# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**
**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA.**

# Caracterización del fenómeno de extrusión de soldadura en superficies no metálicas, de componentes pasivos en dispositivos módulo multichip, usando compuestos de moldeo con base en resinas epóxicas.

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA**

*M.I. CÉSAR EMANUEL MONTAÑO GODÍNEZ*

## DIRECTOR DE TESIS:

*DR. NICOLA RADNEV NEDEV*

## CO-DIRECTOR DE TESIS:

*DR. BENJAMÍN VALDEZ SALAS*

**MEXICALI, B. C.** **DICIEMBRE 2017**

**Agradecimientos**

**A Dios**
**A Rosario y Francisco, mis padres**
**A Oscar y Alejandro, mis hermanos**
**A Mónica**

## Contenido

## Agradecimientos


| | Página |
|---|---|
| **Capítulo 1: Introducción** | **1** |
| **Capítulo 2: Hipótesis** | **2** |
| 2.1 Definición del problema | **2** |
| 2.2 Hipótesis | **2** |
| 2.3 Objetivo general | **3** |
| 2.4 Objetivos específicos | **3** |
| 2.5 Delimitación | **4** |
| 2.6 Antecedentes | **4** |
| **Capítulo 3: Marco Teórico** | **6** |
| 3.1 Diagramas de fases en equilibrio | **6** |
| 3.1.1 Diagrama de fases para materiales puros | **6** |
| 3.1.2 Diagrama de fases para mezclas binarias | **6** |
| 3.1.3 Construcción de los diagramas de fases en equilibrio | **7** |
| 3.1.3.1 Análisis térmico diferencial | **8** |
| 3.1.3.2 Líneas de “liquidus” | **8** |
| 3.1.3.3 Líneas de “solidus” | **8** |
| 3.1.4 Reacciones de tres fases | **9** |
| 3.1.5 Sistemas eutécticos | **10** |
| 3.1.6 Uso de los diagramas de fase para la selección de soldadura | **11** |
| 3.1.7 Diagrama de fase para la aleación estaño y antimonio (SnSb) | **11** |
| 3.2 Estructuras cristalinas | **12** |
| 3.2.1 Celda unitaria, sistemas cristalinos y redes puntuales o espaciales | **12** |
| 3.2.2 Estructuras metálicas comunes | **14** |
| 3.2.2.1 Estructura cúbica centrada en el cuerpo (CCC) | **14** |

3.2.2.2 Estructura cúbica centrada en las caras (CC) **14**
3.2.2.3 Estructura tetragonal centrada en cuerpo **15**
3.2.2.4 Estructura hexagonal compacta (HC) **15**
3.2.3 Intersticios **16**
3.2.4 Estructura del estaño (Sn) **17**
3.2.5 Estructura del antimonio (Sb) **18**
3.3 Módulos Multi-Chip (MCM) **19**
3.3.1 Funcionalidad de los dispositivos MCM **20**
3.3.2 Ventajas de los MCM **20**
3.3.3 Confiabilidad **22**
3.3.4 Proceso de ensamble de un MCM **23**
3.4 Tecnología de montaje superficial (SMT) **23**
3.4.1 Procesos de ensamble de montaje superficial **24**
3.4.1.1 Componentes de montaje superficial **24**
3.4.2 Aplicación de la pasta de soldadura **25**
3.4.2.1 Composición de la pasta de soldadura **26**
3.4.2.1.1 Partículas de soldadura **26**
3.4.2.1.2 Resinas **27**
3.4.2.1.3 Activadores **28**
3.4.2.1.4 Solventes **28**
3.4.2.1.5 Agentes tixotrópicos **29**
3.4.2.2 Pastas No-Lavables **29**
3.4.3 Refusión **29**
3.4.3.1 Teoría de soldadura **31**
3.4.3.1.1 Esparcimiento **32**
3.4.3.1.2 Flujo del fluido **33**
3.4.3.1.3 Disolución del metal base **34**
3.4.3.1.4 Intermetálicos **35**
3.5 Encapsulación **36**
3.5.1 Protección química **36**
3.5.1.1 Protección contra la humedad **37**
3.5.1.2 Protección contra sales **38**
3.5.1.3 Protección contra organismos biológicos **38**
3.5.1.4 Protección de contaminantes atmosféricos **39**

3.5.2 Protección mecánica **39**
3.5.3 Procesos de encapsulación **39**
3.5.3.1 Moldeo por transferencia **40**
3.5.3.2 Moldeo por compresión **41**
3.5.4 Requerimiento de encapsulación **42**
3.5.4.1 Mecánicos **42**
3.5.4.1.1 Propiedades mecánicas **42**
3.5.4.1.1.1 Consideraciones termo-mecánicas **43**
3.5.4.1.1.2 Estrés residual **43**
3.5.4.1.2 Propiedades térmicas **44**
3.5.4.1.2.1 Coeficiente de expansión térmica (CTE) **44**
3.5.4.1.2.2 Temperatura de transición vítrea ($T_g$) **44**
3.5.4.1.2.3 Flujo durante la encapsulación **45**
3.5.4.1.3 Propiedades físicas **46**
3.5.4.1.3.1 Adhesión **46**
3.5.4.1.3.2 Interfaces **46**
3.5.5 Materiales encapsulantes **47**
3.5.5.1 Epóxicos y materiales relacionados **47**
3.5.5.1.1 Anhídridos-Epóxicos **47**
3.5.5.1.2 Amina-Epoxi **48**
3.5.5.1.3 Fenólico-Epoxi **48**
3.5.5.2 Uretanos **49**
3.5.5.3 Silicones **49**
3.6 Mecanismos de difusión de humedad, abultamiento higroscópico y degradación de adhesión en compuestos epóxicos de moldeo. **50**
3.6.1 Difusión de humedad en un paquete Vs volumen del compuesto de moldeo **50**
3.6.1.1 Difusión de humedad interfacial **50**
3.6.1.1.1 Acomodo de la humedad en las interfaces **51**
3.6.1.2 Difusión de humedad en microcircuitos encapsulados **51**
3.6.2 Desorción de humedad **52**
3.6.3 Abultamiento higroscópico **53**

Capítulo 4: Experimentación y análisis de resultados **55**

4.1 Materiales y métodos **55**
4.1.1 Equipo requerido **55**
4.1.1.1 Cámara de humedad y temperatura (remojo) **55**
4.1.1.2 Horno de refusión **56**
4.1.1.3 Microscopio óptico **56**
4.1.1.4 Equipo de prueba eléctrica **57**
4.1.1.5 Horno **57**
4.1.2 Método: Pre-acondicionamiento **58**
4.1.2.1 Procedimiento **58**
4.2 Mecanismos de falla para la ocurrencia de extrusión de soldadura **58**
4.2.1 Análisis de causas potenciales **58**
4.3 Experimento 1: Residuos de fundente y condición de limpieza **59**
4.3.1 Diseño del experimento 1 **59**
4.3.2 Vehículo de pruebas **61**
4.3.3 Matriz experimental **62**
4.3.4 Respuestas de interés **63**
4.3.5 Flujo de ensamble y prueba **64**
4.3.6 Análisis de respuestas de interés y resultados **64**
4.3.6.1 Volumen de pasta depositada **64**
4.3.6.2 Vacíos en las uniones de soldadura **65**
4.3.6.3 Residuos visibles del fundente de soldadura **66**
4.3.6.4 Inspección por delaminación **67**
4.3.6.5 Resultados de prueba eléctrica, pos pre-acondicionamiento MSL3 **67**
4.3.6.6 Análisis de fallas **68**
4.3.6.7 Réplica del experimento **70**
4.3.7 Resultados del experimento 1 **71**
4.4 Experimento 2: Tiempo de exposición antes de moldeo, horneado y plasma **71**
4.4.1 Diseño del experimento 2 **71**
4.4.2 Vehículo de pruebas **72**
4.4.3 Matriz experimental **72**
4.4.4 Respuestas de interés **73**
4.4.5 Flujo de ensamble y prueba **73**

4.4.6 Análisis de respuestas de interés y resultados **74**
4.4.6.1 Delaminación **74**
4.4.6.2 Prueba eléctrica post-preacondicionamiento MSL3 **76**
4.4.7 Resultados del experimento 2 **77**
4.5 Experimento 3: La humedad y estrés termo-mecánico **77**
4.5.1 Diseño del experimento 3 **78**
4.5.2 Vehículo de pruebas **78**
4.5.3 Respuestas de interés **79**
4.5.3.1 Resultados de prueba eléctrica ($T_f$) **79**
4.5.3.2 Análisis de fallas **80**
4.5.4 Resultados del experimento 3 **80**
4.6 Experimento 4: Volumen de soldadura, diseño del PCB y espesor del encapsulante. **81**
4.6.1 Diseño del experimento 4 **81**
4.6.2 Vehículo de pruebas **82**
4.6.3 Matriz experimental **82**
4.6.4 Respuestas de interés **83**
4.6.5 Flujo de ensamble y prueba **83**
4.6.6 Análisis de respuestas de interés y resultados **84**
4.6.6.1 Prueba eléctrica antes de preacondicionamiento ($t_0$) **84**
4.6.6.2 Análisis de fallas antes de preacondicionamiento ($t_0$) **85**
4.6.6.3 Prueba eléctrica posterior al pre-acondicionamiento MSL2A/3 ($t_f$). **85**
4.6.6.4 Análisis de fallas **86**
4.6.7 Resultados del experimento 4 **87**

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones **88**
5.1 Trabajo futuro **89**

Bibliografía **90**

## Capitulo I. Introducción

El diseño y manufactura de dispositivos electrónicos confiables solo puede lograrse a través del entendimiento profundo de las propiedades de los materiales empleados en su fabricación. De igual forma, debe existir una comprensión amplia de las condiciones a las que dichos dispositivos se verán sometidos durante su uso para la fabricación de otros sistemas complejos e incluso durante el transcurso de su vida útil como parte de dichos sistemas.

El tema que aborda el presente trabajo de investigación intenta dar luz a las causas que dan origen a un fenómeno de extrusión de soldadura que ha sido observado en dispositivos módulo multichip (Multi-Chip Module Devices o MCM por sus siglas en ingles), en proporción de unas cuantas centenas de unidades por cada millón producidas. Históricamente, estas unidades afectadas son encontradas por el usuario durante la etapa de prueba de los sistemas donde son implementados estos dispositivos. Esta situación nos habla de una condición que afecta la confiabilidad del dispositivo MCM y, por ende, puede llegar a incurrir en costos muy elevados de pobre calidad. Dicho lo anterior, se vuelve más que evidente la necesidad de identificar aquellas previsiones de diseño o manufactura que puedan vigilarse con el afán de mitigar o eliminar la ocurrencia del mencionado fenómeno.

# Capítulo 2. Hipótesis

## 2.1 Definición del problema

El problema consiste en la caracterización del fenómeno de extrusión de soldadura, que típicamente se manifiesta después del encapsulamiento del módulo multichip, como una delgada capa de apenas unas cuantas micras de estaño, localizada sobre el cuerpo cerámico de componentes de montaje superficial. El impacto de este fenómeno en el funcionamiento eléctrico de los dispositivos a los que afecta, es típicamente catastrófico.

## 2.2 Hipótesis

a) Los residuos de fundente de soldadura y la redeposición de contaminantes durante el proceso de limpieza, que tiene lugar después de la refusión, son factores que afectan la adhesión del plástico encapsulante y las superficies de los componentes de SMT. Esta condición es agravada durante el cambio de fase de la soldadura, de solida a liquida, debido al incremento de volumen de la misma. Estos dos escenarios son suficientes para dar lugar a la ocurrencia del fenómeno de extrusión de soldadura.
b) El tiempo que los dispositivos MCM permanecen expuestos al ambiente, antes de ser encapsulados, puede dar lugar a la absorción de humedad y a la acumulación de contaminantes en las superficies de los componentes de SMT. Esta condición puede dar origen a fallas en la adhesión del plástico encapsulante con las superficies del dispositivo MCM.
c) El estrés termo-mecánico, causado por múltiples ciclos de refusión, puede dar lugar a una micro-delaminación en la interfaz del plástico encapsulante y las superficies de los componentes de SMT. Esta condición puede verse agravada por la acumulación de humedad en las interfaces, producto de la exposición no controlada de los dispositivos al medio ambiente.
d) El volumen de soldadura en los componentes de SMT, el espesor del material encapsulante y el diseño de la tablilla de circuito impreso son factores que modifican el riesgo de observar el fenómeno de extrusión de soldadura. Estos factores pueden tener un efecto significativo en los niveles de estrés mecánico a los cuales son sometidos los dispositivos MCM durante los varios procesos involucrados en su manufactura.

### 2.3 Objetivo general

El objetivo central de este proyecto de investigación es identificar aquellos factores que influyen o promueven la incidencia del fenómeno de extrusión de soldadura sobre estas superficies no metálicas, después de haber sido encapsuladas. Confirmado lo anterior, se procederá con la identificación de previsiones potenciales pudiesen considerarse durante las etapas de diseño y manufactura de los dispositivos empaquetados para evitar la ocurrencia de dicho fenómeno.

### 2.4 Objetivos específicos

Con miras a lograr el objetivo antes descrito, se planeó la ejecución de una serie de experimentos orientados a la evaluación de cada una de las hipótesis planteadas. Los desarrollos experimentales son como se listan a continuación:

a) Evaluar el efecto que tiene la existencia de distintos tipos de residuos de fundente de soldadura en las superficies de los componentes de SMT que forman parte del dispositivo MCM. Lo anterior, en conjunto con la validación del proceso de limpieza efectuado bajo distintas condiciones de envejecimiento o concentración de contaminantes en el solvente empleado en esta operación.
b) El segundo experimento se enfoca a la comprobación de la segunda hipótesis planteada. Evaluar el efecto que tiene el tiempo en el que los dispositivos son expuestos al ambiente antes de ser encapsulados, así como el resultado que se tendría usando procesos de horneado y plasma orientados a la eliminación de humedad y contaminantes superficiales respectivamente.
c) Un tercer experimento enfocado en poner a prueba la robustez de los dispositivos, posteriores al encapsulamiento, para soportar ciclos de estrés termo-mecánico originado durante el proceso de refusión. Lo anterior actuando sobre dispositivos MCM expuestos a condiciones de humedad y temperatura consistentes con una clasificación MSL3.
d) Un último experimento diseñado para evaluar el efecto que tiene el volumen de soldadura usado para el montaje de componentes de SMT en conjunto con el uso de diferentes diseños de tablillas de circuito impreso y dos distintos espesores de encapsulante.

## 2.5 Delimitación

El fenómeno fue estudiado únicamente en dispositivos MCM, encapsulados mediante el uso de resinas epóxicas, construidos con los materiales y bajo los procesos de manufactura calificados, para la producción en alto volumen de este tipo de empaquetados, por la compañía Skyworks Solutions de México.

## 2.6 Antecedentes

En todos los casos, el fenómeno se describe como la incidencia de una pequeña capa de material de soldadura de apenas unos cuantos micrómetros de espesor (3 - 5 um), mismo que se localiza típicamente en la cara superior de uno o varios componentes cerámicos de SMT, posterior al encapsulamiento y estrés termo-mecánico al que es sometido el dispositivo MCM durante el proceso de ensamble del siguiente nivel del sistema. Comúnmente, esta huella se encuentra extendida a todo lo largo de la superficie del componente afectado, lo cual ocasiona una condición de corto circuito eléctrico entre los extremos o electrodos del mismo. La figura 1 muestra un acercamiento de un corte transversal realizado sobre un componente cerámico de SMT que fue reportado con una incidencia de este fenómeno.

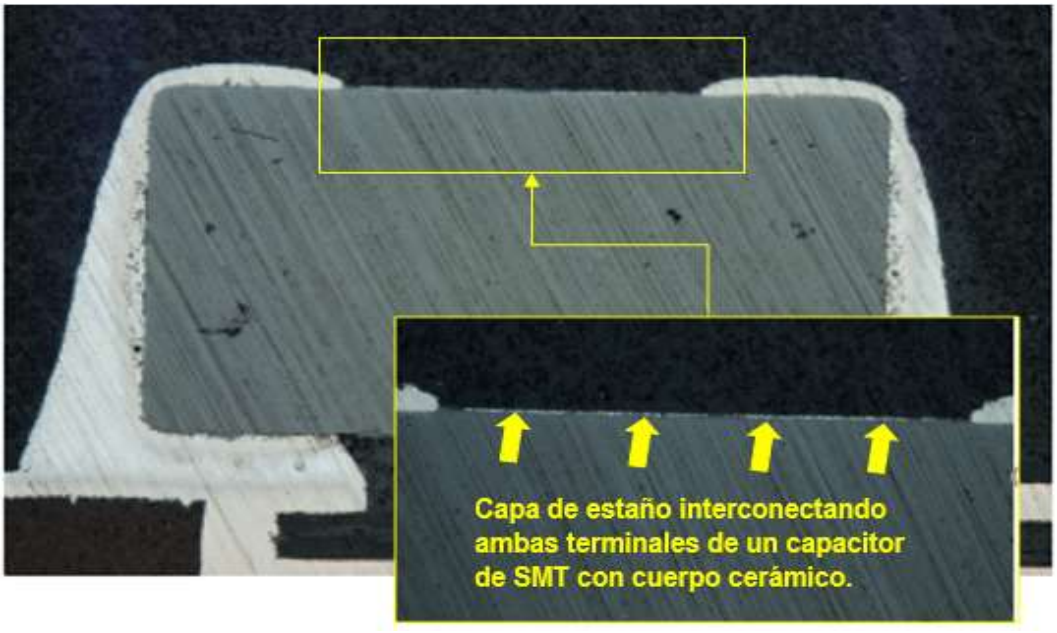



**Figura 1.** Corte transversal de un componente cerámico de SMT encontrado con el problema de escurrimiento de soldadura.

Algunos hechos conocidos:

- Análisis realizados mediante la técnica de espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDX) – ver figura 2- han revelado que el metal depositado en la superficie del componente está compuesto principalmente de Sn.
- La medición del espesor de la capa de metal es solamente de unas cuantas micras; típicamente menor a los 10 µm.

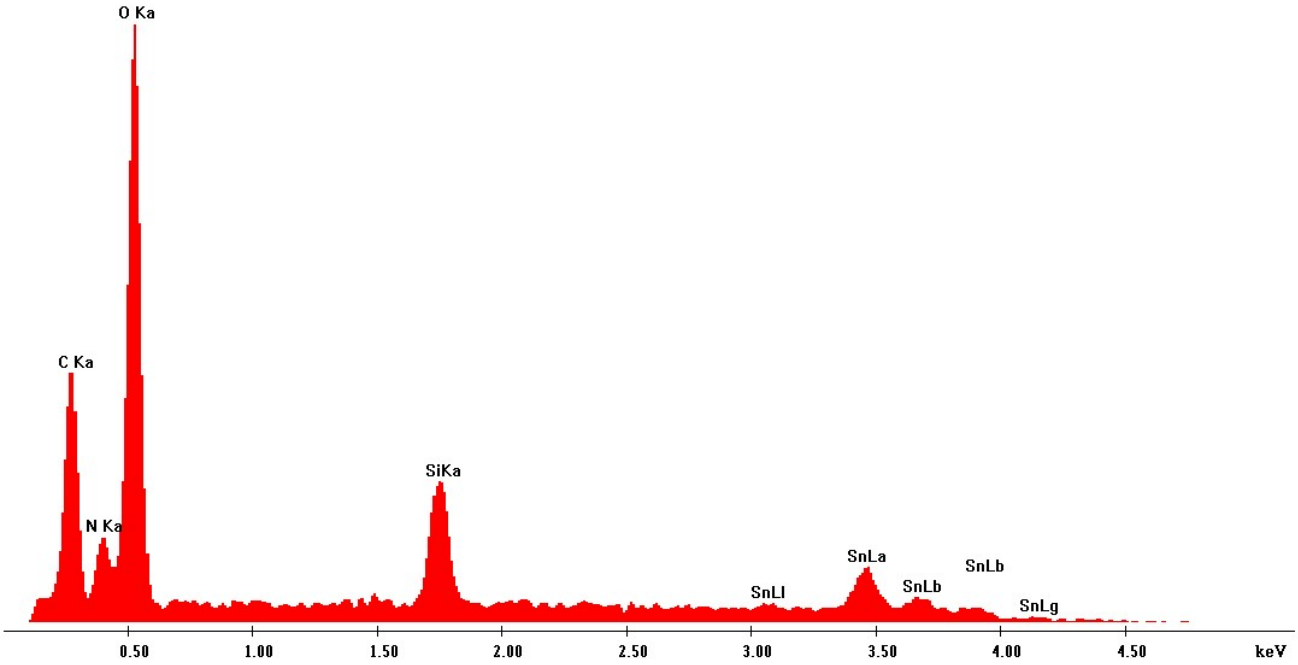



**Figura 2.** Análisis por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X realizada a una muestra de componente cerámico para SMT que presenta el problema de escurrimiento de soldadura.

# Capítulo 3. Marco teórico

## 3.1 Diagrama de fases en equilibrio

Una fase se define como “un estado homogéneo distinguible (gaseoso, liquido o solido) de la materia que manifiesta composición y propiedades uniformes” [Magonon, 2001]. El diagrama de fases en equilibrio, es una herramienta, ampliamente usada en ciencia de los materiales; nos permite observar de manera gráfica, las fases en las que pueden encontrarse diferentes concentraciones de materiales bajo un rango determinado de temperaturas.

### 3.1.1 Diagrama de fases para materiales puros

Cuando analizamos el comportamiento de materiales puros, la fase solida se transforma en la liquida en el momento exacto en el que se alcanza el punto de fusión. El uso de una línea vertical es suficiente para representar de forma gráfica este cambio como función de la temperatura; en sí misma, esta línea constituye ya un diagrama de fases. Ver figura 3.

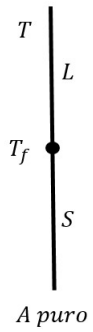



**Figura 3**. Representación de un diagrama de fases para un material puro “A”

### 3.1.2 Diagrama de fases para mezclas binarias

En el escenario donde existen dos materiales, A y B, que se mezclan para formar una aleación, resulta una nueva variable: la composición. Este nuevo factor, se representa como una línea horizontal que une a los “diagramas de fase” individuales, correspondientes a cada uno de los materiales presentes en la mezcla. Es dentro de este “marco”, compuesto por las dos líneas verticales extremas y la otra horizontal que las une en su base, que se muestran los campos de

fase propios de las diferentes composiciones y temperaturas para los elementos aleados. Ver figura 4.

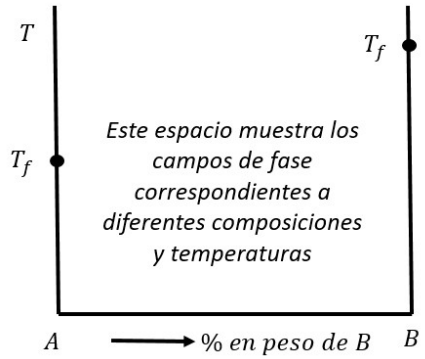



**Figura 4.** Representación de un diagrama de fases para una mezcla binaria

La composición suele expresarse en términos de porcentaje del peso. Este nuevo elemento del diagrama de fases, toma valores que van del 0 al 100%, esto desde cada uno de los extremos de la horizontal. En otras palabras, cuando nos encontramos en cualquiera de los extremos, izquierdo o derecho, la composición corresponde al 100% del peso del material representado por la vertical y al 0% de la opuesta. La suma de los porcentajes de composición para la aleación bajo estudio, siempre será igual al 100%.

### 3.1.3 Construcción de los diagramas de fases en equilibrio

Un diagrama de fases binario para dos materiales puros se determina de manera experimental, mediante el estudio de las estructuras formadas a diferentes composiciones y temperaturas. Estos estudios, revelan ciertas regiones del diagrama de fases que pueden consistir de una única fase solida (solución solida), una mezcla de dos o más fases, compuestos estequiométricos o no-estequiométricos, temperaturas de transformación y por supuesto, las composiciones de las distintas fases en equilibrio estable.

Para establecer el diagrama de fases es imprescindible determinar los límites de fase. Estos límites de fase representan los lugares donde se originan cambios de fase o de composición, mismos que implican cambios en las propiedades físicas, esto en virtud de las diferentes fases que se producen. Es por lo anterior, que los cambios en las propiedades físicas, son los métodos principales empleados para la determinación del diagrama de fases; ejemplos de propiedades físicas son: la resistividad eléctrica, las propiedades magnéticas, el calor de fusión o de

solidificación, entre otras. Normalmente, estos métodos se complementan con otras técnicas, tales como la microscopia y rayos X.

#### 3.1.3.1 Análisis térmico diferencial

El análisis térmico diferencial (ATD, por sus siglas en ingles), es una técnica que permite medir la diferencia de temperatura entra una muestra determinada y un material de referencia, esto, en función del tiempo (temperatura constante) o de la temperatura alcanzada en cada momento. Estas medidas, pueden llevarse a cabo bajo condiciones de atmosfera controlado o en el ambiente.

El análisis térmico, en conjunción con las técnicas de microscopia y de rayos X, es aplicable a un gran número de sistemas de aleación, y es particularmente idónea para determinar los límites de fase del *liquidus* y del *solidus*. [Mangonon, 2001]. Las líneas (limites) de *liquidus* son establecidas a partir de curvas de enfriamiento, en tanto que la de *solidus* parte de una curva de calentamiento. Las curvas de enfriamiento o calentamiento, son simples representaciones graficas del tiempo y la temperatura, para los casos donde un líquido se enfría o un sólido se calienta, respectivamente. Los cambios que se observan en las pendientes de estas curvas, indican los puntos de solidificación (enfriamiento) o de fusión (calentamiento) de los materiales.

#### 3.1.3.2 Líneas de "*liquidus*"

Esta línea establece el límite a partir del cual el sistema se encontrará en su fase de líquido puro. Ver figura 5.

#### 3.1.3.3 Líneas de "*solidus*"

Este límite indica el punto exacto donde el sistema, bajo condiciones de equilibrio, alcanza la solidificación completa. Ver figura 5.

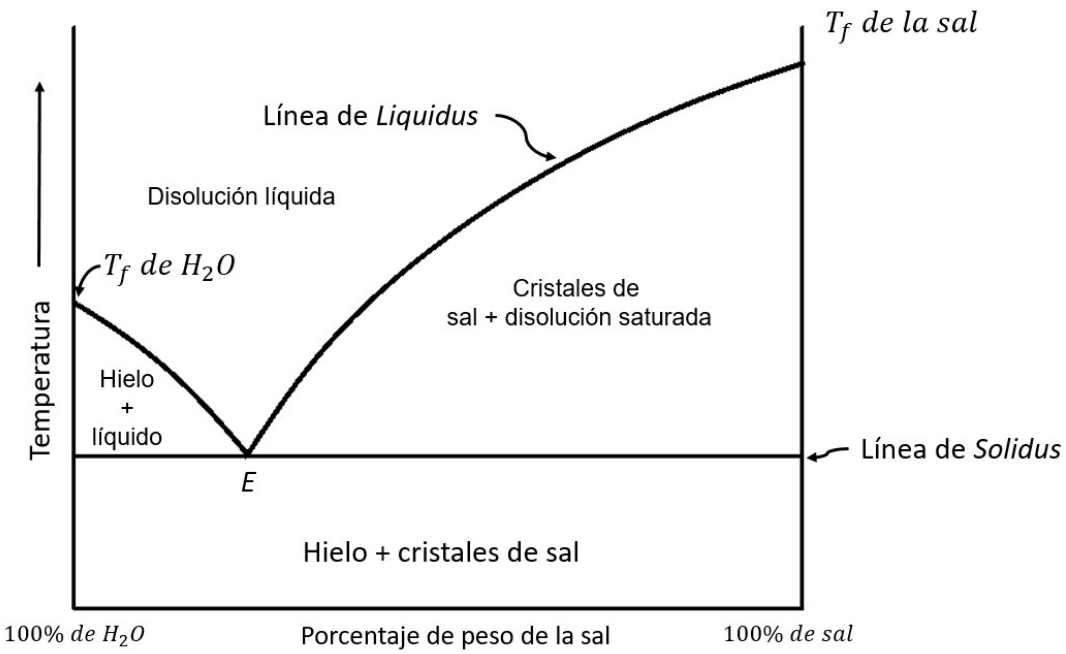



**Figura 5.** Localización en un diagrama de fases de las líneas *Liquidus* y *Solidus.*

En resumen, el ATD es una técnica cualitativa que permite detectar si se presentan procesos endotérmicos o exotérmicos en nuestra muestra, además de indicar la temperatura a la cual tienen lugar estos cambios energéticos.

