de la superficie ABCD es γ veces el área, esto es, $\gamma \cdot R_1 \delta\phi \cdot R_2 \delta\psi$. Si el área de la superficie se incrementa a A'B'C'D', la energía se incrementa a $\gamma \cdot (R_1 + \delta x) \delta\phi \cdot (R_2 + \delta x) \delta\psi$. Si la diferencia de presión a través de la superficie curvada, que surge de las fuerzas resultantes que actúan hacia adentro es δp , entonces el trabajo hecho para causar esta expansión es (presión)×(área)×(distancia de expansión), esto es: $\delta p \cdot R_1 \delta\phi \cdot R_2 \delta\psi \cdot \delta x$.

Así que:

$$\gamma \delta\phi \delta\psi [(R_1 + \delta x)(R_2 + \delta x) - R_1 R_2] = \delta p \delta\phi \delta\psi R_1 R_2 \delta x$$

De donde:

$$\delta p = \gamma \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Esta se conoce como la ecuación de **Young-Laplace**.

En la ecuación 2.1 un radio es positivo cuando se mide dentro del líquido y negativo si se mide fuera del líquido. Para una gota flotante, una esfera de radio R, por tanto

$$\delta p = \frac{2\gamma}{R} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

La esfericidad de una gota de líquido que se sostiene sobre una placa plana que no es mojada por el líquido es solo una aproximación, válida en el límite en que R se aproxima a cero. Conforme el volumen de la gota colocada se incrementa, su superficie superior se vuelve aplanada por efecto de la gravedad, como se muestra en la Figura 2.3 (a). La diferencia en presión a través de la superficie, en cualquier punto de la superficie del líquido es entonces

$$\delta p = g\rho z + \text{constante} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

donde g es la aceleración debida a la gravedad, ρ es la densidad del líquido y z la coordenada vertical medida desde el ápice de la gota como se muestra en la Figura 2.3 (b). En el caso de una gota colocada sobre una placa plana, la superficie tiene simetría cilíndrica sobre el eje vertical y las secciones verticales definen la forma de las gotas.

La normal a la curva en cualquier punto (x,z) hace un ángulo ϕ con la vertical, y el radio de curvatura de la superficie en el plano subtendido a un ángulo ϕ es $R_2 = x/\sin\phi$. El radio de curvatura en el plano de la sección es R_1 como se muestra. En el ápice de la gota, $z=0$, $R_1=R_2=r$, el máximo radio de curvatura, y de ahí la constante en la ecuación (2.3) es $2\gamma/r$.

Así pues la ecuación para la forma de la gota colocada cilíndricamente simétrica se obtiene sustituyendo en la ecuación (2.1):

$$\frac{r}{R_1} + \left[\frac{r}{x} \right] \sin\phi = 2 + \frac{r^2 g\rho}{\gamma} \left[\frac{z}{r} \right] \quad (\text{Ec. 2.4})$$

La forma de esta ecuación es útil ya que las dimensiones lineales R_1 , x y z aparecen como cocientes del máximo radio de curvatura, r. También, el parámetro

$$\zeta = \frac{r^2 g \rho}{\gamma}$$

es una constante sin dimensión para el líquido particular y su cantidad. Para soldadura de estaño-plomo 60:40

$$\zeta = 0.20r^2$$

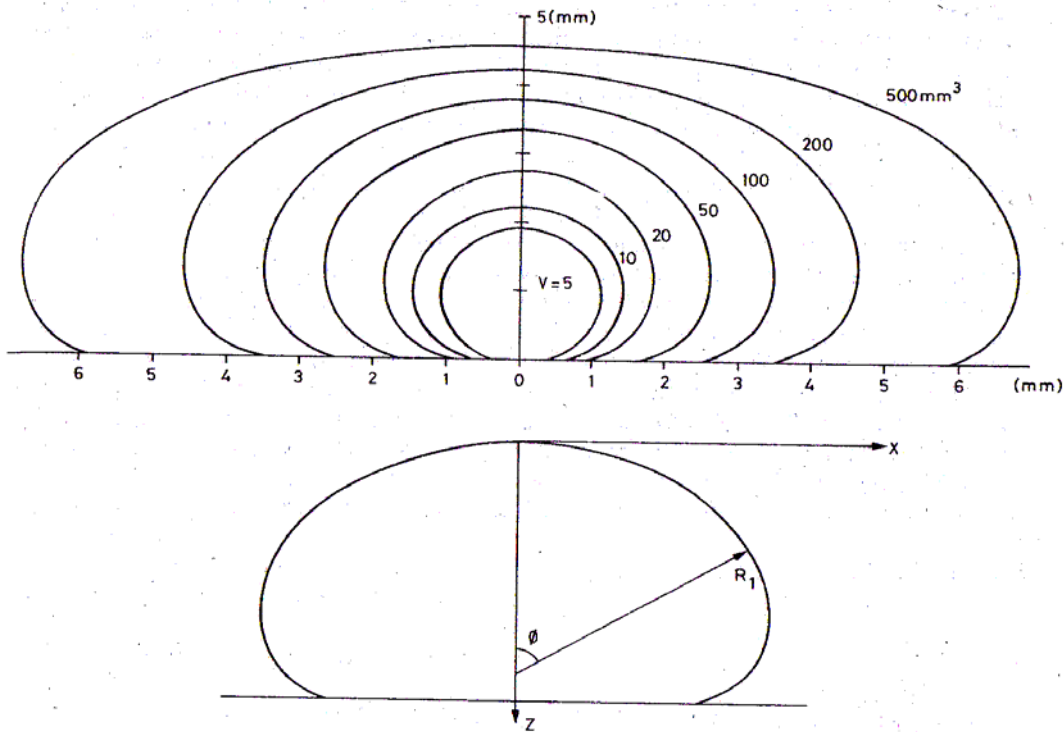


Figura 2.3.- Esfericidad y coordenadas de una gota.

si r se expresa en milímetros. A su vez, r depende del volumen del líquido de soldadura presente. Así pues, un valor dado para la constante ζ da la misma forma de la gota sin importar el tamaño de la gota, y una r cambiante influencia sólo el tamaño de la gota sin alterar su forma. Por supuesto, cambiar el tamaño de la gota mientras se mantiene la tensión superficial y la densidad constante causa que tanto ζ como r cambien simultáneamente.

Tanto R_1 como ϕ involucran derivadas de z con respecto a x , para dar:

$$r \frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{r}{x} \left\{ 1 + \left[\frac{dz}{dx} \right]^2 \right\} \frac{dz}{dx} = \left[2 + \frac{\zeta z}{r} \right] \left\{ 1 + \left[\frac{dz}{dx} \right]^2 \right\}^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Esta ecuación es la de la forma de una gota líquida colocada, ilustrada en la Figura 2.3.

No está disponible una solución analítica pero hace tanto como 1883 se han producido tablas de soluciones numéricas. Las rutinas modernas de llenado de curvas han facilitado la tarea de caracterizar paramétricamente los perfiles de las gotas líquidas.

2.3. Termodinámica del mojado

Cuando una gota de líquido se pone en contacto con una superficie sólida plana a la que moja, la forma final tomada por la gota depende de las magnitudes relativas de las fuerzas inter-moleculares que existen dentro del líquido (fuerzas de cohesión) y entre el líquido y el sólido (fuerzas de adhesión). El índice de este efecto es el ángulo de contacto, θ , que el líquido subtiende con el sólido.

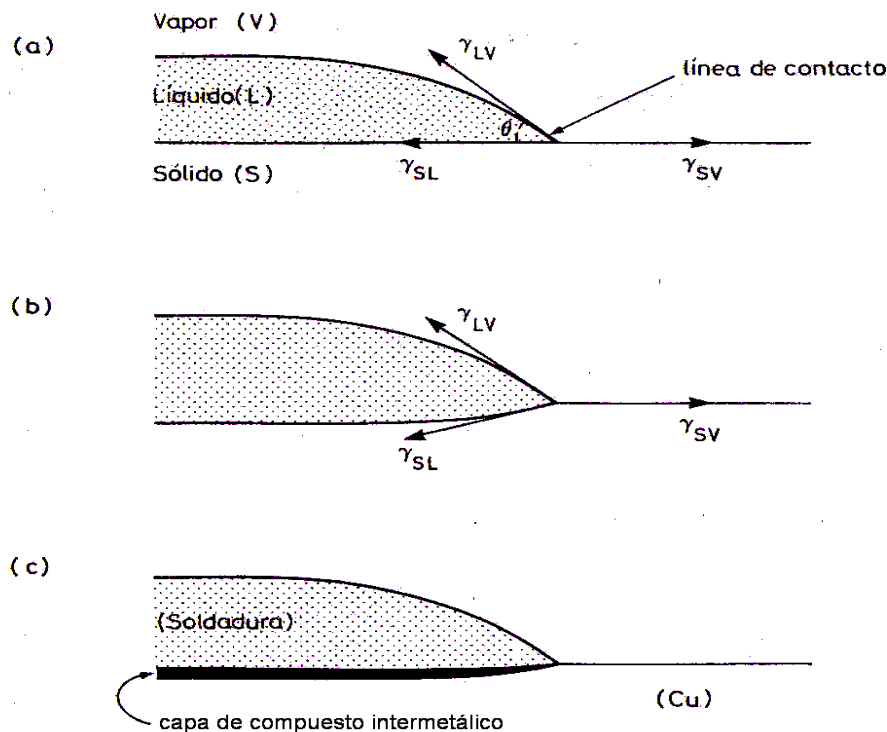


Figura 2.4.- Aspectos de energía superficial durante el mojado.

La situación se puede ver en la Figura 2.4. Young originalmente consideró el equilibrio cuantitativamente en 1805 y Dupré, en 1869, lo puso en términos matemáticos. Cada sistema tiende hacia una energía libre total mínima y de ahí las áreas de las

interfases y superficies se esfuerzan de volverse tan pequeñas como sea posible. Al hacerlo así deben contra-actuar una a la otra: una se vuelve más pequeña a expensas de otra superficie volviéndose más grande. Así pues una condición de equilibrio se alcanza cuando la energía libre total, F , dada por

$$F = \sum_i \gamma_i (\text{área superficial}) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

es un mínimo.

Si la línea de contacto en la Figura 2.4 (a) se mueve de tal modo que un área adicional del sólido se moja, entonces hay un incremento de la energía libre superficial en la interfaz sólido-líquido, un decremento en la interfaz sólido-vapor y un incremento en la superficie del líquido. Así pues, en equilibrio

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde los subíndices SV, SL y LV representan las interfases sólido-vapor, sólido-líquido y líquido-vapor respectivamente.

Esta se conoce como la ecuación de Young-Dupré. Puede arguirse que la ecuación 2.7 no es rigurosamente correcta ya que es algebraicamente equivalente a resolver las componentes horizontales de las fuerzas superficiales, y no se toma en cuenta la componente vertical de γ_{LV} . Hay evidencia de alguna distorsión de la superficie del sólido por esta componente de la fuerza y por tanto, estrictamente, los esfuerzos en el sólido que balancean en parte la fuerza vertical, como se muestra en la Figura 2.4 (b), deben incluirse en la derivación del ángulo de contacto de equilibrio. Sin embargo, donde el sólido es grueso y la temperatura es tal que hay poca deformación elástica o plástica, la ignorancia de estos efectos se justifica comúnmente. En soldadura, el material sólido se disuelve en el líquido y la forma final de equilibrio tiende a la mostrada en la Figura 2.4 (c). Adicionalmente, la interdifusión del sustrato y la soldadura por disolución usualmente resulta en una fase sólida intermetálica separada que se forma en la interfaz. Así pues, en el caso práctico de soldadura sobre un sustrato soluble, la ecuación 2.7 es sólo una aproximación.

El término “mojado” se usa a menudo ampliamente. Para propósitos prácticos se dice comúnmente que si el ángulo de contacto $\theta > 90^\circ$ la soldadura no ha mojado el sustrato, pero, estrictamente hablando, sólo si $\theta = 0^\circ$ el mojado ha ocurrido

verdaderamente. Un pequeño ángulo de contacto θ es promovido por valores pequeños de γ_{LV} y γ_{SL} en combinación con un valor de γ_{SV} relativamente grande. Esto significa por lo común que la soldadura no mojará ni se esparcerá sobre un sustrato cubierto de óxido ya que las tensiones superficiales de los óxidos (γ_{SV}) son marcadamente más bajas que los valores de sus metales no-oxidizados correspondientes. La función principal del fundente en la soldadura es remover el óxido sobre el sustrato y, al hacerlo así, incrementar su energía superficial, haciendo termodinámicamente ventajoso para la soldadura líquida mojar y esparcirse sobre éste, reduciendo con esto la energía superficial total del sistema.

Conforme el ángulo de contacto θ se aproxima a cero, el desbalance de las energías libres superficiales se define por la energía de esparcimiento σ_{SLV} :

$$\sigma_{SLV} = \gamma_{SV} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LV}) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Si σ_{SLV} es positivo, el esparcimiento es acompañado por un decrecimiento en la energía del sistema, y es por tanto espontáneo. La energía de esparcimiento es la diferencia entre el trabajo de adhesión del líquido al sólido ($\gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL}$) y el trabajo de cohesión del líquido ($2\gamma_{LV}$), parámetros que se definen esquemáticamente en la Figura 2.5. Si el esparcimiento ocurre o no es una manifestación de las magnitudes relativas de las fuerzas inter-moleculares.

Dependiendo de las magnitudes de las tensiones superficiales es posible lograr valores de equilibrio del ángulo de contacto θ entre 0 y 180° para, respectivamente, mojado ideal completo y completo no-mojado. En soldadura, aún con un fundente activo, un ángulo de contacto $\theta=0^\circ$ no es una situación normal debido a la magnitud de la tensión interfacial γ_{SL} , que cambia con el tiempo conforme el grosor y la morfología de la capa de compuesto intermetálico cambia.

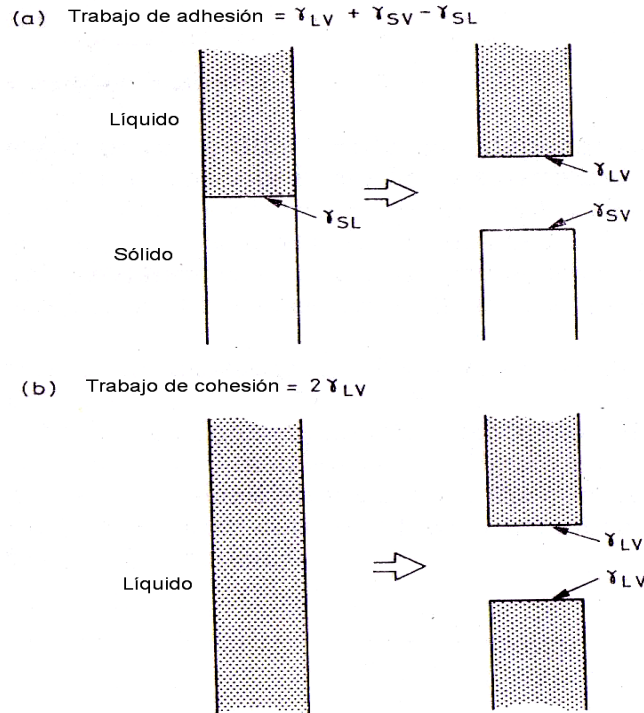


Figura 2.5.- Parámetros termodinámicos de trabajo de adhesión y cohesión de interfases.

2.4. Formas del menisco líquido

Los perfiles superficiales de gotas líquidas colocadas en contacto con una superficie que no es mojada por el líquido, se definen por la ecuación de Laplace (Ec. 2.1) más la gravedad en la forma de una presión hidrostática $\rho g \Delta z$, donde Δz es una diferencia en altura entre dos puntos en el líquido.

Las mismas expresiones matemáticas se aplican también en el caso en que el líquido moja la superficie sólida. En una situación estable y con volumen constante, el contorno de equilibrio de la superficie líquida representa el estado de mínima energía con respecto a cambios pequeños del perfil. Para la solución bidimensional, relevante para una placa infinita sumergida en un líquido, una representación matemática del perfil del menisco fue derivado por Rayleigh y la curva se conoce como la elástica. En cualquier punto de la curva, las coordenadas x y z pueden expresarse como funciones del ángulo β que la curva en ese punto subtende al eje x :

$$x = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \left[\ln \cot \frac{\beta}{4} - 2 \cos \frac{\beta}{2} \right] \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$z = 2 \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \sin \frac{\beta}{2}$$

La curva se ha dibujado usando valores para los parámetros γ y ρ apropiados para la soldadura SnPb 60:40 a 235°C bajo un fundente basado en rosina; la tensión superficial γ toma un valor de 0.4 Jm⁻² y la densidad ρ un valor de 8 g·cm⁻³. También, la aceleración debida a la gravedad, g , es 9.81 m s⁻², de modo que el parámetro $\sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} = 2.25 \text{ mm}$, como aparece en la ecuación (2.4). Si una placa plana infinitamente larga se sumerge en soldadura a un ángulo a la superficie del líquido, y el ángulo de contacto definido por el mojado es θ , entonces el ángulo que el menisco, en su línea de contacto, hace con la horizontal es

$$\beta = \alpha - \theta$$

y la altura del menisco está por tanto dada por

$$m = 2 \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \sin \left(\frac{\alpha - \theta}{2} \right) \quad (\text{Ec. 2.10})$$

El perfil del menisco está definido por el ángulo β sobre la elastica como se muestra en la figura 2.6 para cuatro casos ilustrativos. En el caso de mojado perfecto ($\theta = 0^\circ$) con la placa normal a la superficie de soldadura, la ascensión del menisco es 3.2 mm.

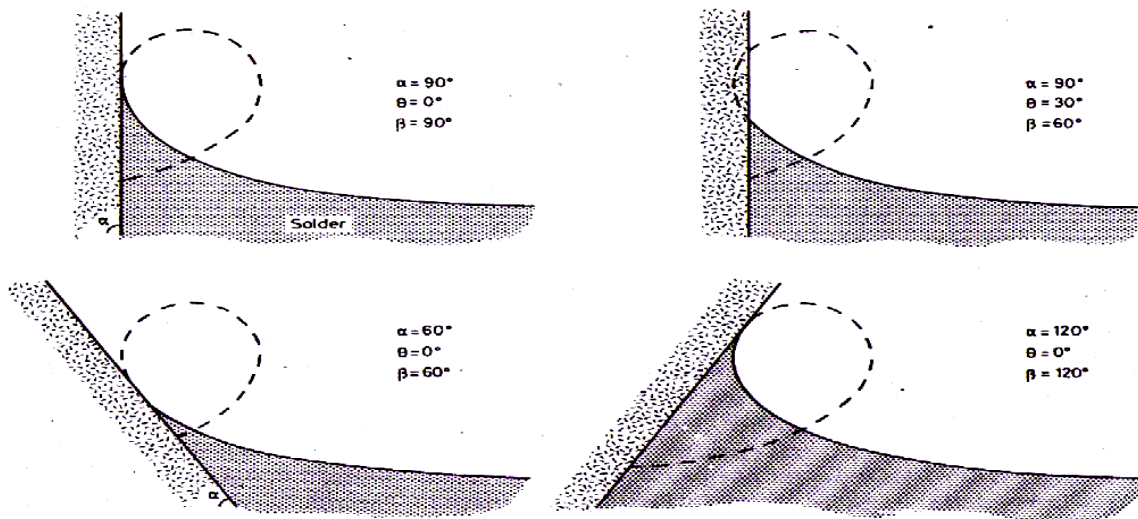


Figura 2.6.- Diferentes perfiles de cuatro casos de meniscos.

2.5. MOJADO POR SOLDADURA

2.5.1 Efecto de la aleación de soldadura

La tensión superficial de la soldadura derretida γ_{LV} depende de la composición de la aleación y del fundente. (El símbolo γ sin subíndice se usa como una notación corta para la tensión superficial de la soldadura líquida, donde no hay ambigüedad. Cuando se requieren los subíndices, el subíndice LV, líquido-vapor, continúa usándose para la interfaz soldadura-fundente, por simplicidad. La ecuación de Young se aplica igualmente, ya sea que el vapor) es un gas, un vacío o, como en el caso de soldadura práctica, un fundente líquido.)

La mayoría de las mediciones de tensión superficial de soldaduras se han hecho en una atmósfera de gas inerte en vez de en un fundente. Además de remover el óxido del sustrato y con esto incrementar γ_{SV} , otro efecto ventajoso del fundente es reducir la tensión superficial γ_{LV} de la soldadura. La Figura 2.7, da mediciones de tensión superficial de aleaciones estaño-plomo a través del intervalo de composiciones, medidos bajo un fundente de grado electrónico, comparado con mediciones hechas en una atmósfera reductora inerte de hidrógeno.

Un valor promedio ponderado de las mediciones en la literatura para la tensión superficial de soldadura Sn:Pb 60:40 a 235°C bajo fundente de colofonia no activado es $0.41 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ que se reduce a $0.35 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ bajo fundente activado. Los valores medidos de la dependencia de la temperatura de la tensión superficial de aleaciones de soldadura muestran considerable esparcimiento pero el promedio ponderado es aproximadamente $-10^{-4} \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, cerca de las temperaturas de soldado. Para la mayoría de los cálculos un valor de la tensión superficial de soldadura derretida de $0.4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ puede usarse con suficiente precisión.

El área máxima de esparcimiento y de ahí el más bajo valor de equilibrio de θ para un volumen dado de aleación de soldadura de SnPb se encuentra que ocurre para una composición de aproximadamente 50:50 SnPb. Sin embargo, como se vio en la Figura 2.7, incrementar el contenido de plomo reduce la tensión superficial de la soldadura. Estas dos observaciones deben significar que ya sea la tensión interfacial γ_{SL} se

incrementa o la tensión interfacial γ_{SV} se decrementa con contenido de plomo que aumenta. Probablemente ambas posibilidades ocurren. Primeramente, γ_{SL} se incrementa conforme se incrementa el contenido de plomo ya que, con un contenido más alto de estaño en la aleación derretida, hay un crecimiento más rápido de los compuestos intermetálicos cobre-estaño en la interfaz. La observación de que cualquier compuesto intermetálico expuesto sobre una superficie soldable vuelve a esa superficie difícil de soldar es una verificación de una tensión superficial más baja que la de una superficie sin ningún intermetálico expuesto. Segundo, la tensión interfacial del sólido, γ_{SV} , puede decrecer conforme el contenido de plomo de la soldadura se incrementa ya que hay evidencia de que el plomo se difunde adelante del frente de esparcimiento para formar un halo de grosor atómico sobre la superficie del sustrato.

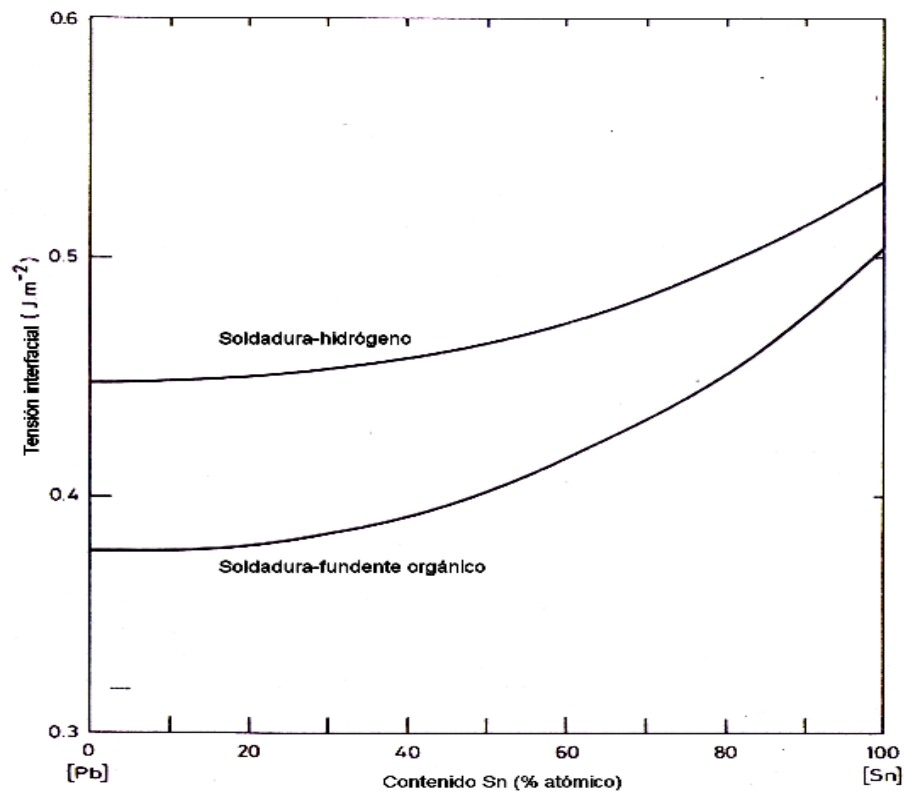


Figura 2.7.- Mediciones de tensión superficial a diferentes composiciones de soldadura estaño plomo.

2.6. El papel de la composición de la superficie

Se han medido halos de una de las especies de la aleación de soldadura, difundiéndose preferencialmente delante del líquido que se esparce para aleaciones de

Sn-In y Sn-Pb sobre cobre, usando técnicas de análisis superficial. El halo al que aquí se refiere no es el aro visible macroscópico a veces barrido por el fundente, sino una capa de sólo uno o dos átomos de grueso, producida por un mecanismo atómico de difusión superficial. Las observaciones de análisis de superficies de este mecanismo se han hecho en vacío o hidrógeno debido a las restricciones instrumentales de la técnica, pero transporte de especies similar puede bien existir bajo o dentro de un fundente líquido.

La Figura 2.8 muestra una distribución composicional de superficie a través del frente de soldadura esparciéndose en cobre, medida a una temperatura por encima de "liquidus", usando espectroscopía de electrón Auger. Esta es la composición de sólo las más externas capas atómicas sobre la superficie, y claramente demuestra la presencia de plomo sobre la superficie sólida, decreciendo la energía superficial e inhibiendo el mojado conforme el contenido de plomo en la aleación se incrementa.

En el lado izquierdo de la Figura 2.8 la composición superficial de la aleación en bulto 60:40 SnPb muestra un aumento de plomo. Esto es porque el plomo, ya que tiene una tensión superficial más baja que el estaño, se segrega en la superficie líquida, siendo termodinámicamente impulsado a reducir la energía libre superficial total del sistema. En la interfaz de la soldadura que se esparce, la componente de estaño del espectro empieza a declinar y se ve una contribución del cobre en la capa del compuesto intermetálico. Sin embargo, una monocapa atómica parcial de plomo continúa extendiéndose sobre la superficie y, ya que la técnica de espectroscopía de electrón Auger analiza sólo unos pocos átomos de profundidad, la señal de plomo permanece dominante. Este halo de plomo sobre el sustrato de cobre "desnudo" es de un 50% de cobertura de la monocapa y, en este experimento, se entiende aproximadamente $80\mu\text{m}$ en frente del frente que se esparce.

Las composiciones mostradas en la Figura 2.8 son típicas de aquellas en que el esparcimiento ha cesado y se ha alcanzado un cuasi-equilibrio. Muestra que el esparcimiento se detiene cuando la difusión de cobre desde el sustrato hasta la soldadura derretida es tal que el compuesto intermetálico estaño-cobre queda expuesto a la superficie líquida.

Cuando las mediciones se hacen mucho antes de que este cuasi-equilibrio se ha alcanzado, los datos apoyan el modelo de equilibrio en que, si el frente de líquido que se

esparce se monitorea conforme pasa por un punto dado, se observa el plomo antes que el estaño. Más aún, el inicio de la señal del plomo es muy definido mientras que la señal del estaño se incrementa menos rápidamente.

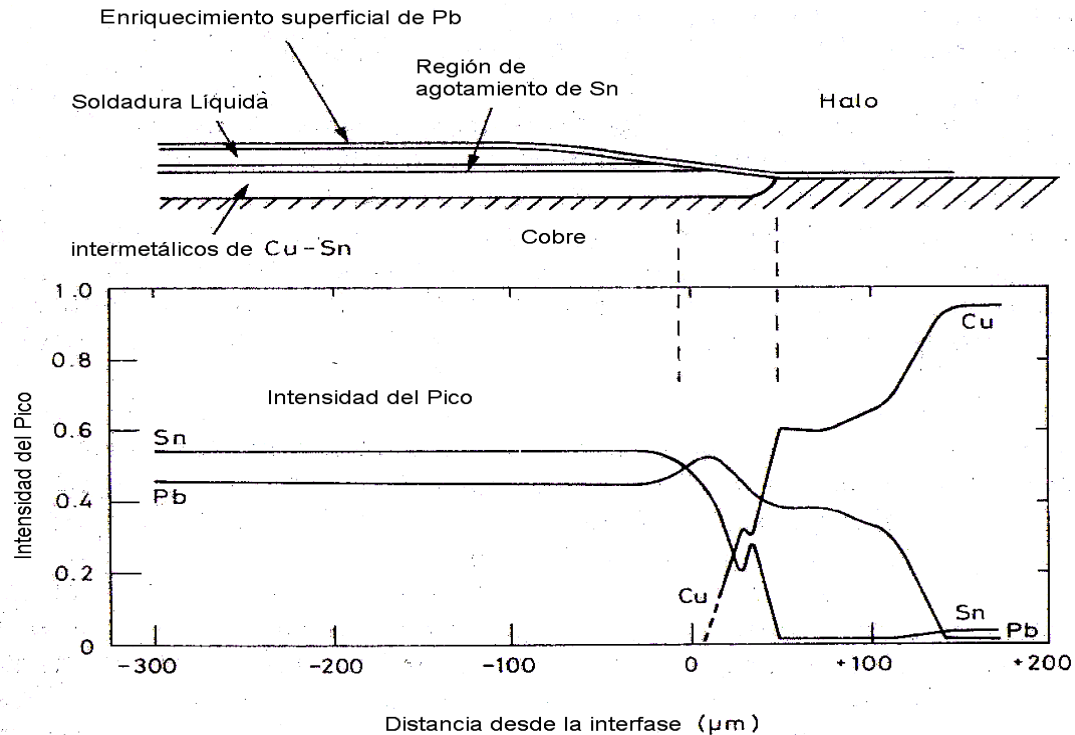


Figura 2.8.- Distribución de la composición de la superficie a través del frente de soldadura.

La segregación superficial del plomo en aleaciones de estaño-plomo se ha medido directamente, de nuevo usando espectroscopía de electrón Auger. Algunos datos a través del intervalo composicional del Sn:Pb se muestran en la Figura 2.9. Las mediciones demuestran un significativo enriquecimiento superficial de plomo a través del intervalo completo de la aleación, y el cociente de la fracción atómica superficial de plomo X_{Pb}^S a la fracción atómica de bulto de plomo X_{Pb}^b muestra un ajuste cercano a las curvas teóricas obtenidas por un modelo cuasi-químico de energías de enlace y una relación predictiva semiempírica. En el caso de una aleación binaria líquida, la contribución a la energía libre de segregación de la energía de deformación es nula ya que un líquido no puede soportar una deformación de red, y como resultado la comparación entre teoría y medición es más precisa que la correspondiente al caso de estado sólido.

El punto importante a notar de la Figura 2.9 es que, a la composición eutéctica, aunque la composición del bulto X_{Pb}^b es 26.0 % átomos (38.1 % en peso), la composición de la capa atómica de la superficie X_{Pb}^s es aproximadamente 67 % átomos. Este reforzamiento superficial de plomo explica porqué, en la Figura 2.7, la tensión superficial de la aleación de soldadura permanece cercana a la del plomo sobre una amplia declinación en contenido de plomo en el bulto. La relación entre la energía superficial de una aleación binaria y las energías superficiales de sus componentes han sido sujetos de mucha investigación. Para una solución ideal, (con mezclado completo, sin interacción, sin segregación) la energía superficial de la aleación es simplemente igual a la suma de las energías superficiales de los componentes añadidos en proporción a sus concentraciones en *bulto*. En el caso de una solución regular, como las aleaciones SnPb líquidas, la energía superficial es, con una buena aproximación, igual a la suma de las energías superficiales de los componentes añadidos en proporción a sus concentraciones *superficiales*. Para soldaduras de SnPb esto es válido dentro de un porcentaje pequeño a través del intervalo composicional completo. La tensión superficial del plomo puro bajo fundente, de la Figura 2.7, es $0.375 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ y el del estaño puro es de $0.504 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$. Cerca de la composición eutéctica de SnPb la concentración superficial es aproximadamente 0.67 % átomos y la del estaño aproximadamente 0.33 % átomos. Así pues, sumando las tensiones superficiales en proporción a sus composiciones superficiales da un valor de $0.41 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, exactamente como se mide.