### 3.1.4 Reacciones de tres fases

La coexistencia de tres fases se presenta en uno de dos posibles escenarios: a) una fase se transforma en dos fases, o b) dos fases se combinan para dar origen a una sola fase. El proceso de transformación se hace presente a través del cambio de una temperatura alta a una más baja, por ejemplo, durante el enfriamiento. Cuando la transformación no es completa, las tres fases coexisten y están en equilibrio. Debido a este equilibrio, la transformación también se describe como una reacción de tres fases. [Mangonon, 2001].

La tabla 1 muestra las reacciones de tres fases más comunes que pueden encontrarse en un diagrama de fases binario, así como sus nombres. En la columna de la izquierda, se muestran las reacciones en la que participa una fase liquida, en tanto que la de la derecha es exclusiva para reacciones en la que se involucran solidos únicamente. Nótese el uso de los sufijos “ica” y “oide” para la identificación respectiva de los nombres de estas reacciones.

| *Con líquido* | *Sin líquido (únicamente sólidos)* |
|---|---|
| *Eutéctica*<br>$L \rightarrow S_1 + S_2$ | *Eutectoide*<br>$S_1 \rightarrow S_2 + S_3$ |
| *Peritéctica*<br>$L + S_1 \rightarrow S_2$ | *Peritectoide*<br>$S_1 + S_2 \rightarrow S_3$ |
| *Monotéctica*<br>$L_1 \rightarrow S_1 + L_2$ | *Monotectoide*<br>$S_1 \rightarrow S_2 + S_3$ |

**Tabla 1.** Reacciones de tres fases más comunes.

### 3.1.5 Sistemas eutécticos

Un sistema eutéctico se caracteriza por una composición de aleación que posee una temperatura de fusión o solidificación menor que aquellas pertenecientes a cualquiera de los elementos puros constituyentes. En consecuencia, es posible diseñar aleaciones con puntos de fusión más bajos y con mejores características de moldabilidad. La aleación de soldadura clásica de estaño y plomo, constituye un ejemplo claro de este tipo de sistemas. Ver figura 6.

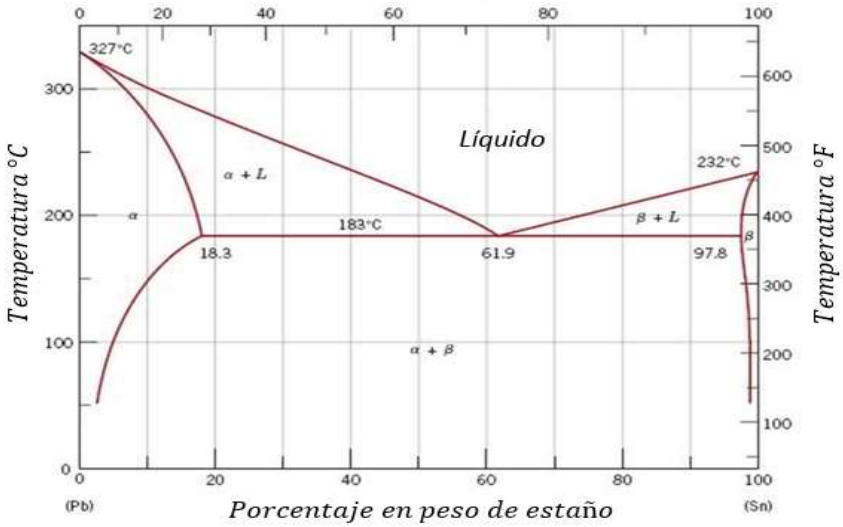



**Figura 6.** Diagrama de fases para el sistema SnPb.

### 3.1.6 Uso de los diagramas de fase para la selección de soldadura

El entendimiento del diagrama de fase de las aleaciones de soldadura y de aquellos sistemas compuestos por soldadura y substratos, constituye la principal base científica, para realizar una selección óptima de candidatos para nuevas soldaduras, además de contribuir al mejor entendimiento del proceso asociado.

Estos diagramas de fase aportan información importante no solo relacionada con las temperaturas para las fases sólidas y liquida de la aleación, sino también, acerca de la posible formación de fases inter-metálicas, ya ocurran estas durante la solidificación de la misma soldadura, o bien, como una reacción con los materiales constituyentes del substrato. [Kattner, 2002]

### 3.1.7 Diagrama de fase para la aleación estaño y antimonio (SnSb)

El diagrama de fase de la figura 7 fue construido a partir del estudio de las entalpias de fusión de las soluciones solidas de estaño, de manera simultánea se obtuvieron las líneas liquidus y solidus mediante el método del análisis térmico diferencial. La fase β (SbSn) se forma a los 425ºC, mediante una reacción peritéctica entre el material en estado líquido y la solución solida de antimonio. Esta fase β tiene un rango de homogeneidad que va desde 43 hasta 60.5% de concentración de Sb a 250ºC.

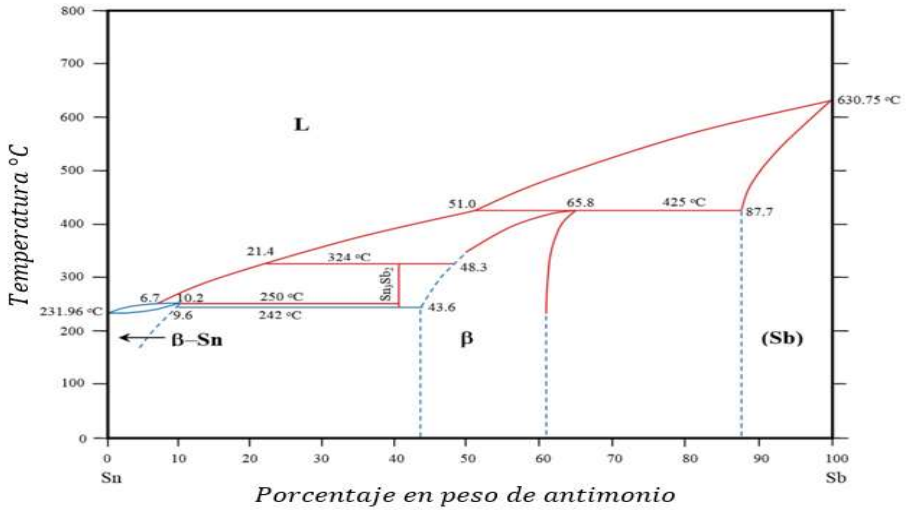



**Figura 7.** Diagrama de fases para el sistema SnSb.

### 3.2 Estructuras cristalinas

Los materiales pueden clasificarse como cristalinos o amorfos de acuerdo con la disposición de los átomos o moléculas en los sólidos. Si hablamos de un material cristalino, nos ubicamos en los casos donde existe una disposición regular de los átomos y que por tanto resulta en un patrón que se repite en tres dimensiones. Por el contrario, si la disposición de los átomos no es localizada y no se repite en tres dimensiones, se dice entonces que el material es amorfo (no cristalino).

#### 3.2.1 Celda unitaria, sistemas cristalinos y redes puntuales o espaciales

Una celda unitaria consiste en aquel patrón que se repite en la estructura cristalina. En la figura 8 se muestra una celda unitaria tridimensional. Esta celda se caracteriza por los tres vectores de traslación unitarios **a, b** y **c** por medio de los cuales se repite en tres dimensiones. Estos por ser vectores, tienen tanto magnitud como dirección y se les llama ejes cristalográficos porque definen el tamaño y la forma de la celda unitaria. Las magnitudes de los ejes o vectores **a, b** y **c** y los ángulos **α, β** y **γ** entre los ejes se denominan constantes reticulares o parámetros de la red de la celda.

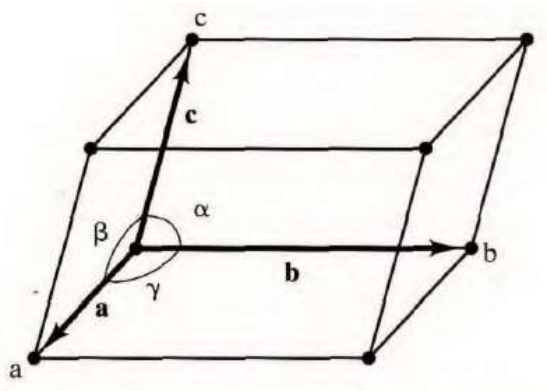



**Figura 8.** Celda unitaria paralelepípeda. Tres vectores de traslación, $\boldsymbol{a, b}$ y $\boldsymbol{c}$, y sus relaciones angulares, $\boldsymbol{\alpha, \beta}$ y $\boldsymbol{\gamma}$ definen la forma y el sistema cristalino.

Si se parte de un punto y después se traslada este en todas direcciones con el conjunto de los tres vectores unitarios, se obtiene lo que se conoce como red espacial puntual. Una red espacial puntual se define como una matriz de puntos dispuestos en el espacio de tal modo que cada uno tiene un entorno idéntico.

Si se especifican valores para las longitudes axiales y para los ángulos entre estas, se producen celdas unitarias de diversos tamaños y formas. Resulta que hay solamente siete maneras únicas e independientes de especificar las longitudes axiales y los diferentes ángulos entre ellas. En otras palabras, solo podemos tener siete tipos de celdas unitarias, o lo que se conoce como sistemas cristalinos. Estas se muestran en la tabla X junto con los ejes cristalográficos y las relaciones angulares de unos respecto a otros.

**Tabla 2.** Sistemas cristalinos y redes de Bravais

| Sistema | Longitudes axiales y ángulos | Redes de Bravais | Símbolo de la red |
|---|---|---|---|
| **Cúbico** | Tres ejes iguales en ángulos rectos $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90°$ | Simple<br>Centrado en el cuerpo<br>Centrado en las caras | P<br>I<br>F |
| **Tetragonal** | Tres ejes en ángulos rectos, dos iguales $a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90°$ | Simple<br>Centrado en el cuerpo | P<br>I |
| **Ortorrómbico** | Tres ejes desiguales en ángulos rectos $a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90°$ | Simple<br>Centrado en el cuerpo<br>Centrado en la base<br>Centrado en las caras | P<br>I<br>C<br>F |
| **Romboédrico** | Tres ejes iguales, con el mismo ángulo $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma \neq 90°$ | Simple | P |
| **Hexagonal** | Dos ejes coplanares iguales a $120°$ El tercer eje en ángulo recto $a = b \neq c; \alpha = \beta = 90°, \gamma = 120°$ | Simple | P |
| **Monoclínico** | Tres ejes desiguales, un par en ángulos; $a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90° \neq \beta$ | Simple<br>Centrado en la base | P<br>C |
| **Triclínico** | Tres ejes desiguales, con distinto ángulo y ninguno en ángulo recto $a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$ | Simple | P |

Bravais, un cristalógrafo francés, demostró que solo hay 14 redes puntuales posibles y ninguna otra. Como reconocimiento a esta contribución, la red puntual también se llama red de Bravais.

### 3.2.2 Estructuras metálicas comunes

La mayoría de los elementos de la tabla periódica son metales, y de ellos, la mayor parte se cristaliza en una de tres estructuras cristalinas: cubica centrada en el cuerpo (CCC), cubica centrada en las caras (CC) y hexagonal compacta (HC).

#### 3.2.2.1 Estructura cúbica centrada en el cuerpo (CCC)

En esta estructura todos los ejes son iguales y los ángulos son todos de 90º. Si se colocase un átomo en cada punto de la red, se encontrarían un total de ocho átomos en los vértices, además de uno adicional en el centro del cubo. Ver figura 9.

**Figura 9.** Estructura cúbica centrada en el cuerpo.

#### 3.2.2.2 Estructura cúbica centrada en las caras (CC)

Al igual que en la estructura CCC, la cubica centrada en cara, posee ejes iguales y ángulos de 90º; sin embargo, si colocásemos un átomo en cada uno de los puntos de la red, tendríamos un total de 6 átomos en los centros de cada una de las seis caras, además de ocho en cada uno de los vértices. Ver figura 10.

**Figura 10.** Estructura cúbica centrada en las caras.

### 3.2.2.3 Estructura tetragonal centrada en cuerpo

La estructura tetragonal centrada en cuerpo posee iguales características a aquellas de la cubica centrada en cuerpo, con la única diferencia de que uno de sus ejes es diferente a los otros dos. Ver Figura 11.

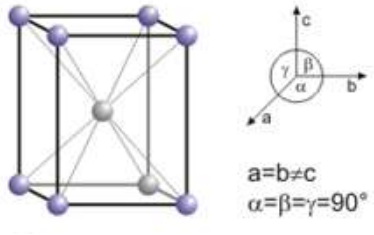



**Figura 11**. Estructura tetragonal centrada en cuerpo.

### 3.2.2.4 Estructura hexagonal compacta (HC)

La celda unitaria de esta estructura se muestra en la figura 12 (a). Las relaciones angulares son: α = β = 90º y γ = 120º. Para visualizar mejor las características de esta estructura, se pueden agrupar tres celdas unitarias para dar origen al hexágono que se muestra en la figura 12 (b). Nuevamente, si se colocasen átomos en cada punto de la figura b, esto daría como resultado un conjunto de átomos empacados y agrupados como el que se muestra en la figura c. Los planos superior e inferior del hexágono se denominan *planos basales*, y los seis lados o caras son los *planos prismáticos.* [Mangonon, 2001]. En esta estructura los átomos del interior del hexágono encajan sobre los huecos formados entre las uniones de los átomos que componen el plano basal inferior; de esta misma forma, el plano basal superior, cubre a los átomos de en medio, encajando en los mismos huecos encontrados en el primer plano. Resulta entonces sencillo inferir, que el nombre de esta estructura resulta del hecho de que los átomos dispuestos dentro de ella, se encuentran “empacados” de la forma más compacta posible,

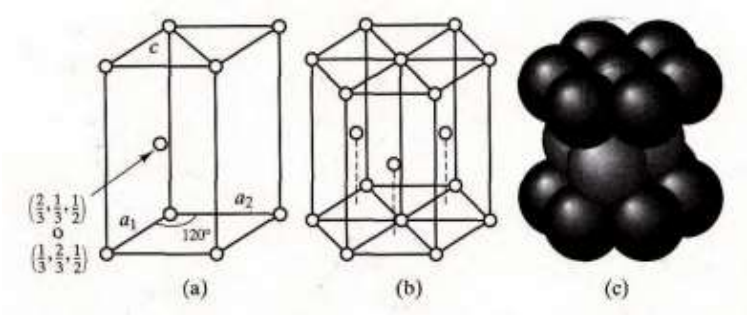



**Figura 12.** Estructura hexagonal compacta.

### 3.2.3 Intersticios

En todas las estructuras antes descritas, existen huecos también llamados *intersticios.* Estos intersticios pueden dar cabida a átomos de tamaño pequeño. El tamaño de estos, varía dependiendo las diferentes estructuras y también determina la medida en la que cada una puede aceptar átomos pequeños. Existen, fundamentalmente, dos tipos de intersticios: octaédricos y tetraédricos. Los nombres se deben a que cada intersticio está situado en el interior de un octaedro o de un tetraedro, respectivamente. Ver figura 13, 14 y 15.

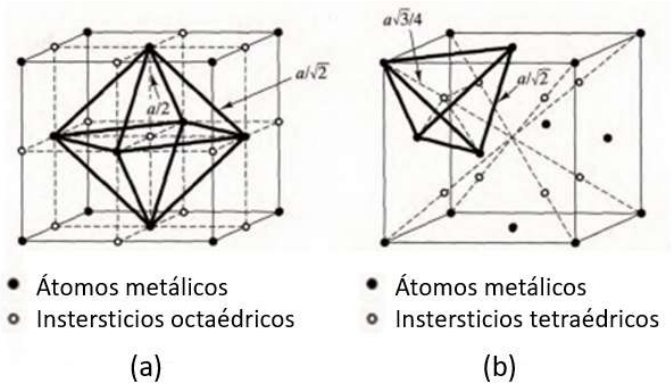



**Figura 13.** Huecos octaédricos y tetraédricos en la estructura CC.

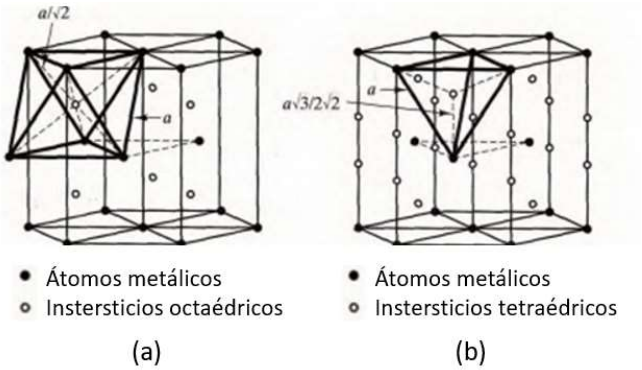



**Figura 14.** Huecos octaédricos y tetraédricos en la estructura HC.

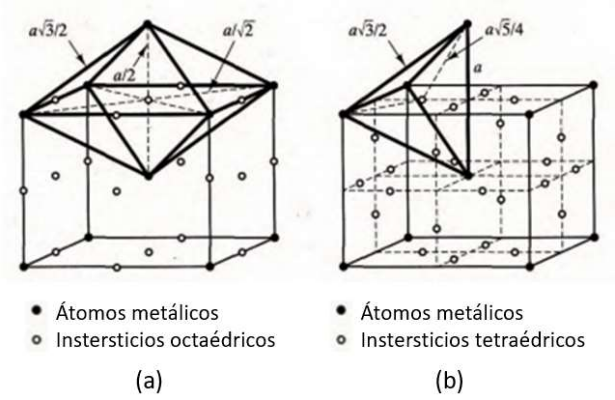



**Figura 15.** Huecos octaédricos y tetraédricos en la estructura CCC.

### 3.2.4 Estructura del estaño (Sn)

El estaño es un metal de color blanco-plata, muy brillante, de estructura cristalina de gruesos cristales. Su peso específico es de 7,3; funde a la temperatura de 232ºC. Es muy dúctil y maleable. [Angiolani, 1960]

La forma normal de este elemento es el estaño blanco, que tiene una estructura menos simétrica que la variedad gris. En el estaño blanco cada átomo tiene 4 vecinos más próximos a 3,02 ∑, formando un tetraedro muy aplanado a su alrededor, y 2 más a 3,18 ∑. Aunque los cuatro vecinos más próximos están a mayor distancia que los cuatro vecinos más próximos del Sn gris (a 2,80 ∑), hay también 4 Sn a 3,77 ∑ y 8 Sn a 4,41 ∑, frente a los 12 vecinos más próximos inmediatos a 4,49 del Sn gris. De acuerdo con esto el Sn blanco es mucha más denso (7,31 g/cm$^3$) que el Sn gris (5,75 g/cm$^3$), con independencia de que sea la forma a alta temperatura. [Wells, 1978]

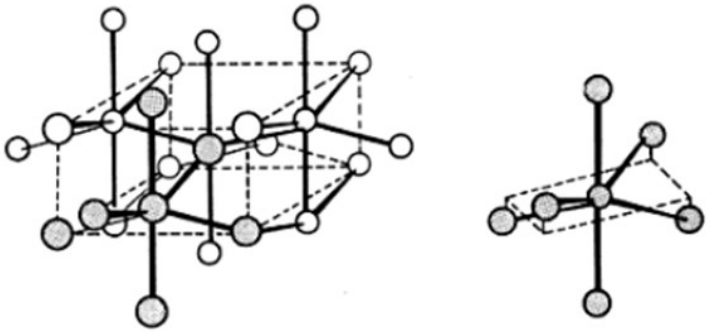


**Figura 16.** Estructura cristalina del estaño blanco mostrando el grupo octaédrico, deformado, de vecinos alrededor de cada átomo.

### 3.2.5 Estructura del antimonio (Sb)

El antimonio, bajo condiciones normales, forma cristales hexagonales a la manera del arsénico con 6 átomos por celda unitaria. La estructura hexagonal del antimonio consiste en láminas corrugadas unidas unas a otras mediante interacciones covalentes entre planos atómicos. Ver figura 17. [Vasil'ev, 2003]

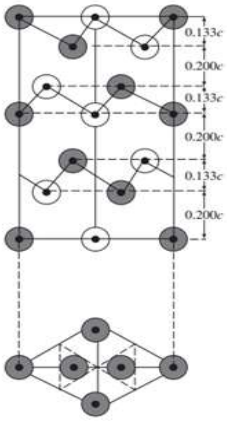



**Figura 17.** Proyección de la célula hexagonal del antimonio.

### 3.3 Dispositivos Módulo Multichip (MCM)

Un dispositivo módulo multichip (MCM por sus siglas en inglés) se define como una unidad sencilla (paquete) que contiene dos o más microcircuitos y un sustrato de interconexión, los cuales funcionan juntos como un bloque único en la construcción de sistemas más complejos [Tummala, 2000].

El empaquetado MCM ofrece los medios de interconexión y administración de entradas/salidas (I/O) necesarias, que requieren los microcircuitos contenidos dentro del paquete, para funcionar en los sistemas donde serán incorporados. De igual forma, proporciona los medios necesarios para la disipación térmica adecuada, el soporte mecánico y la protección de los microcircuitos, de elementos nocivos presentes en el ambiente de operación.

El MCM fue desarrollado a inicios de la década de 1980 y es una evolución del "paquete hibrido" que apareció poco después del surgimiento de los circuitos integrados [Tummala, 2000]. Una de las ventajas más significativas que brinda esta tecnología consiste en permitir que los microcircuitos puedan ser empacados en un volumen más pequeño y de menor peso del que se necesitaría para hacerlo de forma individual. Por lo anterior, el MCM tiene un abanico muy amplio de aplicaciones en las áreas aeroespacial, médica, electrónicos de consumo, dispositivos portátiles e incluso, supercomputadoras.

Típicamente para que un paquete pueda ser clasificado como MCM, la mitad del substrato o área del empaquetado debe estar ocupada por dispositivos semiconductores. Esto puede representarse con la siguiente formula sencilla:

$$A_C \geq 0.5A_S$$

Donde $A_C$ es igual al área de los dispositivos semiconductores (microcircuitos) y $A_S$ es el área del substrato.

### 3.3.1 Funcionalidad de los dispositivos MCM

Como ya se mencionaba anteriormente, un empaquetado tipo MCM ofrece al diseñador del circuito o al ingeniero de empaquetado una alternativa práctica y altamente funcional para la construcción e implementación de circuitos complejos, subsistemas o sistemas pequeños para aplicaciones particulares.

A continuación, se enlistan algunas características fundamentales con las que debe cumplir un empaquetado para ser considerado MCM:

a. El espaciamiento entre microcircuitos debe ser lo más pequeño posible para minimizar retardos en la propagación de señales. Un espaciamiento pequeño requiere que el substrato posea una alta densidad de interconexiones para soportar los requerimientos de entradas y salidas (I/O) de cada microcircuito. Debido a su tamaño pequeño, los conductores deben estar hechos de metales de alta conductividad para evitar la resistencia excesiva en las terminales. Además, las pistas deben ser diseñadas adecuadamente para evitar la distorsión, interferencia y ruido.

b. El MCM debe proveer los medios de disipación térmica que permitan ubicar la temperatura en las uniones de los semiconductores, en un rango comprendido entre los $85\ y\ 100℃$.

c. El MCM debe proporcionar conexiones de entrada y salida confiables hacia el siguiente nivel de ensamble en el sistema. Típicamente, esto toma la forma de una interfaz a través de una tarjeta de circuito impreso.

d. El MCM debe proporcionar una protección adecuada a los microcircuitos de los elementos nocivos presentes en el medio ambiente de operación. Debe considerarse el uso de procesos de fabricación que permitan el sellado, impermeable, de los paquetes o al menos recubrir o encapsular los circuitos y sus interconexiones.

### 3.3.2 Ventajas de los MCM

La necesidad de contar con la tecnología MCM se deriva de la incesante búsqueda de los diseñadores por aumentar la funcionalidad de los dispositivos, situación que es difícil de lograr si

se considera un diseño basado en un único microcircuito o chip. A medida que la tendencia por integrar tecnologías avanza, es posible que se logre incorporar todas las funciones requeridas por el sistema, dentro de un solo chip u oblea. Esta integración a escala de oblea (wafer scale integration o WSI por sus siglas en inglés) mantiene la posibilidad de regresar a las técnicas de empaquetado basadas en un chip único, pero hasta que esto sea alcanzable, el empaquetado MCM continuará siendo necesario.

Los MCM tienen varias ventajas importantes con respecto al empaquetado de microcircuitos sencillos; a continuación, se enlistan 4 de estas:

1) Alta eficiencia de empaquetado debido a que los microcircuitos pueden ser colocados más cerca de otros, especialmente cuando se le compara con la tecnología de empaquetado de microcircuito único.

2) Mejor desempeño eléctrico gracias a que las distancias entre microcircuitos se acortan y por tanto, la longitud del “alambrado” del sustrato también se reduce.

3) Mejor confiabilidad debido a un reducido número de interconexiones entre el microcircuito y la tarjeta.

4) Los MCM (en alto volumen) ofrecen el beneficio potencial de un costo asequible de manufactura debido a que no se requiere empaquetar circuitos integrados individuales y el hecho de necesitar un sustrato de tamaño más reducido.

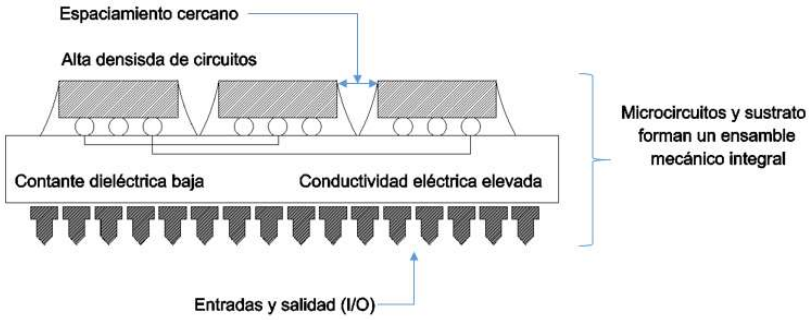



**Figura 18. Esquema ilustrativo de un dispositivo MCM.**

### 3.3.3 Confiabilidad

La confiabilidad es un elemento esencial que debe tenerse en mente durante los procesos de diseño, fabricación y prueba de dispositivos MCM. La figura 19 ilustra el rendimiento de un dispositivo MCM en función del número y calidad de microcircuitos contenidos en él. Aun cuando la calidad de los microcircuitos sea alta o se tenga una probabilidad mayor al 95% de usar chips buenos, el rendimiento puede llegar a ser considerablemente bajo, particularmente para aquellos módulos que contienen un número elevado de chips. Las curvas mostradas en la figura de abajo, asumen que no existen defectos o errores en el sustrato o en el proceso de ensamble. La inclusión de dichos factores afectaría aún más a esta fracción de rendimiento proyectado.

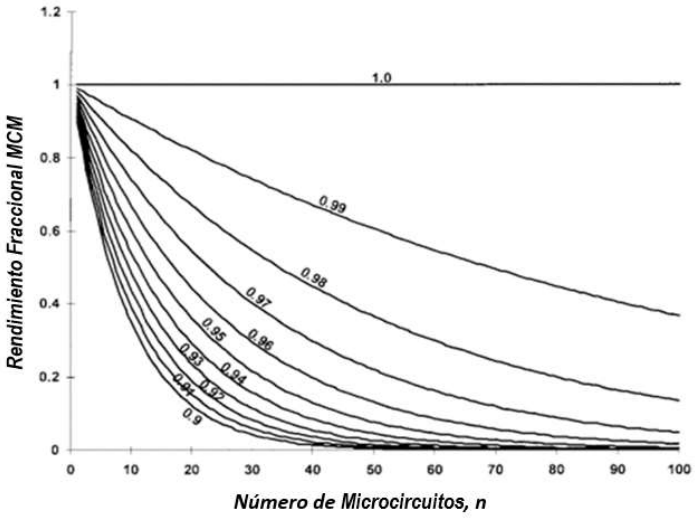



**Figura 19.** Rendimiento fraccional de un MCM en función del número de microcircuitos contenidos en el módulo, considerando varias probabilidades de uso de microcircuitos buenos.

Por lo tanto, la confiabilidad necesaria para la operación del MCM debe ser mayor que aquella considerada para el empaquetado individual de microcircuitos. Tal confiabilidad del empaquetado, debe ser diseñada y construida dentro del producto. Las siguientes tres áreas deben ser abordadas para garantizar dicha confiabilidad:

1. Diseñar para la confiabilidad, buscando un número mínimo de conexiones.
2. Construir el modulo usando procesos de manufactura $6\sigma$ (seis sigma).
3. Llevar a cabo pruebas de confiabilidad aceleradas y de segregación de fallas funcionales antes de embarcar el producto al cliente.

### 3.3.4 Proceso de Ensamble de un MCM

A continuación, se ilustra el flujo de ensamble típico para la manufactura de dispositivos MCM. Los bloques de color amarillo o rojo, indican las etapas del proceso en las que los materiales están siendo sometidos a estrés termo-mecánico.

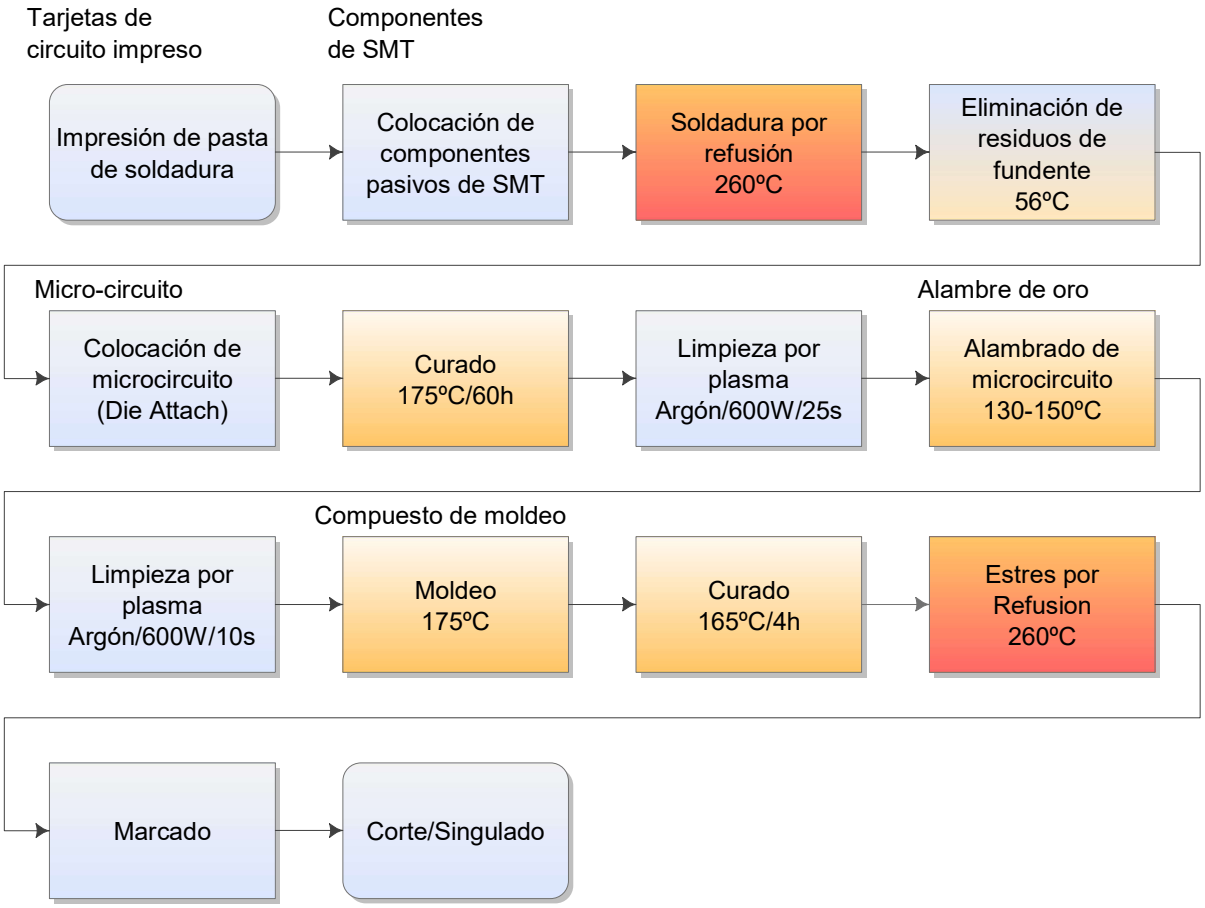



**Figura 20.** Flujo de ensamble para dispositivos MCM encapsulados mediante el uso de resinas epóxicas.

### 3.4 Tecnología de montaje superficial (SMT)

El montaje superficial implica soldar un componente directamente a un conjunto de superficies de metal expuesto o almohadillas - también conocidas con el nombre de “PADs”- en lugar de insertar las terminales de los componentes en las perforaciones de una tarjeta de circuito impreso (tecnología “a través de agujero” o de inserción). [Hollander, 1987]

### 3.4.1 Procesos de ensamble de montaje superficial

Un ensamble de Montaje superficial es primordialmente un proceso de soldadura por refusión. Este involucra deposición de pasta de soldadura, posicionamiento de componentes y posiblemente soldadura de ola y limpieza. [N. C. Lee, 2002]. La figura 21 muestra la configuración típica de una línea de ensamble de Montaje Superficial.

**Figura 21.** Apariencia típica de una línea de ensamble para tecnología de montaje

#### 3.4.1.1 Componentes de montaje superficial

Los componentes de montaje superficial (Surface Mount Devices, SMD por sus siglas en inglés) están disponibles para casi cualquier tipo de aplicación, tales como capacitores, resistencias, transistores, diodos, inductores, circuitos integrados y conectores. [N. C. Lee, 2002]

El uso de SMDs tiene muchas ventajas en términos del diseño de circuitos y la funcionalidad de los ensambles electrónicos. Los componentes son más pequeños, por lo tanto, es posible aumentar la densidad, lo cual reduce el tiempo de propagación de las señales. Los SMDs permiten que el tamaño de ciertos productos electrónicos, tales como los teléfonos celulares, sean miniaturizados en masa.

Desde la perspectiva de producción, estos son mucho más fáciles de procesar en líneas de ensamble automatizadas, lo que vuelve más económica la producción en alto volumen. Por ejemplo, la colocación de SMDs de forma automatizada omite varias etapas de preparación en el proceso (enderezar terminales, etc.) que son necesarias para la colocación de componentes

en la tecnología de inserción. En contraste, la producción de un ensamble con componentes de montaje superficial únicamente consistirá en aplicación de pasta de soldadura, posicionamiento de componentes y soldadura por refusión. Ver figura 22 [Wormuth, et al, 2001].

### 3.4.2 Aplicación de la pasta de soldadura

Para crear una unión de soldadura confiable, mediante la soldadura por refusión, el primer paso es aplicar soldadura en forma de pasta sobre las almohadillas de la tarjeta de circuito impreso. Esto puede lograse de diversas maneras. Entre las formas más comunes encontramos al método de impresión con malla, el método de dispensado y la impresión mediante el uso de plantilla o esténcil, siendo este último el método más comúnmente utilizado dada su practicidad y economía. El proceso de aplicación de la pasta de soldadura es probablemente la parte más importante del proceso de producción para un ensamble eléctrico. El nivel de calidad alcanzado en este punto del proceso, tiene un efecto directo en las etapas subsecuentes. [Wormuth, et al, 2001]

El control de la cantidad de pasta depositada es crítico, particularmente en el caso de ensambles de montaje superficial con espaciamiento fino y ultra fino. El proceso de impresión aún no está comprendido en su totalidad, tal como lo indica el hecho de entre el 52 y 71% de los defectos encontrados en ensambles de SMT están relacionados con él. [Pan, 2004]

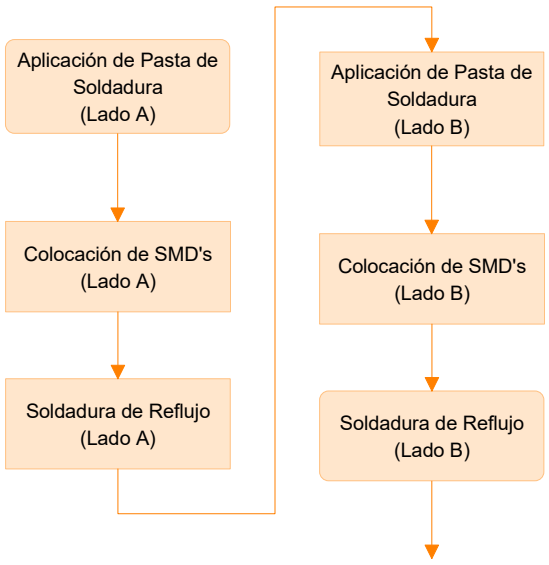



**Figura 22.** Secuencia de producción para ensambles puros de montaje superficial.

### 3.4.2.1 Composición de la pasta de soldadura

La pasta de soldadura es una mezcla homogénea de partículas metálicas y aditivos de *fundente*.

El *fundente* consiste de resinas, solventes, activadores y agentes tixotrópicos.

La figura 23 muestra la composición de una pasta de soldadura típica (porcentajes por peso):

- 90% de partículas de soldadura:
  - Aleación de estaño y plomo (con algo de plata si esto es necesario).

- 10% fundente:
  - 5% resinas, 4% solventes y 1% activadores y agentes tixotrópicos.

Por otro lado, los porcentajes en volumen para una pasta de soldadura estándar son apenas 50% de partículas de soldadura y 50% de fundente. [Wormuth, et al, 2001]

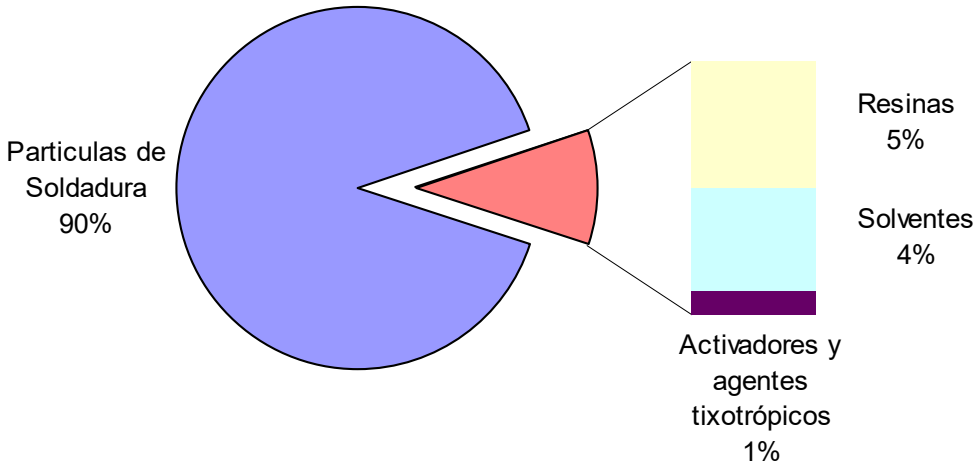



**Figura 23.** Composición en porcentajes de peso de la pasta de soldadura.

#### 3.4.2.1.1 Partículas de soldadura

Las partículas de soldadura (o el contenido de metales) determinarán el éxito del proceso de soldadura. El tamaño y forma de las partículas en el metal pulverizado afectan las propiedades

y calidad de impresión de la pasta de soldadura. Las partículas deben tener una forma esférica uniforme, con una superficie suave y mínimas desviaciones respecto de su forma ideal.

El tamaño de las partículas se divide en varias clases o categorías. La tabla 3 muestra una clasificación de estos tamaños.

Las pastas de soldadura con tamaños de partícula clase 3 y 4 son usadas para aplicaciones con espaciamiento fino y ultra fino (0.5 a 0.3 mm). Si el diámetro de las partículas de soldadura es reducido sustancialmente, el área de superficie total de las partículas a ser soldadas incrementará significativamente, aunque, el volumen de soldadura permanezca sin cambio.

**Tabla 3.** Porcentajes y tamaños de partículas de soldadura.

| Tipo de Partícula | Rango Nominal | Limite Superior | | Límite Inferior | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Mínimo 85% entre (µm) | Máximo 10% de partículas ente (µm) | No. partículas arriba de (µm) | Máximo 10% de partículas ente (µm) | Máximo 3% de partículas (µm) |
| 1ª | 75 – 150 | 150 – 200 | 200 | 50 – 75 | 50 |
| 1b | 20 – 150 | 150 – 200 | 200 | 15 – 20 | 5 |
| 2a | 45 – 75 | 75 – 100 | 100 | 32 – 45 | 32 |
| 2b | 20 – 75 | 75 – 100 | 100 | 15 – 20 | 15 |
| 2c | 20 – 63 | 63 – 80 | 80 | 15 – 20 | 15 |
| 3 | 20 – 45 | 45 – 60 | 60 | 15 – 20 | 15 |
| 4 | 20 – 38 | 38 – 50 | 50 | 15 – 20 | 15 |
| 5 | 15 – 25 | 25 – 30 | 30 | 10 – 15 | 10 |

El inevitable incremento en el área de superficie total, producto del uso de partículas de soldadura más pequeñas puede ocasionar una mayor oxidación, la cual puede tener un efecto adverso en la calidad de la unión de soldadura. Los óxidos se forman cuando el metal pulverizado es procesado, y tienen un efecto negativo en la mojabilidad de las superficies y en la formación de bolas de soldadura durante el proceso de soldado. [Wormuth, et al, 2001]

#### 3.4.2.1.2 Resinas

Las resinas son un componente importante del fundente (y de los residuos de este después del proceso de soldado). Estas protegen las superficies de las partículas de soldadura en contra de la oxidación, además que tienen influencia sobre las propiedades adhesivas de la pasta de

soldadura (la cual es importante para fijar los dispositivos de montaje superficial durante el proceso de posicionamiento) y sus características reológicas; por ejemplo, el comportamiento de flujo (deformación irreversible) y viscosidad.

Entre menor sea la cantidad de resinas contenidas en la pasta de soldadura, la cantidad de residuos de fundente después del proceso de soldado serán menores. Desafortunadamente, el efecto protector de la resina también disminuye. Por otro lado, un contenido excesivo de resinas tendría un efecto negativo en el comportamiento de flujo y pudiera causar que la pasta de soldadura formase interconexiones entre depósitos adyacentes. [Wormuth, et al, 2001]

#### 3.4.2.1.3 Activadores

Los activadores sirven para remover las capas de óxido de las partículas de soldadura (metal pulverizado) y de las superficies a soldar (islas y terminales). El objetivo es que las partículas de soldadura sean capaces de fundirse homogéneamente y a su vez, mojen uniformemente las superficies de contacto. Los activadores incluyen halógenos y ácidos. La concentración de los activadores debe ser racionalizada ya sus los residuos y otros sub-productos originados durante su funcionamiento, permanecen en los componentes después de soldados. Por esta razón, los valores de corrosión electrolítica, resistencia de la superficie y residuos iónicos deben ser tomados en consideración. Particularmente, hay que tomar en cuenta estas especificaciones al manejar soldaduras No-Lavables, las cuales han sido diseñadas para eliminar el proceso de limpieza. [Wormuth, et al, 2001]

#### 3.4.2.1.4 Solventes

Los solventes son usados para disolver las resinas. Comúnmente se emplean alcoholes y éteres (con altos puntos de ebullición). Estos solventes deben evaporarse lentamente a temperatura ambiente, de forma que el tiempo de vida de la pasta sobre el esténcil sea adecuado, de lo contrario, esta se volvería más viscosa lo que resultaría en una pobre calidad de impresión. Por el contrario, cuando la pasta de soldadura es calentada durante el proceso de refusión, los solventes deben evaporarse rápidamente para evitar que la pasta de soldadura comience a fluir una vez más. Un comportamiento inapropiado de flujo podría causar defectos tales como puentes de soldadura o pequeñas interconexiones de soldadura entre almohadillas adyacentes.

#### 3.4.2.1.5 Agentes tixotrópicos

La viscosidad de una pasta de soldadura está determinada por el fundente, el solvente, las partículas de soldadura (forma, tamaño y porcentaje de volumen en la pasta) y por otros aditivos. Estos aditivos o agentes tixotrópicos, tales como la celulosa o resinas acrílicas, afectan la viscosidad relacionada con la presión o el comportamiento tixotrópico de la pasta de soldadura. La tixotropía es la reducción de viscosidad causada por un estrés mecánico sostenido, con un correspondiente incremento cuando dicho estrés cesa. El comportamiento tixotrópico es por tanto una separación de la estructura intrínseca de la pasta de soldadura causada por el estrés aplicado (las fuerzas estructurales internas son sobrepasadas o destruidas), resultando en una reducción de fuerza (baja viscosidad, mejor comportamiento de flujo). La estructura original se reestablece una vez que el estrés desaparece, así que, se trata de un proceso reversible y relacionado con el tiempo.

### 3.4.2.2 Pastas No-Lavables

La designación de No-Lavables o “No-Clean” indica que los residuos del fundente que permanecen después del proceso de soldadura por refusión no tienen que ser removidos obligatoriamente mediante un proceso de limpieza. Existen varias razones por las que los fabricantes de dispositivos electrónicos han optado por usar este tipo de soldaduras en sus procesos. Con la continua miniaturización de componentes y el resultante incremento de densidad en los circuitos, se ha vuelto aún más difícil limpiar los componentes electrónicos de una manera reproducible – con calidad uniforme. Otra razón muy importante para los fabricantes, es la prohibición del uso de clorofluorocarbonos como agentes de limpieza. La eliminación de los procesos de lavado reduce tanto costos de inversión (equipo de lavado) como los costos de operación (agentes de limpieza, disposición de residuos).

## 3.4.3 Refusión

Una vez que todas las partes son colocadas sobre el PCB, las tablillas de circuito impreso montadas están listas para el proceso de refusión. Los métodos usados más comúnmente para este proceso incluyen: infra-rojos, fase de vapor y convección.

**Tabla 4.** Tasa de calentamiento de acuerdo al método de refusión empleado

| Método de Re-fusión | Tasa de Calentamiento | Descripción |
|---|---|---|
| Fase de Vapor | $Q = HA_A(T_s - T_A)$ | $H$ = Coeficiente de transferencia de calor de vapor.<br>$A_A$ = Área de ensamble.<br>$T_S$ = Temperatura de vapor saturado.<br>$T_A$ = Temperatura del ensamble. |
| Infrarrojo | $Q = \sigma A F_\varepsilon F_\alpha (T_S^4 - T_A^4)$ | $\sigma$ = Contante Stefan - Boltzman.<br>$A$ = Área siendo calentada.<br>$F_\varepsilon$ = Factor de emisividad de fuente y producto.<br>$F_\alpha$ = Configuración del ensamble.<br>$T_S$ = Temperatura de la fuente.<br>$T_A$ = Temperatura del área siendo calentada. |
| Convección | $Q = H_C A_S (T_g - T_S)$ | $H_C$ = Conductacia de convección térmica.<br>$A_S$ = Área de superficie del ensamble.<br>$T_g$ = Temperatura del gas cerca de la superficie.<br>$T_S$ = Temperatura de la superficie del ensamble. |

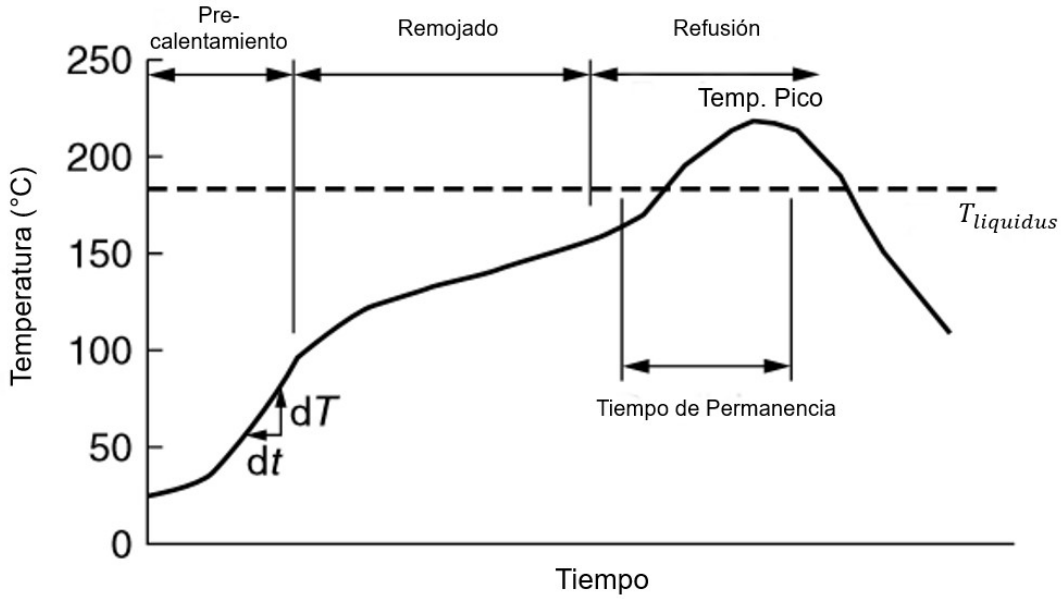



**Figura 24.** Esquema ilustrativo de un perfil típico de refusión.

Un perfil usado comúnmente es el que se muestra en la imagen anterior. Muchos fabricantes de componentes especifican una tasa máxima de incremento de temperatura de entre 2 y 4 °C/s ($\frac{dT}{dt}$). Un incremento rápido de temperatura podría resultar en componentes fracturados, causados por la acumulación de estrés térmico debido a la aparición de un gradiente de temperatura, ganancia de humedad y una disparidad de los coeficientes de expansión térmica de los distintos materiales involucrados.

El propósito de la zona de remojado es la de evaporar los solventes y activar el fundente. El rango típico de temperaturas recomendado por los fabricantes de soldadura oscila entre los 150 °C y los 175 °C. Otra función importante de esta zona es la de equilibrar la temperatura a lo largo de la tablilla de circuito impreso antes de entrar a la zona de refusión. Lo anterior con el objetivo de lograr gradientes pequeños de temperatura antes de alcanzar el punto de fusión de la soldadura.

En lo que respecta a la zona de refusión, el objetivo es alcanzar un pico de temperatura que permita la adecuada formación de uniones de soldadura. Este nivel pico, es comúnmente dictado por la recomendación de los fabricantes, tomando en cuenta la química y constituyentes de la pasta de soldadura. El tiempo de permanencia es el periodo en el que la soldadura permanece por arriba de su punto de liquidus y debe ser mantenido tan corto como sea posible. Un tiempo de permanencia típico oscila entre los 30 y 90 segundos, dependiendo en el pico de temperatura.

### 3.4.3.1 Teoría de soldadura

El proceso de soldadura puede ser representado como se muestra en la figura 25 y puede ser burdamente dividido en tres etapas: (1) esparcimiento, (2) disolución del metal base y (3) formación de una capa de compuesto inter-metálico.

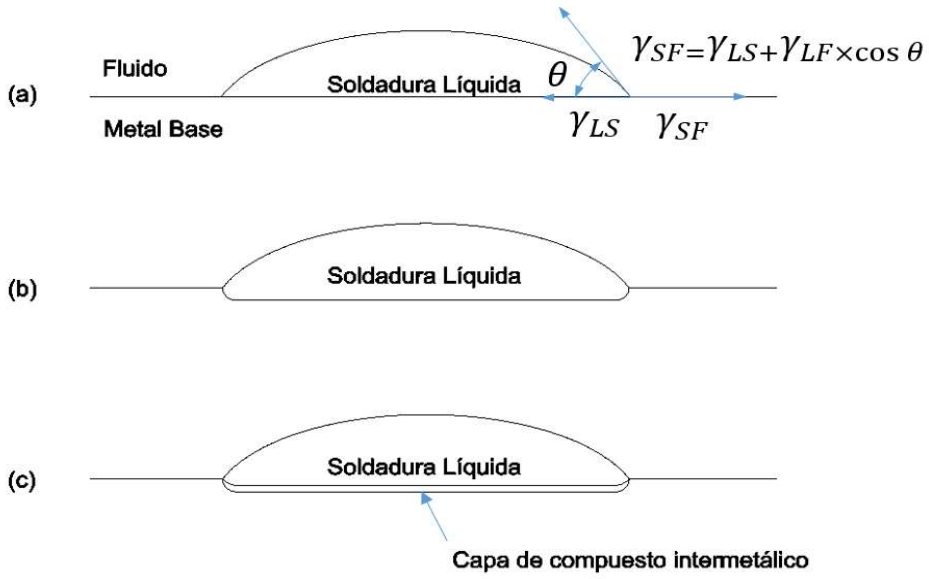



**Figura 25.** El proceso de mojabilidad de la soldadura involucra (a) esparcimiento de la soldadura liquida sobre el metal base, con un ángulo de contacto **θ**, (b) disolución del metal base en la soldadura liquida, (c) la reacción del metal base con la soldadura liquida para formar una capa de compuestos inter-metálicos

#### 3.4.3.1.1 Esparcimiento

El primer paso para completar el proceso de soldadura consiste en calentar el material de la soldadura hasta alcanzar el punto de fusión. Una vez fundida la soldadura, esta "mojara" la superficie del metal de base. Como cualquier otro fenómeno de mojabilidad, la soldadura líquida sobre el metal base, tiene que cumplir con la ley física del equilibrio de la tensión interfacial, tal como se expresa por:

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{LF} \times \cos\theta$$

Donde $\gamma_{SF}$ es la tensión interfacial entre el metal base del sustrato y el fluido. $\gamma_{LS}$ es la tensión interfacial entre el sustrato y la soldadura liquida, $\gamma_{LF}$ es la tensión interfacial entre la soldadura liquida y el fluido y $\theta$ representa el ángulo de contacto entre la soldadura liquida y el sustrato.