Concentraciones relativamente bajas de impurezas o adiciones a la aleación en soldaduras de estaño-plomo pueden tener un efecto marcado en sus características de mojado y de esparcimiento. Esto puede surgir en diferentes formas. Como se vio arriba, la tensión superficial de un líquido está determinada por su composición superficial en vez de su composición en bulto y las impurezas con energías superficiales bajas se segregarán a la superficie líquida libre, reduciendo la energía superficial γ_{LV} . Siendo un líquido, este proceso de difusión ocurre en un tiempo muy corto. Las otras dos energías interfaciales, γ_{LS} y γ_{SV} también pueden ser afectadas por cambios relativamente pequeños de la composición de la aleación en bulto, afectando la tasa de crecimiento del compuesto intermetálico en la interfaz soldadura sustrato y afectando los

procesos de difusión a través de la superficie sólida enfrente del frente líquido que se esparce.

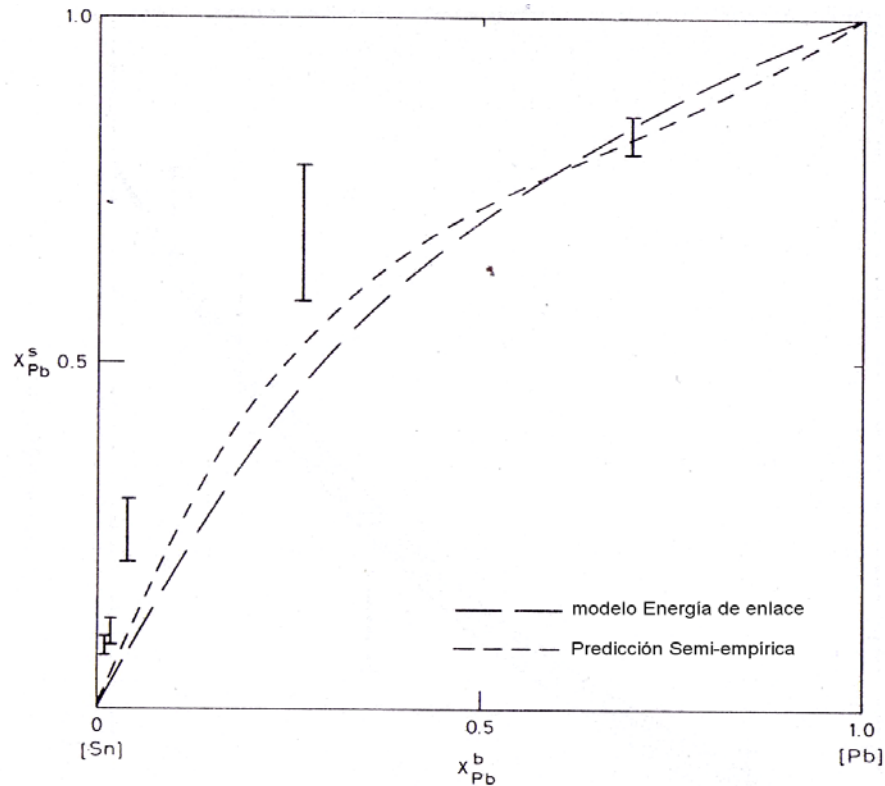


Figura 2.9.- Intervalo de composición de la aleación Sn:Pb

Algunas impurezas de la soldadura provienen de los constituyentes básicos, siendo poco económico removerlas o reducirlas a niveles más bajos. Otras impurezas aparecen durante la producción y el uso de la soldadura, por ejemplo, durante el colado o durante el ensamble de componentes electrónicos, por disolución de las superficies metálicas. Además, algunos constituyentes de la soldadura son añadidos a bajos niveles para mejorar propiedades particulares como resistencia a la fatiga o por razones económicas y estas adiciones pueden también tener un efecto en las características de mojado y esparcimiento.

Las adiciones a la aleación de bajo nivel y las impurezas pueden afectar las características de mojado y esparcimiento de la soldadura en muchas formas, por ejemplo, resultando en cristales de una segunda fase dentro del líquido lo que incrementa la viscosidad o afectando la composición superficial y de ahí la tensión superficial. El efecto específico de adiciones de bajo nivel sobre la tensión superficial ha sido estudiado experimental y teóricamente. El efecto de la adición de 1% ya sea de

plata o cobre es despreciable ya que estos dos elementos, teniendo energías superficiales relativamente altas, no se segregan a la superficie libre ni compiten con los átomos de plomo. El antimonio por otra parte tiene una energía superficial más baja que el plomo y por tanto, en la aleación líquida, tiene una concentración aumentada en la superficie, reduciendo la tensión superficial de la aleación.

2.7. Efecto de la rugosidad de la superficie

La rugosidad y textura de la superficie pueden modificar y controlar significativamente el mojado del sólido por un líquido que se esparce. Usando un tratamiento termodinámico teórico, el área superficial adicional producida por la rugosidad del sustrato puede ser considerada como causando efectivamente un incremento en su energía superficial, llevando a la predicción

$$\cos \theta_R = W_R \cos \theta$$

donde W_R es el cociente de rugosidad de área, esto es, el área verdadera/ el área nominal, θ_R es el ángulo de contacto observado sobre la superficie rugosa y θ , tomado como un parámetro material inherente, es el ángulo de contacto cuando el sustrato es suave. Esto supone implícitamente que las características de la superficie del sustrato son insignificanamente pequeñas comparadas con las dimensiones de la gota líquida y que su geometría no tiene consecuencias, excepto en cuanto afecta al área superficial.

En una aproximación diferente, la rugosidad puede considerarse que pone barreras al flujo del líquido conforme intenta asumir el ángulo de contacto mínimo, de modo que

$$\theta_R = \theta + \alpha_m$$

donde α_m es la pendiente máxima de la característica de la superficie en el frente que se esparce. Mientras que, matemáticamente α_m puede ser positiva o negativa, y de ahí θ_R más grande o más pequeña que θ , consideraciones de la minimización de la energía superficial llevan a la conclusión de que un frente líquido que avanza llega al reposo en una pendiente descendiente con α_m positiva, pero un frente que retrocede llega al reposo en una pendiente ascendiente con un valor negativo de α_m .

Desafortunadamente estas dos aproximaciones llevan a predicciones en conflicto sobre el efecto de la rugosidad de la superficie. La primera predice que los ángulos de contacto de líquidos que no mojan se incrementarán y la de los líquidos que mojan decrecerá al hacer rugosa la superficie, mientras que la segunda lleva a esperar que los ángulos de contacto de avance de tanto los líquidos que no mojan como los que sí mojan se incrementaran.

Los dos modelos se aplican en diferentes regímenes de rugosidad y mojabilidad inherente. En un trabajo reciente un intervalo completo de combinaciones líquido-sólido con rugosidades bien definidas ha sido cuidadosamente estudiado experimentalmente. Las conclusiones generales son que, por lo común, hacer rugoso un sustrato causa que su mojabilidad tanto por líquidos que mojan como por líquidos que no mojan decrezca. Excepciones a esta generalización ocurren cuando la textura de la superficie es muy rugosa y cuando el líquido moja inherentemente muy bien. Los ángulos de contacto en las situaciones de mojado y no-mojado a menudo se incrementan linealmente con el parámetro de textura superficial del sustrato R_a / λ_a , donde R_a es la amplitud promedio y λ_a la longitud de onda promedio de las características de la superficie.

Si la rugosidad no es de una textura aleatoria, sino que incluye canales paralelos a la dirección de esparcimiento, el esparcimiento del líquido puede ser considerablemente reforzado por los canales que actúan como tubos capilares.

2.8. Histéresis del mojado

Las mediciones del ángulo de contacto, o de algún otro parámetro directamente relacionado con éste, es una entrada importante hacia el entendimiento de los mecanismos de mojado en la interfaz sólido-líquido. Hay, sin embargo, siempre una histéresis del mojado de tal modo que el ángulo de contacto medido conforme se alcanza el equilibrio con un frente líquido que avanza no es el mismo que el medido cuando el frente líquido está retrocediendo. El frente líquido es de algún modo “pegado” cuando el líquido es estático y requiere una energía de activación extra para empezar su movimiento de nuevo, en la misma forma que en el movimiento de deslizamiento sólido-sólido la fricción estática es mayor que la fricción medida una vez que el deslizamiento

ha comenzado. Este “pegado” del líquido ocurre aún entre materiales virtualmente no-reactivos como vidrio y agua.

La rugosidad superficial y la heterogeneidad superficial han sido identificadas como razones para la histéresis. En soldadura, donde la naturaleza de la interfaz sólido-líquido es variante con el tiempo, la capa intermetálica “pega” el líquido que se esparce de dos formas, primero incrementando la rugosidad efectiva de la superficie sólida sobre la que el líquido tiene que fluir cuando retrocede y segundo, congelándose en el frente que se esparce.

2.9. Grados de mojado

Cuando un sólido está sumergido en soldadura derretida y cuando se retira y se permite que se enfríe, el grado de mojado de la soldadura solidificada sobre el sustrato sólido puede evaluarse visualmente, a menudo en comparación con juegos de fotografías de superficies modelo. El éxito de la soldadura se describe en términos de las áreas fraccionales que pueden describirse respectivamente como “mojadas”, “parcialmente mojadas”, “no-mojadas” ó “desmojadas”, como se ilustra en la Figura 2.10.

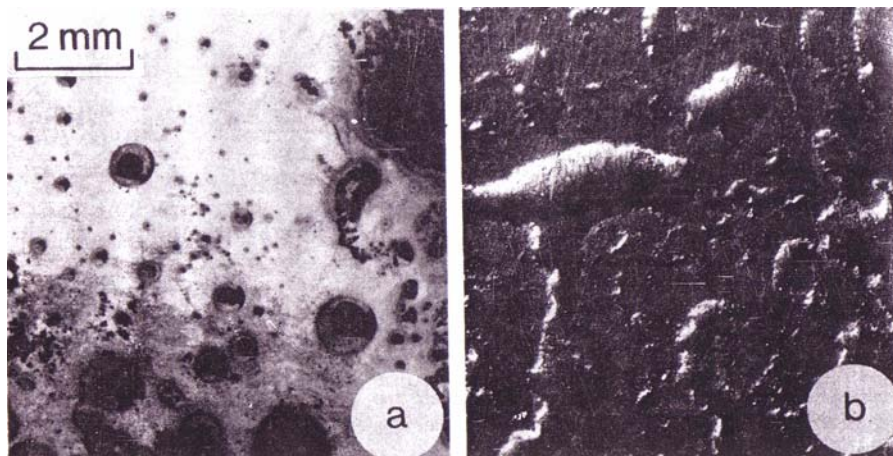


Figura 2.10.- Condiciones de mojado por soldadura (a) y desmojado (b)

Mojada: Conforme el sustrato se retira del baño de soldadura, la soldadura derretida escurre pero una capa delgada permanece, idealmente uniforme, suave, sin quebrar y adherente.

Parcialmente mojada: La superficie del sustrato, en algunas áreas, bien mojada con un recubrimiento suave y adherente de la soldadura, pero en otras áreas, a menudo en un arreglo de islas, el sustrato permanece no-mojado.

No-mojado: Después de retirar el sustrato de la soldadura derretida, la soldadura se aparta de la superficie dejándolo esencialmente sin cambios debidos a la inmersión. Esto es comúnmente un resultado de que el óxido superficial sobre el sustrato es muy grueso para ser removido por el fundente elegido dentro del tiempo disponible en la soldadura.

Desmojado: Conforme el sustrato está siendo retirado, aparece inicialmente estar completamente mojado, pero antes de que el recubrimiento de soldadura solidifique retrocede de algunas partes de la superficie para dejar una capa muy delgada de soldadura sobre áreas desmojadas y un recubrimiento engrosado sobre otras áreas.

2.10. El fenómeno de desmojado.

El desmojado de una película de soldadura tiene la apariencia de agua sobre una superficie grasosa, como se muestra en la Figura 2.10 (b). Surge cuando una superficie es mojada inicialmente y la soldadura se adhiere a la superficie sólida del metal pero se retrae después de un tiempo debido a un incremento en el ángulo de contacto que causa que la soldadura se agrupe en glóbulos y cordilleras. Aunque el resto de la superficie del metal base retiene el color de la soldadura, esta capa de soldadura es delgada y su superficie tiene pobre soldabilidad. El desmojado es un problema práctico que ocurre sobre una variedad de sustratos y afecta la calidad de las uniones de soldadura reduciendo el tamaño de los filetes de soldadura.

El desmojado surge a partir de cierto mecanismo variante en el tiempo que cambia el balance de tensiones en la superficie y de ahí cambia el ángulo de contacto localmente de modo que llega a ser energéticamente favorable para la soldadura hacerse bola en vez de permanecer como una capa delgada. Conforme la soldadura se hace bola, el metal sustrato desnudo es por supuesto no re-expuesto debido a que una reacción ha ocurrido en la interfaz soldadura-sustrato y la superficie expuesta es principalmente un compuesto intermetálico.

Varios mecanismos variantes en el tiempo pueden ocurrir para dar lugar al desmojado. Puede haber contaminación sobre el metal base debajo de un recubrimiento

de estaño, estaño-plomo, plata u oro. Durante la soldadura el recubrimiento se disuelve y la contaminación queda expuesta. Alternativamente el crecimiento del compuesto intermetálico en la interfaz puede ser tal como para cambiar la energía de esparcimiento significativamente, ya que generalmente los intermetálicos se vuelven rápidamente insoldables cuando se exponen al aire. En ambos mecanismos, existen pequeñas áreas no-soldables. Se ha desarrollado un modelo simple para demostrar la forma en que semejantes pequeñas áreas no-mojables dan lugar al desmojado. En la Figura 2.11 (a) una superficie soldable con puntos no soldables es cubierta completamente con una capa gruesa de soldadura. En la Figura 2.11 (b) la misma superficie base es parcialmente cubierta con gotas de soldadura, y parcialmente con una capa muy delgada de soldadura sobre la superficie mojable y nada de soldadura sobre los puntos no mojables. Si el área fraccional de puntos es f , entonces, en el primer caso la superficie de soldadura libre por unidad de área de sustrato es simplemente

$$SS(a) = 1 + f \quad (\text{Ec. 2.11})$$

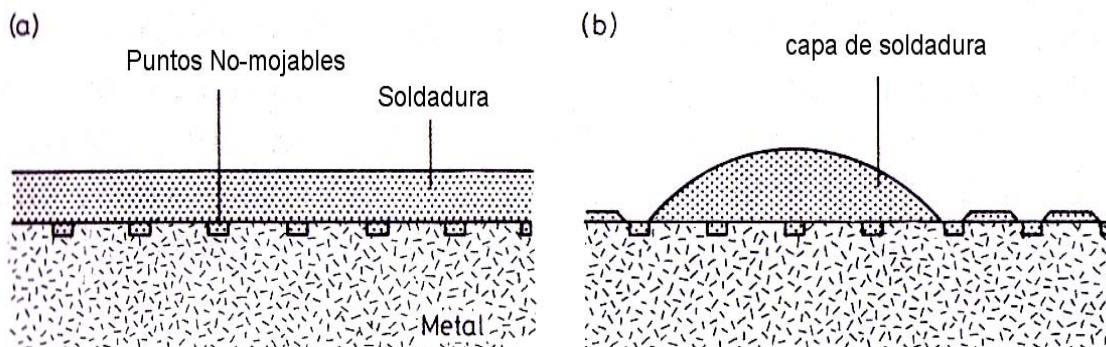


Figura 2.11.- Superficies soldadas con defectos de mojado.

El grosor del recubrimiento de soldadura es d y de ahí el volumen por unidad de área es también d . En el segundo caso la superficie está parcialmente desmojada. El volumen de soldadura ha sido tomado por N gotas supuestas aquí como de igual tamaño con área de la base A_1 y área de la parte superior A_2 . La superficie de soldadura libre, por unidad de área de sustrato es por tanto

$$SS(b) = (NA_2 + fNA_1) + (1 - f)(1 - NA_1) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

La diferencia entre estas dos áreas de superficie de soldadura $\Delta SS = SS(a) - SS(b)$ es una medida del cambio en la energía superficial total del sistema

debido a que la parte mojabla de la superficie del sustrato está completamente mojada en ambos casos y por tanto no contribuye en nada al cambio de energía. Cuando ΔSS es positiva, el desmojado puede ocurrir favorablemente. Su valor es una función del grosor de la soldadura d , el área fraccional de puntos no-mojables f , el número de gotas N y el ángulo de contacto θ de las gotas que define el cociente $A_1: A_2$.

2.11. La necesidad de un fundente

Un líquido sólo fluirá sobre una superficie si, al hacerlo así, la energía libre superficial total del sistema es con esto reducida. Una superficie limpia, sin óxido tiene una energía superficial más grande que una sucia y de ahí un líquido mojará y fluirá más fácilmente sobre una superficie limpia. En el caso específico de la soldadura es posible limpiar la superficie de la soldadura y promover el mojado *in situ* con el uso de un fundente apropiado. El nombre en inglés del fundente, “flux” proviene del latín y significa “flujo” y en verdad el principal papel del fundente es promover el flujo de la soldadura. Los mecanismos de este fenómeno son sin embargo bastante complejos. El fundente afecta tanto la tasa como el grado de esparcimiento de la soldadura pero no entra en la formación del enlace.

Las funciones principales del fundente son:

- (i) proporcionar superficies limpias libres de óxido del sustrato sólido disolviendo o separando y barriendo la capa superficial;
- (ii) retener la naturaleza libre de óxido del sustrato caliente en frente del frente de mojado
- (iii) influenciar el equilibrio de tensión superficial de tal modo que el ángulo de contacto dihedral sea reducido;
- (iv) retardar la oxidación de la soldadura derretida durante el flujo y el subsecuente enfriamiento.

La mayoría de los fundentes son virtualmente inertes a temperatura ambiente pero llegan a ser ácidos y corrosivos conforme la temperatura de soldado se alcanza. Así pues debe haber un periodo de iniciación entre la aplicación de calor a la unión y el inicio del esparcimiento de la soldadura, primero porque la temperatura de activación del fundente debe ser alcanzada y segundo porque se requiere un tiempo finito para la

disolución de la película de óxido. El proceso de esparcimiento se muestra esquemáticamente en la Figura 2.12.

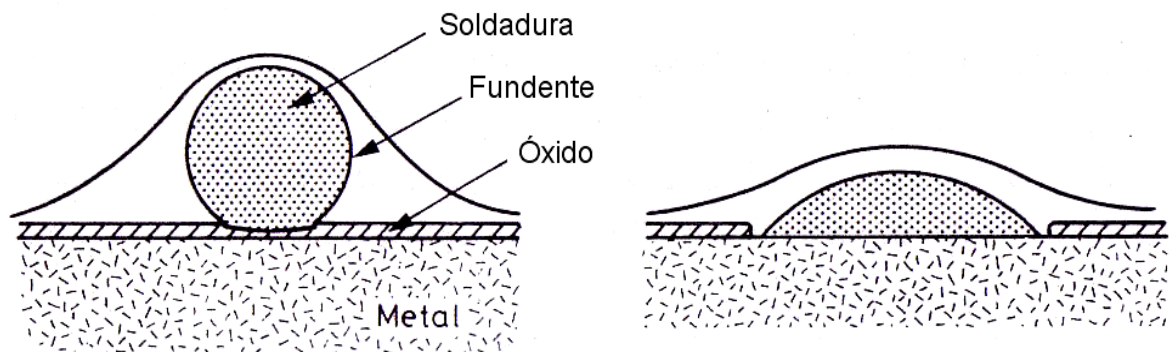


Figura 2.12.- Proceso de esparcimiento de la soldadura.

2.12. El papel de los recubrimientos soldables

Para ser fácilmente soldables, las superficies de tanto las terminaciones de los componentes como las pistas en el PCB deben tener una energía superficial relativamente alta, y esto implica que cualquier óxido u otras capas químicas que decrezcan la energía superficial deben ser fácilmente removibles por un fundente que es lo suficientemente suave para ser aceptable para el ensamble electrónico. Las superficies no protegidas de cobre, y en menor medida las aleaciones de hierro-níquel y las tintas soldables cocidas llegan a oxidarse bastante rápidamente en aire a temperatura ambiente. Es por tanto común aplicar un recubrimiento protector impenetrable a las terminaciones. Este recubrimiento es casi siempre estaño o estaño-plomo pero puede ser oro, plata, níquel, etc. Durante la manufactura de los PCBs, una capa de estaño-plomo galvanizado se usa frecuentemente como resistente al ataque químico para el cobre que está debajo, y es subsecuentemente sometida a reflujo para producir una capa impenetrable. Tarjetas con un acabado nivelado por soldadura al aire caliente del mismo modo tienen una capa impenetrable de estaño-plomo, en este caso aplicada por inmersión en caliente.

Para mejorar la soldabilidad de los componentes de montaje superficial, sumergirlos en soldadura derretida, para proporcionar una superficie de reconocible buena soldabilidad, está llegando a ser popular y es fuertemente recomendado. Ahora están disponibles máquinas automáticas para recubrir terminaciones sobre dispositivos

de montaje superficial a muy altas producciones. El pre-estañamiento es importante para componentes de montaje superficial por las siguientes razones:

- (i) Permite que las superficies de las terminales y pistas sean probadas e inspeccionadas en mojado antes del ensamble.
- (ii) Incrementa la resistencia de la unión
- (iii) La soldadura adicional eleva ligeramente el componente en el tablero, lo que ayuda a limpiar debajo del cuerpo del componente después del soldado.
- (iv) Remueve el oro de las pistas de LCCCs. El oro está ahí debido a la ruta de manufactura usada y también para proporcionar una superficie soldable con retención de soldabilidad de muy largo término. Sin embargo, es preferible reemplazar esto con un recubrimiento de soldadura antes del ensamblaje, lo que es fácilmente logrado por inmersión en caliente.

2.13. Soldadura Estaño-Antimonio (Sn-Sb)

2.13.1 Microestructura

Esta soldadura presenta una composición casi peritética y una temperatura de líquido relativamente alta cercana a los 238°C., la cual es un poco más elevada que el punto de fusión de la soldadura Sn-Pb eutéctica. A diferencia a otros elementos utilizados para aleaciones, la adición de Sb al Sn eleva el punto de fusión del Sn gradualmente conforme la solubilidad del sólido del Sb en el Sn se incrementa.

La reacción peritética, que ocurre cercana a los 246°C, produce microestructuras complejas de Sn-Sb. Esta microestructura exhibe dentritas burdas de solución sólida rica en Sn con compuestos intermetálicos Sn-Sb dispersos entre las dentritas (Figura 2.13)

2.13.2 Beneficios

Una pequeña adición de Sb a la soldadura eutéctica Sn-Pb trae muchos beneficios tales como la prevención del defecto conocido como “Tin pest”, mejoras en la fuerza de barrido y resistencia al efecto conocido como “creep”. El añadir pequeñas cantidades de Sb al Sn puro generalmente provee los mismos efectos benéficos observados en la soldadura eutéctica Sn-Pb. Existen datos en los cuales se encontró

una mejora en la fuerza de barrido de las uniones Sn-5Sb comprados contra las hechas en base a Sn puro.

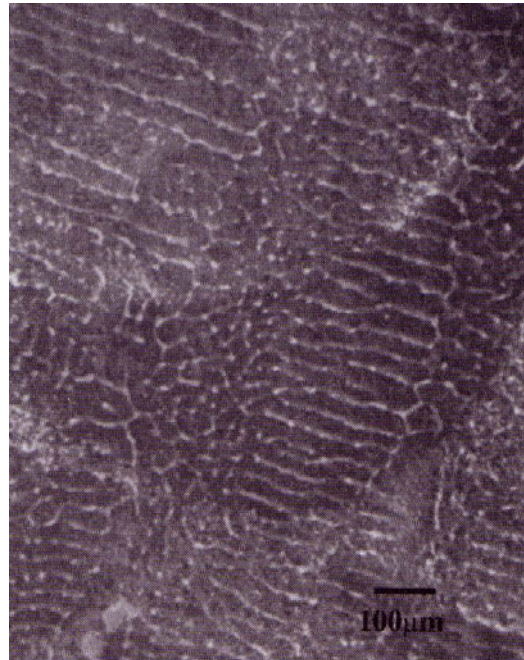


Figura 2.13.- Microestructura que exhibe dendritas burdas de solución sólida rica en Sn con compuestos intermetálicos Sn-Sb dispersos entre las dendritas.

2.13.3. Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas del Sn-5Sb son superiores a las observadas en la soldadura eutéctica de Sn-Pb. Esta aleación presenta buenas propiedades de resistencia a la termofluencia y a la fatiga térmica. La ductibilidad de la aleación a temperatura ambiente es muy alta.

Sin embargo, la adición de Sb puede ser perjudicial para las propiedades mecánicas del Sn puro cuando el nivel de Sb alcanza el límite de solubilidad en Sn, el cual es cercano al 10% en peso a 250°C. Esto es atribuible a una formación extensa de fase intermetálica Sn-Sb

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas en diversas aleaciones

Comparación de Propiedades Mecánicas para diversas aleaciones						
Propiedades	Sn-37Pb	Sn-57Bi	Sn-3.5Ag	Sn-5Sb	Sn-0.7Cu	Sn-9Zn
Punto de fusión (°C)	183	139	221	238	227	199
UTS (MPa)	31-46	45-80	55	23-42	31	60-65
Elongación (%)	35-176	40-200	35	90-350	12	38
Fuerza de barrido (MPa)	28.4	48.3	32.1	31.8		
Dureza (HV)	12.9	20	17.9	17.2	14.4	23
Esfuerzo "Creep" (Mpa) (75°C, 1000 hr)	2	—	11	—	3	—
Vida de fatiga en pocos ciclos (ciclos)	16,000	8,500	—	6,300	—	—
Disolución de Cu ($\mu\text{m}/\text{min}$)	0.085	0.055	> 0.2	> 0.2	—	—
Resistencia Elec. ($\mu\Omega \text{ cm}$)	17.0	30-35	7.7	17.1	10-15	10-15
Módulo Elástico (GPa)	29	35	37	58	—	—

2.14. Disolución de Metal Base y Crecimiento de Intermetálicos

Una de las preocupaciones más importantes con las soldaduras ricas en Sn es la disolución excesiva de la base metálica tal como Cu en la soldadura fundida. Debido al gran contenido de Sn y a la temperatura tan alta del reflujo, la soldadura fundida Sn-5Sb disuelve la metalización de Cu a un grado mayor de $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$ y para la metalización de Ni a un grado de $0.07 \mu\text{m}/\text{min}$ a 270°C .

El crecimiento intermetálico de Sn-5Sb es mucho mayor que el observado con soldadura eutéctica de Sn-Pb o Bi-Sn. La figura 2.14 compara la reacción interfacial que ocurre entre la metalización de Cu que reacciona con Sn-5Sb a 270°C y la de la soldadura de Sn-37Pb a 215°C .

Después de 20 minutos en la interfase Sn-5Sb (b) se observaron intermetálicos Cu_6Sn_5 muy grandes y separados, mientras que los observados en la de la interfase Sn-Pb (a) fueron mucho menores y mejor adheridos.

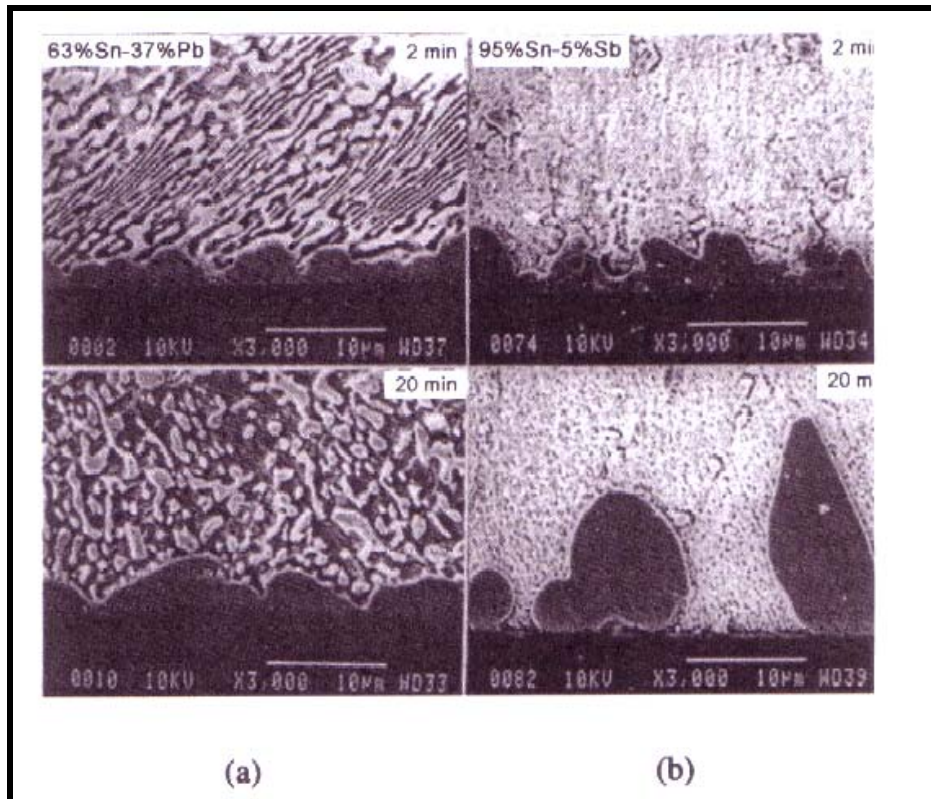


Figura 2.14.- reacción interfacial que ocurre entre la metalización de Cu que reacciona con Sn-5Sb a 270 °C y la soldadura de Sn-37Pb a 215 °C

2.15. Fundentes

La palabra fundente se deriva de una palabra latina que significa “fluir”. Un fundente normalmente se necesita para facilitar el mojado de las superficies a soldar y para que la soldadura pueda fluir. Entonces, fundente puede ser definido como una sustancia capaz de limpiar o remover óxidos de una superficie metálica.

La química de las interacciones del fundente en superficies oxidadas pueden ser muy complejas y pueden involucrar reacciones ácido-base, oxidación-reducción, complejos de coordinación y hasta de adsorción. En general algunos autores prefieren pensar que la mayoría de los fundentes utilizados para soldar electrónicos son sustancias que reaccionan como ácidos de Bronsted-Lowry con óxidos metálicos para formar sus respectivas sales y agua, y que estas sales sirven como surfactantes que promueven el mojado de la soldadura.

Normalmente los fundentes o los aditivos que los fundentes contienen son activados térmicamente, de hecho pueden llegar hasta a degradarse si la exposición térmica es excesiva.

En general para que los fundentes puedan cumplir con su propósito principal de **mojar y facilitar la unión** de dos terminales deben: a) bajar la energía superficial al reaccionar con los óxidos presentes, b) disolver las capas superiores de las terminales metálicas como vapor de agua, gases adsorbidos por los metales, materiales depositados en procesos anteriores, óxidos, carbonatos, sulfuros o una combinación de los mismos y c) después de llevar a cabo la función de remoción el fundente debe actuar como una capa protectora para prevenir que los gases de la atmósfera reaccionen con las terminales y puedan reoxidarlas o contaminarlas antes que la soldadura las moje. Otra función muy importante de los fundentes es la de mantener el alineamiento y posición de los componentes electrónicos desde que son colocados y hasta que se someten a reflujo térmico, esto es logrado de acuerdo al grado de adherencia que presenta el mismo y es factor clave para un buen proceso de impresión de pasta.

Para que los fundentes puedan cumplir su función éstos deben tener ciertas propiedades, la mayoría son generales para todos los tipos de materiales y algunos son específicos de acuerdo al tipo de aplicación:

1. Estabilidad a la temperatura del soldado. *Debe remover capas contaminantes y no degradarse para evitar una re-contaminación de las mismas.*
2. Bajo nivel de degradación a las temperaturas de soldado. *Que eviten que los productos de degradación del fundente eviten el mojado y sean más difíciles de remover.*
3. Fácilmente desplazada por la soldadura. *Para evitar que sea una barrera u obstáculo en el mojado de la soldadura hacia las terminales.*
4. Fácilmente removible si se desea. *Sobre todo si los residuos son corrosivos o afecten la funcionalidad del producto.*

2.15.1. Clasificación de fundentes

Existen miles de formulaciones de fundentes hoy en día en el mercado, muchos de ellos para cubrir requerimientos especiales por lo cual o son patentes o bien propiedad privada. Existen diversos sistemas de clasificación de los mismos que se utilizan en el mercado y básicamente se distinguen 4 grandes grupos principales: inorgánicos, orgánicos, los que se basan en resina orgánica o colofonia y aquellos que contienen resina sintética. El estándar ANSI J-STD-004 (“Requerimientos de los fundentes para soldar”) desgloza cada una de éstas clasificaciones en seis categorías adicionales basadas en actividades bajas, moderadas y altas, con y sin cloruros para dar un total de 24 tipos. (Tabla 2.2)

Tabla 2.2. Clasificación de tipos de fundentes.

Clasificación de Fundentes de acuerdo a ANSI			
Fundente	Símbolo	Actividad	Tipo
Resina Orgánica (Colofonia)	RO	Baja (0%)	L0
		Baja (<0.5%)	L1
		Moderada (0%)	M0
		Moderada (0.5% - 2.0%)	M1
		Alta (0%)	H0
		Alta (>2.0%)	H1
Resina Sintética	RE	Baja (0%)	L0
		Baja (<0.5%)	L1
		Moderada (0%)	M0
		Moderada (0.5% - 2.0%)	M1
		Alta (0%)	H0
		Alta (>2.0%)	H1
Orgánico	OR	Baja (0%)	L0
		Baja (<0.5%)	L1
		Moderada (0%)	M0
		Moderada (0.5% - 2.0%)	M1
		Alta (0%)	H0
		Alta (>2.0%)	H1
Inorgánico	In	Baja (0%)	L0
		Baja (<0.5%)	L1
		Moderada (0%)	M0
		Moderada (0.5% - 2.0%)	M1
		Alta (0%)	H0
		Alta (>2.0%)	H1

Durante muchos años en la industria de los electrónicos el uso de los fundentes con base Colofonia ha sido el más común, de hecho existe un sistema de clasificación que define el uso de aditivos a la Resina Orgánica que se utilizan para mejorar la actividad del fundente. Muchas aplicaciones requieren una actividad del

fundente más fuerte que la que la propia resina puede proveer por sí misma. Este sistema, muchas veces llamado de clasificación R, asigna las iniciales R, RA y RMA para la resina, resina activada y resina moderadamente activada, respectivamente. La Tabla 2.3 resume estas designaciones y la tabla 2.4 muestra la equivalencia de los fundentes bajo el sistema ANSI y su clasificación R.

	Resina Base	Nivel de Activación	Activador	Oxidos a remover	Corrosión/Conductividad
R	Resina Natural-Colofonia	No activados	Acidos Orgánicos Débiles	Fáciles	No Corrosivos/No conductivos
RMA	Resina Natural-Colofonia	Activados moderadamente	Activadores suaves (<0.1%)	Moderados	No Corrosivos/No conductivos
RA	Resina Natural-Colofonia	Activados	Activador iónico Fuerte (>1.0%)	Dificiles	Corrosivos/Conductivos

Tabla 2.3.- Calsificación R de fundentes

Existen más clasificaciones que dependen de otras propiedades relacionadas con la naturaleza del mismo fundente, por ejemplo en la que está basada en la solubilidad del mismo, que se divide principalmente en dos grupos: soluble en solventes orgánicos y solubles en agua. Otra clasificación se refiere al tipo de residuo que se obtendrá después del reflujó, como los libre de limpieza (residuos no corrosivos ni dañinos) o los de bajo residuos (generan muy pocos residuos sobre la tarjeta).

Tabla 2.4.- Equivalencia de los fundentes bajo el sistema ANSI y su clasificación R

Contenido de Cl-	Actividad	Equivalencia "R"
0%	L0	R, algunos RMA
<0.5%	L1	RMA, algunos RA
0%	M0	Algunos RA
0.5 - 2.0%	M1	La mayoría RA
0%	H0	Ninguna
>2.0%	H1	Soluble en Agua y Activación sintética

2.15.2. Componentes principales

Aunque hay cientos o tal vez miles de formulaciones de fundentes, la mayoría de ellos son formulados con ingredientes con propiedades químicas similares, con cada ingrediente añadido para satisfacer un objetivo específico. Como se ha mencionado, un fundente ideal debe cumplir ciertos requerimientos para ser efectivo, sin embargo ningún fundente cumple todos esos requerimientos para todas las aplicaciones, por lo que se vuelve necesario hacer negociaciones o evitar algunas características no deseables.

Sumarizando, se pueden listar los siguientes componentes principales para los fundentes y su función específica:

Fundentes solubles en solventes orgánicos:

- Resina: Es la responsable principal de la remoción de óxidos y suciedad para mantener el flujo de la soldadura, mantener adheridos los componentes a la soldadura además de ser barrera contra el oxígeno.

La más común en el mercado de los electrónicos es la llamada Resina de Agua Blanca cuya composición es ácido abiético en un 90% y es un producto natural que se obtiene de la resina de los pinos. Otro tipo de Resinas que pueden ser utilizadas son las resinas sintéticas como el ester pentaerythritol tetrabenzoato.

- Activadores: Normalmente la resina por sí misma no desempeña su función de una manera espontánea por lo que hay que agregar activadores que aceleren dicha función.

Existe una variedad enorme de tipo de activadores pero la selección dependerá de los procesos específicos, en especial del tipo de solubilidad del solvente. Podemos encontrar desde sales orgánicas de haluros, ácidos lineales dicarboxílicos, hasta bases orgánicas como las aminas

- Solventes: Su función principal es la de formar un fluido homogéneo para poder maniobrarlo adecuadamente en un ambiente de manufactura.

Para las resinas en base al ácido abiético tenemos que los sistemas glicólicos son los más utilizados, pero pueden utilizarse también alcoholes, aminas, ésteres, éteres e hidrocarburos (alifáticos o aromáticos).

- Aditivos Reológicos: Podemos tener diferentes tipos de aditivos y dependerá de la necesidad en específico a cubrir en la soldadura final. Un tipo de aditivo normalmente utilizado es el que se usa para aumentar la adherencia de la pasta a los componentes, como es el caso de los derivados del aceite de castor para las aplicaciones RMA o libre de limpieza, pero para los sistemas solubles en agua podemos tener polietilenglicol o sus derivados.

Fundentes solubles en Agua

Sus componentes son muy similares a los fundentes cuya base es la Resina.

- Solvente: Permite una distribución homogénea de los ingredientes activos. Normalmente es conformada por agua, alcoholes o solventes orgánicos
- Vehículo de Transporte: Debe mantener el fundente con bajo nivel de evaporación y mantener los ingredientes activos en forma semi-líquida. Se pueden utilizar glicoles o algunos polimeros.
- Agente Humectante: Debe promover el mojado de la soldadura.
- Activadores: Encargados de remover óxidos o grasas de las superficies metálicas. Pueden utilizarse sales orgánicas de haluros (DMA HCl) , ácidos orgánicos débiles (ácido láctico, ácido cítrico), aminas o amidas (trietanol amina o urea), inorgánicos (sales como Cloruro de Zinc, cloruro de amonio o ácidos como el clorhídrico)

2.15.3. Propiedades de los grupos principales

Fundentes Inorgánicos

Se componen de sales y ácidos inorgánicos. Son muy activos y generalmente se utilizan para unir superficies difíciles de soldar. Estos fundentes requieren de una limpieza minuciosa después del proceso de soldado debido a que son muy corrosivos y es por eso que NO son utilizados para ensamblajes de electrónicos.

Entre los activadores más comunes tenemos cloruro de zinc, cloruro de amonio o cloruro de estaño (Sales Inorgánicas), ácido clorhídrico y ortofosfórico (Ácidos Inorgánicos) e Hidrógeno seco o ácido clorhídrico (Gases inorgánicos).

Aunque estos fundentes no se utilicen para ensamblajes de electrónicos es importante conocer el rol que tienen los cloruros y relacionarlo con el grupo carboxilo en fundentes orgánicos. Es importante también conocer que los fundentes de resina orgánica que son activados con sales inorgánicas son muy efectivos al dar la capacidad al fundente de mojar rápidamente las superficies a soldar, pero que la corrosión puede ocurrir casi inmediatamente.

Las sales inorgánicas a partir de cloruros con Sn, Pb, Cu, Ag y Zn forman mezclas eutécticas que son muy estables y no se descomponen fácilmente en el rango de temperaturas que se utilizan en procesos de soldadura; esto aunado a que las

soldaduras fundidas reaccionan con dichas sales metálicas para favorecer el mojado de las terminales hacen que estos fundentes sean tan efectivos.

Fundentes Orgánicos (Resina Natural-Colofonia)

Esta resina natural es una mezcla de resinas conocida como Colofonia. Como todas las resinas naturales, es dura, material tipo cristal frágil cuando es enfriado pero suave y pegajoso a temperaturas superiores a su temperatura de transición vítrea (T_g). Las resinas naturales se derivan de fuentes vegetales y fluyen naturalmente cuando se cortan algunas ramas para después extraerla con solventes. Dentro de esta clasificación existen también algunas resinas fósiles que se obtienen de restos de animales muertos y plantas petrificadas. La Rosina o Colofonia, cuya fórmula general es $C_{19}H_{29}COOH$, consiste principalmente de ácidos abiéticos y pimáricos que son ácidos orgánicos. Debido a que la rosina utilizada en los fundentes para ensambles electrónicos se deriva de pinos (*pinus palustris* y *pinus caribae*) de todo el mundo, su composición no es fija ya que varía dependiendo del origen de la materia prima. Sin embargo existen resinas sintéticas a base de materiales poliméricos sintetizados por el hombre que tienen la ventaja de presentar una composición uniforme, una característica deseable desde el punto de vista de calidad y de manufactura. Algunos ejemplos de resinas sintéticas son la bakelita, a base de fenol y formaldehído, y el nylon, a base de diamina y ácido carboxílico.

Tipos de Rosinas:

- Rosina de Goma (Residuo de la destilación del aceite turpentino de la oleoresina de árboles vivos.
- Rosina de Madera (se obtiene de la extracción de las cepas de pino con nafta y destilando la fracción volátil)
- Rosina de aceite Tall (subproducto de la fracción de este aceite, consiste en 50% ácidos de resina y 50% de ácidos grasos insaturados, principalmente oléico y linoléico)

Hay muchos grados de las rosinas, basados en su color de menos a mayor calidad se designan como: B, D, E, F, G, H, I, K, L, M, N, W-G, W-W, y X. El grado seleccionado para los electrónicos es una rosina de goma, de bajo colorido llamada de

Agua Blanca (Water White o W-W, por sus siglas en inglés), que consiste en 80-90% ácido abético. Se seleccionó esta rosina en particular debido a su limpieza y efectividad.

Esta resina, Colofonia, presenta propiedades que la hacen única; entre ellas su naturaleza benigna con lo que respecta a corrosión. La rosina es un sólido no cristalino (vidrio) a temperatura ambiente, con un punto de ablandamiento en el rango de 70-80°C, no tiene punto de fusión pero empieza a convertirse en líquido cerca de los 150°C y se derrite completamente a la temperatura de soldado de la aleación eutéctica Sn-Pb. Normalmente es necesario disolverla en un solvente como benzilo o isopropil alcohol. En adición a estas características, la Rosina presenta una excelente adherencia si no se disuelve en exceso, ayuda en el auto-alineamiento de los componentes durante el reflujo y transporta el estaño a través del mismo fundente hacia las terminales de cobre sin presentar interferencia.

Otras características de la rosina es que tiende a oxidarse en el aire y se oscurece cuando se calienta a las temperaturas de soldado, sin embargo es estable y no se degrada hasta temperaturas de hasta 400°C por varias horas sin presentar decoloración ni presentar residuos en atmósferas <10 ppms de Oxígeno (Nitrógeno). Se evapora más rápidamente en ambientes de aire que en las de nitrógeno y esto puede suceder debido al rompimiento de enlaces bajo la influencia del oxígeno.

Es importante mencionar que la actividad de la Rosina se incrementa con la temperatura hasta que el fenómeno de isomerización ocurre, que es generalmente a temperaturas cercanas a los 300°C (Figura 2. 15). Debido a esto la rampa del perfil térmico debe empezar lento para permitir a los solventes volatilizarse, debe tener una zona de “remojado” entre el punto de ebullición de los solventes y la temperatura de fusión de la aleación para después tener una pendiente rápida hasta alcanzar la temperatura de fusión de la soldadura.

Normalmente los fundentes de Rosina que se disuelven en alcoholes tienen valores altos de SIR (Surface Insulation Resistivity, por sus siglas en inglés) por lo que los residuos se pueden dejar en las tarjetas sin preocupación por corrosión o fugas eléctricas; y para rosinas polimerizadas los valores SIR se incrementan más. Esta propiedad es ventajosa cuando la limpieza es muy difícil. Sin embargo es importante

mencionar que residuos excesivos provenientes de la oxidación por efecto del oxígeno en la atmósfera de soldado pueden tener valores SIR significativamente bajos.

Por último, las Rosina son ácidos y su efectividad depende de su número de acidez, un alto valor representa una muy buena acción de remoción. Este valor es el número de miligramos de KOH requerido para neutralizar 1 gramo de rosina. Las mejores rosinas presentan valores de acidez entre 160-170; el ácido abiético por sí solo presenta un valor de 185 y para referencia una rosina dimerizada y polimerizada presenta valores de 140-144.

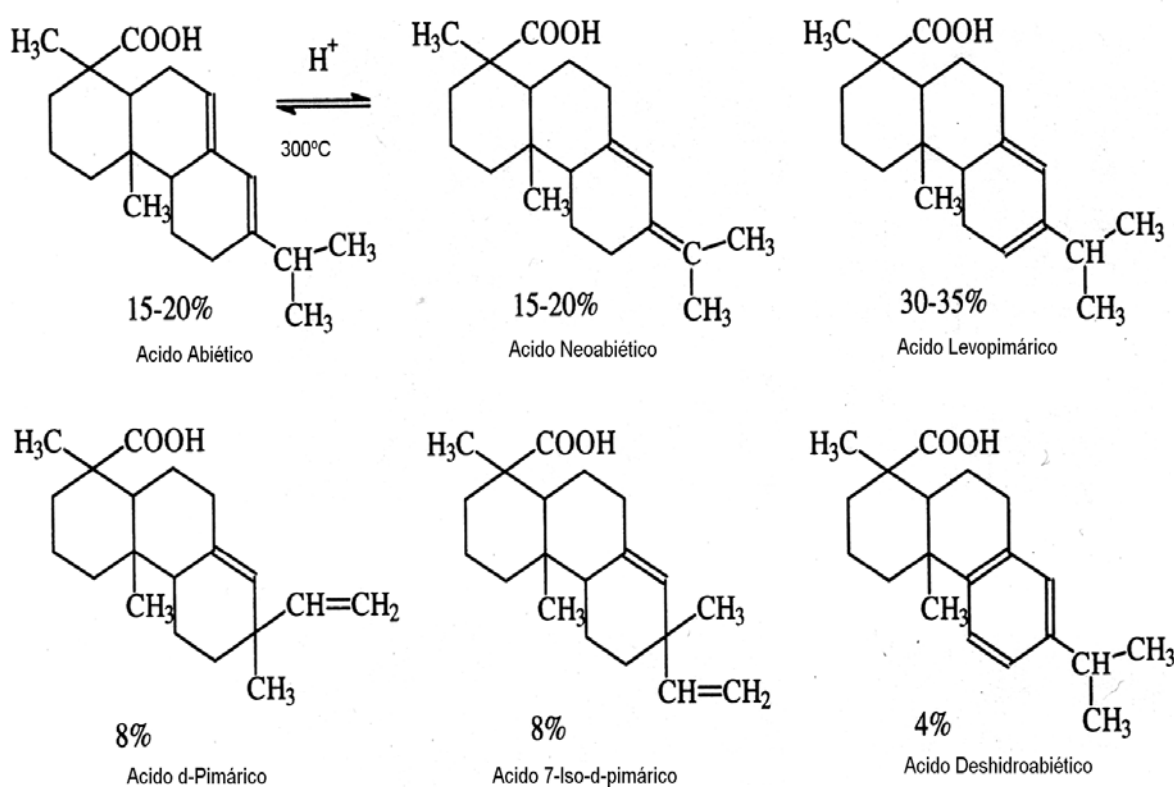


Figura 2.15.- Compuesto tipo rosina.

Fuentes Orgánicas Sin Halógenos

Como se ha mencionado con las rosinas, los activadores utilizados normalmente contienen haluros (cloruros, bromuros) que son corrosivos. Hay sin embargo, varias categorías de activadores menos agresivos libres de haluros como lo son ácidos orgánicos y compuestos de aminas. Debido a que estos fundentes son menos agresivos, actúan más lentamente y no tienen la capacidad de remover capas

oxidadas muy gruesas. Para que estos fundentes sean más efectivos es necesario suplir con superficies soldables no muy contaminadas.

Acidos Carboxílicos:

Estos fundentes contienen el grupo funcional carboxilo que es el principal ingrediente en la clasificación de fundentes OR. La mayoría de los fundentes de este tipo están conformados con uno o dos grupos carboxilos (Monocarboxílicos o Dicarboxílicos).

Funcionan a través de reacciones simples ácido-base con los óxidos de las terminales. Es importante mencionar que para que el fundente lleve a cabo su función es necesario que el ácido o su sal esté en estado líquido durante la temperatura de reflujo, por eso la importancia de seleccionar el ácido de acuerdo a las características de nuestro proceso.

Existen algunos estudios que han tratado de predecir la mojabilidad basada en la longitud de la cadena de carbono además de otras características de los ácidos dicarboxílicos, como la energía de activación, constantes de ionización o su estructura química, sin embargo los resultados no han sido exitosos [33].

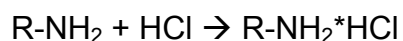
Aminas

Son bases orgánicas con fórmula general $R-NH_2$ (primaria), R_2NH (secundaria) y R_3N (terciaria).

En general, si se incrementa el número de átomos de hidrógeno unidos a los átomos de nitrógeno se incrementa su solubilidad en agua e incrementando el número de átomos de carbono se disminuye su solubilidad. Como referencia, una amina con más de seis átomos de carbono se vuelve más difícil de remover debido a que se encuentra en el límite de ser soluble en agua.

Normalmente las aminas por sí solas no se emplean para fabricar fundentes, pero sus sales y derivados sí. Las sales son materiales cristalinos que se descomponen antes o durante su fusión y dejan residuos poco solubles en agua. Aunque las aminas no contienen haluros son corrosivas y se deben remover debido a que pueden reaccionar para formar carbonatos, cloruros y sulfuros. Esto aumenta las probabilidades de falla al reducir el valor SIR, además de que sus productos, especialmente carbonatos y sulfuros son muy difíciles de remover.

Algunas aminas pueden cargarse con HCl(g) de acuerdo a la siguiente reacción:



Cada molécula de una amina puede retener una molécula de HCl. Estos productos de reacción liberan el HCl cuando se calientan lo que luego reacciona con los óxidos metálicos. Los constituyentes amínicos de un fundente pueden cargarse completa o parcialmente con HCl para alcanzar niveles de actividad deseados. Pero dichas especies deben ser removidas rápidamente después de soldar debido a su gran capacidad de corrosión.

Aminoácidos

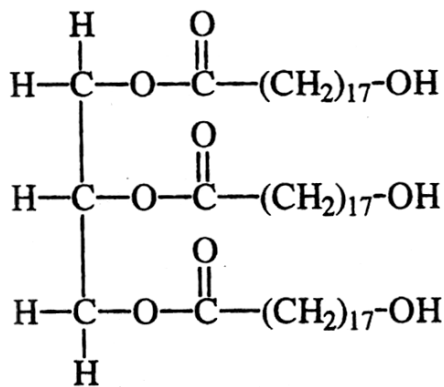
Los aminoácidos contienen grupos amino (-NH₂) y carboxilo (-COOH). Se clasifican como ácidos, básicos o neutrales dependiendo de cuál sea el grupo funcional predominante. Son compuestos cristalinos, sólidos no volátiles que se funden y descomponen a temperaturas relativamente altas. Sus propiedades se asemejan a las de las estructuras iónicas dipolares semejantes a las sales.

Alcohol Aminas

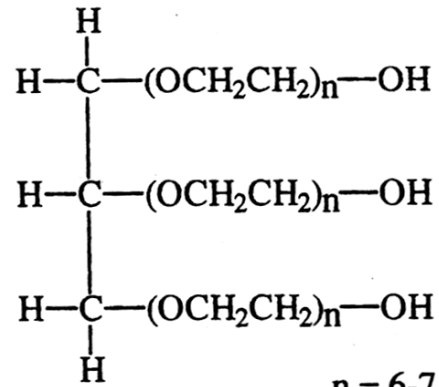
Son aminas que contienen el grupo hidroxilo (-OH). Estos compuestos forman sales con los ácidos rápidamente, las cuales tienen buena solubilidad en sistemas acuosos y orgánicos, por lo que son utilizados para ayudar a solubilizar y emulsificar los componentes de los fundentes [34].

Fundentes Sintéticos

La creación de los fundentes sintéticos se derivó de la necesidad de controlar la composición de los fundentes naturales; esto para un mejor control de proceso. Además de esto, las mezclas sintéticas se pueden modificar para proveer propiedades químicas y físicas que cumplan con las necesidades que son requeridas. Ejemplos comerciales específicos podemos verlos en la Figura 2.16 creados para estabilidad a altas temperaturas, buena adherencia y compatibilidad para una limpieza acuosa. Aquí los grupos aminoácidos policarboxílicos proporcionan buena actividad de fundente y los policalcoholes proporcionan adherencia, control de viscosidad, estabilidad térmica y solubilidad en agua para una limpieza acuosa al final del reflujo.

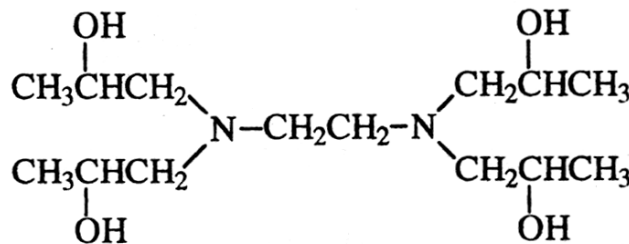


Aceite de Castor Hidrogenado



$n = 6-7$

Glicerol Etoxilato



Quadrol

Figura 2.16.- Fundentes sintéticos comerciales.

2.16. Oxidación y Corrosión en SMT

La soldabilidad de una terminación no soldada se ve afectada principalmente por la oxidación que la cubre o por las capas de otros elementos que se depositan sobre esa superficie, entonces es utilizado un fundente para poder remover dichos óxidos e incrementar la mojabilidad de las terminales para tener una unión satisfactoria. Cuando la unión ya está hecha, la soldabilidad se puede ver afectada con el paso del tiempo debido a las reacciones interfaciales entre los metales soldados o puede deteriorarse por las reacciones entre la superficie exterior y la atmósfera que la rodea.

En el caso de Sn puro y para la superficie exterior de la unión, la capa de óxido SnO que se forma es protectora y normalmente se limita a un espesor de 2-6 nm a temperatura ambiente en un ambiente seco. A temperaturas más elevadas y en

condiciones húmedas la capa de óxido crece. El crecimiento de la capa de óxido es afectado por las impurezas que el Sn pueda tener y la velocidad de crecimiento y la estructura dependerán de la afinidad de dichas impurezas con el oxígeno y la humedad.

Normalmente en una atmósfera de oxígeno esta capa de SnO inhibe otras reacciones superficiales, sin embargo, existe la posibilidad que otros constituyentes en el aire puedan ser más reactivos que el oxígeno y formen capas adicionales que sean no protectoras y tengan un efecto adverso en la soldabilidad que los óxidos. Otros gases que pueden afectar son: SO₂, NO₂, H₂S, Cl, NH₃ y CO₂ que pueden encontrarse en la atmósfera.

En el caso de la aleación SnPb se ha encontrado que concentraciones tan bajas como 10-100 ppm de NO₂ en el ambiente corroen las cubiertas de SnPb al formarse la capa no protectora de Pb(NO₃)₂ y concentraciones menores a 10ppm de cloruros en combinación con humedades relativas mayores a 25% generan corrosión al formarse SnCl₂ formados de la reducción de su óxido. Ambos casos forman una capa no protectora que puede crecer con el tiempo y finalizar en una falla de la unión. Casos similares ocurren para las soldaduras libres de plomo; cuestiones específicas dependerán de la naturaleza del sistema, sea que la corrosión se genere por el contacto con la atmósfera o por los residuos generados por el fundente.

2.17. Variables del proceso que pueden generar Oxidación antes y durante SMT

El uso de atmósferas inertes como el Nitrógeno durante el proceso de en SMT es una práctica común. El hecho de calentar la soldadura en presencia de oxígeno genera óxidos, los cuales son superficies no-soldables que afectan el producto final.

La Oxidación se ve afectada por:

- Contenido y condición de metales
- Temperatura
- Contenido del fundente en la pasta
- Niveles de oxígeno alrededor de la unión de soldadura

2.18. Contenido y condición de metales

Algunos metales son más soldables que otros. Es más fácil soldar en un tablero que contiene una cubierta de Sn/Pb comparado con un tablero de tiene sólo cobre.

La condición del metal que va a ser soldado tiene también un impacto alto en la soldabilidad. Si los tableros han estado en contacto con el ambiente por meses sin protección especial, se les formará una capa de oxidación sobre el metal haciendo el trabajo del reflujo más difícil.

En general, entre mayor área superficial se tenga, mayor será el área disponible para la oxidación. Caso especial son los nuevos tipos de soldadura cuyas partículas tienden a disminuir aumentando así la relación de área superficial / volumen favoreciendo la tendencia a oxidación

2.19. Temperatura

La oxidación está relacionada directamente con la temperatura. A mayores temperaturas se observan mayores niveles de oxidación. Por lo tanto, soldar a la temperatura más baja posible reduce la cantidad de óxidos generados durante el proceso de reflujo. La tecnología de calentamiento por convección en los hornos de reflujo ayuda a tener un calentamiento más uniforme y por lo tanto reduce la temperatura máxima que los productos alcanzan dentro del horno.

2.20. Contenido del fundente en la pasta

Parte fundamental de la soldadura en pasta es el fundente, que es el que ayuda a remover los óxidos de las superficies a soldar. Hace algunos años la soldadura en pasta contenía fundentes lo suficientemente agresivos para remover fácilmente los óxidos pero había que remover sus residuos con solventes CFC. La eliminación de los CFC en el mundo eliminó la manera más efectiva de limpieza de residuos de pasta del tablero.

Hoy en día, los fundentes utilizados son en base a ácidos orgánicos solubles en agua, y el proceso de limpieza ha cambiado a no utilizar agua o hasta no utilizar ningún tipo de solvente (proceso libre de limpieza). Es importante mencionar que la

cantidad de residuos sobre el producto determina su confiabilidad a largo plazo. El punto aquí es que las pastas que dejan más residuos son más fáciles de soldar en aire.

Entre más débil sea el fundente, mayor será la posibilidad de oxidación. Un soldado libre de limpieza requiere controles más estrictos de proceso. Todos los componentes y tableros deben ser altamente soldables. Ya que el tablero no se lava para remover los residuos de soldadura en el producto, el proceso de reflujo debe prevenir la formación de estos residuos, ya que pueden provocar cortos circuitos en el producto si no se remueven completamente.

2.21. Tipo de atmósfera durante el soldado

En un proceso de soldado en reflujo con componentes *fine pitch* y pocos residuos de pasta es necesaria una atmósfera libre de oxígeno para obtener buenos resultados. Esto requerirá de un horno que pueda trabajar con bajos contenidos de oxígeno. El nivel de oxígeno se mide en partes por millón o ppm. La mayoría de los hornos tienen la opción de operar con menos de 100 ppm de Oxígeno. El contenido de la atmósfera se dicta por las variables de proceso.

Las soldaduras de pasta cambian continuamente para hacerlas capaces de trabajar en ambientes de aire que no dejen residuos, de hecho han mejorado hasta el punto en donde uno debe experimentar y determinar si el Nitrógeno tiene un impacto significativo en el proceso. Si se sabe que no lo tiene, no es necesario utilizarlo.

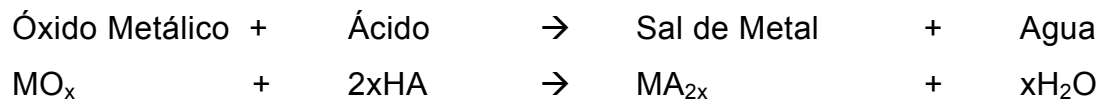
2.22 Reacciones químicas de los fundentes y su relación con la oxidación.

Como se ha dicho, la función más mencionada para los fundentes es la de la remoción de óxidos. A excepción de varias circunstancias, esto normalmente no ocurre, de hecho la función debe ser entendida como una reacción química que convierte el óxido metálico en especies que promueven la mojabilidad. El fundente reacciona con los óxidos haciendo que sean desplazados más fácilmente por la soldadura líquida. Se cree que la sal que se forma permanece en la superficie de la soldadura y funciona como un pseudo-surfactante que facilita la reacción en la interfase de los metales. Las reacciones químicas involucradas pueden ser muy

complejas y pueden ser llevadas a cabo a través de diversos principios químicos que se enlistan en seguida:

1. Reacciones Ácido-Base

Las interacciones fundente-óxido de metal son descritas de mejor manera utilizando la teoría de Bronsted-Lowry, la cual define al ácido como un donador de protones y la base como un receptor de protones, de esta manera tenemos:



2. Reacciones de descomposición

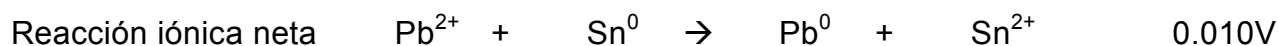
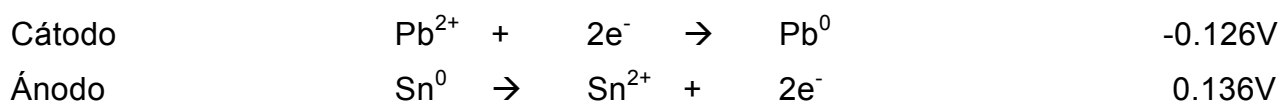
Cuando los componentes originales del fundente o los productos formados de la interacción con los óxidos presentes se calientan durante el reflujo, es posible que puedan polimerizarse, regresar a sus especies iniciales, descomponerse en residuos carbonizados o convertirse en efluentes volátiles. La tabla 2.5 enlista varias reacciones y sus residuos justo después de las temperaturas de reflujo para algunas sales de Cloro y algunas sales orgánicas. Dichos residuos permanecerán en la vecindad de las conexiones de soldadura. Los residuos orgánicos son regularmente química y eléctricamente inocuos pero pueden interferir con materiales adhesivos que se utilizan para rellenar algunos componentes electrónicos como el flip chip o algunos BGAs. Algunas excepciones son los residuos de aminas o de cloruros que deben ser removidos inmediatamente. Algunos ácidos de elevado peso molecular y térmicamente estables, tales como el ácido abiético, permanecen como una mezcla de ambos ácido y sal. Un ejemplo interesante de descomposición de ácido dibásico, la cual es muy deseable para las aplicaciones libres de limpieza. En este tipo de descomposición, la sal de carboxilato revierte a SnO, y las especies orgánicas producidas no son agresivas. Algunos ácidos polifuncionales pueden polimerizarse, a veces dejando residuos muy difíciles de remover, pero a la vez siendo inocuos.