Esta ecuación predice que el esparcimiento de un líquido sobre una superficie solida alcanza un estado de equilibrio estable cuando el ángulo de contacto adquiere un valor de $\theta$ donde las fuerzas de los dos vectores opuestos $\boldsymbol{\gamma_{SF}}$ y ($\boldsymbol{\gamma_{LS}} + \boldsymbol{\gamma_{LF}} \times \boldsymbol{cos\theta}$ ) están balanceadas.

Una buena formación de filete es deseable, en las aplicaciones de soldadura en la industria electrónica, ya que permite una concentración mínima del estrés. Para lograr esto, se requiere de una característica de esparcimiento con un bajo $\theta$. De hecho, un pequeño valor de $\theta$ es deseable no solo por la consideración del estrés, sino que también para garantizar un buen nivel de mojabilidad metalúrgica.

Un bajo valor de $\theta$ puede ser alcanzado a través de medios químicos y físicos. Los medios físicos involucran la manipulación de la tensión superficial de los materiales involucrados en el proceso de soldadura. En principio, 1) el uso de un fundente de baja tensión superficial, 2) un sustrato de alta tensión o energía superficial y 3) una soldadura de baja tensión superficial que permita la formación de un ángulo bajo de contacto $\theta$. Estos medios pueden ilustrarse fácilmente mediante fenómenos comunes: La segunda situación puede encontrarse en la pobre mojabilidad del agua sobre un sustrato de teflón, pero alta mojabilidad sobre un sustrato de metal; la tercera situación puede ser demostrada por la buena mojabilidad del alcohol y pobre mojabilidad del mercurio, ambos sobre un trozo de vidrio.

De cualquier forma, debe enfatizarse nuevamente que el balance de la tensión interfacial es tan solo una de las fuerzas que determinan el fenómeno de mojabilidad en el proceso de soldadura. Factores como la viscosidad del fluido, la disolución del metal y la reacción química entre la soldadura y el metal base, tienden a ser más relevantes, dado que la soldadura es un proceso relativamente corto y no equilibrado. [N. C. Lee, 2002]

#### 3.4.3.1.2 Flujo del fluido

Como ya se mencionó anteriormente, el esparcimiento del fluido está determinado por el balance en la tensión interfacial establecida en el estado de equilibrio. Sin embargo, en un proceso real de soldadura, como el utilizado por la industria electrónica, el fenómeno transcurre en tan solo unos cuantos minutos o incluso, segundos, lo que ocasiona que la condición de equilibrio no se cumpla, virtualmente, nunca. Factores tales como la viscosidad de la soldadura fundida, afectaran su capacidad de flujo, y por lo tanto pueden ser de mayor importancia cuando el tiempo es una limitante. Milner ha analizado el flujo del fluido entre dos platos paralelos horizontales considerando los factores de tensión superficial y viscosidad del fluido. La conclusión acerca de la velocidad de flujo de fluido a través de los platos paralelos $\frac{dl}{dt}$ obtenida a través de este estudio puede ser expresada como

$$\frac{dl}{dt} = \frac{(\gamma_{LV} D cos\theta)}{6nl}$$

Done $l$ es la logitud de los platos, $n$ es la viscosidad del fluido, $\gamma_{LV}$ es la tensión interfacial entre el fluido y la atmosfera o vapor que lo rodean, $D$ es el espacio en la unión, y $\theta$ es el ángulo de contacto entre el fluido y el plato. Por lo tanto, la velocidad de flujo del líquido a través de los platos paralelos $\frac{dl}{dt}$ se incrementa con una tensión interfacial creciente entre el líquido y el vapor $\gamma_{LV}$, un espacio mayor en la unión $D$, pero también, con un ángulo de contacto $\theta$, viscosidad $n$, y longitud de plato $l$, decrecientes.

Aplicando esta ecuación al esparcimiento de soldadura, $\gamma_{LV}$ puede re-escribirse como $\gamma_{LF}$, y representa la tensión interfacial entre la soldadura liquida (L) y el fundente (F). Dado que $\boldsymbol{\gamma_{LF} = \gamma_L - \gamma_F}$, de acuerdo con la regla de Antonow, para una dada tensión superficial $\gamma_L$, un incremento en $\gamma_{LF}$ dependería en un incremento en la tensión superficial del fundente $\gamma_F$. Por lo tanto, un

fundente con baja tensión superficial no solo aumentara el esparcimiento, sino que también incrementara la velocidad de flujo de la soldadura liquida. [N. C. Lee, 2002]

#### 3.4.3.1.3 Disolución del metal base

Los fenómenos de flujo y esparcimiento de la soldadura líquida sobre un sustrato de metal base no son suficientes para formar enlaces metalúrgicos, mismos que son necesarios para formar uniones de soldadura; tal como se demuestra al colocar soldadura liquida sobre una superficie de vidrio. Para poder formar un enlace metalúrgico, tanto la soldadura como el metal base tiene que mezclarse a un nivel atómico en la interfaz. Esto se logra típicamente a través de la disolución del metal base dentro de la soldadura en un nivel microscópico $(< 100\mu m)$.

Típicamente, el proceso de soldadura, en la industria electrónica, se lleva a cabo a temperaturas relativamente bajas y tiempos de ciclo cortos, esto debido principalmente a requerimientos implícitos en el uso de materiales o a consideraciones de eficiencia de producción. Es por esta razón que la disolución del metal base en la soldadura necesita ser razonablemente fácil y rápida. Para los sistemas estaño-plomo, los metales base o metalización aceptables incluyen, entre otros, al Sn, Pb, Bi, Au, Ag, Cu, Pd, Pt y Ni. La velocidad de disolución $\frac{dC}{dt}$, como una función de la temperatura, para algunas de estas metalizaciones en 60 Sn/40Pb, se muestra en la siguiente figura y puede ser representada por la relación de Arrhenius, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{dC}{dt} \propto e^{-E/kT}$$

Donde $C$ es la concentración del metal base, $E$ es la energía de activación, $k$ es la constante de Boltzmann y $T$ es la temperatura en Kelvin. La velocidad de disolución de un metal base en la soldadura es una función del tiempo, tal como se expresa en:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{KA(C_S - C)}{V}$$

Donde C es la concentración del metal base, $C_S$ es el límite de concentración del metal disuelto en la soldadura fundida en cualquier temperatura dada, $t$ es tiempo, $K$ es la constante de la

velocidad de disolución, $A$ es la superficie mojada y $V$ es el volumen de la soldadura fundida. Integrando la ecuación, la relación entre $C$ y $t$ puede ser expresada por una relación, donde $C$ alcanza el equilibrio en una relación exponencial inversa con $t$. La disolución del metal base en la soldadura es una función del tiempo y la temperatura, donde la disolución del metal base plata en estaño fundido se incrementa con tiempo y temperatura incrementales. Humpston y Jacobson reportaron que la condición de equilibrio puede alcanzarse en unos pocos segundos a la temperatura del proceso de acuerdo con sus cálculos, sugiriendo la posibilidad de predecir la composición de la unión de soldadura con un diagrama de fase en equilibrio.

La velocidad de disolución de un metal base en la soldadura no es tan solo una función del tiempo, la temperatura y el metal base, sino también del tipo de aleación de soldadura. Dicha velocidad puede ser cambiada alterando la concentración inicial del metal base en la soldadura mediante la ingeniería de la composición de la soldadura.

En general, la mojabilidad de la metalización parece aumentar con una velocidad de disolución incremental en la soldadura. Aunque este fenómeno puede estar relacionado a reacciones químicas, puede también ser atribuible al factor entropía, ya que la disolución de un metal base en soldadura resultará en un incremento en entropía. Dado que la velocidad de disolución aumenta con un aumento en la temperatura y el tiempo, esto permite un control sobre la disolución como un parámetro de proceso. Por otro lado, la fuerte influencia del tipo de metal base y el tipo de soldadura en la velocidad de disolución, indica la importancia que tiene la adecuada selección de materiales en la etapa de diseño o ingeniería.

Aunque la disolución del metal base es esencial para la formación de enlaces metalúrgicos, una velocidad de disolución demasiado elevada puede resultar en un severo problema de oxidación y por lo tanto perder los enlaces metalúrgicos. Además, esto puede también causar un cambio significativo en la composición de la soldadura y entonces, causar el deterioro de la confiabilidad de la unión. [N. C. Lee, 2002]

#### 3.4.3.1.4 Intermetálicos

Soldar involucra no solo la disolución física de los metales base en la soldadura fundida, sino también los productos de la reacción química entre el metal base y los componentes de la soldadura. Los productos formados a partir de la reacción son típicamente compuestos

intermetálicos (intermetallic compunds o IMC, por sus siglas en inglés) localizados en la interfaz entre la soldadura y el metal base. Los compuestos inter-metálicos son compuestos estequiométricos exactos que tienden a formarse cuando uno de los dos elementos es de carácter fuertemente metálico y el otro significativamente menor. Por ejemplo, los intermetálicos $Cu_6Sn_5$ y $Cu_3Sn$ se forman normalmente entre la soldadura estaño-plomo y el $Cu$ como metal base. Los intermetalicos tienden a ser duros y frágiles debido a que su estructura cristalina tiene una simetría baja, lo que limita su plasticidad.

El efecto de la formación de intermetálicos en la soldadura incluye: a) Una mejora en la mojabilidad de la soldadura sobre el metal base, b) Disminución de la velocidad de disolución del metal base en la soldadura debido al papel de la capa intermetálica como barrera de difusión y c) Un deterioro de la mojabilidad de superficies pre-estañadas debido a la oxidación de los intermetálicos. [N. C. Lee, 2002]

### 3.5 Encapsulación

La encapsulación provee un medio práctico y económico para proteger los circuitos integrados de contaminantes ambientales, y al mismo tiempo, les ofrece protección mecánica mediante la unión estructural de estos dispositivos con los componentes usados en el empaquetado para formar un empaquetado confiable.

El desempeño del encapsulamiento está determinado por su estabilidad dimensional, su resistencia a ciclos térmicos, su impermeabilidad ante contaminantes ambientales y su capacidad de disipación térmica, para trasladar el calor generado fuera del dispositivo. [Tummala, 2001]

#### 3.5.1 Protección química

Una de las funciones fundamentales con las que debe cumplir el encapsulamiento es la de proteger al dispositivo electrónico de contaminantes que se encuentran en el ambiente. La humedad, así como otros contaminantes ambientales, son factores que degradan severamente la vida útil de los productos electrónicos. Las sales y otras secreciones biológicas son solo ejemplos de elementos corrosivos que se encuentran normalmente en los ambientes en los que operan los dispositivos. [Tummala, 2001]

#### 3.5.1.1 Protección contra la humedad

La humedad es uno de los factores que más contribuyen a la falla de dispositivos electrónicos empaquetados, ya que degrada su desempeño y confiabilidad. La rápida desorción de humedad de un empaquetado a base de polímeros, durante el ensamble de segundo nivel (board level assembly), es una de las principales causas de delaminación entre la superficie del dispositivo y el plástico de moldeo. La presión del vapor acumulada en el interior del paquete puede llegar incluso a fracturarlo. Tanto la delaminación, como estas fracturas de los empaquetados, reducen severamente la confiabilidad de los dispositivos después de haber sido ensamblados. Estas situaciones han obligado a los fabricantes de circuitos integrados a usar métodos de empaque secos, en tanto que los ensambladores de sistemas han tenido que recurrir al horneado para eliminar humedad antes de utilizar los dispositivos empaquetados en sus procesos. Se ha confirmado que propiedades tales como la temperatura de transición vítrea $(T_g)$ y el módulo de Young $(E)$, de encapsulantes no-curados y envejecidos en presencia de humedad y a temperatura ambiente, serian significativamente más bajos que aquellos desarrollados en condiciones de almacenamiento en ambientes libres de humedad y curado posterior. Estas son indicaciones claras de que la humedad ataca por igual a materiales epóxicos curados y no curados, degradando sus propiedades mecánicas intrínsecas que son diseñadas para proteger los paquetes electrónicos. También ha sido confirmado que la fuerza de adhesión entre las bolas de soldadura y los materiales epóxicos de relleno (underfill) se deteriora si estos son envejecidos en condiciones de exposición a la humedad.

El abultamiento de los encapsulantes causado por la absorción de humedad, así como el correspondiente estrés por la misma causa, es uno de los principales motivos de falla en los dispositivos electrónicos. La absorción de agua para resinas epóxicas siguen una relación – en un principio - lineal con la raíz cuadrada del tiempo de exposición. Esta linealidad sugiere que la absorción está controlada por la difusión.

La ley de difusión de Fick establece que la cantidad de agua absorbida, $W_t$, en el tiempo, $t$, antes de alcanzar el equilibrio, es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo e inversamente proporcional al espesor del material $L$:

$$\frac{W_t}{W_e} = \frac{4}{L}\sqrt{\frac{Dt}{\pi}}$$

El equilibrio en el contenido de agua, $W_e$, de un encapsulante es una función exponencial en función de la humedad:

$$W_e = KH^{\alpha}$$

Donde $K$ y $\alpha$ son contantes dependientes de la temperatura. El equilibrio típico de contenido de agua para epóxicos es de 1.5 – 2% para la resina pura, y la constante de difusión $D$ para el agua en el epóxico es $1.5 \times 10^{-1}$ $m^2/_S$. La humedad puede ser absorbida con relativa facilidad dentro componentes moldeados con plásticos. Sin embargo, cuando estos componentes son sometidos al proceso de soldadura por refusión, la humedad absorbida se vaporiza, lo que ocasiona una enorme cantidad de presión que pudiese ser capaz de fracturar el componente. A esto se le llama efecto “pop-corn” o palomita de maíz. [Tummala, 2001]

#### 3.5.1.2 Protección contra sales

Los contaminantes iónicos, tales como el sodio, el potasio y el cloro, afectan la confiabilidad y en algunos casos el desempeño eléctrico de los dispositivos encapsulados. Las fuentes de sales pueden ser biogénicas (por ejemplo, el sudor) o abiogénicos (por ejemplo, del agua de mar o la operación de cortado). La corrosión de la metalización de los circuitos integrados se acelera en la presencia de estas sales. El espesor del encapsulante, el pH de la solución a la que se encuentra expuesto el dispositivo y el voltaje aplicado, son factores críticos para determinar la corrosión acelerada. [Tummala, 2001]

#### 3.5.1.3 Protección contra organismos biológicos

Esta protección se vuelve indispensable debido a que los insectos pueden ser atraídos por el campo eléctrico generado por el funcionamiento de un dispositivo electrónico. Estudios han revelado que los insectos son atraídos más fácilmente a campos eléctricos generados a altas frecuencias. [Tummala, 2001]

#### 3.5.1.4 Protección de contaminantes atmosféricos

Óxidos de nitrógeno $(NO_x)$ y dióxido de azufre $(SO_2)$ son ejemplos de gases corrosivos que se encuentran en la atmosfera y que pueden ser altamente dañinos para el correcto funcionamiento de los dispositivos electrónicos. Ambos están presentes en el aire como sub-productos de la quema de combustibles fósiles. Estos gases forman ácidos altamente corrosivos cuando entran en contacto con la humedad del aire. En la presencia de estos óxidos, la lluvia acida puede alcanzar niveles de pH tan bajos como 5 y tornarse extremadamente corrosiva. [Tummala, 2001]

### 3.5.2 Protección mecánica

La protección mecánica es otra función importante que el encapsulante le ofrece al empaquetado electrónico. Dispositivos alambrados (wirebonded) y con tecnología "flip-chip" tienen interconexiones de entrada y salida muy delicadas; alambre de alrededor de $25\mu m$ en el caso de los dispositivos alambrados o esferas de soldadura de hasta $50\mu m$ de diámetro en el caso de dispositivos "flip-chip". La integridad estructural provista por estas interconexiones con el siguiente nivel de ensamble es mínima. La protección mecánica es posible de dos maneras:

- Prevención de daños mecánicos mediante el uso de encapsulantes sobre el circuito integrado.
- Minimizar la tensión en las uniones de soldadura utilizando un material de relleno (underfill) entre el circuito integrado y el substrato donde ha sido montado.

El encapsulante, ya sea en su forma de compuesto de moldeo o líquido de relleno, puede ayudar a proteger estas estructuras delicadas dentro de un formato más robusto. [Tummala, 2001]

### 3.5.3 Procesos de encapsulación

Los procesos de encapsulación pueden clasificarse en dos categorías principales: Encapsulación por moldeo y liquida.

### 3.5.3.1 Moldeo por transferencia

La mayoría de los procesos de encapsulación, en el mercado de circuitos integrados empacados, son por moldeo por transferencia. El compuesto de moldeo, calentado y derretido, es transferido aplicando presión desde un deposito (embolo) a través de los corredores y dentro de las cavidades del molde. Este es un método simple y de bajo costo para la producción en masa de dispositivos encapsulados.

El moldeo por transferencia es un desarrollo a partir del moldeo por compresión en el que el compuesto de moldeo se introduce en una cavidad dentro del molde, de modo que al cerrar el molde el compuesto se transfiere hasta las diferentes cavidades de moldeo a través de una serie de canales. En la figura 26 se muestra un esquema de este proceso.

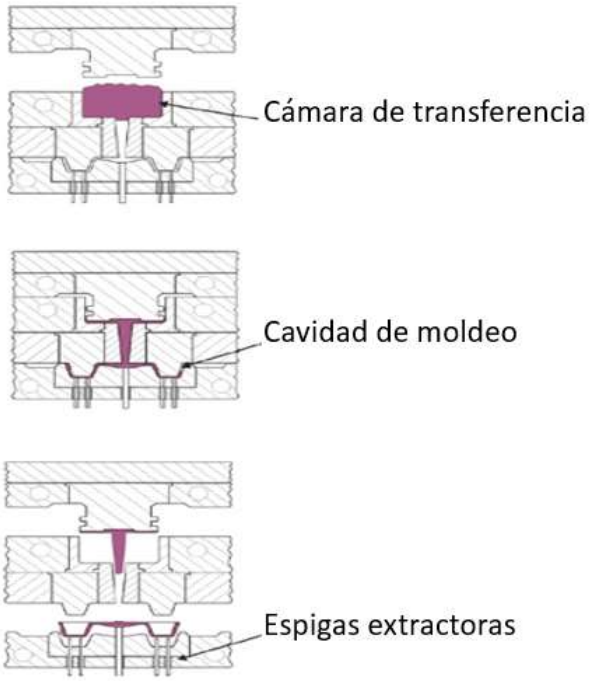



**Figura 26.** Esquema ilustrativo del moldeo por transferencia

El proceso de transferencia es, por lo tanto, un proceso intermedio entre la inyección y la compresión y presenta una serie de ventajas y desventajas respecto a estos. El moldeo por transferencia está indicado en el caso de que se deseen moldear muchas cavidades o cuando el llenado del molde con el material de moldeo resulte problemático (moldes muy planos, con inserciones metálicas, cuando se emplea polvo de moldeo de densidad aparente muy baja, etc.).

El ciclo en moldeo por transferencia suele ser algo más corto debido a la mejor transferencia de calor cuando el material circula por los canales. En contrapartida el moldeo por transferencia presenta una serie de desventajas frente al moldeo por compresión: el flujo del material a través del molde es más complejo, por lo que puede darse cierto grado de orientación; los moldes sufren más abrasión de modo que el mantenimiento es más costoso; los equipos son más complejos y más caros; y por último el material que queda en los canales tras el proceso es material de desecho, que no se puede reutilizar (nota: en la industria por lo general este material puede ser utilizado en bajas proporciones, reducido a polvo, como relleno en este u otros procesos de termoestables para reducir costos, pero reduciendo las propiedades técnicas de las piezas obtenidas). [Tummala, 2001]

#### 3.5.3.2 Moldeo por compresión

En el moldeo por compresión el material, líquido, en forma de polvo o de pastillas preformadas, se coloca en un molde caliente, y este se cierra lentamente, hasta que las dos mitades del molde ejercen presión sobre el material. Conforme el molde va cerrándose, el material es obligado a ocupar todas las partes de la cavidad de moldeo. En ciertos casos, es ventajoso realizar el moldeo cerrando primeramente el molde casi por completo y abriéndolo después de unos segundos antes de aplicar la presión definitiva. De esta forma se logra evacuar el gas que pudiese quedar atrapado entre el polvo de moldeo o que es generado en la reacción de polimerización. Una vez que el molde se ha cerrado completamente se aplica la máxima presión, que provoca el llenado final y completo de la cavidad. Bajo la acción conjunta del calor y la presión tienen lugar las reacciones de entrecruzamiento que transforma el material termoendurecible en termoestable, proceso que se conoce vulgarmente como “curado”. Tras el curado se abre el molde y se extrae la pieza totalmente sólida, que solamente alcanza su rigidez definitiva cuando se ha enfriado totalmente.

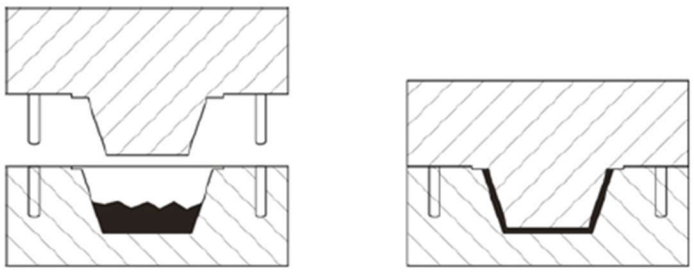


**Figura 27**. Esquema ilustrativo del moldeo por compresión

### 3.5.4 Requerimientos de encapsulación

Los encapsulantes deben poseer propiedades mecánicas, térmicas y químicas congruentes con su función como parte del empaquetado. El Flujo y la adhesión son dos de las principales propiedades físicas que deben ser observadas y optimizadas en los encapsulantes. Es deseable que el encapsulante posea un coeficiente de expansión térmica (CTE por sus siglas en inglés) cercano al de las uniones de soldadura, una temperatura de transición vítrea ($T_g$) que asegure la estabilidad dimensional durante las pruebas de confiabilidad, un módulo elástico que no contribuya a aumentar el estrés durante el ciclado térmico, un alongamiento en ruptura que sea más grande del uno por ciento y una baja absorción de humedad. Sin embargo, estas propiedades no están presentes en un epóxico sencillo. Una forma práctica de cumplir con estos requerimientos de los encapsulantes, consiste en el uso de formulaciones epóxicas compuestas de mezclas de epóxicos y rellenadores. [Tummala, 2001]

#### 3.5.4.1 Mecánicos

##### 3.5.4.1.1 Propiedades mecánicas

Una de las propiedades mecánicas más importantes de un buen encapsulante debe de ser su buen desempeño estrés-deformación. La siguiente figura muestra curvas de estrés-deformación de dos materiales encapsulantes. Un encapsulante ideal debería mostrar >1% de elongación en rompimiento, un módulo de tensión de 5-8 GPa y un mínimo cambio en sus propiedades a temperaturas cercanas al $T_g$. El material B, en la figura 28, muestra un aumento del estrés con la deformación muy alto, por lo que no es un material aceptable. Por otro lado, el material A se muestra como un material ideal. [Tummala, 2001]

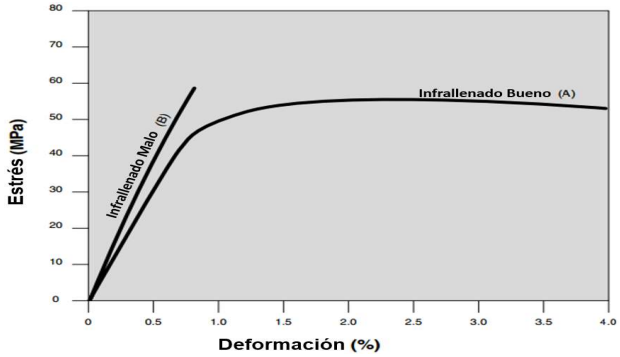



**Figura 28.** Curvas de estrés-deformación de materiales encapsulantes optimo (A) y no-deseable (B).

#### 3.5.4.1.1.1 Consideraciones termo-mecánicas

Muchos sistemas de polímeros sin rellenar exhiben cambios de hasta 4 veces el CTE arriba de las temperaturas de transición vítrea. Los cambios en CTE después de la temperatura de transición vítrea en encapsulantes rellenos, tales como los compuestos de moldeo y rellenadores, se encuentran en el rango de 2-5 veces. Idealmente el CTE de un compuesto de moldeo debe ser tan cercano al del Si $(2.6\ {}^{ppm}/_{\circ C})$ como sea posible; y el CTE de un material de relleno debe ser tan cercano al de una esfera de soldadura $(25\ {}^{ppm}/_{\circ C})$ como sea posible. Estas propiedades aseguran un nivel bajo de estrés entre el microcircuito y el material de relleno, así como entre la soldadura y el material de relleno. [Tummala, 2001]

#### 3.5.4.1.1.2 Estrés residual

Muchos sistemas de resinas usadas en encapsulamiento desarrollan varios niveles de estrés residual después del curado. Las dos fuentes principales de estrés residual provienen del encogimiento de la resina y de la carga termo-mecánica debida al desajuste de los CTEs de los materiales constituyentes, entre la temperatura de curado y la temperatura ambiente. El encogimiento volumétrico de polímeros posterior al curado es muy común; por ejemplo, resinas epóxicas se encogen entre 3-6% en volumen después de curadas, o 1-2% de sus dimensiones lineales. Este encogimiento, por sí mismo, produce un estrés residual de ~20 MPa después de curado. El grado de encogimiento volumétrico depende del tipo de reacciones de curado. Los sistemas epoxi-amina tienden a encogerse más que los sistemas epoxi-anhídridos. Modificadores epóxicos que se expanden durante el curado pueden ser adicionados al sistema de resina para reducir o eliminar el estrés por encogimiento. El estrés inducido por un desajuste en los coeficientes de expansión térmica se encuentra en el mismo orden de magnitud que el estrés debido al encogimiento. El estrés generado por un desajuste en CTE puede ser estimado mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = k \int_{25}^{T_g} E(\alpha_e - \alpha_s) dT \qquad [3]$$

Donde $\sigma$ es el estrés de película de epoxi, $E$ es el modulo elástico del epoxi, $k$ es una constante, $(\alpha_e - \alpha_s)$ es la diferencia en CTEs entre el epoxi y el sustrato, y $dT$ es el cambio infinitesimal de

temperatura; la integral se obtiene entre la temperatura ambiente y la $T_g$ del epoxi. [Tummala, 2001]

#### 3.5.4.1.2 Propiedades Térmicas

##### 3.5.4.1.2.1 Coeficiente de expansión térmica (CTE)

Los requerimientos de CTEs varían significativamente de acuerdo con el tipo de encapsulante requerido. Muchos sistemas a base de resina exhiben CTEs de $50 - 80\ ^{ppm}/_{\circ C}$ y por lo tanto requieren de la adición de un rellenador cerámico para reducir los CTEs. Entre más bajo el CTE, mejor, pero el CTE está normalmente dictado por cuanto rellenador de sílice (SiO2 - CTE $\sim 0.5\ ^{ppm}/_{\circ C}$) pueda ser integrado a la resina (CTE $\sim 60\ ^{ppm}/_{\circ C}$) sin comprometer el flujo y la adhesión durante el moldeo. En realidad, los compuestos de moldeo con CTE de $10 - 15\ ^{ppm}/_{\circ C}$ y rellenadores con CTE de $20 - 35\ ^{ppm}/_{\circ C}$ son comúnmente aceptados. [Tummala, 2001]