Tabla 2.5. Reacciones y sus residuos justo después de las temperaturas de reflujo para algunas sales de Cloro y algunas sales orgánicas

Reacción	Residuo	Propiedades
$\text{SnO} + 2\text{HCl} = \text{SnCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	SnCl_2	Estable (pf 247°C, pe 652°C)
$\text{SnO} + 2\text{NH}_4\text{Cl} = \text{SnCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3$	SnCl_2	
$\text{SnO} + 2\text{RNH}_2 \cdot \text{HCl} = \text{SnCl}_2 + 2\text{RNH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	SnCl_2	
$\text{CuO} + 2\text{HCl} = \text{CuCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	CuCl_2	Cloruro estable en la mayoría de las temperaturas de soldado
$\text{CuO} + \text{HCOOH} = \text{Cu} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	Cu	CuO reducido a metal libre de óxido por ácido fórmico
$\text{PbO} + 2\text{HCl} = \text{PbCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	PbCl_2	Cloruro estable en la mayoría de las temperaturas de soldado
$\text{SnO} + \text{RCOOH} = \text{Sn}(\text{RCOO})_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\text{Sn}(\text{RCOO})_2$	Muchos posibles productos de descomposición dependiendo de las propiedades particulares del ácido carboxílico y su respectiva sal, los niveles atmosféricos de oxígeno y el solvente Los productos posibles pueden volatilizarse, polimerizarse o quemarse Carboxilatos adipico y pimélico pueden formar cetonas volátiles

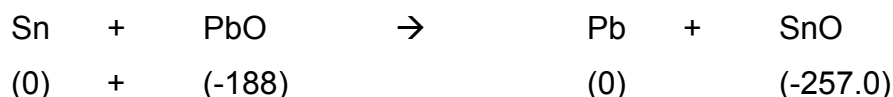
3. Reacciones Redox

Recordando de las reacciones que involucran transferencia de electrones, reducción es la ganancia de electrones y oxidación es la pérdida de los mismos. La reducción ocurre en el cátodo y la oxidación en el ánodo de celdas electrolíticas o galvánicas. Estas reacciones se utilizan para determinar la viabilidad de la reacción principalmente, usando tablas de potencial de reducción (para saber cuál se oxidará y cuál se reducirá) y tablas de la energía libre de Gibbs (para conocer si la reacción es viable en el sentido que se planteó). Por ejemplo en el caso del Sn y Pb de tablas de potencial de reducción se tiene:



en donde determinamos que esta reacción es espontánea y el Pb del PbO es oxidado por Sn^0 debido a que la suma algebraica es positiva.

De las tablas de energía libre de formación:



sumando las energías libres tenemos:

$(0-257.0) - (0-188.0) = -69.0$ KJ/mol, que nos indica que el Sn elemental puede reducir PbO a Pb0. Además el Sn es capaz de reducir óxidos de Cu y de Pb.

En el caso de reacciones que involucran metales es recomendable utilizar las tablas de potenciales y para las que involucran especies orgánicas las tablas de energía libre por la mayor facilidad de encontrar información.

2.23. Corrosión

Debido a la gran cantidad de información existente al respecto y a que dicha información sirve como base para entender lo que sucede con las nuevas soldaduras libres de plomo, empezaremos revisando el ciclo de corrosión que normalmente se presenta en el caso de una soldadura Sn-Pb.

Es bien sabido que el Pb metálico forma una capa de óxido exterior que es protectora. Sin embargo si el fundente o sus residuos contienen iones cloro, que normalmente sucede, entonces podemos iniciar el ciclo de corrosión que se muestra en la figura 2.17. Por simplicidad se utiliza HCl en la reacción debido a que se obtiene fácilmente de los iones Cl^- y agua. Aquí el cloruro de plomo formado no es muy estable en una atmósfera húmeda que contenga CO_2 . Debido a esto el PbCl_2 es fácilmente convertido a PbCO_3 además de liberar otro ión de Cloro, que estará libre para atacar otra capa de óxido de plomo. Este carbonato, que es el producto final de la transformación, forma una capa blanca muy porosa que no protege a la terminal metálica. Como resultado, el oxígeno del ambiente alcanza nuevamente el plomo oxidándolo y empezando nuevamete el ciclo hasta que todo el plomo haya sido consumido. La representación es esquemática y el ciclo involucra una serie de reacciones con otros agentes químicos como el fundente que es un derivado clorado de ácido abiético (rosine), los productos de descomposición a temperatura mayor de 200 °C y los demás componentes de la atmósfera.

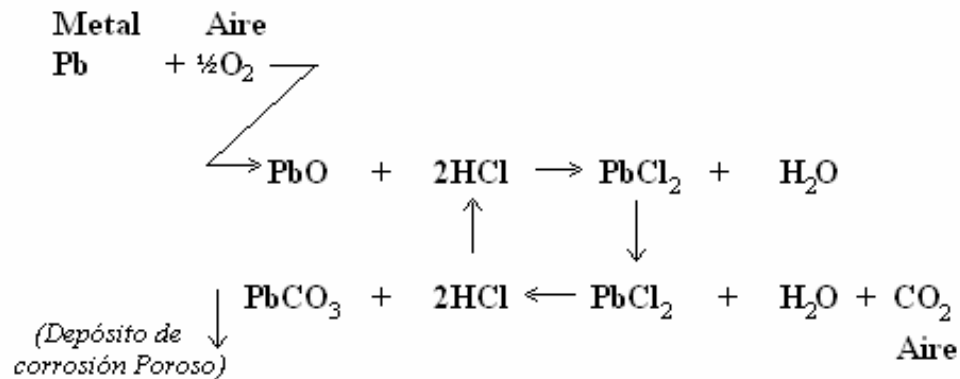


Figura 2.17.- Ciclo de corrosión del plomo.

Factor importante que causa la corrosión entonces tiene que ver con la limpieza de los residuos del fundente y del medio ambiente que rodeará la parte electrónica que se soldó. El grado de limpieza que una pieza debe tener para evitar que se corra dependerá pues de conocer el uso final del paquete electrónico y las condiciones a las que será sometida.

A parte de que la corrosión puede consumir la soldadura también puede tener otros daños como:

- Puede dañar conductores al incrementar la resistencia del circuito.
- Daños físicos al debilitar y fragilizar los conductores del circuito
- Los productos de corrosión pueden causar fuga de corriente.
- Los productos de corrosión originan contaminación en el sistema (depósitos no conductivos), que pueden convertirse en barreras para los contactos eléctricos.

Aunque los fundentes y sus residuos son los primeros a los que normalmente se les culpa por causar corrosión en los ensamblajes electrónicos, hay muchas otras fuentes que la originan en estos ensamblajes. Esta contaminación puede originarse en las operaciones anteriores al soldado de las piezas, ya que muchos ensamblajes se someten a soluciones de deposición muy agresivos químicamente hablando. A veces los procedimientos de limpieza no se controlan o llevan a cabo adecuadamente. Además de esto, siempre hay riesgo de contaminación debido a los almacenamientos. En este caso, la contaminación o corrosión puede originarse ya sea por el material en el que fue empaquetado o por la deposición de algunos materiales corrosivos del ambiente

mientras la pieza estuvo en espera. Además de esto los solventes por sí mismos contribuyen a la corrosión si no fueron seleccionados correctamente y si los procedimientos de limpieza no son los correctos o no se llevan a cabo. Por último no se debe olvidar las operaciones posteriores al soldado que también pueden ser fuentes de contaminación que originen corrosión.

Otras fuentes de contaminación se enlistan a continuación:

1. Soluciones de procesamiento. Ejemplo: Recubrimiento de metales.
2. Respiración Humana: Se pueden depositar cloruros corrosivos en operaciones de manejo manual.
3. Sedimentación del Ambiente: El Sulfuro en el aire puede atacar la plata y superficies de Cu.
4. Contaminación por equipos de manejo de material: Estos equipos pueden contener aceites o solventes que contribuyan a la contaminación.
5. Materiales de empaquetamiento: Es importante conocer los materiales utilizados y evitar aquellos que puedan contaminar.

Especialmente en el punto anterior 3 existe mucha investigación que profundiza al respecto, como los estudios de referencia [43-45]. En el caso de este estudio en particular, el enfoque será sobre los materiales del fundente y los efectos que los residuos, en caso de haberlos, pueden originar en los ensamblajes electrónicos.

Como se mencionó, la corrosión a discutirse en este estudio se enfocará sobre los fundentes. Esta corrosión, en caso de haberla, deberá ser controlada o de lo contrario las uniones de soldadura pueden debilitarse y fallar. En partes buenas, la falla puede ocurrir por la reducción de la sección transversal de las partes metálicas, la cual debilita al metal, o por debilitamiento de la unión por corrosión intergranular la cual origina fallas del tipo fatiga.

En conexiones eléctricas, estos problemas pueden incrementarse por cambios en las características eléctricas del material (ejemplo: incremento en la resistencia debido a la reducción del diámetro del conductor). Además, los productos de corrosión pueden disminuir la resistencia al aislamiento (SIR) o unir los componentes causando cortos circuitos. Esto es una función de los productos de corrosión ionizables formados, y

la fuga de corriente dependerá de la absorción de humedad para formar capas delgadas de electrolitos.

En la actualidad debe tenerse mucho cuidado con el grado de limpieza que debe tenerse al final del proceso de soldado; hay muchos tipos de fundentes como ya se ha visto en puntos anteriores, algunos de ellos llamados libres de limpieza, sin embargo es importante mencionar que todo fundente es hasta cierto punto corrosivo, de otra forma sería incapaz de remover los óxidos y contaminaciones de las superficies que serán soldadas. Los procedimientos de remoción de fundentes van a depender de la fórmula utilizada. Las soluciones de limpieza a emplearse para esta remoción deben incluir materiales que disuelvan tanto el fundente como los activadores y los ingredientes añadidos a la fórmula. Estos deben considerarse tanto en su forma original así como también en sus productos de decomposición. Normalmente los procedimientos de limpieza se dividen en solubles en agua y solubles en solventes. Además de esto la operación de limpieza puede mejorarse por medios mecánicos como agitación mecánica y ultrasónicos.

2.24. Especificaciones Industriales para los Fundentes Basados en su Corrosividad y Actividad

El instituto para Interconectividad y el Empaquetamiento de Circuitos Electrónicos (IPC, por sus siglas en inglés) inició junto con el Instituto de Estándares Nacionales Americanos (ANSI, por sus siglas en inglés), una especificación industrial para los fundentes [46]. El alcance de la especificación no es tan científico como las clasificaciones químicas ya mencionadas en puntos anteriores, debido a que está orientada a proteger al personal no-técnico. En este documento, la clasificación de fundentes se basa en sus propiedades **corrosivas** o conductivas, sea del fundente o sus residuos. Esto obviamente afecta la necesidad y el método de limpieza.

De acuerdo al estándar ANSI/J-STD-001 [47], los productos ensamblados se clasifican de acuerdo a su uso final:

Clase 1 – Productos al consumidor (aplicaciones no críticas, el objetivo principal no es una vida extensa)

Clase 2 – Industriales Generales (comerciales de alto rendimiento, se busca una vida de producto extensa en donde un servicio ininterrumpido no es crítico)

Clase 3 – Alto rendimiento (equipo electrónico militar).

De modo general los fundentes se clasifican por los requerimientos finales:

L = Baja actividad del fundente o su residuo

M = Moderada Actividad del fundente o su residuo

H = Alta Actividad del fundente o su residuo

Lo importante y lo que concierne a corrosión para esta especificación son las siguientes pruebas que se le requieren a cada fundente como manera de medir los niveles de actividad/corrosión de cada uno de ellos:

1. Prueba del espejo de Cobre: El espejo está hecho de cristal, con una capa delgada de cobre de unos 500 Å de espesor, la cual permite $10 \pm 5\%$ de transmisión de luz incidente. Se prepara una muestra de fundente y se coloca en el lado del cobre, enseguida de una muestra de control. El espejo después se coloca horizontalmente en una cámara de humedad a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y $50 \pm 5\%$ de humedad relativa (HR) por 24 ± 0.5 hrs. Al final de la exposición, se lava el fundente con alcohol isopropílico y se examina el espejo ya seco para determinar la extensión o decoloración del cobre.
2. Papel de Cromato de Plata: Este papel de prueba impregnado se utiliza para detectar la presencia de cloruros y bromuros en los químicos de la soldadura. El papel saturado de reactivo de 5 x 5 cm es sensible a la luz y debe ser manejado con guantes. La prueba consiste en colocar una gota de fundente en el papel y permitirle reaccionar al menos 15 s. Después se deberá sumergir en alcohol isopropílico para limpiar los residuos. Posteriormente se seca por unos 10 minutos y se examina. Un cambio de color amarillento o blanco indica la presencia de cloruros o bromuros y se considera como una falla. Una leve decoloración o un anillo de luz en los alrededores de la gota se considera aceptable. La presencia de fluoruros se

determina añadiendo una gota de púrpura de zirconio; un cambio de color de púrpura a amarillo indica la presencia de fluoruros.

3. Contenido de Haluros: Esta es una prueba regular de titulación usando cloroformo para disolver el fundente. Los haluros se extraerán después con agua deionizada y luego titulados. La cantidad de haluros se reporta en contenido de haluros por sólido.
4. Corrosión del fundente: En esta prueba se considera corrosión a cualquier reacción química entre el cobre del metal base, la soldadura y el fundente durante y después de un proceso de soldado simulado. Exposición a humedad se utiliza para acelerar la reacción. La corrosividad del fundente se evalúa calentándolo junto con algo de soldadura y el metal de prueba a la temperatura de fusión. El metal de prueba es una hoja de cobre puro (5 ± 0.05 mm de espesor), cortado en secciones de 5 x 5 cm. Las muestras se examinan bajo microscopio (20X) y se buscan principalmente decoloraciones en el fundente.
5. Resistencia al Aislamiento Superficial (SIR): Los materiales usados para fabricar PCBs y sus componentes tienen ciertas propiedades eléctricas que incluyen la resistividad de las capas superficiales. Una prueba que mide la resistencia al flujo de corriente entre dos conductores superficiales adyacentes se llama Resistencia al Aislamiento Superficial (SIR, por sus siglas en inglés). Cuando se expone a la humedad, los iones conductivos presentes en la superficie dieléctrica del PCB se disolverán en la capa superficial de humedad. Cuando se aplica voltaje los metales movilizados o los iones de sal pueden unirse para formar dentritas o puentes conductivos entre los conductores.

El IPC-TM-650, TM2.6.3.3 especifica las condiciones de prueba. Normalmente el voltaje usado es de $48\pm$ V en cada conductor. Las mediciones de resistencia se toman inicialmente y después de 24 hrs, 96 hrs y 168 hrs expuestos a 85°C 85%HR. Las mediciones a 96 y 168 hrs. deben exceder de 100 MOhms.

Los fundentes utilizados en los ensamblajes pueden disminuir estos valores SIR al proveer metales o iones salinos adicionales en la superficie del PCB.

Otras pruebas que se realizan a los fundentes del ANSI/J-STD-004 [46]:

- 2.3.13 – Determinación del Valor de acidez (titulación)
- 2.3.28 – Análisis Iónico de PCBs (método cromatográfico)
- 2.3.32 – Corrosión Inducida en los fundentes (Método del espejo de Cu)
- 2.3.33 – Presencia de Haluros en el fundente (Método del cromato de plata)
- 2.3.34 – Contenido de Sólidos en el fundente
- 2.3.35 – Contenido de haluros, cuantitativo (Cloruro y Bromuro)
- 2.4.14.2 – Actividad del fundente líquido
- 2.4.34.4 – Viscosidad del fundente en la pasta
- 2.4.46 – Prueba de dispersión
- 2.6.3.3 – Resistencia al Aislamiento Superficial, Fundentes
- 2.6.15 – Corrosión en Fundentes

2.25. Formación de Compuestos Intermetálicos

Las uniones de soldadura proporcionan continuidad eléctrica además de estabilidad mecánica en las interconexiones de los productos electrónicos. Los compuestos intermetálicos o *IMC* (*Intermetallic Compound, por sus siglas en inglés*) tienen influencia directa en las propiedades de dichas uniones por lo que un buen entendimiento de los mecanismos de formación de los IMCs es crucial para entender el comportamiento de dichas uniones.

La formación de IMCs puede cambiar en gran manera la microestructura de las uniones de soldadura y por lo tanto sus propiedades mecánicas. Factores como tamaño de grano, concentración de impurezas, precipitación de fases secundarias y la densidad de dislocaciones afectan los movimientos de dislocación así como el crecimiento de granos en estas uniones. Estos procesos determinan el comportamiento mecánico de las uniones debido a que muchos procesos de deformación son dependientes del crecimiento de dislocación o del deslizamiento de las uniones entre granos. Los IMCs pueden formarse en cualquier parte de la soldadura y en las interfases terminal-soldadura. Algunos IMCs son muy quebradizos originando zonas débiles que resultarían

en fallas. Una pobre adhesión entre IMCs también puede causar fallas. La microestructura pues afecta las propiedades mecánicas de las uniones de soldadura, y los IMCs juegan un papel muy importante en dicha microestructura [35-37].

Normalmente y aunque las terminales metálicas pueden ser de solo 10 micrómetros de espesor, las reacciones de la soldadura no consumen este material (excepciones: Estaño y capas de pasivación como Au).

2.25.1. Formación y crecimiento de fases intermedias

La formación de interconexiones de soldadura en los microelectrónicos se lleva a cabo cuando se funde la soldadura y se le pone en contacto con superficies metálicas. La unión de los metales se facilita cuando se utiliza un fundente (reducir la oxidación) y se usan atmósferas controladas para prevenir la oxidación durante el reflujo. Las terminales normalmente se recubren, por ejemplo el Ni se recubre con $0.1 \mu\text{m}$ de Au. Los IMCs se pueden formar mediante difusión durante el contacto terminal en estado sólido-soldadura líquida y también durante el estado sólido debido al crecimiento por difusión en estado sólido.

2.25.2. Cinética vs Energética

Cuando hablamos de predecir cuál fase metálica dominará la formación de IMCs tenemos que la cinética tiende a dominar sobre la energética. Esto se ve reflejado en el hecho que la mayoría de las aleaciones ricas en Sn generalmente primero forman sistemas metal-Sn.

La Energética en cambio favorece primero a otras aleaciones. Por ejemplo, en el caso Cu/Sn se primero se observa la formación Cu_6Sn_5 y en Pd/Sn el IMC PdSn_4 . Para entender mejor esta comparación el caso Pd/Sn representa un buen ejemplo. La aleación Pd-Sn contiene siete aleaciones intermedias como se puede ver en la figura 2.18.

Si consideramos el análisis energético de las entalpías de formación de estas aleaciones intermedias en función del contenido de Sn, como se ve en la figura 2.19, vemos que se favorece la formación de aleaciones ricas en Pd, aquí el caso PdSn_4 es el menos favorecido más sin embargo es el que se forma primero.

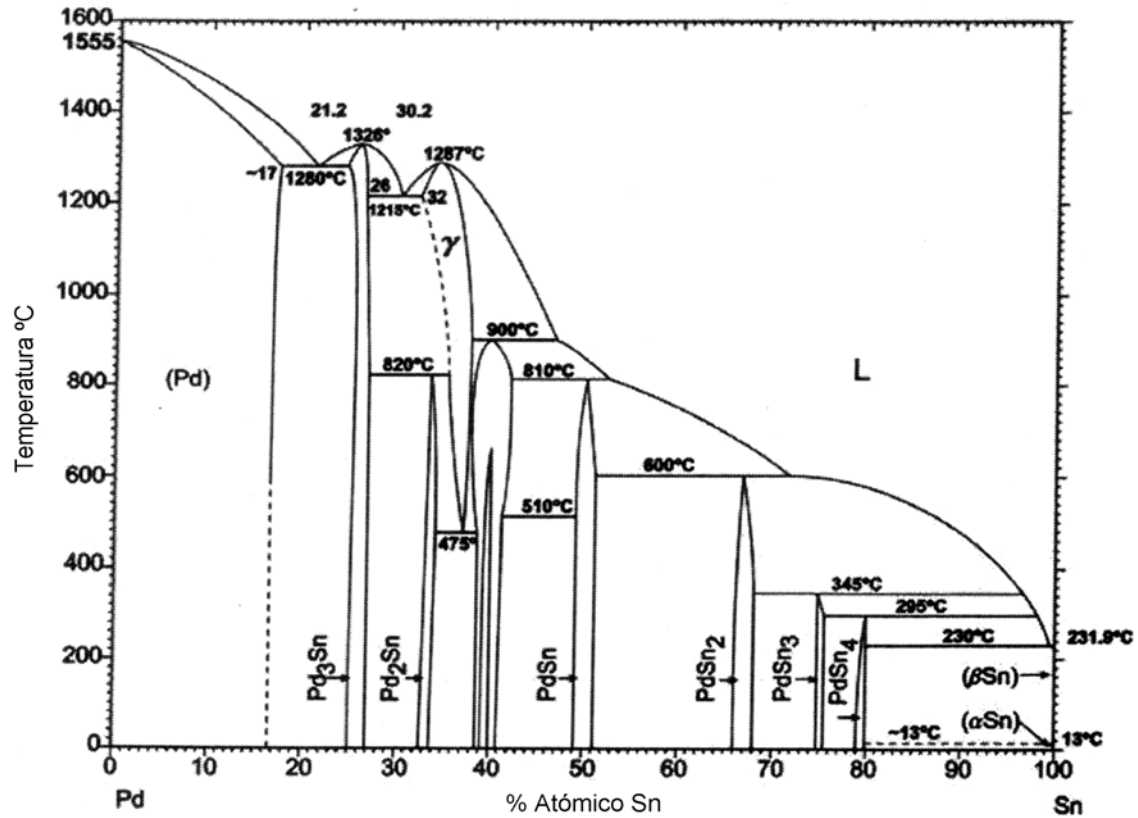


Figura 2.18.- La aleación Pd-Sn contiene siete aleaciones intermedias

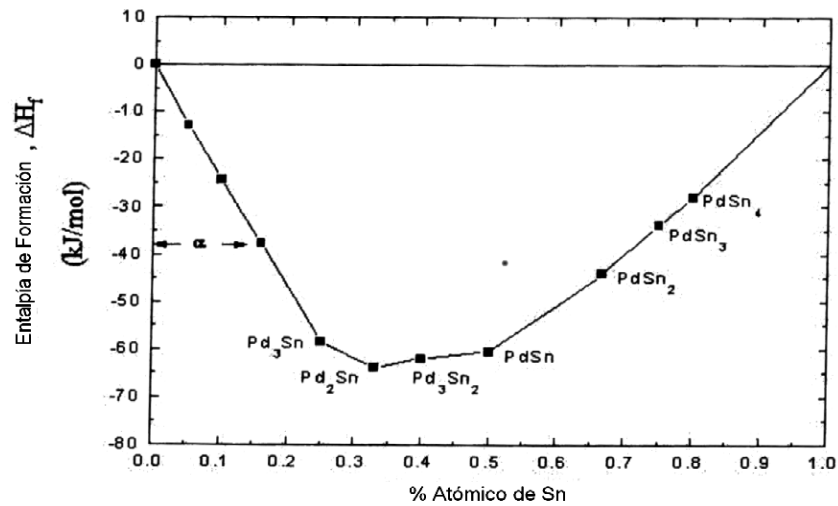


Figura 2.19.- Análisis energético de la soldadura Sn-Pd.

La cinética de formación en cambio ayuda a predecir con más certeza la formación de fases. Por ejemplo y siguiendo con el mismo caso, al examinar los coeficientes de interdifusión de Pd en Sn notamos que la interdifusión de PdSn₄ es similar al Pd en Sn y que los coeficientes de interdifusión disminuyen conforme

disminuye la cantidad de Sn en la aleación (Figura 2.20) . Este análisis puede complementarse y ser mejor entendido cuando analizamos las estructuras cristalinas de dichas aleaciones; podemos ver que la estructura del PdSn₄ es muy similar a la de Sn puro ya que ambas muestran grados de separación similares mientras que la estructura PdSn₂ presenta menos espacio que hace que las constantes de interdifusión disminuyan (figura 2.21 en donde los átomos de Sn se representan como pequeños octahedros y los de Pd como dodecahedros).

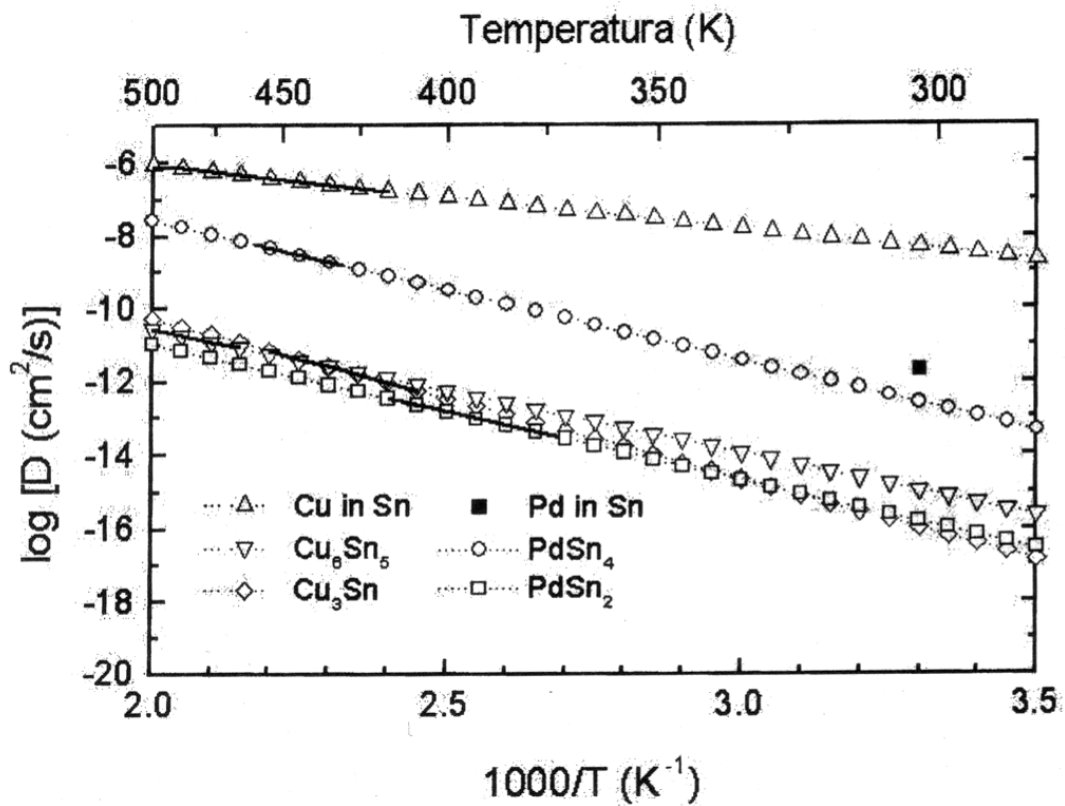


Figura 2.20. Coeficientes de interdifusión de Sn en la aleación

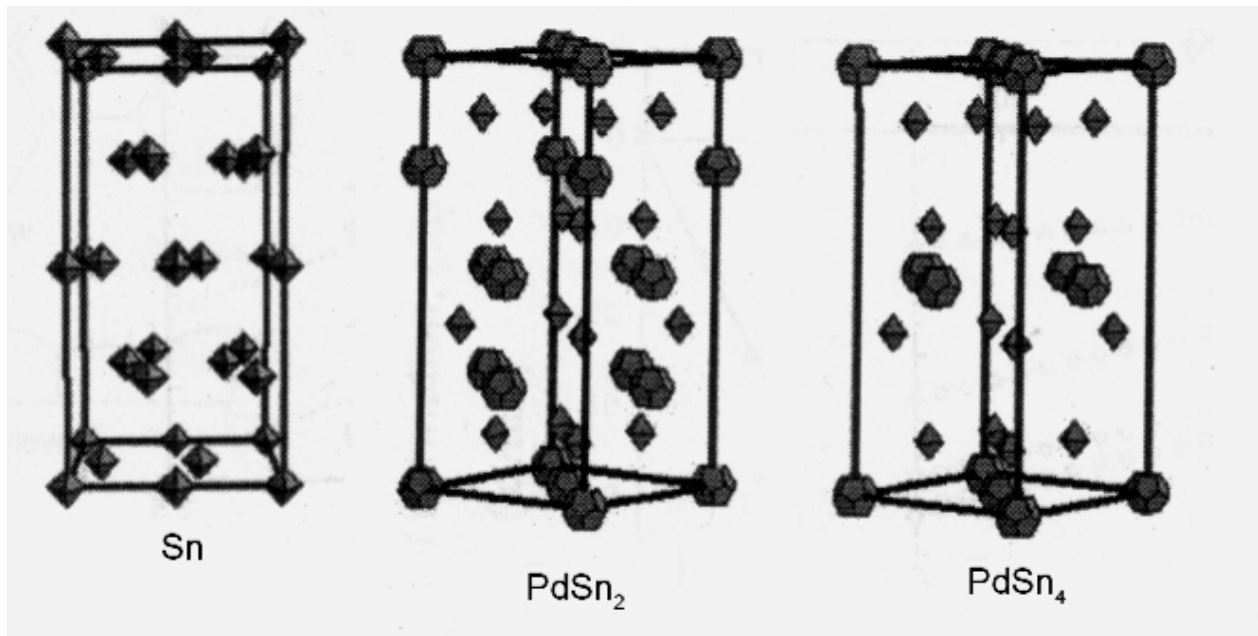


Figura 2.21.- Estructuras cristalinas de Sn y Sn-Pd; podemos ver que la estructura del PdSn₄ es muy similar a la de Sn puro ya que ambas muestran grados de separación similares, mientras que la estructura PdSn₂ presenta menos espacio.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Identificación del mapa de materiales y procesos actuales de Skyworks

El primer paso de esta investigación después de conocer el área de oportunidad que aquí se plantea de no utilizar atmósfera inerte de nitrógeno durante el reflujo del material, es la de hacer un mapeo de cada uno de los materiales y las condiciones de proceso a las que se someten los productos en el proceso actual de Skyworks.

La finalidad de este mapeo es ayudarnos a entender las condiciones y necesidades específicas del proceso para poder estudiar la viabilidad de aplicar cualquier cambio. Esto se logra al definir el enfoque de la aplicación y encontrar las recomendaciones adecuadas basadas en la literatura técnica y fundamentos teóricos alrededor del (los) proceso(s) involucrado(s).

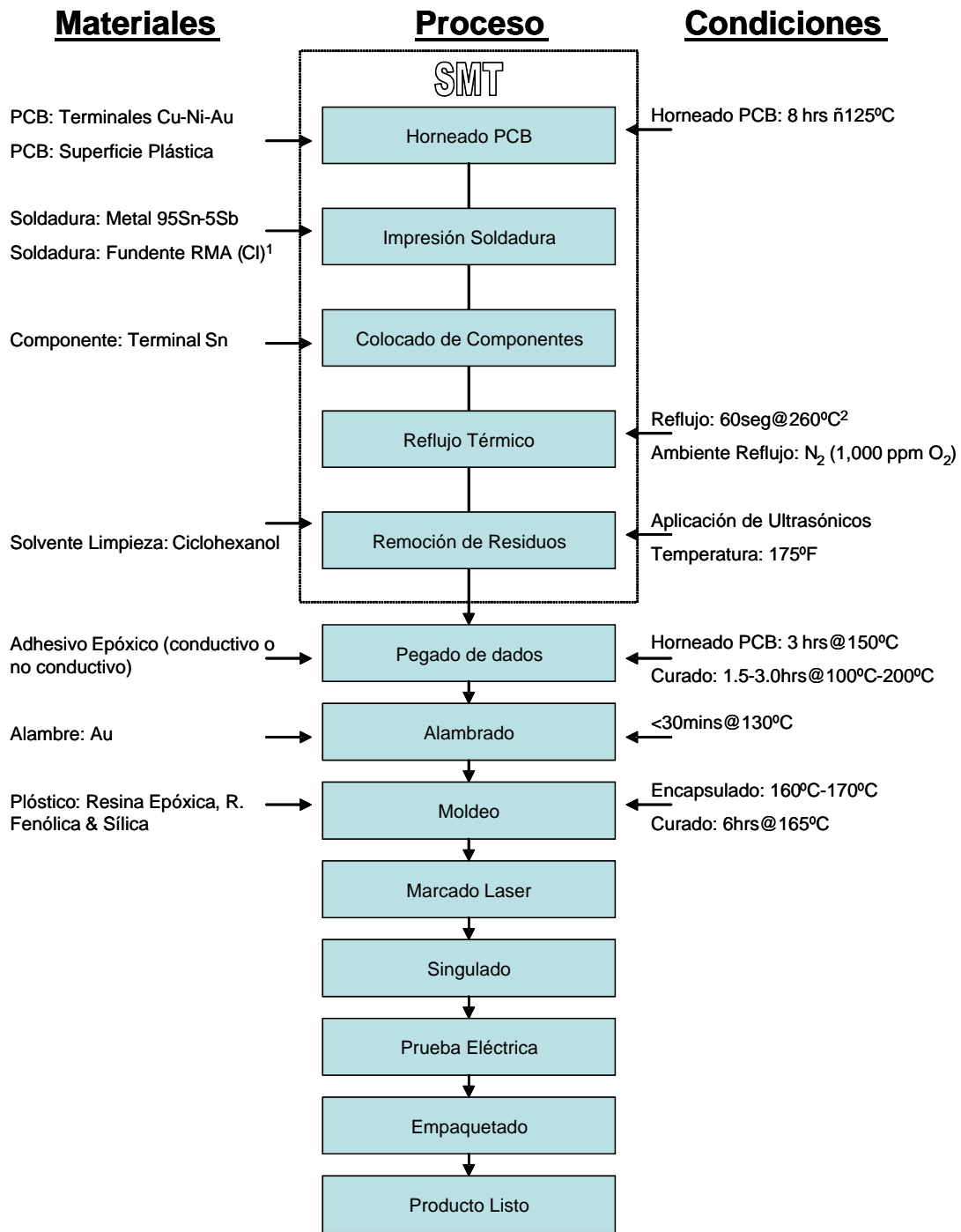
El mapa ilustra las condiciones actuales y no sólo se ubica en el área de enfoque de este estudio (SMT), sino que incluye el resto de las operaciones de ensamble hasta que el producto es terminado ya que ellas también pueden llegar a contribuir en la calidad final del producto (Figura 3.1)

3.2 Definición de Efectos y Variables Críticas.

Una vez que se conocen los detalles de las condiciones y materiales sobre los que se planteó el objetivo principal de este estudio y que se han comprendido los fundamentos teóricos detrás de los procesos involucrados, entonces es posible entender los posibles mecanismos de reacción que a su vez nos ayudan a identificar los efectos y las variables críticas involucrados; ambos serán parte estructural de la experimentación.

Considerando el Objetivo principal y la hipótesis planteados al principio de este estudio y siguiendo un análisis de Causa-Efecto se obtuvieron las siguientes preguntas:

1. ¿Qué efectos me ocasiona el quitar o reducir la atmósfera de Nitrógeno en las condiciones actuales de proceso?
2. En caso de haber algún efecto que pueda degradar las condiciones actuales, ¿qué efectos secundarios me ocasionarían en mi proceso y producto?



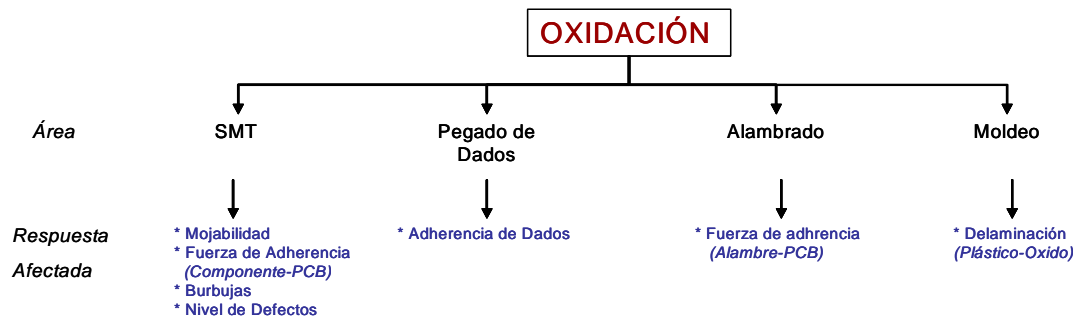
1. Especificaciones de pasta en Anexo 1
2. Perfil térmico utilizado en Anexo 2

Figura 3.1.- Mapa de Materiales y Procesos de Skyworks.

3. Si los efectos secundarios se ven afectados negativamente de manera significativa al quitar o disminuir la atmósfera de nitrógeno durante el reflujo, ¿qué otras opciones puedo considerar para evitar dicha degradación?
4. ¿Qué nuevos riesgos y problemas ocasionarían dichas opciones (de 3)?
5. ¿Cómo puedo conocer el efecto real de los nuevos riesgos y problemas (de 4)?

Las respuestas son:

1. Oxidación. Es el principal efecto directo sobre el material.
2. La oxidación puede afectar las variables respuesta críticas de cada operación del proceso, como se muestra en el siguiente bosquejo:



3. Lo primero es determinar si la oxidación afecta las respuestas enlistadas en el bosquejo anterior en las peores condiciones de proceso (eliminando totalmente la atmósfera inerte de nitrógeno). Si el efecto es significativo el siguiente paso es determinar si existe un nivel medio que sea aceptable para el proceso.

Una vez encontrado el nivel en el que la calidad del producto no se vea afectada (sobre todo después de SMT), entonces existen alternativas para robustecer el área de SMT que es en donde se origina la oxidación: a) cambio de materiales en las terminales a soldarse para mejorar la mojabilidad o b) cambio de fundente en la pasta. Ambos casos disminuirían o contrarrestarían los niveles de oxidación.

Por cuestiones de costos, la propuesta b) sería la más viable a considerar desde el punto de vista de manufactura.

4. El considerar un nuevo fundente traería dos principales problemas a considerar: problemas de corrosión y problemas de manufactura, sea en el proceso de impresión de la pasta o en el incremento de defectos debido a la misma.
5. Los problemas de corrosión se pueden verificar con pruebas de confiabilidad en el producto funcional, además de verificación de algunas pruebas a las que las pastas son sometidas y que se explican en los fundamentos teóricos de este estudio.

Los problemas de manufactura pueden verificarse a través de diversas pruebas que se recomiendan cuando una nueva pasta es evaluada.

El enfoque de este estudio será puramente experimental para los puntos 1 y 2, además de cubrir el resto de los puntos (3-5) a través de recomendaciones que se adaptan al caso específico de Skyworks.

Para ambos casos y como parte fundamental de este estudio, a continuación se enlistan los efectos y variables críticas más importantes a considerar:

Efectos:	Variables
1. Oxidación.	* Fundente en soldadura * Cantidad de O ₂ en horno
2. Corrosión	* Fundente en soldadura
3. Problemas de Manufacturabilidad.	* Fundente en soldadura

3.3 Diseño Experimental

La fase experimental de este estudio se divide en tres pruebas principales utilizando la soldadura en pasta actual de Skyworks. Las dos primeras pruebas consisten en conocer la mojabilidad y los niveles de oxidación en diversos niveles de la atmósfera durante el reflujó, ambas pruebas sobre una superficie de cobre como medio de comparación con las información del medio. La última prueba se realiza sobre material característico de Skyworks con la finalidad de cubrir el panorama definido en 3.2-2

3.3.1 Mojabilidad de la Pasta Actual en Cobre

El experimento consiste en aplicar un depósito circular de soldadura actual Sn-Sb sobre una superficie de cobre y someterla a tres diferentes niveles de oxígeno (21%, 10% y 1000 ppm) en el horno de reflujo por convección de Skywoks utilizando el perfil térmico actual mostrado en el anexo 2

El objetivo es conocer el comportamiento y la actividad del fundente actual en los diferentes niveles de oxígeno en la atmósfera de reflujo (Mezcla Oxígeno-Nitrógeno).

Materiales y Equipo:

1. Placas de cobre (9.5 cm de lado)
2. Soldadura Actual Skyworks
3. Mini-esténcil con diámetro de 6.5 cm. y 1 mm de espesor
4. Horno de convección de Skyworks
5. Perfilador térmico

Variables de Entrada:

1. Porcentaje de Oxígeno en la atmósfera de reflujo
 - Nivel Bajo: 1,000 ppm O₂ (El resto Nitrógeno)
 - Nivel Medio: 10% O₂ (El resto Nitrógeno)
 - Nivel Alto: 21% O₂ (Puro Aire)

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Previamente ajustar las condiciones térmicas del horno de reflujo para obtener el mismo perfil definido en el anexo 2 sobre la superficie de cobre a utilizar.
- b. Aplicar un depósito circular de 6 cm. de diámetro utilizando un mini-esténcil (para controlar que el depósito sea uniforme) sobre varias superficies de cobre.
- c. Someter las muestras a las diferentes condiciones atmosféricas (3 niveles) identificando cada grupo para evitar confusiones.
- d. Tomar las mediciones requeridas.

Variables Respuesta y Metrología:

- | | |
|------------------------------------|------------------------|
| a. Apariencia del fundente | (Visual) |
| b. Apariencia de la terminal de Cu | (Visual) |
| c. Angulo de Soldadura | (Análisis transversal) |

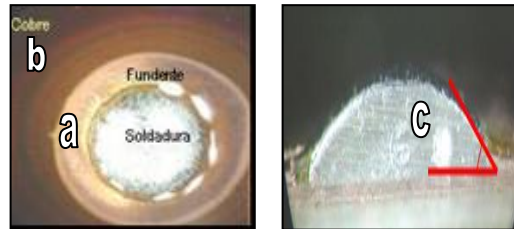


Figura 3.2.- Variables Respuesta.

Criterio: La base de comparación es la condición de 1,000 ppm de O₂ en la atmósfera del horno ya que son las condiciones actuales de proceso. La efectividad del fundente en un atmósfera de aire debe ser similar a la de la atmósfera inerte. Los niveles de oxidación deben ser nulos en el área que cubre el fundente.

Vehículo de Prueba:

Placa de cobre cuadrada de 9.5 cm. de lado.

3.3.2 Nivel de Oxidación utilizando la Pasta Actual en Cobre

Este experimento consiste en soldar con la soldadura actual de Skyworks sobre una superficie de cobre bajo dos atmósferas diferentes (aire y Nitrógeno), con el objetivo de conocer las diferencias en los niveles de óxidos en ambos casos. Esto nos dará, al igual que el experimento anterior, una medida de la efectividad del fundente actual sobre cobre.

Materiales y Equipo:

1. Placas de cobre (9.5 cm de lado)

2. Soldadura Actual
3. Tanque de Nitrógeno
4. Plancha
5. Cautín
6. Embudo

Variables de Entrada:

1. Tipo de Atmósfera

Nivel Bajo: Nitrógeno

Nivel Alto: Aire

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Montar el equipo de laboratorio mostrado en la figura 3.3

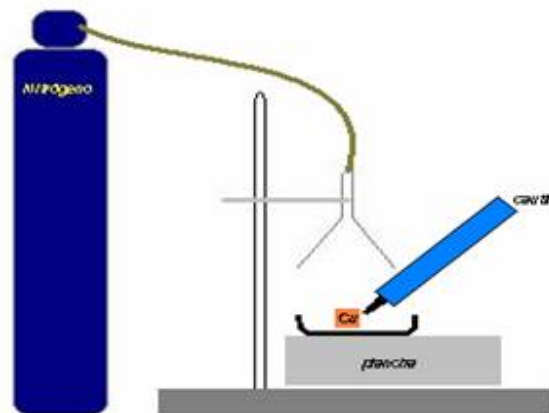


Figura 3.3.- Equipo utilizado para realizar prueba de oxidación.

- b. Calentar la plancha alrededor de 260°C
- c. En el caso de atmósfera de la condición de atmósfera de Nitrógeno, mantener el flujo del embudo cubriendo el área de la plancha de tal forma que el oxígeno sea desplazado.
- d. Precalear la superficie de cobre metálica en la plancha por unos segundos.

- e. Aplicar un poco de soldadura a la superficie de cobre e inmediatamente aplicar calor con el caudín cuidando que la soldadura sea homogénea y no forme un domo. Siempre mantener el material dentro de la atmósfera a evaluarse.
- f. Limpiar las muestras utilizando solvente y ultrasónicos para remover los residuos de fundente sobre la superficie.
- g. Guardar ambas muestras en bolsas de plástico para su medición posterior utilizando equipo SEM/EDX.

Variables Respuesta y Metrología:

- a. Coloración de Soldadura (Microscopio 20X)
- b. % de Oxígeno en Soldadura (SEM/EDX)

Criterio: Para que la efectividad del fundente sea la correcta, los niveles de oxidación sobre la superficie de la soldadura deben ser muy pequeños o nulos en ambos casos.

Vehículo de Prueba:

Placa de cobre cuadrada de 9.5 cm. de lado.

3.3.3 Evaluación de la pasta actual sobre material característico y procesos de ensamble de Skyworks.

Este experimento consiste en evaluar la soldadura actual en condiciones reales del proceso de Skyworks siguiendo todo el flujo completo de ensamble descrito en 3.1. El principal objetivo de esta evaluación es el de conocer el comportamiento del fundente en una atmósfera de aire, cubriendo el análisis de 3.2-2 y comparándolo contra las condiciones actuales.

A este estudio se incorporará otra variable de entrada que tiene que ver con la manera en que es transportada la tarjeta por SMT; el objetivo de incluir esta condición a nuestro estudio es considerar este cambio potencial que está siendo evaluado en Skyworks y que pudiera formar parte del flujo normal de producción. Cabe mencionar de forma genérica que el utilizar o no tablilla transportadora tiene que ver con el mecanismo de transferencia de calor a nuestro material, por convección forzada (sin tablilla) y

convección-conducción (con tablilla). Considerando estas dos principales variables de entrada evaluaremos utilizando un diseño de experimentos de arreglo factorial completo que se define en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Diseño de Experimentos a evaluar en materiales de Skyworks.

Condición	Atmósfera	Transporte
C1	Aire	Con Tablilla
C2	Aire	Sin Tablilla
C3	Nitrógeno	Con Tablilla
C4	Nitrógeno	Sin Tablilla

Recursos Necesarios:

1. Material Característico de Skyworks SKY77328 (PCB y componentes)
2. Soldadura Actual
3. Línea de Producción
4. Perfiles térmicos para material sin y con tablilla de acuerdo a anexo 2
5. Metrología necesaria para recopilar las variables respuesta.

Variables de Entrada:

1. Tipo de Atmósfera
 - Nivel 1: Nitrógeno (1,000 ppm O₂)
 - Nivel 2: Aire
2. Transporte de PCB en SMT
 - Nivel 1: Con tablilla
 - Nivel 2: Sin tablilla

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Identificar cada uno de las grupo (4 en total) para evitar confusiones

- b. Ensamblar el material de acuerdo al flujo normal de proceso de Skyworks variando únicamente las condiciones definidas en el diseño de experimentos
- c. Recolectar las variables respuesta requeridas

Variables Respuesta y Metrología:

*SMT

- a. Nivel de Defectos (Microscopio 7X-30X)
- b. Partículas de Soldadura (Microscopio 7X-30X)
- c. Porcentaje de altura de mojado en componente (Análisis transversal)
- d Apariencia de Oxidación en diversas superficies (Microscopio 7X-30X)
- e. Fuerza de Adherencia Componente-PCB (medidor de esfuerzos)
- f. Burbujas en Soldadura (Rayos X)

*Pegado de dados

- g. Fuerza de Adherencia Dado-PCB (medidor de esfuerzos)

*Alambrado

- h. Fuerza de Adherencia Alambre-PCB (medidor de esfuerzos)

*Producto Final

- i. Delaminación bajo pruebas de confiabilidad (Microscopía Acústica)



Figura 3.5.- Variables Respuesta para pruebas sobre material de Skyworks.

Criterios:

- a. A menor cantidad de defectos mejor comportamiento. Debe mantenerse <0.5%
- b. A menor cantidad de partículas mejor comportamiento. Debe mantenerse <0.5%
- c. A mayor altura de mojado mejor comportamiento. El criterio Skyworks es de al menos 1/3 parte de altura.

- d. Entre menor sea la capa de óxido presente es mejor. Mayor presencia se detecta con una coloración más oscura sobre las superficies: terminal expuesta de componente, superficie plástica del PCB (donde se colocarán los dados), terminal de alambrado.
- e. Debe ser de 1000 gr/micrometro², ó 150 gramos para el caso de componentes 0201.
- f. A menor cantidad mejor comportamiento. No hay valor definido pero podemos utilizar el criterio <20% del área.
- g. Debe ser >4.0Kg para dado de Silicio y GaAs
- h. Debe ser >6.5 gramos
- i. Ninguna pieza delaminada.

Vehículo de prueba

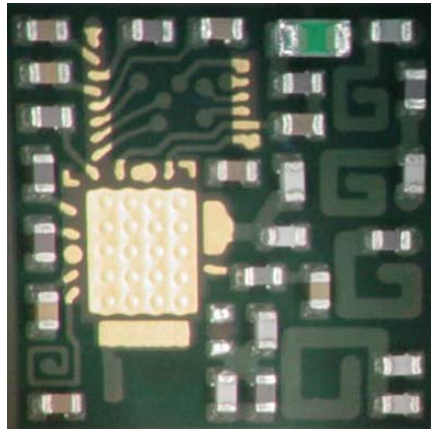


Figura 3.6.- SKY77328. Vehículo de Prueba para pruebas sobre material de Skyworks.

Se seleccionó un material de producción que contiene las condiciones típicas características de las condiciones actuales del proceso en Skyworks. Este vehículo de prueba contiene 26 componentes 0201 y 1 componente 0402. Dos dados, uno de GaAs que se pegará sobre terminal metálica y otro de Silicio que se pegará sobre terminal plástica.

El material lleva el número de parte SKY77328.

3.4 Diseño de Vehículo de Prueba para evaluación de pastas en las condiciones actuales de Skyworks

Este último punto del presente estudio cubrirá la necesidad de los puntos definidos en 3.2-3 al 3.2-5 y se utilizará como recomendación para futuras evaluaciones en Skyworks.

3.4.1 Objetivos del Vehículo de Prueba

Varios son los objetivos que se persiguen en este diseño:

1. **Evaluación de soldaduras en pasta:** utilizando una serie de pruebas recopiladas y recomendadas en estudios similares y literatura; el enfoque de dichas pruebas es específicamente en el área de manufactura de los electrónicos. Las pruebas pueden realizarse en diversas áreas de este diseño a la misma vez, esto con la finalidad de ahorrar tiempo y materiales al momento de realizar la experimentación.
2. **Uso de condiciones actuales (materiales) en Skyworks;** ya que el diseño contendrá las mismas características de los materiales utilizados en esta compañía para hacer una evaluación justa y representativa.
3. **Liderazgo tecnológico,** en ensambles de SMT de Nivel 1 al incluir componentes tan pequeños como 0201 y 01005.

3.5 Metrología

1. Microscopio



Magnificación: 7X – 30X.

Utilizado para inspección visual. Especialmente para detectar defectos.

2. Microscopía electrónica de barrido SEM/EDX



Resolución: 300,000X de magnificación, 3.5nm (30Kv)

Proveedor: Jeol

Utilizado para inspección a altas magnificaciones y análisis químico superficial en una muestra, especialmente para detectar niveles de oxidación.

3. Rayos X



Magnificación: hasta 6,000X

Resolución: Hasta 1 micrómetro.

Proveedor: X-Tek

Utilizado para detección y medición de burbujas en las uniones de SMT.

4. Equipo medidor de esfuerzos DAGE



Rango de Operación: Hasta 10 Kilogramos fuerza.

Proveedor: DAGE.

Utilizado para medir esfuerzos, uniones PCB-componente, PCB-dado, PCB-alambre, sus pruebas pueden ser destructivas o no destructivas arrojando resultados en gramos.

5. Equipo medidor de dimensiones en impresión de pasta



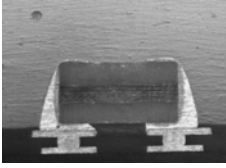
Resolución: 20 micrómetros por pixel.

Rango: 50 – 300 micrómetros de altura de pasta

Proveedor: Cyberoptics

Utilizado para medir dimensiones de soldadura impresa a través de un sistema láser. Mide altura, área y volumen de pasta.

6. Análisis de Sección Transversal



Consta de una serie de equipos utilizados para un microanálisis a través de encapsulado de material y pulido fino. Se utiliza para verificar el grado de mojado de los componentes.

7. Microscopía Acústica



Proveedor: Sonoscan

Utilizado para detectar vacíos dentro de material sólido a través del uso de frecuencias. Es utilizado para detectar delaminación en material encapsulado.

8. Perfilador Térmico



Rango de Operación: Hasta 300°C

Proveedor: Datapaq

Utilizado para medir perfiles térmicos dentro de un horno de reflujo en línea a través de una termocopla y un programa de computadora.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Mojabilidad de la Pasta Actual en superficie de Cobre

Variables Respuesta: :

- Apariencia del fundente (a) y de la terminal de Cobre (b)

La actividad del fundente sobre cobre fue satisfactoria para las tres condiciones ya que en cada una de ellas la presencia de óxidos no fue detectada en el área cubierta por el mismo; además de que se observó que el área que el fundente recorrió para los tres casos fue similar como se puede apreciar en las figuras siguientes: Figura 4.1 condición en aire, Figura 4.2 en 10% de oxígeno y figura 4.3 en 1,000 ppm de oxígeno.

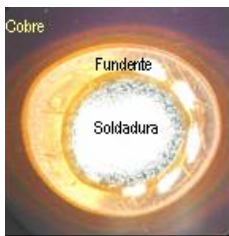


Figura 4.1 En Aire

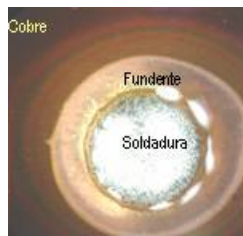


Figura 4.2 En 10% Oxígeno



Figura 4.3 En 1,000 ppm de oxígeno

Con respecto a las terminales de cobre que no fueron cubiertas por el fundente y como era de esperarse, presentaron diversos grados de oxidación de acuerdo a la atmósfera a la que fueron sometidas, para el caso de aire presentó una coloración azulada, para el nivel medio una coloración café y para la inerte no se observaron signos de oxidación. Figura 4.1 condición en aire, Figura 4.2 en 10% de oxígeno y figura 4.3 en 1,000 ppm de oxígeno.

- Angulo de Soldadura

Se encontró que el ángulo de la soldadura disminuyó conforme aumentaba la concentración de oxígeno en la atmósfera. La figura 4.4 muestra un análisis de varianzas entre las diversas condiciones, los datos son resumizados en la tabla 4.5.

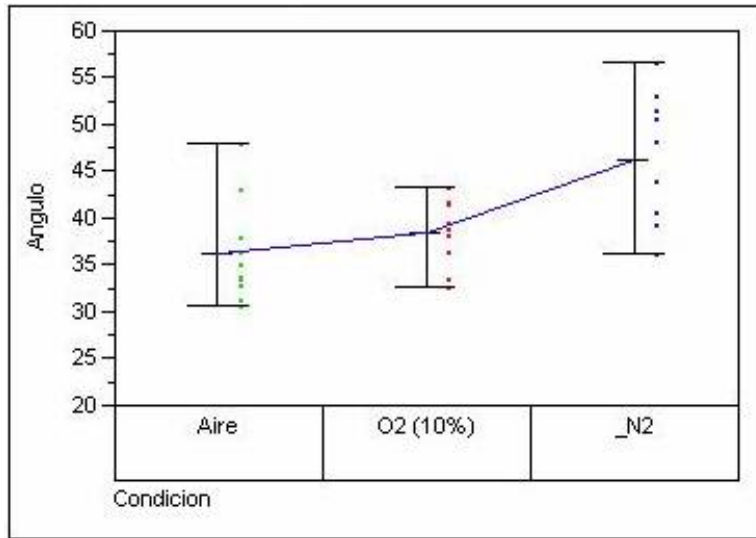


Figura 4.4.- Análisis de Varianza para ángulo de soldadura en tres condiciones de atmósfera.

Tabla 4.5.- Resultados para ángulos de soldadura

	Aire	10% O2	Nitrógeno
Media	36.37	38.58	46.24
Desviación Std	5.49	3.68	6.83
Mínimo	30.68	32.74	36.44
Máximo	48.09	43.48	56.79

Notas importantes del Análisis y Comentarios:

1. El fundente es suficientemente fuerte para remover los óxidos en el área que actúa aún en superficie de cobre.
2. Las áreas que no fueron alcanzadas por el fundente presentaron diversos grados de oxidación. Entre más contenido de oxígeno en la atmósfera, mayor era la oxidación observada.
3. El ángulo de contacto es menor conforme el Nitrógeno es disminuído del horno de convección. Las medias de las condiciones de aire y 10% de oxígeno fueron similares.
4. Si se obtuvieron buenos resultados del fundente sobre cobre, es de esperarse que se obtengan mejores resultados en superficies menos oxidables como las cubiertas con oro.

4.2 Nivel de Oxidación utilizando la pasta actual en Cobre

Variables Respuesta: :

- Coloración de la Soldadura

La coloración fue similar para ambos casos cuando se inspeccionó en microscopio a 20X de magnificación, por lo que visualmente no hubo rastros de presencia de óxidos en la superficie (figura 4.6).



Figura 4.6.- Coloración de Soldadura en nitrógeno (izquierda), y en aire (derecha)

- Porcentaje de oxígeno en soldadura

Durante la inspección del SEM se encontraron restos orgánicos para ambos casos conformados principalmente de carbono, descartándose la posibilidad de oxidación. (Figura 4.7). La Figura 4.8 es una muestra limpia vista en SEM.

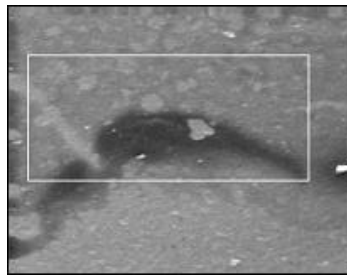


Figura 4.7- Restos de Fundente vistos en SEM

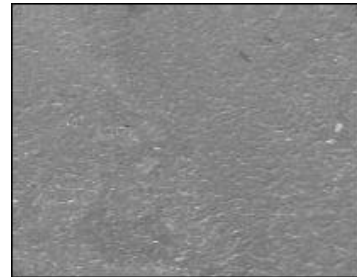


Figura 4.8 Muestra limpia vista en SEM

Los resultados del SEM/EDX nos indican que no hubo diferencia significativa en la presencia de óxidos en ambas superficies (Tabla 4.10), la figura 4.9 muestra la gráfica característica de todas las mediciones.

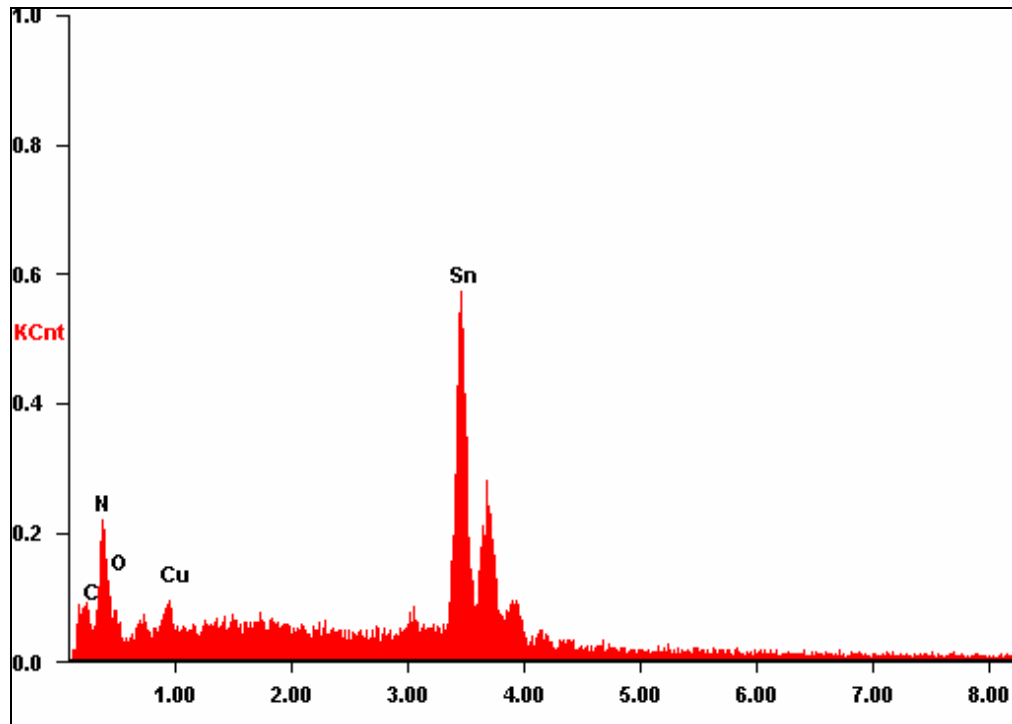


Figura 4.9.- Resultados de las muestras obtenidas en equipo SEM

Tabla 4.10.- Resultados de niveles de oxígeno en porcentaje en peso.

	%wt Oxígeno
Nitrógeno	5.95 - 11.44
Aire	5.38 - 7.37

Notas importantes del Análisis y Comentarios:

1. No se encontraron diferencias en la coloración de ambos casos
2. No hubo diferencia representativa en los niveles de oxígeno, por lo que la oxidación se mantuvo en niveles bajos.
3. Hubo diferencia en los niveles de carbono por los restos de fundente que no fueron removidos adecuadamente.
4. Los bajos niveles de oxígeno encontrados cuantitativamente en SEM/EDX nos corroboran la buena función del fundente de remover óxidos sobre las áreas que éste protege.

4.3 Evaluación de la pasta actual sobre material característico y procesos de ensamble de Skyworks

Los resultados se muestran considerando la nomenclatura de las condiciones de acuerdo a la tabla 4.11:

Tabla 4.11.- Condiciones de Experimentación.

Condición	Atmósfera	Transporte
A	Nitrógeno	Con Tablilla
B	Aire	Con Tablilla
C	Nitrógeno	Sin Tablilla
D	Aire	Sin Tablilla

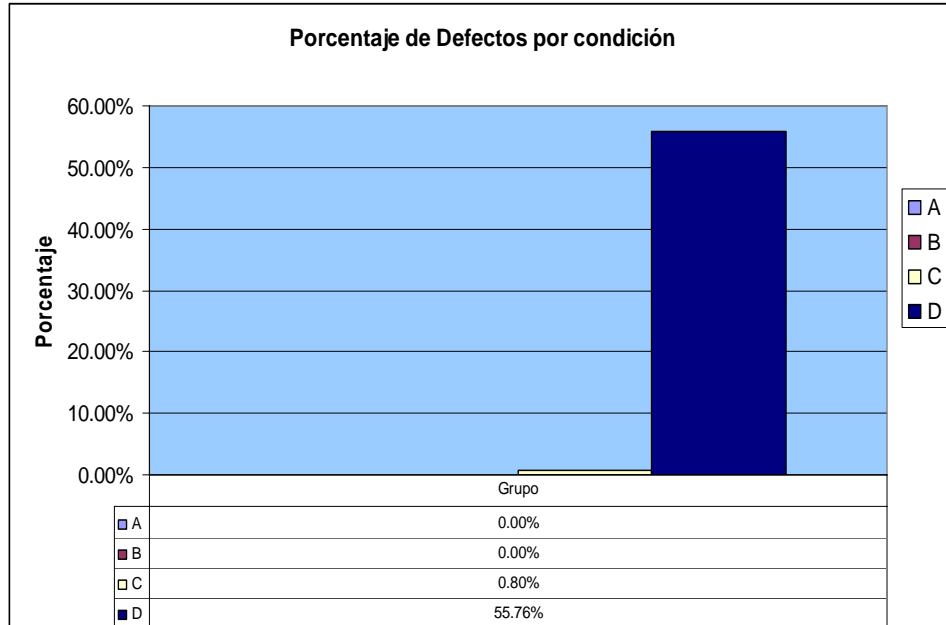
Consideramos la condición A como el grupo control de la experimentación, por ser las condiciones actuales del proceso.

La muestra de ensamble de cada grupo fue de 3 sustratos, esto equivale a 504 unidades y 13,608 componentes por condición.

Variables Respuesta: :

- Nivel de Defectos (a); Area: SMT

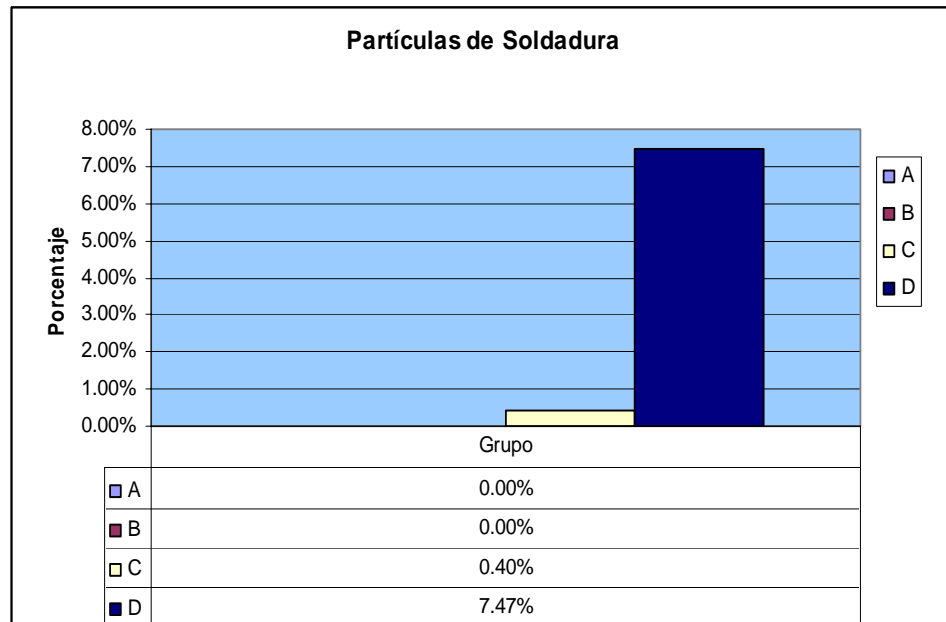
Se observó un marcado incremento de defectos en la condición D (Sin tablilla y sin Nitrógeno), en donde el principal modo de falla fue la presencia de partículas de soldadura en el tablero y apariencia granulosa de las uniones de soldadura indicando un reflujo incompleto (gráfica 4.12). Los mejores grupos con cero defectos fueron los grupos A y B.