##### 3.5.4.1.2.2 Temperatura de transición vítrea $(T_g)$

La temperatura de transición vítrea se define como la temperatura a la cual tiene lugar la transición de solido a líquido. Arriba de esta temperatura, el módulo es bajo y cercanamente constante; mientras que debajo, está cerca de 3 órdenes de magnitud a lo indicado en la figura 29. La $T_g$ mide la transición de fase de los polímeros usados en encapsulates con respecto al cambio de temperatura. Arriba de $T_g$ muchos polímeros exhiben tanto como tres veces o más sus CTEs. En espacios confinados, tales como el espacio debajo de un dispositivo Flip-chip, estos cambios abruptos del CTE pueden ocasionar fallas catastróficas. Por esta razón particular, los sistemas robustos de relleno deben tener $T_g$ por arriba de las temperaturas de confiabilidad requeridas $(125℃\ o\ 150℃)$. [Tummala, 2001]

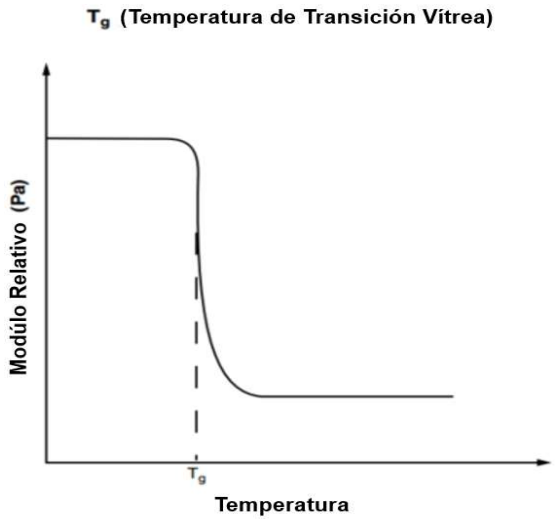



**Figura 29.** Temperatura de transición vítrea de polímeros

### 3.5.4.1.2.3 Flujo durante encapsulación

La forma inicial del compuesto de moldeo es un sólido preformado. Las características de flujo del compuesto fundido dentro del molde durante la operación de moldeo son críticas para obtener un rendimiento alto en el proceso. Por buenas características de flujo podemos mencionar la buena mojabilidad de las superficies a ser encapsuladas con el fin de evitar burbujas. La siguiente ecuación de Washburn representa un modelo simple, derivado del flujo entre platos paralelos, que describe el tiempo requerido por un material de relleno a fluir entre el espacio microcircuito-sustrato. [Tummala, 2001]

$$Tiempo\ de\ Relleno = \frac{3nL^2}{h\gamma \cos\theta}$$

Donde

$n = Viscosidad$
$L = Distancia\ de\ flujo$
$h = Espacio\ microcircuito - sustrato$
$\gamma = Tension\ superficial$
$\theta = Angulo\ de\ mojado$

#### 3.5.4.1.3 Propiedades físicas

##### 3.5.4.1.3.1 Adhesión

La adhesión se define como la medida de la fuerza entre dos interfaces. Un sistema de encapsulación robusta provee una adhesión fuerte hacia las interfaces del dispositivo encapsulado, de tal forma que la integridad mecánica del paquete pueda mantenerse bajo estrés térmico. Ambos enlaces químicos (covalente) y por las fuerzas de van del Waals pueden ser incorporados en el sistema con resultados deseables. Algunos ejemplos de cambios que pueden llevarse a cabo para mejorar la adhesión entre superficies incluyen: a) La adición de promotores de adhesión en las formulaciones del encapsulante y b) El uso de limpieza con plasma para mejorar el enlace químico y rugosidad de la superficie de las interfaces dispositivo-sustrato. La progresión de una falla por adhesión en paquetes electrónicos se origina de la siguiente manera: Comienzo del daño, formación de micro-fracturas, crecimiento de la separación y finalmente, delaminación interfacial. Los promotores de adhesión proveen una buena unión entre interfaces, de tal forma que el daño iniciado por carga termo-mecánica puede ser minimizado. Aditivos tales como fortalecedores que son incorporados en las formulaciones de los encapsulantes, también ayudan a limitar el crecimiento de micro-fracturas y la progresión del despegado de interfaces.

##### 3.5.4.1.3.2 Interfaces.

Una interfaz se define como cualquier capa física o química, típicamente de magnitud atómica que se encuentra entre dos materiales. La adhesión interfacial robusta entre la pasivación dura del dispositivo (dióxido de silicio, nitruro de silicio, oxinitruro de silicio), o recubrimientos suaves de amortiguación (poliamidas o benzo-ciclobuteno encima de la pasivación dura) es la primera línea de defensa en contra de las fallas por adhesión. La adhesión entre el encapsulante y los alambres (para dispositivos alambrados) o esferas de soldadura (para dispositivos flip-chip) pasa a segundo término. Las interfaces entre la máscara de soldadura, sustratos (FR-4, BT, cerámicos) y los materiales encapsulantes, requieren de una buena adhesión para evitar fallas en el paquete. [Tummala, 2001]

### 3.5.5 Materiales encapsulantes

Los materiales encapsulantes más comunes caen dentro de cuatro categorías genéricas: Epóxicas, cianato de éster, silicón y uretano. Todos los encapsulantes involucran alguna forma de polimerización o reacciones entrelazadas para mejorar aún más las propiedades mecánicas del sistema de empaquetado. [Tummala, 2001]

#### 3.5.5.1 Epóxico y materiales relacionados

Este es el sistema más comúnmente usado en la tecnología de encapsulación. La polimerización epóxica es rápida y limpia, no produce volátiles y ha sido muy bien estudiada. Tres agentes de curado o endurecedores son típicamente usados en los sistemas de encapsulantes a base de epóxicos: anhídridos, aminas y fenólicos. [Tummala, 2001]

##### 3.5.5.1.1 Anhídridos-Epóxicos

Este sistema ofrece un enlazado de poliéster que puede ser susceptible a hidrolisis. La relativamente alta presión de vapor de los anhídridos a las temperaturas de curado $(\sim 150 - 175℃)$ puede plantear un problema estequiométrico debido a la pérdida del anhídrido por vaporización. Para evitar dicho problema, los encapsulantes que contienen anhídridos tienen que someterse a una etapa gelificante intermedia a una temperatura más baja $(\sim 125℃)$ antes de que sean curados a una temperatura final más elevada. A pesar de este inconveniente, los sistemas epoxi-anhídrido son los caballos de batalla para la operación de encapsulación liquida. La figura 30 muestra un sistema típico de encapsulantes epoxi-anhídrido que consiste de una mezcla de dos epóxicos y un anhídrido. [Tummala, 2001]

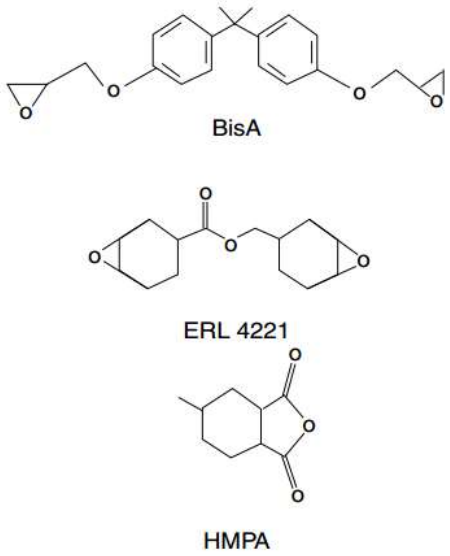



**Figura 30.** Estructuras de ingredientes comunes usados en rellenadores

#### 3.5.5.1.2 Amina-Epoxi

Este sistema es menos popular debido al hecho de que las aminas más efectivas se encuentran en estado sólido o liquido viscoso y por lo tanto requieren de un solvente para disolverlo en la formulación. La presencia de solventes en los encapsulantes puede ocasionar vacíos o burbujas durante el curado y puede también plastificar la estructura del epóxico lo que actúa debilitando su fuerza mecánica. [Tummala, 2001]

#### 3.5.5.1.3 Fenólico-Epoxi

Este sistema es usado principalmente en compuestos de moldeo debido a su naturaleza sólida. La reacción de curado fenólica es la más lenta de entre los tres sistemas, por lo que a menudo es necesario realizar un curado posterior al moldeo, por unas cuantas horas a 180℃. Los polímeros epóxicos curados por fenólicos también exhiben las propiedades mecánicas más deseables debido a que carecen de otras estructuras disruptivas tales como ésteres y aminas. Estas estructuras disruptivas también ocasionan una mayor susceptibilidad del polímero a ganar más humedad. Algunas de las estructuras aromáticas más comúnmente usadas se ilustran en la figura 31. [Tummala, 2001]

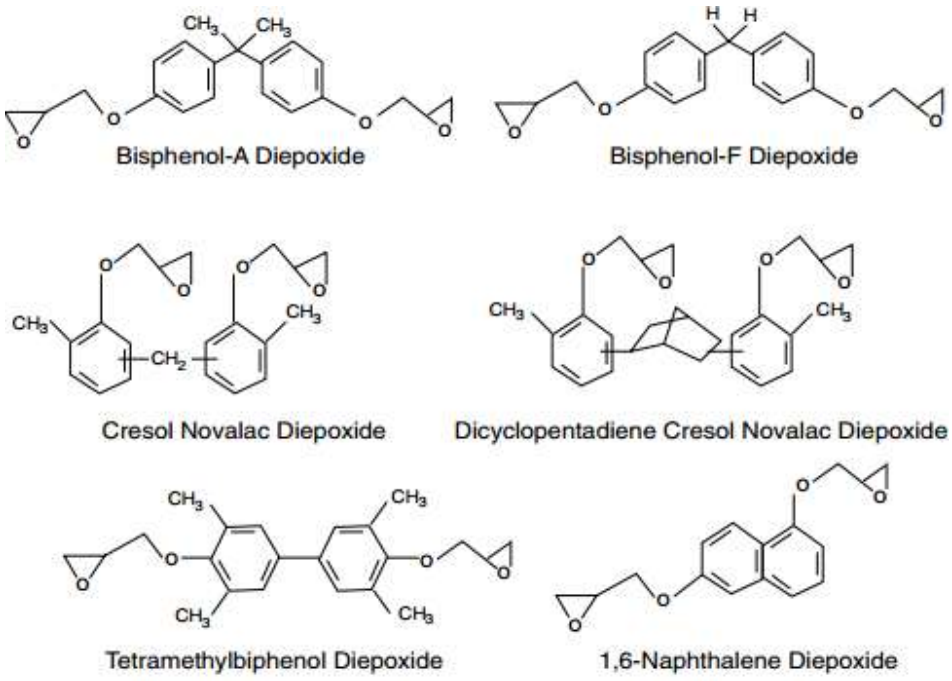



**Figura 31.** Estructuras de resinas epóxicas aromáticas comunes

### 3.5.5.2 Uretanos

El Uretano constituye un ingrediente principal de muchos recubrimientos de conformación, los cuales son usados para proteger las tarjetas de circuito impreso de golpes térmicos, salpicaduras de fluidos de motor, humedad, atmosferas corrosivas y otros ambientes adversos. Los recubrimientos de uretano muestran una buena adhesión a las tarjetas de circuito y también proveen de alivio de estrés a los paquetes electrónicos y en algunas ocasiones ofrecen un nivel de protección a los dispositivos que es comparable con el que se encuentra en paquetes sellados herméticamente. [Tummala, 2001]

### 3.5.5.3 Silicones

El silicón fue uno de los primeros polímeros orgánicos usados para el encapsulado de dispositivos electrónicos. Su estabilidad térmica y conformidad se encuentran entre las características más atractivas que hacen del silicón el material a escoger. Su bajo $T_g(\sim 125℃)$, extremadamente alto CTE $(300 - 800\ {}^{ppm}/_{\circ C})$, y bajo modulo, limitan su aplicación a las áreas de recubrimientos de conformación, selladores y rellenadores de cavidades. [Tummala, 2001]

## 3.6 Mecanismos de difusión de humedad, abultamiento higroscópico y degradación de adhesión en compuestos epóxicos de moldeo.

### 3.6.1 Difusión de humedad en un paquete vs volumen de compuesto de moldeo

Los paquetes plásticos y sus respectivos volúmenes de compuesto epóxico de moldeo exhiben un comportamiento similar en términos de adsorción de humedad. En ambos casos, se observan tres etapas características: Una primera fase lineal de la curva de adsorción, seguida de una pequeña meseta y finalmente una segunda etapa lineal. Sin embargo, existen algunas diferencias en términos de las tasas de difusión, lo que sugiere la existencia de otros mecanismos de difusión presentes en los paquetes plásticos.

#### 3.6.1.1 Difusión de humedad interfacial

En general las tasas de difusión de humedad a lo largo de las interfaces adhesivo-sustrato son más altas que aquellas que existen entre el volumen del compuesto de moldeo y el adhesivo. Davis et al. utilizaron la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica e investigaron epóxicos adheridos a aluminio con diversas preparaciones de superficie que resultaban en interfaces fuertes o débiles y observaron que la tasa de crecimiento de fracturas era más lenta para las interfaces fuertes. Sin embargo, para interfaces débiles, el desarrollo de fracturas era detectado casi de inmediato ya que aparecía humedad en la interfaz lo que conducía a una tasa elevada de crecimiento para las fracturas. Zanni et al. Compraron las tasas calculadas de difusión entre especímenes adhesivos no adheridos y uniones adheridas. Ellos observaron que el coeficiente de difusión interfacial era superior que el del adhesivo en volumen e hipotetizaron la existencia del fenómeno “difusión capilar”, donde la energía de superficie elevada del adhesivo seco atraía humedad a lo largo de la interfaz.

Estos ejemplos sugieren que la difusión de agua en uniones adhesivas no es un proceso simple y puede involucrar distintos caminos para el ingreso de humedad, dependiendo de la química del sistema y la morfología interfacial.

#### 3.6.1.1.1 Acomodo de la humedad en las interfaces

Otra posible explicación para una concentración ligeramente mayor de humedad en los paquetes plásticos comparados con el volumen del compuesto de moldeo, es la de una posible existencia de estrés residual que causa daños en una escala nanoscópica a lo largo de las interfaces. Buchwalter estudio el efecto del estrés aplicado a danos en las interfaces de un empaquetado plástico causadas por la presencia de humedad. Uso una prueba de cuña aplicada a las uniones adhesivas y concluyó que el estrés mecánico puede trabajar en conjunto a la humedad, para ocasionar daños interfaciales distintos a los ocasionados únicamente por la presencia de humedad.

### 3.6.1.2 Difusión de humedad en microcircuitos encapsulados

La difusión de agua en los polímeros obedece en muchos casos a una tasa de difusión constante (modelo de Fick). La segunda ley de Fick puede aplicarse para describir el proceso de difusión de humedad en estos materiales.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C)$$

Donde D ($mm^2/s$) es el coeficiente de difusión, C ($g/mm^3$) es la concentración de humedad, t (s) es el tiempo y x (mm) es la referencia a las coordenadas en el plano cartesiano. Para materiales isotrópicos, la segunda ley de Fick puede simplificarse como se muestra a continuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right)$$

Considerando el caso unidimensional de un plato infinito de espesor $l$ con condiciones de frontera apropiadas, la solución analítica para la concentración de humedad temporal y espacial, $C$, en el tiempo $t$ y distancia $x$ desde el plano medio es dada por

$$\frac{C_t - C_0}{C_\infty - C_0} = 1 - \frac{4}{\pi}\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} e^{\left(\frac{-D(2n+1)^2\pi^2}{4l^2}\right)} \times \cos\left(\frac{(2n+1)\pi}{2l}x\right)$$

Donde $C_\infty$ es la concentración máxima en equilibrio, $C_0$ es el contenido de humedad inicial y $D$ es el coeficiente de difusión de Fick.

Ya que no es posible medir, de forma experimental, la concentración de humedad en un punto, se integra la expresión anterior sobre el espesor del volumen y la ganancia fraccional de masa del espécimen como función del tiempo es:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2x+1)^2}e^{\left(\frac{-D(2n+1)^2\pi^2}{4l^2}t\right)}$$

Donde $M_t$ es la masa correspondiente la absorción de humedad después de un tiempo $t$ y $M_\infty$ corresponde a la masa de la muestra saturada. La ecuación anterior implica que la masa de humedad de una muestra polimérica expuesta a un ambiente húmedo obedece un comportamiento asintótico, para el cual existe un estado de saturación. En otras palabras, si dos muestras de diferente espesor son sometidas a un ambiente húmedo, la ganancia final de humedad definida por la ecuación anterior, será la misma en ambos casos; sin embargo, el tiempo que tome alcanzar el máximo dependerá del espesor de la muestra.

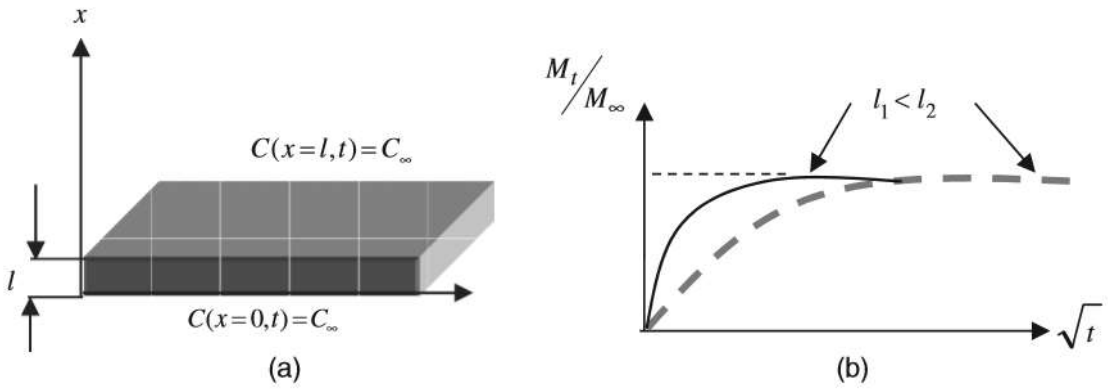



**Figura 32.** Estructuras de resinas epóxicas aromáticas comunes

### 3.6.2 Desorción de humedad

La desorción de humedad en compuestos epóxicos de moldeo ocurre durante el proceso de refusión. De igual forma, es importante entender los mecanismos de desorción de humedad, ya que durante en ensamble de microcircuitos encapsulados, estos son sometidos a procesos de

horneado para eliminar humedad y de esta forma reducir la probabilidad de encontrar fallas relacionadas con esta condición, tales como el efecto “pop-corn” y la delaminación interfacial.

Datos experimentales han confirmado el hecho de que muestras con un contenido de humedad inicial alto, muestran un nivel residual alto al final de un ciclo de desorción. Esto sugiere que un tiempo prolongado de exposición a la humedad puede conducir a un contenido más elevado de “humedad no reversible” a determinada temperatura. El horneado a temperaturas elevadas (por ejemplo: 160 °C) conduce a una mayor liberación de humedad y un nivel más bajo de humedad residual. Esto puede significar que para romper los enlaces de hidrogeno entre las moléculas de agua y las cadenas de polímeros, se requiere cierta cantidad de energía, misma que no está presente o disponle a bajas temperaturas (ejemplo: 110 °C).

El espesor de la muestra parece ser otro factor importante para la medición de la cantidad de humedad residual. Muestras de mayor espesor muestran una retención más alta cuando se comparan con muestras de espesor delgado. Esta condición parece lógica siempre que las muestras más gruesas requieren de más tiempo para alcanzar un cierto nivel de humedad durante un ciclo de absorción. Como ya se mencionó antes, una exposición prologada a la humedad resulta en una cantidad mayor de enlaces de hidrogeno no reversibles y consecuentemente un valor de humedad residual mayor. Esto sugiere una formación prematura de enlaces de hidrogeno durante etapas tempranas de la exposición a la humedad.

### 3.6.3 Abultamiento higroscópico

Las moléculas de agua en los materiales poliméricos pueden encontrarse en dos estados distintos: un estado libre que es atribuible a las moléculas de agua presentes en vacíos o nano-poros en el material y que puede moverse con libertad a través de los volúmenes huecos del polímero; un segundo estado también formado por moléculas de agua las cuales alteran las cadenas del polímero y son llamadas moléculas enlazadas. Las moléculas de agua enlazadas reaccionan con las cadenas del polímero mediante enlaces de hidrógeno. Se cree que el abultamiento inducido por humedad en los polímeros, es el resultado de enlaces de hidrógeno y que la presencia de moléculas de agua en los volúmenes huecos del polímero tiene una contribución modesta a la aparición del llamado abultamiento higroscópico.

A temperatura ambiente, el pandeo de un paquete “seco” está gobernado por dos factores: El primer mecanismo es el encogimiento del compuesto epóxico de moldeo una vez que ha sido curado, debido al entrelazamiento de las cadenas de polímero durante el proceso de moldeo. El segundo mecanismo consiste en la disparidad de los coeficientes de expansión térmica de los distintos materiales que conforman el empaquetado. Cuando los paquetes absorben humedad, el abultamiento higroscópico del compuesto epóxico de moldeo actúa como un tercer mecanismo y afecta la dirección del pandeo debido a un fenómeno de expansión inducida por la presencia de humedad en el compuesto de moldeo.

La cantidad de deformación originada por el cambio dimensional es linealmente proporcional a la concentración de humedad

$$\varepsilon_h = \beta C$$

Donde $\varepsilon_h$ es la deformación higroscópica, $\beta$ $(\frac{mm^3}{g})$ es el coeficiente de abultamiento higroscópico y $C$ $(\frac{g}{mm^3})$ es la concentración de humedad.

# Capítulo 4. Experimentación y análisis de resultados.

## 4.1 Materiales y métodos

### 4.1.1 Equipo requerido

#### 4.1.1.1 Cámara de humedad y temperatura (remojo)

Esta prueba requiere del uso de una cámara de humedad capaz de operar a 85 °C/85% de humedad relativa (RH), 85 °C/60% de RH y 30 °C/60% de RH. La tolerancia para la temperatura y la humedad relativa dentro del área operativa de la cámara debe mantenerse en ± 2 °C y ± 3% respectivamente.

Modelo: TSE-11-A
Marca: ESPEC

**Figura 33.** Cámara de temperatura y humedad ESPEC, modelo TSE-11-A

#### 4.1.1.2 Horno de refusión

Un sistema de horno de refusión que sea capaz de mantener los perfiles de temperatura requeridos por el estándar.

Modelo: N70-i124SWH
Marca: TSM

**Figura 34.** Horno de refusión TSM, modelo N70-i124SWH

#### 4.1.1.3 Microscopio óptico

Un microscopio óptico capaz de alcanzar una magnificación mínima de 40x

Modelo: ECLIPSE LV150N
Marca: NIKON

**Figura 35.** Microscopio óptico Nikon, modelo ECLIPSE LV150N

#### 4.1.1.4 Equipo de Prueba Eléctrica

Equipo de prueba eléctrica capaz de realizar pruebas funcionales y de corriente directa a temperatura ambiente.

Modelo: ASL 3000RF
Marca: Credence

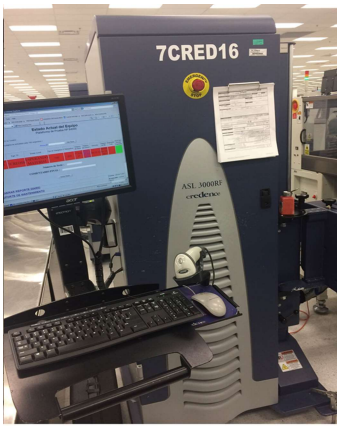



**Figura 36.** Equipo de prueba eléctrica Credence, modelo ASL 3000RF

#### 4.1.1.5 Horno

Un equipo para hornear capaz de operar a temperaturas de 125 +5/-0 °C.

Modelo: Blue M DCC-206-B-MP550
Marca: TPS

**Figura 37.** Horno de cámara TPS, modelo Blue M DCC-206-B-MP550

### 4.1.2 Método: Pre-acondicionamiento

Se trata de un método de prueba estandarizado para dispositivos de montaje superficial no-herméticos, que es representativo de una operación, típica en la industria, donde suceden múltiples procesos de refusión. La intención es que cualquier dispositivo de montaje superficial sea sometido a una secuencia apropiada de pre-acondicionamiento antes de ser sometidas a pruebas para evaluar la confiabilidad de largo plazo del dispositivo.

#### 4.1.2.1 Procedimiento

El siguiente diagrama a bloques ilustra el flujo del material en cada etapa para esta prueba estandarizada. Las condiciones específicas a las que será sometido el material durante la etapa de remojo y refusión pueden ser consultadas en el estándar JEDEC: JESD22-A113D.

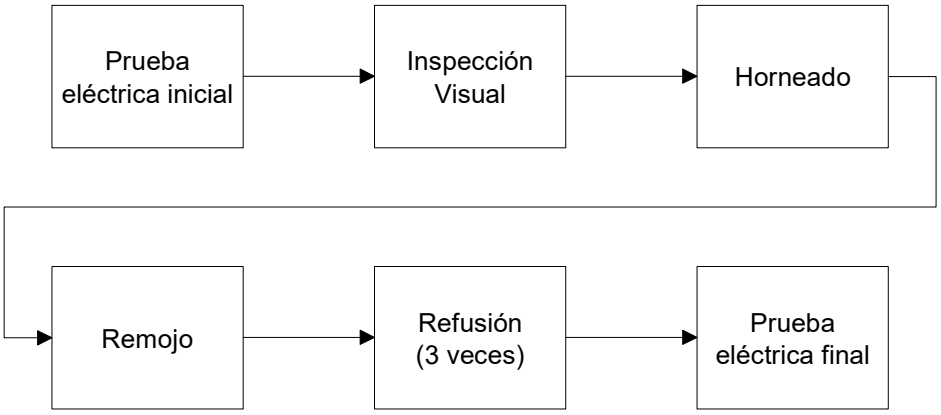



**Figura 38.** Diagrama a bloques del proceso de preacondicionamiento

## 4.2 Mecanismo de falla para la ocurrencia de extrusión de soldadura

### 4.2.1 Análisis de causas potenciales

A continuación, se muestra un resumen de las causas probables, en la forma de un diagrama de Ishikawa, que pueden dar lugar al fenómeno de extrusión de pasta de soldadura en el marco de los procesos de fabricación, equipos, materiales y personal involucrados en la manufactura de dispositivos MCM.