Gráfica 4.12.- Nivel de defectos por condición expresado en porcentaje

- Porcentaje de partículas de soldadura (b); Area: SMT

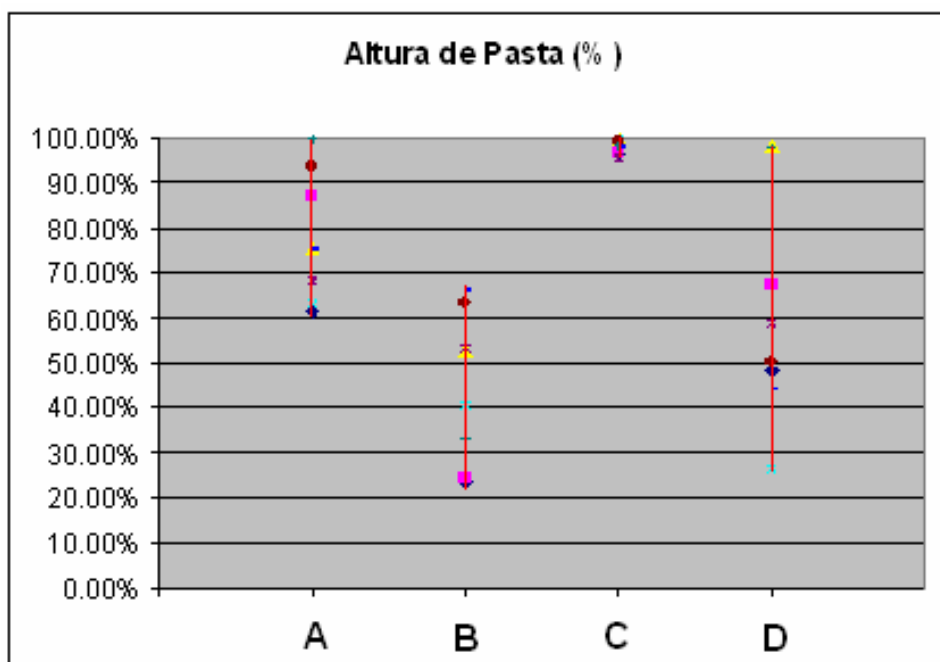
La presencia de partículas de soldadura sigue la misma tendencia que la gráfica de defectos. La condición D muestra el peor comportamiento y los grupos A y B nuevamente no presentan defecto alguno. La gráfica 4.13 muestra los resultados.



Gráfica 4.13.- Partículas de Soldadura por condición expresado en porcentaje

- Porcentaje de altura de mojado en componentes (c); Area: SMT

Encontramos una clara diferencia entre la atmósfera de Nitrógeno contra el Aire. Como era esperado el ambiente en aire reduce el grado de mojado, aunque al parecer si eliminamos la tablilla favorecemos el grado de mojado. Los resultados están en la gráfica 4.14 y tabla 4.15; los casos típicos analizados pueden referenciarse en la figura 4.16



Gráfica 4.14.- Altura de Pasta por condición expresado en porcentaje

Tabla 4.15.- Resultados de altura de pasta expresados en porcentaje

	A	B	C	D
Mínimo	61.60%	23.46%	95.79%	26.35%
Máximo	99.94%	66.32%	99.61%	98.33%
Promedio	78.12%	44.65%	97.90%	61.48%

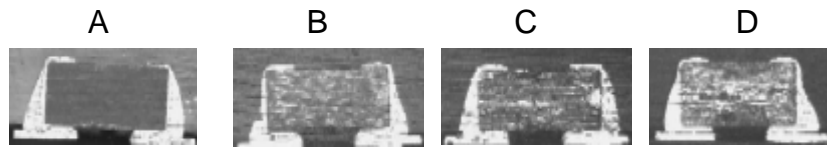


Figura 4.16.- Análisis transversal mostrando alturas de pasta en las diversas condiciones.

- Apariencia de Oxidación en diversas superficies (d); Area: SMT

Visualmente se encuentra una gran diferencia entre ambas atmósferas (Figura 4.17), en donde los niveles de oxidación sobre los componentes se hace notorio cuando no se utiliza una atmósfera inerte.

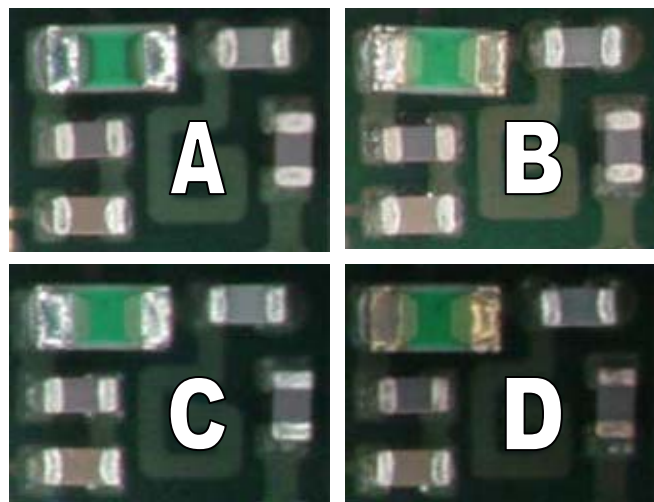
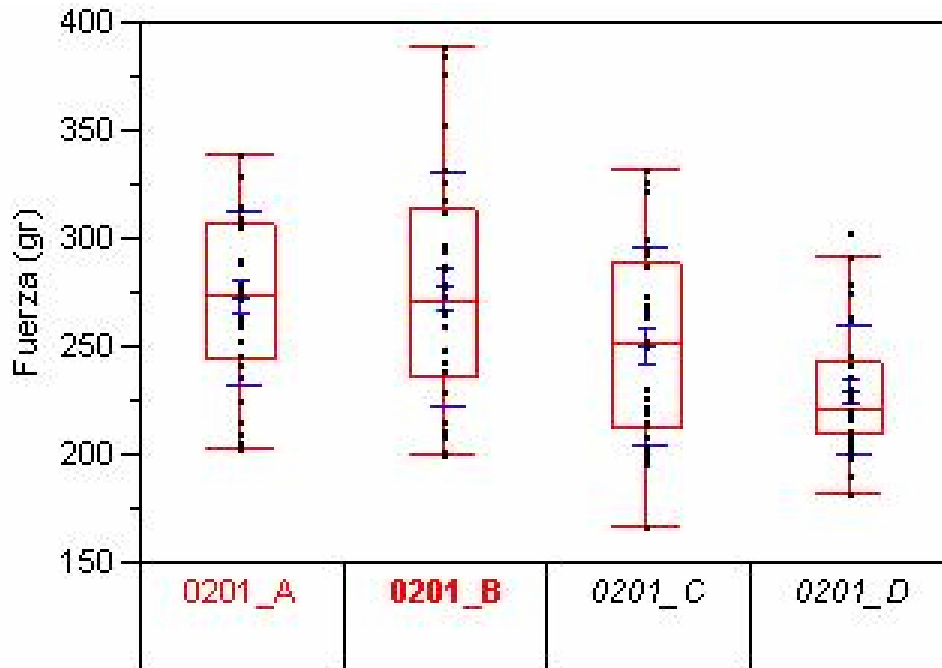


Figura 4.17.- Apariencia de oxidación sobre terminales de componentes para las diversas condiciones.

- Fuerza de Adherencia Componente-PCB (e); Area: SMT

Por análisis de varianzas encontramos que el grupo control A es similar al B, pero la remoción de la tablilla baja la fuerza de aleación; caso especial es el grupo D que obtuvo los valores más bajos. Sin embargo todos ellos cumplen con el criterio mínimo de 150 gramos (componentes 0201). La gráfica 4.18 y la tabla 4.19 enlistan los resultados numéricos.



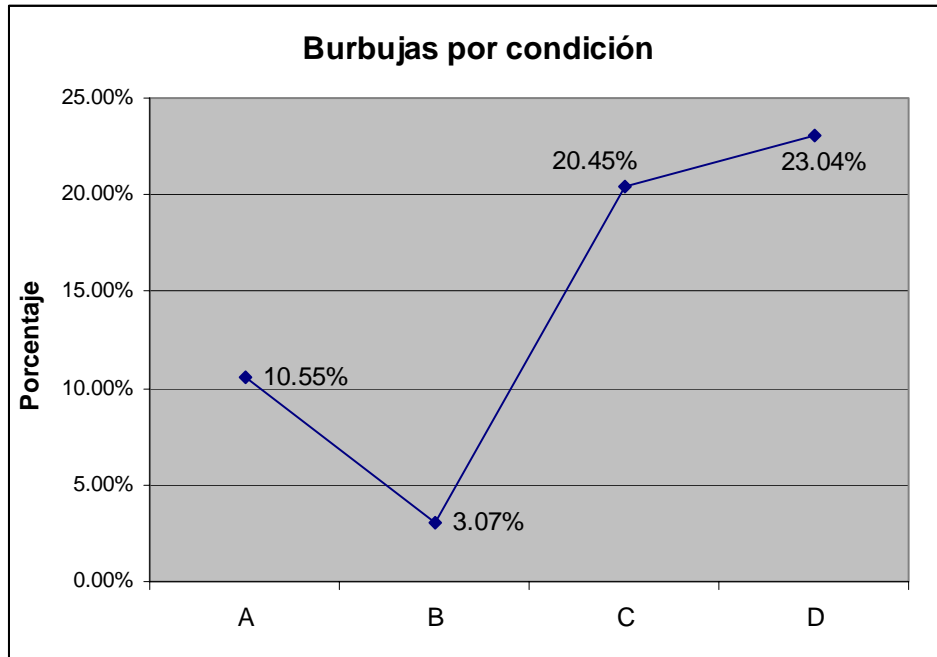
Gráfica 4.18.- Fuerza de Adherencia PCB-componente para las diversas condiciones.

Tabla 4.19.- Resultados de altura de pasta expresados en gramos

	A	B	C	D
Muestra	30	30	30	30
Mínimo	203.5952	200.07	167.58	182.83
Máximo	339.25	390.09	332.21	304.04
Promedio	273.32	277.45	250.98	230.01
Desv. Estándar	40	54.27	45.43	29.82

- Porcentaje de burbujas en Soldadura (f); Area: SMT

Hay una clara diferencia entre los grupos A-B con los C-D, es decir, se encontraron menos burbujas utilizando la tablilla como medio de transporte. La gráfica 4.20 muestra los resultados y las figuras 4.21 muestran el comportamiento típico por condición.



Gráfica 4.20.- Porcentaje de burbujas por condición

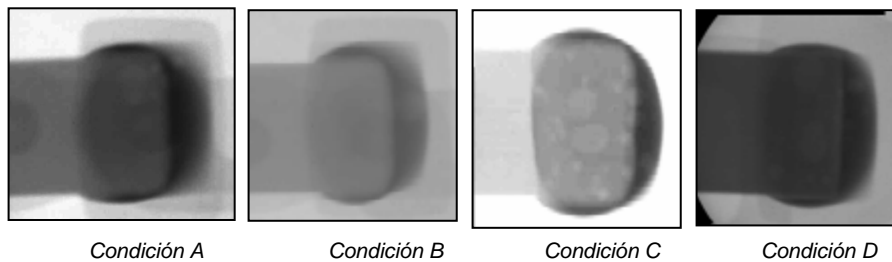
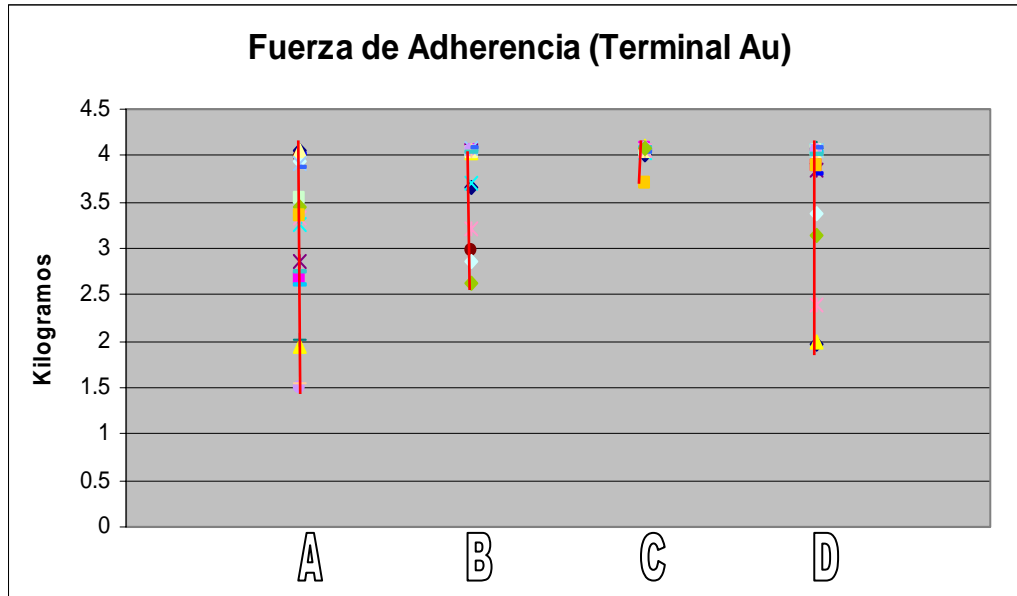


Figura 4.21.- Radiografía mostrando nivel de burbujas por condición

- Fuerza de Adherencia Dado-PCB (g); Area: Pegado de Dados

El pegado que se hace sobre una superficie de oro presenta dispersión y valores mínimos a la especificación de 4 Kilogramos hasta en el grupo de control, por lo que la hipótesis de que los niveles de oxidación afectan la adherencia de los dados en terminales de oro queda descartada. (Gráfica 4.22 y Tabla 4.23).

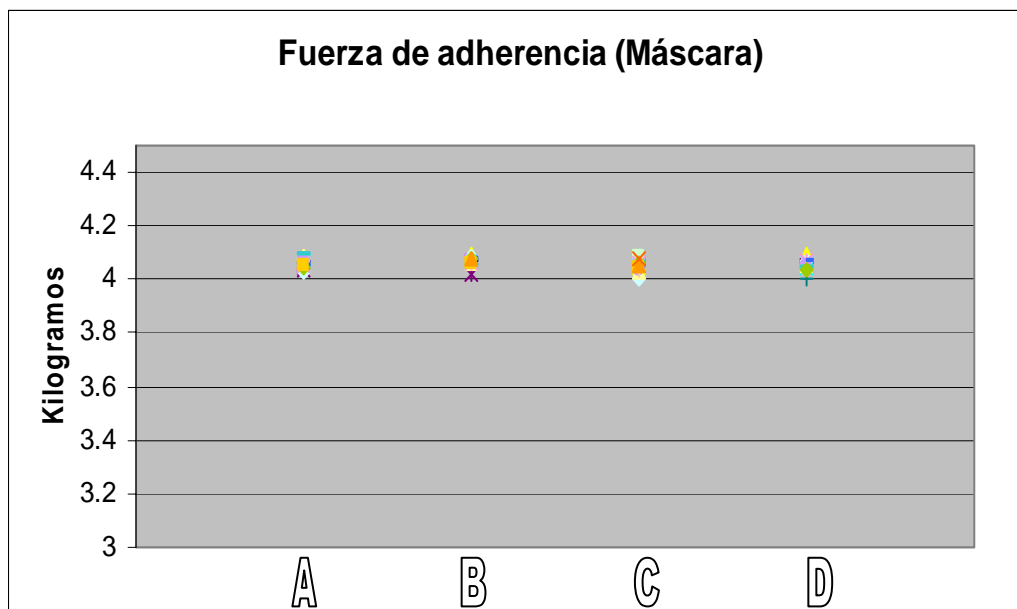


Gráfica 4.22.- Fuerza de Adherencia dado-PCB terminal de oro por condición expresado en Kilogramos

Tabla 4.23.- Resultados de Fuerza de Adherencia dado-PCB terminal de oro

	A	B	C	D
Muestra	20	20	20	20
Mínimo	1.507	2.616	3.692	1.969
Máximo	4.056	4.083	4.093	4.077
Promedio	3.13	3.77	4.04	3.64
Dev. Estándar	0.85	0.48	0.08	0.70

Para el pegado sobre superficie plástica encontramos que no hubo efecto negativo ya que todos los grupos cumplen con los requisitos mínimos que la prueba exige. (Gráfica 4.24 y tabla 4.25)



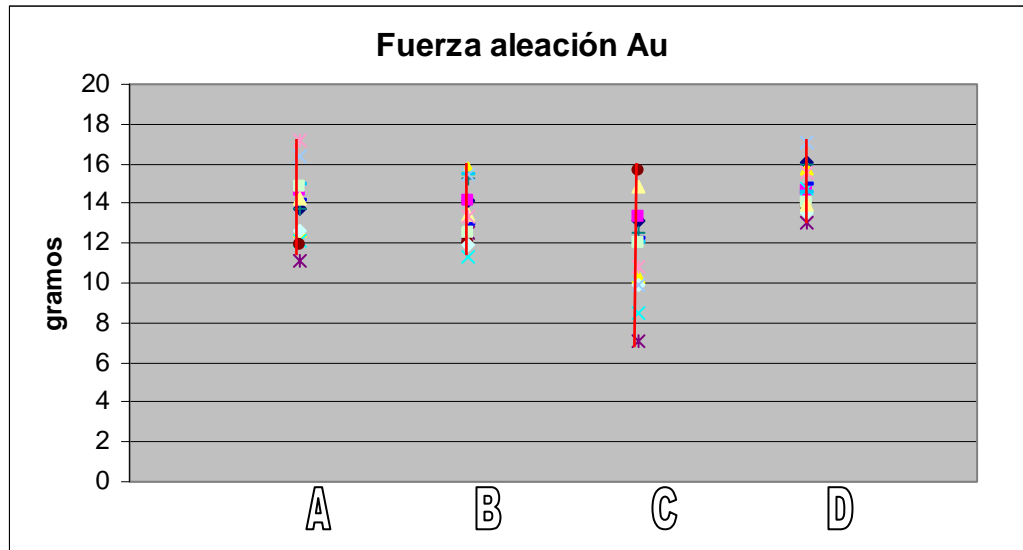
Gráfica 4.24.- Fuerza de Adherencia dado-PCB sobre máscara por condición expresado en Kilogramos

Tabla 4.25.- Resultados de Fuerza de Adherencia dado-PCB sobre máscara

	A	B	C	D
Muestra	20	20	20	20
Mínimo	4.025	4.016	4.003	4.001
Máximo	4.093	4.092	4.088	4.095
Promedio	4.06	4.06	4.05	4.06
Desv. Estándar	0.02	0.02	0.02	0.02

- Fuerza de Adherencia Alambre-PCB (h); Area: Alambrado

Alambrado de Datos en terminales de Au: Si comparamos los grupos con Nitrógeno (A y C) contra los de Aire (B y D) encontramos que tenemos valores más bajos para los primeros (incluido el grupo control A), por lo que los niveles de óxidos que pudieran estar presentes sobre el oro no afectan negativamente la operación de alambrado. (Gráfica 4.26 y tabla 4.27)



Gráfica 4.26.- Fuerza de Adherencia alambre-PCB por condición expresado en gramos

Tabla 4.27.- Resultados de Fuerza de Adherencia alambre-PCB

	A	B	C	D
Muestra	20	20	20	20
Mínimo	11.107	11.264	7.031	13.03
Máximo	17.195	15.711	15.617	17.053
Promedio	13.87	13.58	11.59	14.84
Desv. Estándar	1.70	1.48	2.37	1.14

- Delaminación bajo pruebas de confiabilidad (i); Area: Producto Final

Una de las principales preocupaciones en el producto final, es que la capa de óxidos que se forma en las superficies del material genere problemas de adherencia con el plástico del encapsulado. Estos problemas de delaminación representarían problemas de calidad en el producto.

Una muestra de material fue sometido a pruebas de confiabilidad (ciclos de temperatura, cámara de humedad y reflujo) para después ser analizados por medio de microscopía acústica. Los resultados fueron negativos, en ningún grupo pudo encontrarse signos de delaminación antes y después del reflujo. (Figura 4.28).

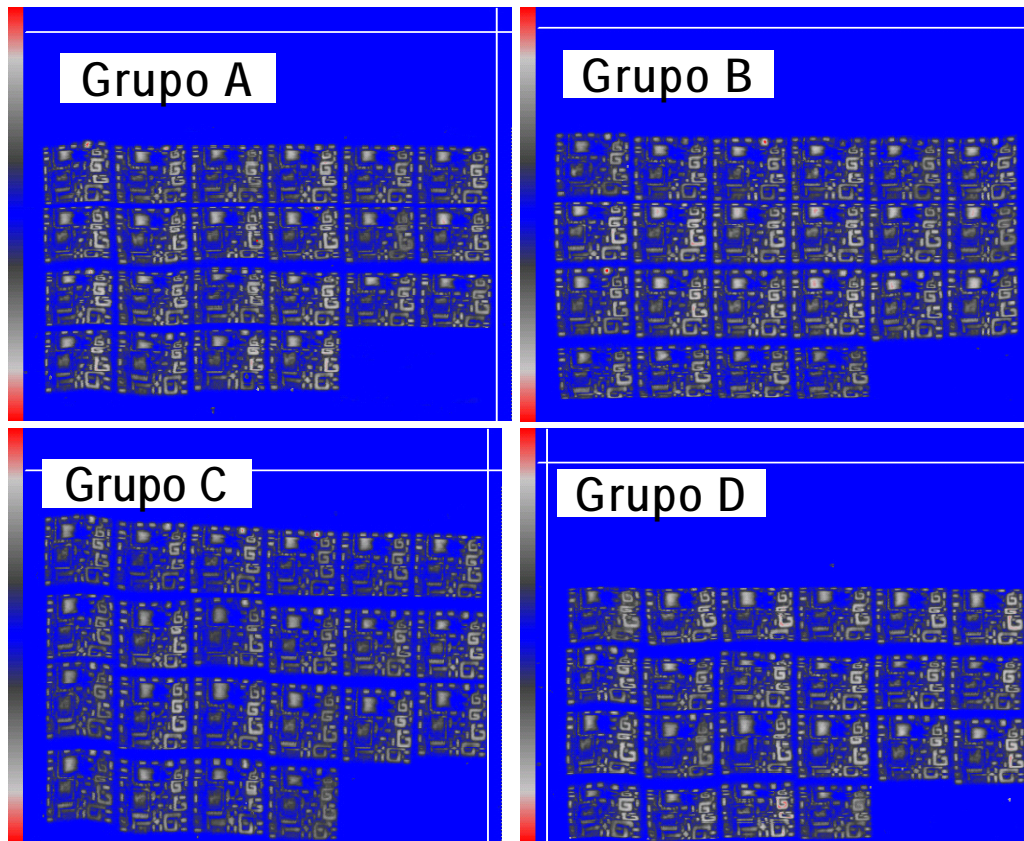


Figura 4.28.- Resultados de Microscopía acústica que no muestran evidencia de delaminación.

Los resultados fueron verificados a través de un análisis transversal e inspección en SEM (Figura 4.29)

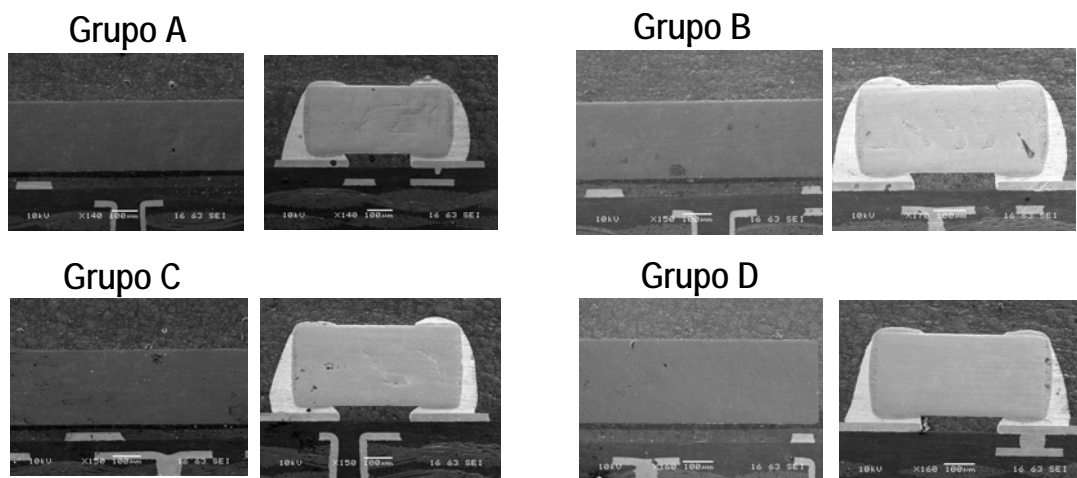


Figura 4.29.- Análisis transversal que no muestran evidencia de delaminación.

Análisis del Diseño de Experimentos:

El diseño de experimentos es un diseño factorial completo de dos niveles y dos factores únicamente; uno de ellos variable continua (cantidad de oxígeno en atmósfera de horno) y el otro variable tipo categórica. Para este panorama, el análisis más práctico se vuelve al dar pesos definidos a cada variable respuesta y al final sumar el total de cada condición, la comparación de los totales nos dará una forma cualitativa de calificar cada condición.

De esta forma generamos la tabla de 4.30 en donde se enlistan los pesos asignados, los resultados de cada condición considerando las medias para las variables respuesta continuas y los totales para una comparación global.

Tabla 4.30.- Resultados Globales del diseño de experimentos y su ponderación.

	Peso (%)	Criterio	Resultados			
			A	B	C	D
			Con Tablilla Nitrógeno	Con Tablilla Aire	Sin Tablilla Nitrógeno	Sin Tablilla Aire
Defectos (%)	20	<0.5%	0	0	0.8	55.76
Partículas de Soldadura (%)	10	<0.5%	0	0	0.4	7.47
Altura Mojado (%)	10	>33%	78.12	44.65	97.9	61.48
Fuerza adherencia componente	10	>150gr	273	277	251	230
Burbujas (%)	10	<20%	10.55	3.07	20.45	23.04
Fuerza adherencia dado	10	>4.0Kg	4.06	4.06	4.05	4.06
Fuerza adherencia alambre	10	>8.5 gr	13.87	13.58	11.59	14.84
Piezas delaminadas	20	0	0	0	0	0
	100					

	Peso (%)	Criterio	Ponderación			
			A	B	C	D
			Con Tablilla Nitrógeno	Con Tablilla Aire	Sin Tablilla Nitrógeno	Sin Tablilla Aire
Defectos (%)	20	<0.5%	20.00	20.00	0.00	0.00
Partículas de Soldadura (%)	10	<0.5%	10.00	10.00	2.00	0.00
Altura Mojado (%)	10	>33%	6.73	1.74	9.69	4.25
Fuerza adherencia componente	10	>150gr	10.00	10.00	10.00	10.00
Burbujas (%)	10	<20%	4.73	8.47	0.00	0.00
Fuerza adherencia dado	10	>4.0Kg	10.00	10.00	10.00	10.00
Fuerza adherencia alambre	10	>8.5 gr	10.00	10.00	10.00	10.00
Piezas delaminadas	20	0	20.00	20.00	20.00	20.00
	100		91.46	90.20	61.69	54.25

Los mejores resultados los tenemos en las condiciones A y B. Considerando que A es el grupo de control, el grupo B arrojó datos promisorios con resultados bajos en la mojabilidad únicamente.

Notas importantes del Análisis y Comentarios:

1. En lo que se refiere a nivel de defectos y presencia de partículas de soldadura, los grupos A y B (con tablilla) obtuvieron resultados perfectos, los grupos sin tablilla presentaron problemas notorios con el nivel de defectos, marcadamente para el grupo D. El principal defecto en D (soldadura fría), nos indica que el perfil térmico para los grupos sin tablilla no es el óptimo.
2. Se encontró muy buen resultado en mojabilidad del grupo C. Aún el grupo control presentó variaciones de 60% a 100%. En general hubo mejores resultados sin la tablilla y con atmósfera inerte. Los grupos en aire puro presentaron valores bajos marginales de arriba del 20%. Para estos casos se recomienda reconsiderar el criterio de altura de mojado; ya que la tendencia de los componentes electrónicos tiende a ser sin soldadura sobre los lados de las terminales pero si por debajo de ella.
3. La oxidación se hizo notoria visualmente específicamente en las terminales superiores de los componentes que no se alcanzan a recubrir por el fundente. Estos valores de oxidación no presentaron problemas de delaminación después de que el material fue sometido a pruebas de confiabilidad.
4. Todos los grupos arrojaron valores superiores a lo mínimo requerido en la prueba de adherencia de componentes, sin embargo se alcanza a notar que los grupos sin tablilla resultaron inferiores reflejando que la formación de intermetálicos no fue similar al grupo control posiblemente debido a un perfil térmico no óptimo para estas condiciones. El grupo control es similar al grupo B.
5. La cantidad de burbujas se incrementó para los grupos C y D (sin tablilla) con valores arriba de lo esperado. Los grupos A y B presentaron mejores resultados. Nuevamente el perfil no óptimo para los grupos sin tablas afectó la variable respuesta

6. Las variables respuesta del pegado de dados y del alambrado presentaron valores satisfactorios sin verse afectados.
7. En general, el análisis de los totales ponderados del diseño de experimentos nos arrojó que el mejor grupo fue el grupo control, sin embargo el grupo B (condiciones de aire con tablilla) fue similar en la mayoría de los aspectos excepto en la mojabilidad en los componentes que en algunos casos fueron marginales. Para obtener mejores resultados es necesario considerar una mezcla de aire-atmósfera nitrógeno en medio de ambas condiciones, optimizar el perfil térmico o considerar un nuevo fundente.
8. Los grupos sin tablilla mostraron resultados muy pobres. Los modos de falla obtenidos nos dan a entender que el perfil térmico actual no es el óptimo para las condiciones sin tablilla. Es muy probable que el método de conducción térmica durante el reflujo afecta significativamente este proceso.

4.4 Diseño de Vehículo de Prueba para evaluación de pastas en las condiciones actuales de Skyworks

4.4.1 Descripción de pruebas

Se han incluido las pruebas más relevantes recomendadas por la industria de los electrónicos, 11 en total, con la finalidad de evaluar y comparar diferentes tipos de soldaduras en pasta utilizando un solo vehículo de prueba. El orden como se enlistaron las pruebas es el que se recomienda como guía para llevar a cabo la experimentación con la finalidad de optimizar tiempos y materiales, sin embargo cada prueba puede llevarse a cabo por separado y en cualquier orden de acuerdo a los recursos disponibles, siempre y cuando las condiciones del proceso de impresión sean las mismas (parámetros y medio ambiente) para cada caso. Las primeras 7 pruebas son dependientes del tiempo por lo que se debe poner más cuidado para lograr un mejor control en la experimentación; las últimas 4 pruebas no requieren tal cuidado debido a que se llevan a cabo después que el material fue soldado por lo que la asignación de recursos para llevarlas a cabo puede ser menos exigente.

Las pruebas que se consideraron en este diseño se enlistan a continuación.

4.4.1.1 Expansión de Pasta

Una de las funciones del fundente es la de mantener la soldadura bajo la misma forma a través del tiempo y así evitar que ésta se desparrame sobre la superficie de la tarjeta electrónica. Si existe una diferencia en altura y forma entonces la soldadura no está cumpliendo con su cometido y esto puede provocar diversos defectos en el producto.

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Imprimir 1 sustrato
- b. Examinar por interconexiones de soldadura inmediatamente después de imprimir la pasta y durante 6 horas a intervalos de 1 hora, determinando visualmente el espaciamiento mínimo entre terminales sin interconexión. (utilizar de referencia los diagramas especificados en la siguiente sección).
- c. Medir dimensiones de la pasta (Altura, Área y Volúmen) en los mismos tiempos que el punto anterior utilizando equipo de medición láser.