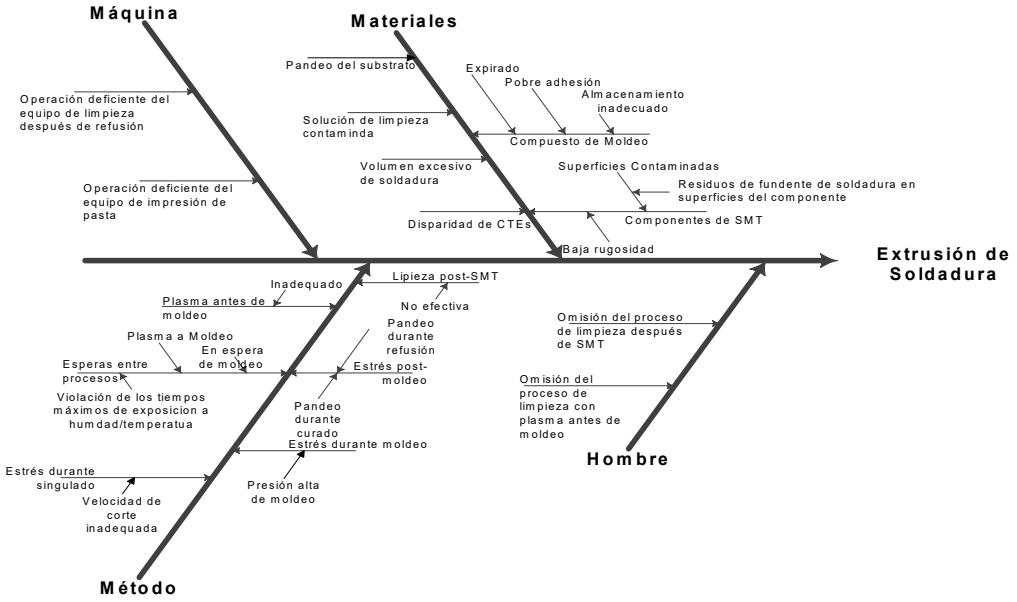



**Figura 39.** Diagrama de Ishikawa para las causas potenciales del fenómeno de extrusión de soldadura

## 4.3 Experimento 1: Residuos de fundente y condición de limpieza

Este primer experimento se diseñó para poner a prueba la primera de las hipótesis citadas en este trabajo de investigación. Como ya se postulaba desde un principio, las causas que pueden comprometer la integridad de la adhesión del encapsulaste y los componentes de SMT son:

a) Residuos del fundente de pasta localizados sobre las superficies de los componentes de SMT.
b) Re-deposición de contaminantes debido al uso de solvente saturado o contaminado durante el proceso de limpieza.

### 4.3.1 Diseño del experimento 1

Se consideraron dos factores como parte de un diseño de experimentos factorial completo:

a) Pasta de soldadura
b) Condición de limpieza posterior a SMT

Para cada factor se contemplaron los siguientes niveles:

**Tabla 6.** Factores y niveles considerados para su evaluación como parte del experimento 1

| Factor | Niveles | | | |
|---|---|---|---|---|
| Pasta de Soldadura | Actual (Senju) | PHW | M10-NXC | M10-LCS50 |
| Condición de limpieza | Sin Lavar | Solvente Saturado | Solvente Limpio | |

Las pastas de soldadura fueron seleccionadas con apoyo del fabricante, considerando su compatibilidad con el solvente usado durante el proceso de limpieza que tiene lugar después de la refusión de la soldadura. La siguiente matriz muestra los resultados de las pruebas de limpieza de residuos de fundente que fueron realizadas con cada una de las formulaciones de pasta de soldadura. Resulta claro que los residuos de fundente de la pasta “Actual” pueden no ser removidos en su totalidad durante el proceso de limpieza, tal como se puede apreciar en las imágenes que aparecen al calce.

En cuanto a la condición de limpieza, pruebas anteriores realizadas con apoyo del instituto de ingeniería de UABC y la UAG, habían revelado una diferencia aparentemente significativa en la aparición y distribución de contaminantes orgánicos en muestra procesadas bajos tres condiciones de limpieza diferentes: a) muestras sin lavar, b) muestras lavadas con solvente limpio y c) muestras lavadas con solvente saturado. Por este motivo, se decidió proceder con la inclusión de estos mismos niveles para la evaluación de este factor como parte de este primer experimento.

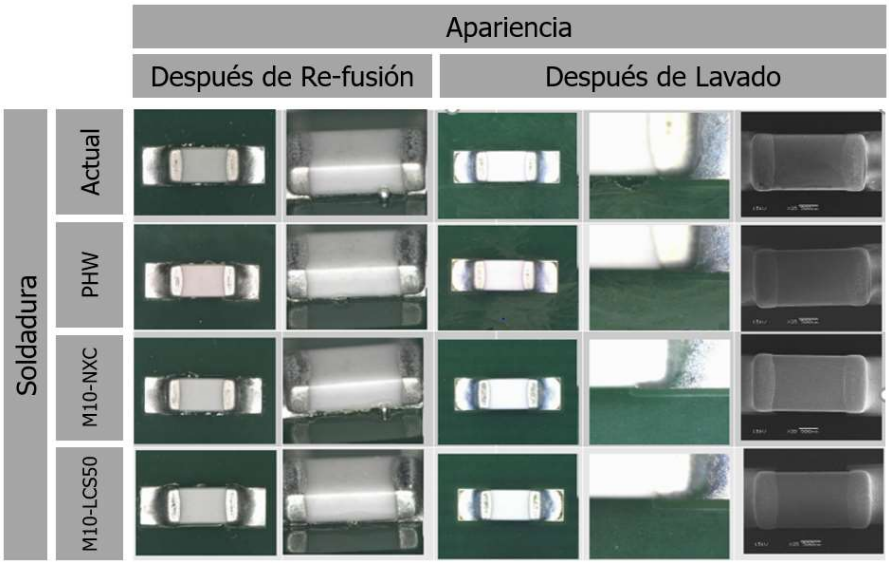



**Figura 40.** Pruebas de refusión y lavado realizadas a muestras fabricadas con los distintos tipos de soldadura considerados en el experimento 1.

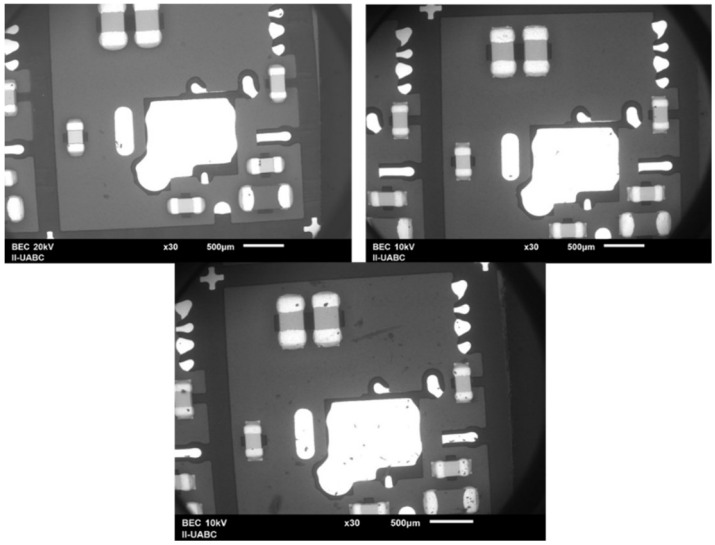



**Figura 41.** Imágenes de microscopia electrónica de barrido tomadas en muestras de dispositivos MCM lavadas bajo diferentes condiciones de saturación del solvente de limpieza.

### 4.3.2 Vehículo de pruebas

El vehículo de pruebas fue seleccionado con base a la información histórica disponible relacionada con el fenómeno bajo investigación. Se determinó que el producto conocido como SKY77528 presentaba la incidencia histórica más alta de fallas a causa de la extrusión de soldadura. El producto es un MCM relativamente denso; cuenta con una base de 3 microcircuitos

interconectados, a través de alambre de oro, a un substrato de 4 capas, populado con 43 componentes de SMT que varían en tamaño desde 01005, pasando por 0201 hasta 0402. El componente con la mayor incidencia de fallas relacionada con la extrusión de pasta de soldadura es la identificada como “C99”. Se trata de un capacitor de SMT de tamaño 0402, localizado cerca de la esquina inferior derecha del MCM.

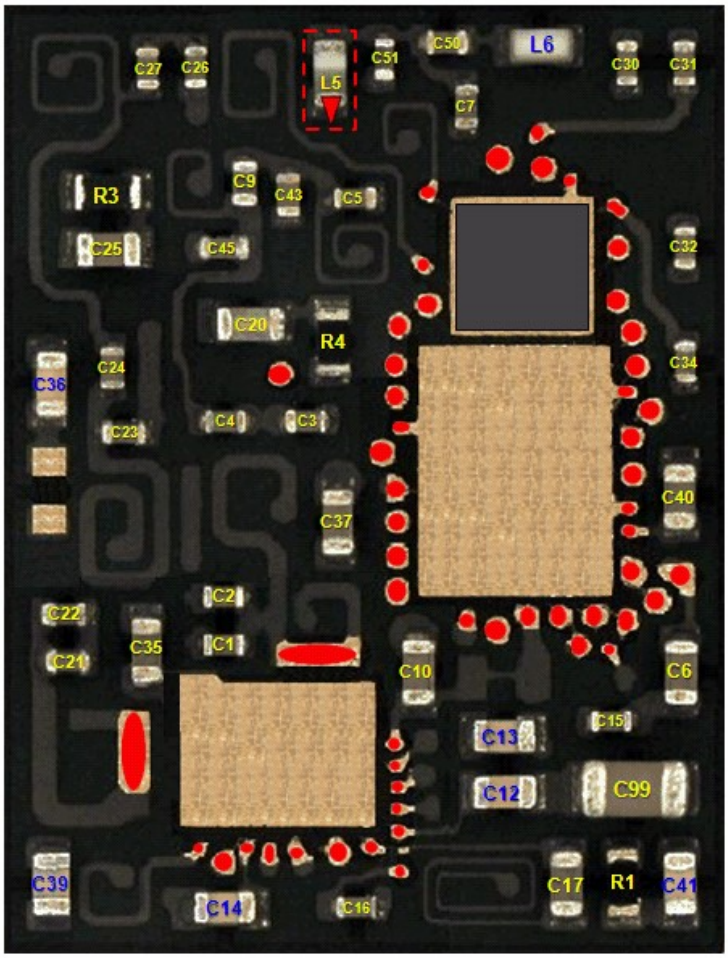



**Figura 42.** SKY77528 – Vehículo de pruebas seleccionado para la experimentación

### 4.3.3 Matriz experimental

Se trata de un diseño factorial completo, compuesto de 2 factores evaluados en 3 y 4 niveles cada uno. La matriz experimental y el tamaño de muestra es como se muestra en la tabla siguiente:

**Tabla 7.** Matriz de tratamientos para el experimento 1

| Tratamiento | Pasta de Soldadura | Condición del Solvente | Tablillas por Tratamiento |
|---|---|---|---|
| 1 | Actual | Limpio | 2 |
| 2 | Actual | Saturado | 2 |
| 3 | Actual | Sin Lavar | 2 |
| 4 | PHW | Limpio | 2 |
| 5 | PHW | Saturado | 2 |
| 6 | PHW | Sin Lavar | 2 |
| 7 | M10-NXC | Limpio | 2 |
| 8 | M10-NXC | Saturado | 2 |
| 9 | M10-NXC | Sin Lavar | 2 |
| 10 | M10-LCS50 | Limpio | 2 |
| 11 | M10-LCS50 | Saturado | 2 |
| 12 | M10-LCS50 | Sin Lavar | 2 |

### 4.3.4 Respuestas de interés

Las respuestas de interés medidas y evaluadas como parte de este primer experimento fueron las que se muestran a continuación:

**Tabla 8.** Matriz de respuestas de interés evaluadas para el experimento 1

| No. | Respuesta | Metrología | Tipo de Variable | Tamaño de Muestra |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Volumen de pasta depositada | Equipo de medición de pasta automática (SPI, por sus siglas en ingles). | Continua | 2 Tablillas de circuito impreso por tratamiento |
| 2 | Vacíos en las uniones de soldadura | Rayos-X | Discreta | 3 módulos por tipo de pasta de soldadura |
| 3 | Residuos visibles del fundente de soldadura | Inspección Visual | Atributo | 100% |
| 4 | Delaminación | Microscopia acústica de barrido confocal (C-Sam) | Atributo | 2 Tablillas de circuito impreso por tratamiento |
| 5 | Prueba eléctrica post-pre-acondicionamiento MSL3 | Rendimiento eléctrico | Continua | 100% |
| 6 | Fallas confirmadas | Análisis de fallas | Discreta | Todas las fallas |

### 4.3.5 Flujo de ensamble y prueba

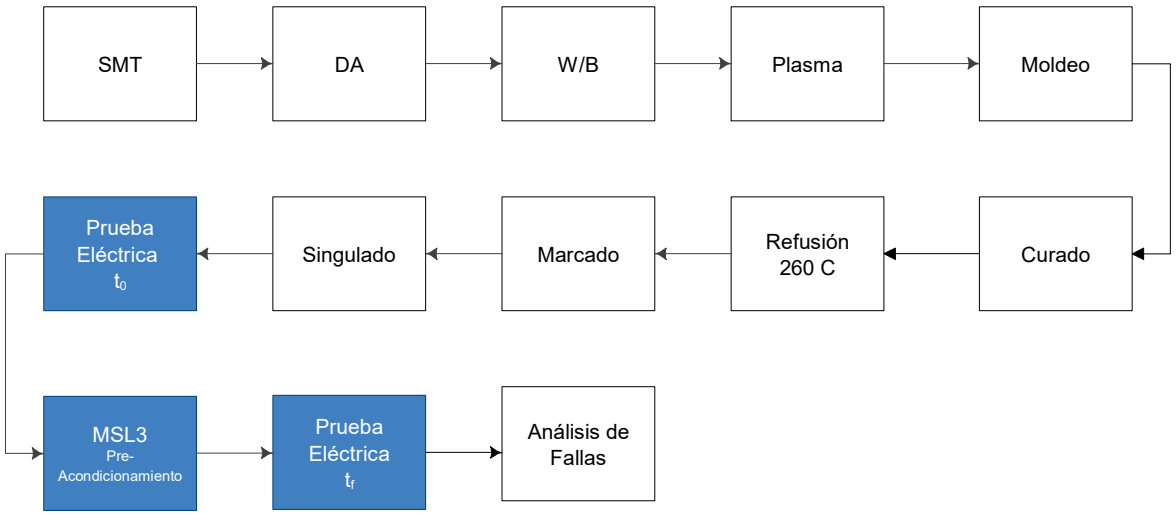
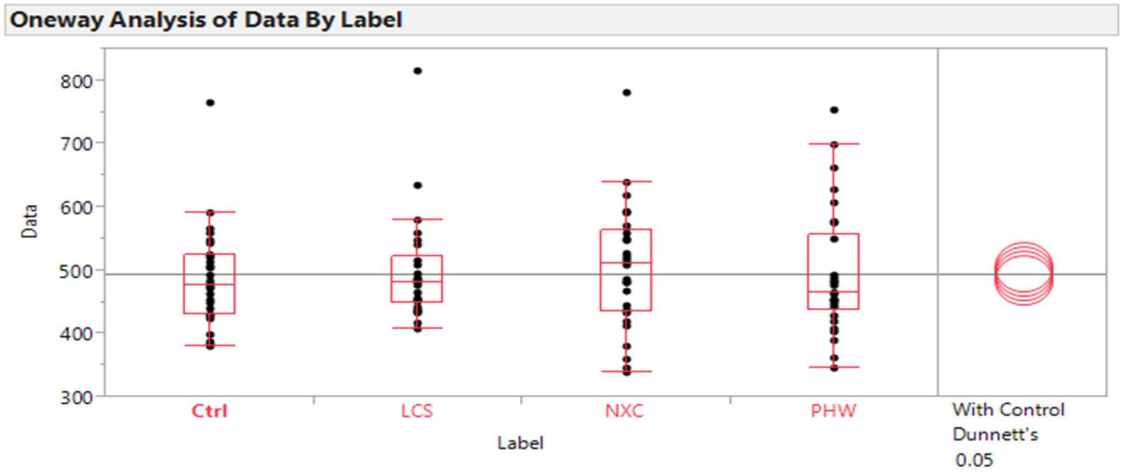



**Figura 43.** Flujo de ensamble y prueba empleado para la evaluación de los diferentes tratamientos considerados en el experimento 1.

### 4.3.6 Análisis de respuestas de interés y resultados.

#### 4.3.6.1 Volumen de pasta depositada

La medición de volumen de pasta se realizó usando un equipo de inspección de pasta automático (SPI). En ninguno de los casos se aprecia una diferencia estadísticamente significativa entre los promedios de volumen de pasta de soldadura depositada entre las muestras de los diferentes tratamientos. En este sentido, el resultado de la presión hidrostática resultante del cambio de fase de soldadura de su estado sólido a liquido debería ser igual en todos los tratamientos evaluados como parte de este primer experimento.




**Quantiles**

| Level | Minimum | 10% | 25% | Median | 75% | 90% | Maximum |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ctrl | 380.64 | 385.731 | 430.7425 | 476.72 | 524.03 | 566.012 | 764.27 |
| LCS | 406.67 | 434.202 | 449.0325 | 481.82 | 521.3775 | 578.95 | 816.73 |
| NXC | 338.14 | 362.046 | 435.385 | 511.335 | 562.6975 | 619.389 | 782.35 |
| PHW | 346.85 | 391.172 | 438.2075 | 464.115 | 556.6325 | 659.244 | 753.6 |

**Means Comparisons**

**Comparisons with a control using Dunnett's Method**

Control Group = Ctrl

**Confidence Quantile**

| \|d\| | Alpha |
|---|---|
| 2.38017 | 0.05 |

**LSD Threshold Matrix**

| Level | Abs(Dif)-LSD | p-Value |
|---|---|---|
| NXC | -32.9 | 0.6641 |
| LCS | -41.6 | 0.8957 |
| PHW | -47.6 | 0.9805 |
| Ctrl | -54.6 | 1.0000 |

Positive values show pairs of means that are significantly different.

**Figura 44.** Análisis de varianza para las medias de volumen de pasta impreso por soldadura utilizada.

### 4.3.6.2 Vacíos en las uniones de soldadura

Esta validación se realizó usando un equipo de inspección de rayos X. Los parámetros del equipo se mantuvieron sin cambio para todas las piezas inspeccionadas en 100 $\mu A$ y 100 $kV$. En ningún caso se observaron diferencias significativas en la apariencia de las uniones de soldadura, por lo que se descarta la posibilidad de la existencia de cualquier tipo de efecto colateral asociados con la existencia de vacíos en las uniones de soldadura. Algunas imágenes representativas de las inspecciones realizadas se muestran en la figura #

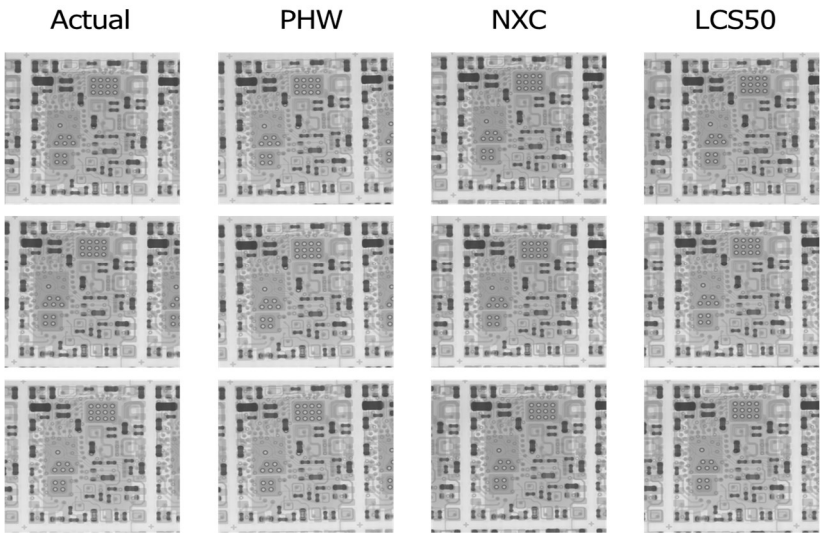



**Figura 45.** Imágenes representativas de las inspecciones realizadas en rayos X, en busca de vacíos en las uniones de soldadura, a muestras agrupadas por tipo de pasta de soldadura.

#### 4.3.6.3 Residuos visibles del fundente de soldadura

La inspección por la presencia de residuos se realizó bajo microscopio con una magnificación de 30x. Todas las muestras, con excepción de aquellas identificadas como “Sin Lavar” se encontraron libres de residuos aparentes. Imágenes representativas de la inspección realizada se muestran en la figura #.

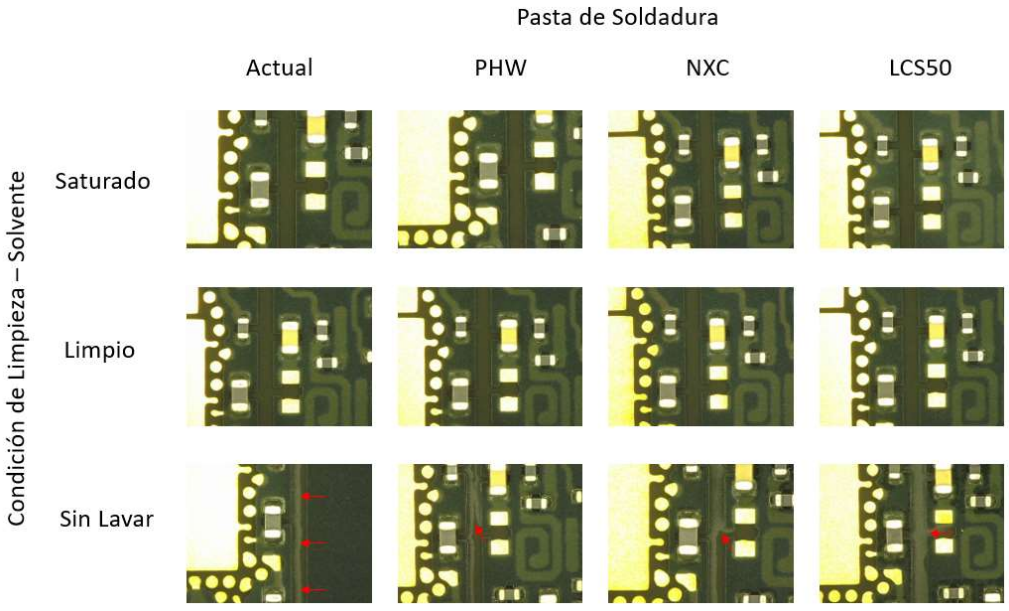



**Figura 46.** Imágenes representativas de las inspecciones realizadas bajo microscopio con magnificación 30x, en busca de residuos visibles de fundente, a muestras agrupadas por tipo de pasta de soldadura.

#### 4.3.6.4 Inspección por delaminación

La inspección por delaminación se realizó usando un equipo de microscopia acústica de barrido confocal (C-SAM). Las muestras fueron colectadas posterior al proceso de moldeo. En ninguno de los casos se observó la existencia de señales que pudieran sugerir la presencia de rupturas o delaminaciones en las interfaces de los componentes de montaje superficial con el material encapsulante. Imágenes representativas de esta inspección se muestran en la figura #.

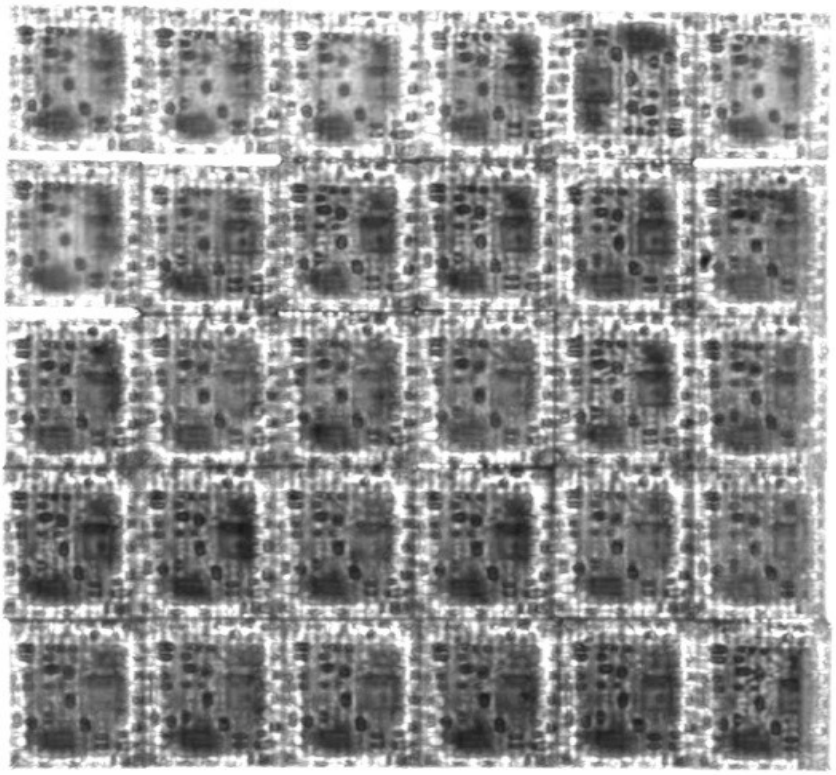


**Figura 47.** Imágenes representativas de la inspección realizada por microscopia acústica de barrido confocal, en busca de señales de delaminación.

#### 4.3.6.5 Resultados de prueba eléctrica, post pre-acondicionamiento MSL3

Una vez completadas las operaciones de ensamble de los dispositivos MCM, se procedió con la realización de la prueba eléctrica de los mismos con el objetivo de identificar fallas eléctricas que en principio, pudiesen tener su origen en la existencia de extrusiones de pasta de soldadura. En segundo lugar, se logró identificar piezas eléctricamente buenas para ser sometidas a un proceso de preacondicionamiento MSL3 y posteriormente, reprobarlas una vez más.

**Tabla 9.** Matriz de resultados de prueba eléctrica post-preacondicionamiento para los tratamientos del experimento 1

| T | Pasta de Soldadura | Condición del Solvente | **Fallas** | Muestra | Buenas | Rendimiento | Modo de Falla |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Actual | Limpio | **1** | 125 | 124 | 99.20% | 1910_TESTS_E |
| 2 | Actual | Saturado | **1** | 103 | 101 | 98.06% | CONT_LKG_VDET_NORF |
| 3 | Actual | Sin Lavar | **0** | 131 | 131 | 100.00% | N/A |
| 4 | PHW | Limpio | **0** | 122 | 122 | 100.00% | N/A |
| 5 | PHW | Saturado | **3** | 115 | 112 | 97.39% | 824_POUT_G |
| 6 | PHW | Sin Lavar | **3** | 136 | 132 | 97.06% | 824_POUT_G |
| 7 | M10-NXC | Limpio | **1** | 134 | 133 | 99.25% | 824_TESTS |
| 8 | M10-NXC | Saturado | **2** | 101 | 99 | 98.02% | 824_TESTS |
| 9 | M10-NXC | Sin Lavar | **7** | 127 | 119 | 93.70% | 824_POUT_G |
| 10 | M10-LCS50 | Limpio | **1** | 107 | 106 | 99.07% | 824_TESTS |
| 11 | M10-LCS50 | Saturado | **2** | 45 | 42 | 93.33% | 824_TESTS |
| 12 | M10-LCS50 | Sin Lavar | **3** | 132 | 124 | 93.94% | CONT_LKG_VDET_NORF |

#### 4.3.6.6 Análisis de fallas

Las fallas eléctricas, identificadas después del proceso de pre-acondicionamiento MSL3, fueron sometidas a un proceso de análisis para determinar si habían sido resultado de la aparición del fenómeno de extrusión de soldadura. Para lograr lo anterior, se realizaron inspecciones usando equipo de rayos X, microscopia acústica de barrido confocal y finalizando con la disección de las fallas eléctricas a través de la técnica de corte transversal en las zonas de interés. En ninguno de los casos, pudo ser confirmada la aparición de interconexiones de soldadura a causa del fenómeno de extrusión.

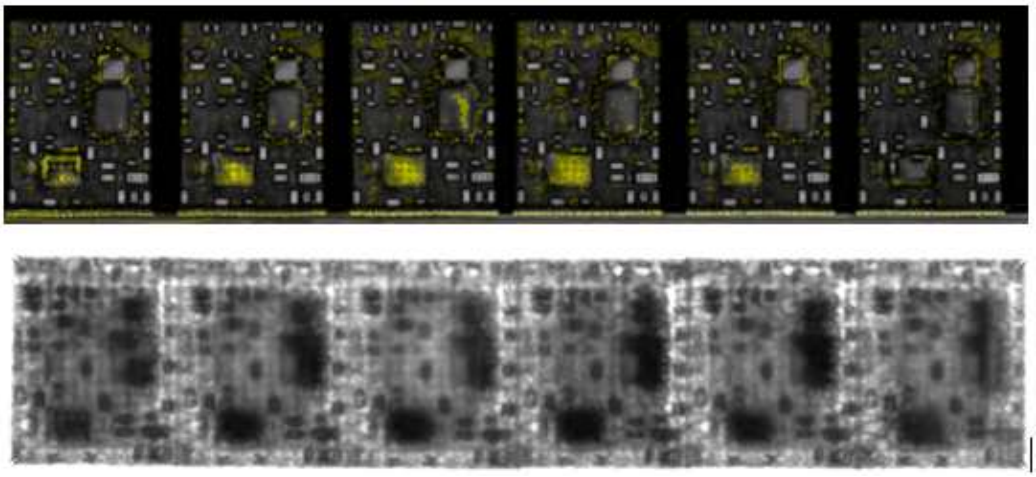


**Figura 48**. Imágenes representativas del análisis por microscopia acústica de barrido confocal, realizado a las fallas eléctricas encontradas después del estrés por preacondicionamiento.

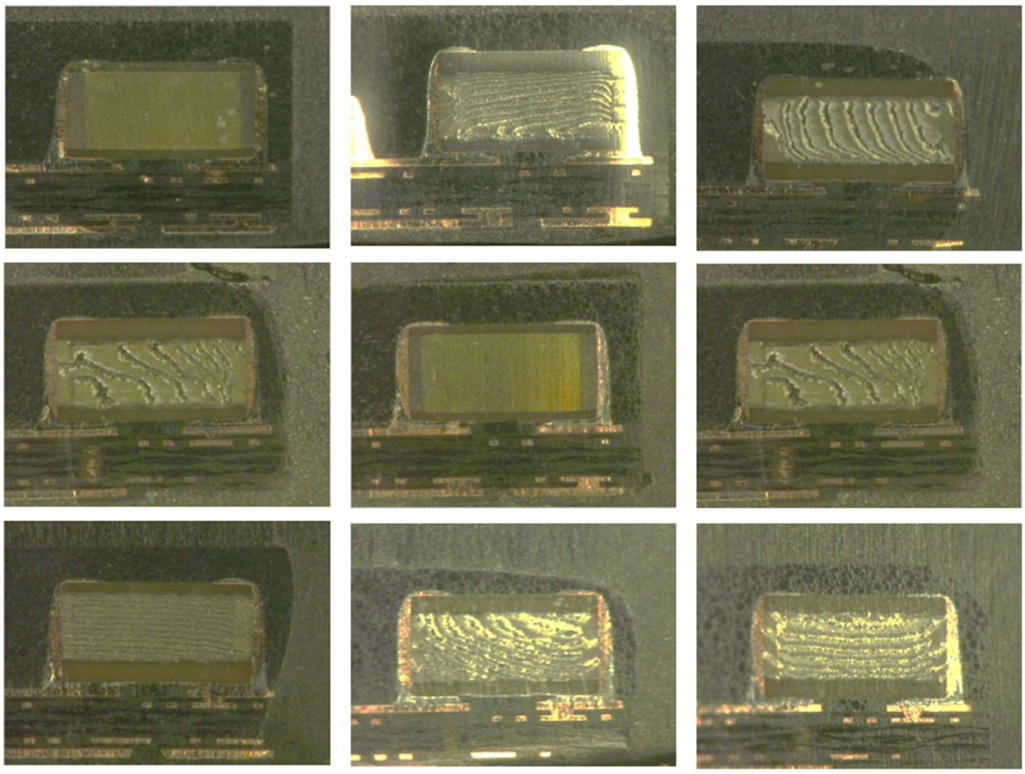


**Figura 49**. Imágenes representativas del análisis por corte transversal, realizado a las fallas eléctricas encontradas después del estrés por preacondicionamiento.

#### 4.3.6.7. Réplica del experimento

De entre el material construido para la realización de este primer experimento, se decidió conservar una muestra de una tablilla de circuito impreso, para cada uno de los tratamientos del experimento, sin moldear. Esta muestra fue de nueva cuenta considerada para realizar una réplica del experimento anterior, con la única diferencia de que esta última había sido expuesta a un ambiente no controlado de temperatura, humedad y partículas, por un periodo de aproximadamente 3 meses. Los resultados de esta última prueba, fueron consistentes con los encontrados en el primer experimento; no se identificaron ocurrencias del fenómeno de extrusión de soldadura, aun después del estrés por pre-acondicionamiento MSL3. Sin embargo, durante la realización de esta replica experimental, fue posible confirmar una condición de delaminación potencial identificada en las muestras inspeccionadas, mediante la técnica de C-SAM, justo después del proceso de moldeo. Ver Figura 50.

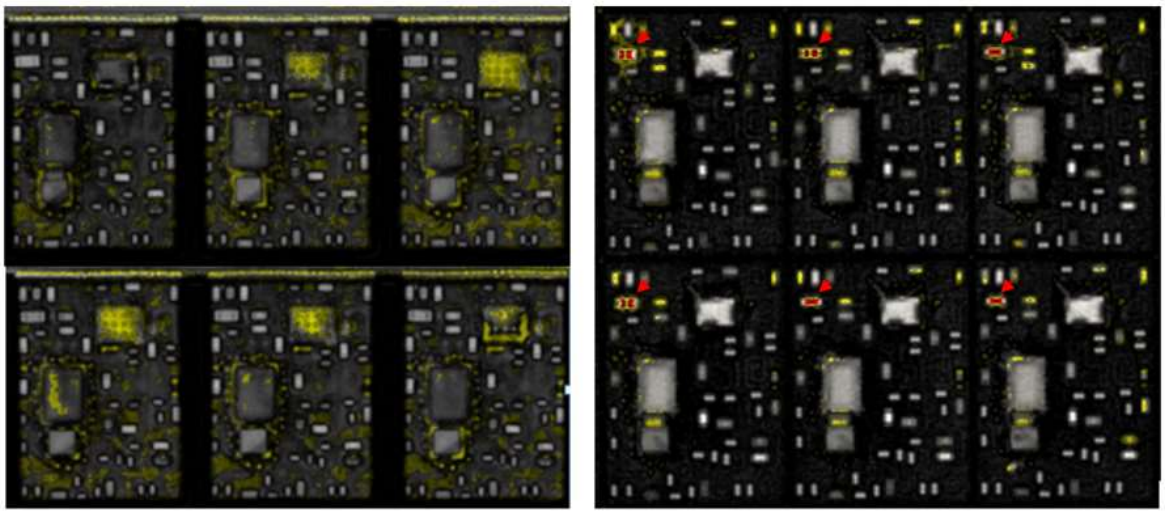


**Figura 50.** Imágenes representativas de una muestra de dispositivos inspeccionados mediante la técnica de C-SAM.

Con lo anterior en mente, se establece que el tiempo que permaneció el material expuesto al ambiente podría ser el motivo por el cual se presentó es diferencia observable entre los materiales usados en estos experimentos, aun cuando fue imposible reproducir el fenómeno de extrusión de soldadura.

### 4.3.7 Resultados del experimento 1

- No existe evidencia para concluir que cualquiera de las variables evaluadas en el experimento tenga alguna influencia en la aparición de la delaminación observada en todos los tratamientos.
- La Inspección por microscopia acústica de los todos los diferentes tratamientos evaluados durante el segundo bloque del experimento mostraron la presencia de delaminación arriba del componente C99. Esta delaminación es visible antes de realizar el proceso de refusión posterior al encapsulamiento. Se observa también que la huella de delaminación se hace más evidente después del proceso de re-fusión, posiblemente por efecto del stress termo-mecánico al que es sometido el material durante este proceso.

## 4.4 Experimento 2: Tiempo de exposición antes de moldeo, horneado y plasma

El tiempo que los dispositivos MCM permanecen expuestos al ambiente, antes de ser encapsulados, puede dar lugar a la concentración de humedad y a la acumulación de contaminantes en las superficies de los componentes de SMT. Estas condiciones, pueden verse agravadas por un pobre desempeño del proceso de limpieza con plasma, previo al encapsulamiento, situación que puede dar origen a fallas en la adhesión del plástico encapsulante con las superficies del dispositivo MCM que a su vez pueden dar ocasión para que la soldadura de las uniones de los componentes de SMT, pueda ser extruida a través de los vacíos que se formen.

### 4.4.1 Diseño del experimento 2

Con miras a identificar los factores que pueden comprometer la adhesión del plástico encapsulante con las superficies de los componentes de SMT, se consideraron tres factores, previos al proceso de encapsulamiento, como parte de un diseño de experimentos:

**Tabla 10.** Factores y niveles considerados para su evaluación como parte del experimento 2

| Factor | Niveles | | |
|---|---|---|---|
| Horneado | No | 1 h - 175 °C | |
| Limpieza con Plasma | Ar | Ar + $O_2$ | |
| Tiempo de Espera | 8 h | 12 h | 24 h |

### 4.4.2 Vehículo de pruebas

En este segundo experimento se continuó con el uso del vehículo de pruebas seleccionado para el experimento 1: SKY77528.

### 4.4.3 Matriz experimental

Se trata de un diseño de experimento factorial completo, compuesto de un total 12 tratamientos, tal como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 11.** Matriz de tratamientos para el experimento 2

| *Tratamiento* | *Horneado* | *Limpieza con Plasma* | *Tiempo de Espera* | *Muestra* |
|---|---|---|---|---|
| *1* | No | Ar | 12 | *2* |
| *2* | No | Ar | 8 | *2* |
| *3* | 1 h - 175 °C | Ar | 12 | *2* |
| *4* | 1 h - 175 °C | Ar | 8 | *2* |
| *5* | No | Ar + $O_2$ | 12 | *2* |
| *6* | No | Ar + $O_2$ | 8 | *2* |
| *7* | 1 h - 175 °C | Ar + $O_2$ | 12 | *2* |
| *8* | 1 h - 175 °C | Ar + $O_2$ | 8 | *2* |
| *9* | No | Ar | 24 | *1* |
| *10* | No | Ar + $O_2$ | 24 | *1* |
| *11* | 1 h - 175 °C | Ar | 24 | *1* |
| *12* | 1 h - 175 °C | Ar + $O_2$ | 24 | *1* |

### 4.4.4 Respuestas de interés

Las respuestas de interés medidas y evaluadas como parte de este segundo experimento fueron las que se muestran a continuación:

**Tabla 12.** Matriz de respuestas de interés evaluadas para el experimento 2

| No. | Respuesta | Metrología | Tipo de Variable | Tamaño de Muestra |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Delaminación | Microscopia acústica de barrido confocal (C-Sam) | Atributo | 2 Tablillas de circuito impreso por tratamiento |
| 2 | Prueba eléctrica post-preacondicionamiento MSL3 | Rendimiento eléctrico | Continua | 100% |
| 3 | Fallas confirmadas | Análisis de fallas | Discreta | Todas las fallas |

### 4.4.5 Flujo de ensamble y prueba

El flujo de ensamble y prueba para el experimento es como se muestra en la siguiente imagen.

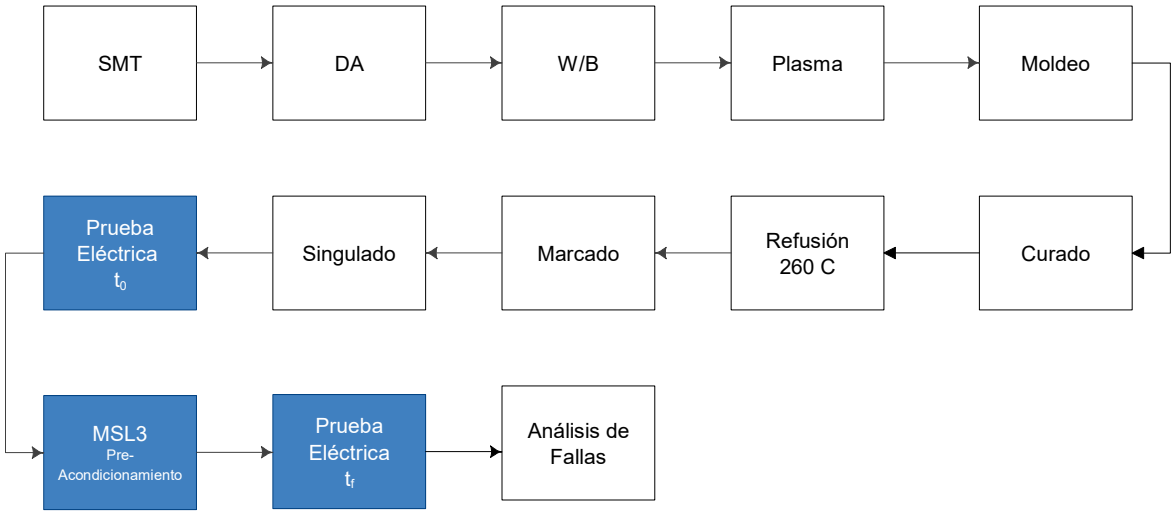


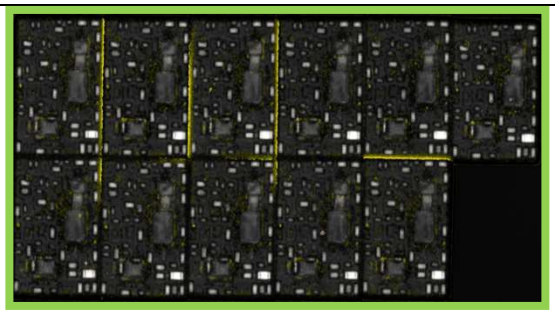
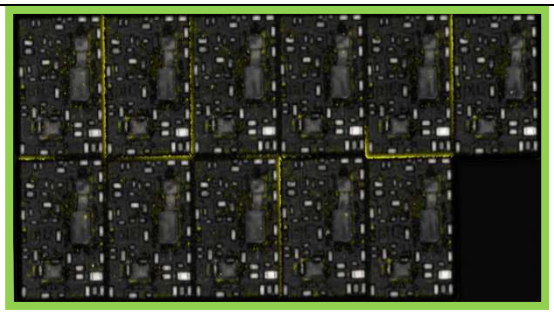
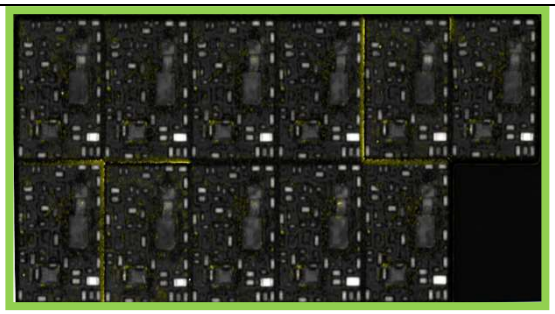
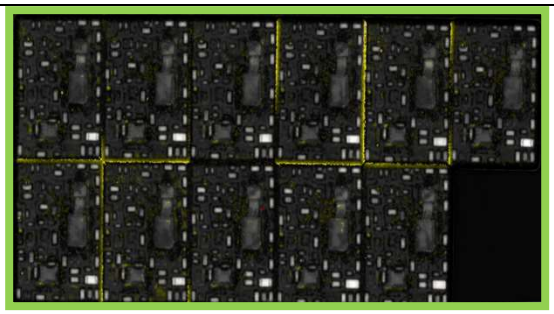
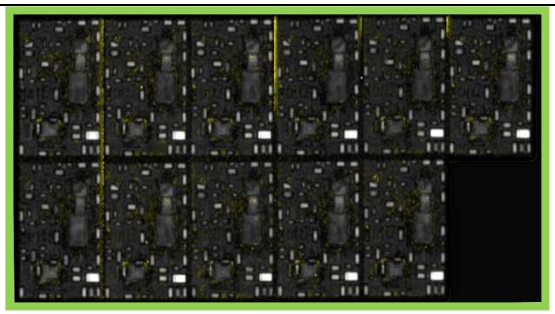
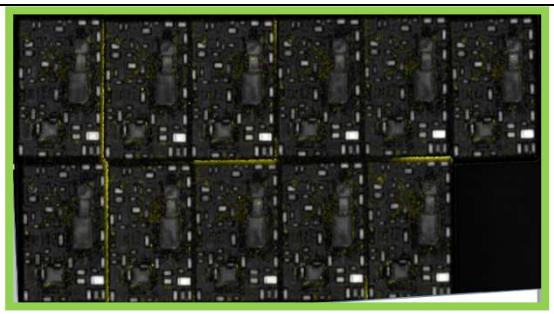

**Figura 51.** Flujo de ensamble y prueba empleado para la evaluación de los diferentes tratamientos considerados en el experimento 2

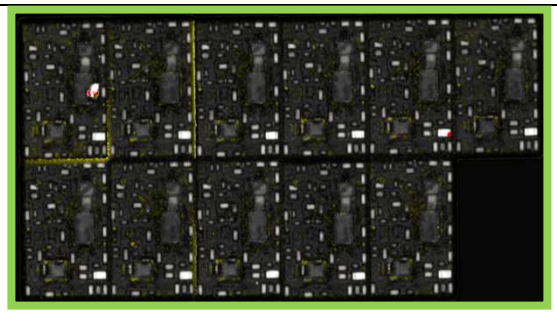
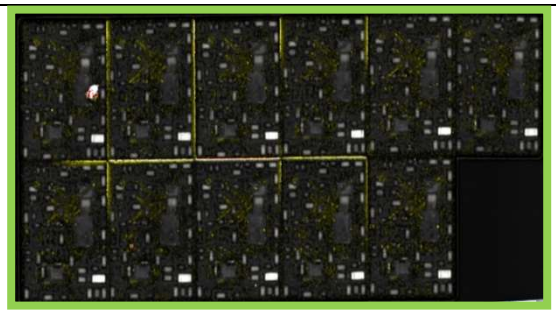
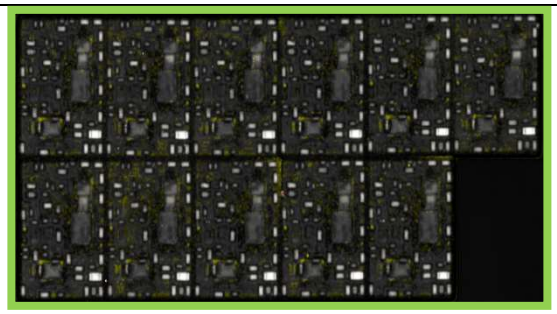
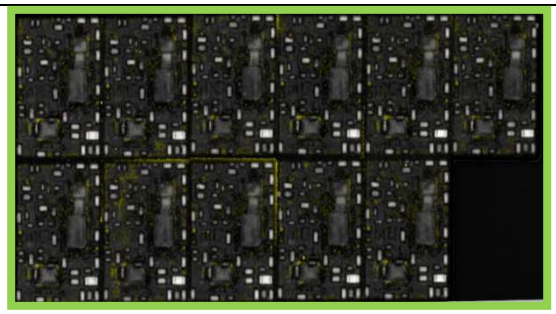
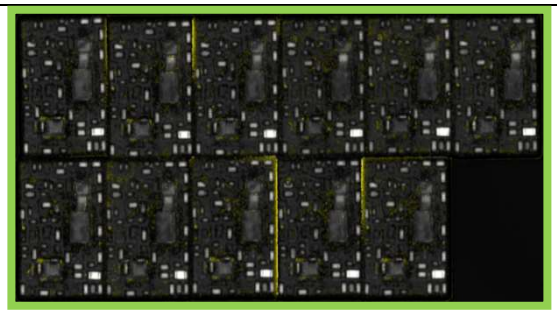
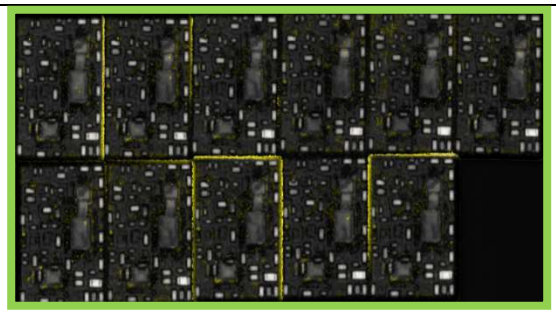
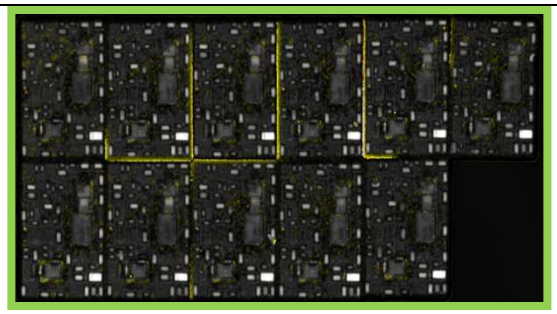
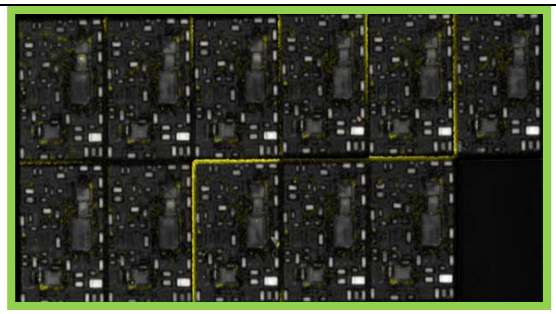
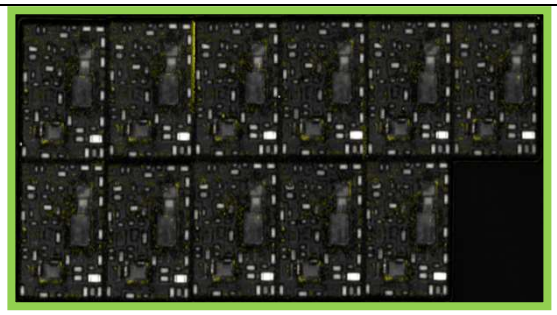
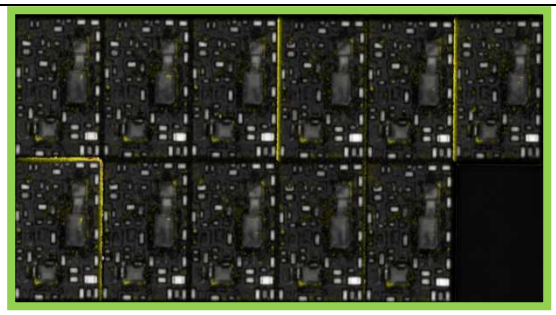
### 4.4.6 Análisis de respuestas de interés y resultados

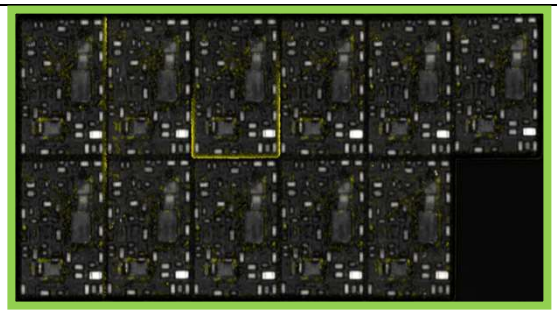
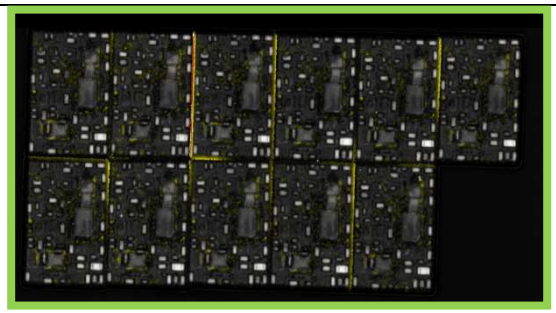
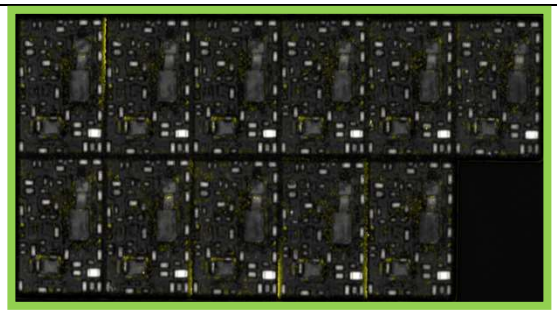
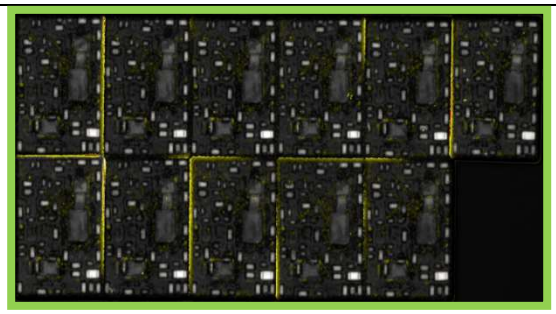
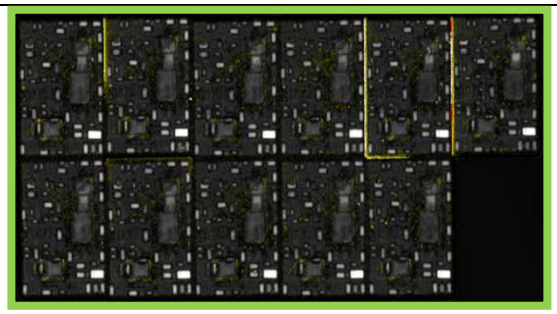
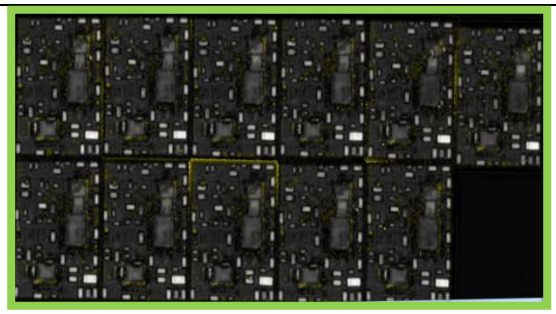
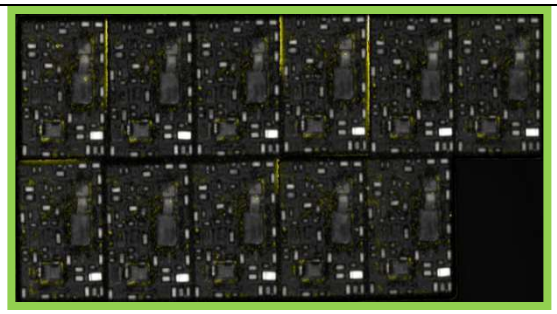
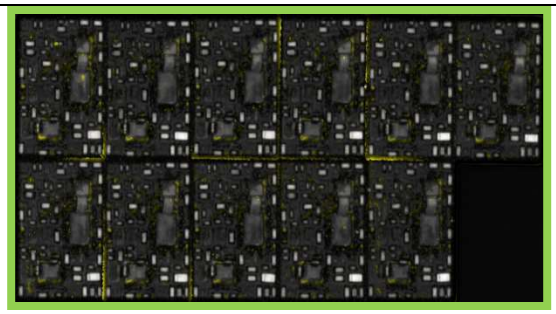
#### 4.4.6.1 Delaminación

Ninguno de los tratamientos inspeccionados, antes o después del pre-acondicionamiento MSL3, mostraron señales de delaminación en o cerca del componente C99. Imágenes de las inspecciones realizadas a los distintos tratamientos se muestran a continuación:

**Tabla 13.** Resultados del análisis de C-SAM en muestras inspeccionadas antes y después de preacondicionamiento MSL3.

| T | Microscopia Acústica Antes de MSL3 | Microscopia Acústica Después de MSL3 |
|---|---|---|
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |

| | | |
|---|---|---|
| 4 |  |  |
| 5 |  |  |
| 6 |  |  |
| 7 |  |  |
| 8 |  |  |

| | | |
|---|---|---|
| 9 |  |  |
| 10 |  |  |
| 11 |  |  |
| 12 |  |  |

#### 4.4.6.2 Prueba eléctrica post-preacondicionamiento MSL3

El resultado de la prueba eléctrica realizada después del proceso de preacondicionamiento MSL3 es como se muestra a continuación:

**Tabla 14.** Matriz de resultados de prueba eléctrica post-preacondicionamiento para los tratamientos del experimento 2

| *Tratamiento* | *Muestra* | *Estrés* | *Comentarios* |
|---|---|---|---|
| *1 - STR44615LEG1* | 183 | MSL3 | Sin Fallas |
| *2 - STR44615LEG2* | 234 | MSL3 | Sin Fallas |
| *3 - STR44615LEG3* | 219 | MSL3 | 1 Falla (ILRX1_869) |
| *4 - STR44615LEG4* | 205 | MSL3 | Sin Fallas |
| *5 - STR44615LEG5* | 228 | MSL3 | Sin Fallas |
| *6 - STR44615LEG6* | 262 | MSL3 | 1 Falla (ILRX1_869) |
| *7 - STR44615LEG7* | 260 | MSL3 | Sin Fallas |
| *8 - STR44615LEG8* | 258 | MSL3 | Sin Fallas |
| *9 - STR44615LEG9* | 121 | MSL3 | Sin Fallas |
| *10 - STR44615LEG10* | 103 | MSL3 | Sin Fallas |
| *11 - STR44615LEG11* | 133 | MSL3 | Sin Fallas |
| *12 - STR44615LEG12* | 100 | MSL3 | Sin Fallas |

### 4.4.7 Resultados del experimento 2.

Se encontraron dos fallas eléctricas relacionadas con potencias de salida. En ninguno de los casos se confirmó la existencia de corrientes de fuga que pudieran señalar la presencia de cortos eléctrico ocasionados por la presencia de extrusiones de soldadura en el componente C99. El resultado, fue finalmente confirmado a través del análisis destructivo de las fallas eléctricas mediante la técnica de corte transversal. Con lo anterior, se concluye que no existe evidencia estadística del efecto de cualquiera de los factores y niveles analizados en la ocurrencia del fenómeno de extrusión de soldadura.