Variables Respuesta y Metrología:

- | | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| a. Altura de la impresión | (Equipo de Medición láser) |
| b. Área de la impresión | (Equipo de Medición láser) |
| c. Volúmen de la impresión | (Equipo de Medición láser) |
| d. Distancia mínima entre terminales | (Microscopio 7X – 30X) |

Criterio: Para los primeros tres puntos (**a-c**), es recomendable el menor cambio posible en el mayor tiempo posible para tener un mejor comportamiento de la pasta. Aquí tampoco hay un valor numérico como regla general que sea recomendada ya que ésta dependerá del diseño del vehículo de prueba y las condiciones de manufactura. En el caso de este diseño se recomienda que el cambio límite en el área de cobertura de la

soldadura se base en el hecho de que el cambio en la cobertura sea menor al 20% en el eje X o en el eje Y en un período de al menos 4 horas. Para el punto **d** se obtendrán mejores resultados cuando la distancia de interconexiones sea la menor posible. Por regla de diseño se debe cumplir al menos 160 micrómetros de espaciamiento para componentes 01005 y al menos 200 micrómetros para componentes 0201.

Muestra y Áreas designadas en el VP:

- Variante 1 y 5 para mediciones (a-c) en componentes 0201 y 01005
- Variante 2 para mediciones de distancia (d) en componentes 0201
- Variante 3 para mediciones de distancia (d) en componentes 01005

<i>Cantidad de componentes 0201 para (a-c) en cada PCB:</i>	1,920
<i>Cantidad de componentes 01005 para (a-c) en cada PCB:</i>	1,920
<i>Cantidad de unidades para (d) en componentes 0201 en cada PCB:</i>	40
<i>Cantidad de unidades para (d) en componentes 01005 en cada PCB:</i>	40

Sugerencia de Análisis: Para las pruebas (a-c) se sugiere utilizar el 100% de los datos disponibles para el análisis debido a la naturaleza del equipo de inspección que es automático. Se deberá comparar el cambio a las diferentes horas contra la referencia tomada a las 0 hrs y reportado en porcentaje: por tipo de componente y por orientación del componente (vertical u horizontal).

Para las mediciones de (d) y debido a que el análisis es manual, se sugiere un muestreo que sea representativo estadísticamente con un total de al menos 40 mediciones tomadas al azar de las diferentes variantes disponibles en el PCB. Los resultados se reportarán como distancias absolutas por tipo de componente y por orientación del mismo (vertical u horizontal).

4.4.1.2 Expansión de Pasta en Caliente

La prueba de expansión de pasta del punto anterior que se realiza a temperatura ambiente se complementa sometiendo la pasta a condiciones extremas, en este caso a temperaturas mayores.

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Imprimir 1 sustrato
- b. Examinar por interconexiones de soldadura inmediatamente después de imprimir la pasta y después de 2 minutos a 150°C (aplicados en una plancha térmica)
- c. Determinar visualmente el espaciamiento mínimo entre terminales sin interconexión. (utilizar de referencia los diagramas especificados en la siguiente sección).
- d. Medir dimensiones de la pasta (Altura, Area y Volúmen) en ambos casos utilizando equipo de medición laser.

Variables Respuesta y Metrología:

- | | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| a. Altura de la impresión | (Equipo de Medición laser) |
| b. Area de la impresión | (Equipo de Medición laser) |
| c. Volúmen de la impresión | (Equipo de Medición laser) |
| d. Distancia mínima entre terminales | (Microscopio 7X – 30X) |

Criterio: Utilizar los mismos criterios que el punto anterior, a excepción del tiempo que no es factor considerado para esta evaluación.

Muestra y Áreas designadas en el VP:

- Variante 1 y 5 para mediciones (a-c) en componentes 0201 y 01005
- Variante 2 para mediciones de distancia (d) en componentes 0201
- Variante 3 para mediciones de distancia (d) en componentes 01005

Cantidad de componentes 0201 para (a-c) en cada PCB: 1,920

<i>Cantidad de componentes 01005 para (a-c) en cada PCB:</i>	1,920
<i>Cantidad de unidades para (d) en componentes 0201 en cada PCB:</i>	40
<i>Cantidad de unidades para (d) en componentes 01005 en cada PCB:</i>	40

Sugerencia de Análisis: Se sugiere un análisis similar al recomendado a temperatura ambiente del punto anterior.

4.4.1.3 Tiempo de Vida

Por requerimientos de manufactura, las soldaduras que se utilicen deben ser capaces de estar en los equipos de impresión de pasta durante periodos de tiempo largos sin afectar la calidad de impresión. Estos periodos de espera pueden ser comunes cuando se presentan problemas durante la producción; por lo que una pasta robusta debe evitar al máximo generar defectos por una pobre impresión debido a estos tiempos de espera.

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Imprimir 1 PCB cada hora durante 6 horas.
- b. Durante el tiempo de espera entre impresiones, mantenga la pasta dentro de la bomba de impresión sin ningún procedimiento adicional de homogenización de la pasta dentro de la misma.
- c. Medir dimensiones de la pasta (Altura, Area y Volúmen) en cada tarjeta utilizando equipo de medición laser.
- d. Para cada tarjeta, Inspeccionar visualmente y cuantificar las terminales interconectadas y de pobre o nula cobertura de soldadura.

Variables Respuesta y Metrología:

- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| a. Altura de la impresión | (Equipo de Medición laser) |
| b. Area de la impresión | (Equipo de Medición laser) |
| c. Volúmen de la impresión | (Equipo de Medición laser) |
| d. Defecto: Interconexiones | (Microscopio 7X – 30X) |

e. Defecto: Pobre cobertura de pasta

(Microscopio 7X – 30X)

Criterio: Entre mayor sea el tiempo que transcurra antes de un cambio significativo en las variables respuesta mejor comportamiento tendrá la pasta. Un tiempo aceptable de vida de la pasta será cuando el cambio a través del tiempo de la cobertura de la pasta 1) no genere interconexiones, 2) no exceda un cambio mayor a 20% en los ejes X y Y de las terminales o 3) no cubra el 80% de la terminal impresa.

Muestra y Áreas designadas en el VP:

- Variante 1 para ambos tipos de componentes
- Variante 5 para ambos tipos de componentes

Cantidad de componentes 0201 en cada PCB: 1,920

Cantidad de componentes 01005 en cada PCB: 1,920

Sugerencia de Análisis: Se sugiere utilizar el 100% de los datos disponibles por la facilidad de recolección de los puntos (a-c); el reporte debe incluir cambios en porcentaje comparado contra la referencia inicial a tiempo 0 hrs. Para (d-e) aunque la inspección es manual los defectos son muy obvios y fácilmente detectables por lo que se recomienda tomar el 100% de la muestra; los resultados deben reportarse como porcentaje de defectos en base al total de muestra inspeccionada. En todos los casos se sugiere realizar el análisis por tipo de componente y por variante.

4.4.1.4 Adherencia de Componentes

Otra de las funciones del fundente es la de sujetar o mantener los componentes adheridos a la soldadura y evitar que se muevan para que el proceso de soldado se lleve a cabo correctamente. La manufactura requiere que esta función se

sostenga en el mayor tiempo posible, dando holgura a los ciclos de manufactura parciales en tiempos perdidos por fallas en la línea de producción.

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Imprimir 7 PCBs y colocarles componentes en las variantes 1 y 5 únicamente.
- b. Inspeccionar que el 100% de los componentes hayan sido colocados, en caso contrario registrar los faltantes.
- c. En intervalos de una hora y a partir del tiempo 0: invertir cada PCB a 90°, dejarlo caer suavemente a una superficie desde un centímetro de altura, invertirlo a 180° y contabilizar los componentes que se cayeron del mismo.
- d. Calcular el porcentaje de componentes caídos descontando los que no se colocaron antes de realizar la prueba del punto c.

Variables Respuesta y Metrología:

- a. Cantidad de componentes caídos (Visual)

Criterio: Entre mayor sea el tiempo que pase expuesto el PCB con los componentes colocados sobre pasta fresca sin que el porcentaje de componentes caídos sea significativo mejor funcionamiento de la pasta. Un porcentaje significativo de componentes caídos sería uno mayor al 0.5% del total de componentes colocados.

Muestra y Áreas designadas en el VP:

- Variante 1 para ambos tipos de componentes
- Variante 5 para ambos tipos de componentes

Total de componentes 0201 en cada PCB: 2,304

Total de componentes 01005 en cada PCB: 2,592

Total de componentes de ambos tipos en cada PCB: 4,896

Sugerencia de Análisis: Se sugiere utilizar el 100% de los datos componentes. El resultado se registrará como porcentaje de componentes caídos respecto al tiempo de exposición por tipo de componente.

4.4.1.5 Presencia de Burbujas

Las burbujas en una aleación metálica no son otra cosa que espacios vacíos en el metal provocados por humedad o por gases liberados por el fundente o por algunos materiales de la tarjeta electrónica durante el proceso de reflujo. El tiempo de exposición de la soldadura impresa puede incrementar la presencia de burbujas en algunos tipos de fundentes por la facilidad de estos de absorber humedad del ambiente. Un exceso de burbujas puede representar una barrera para la conducción de corriente o calor a través de los materiales provocando un problema de funcionalidad.

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Imprimir 4 sustratos y colocarles componentes en todas las variantes
- b. Exponer los sustratos al medio ambiente.
- c. En intervalos de 2 horas y a partir del tiempo 0, introducir los sustratos al horno de reflujo.
- d. Medir el tamaño de las burbujas en rayos X.

Variables Respuesta y Metrología:

- | | |
|---------------------------------------|-----------|
| a. Tamaño de burbujas | (Rayos X) |
| b. Porcentaje de burbujas en la unión | (Rayos X) |

Criterio: A menor cantidad de burbujas y entre más tiempo de exposición sin incrementarse la cantidad de burbujas significativamente, mejor la soldadura en pasta. No hay un valor absoluto que se haya fijado por las diversas asociaciones de los electrónicos pero P.T. Vianco [21] sugiere que podemos tener productos con buena confiabilidad con porcentajes de burbujas menores a 20% por unión de soldadura.

Muestra y Áreas designadas en el VP:

- Variante 1
- Variante 2
- Variante 3
- Variante 5

Muestra sugerida en terminales 0201 en cada PCB: 40

Muestra sugerida en terminales 01005 en cada PCB: 40

Sugerencia de Análisis: Se sugiere realizar sólo un muestreo que sea representativo estadísticamente con un total de al menos 40 mediciones tomadas al azar de las diferentes variantes disponibles para este estudio para los diversos tiempos. La inspección y medición normalmente toman tiempo para completarse y es por eso que se sugiere el muestreo. El análisis puede completarse a través de un análisis de varianzas entre las diversas soldaduras, por tipo de componente a través del tiempo.

4.4.1.6 Claridad del Residuo

Es importante conocer el estado del fundente ya que éste tiene un rol extremadamente importante durante el proceso de soldado. El residuo que un fundente deja normalmente debe tener ciertas características que de no cumplirse pueden darnos indicios que el fundente no esté en buenas condiciones y pueda generar defectos.

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Imprimir 3 sustratos y colocarles componentes en todas las variantes
- b. Someterlos a reflujo inmediatamente después de ser colocados los componentes.
- c. Antes de someterlos al ciclo de limpieza, identificar el color del residuo e identificar si la masa del mismo es excesiva.

Variables Respuesta y Metrología:

- a. Color del residuo del fundente (Microscopio 7X – 30X)
- b. Cantidad del residuo del fundente (Microscopio 7X – 30X)

Criterio: El color del residuo debe ser transparente y de poca masa. Una coloración amarillenta u obscura representa rechazo. Normalmente el residuo debe circundar la soldadura de las uniones y no unirse entre componentes adyacentes inmediatamente después del reflujó. Después del ciclo de limpieza no debe existir residuo alguno sobre el ensamble.

Muestra y Áreas designadas en el VP:

- Variantes 1, 2, 3 y 5 para determinar cantidad del residuo en ambos tipos de componentes
- Variante 4 para determinar coloración del residuo

Total de componentes de ambos tipos en cada PCB: 8,832

Total de unidades para determinar coloración en cada PCB: 24

Sugerencia de Análisis: En este caso se sugiere un análisis no cuantificable expresando un solo resultado representativo de toda la tarjeta electrónica, complementado a través de fotografías del caso típico de coloración y cantidades del residuo entre componentes adyacentes.

Como nota adicional, esta prueba puede complementarse utilizando el procedimiento de laboratorio que se referencia en [20].

4.4.1.7 Remoción de Residuos

Aunque algunas aplicaciones no requieren de remoción de residuos del fundente, para la aplicación específica de Skyworks la remoción se vuelve muy

importante por el hecho de que en caso de no hacerlo la calidad de los procesos subsecuentes se vería afectada. Si a esto le aunamos que algunas formulaciones de fundentes son corrosivas entonces es de suma importancia la realización de esta prueba.

La inclusión de esta prueba en este diseño es una referencia general que puede utilizarse como referencia inicial en la evaluación de pastas; como ya se ha explicado anteriormente este tipo de pruebas deben complementarse con estudios más profundos que incluyan la detección de trazas de residuos a través de equipos sofisticados como SEM/EDX además de pruebas de confiabilidad en producto funcional para detectar posibles cambios en el comportamiento mecánico y/o eléctrico de las piezas involucradas. Es importante aclarar que esto normalmente se realiza en las fases finales de selección de las soldaduras en evaluación y una vez que se han descartado opciones que no cubren satisfactoriamente las pruebas definidas en esta sección.

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Imprimir 3 sustratos y colocarles componentes en todas las variantes
- b. Someterlos a reflujado inmediatamente después de ser colocados los componentes.
- c. Someterlos al ciclo de limpieza recomendado de acuerdo al tipo de pasta. (Se pueden utilizar los mismos PCBs utilizados en la prueba de claridad del residuo)
- d. Inspeccionar por residuos de fundente que puedan permanecer en el material utilizando microscopio con magnificación 7X-30X.

Variables Respuesta y Metrología:

- a. Residuos de fundente (Microscopio 7X – 30X)

Criterio: Después del ciclo de limpieza recomendado no deben encontrarse restos de residuos de fundente. Se pueden designar los siguientes códigos: 0) no se encontraron restos, 1) se encontraron restos en algunas secciones y 2) se encontraron residuos en todo el material.

Muestra y Áreas designadas en el VP:

- Variante 1
- Variante 2
- Variante 3
- Variante 4
- Variante 5

<i>Total de componentes 0201 en cada PCB:</i>	3,936
<i>Total de componentes 01005 en cada PCB:</i>	4,896
<i>Total de componentes en cada PCB:</i>	8,832

Sugerencia de Análisis: Se sugiere un análisis preliminar utilizando los códigos propuestos como medio de comparación de las diversas pastas a evaluarse.

4.4.1.8 Nivel de Defectos

Esta prueba es una de las más importantes a considerar cuando hablamos de manufactura, ya que el hecho de tener defectos representa tener pérdidas económicas en desperdicios y tiempos muertos; por lo que la tendencia en empresas de manufactura será la de buscar procesos libres de defectos.

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Imprimir 3 sustratos y colocarles componentes en todas las variantes
- b. Someterlos a reflujado inmediatamente después de ser colocados los componentes.
- c. Someterlos al ciclo de limpieza recomendado de acuerdo al tipo de pasta. (Se pueden utilizar los mismos PCBs utilizados en la prueba de claridad del residuo)
- d. Inspeccionar el material y contabilizar los defectos utilizando como referencia de inspección los defectos definidos en la sección 1.14.

Variables Respuesta y Metrología:

a. Cantidad de Defectos

(Microscopio 7X – 30X)

Criterio: La pasta con menor cantidad de defectos es la que mejor califique esta prueba. Sin embargo una buena referencia es un nivel de defectos menor a 0.5%.

Muestra y Áreas designadas en el VP:

- Variante 1
- Variante 2
- Variante 3
- Variante 5

Total de componentes 0201 en cada PCB: 3,936

Total de componentes 01005 en cada PCB: 4,896

Total de componentes en cada PCB: 8,832

Sugerencia de Análisis: Realizarlo tan detallado como sea posible considerando el análisis : por tipo de pasta, por tipo de defecto, por tipo de componente y por tipo de variante. Los resultados pueden analizarse por medio de porcentajes de defectos tomando como base el total de componentes colocados.

4.4.1.9 Partículas de Soldadura

Una de las funciones principales de un fundente es la de mantener la soldadura junta y evitar que se disperse. Si hay dispersión entonces las partículas de soldadura saldrán de la masa principal de pasta provocando un riesgo potencial de puentes en el circuito si no son removidas adecuadamente.

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Imprimir 3 sustratos y colocarles componentes en todas las variantes
- b. Someterlos a reflujado inmediatamente después de ser colocados los componentes.
- c. Someterlos al ciclo de limpieza recomendado de acuerdo al tipo de pasta. (Se pueden utilizar los mismos PCBs utilizados en la prueba de claridad del residuo)
- d. Inspeccionar el material y cuantificar el número de esferas de soldadura que estén fuera de la masa principal en las uniones componente-PCB utilizando como referencia la definición del defecto por la Sección 1.14.

Variables Respuesta y Metrología:

- a. Cantidad de Esferas de Soldadura (Microscopio 7X – 30X)

Criterio: La pasta con menor cantidad de partículas de soldadura es la que mejor califique esta prueba. Sin embargo una buena referencia es un nivel de defectos menor a 5,000 ppm basados en el global de componentes colocados.

Muestra y Áreas designadas en el VP:

- Variante 1
- Variante 2
- Variante 3
- Variante 5

<i>Total de componentes 0201 en cada PCB:</i>	3,936
<i>Total de componentes 01005 en cada PCB:</i>	4,896
<i>Total de componentes en cada PCB:</i>	8,832

Sugerencia de Análisis: Realizar el análisis tan detallado como sea posible considerando el análisis : por tipo de pasta y por tipo de variante. Los resultados pueden analizarse

por medio de partes por millón (ppm) de defectos tomando como base los totales expresado en el párrafo anterior.

Como nota adicional, esta prueba puede complementarse utilizando el procedimiento de laboratorio que se referencia en [20].

4.4.1.10 Fuerza de la Aleación

Una vez que la unión ya ha solidificado después del reflujo, la formación adecuada de intermetálicos entre las interfaces marcará la pauta para determinar que tan fuerte es dicha unión. Una buena unión debe presentar como característica la fuerza suficiente para evitar fallas mecánicas y asegurar una buena calidad y confiabilidad del producto. En caso contrario, una formación de IMC incorrecta nos dará una unión frágil y débil que provocará fallas. Existen estándares que nos indican los límites de esfuerzo que una unión debe cumplir para asegurar una buena confiabilidad en el producto y esta prueba destructiva consiste en medir dicha fuerza.

Al ser prueba destructiva se ha dejado al final de la lista de pruebas en conjunto con la prueba de mojabilidad que también es destructiva, por lo que se recomienda que antes de proceder con ambas se aseguren de complementar el resto de las pruebas.

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Imprimir 3 sustratos y colocarles componentes en todas las variantes
- b. Someterlos a reflujo inmediatamente después de ser colocados los componentes.
- c. Someterlos al ciclo de limpieza recomendado de acuerdo al tipo de pasta. (Se pueden utilizar los mismos PCBs utilizados en la prueba de claridad del residuo)
- d. Realizar la prueba destructiva de medición de esfuerzos para ambos tipos de componentes.

Variables Respuesta y Metrología:

- a. Fuerza de adherencia (Equipo medidor de esfuerzos)

Criterio: Para ambos tipos de componentes el criterio está bien definido, debe ser igual o mayor a 1,000 gr/mm².

Muestra y Áreas designadas en el VP:

- Variante 1 para ambos tipos de componentes
- Variante 5 para ambos tipos de componentes

Muestra sugerida para componentes 0201: 40

Muestra sugerida para componentes 01005: 40

Sugerencia de Análisis: Se sugiere un muestreo representativo estadísticamente por el tiempo que toma realizar las mediciones. Se recomienda realizar el análisis por tipo de componente y comparar las diferentes pastas a través de un análisis de varianza.

4.4.1.11 Mojabilidad

Para que una unión se forme exitosamente es necesario que la soldadura moje adecuadamente las terminales que se desean unir durante el reflujo. Como ya se ha explicado previamente en el capítulo anterior, el fundente cumple con esta función tan importante. Al evaluar nuevas alternativas de soldadura en pasta es obligatorio conocer el grado de mojado que el fundente brindará a las condiciones específicas del proceso en el que se aplicará y si dicha mojabilidad es suficiente para generar uniones satisfactoriamente.

La prueba es una prueba destructiva, por dicha razón se recomienda dejarla al final una vez que el resto de las pruebas y mediciones se completaron.

Procedimiento: Seguir las siguientes indicaciones:

- a. Imprimir 3 sustratos y colocarles componentes en todas las variantes
- b. Someterlos a reflujo inmediatamente después de ser colocados los componentes.

- c. Someterlos al ciclo de limpieza recomendado de acuerdo al tipo de pasta. (Se pueden utilizar los mismos PCBs utilizados en la prueba de claridad del residuo)
- d. Medir diámetros de la soldadura aplicada en la variante 4
- e. Realizar análisis transversal para medir ángulos de contacto en Variante 4 de acuerdo al muestreo que se enlista en los siguientes puntos.
- f. Realizar análisis transversal para medir alturas de mojado en componentes 0201 y 01005 de acuerdo al muestreo que se enlista en los siguientes puntos.

Variables Respuesta y Metrología:

- a. Diámetro de soldadura (Equipo de Medición de dimensiones óptico)
- b. Angulo de mojado (Sección transversal)
- c. Porcentaje de altura de mojado en componente (Sección transversal)

Criterio: A mayor % de incremento en el diámetro (a) y mayor % de altura de mojado (c) mejor grado de mojado tendremos. En ambos casos no existe un criterio estándar definido sin embargo para (c) debe procurarse alturas mayores de una tercera parte de la altura de acuerdo a criterios específicos en Skyworks. Para (b) en el caso de ángulo de mojado negativo el resultado sería inaceptable (Figura 4.31).

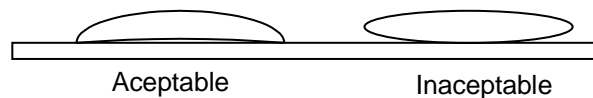


Figura 4.31.- Criterios de Mojabilidad

Muestra y Áreas designadas en el VP:

- Variante 4 para (a-b)
- Variante 1, 2, 3 y 5 para (c).

<i>Muestra sugerida para diámetro de soldadura</i>	40
<i>Muestra sugerida para ángulo de soldadura</i>	10
<i>Muestra sugerida para altura de soldadura por tipo de componente</i>	10

Sugerencia de Análisis: Se sugieren muestreos pequeños para todas las mediciones debido a la naturaleza de la prueba y el tiempo que toma realizar la preparación de un análisis transversal. Es por eso que antes de seleccionar la muestra se deberán seleccionar las piezas que sean representativas del sustrato inspeccionadas en un microscopio a magnificación 7X-30X. Se recomienda que los resultados de (a) se expresen en porcentaje de cambio respecto al diámetro de la impresión original y para (c) en % de altura de mojado.

Como nota adicional, esta prueba debe complementarse en especial para (c) con los valores de fuerza de adherencia del componente ya que es una medida de la fuerza que el IMC provee en dicha unión.

4.4.2 Distribución y dimensiones del diseño

4.4.2.1 PCB

El Vehículo de prueba diseñado tiene el número de parte de Skyworks: TW09-D655-001 y está conformado de diferentes variantes para las diferentes pruebas para las que fue diseñado. Las dimensiones generales y la distribución de las variantes se muestran en las figuras 4.32 (dimensiones X-Y en mm.) y 4.33 (corte transversal, eje Z en micrómetros).

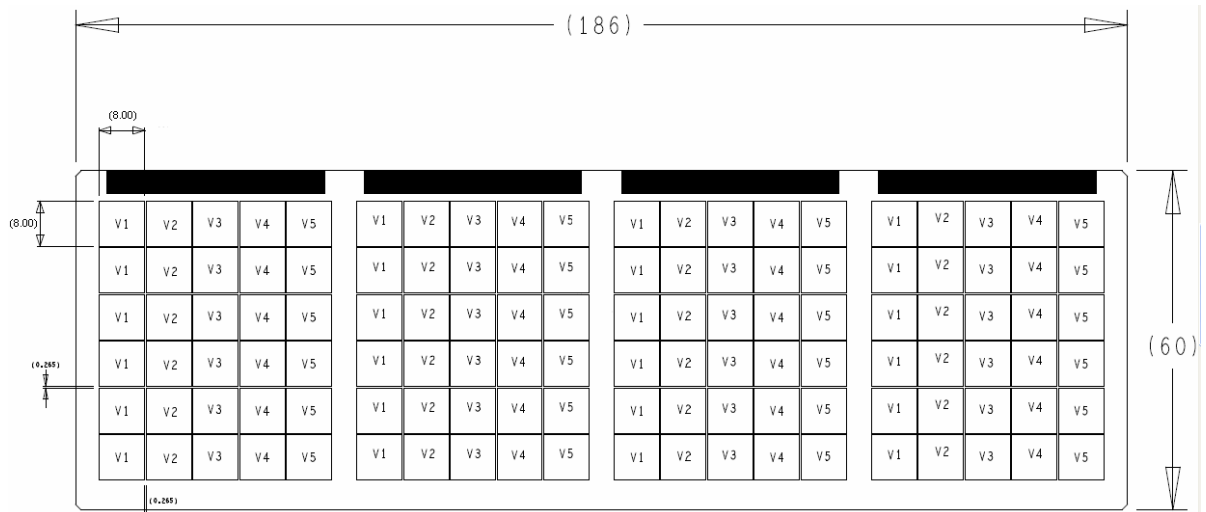


Figura 4.32.- Esquema general del PCB del vehículo de prueba

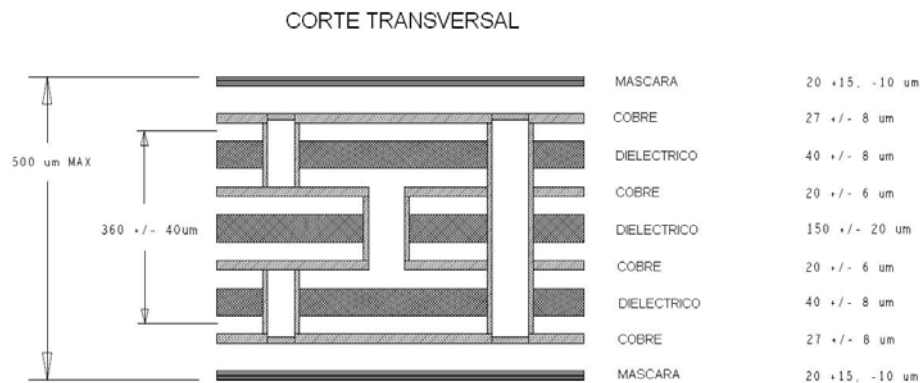


Figura 4.33.- Sección transversal del PCB del vehículo de prueba

- Dimensiones Generales PCB: 186 mm x 60 mm x 0.5 mm.
- Dimensiones de una unidad: 8 mm. X 8 mm.
- PCB de 4 capas internas de cobre.
- 5 Variantes distribuidas en 4 módulos para un total de 24 unidades por variante.
- Multiplicidad de unidades para verificar repetitibilidad a través del diseño.

4.4.2.2 Variante 1

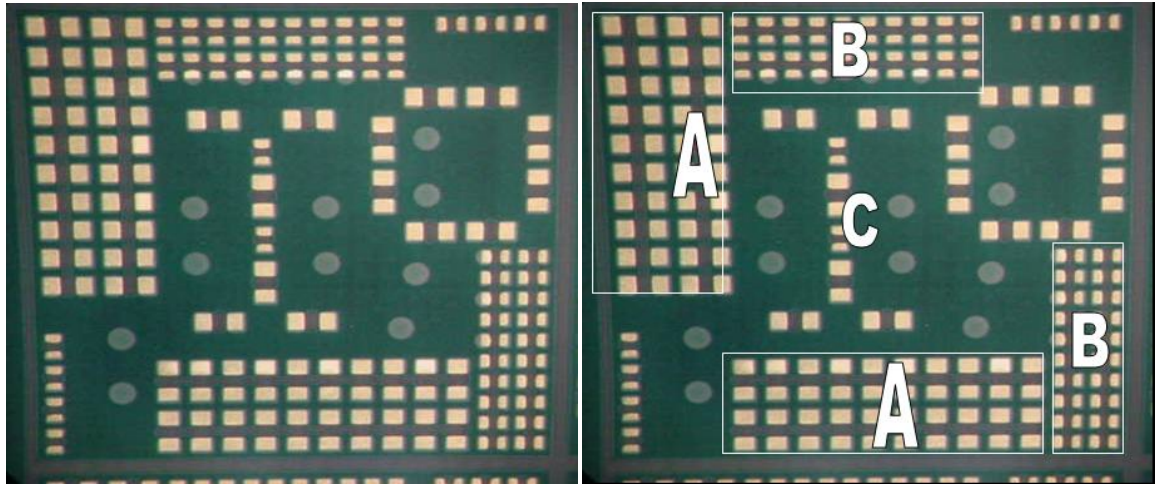


Figura 4.34.- Fotografía y agrupación de la Variante 1 del Vehículo de Prueba

Esta variante se divide en tres secciones como se ve en la figura 4.34

Pruebas realizables

- Sección A (componentes 0201) y Sección B (componentes 01005)
 1. Expansión de Pasta (variables a-c)
 2. Expansión de Pasta en caliente (variable a-c)
 3. Tiempo de vida
 4. Adherencia de los componentes
 5. Presencia de Burbujas
 6. Claridad del Residuo (variable b)
 7. Remoción de Residuos
 8. Nivel de Defectos
 9. Partículas de soldadura
 10. Mojabilidad (variable c)

- Sección C: (ambos tipos de componentes)

1. Fuerza de Aleación
2. Tiempo de vida
3. Adherencia de los componentes
4. Presencia de Burbujas
5. Claridad del Residuo (variable b)
6. Remoción de Residuos
7. Nivel de Defectos
8. Partículas de soldadura

Dimensiones

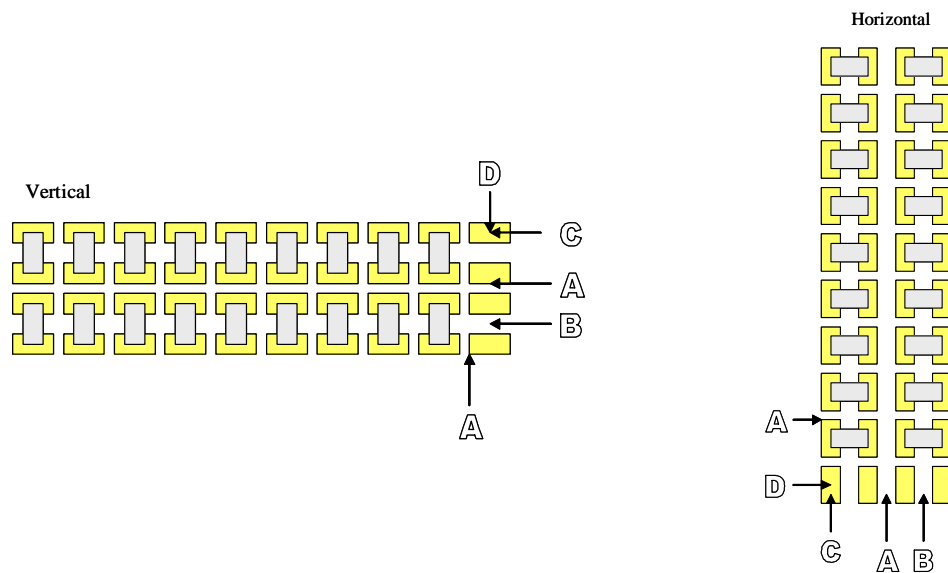


Figura 4.35.-Distribución de la Variante 1 del Vehículo de Prueba

Tabla 4.36.-Dimensiones de la distribución de la Variante 1

<i>Tipo de componente</i>		0201	01005
A	Distancia entre terminales	200	160
B	Abertura en la máscara	230	135
C	Ancho de la terminal expuesta (SMD)	250	143
D	Longitud de la terminal expuesta (SMD)	300	220

unidades en micrómetros

Cantidades

Tabla 4.37.-Cantidad de componentes por sección de la Variante 1

	Total de componentes por unidad		Total de componentes por PCB	
	0201	01005	0201	01005
Sección A	40	0	960	0
Sección B	0	40	0	960
Sección C	14	9	336	216
Total Variante 1	54	49	1,296	1,176

4.4.2.3 Variante 2

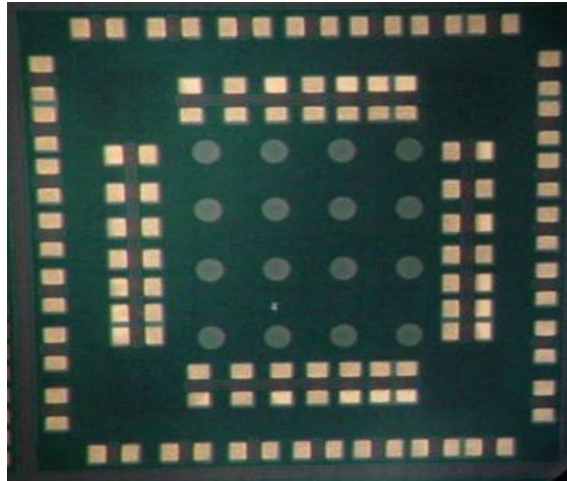


Figura 4.38.- Fotografía y agrupación de la Variante 2 del Vehículo de Prueba

Pruebas realizables (Solo componentes 0201)

1. Expansión de Pasta (variable d)
2. Expansión de Pasta en caliente (variable d)
3. Presencia de Burbujas
4. Claridad del Residuo (variable b)
5. Remoción de Residuos
6. Nivel de Defectos
7. Partículas de Soldadura
8. Mojabilidad (variable c)

Dimensiones

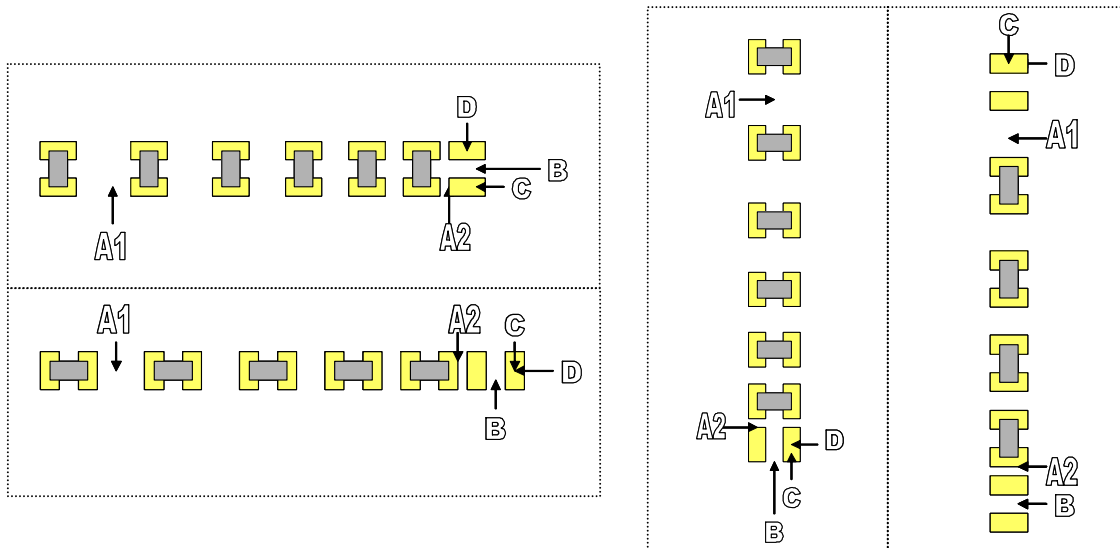


Figura 4.39.-Distribución de la Variante 2 del Vehículo de Prueba

Tabla 4.40.-Dimensiones de la distribución de la Variante 2

		0201
A1	Separación Máxima entre componentes	350
A2	Separación Mínima entre componentes	100
Delta	Incremento entre separaciones	50
B	Abertura de la Máscara	230
C	Ancho de la terminal expuesta (SMD)	250
D	Longitud de la terminal expuesta (SMD)	300

unidades en micrómetros

Cantidades

Tabla 4.41.-Cantidad de componentes por sección de la Variante 2

	por unidad	por PCB
Total de componentes 0201	56	1,344
Total de renglones para prueba de espaciamento:	8	192

4.4.2.4 Variante 3

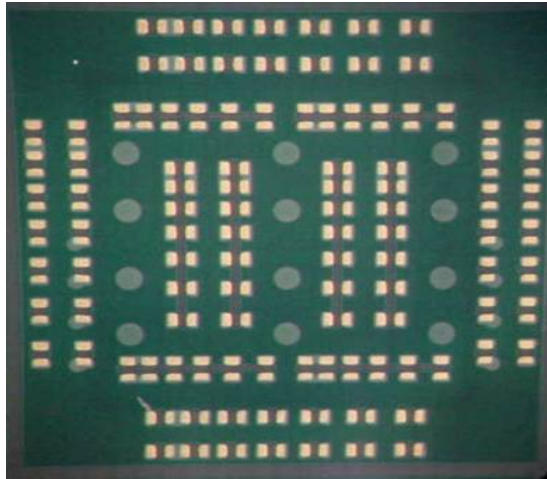


Figura 4.42.- Fotografía y agrupación de la Variante 3 del Vehículo de Prueba

Pruebas realizables (Solo componentes 01005)

1. Expansión de Pasta (variable d)
2. Expansión de Pasta en caliente (variable d)
3. Presencia de Burbujas
4. Claridad del Residuo (variable b)
5. Remoción de Residuos
6. Nivel de Defectos
7. Partículas de Soldadura
8. Mojabilidad (variable c)

Dimensiones

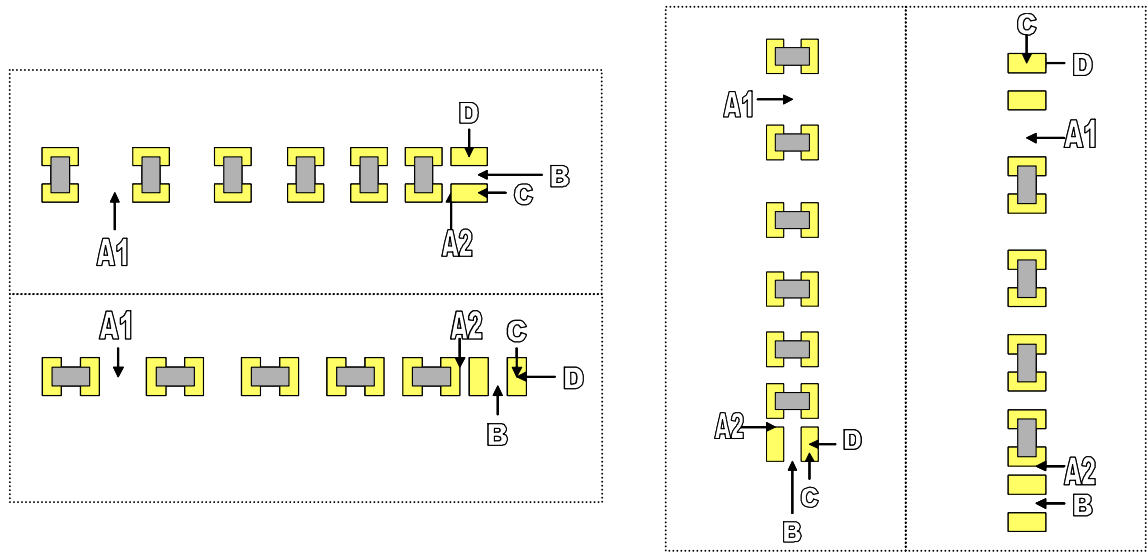


Figura 4.43.-Distribución de la Variante 3 del Vehículo de Prueba

Tabla 4.44.-Dimensiones de la distribución de la Variante 3

		01005
A1	Separación Máxima entre componentes	350
A2	Separación Mínima entre componentes	100
Delta	Incremento entre separaciones	50
B	Abertura de la Máscara	135
C	Ancho de la terminal expuesta (SMD)	143
D	Longitud de la terminal expuesta (SMD)	220

unidades en micrómetros

Cantidades

Tabla 4.45.-Cantidad de componentes por sección de la Variante 3

	por unidad	por PCB
Total de componentes 01005	108	2,592
Total de renglones para prueba de espaciamiento:	16	384

4.4.2.5 Variante 4

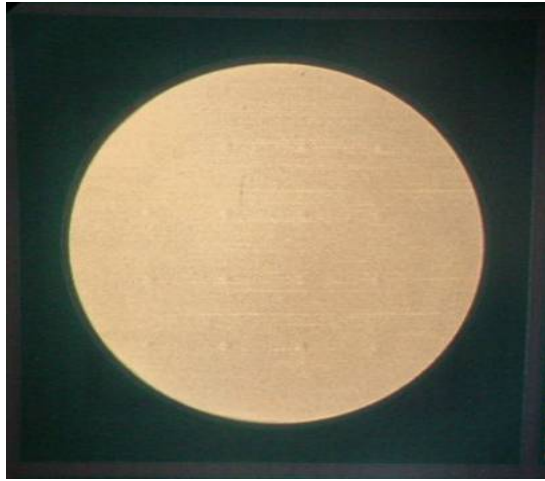


Figura 4.46.- Fotografía de la Variante 4 del Vehículo de Prueba

Pruebas realizables

1. Claridad del Residuo (variable a)
2. Mojabilidad (variables a-b)

Dimensiones

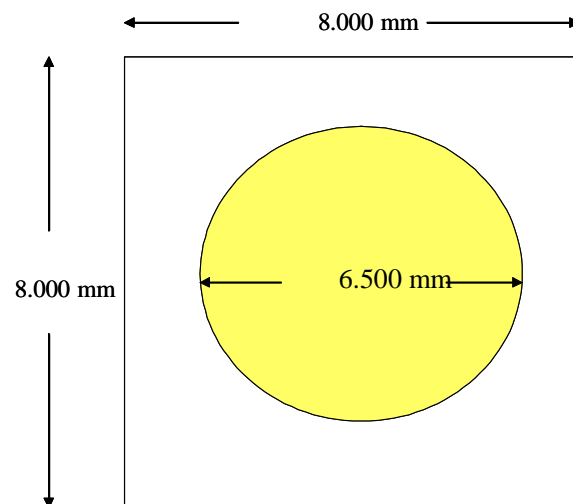


Figura 4.47.- Dimensiones de la Variante 4 del Vehículo de Prueba

Se recomienda una impresión de pasta de 4.5 mm de diámetro en el centro de la terminal.

Cantidades

Muestra total por PCB: 24 unidades

4.4.2.6 Variante 5

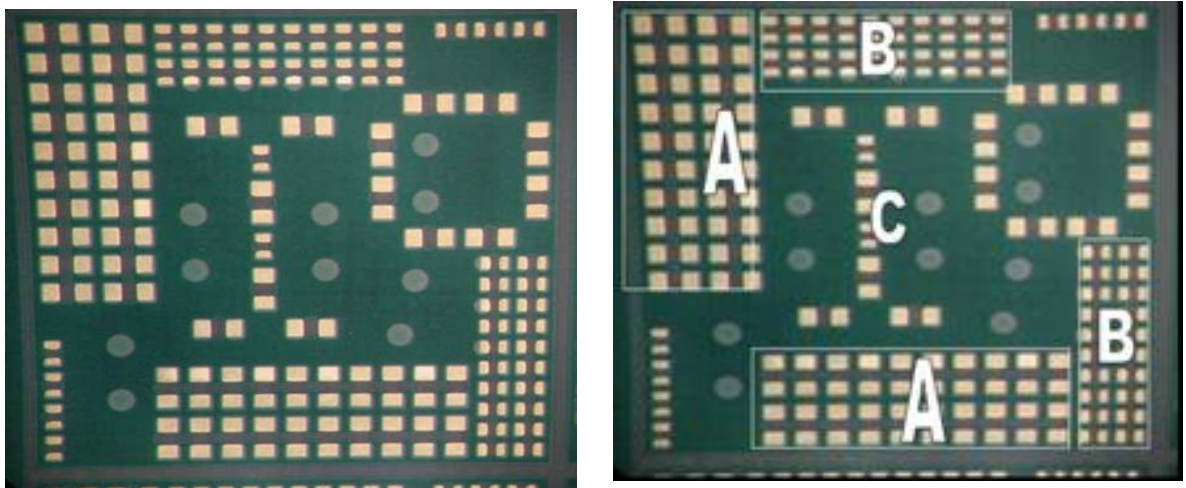


Figura 4.48.- Fotografía y agrupación de la Variante 5 del Vehículo de Prueba

Esta variante se divide en tres secciones como se ve en la figura 4.48

Pruebas realizables

- Sección A (componentes 0201) y Sección B (componentes 01005)
 1. Expansión de Pasta (variables a-c)
 2. Expansión de Pasta en caliente (variables a-c)
 3. Tiempo de vida
 4. Adherencia de los componentes

5. Presencia de Burbujas
6. Claridad del Residuo (variable b)
7. Remoción de Residuos
8. Nivel de Defectos
9. Partículas de soldadura
10. Mojabilidad (variable c)

- Sección C: (ambos tipos de componentes)

1. Fuerza de Aleación
2. Tiempo de vida
3. Adherencia de los componentes
4. Presencia de Burbujas
5. Claridad del Residuo (variable b)
6. Remoción de Residuos
7. Nivel de Defectos
8. Partículas de soldadura

Dimensiones

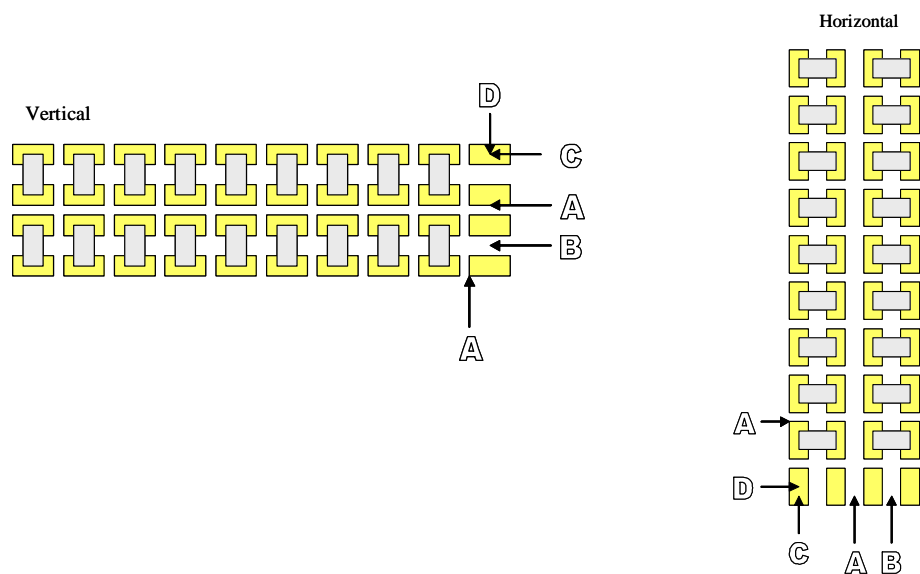


Figura 4.49.-Distribución de la Variante 5 del Vehículo de Prueba

Tabla 4.50.-Dimensiones de la distribución de la Variante 5

		<i>Tipo de componente</i>	
		0201	01005
A	Distancia entre terminales	200	170
B	Abertura en la máscara	230	135
C	Ancho de la terminal expuesta (SMD)	250	143
D	Longitud de la terminal expuesta (SMD)	300	220

unidades en micrómetros

Cantidades

Tabla 4.51.-Cantidad de componentes por sección de la Variante 5

	Total de componentes por unidad		Total de componentes por PCB	
	0201	01005	0201	01005
Sección A	40	0	960	0
Sección B	0	38	0	912
Sección C	14	9	336	216
Total Variante 5	54	47	1,296	1,128

4.4.3 Propuesta de Fundentes a Evaluar

Flux	Clasificación R	Clasificación ANSI	Solubilidad	% -X	Proveedor
F1	RMA	ROL1	Solvente Orgánico	0.05 +- 0.03 %	A
F2	RMA	ROL0	Solvente Orgánico	0.01%	A
F3	RA	REL1	Solvente Orgánico	0.15%	B
F4	RMA	ROL1	Solvente Orgánico	<0.5%	C
F5	RA	ORM1	Agua	<2.0%	D
F6	RA	ORH0	Agua	0%	E
F7	RA	*	Agua	*	A
F8	RA	*	Agua	*	C

Una vez seleccionada la mejor propuesta de fundente de acuerdo a los criterios definidos y sugeridos en este estudio, se recomienda complementarlo con pruebas de funcionalidad (prueba eléctrica) después de su sometimiento a condiciones de confiabilidad.

CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

1. El fundente de la pasta actual es eficaz en superficies de cobre aún en atmósferas de aire al remover los óxidos satisfactoriamente y presentar buena mojabilidad.
2. Procesar materiales sin tablilla podría traer beneficios durante el soldado ya que se observó una mejoría en la mojabilidad. Se encontró que el medio de transferencia de calor afecta directamente algunas de las variables respuesta del proceso de SMT.
3. Los niveles de oxidación observados al procesar materiales de Skyworks a un reflujado de SMT en aire no presentaron efectos degradantes en los procesos de ensamble posteriores a esta operación. Esto se reflejó en los resultados satisfactorios de las variables respuesta de cada proceso y se comprobó con un análisis de microscopía acústica en donde no se encontraron rastros de delaminación en las interfaces óxido-plástico después de pruebas de confiabilidad típicos en Skyworks.
4. El fundente actual presenta problemas con el grado de mojado cuando se procesa material con tablilla en aire. Aunque el nivel de defectos fue satisfactorio y los intermetálicos arrojaron valores de esfuerzos adecuados.
5. Se recomienda un estudio adicional que busque optimizar el perfil térmico actual para las condiciones de transporte sin tablilla verificando que al realizar los cambios térmicos no se degraden las variables respuestas normales de SMT.
6. Se recomienda un estudio adicional para mejorar el grado de mojado al considerar la evaluación de nuevos fundentes utilizando el vehículo de prueba diseñado en el presente estudio.

REFERENCIAS

- [1]. Anders Åström, "The Effect of Nitrogen Reflow Soldering in a Lead-Free Process", Proceedings of the SMTA International '03, USA (2003)
- [2]. H. Hsiao, "Reducing Solder Defects Under Nitrogen With Varying Oxygen Concentrations", Proceedings of the SMTA International '97, USA (1997)
- [3]. Ning-Cheng Lee, "Optimizing Reflow Profile Via Defect Mechanism Analysis", Proceedings of the SMTA International '98, USA (1998)
- [4]. Fredrik Mattsson et al., "PCB Design and Assembly Process Study of 01005 Size Passive Components Using Lead-free solder". Proceedings of the SMTA International '04, USA (2004)
- [5]. Paul P.E. Wang, Ph.D. et al., "Lead-free process and product transition. Phase II. Paste Characteristic Study by Response Assessment and Printing Optimization by Taguchi Method", Proceedings of the SMTA International '04, USA (2004)
- [6]. Mei Wang et al., "Assembly Process Qualification On 0201 Packages For Volume Manufacturing", Proceedings of the SMTA International '02, USA (2002)
- [7]. S. Bukhari, D.L. Santos, L.P. Lehman and E. Cotts, USA (2004). "Evaluation Of The Effects Of Processing Conditions On Shear Strength And Microstructure In Pb-Free Surface Mount Assembly", *Journal of SMT*, Vol. 17-2, 42-47.
- [8]. Andrew Butterfield, "Lead Free Solder Flux Vehicle Selection Process", Proceedings of the SMTA International '00, USA (2000)
- [9]. Ronald C. Lasky, Ph.D., PE et al., "Leaded And Lead-Free Solder Paste Evaluation Screening Procedure", Proceedings of the SMTA International '03, USA (2003)
- [10]. Michael Havener, Robert Farrell. "Lead-Free Solder Paste Evaluation", Proceedings of the SMTA International '04, USA (2004)
- [11]. Timothy Jensen, "Solder Paste Evaluation Techniques To Simplify The Transition To Pb-Free", Proceedings of the SMTA International '04, USA (2004)
- [12]. Ning-Cheng Lee, "Flux Technology For Lead-Free Alloys & Its Impact On Cleaning", Proceedings of the Advanced Packaging Technology '01, USA (2001)
- [13]. Benlih Huang, Ph.D. and Ning-Cheng Lee, Ph.D., "Effect Of Lead-Free Alloy Composition On Tombstoning", Proceedings of the SMTA International '04, USA (2004)

- [14]. Chris Bastecki, Steve Breed. (1997). *What do time, temperatura, humidity and production pauses have in common?*. http://www.cooksonsemi.com/tech_art/pdfs/Time%20Humidity%20%20Pauses.pdf, (12 abril. 2005)
- [15]. Phil Zarrow. (2004). *Evaluating Solder Paste – Not An Option*. http://www.smtinfocus.com/technical_papers_list.html, (21 marzo. 2005)
- [16]. Phil Zarrow. (1998). *Solder paste Performance Testing*. http://www.smtinfocus.com/technical_papers_list.html, (21 marzo. 2005)
- [17]. Brian Sloth Bentzen. (2000). *Nitrogen in reflow*. http://www.smtinfocus.com/technical_papers_list.html, (8 diciembre. 2005)
- [18]. JEDEC. (Agosto, 2003) *Preconditioning Of Plastic Surface Mount Devices Prior To Reliability Testing* (JESD22-A113).
- [19]. IPC/JEDEC. (Julio, 2004) *Joint Ipc/Jedec Standard For Moisture/Reflow Sensitivity Classification For Nonhermetic Solid State Surface-Mount Devices* (IPC/JEDEC J-STD-020).
- [20]. Phil Zarrow. (2002, Enero). *SMT Solder Paste Evaluation and Qualification*. APEX Professional Development Course, San Diego, CA.
- [21]. Paul T. Vianco.(2004, Octubre). *An Introduction into the Materials Engineering Aspects of Pb-Free Solder Electronic Interconnections*. SMTA Chapter tutorial, Irvine, CA.
- [22]. Siemens Dematic (2004). *SMT Process. Training Course*, Mexicali, México.
- [23]. Siemens Dematic (2002). *Surface Mount Technology, Basics. Training Course*, Mexicali, México.
- [24]. C. Lea. (1988). *A Scientific Guide to Surface Mount Technology*. USA: Electrochemical Publications Limited.
- [25]. Ning-Cheng Lee. (2002). *Reflow Soldering Processes and Troubleshooting SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies*. USA: Newnes
- [26]. *ASM Handbook*. (Vols 2,3,6,8,9,11 y 13) (2001). [DVD ROM] . USA: ASM International.
- [27]. Thomas W. Lee, Dr. Seshu V. Pabbisetty. (Ed.) (2004). *Microelectronic Failure Analysis* (5a Ed.). USA: ASM International.
- [28]. Mars. G. Fontana. (1987). *Corrosion Engineering*. (3ra Ed.). USA: McGraw-Hill.
- [29]. John H. Lau, C.P. Wong, Ning-Cheng Lee, S.W. Ricky Lee. (2003). *Electronics Manufacturing: With Lead Free, Halogen Free and Conductive-Adhesive Materials*. USA: McGraw-Hill.

- [30]. Howard Manko (2001). *Solders and Soldering* (4ta. Ed.). USA: McGraw-Hill.
- [31]. Karl J Puttliz, Kathleen A. Stalter. (Ed.). (2004). *Handbook of Leadfree Solder Technology for Microelectronic Assemblies*. USA: Marcel Dekker, Inc.
- [32]. M.Theriault & P. Blostein (2000) *Nitrogen and Soldering: Reviewing the issue of interting*. Surface Mounting Technology Magazine (June 2000) pp. 52-58
- [33]. Shipley, J.F. Influence of flux, substrate and solder composition on solder wetting. *Weld. J. Res. Suppl.* 1975, 54 (10), 357S-362S.
- [34]. Sprokel, G.J. The use of radioisotopes to determine the chemistry of solder flux. *IBM J.* July 1961, 218-225.
- [35]. Frear, D.R.; Burchett, S.N.; Morgan, H.S.; Lau, J.H. *The Mechanics of Solder Alloy Interconnects*; Van Nostrand Reinhold: New York, 1994.
- [36]. Yost, F.G.; Hosking, F.M.; Frear, D.R. *The Mechanics of Solder Alloy Wetting and Spreading*; Van Nostrand Reinhold: New York, 1993.
- [37]. Lau, J.H. *Flip Chip Technologies*; McGraw Hill: New York, 1996.
- [38]. Kim, H.K.; Tu, K.N. Kinetic analysis of the soldering reaction between eutectic SnPb alloy and Cu accompanied by ripening. *Phys. Rev. B* 1996. 53, 16027.
- [39]. Ahmed Sharif. Y.C. Chan, USA (2005). "Interfacial reactions of Sn-3.5% Ag and Sn-3.5% Ag-0.5%Cu solder with electroless Ni/Au metallization during multiple reflow cycles", *Journal of Material Science*, Vol. 16, 153-158.
- [40]. Mei, Z.; Kaufmann, M.; Eslambolchi, A.; Johnson, P. Brittle interfacial fracture of PBGA packages soldered on electroless nickel/immersion gold. *Proceedings 48th Electronic Components and Technology Conference*, 1998; 952-961.
- [41]. Zribi, A.; Chromik, R.R.; Presthus, R.; Teed, K.; Zavalij, L.; DeVita, J.; Tova, J.; Cotts, E.J.; Clum, J.; Erich, R.; Primavera, A.; Westby, G.; Coyle, R.J.; Wenger, G.M. Solder metallization interdiffusion in microelectronic interconnects. *IEEE CPMT* 2000, 23, 383.
- [42]. Snyder, R.W. Diffuse reflectance FT-IR analysis of rosin flux-metal oxide interactions. *Appl. Spectrosc.* 1987, 14(3), 460-463.
- [43]. Rocha Andrade de Silva, Jose. England (2003). "Tropicorr Project – Effects of Tropical Environments on Electro-Electronic Products.", *Corrosion Reviews*, Vol.21, Nos. 5-6, 379.

- [44]. A.V. Echavarria, F.E. Echeverria, C.Arroyave, E. Cano, J.M. Bastidas. England (2003). "Carboxilic Acids in the atmosphere and their effect on the degradation of metals". *Corrosion Reviews*, Vol.21, Nos. 5-6, 395.
- [45]. A. Douthit, David. England (2003). "Electronics and Corrosion". *Corrosion Reviews*, Vol.21, Nos. 5-6, 415.
- [46]. IPC/JEDEC. (Enero, 2004) *Requirements for Soldering Fluxes* (IPC/JEDEC J-STD-004).
- [47]. IPC/JEDEC. (Febrero, 2005) *Requirements For Soldered Electrical And Electronic Assemblies* (IPC/JEDEC J-STD-001).
- [48]. IPC/JEDEC. (Junio, 1996) *Requirements for Soldering Pastes* (IPC/JEDEC J-STD-005).

ABREVIATURAS Y TECNICISMOS

Abb.	Inglés	Español
▪ ANSI	<i>American National Standards Institute</i>	Instituto Americano de Estándares Nacionales
▪ BGA	<i>Ball grid Array</i>	Tecnología de empaquetado de electrónicos
▪ Bluetooth	*	Tecnología de transferencia inalámbrica de datos
▪ Brazing	*	Soldado a alta temperatura
▪ CFC	*	Compuestos Fluoro-Carbonados
▪ CI	*	Circuito Integrado
▪ Creep Resistance	*	Resistencia a la deformación
▪ CSAM	<i>C Scan Acoustic Microscopy</i>	Microscopía Acústica de Barrido
▪ Flip chip	*	Tecnología de empaquetado de electrónicos
▪ FR-4	*	Material plástico que cubre al PCB
▪ GPS	<i>Global Position Satellite</i>	Posicionamiento global por satélite
▪ IPC	<i>Interconnecting and Packaging Electronic Circuits</i>	Empaquetamiento e interconexión de Circuitos Electrónicos
▪ Leads	*	Terminales de componentes
▪ LTPD	<i>Lot Tolerance Percent Defective</i>	Porcentaje de defectos tolerados
▪ LCCC	<i>Leadless Ceramic Chip Carrier</i>	Componente sin terminales externas
▪ MPEG	*	Extensión de formato de video
▪ MSL	<i>Moisture Sensitivity Level</i>	Niveles de Sensibilidad a la Humedad
▪ Pads	*	Terminales en los sustratos
▪ PCB	<i>Printed Circuit Board</i>	Tarjeta electrónica o sustrato.
▪ PTH	<i>Aspin Through hole</i>	Microvía
▪ RF	<i>Radio Frequency</i>	Radio Frecuencia
▪ RoHs	<i>Restrictions on the Use of Hazardous Substances</i>	Restricciones en el uso de sustancias riesgosas
▪ SIR	<i>Surface Insulation Resistivity</i>	Resistencia al Aislamiento superficial
▪ SMT	<i>Surface Mount Technology</i>	Tecnología de Montaje Superficial
▪ THT	<i>Through hole technology</i>	Tecnología por Inserción
▪ Tin Pest	*	Defecto observado sobre Sn

<u>Abb.</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>
▪ WEEE	<i>Waste from Electrical and Electronic Equipment</i>	Desperdicio de Equipo Eléctrico y Electrónico

ANEXOS

1. Especificaciones técnicas de la soldadura actual

A) Composición de la Aleación

Elemento	Especificación
Sb	5 +- 0.5%
Sn	Balance
Cu	Menor 0.05%
Bi	Menor 0.05%
Zn	Menor 0.003%
Fe	Menor 0.03%
Al	Menor 0.005%
As	Menor 0.03%
Cd	Menor 0.005%
Pb	Menor 0.10%

B) Características Fisicoquímicas

Aleación	
Temp. Fusión Soldadura (línea Líquido)	240 +- 5°C
Temp. Fusión Soldadura (línea Sólido)	235 +- 2°C
Forma y Diámetro de las esferas	Esféricas (22-45µ-m)
Fundente	
Tipo de Fundente	RMA (Libre de Limpieza)
Contenido de Halógeno	0.05 +- 0.03 %
pH	5.0
Temp. Fusión Solvente del Fundente	260°C
Gravedad Específica	4.4
Flash point del solvente	151°C
Soldadura en Pasta	
Viscosidad (Malcolm)	1700P _± 400P
Contenido de Fundente	11.0%+- 0.5%

C) Principales componentes del Fundente

Rosina
N-N'-difenil-guanidina
Acido Bromhídrico
Aceite de Castor Hidrogenado
2-Etil-1,3-Hexenediol
Dietilen glycol mono hexileter

D) Pruebas y Especificaciones

Prueba	Especificación	Método de prueba
Plato de Cobre	Aprobado (No Corrosion)	JIS Z 3197
Prueba de Cobre	Aprobado	JIS Z3197 6.6.2.
Prueba del Cromato de Plata	Aprobado	QQ-S-571E
Prueba del Fluoruro	Aprobado	QQ-S-571E
Expansión de la pasta (calentando)	0.5mm(ref.)	JIS Z3284
Calidad de Impresión	Buena	JIS Z3284
Adherencia	110gf	JIS Z3284
Tiempo de Adherencia	Hasta 8hrs	JIS Z3284
Prueba del Reflujo	Aprobado	SMT-34-1
Adherencia del Residuo	Aprobado	JIS Z3284
Esferas de Soldadura	Aprobado (Categoría 3)	JIS Z3284
Efecto Mojado	Aprobado (Categoría 3)	JIS Z3284
Desparramamiento	Aprobado (85%)	JIS Z3197
SIR Condición Normal Después de cámara humedad	1 x 10 ¹³ 1.0 x 10 ¹²	JIS Z 3197 STM-30-1
SIR Condición Normal Después de 168hr 1.) Temp. ambiente 2.) Medida en cámara humedad	1 x 10 ¹³ 1.0 x 10 ¹² 1.0 x 10 ⁹	IPC-SF-818 85°C/85%RH Voltage aplicado: DC 50V en la cámara de humedad DC 100V
SIR Condición Normal En cámara de Humedad Inicial Después de 24 hr Después de 96 hr Después de 168 hr Después de 336 hr	1.0 x 10 ¹³ 8.0 x 10 ¹² 7.0 x 10 ¹² 8.0 x 10 ¹² 1.0 x 10 ¹³ 1.0 x 10 ¹³	Bell core TR-NWT-000078 35°C,90%RH, aplicando DC 50V DC 100V

2. Perfil Térmico de Reflujo Actual en SMT