## 4.5 Experimento 3: La humedad y estrés termo-mecánico

El estrés termo-mecánico, causado por múltiples ciclos de re fusión, puede dar lugar a una micro-delaminación en la interfaz del plástico encapsulante y las superficies de los componentes de SMT. Esta condición puede verse agravada por la acumulación de humedad en las interfaces, producto de la exposición no controlada de los dispositivos al medio ambiente.

### 4.5.1 Diseño del experimento 3

1680 piezas, eléctricamente buenas, fueron separadas en 7 grupos de 240 piezas. Cada uno de los grupos fue sometido a condiciones de remojo propios del proceso de preacondicionamiento MSL3. Posteriormente, estos mismos grupos fueron sometidos a varios ciclos de refusion de acuerdo con la tabla siguiente:

**Tabla 15.** Matriz de tratamientos considerados para su evaluación en el experimento 3

| *Grupo* | *Ciclos de re-fusión* |
|---|---|
| *1* | Ninguno |
| *2* | Ninguno |
| *3* | 3x |
| *4* | 4x |
| *5* | 5x |
| *6* | 6x |
| *7* | 7x |

El material de cada uno de estos grupos fue sometido al siguiente flujo de evaluación y prueba eléctrica:

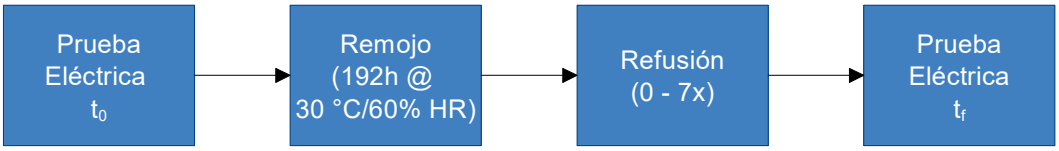



**Figura 52.** Flujo de prueba empleado para la evaluación de los diferentes tratamientos considerados en el experimento 3

### 4.5.2 Vehículo de pruebas

En esta ocasión, se hizo uso de otro dispositivo muy similar al SKY77528. Se trata de un dispositivo MCM de 6 x 8 mm identificado como SKY77547. La disposición de los componentes de SMT, el diseño de la tablilla y el proceso de encapsulamiento son los mismos para ambos dispositivos.

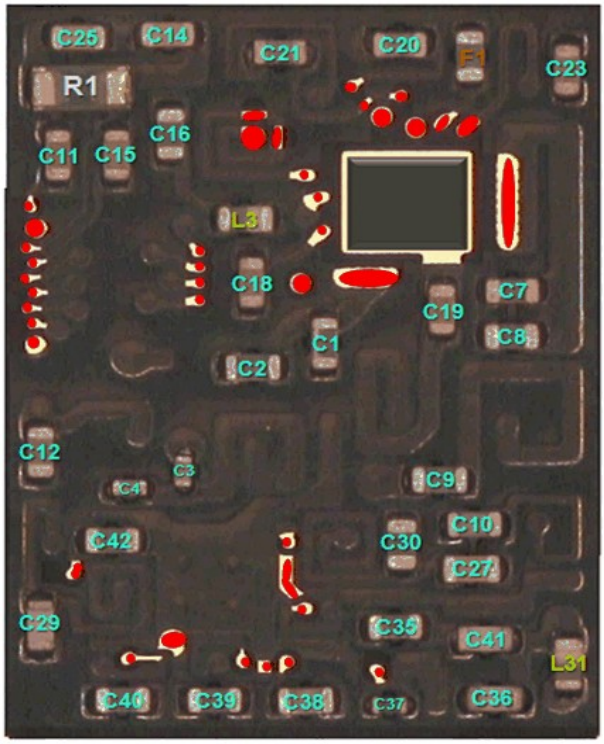



**Figura 53.** Vehículo de pruebas utilizado durante la evaluación de los distintos tratamientos del experimento 3.

### 4.5.3 Respuestas de interés

De acuerdo a lo observado en los experimentos anteriores y con miras en optimizar el uso de recursos en la realización del experimento, se decidió limitar las respuestas de interés únicamente dos: 1) Resultados de prueba eléctrica y 2) Análisis de las fallas resultantes.

#### 4.5.3.1 Resultados de prueba eléctrica ($t_f$).

El análisis de los resultados de prueba eléctrica se llevó a cabo por grupos de acuerdo con los tratamientos definidos durante el diseño de experimentos. Las condiciones de prueba eléctrica se mantuvieron constantes para todos los grupos.

**Tabla 16.** Matriz de resultados de prueba eléctrica para los tratamientos del experimento 3

| *Grupo* | *Ciclos de re-fusión* | *Fallas* | *Modo de Falla* |
|---|---|---|---|
| *1* | Ninguno | 0 | |
| *2* | Ninguno | 0 | |
| *3* | 3x | 0 | |
| *4* | 4x | 0 | |
| *5* | 5x | 0 | |
| *6* | 6x | 1/240 | POUT_824_PVT |
| *7* | 7x | 0 | |

#### 4.5.3.2 Análisis de fallas

La única falla encontrada dentro del grupo 6 fue el resultado de la ocurrencia del fenómeno de extrusión, tal como pudo ser confirmado mediante la técnica de corte transversal.

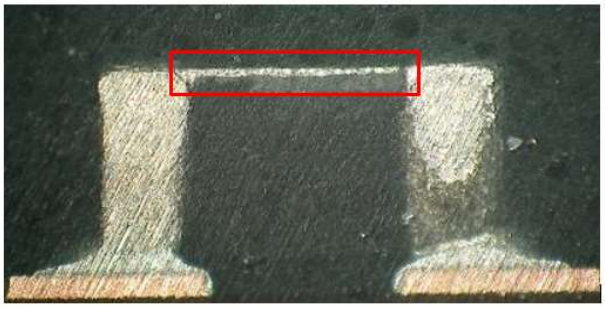


**Figura 54.** Imagen de corte transversal de la falla encontrada con extrusión de soldadura en el tratamiento 6 del experimento 3

### 4.5.4 Resultados del experimento 3

Queda confirmado que el estrés termo-mecánico, asociado con el sometimiento de los dispositivos encapsulados a condiciones de alto contenido de humedad y múltiples ciclos de refusión, es suficiente para dar origen al fenómeno de escurrimiento en una proporción de apenas unas 4,166 partes por cada millón (1/240).

## 4.6 Experimento 4: Volumen de soldadura, diseño del PCB y espesor del encapsulante.

Existen factores relacionados con la manufactura y diseño de los MCM encapsulados, que modifican el riesgo de observar el fenómeno de extrusión de soldadura. Estos factores pueden tener un efecto significativo en los niveles de estrés mecánico a los cuales son sometidos los dispositivos durante los varios procesos involucrados en su manufactura. El diseño del sustrato, el espesor del material encapsulante y el volumen de pasta de soldadura son ejemplos claros de algunos de estos factores.

### 4.6.1 Diseño del experimento 4

Se consideraron los siguientes factores como responsables probables en la variación de estrés mecánico al cual están sometidos los dispositivos encapsulados durante los varios procesos de manufactura a las que son sometidos:

a) Volumen de pasta de soldadura
b) Espesor del material encapsulante
c) Diseño del sustrato

Para cada factor se contemplaron los siguientes niveles:

**Tabla 17.** Factores y niveles considerados para su evaluación como parte del experimento 4

| Factor | Niveles | |
|---|---|---|
| Volumen de soldadura | Típico (40%) | Alto (64%) |
| Espesor de encapsulante | 0.55 mm | 0.7 mm |
| Diseño del sustrato | Tablilla Sencilla | Tablilla Seccionada |

Nota: Se observó que el proceso de refusión al cual se somete la pasta de soldadura para formar las uniones permanentes, puede suceder en atmosferas con diferentes concentraciones de nivel de O2. Se decidió incluir este como un cuarto factor en el experimento para verificar la posibilidad de algún efecto asociado. Se estudiaron dos niveles: a) < 1,000 PPMs y b) > 2,500 PPMs.

### 4.6.2 Vehículo de pruebas

Una vez más, y debido a la disponibilidad de materiales, se hizo uso nuevamente del SKY77528 como vehículo de pruebas.

### 4.6.3 Matriz experimental

Se trata de un diseño factorial completo con cuatro factores evaluados en dos niveles cada uno ($2^4$). La matriz de los tratamientos resultantes es como se muestra a continuación.

**Tabla 18.** Matriz de tratamientos para el experimento 4

| *Tratamiento* | *Volumen de Soldadura* | *Nivel de $O_2$ durante Refusión (PPMs)* | *Espesor de Encapsulante (mm)* | *Tipo de Tablilla* |
|---|---|---|---|---|
| *1* | Alto | < 1000 | 0.7 | Sencilla |
| *2* | Bajo | > 2500 | 0.7 | Sencilla |
| *3* | Alto | > 2500 | 0.55 | Sencilla |
| *4* | Bajo | < 1000 | 0.55 | Sencilla |
| *5* | Bajo | < 1000 | 0.7 | Sencilla |
| *6* | Alto | > 2500 | 0.7 | Sencilla |
| *7* | Bajo | > 2500 | 0.55 | Sencilla |
| *8* | Alto | < 1000 | 0.55 | Sencilla |
| *9* | Alto | < 1000 | 0.7 | Seccionada |
| *10* | Bajo | > 2500 | 0.7 | Seccionada |
| *11* | Alto | > 2500 | 0.55 | Seccionada |
| *12* | Bajo | < 1000 | 0.55 | Seccionada |
| *13* | Bajo | < 1000 | 0.7 | Seccionada |
| *14* | Alto | > 2500 | 0.7 | Seccionada |
| *15* | Bajo | > 2500 | 0.55 | Seccionada |
| *16* | Alto | < 1000 | 0.55 | Seccionada |

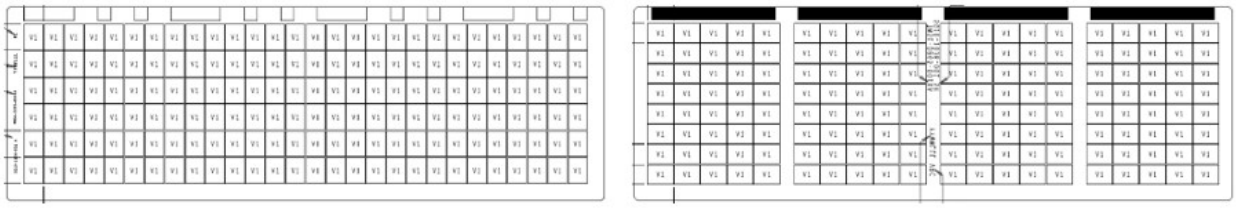


**Figura 55.** Imagen ilustrativa del tipo de tablillas consideradas para su evaluación en el experimento 4

### 4.6.4 Respuestas de interés

En este último experimento se decidió enfocar nuevamente todos los esfuerzos de recopilación de datos en las etapas de prueba eléctrica antes y después de preacondicionamiento. Aunado a lo anterior, se tomaron las previsiones necesarias para lograr dar rastreabilidad a las diferentes condiciones de ensamble presentes en cada uno de los dispositivos MCM ensamblados, de tal forma que fuese posible conocer entre otras cosas:

a) Lotes de componentes usados en el ensamble de dispositivos específicos
b) Condición de impresión antes de la colocación de componentes
c) Condición de la colocación de componentes después de refusión y lavado
d) Posición de ensamble dentro de la tablilla de circuito impreso, después de los procesos de moldeo y singulado.

### 4.6.5 Flujo de ensamble y prueba

Tratando de ser consistentes con los resultados observados en el experimento 3, se decidió someter dos grupos de evaluación de forma simultánea. El primero de estos fue sometido a condiciones de preacondicionamiento MSL3, mientras que el segundo de ellos experimento las de tipo MSL2A.

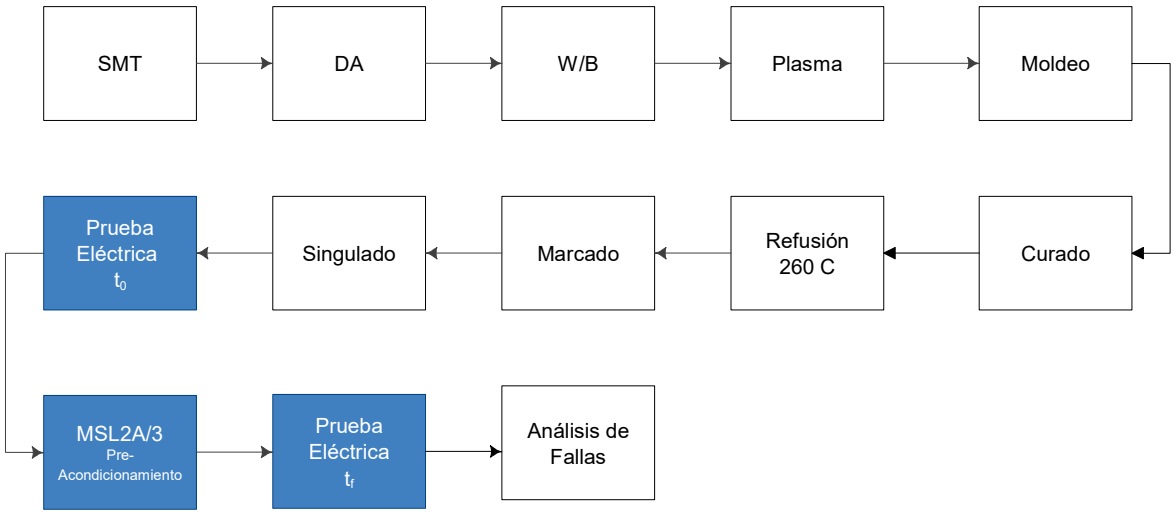



**Figura 56.** Flujo de ensamble y prueba empleado para la evaluación de los diferentes tratamientos considerados en el experimento 4

### 4.6.6 Análisis de respuestas de interés y resultados

#### 4.6.6.1 Prueba eléctrica antes de preacondicionamiento ($t_0$)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos durante la prueba eléctrica de primera inserción, antes de someter los dispositivos a las condiciones de preacondicionamiento requeridos por el diseño del experimento.

| Tratamiento 1 | | Tratamiento 3 | | Tratamiento 6 | |
|---|---|---|---|---|---|
| File analized: | 77528A_51_C@STR55775L1@2016.11.16_15.12.23.csv | File analized: | 77528A_51_C@STR55775L3@2016.11.16_16.57.13.csv | File analized: | 77528A_51_C@STR55775L6@2016.11.17_14.07.54.csv |
| File Location: | D:\Desktop\STR55775\Sumario\ | File Location: | D:\Desktop\STR55775\Sumario\ | File Location: | D:\Desktop\STR55775\Sumario\ |
| Lot ID: | STR55775L1 | Lot ID: | STR55775L3 | Lot ID: | STR55775L6 |
| Tester ID: | M7CREDXP04 | Tester ID: | M7CREDXP04 | Tester ID: | M7CREDXP04 |
| Test Program: | 77528a_51_c | Test Program: | 77528a_51_c | Test Program: | 77528a_51_c |
| File Date/Time: | 11/16/2016 2:43 PM | File Date/Time: | 11/16/2016 3:35 PM | File Date/Time: | 11/17/2016 1:54 PM |
| Devices Total: | 278 | Devices Total: | 291 | Devices Total: | 273 |
| Pass: | 272 | Pass: | 282 | Pass: | 254 |
| Failed: | 6 | Failed: | 9 | Failed: | 19 |
| Yield: | 97.84% | Yield: | 96.91% | Yield: | 93.04% |

| Parameter | LSL | USL | Units | Mean | Median | Min | Max | Std Dev | Fails | Percent | Cpk | Fails S1 | Fails S2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| VCCLK_SDBY_0P1V | --- | 8 | uA | 6.154 | 1.096 | -1.230 | 1405.600 | 84.393 | 1 | 0.36% | 0.007 | 1 | 0 |
| VCCLK_SDBY_6V | --- | --- | uA | 10.233 | 3.914 | 1.996 | 1755.931 | 105.275 | 0 | 0.00% | 0.000 | 0 | 0 |

| Parameter | LSL | USL | Units | Mean | Median | Min | Max | Std Dev | Fails | Percent | Cpk | Fails S1 | Fails S2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| VCCLK_SDBY_0P1V | --- | 8 | uA | 14.949 | 1.190 | -0.958 | 1999.909 | 165.694 | 2 | 0.69% | 0.000 | 1 | 1 |
| VCCLK_SDBY_6V | --- | --- | uA | 17.631 | 3.869 | 1.711 | 1999.844 | 165.471 | 0 | 0.00% | 0.000 | 0 | 0 |

| Parameter | LSL | USL | Units | Mean | Median | Min | Max | Std Dev | Fails | Percent | Cpk | Fails S1 | Fails S2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| VCCLK_SDBY_0P1V | --- | 8 | uA | 8.307 | 0.927 | -1.512 | 1999.817 | 120.977 | 1 | 0.37% | 0.000 | 0 | 1 |
| VCCLK_SDBY_6V | --- | --- | uA | 10.491 | 3.001 | 0.914 | 1999.817 | 120.854 | 0 | 0.00% | 0.000 | 0 | 0 |

**Figura 57.** Resultados de prueba eléctrica para tratamientos encontrados con fallas eléctricas (1, 3 y 6) previo al proceso de preacondicionamiento.

#### 4.6.6.2 Análisis de fallas antes de preacondicionamiento ($t_0$)

Los resultados fueron validados a través de las técnicas de inspección por rayos X, microscopia acústica de barrido confocal y cortes transversales. En ninguno de los casos pudo ser confirmada la presencia de extrusiones de soldadura que pudiesen explicar la ocurrencia de las fallas eléctricas encontradas durante la primera inserción.

#### 4.6.6.3 Prueba eléctrica posterior al pre-acondicionamiento MSL2A/3 ($t_f$).

La siguiente tabla muestra un resumen de los resultados de prueba eléctrica realizada después del proceso de preacondicionamiento MSL2A y MSL3. Las fallas encontradas se totalizan en las últimas dos columnas de la derecha, para MSL2A y MSL3 respectivamente.

**Tabla 19.** Matriz de resultados de prueba eléctrica para los tratamientos del experimento 4

| *Tratamiento* | *Volumen de Soldadura* | *Nivel de $O_2$ durante Refusión (PPMs)* | *Espesor de Encapsulante (mm)* | *Tipo de Tablilla* | *Fallas MSL2A* | *Fallas MSL3* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *1* | Alto | < 1000 | 0.7 | Sencilla | 0 | 0 |
| *2* | Bajo | > 2500 | 0.7 | Sencilla | 0 | 0 |
| *3* | Alto | > 2500 | 0.55 | Sencilla | 0 | 0 |
| *4* | Bajo | < 1000 | 0.55 | Sencilla | 0 | 0 |
| *5* | Bajo | < 1000 | 0.7 | Sencilla | 0 | 0 |
| *6* | Alto | > 2500 | 0.7 | Sencilla | 0 | 0 |
| *7* | Bajo | > 2500 | 0.55 | Sencilla | 0 | 0 |
| *8* | Alto | < 1000 | 0.55 | Sencilla | 0 | 0 |
| *9* | Alto | < 1000 | 0.7 | Seccionada | 0 | 0 |
| *10* | Bajo | > 2500 | 0.7 | Seccionada | 0 | 0 |
| *11* | Alto | > 2500 | 0.55 | Seccionada | 0 | 0 |
| *12* | Bajo | < 1000 | 0.55 | Seccionada | 0 | 0 |
| *13* | Bajo | < 1000 | 0.7 | Seccionada | 0 | 1/240 |
| *14* | Alto | > 2500 | 0.7 | Seccionada | 0 | 0 |
| *15* | Bajo | > 2500 | 0.55 | Seccionada | 0 | 0 |
| *16* | Alto | < 1000 | 0.55 | Seccionada | 0 | 0 |

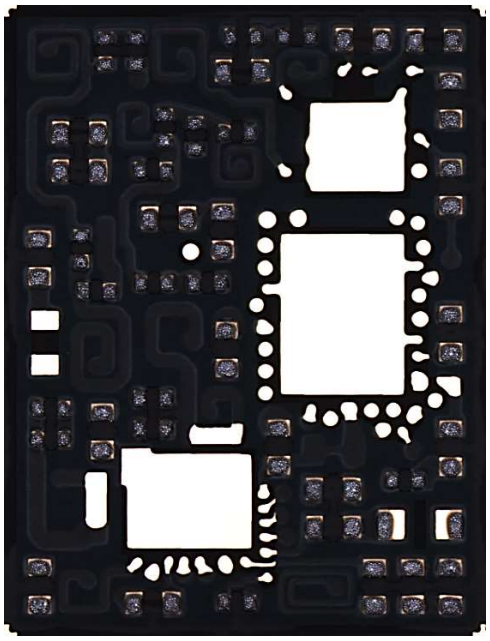


**Figura 58.** Condición de impresión de pasta previo al montaje de componentes de SMT para el dispositivo MCM afectado.

Posición de la falla eléctrica dentro del sustrato original

**Figura 59.** Posición que mantenía el dispositivo afectado en el PCB posterior al proceso de encapsulamiento

### 4.6.6.4 Análisis de fallas

La falla eléctrica fue finalmente examinada mediante la técnica de decapsulación química. El análisis de la pieza revela la existencia de soldadura cubriendo la superficie del componente C99, interconectando ambos electrodos del capacitor de SMT.

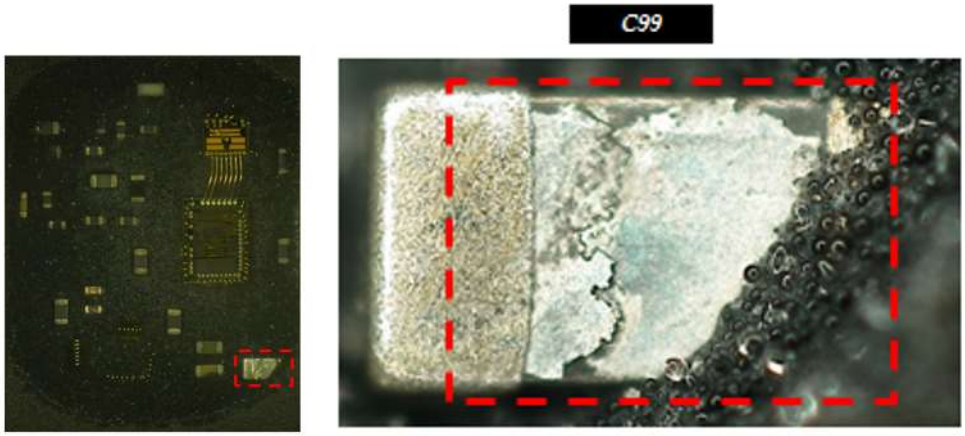



**Figura 60.** Imagen magnificada del decpasulamiento químico del dispositivo encontrado como falla eléctrica.

### 4.6.7 Resultados del experimento 4

- El experimento fue capaz de reproducir el fenómeno de extrusión de soldadura. La falla se encuentra después de que la pieza es sometida a pre-acondicionamiento MSL3.
- Debido a la posición que mantiene la falla dentro del sustrato original, se presume que el estrés inducido durante la etapa de “quiebre del desperdicio” al final del proceso de encapsulación, dio origen a una micro-delaminación localizada en el perímetro del dispositivo afectado. Esta condición debió agravarse durante el estrés por pre-acondicionamiento MSL3.

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación apuntan a la ocurrencia del fenómeno de extrusión de soldadura como resultado de la aplicación de estrés termo-mecánico como parte de los procesos de fabricación o del ensamble de los dispositivos MCM encapsulados.

Con base en lo anterior, se postulan las siguientes recomendaciones que pudieran observarse como parte de un programa de reducción o eliminación del problema objeto de estudio:

1) Minimizar el tiempo de exposición del material al ambiente, previo al proceso de encapsulamiento. Esto debería evitar la acumulación de humedad en las superficies a ser encapsuladas, misma que puede impactar de forma negativa la adhesión del plástico con el dispositivo que estaría siendo protegido.
2) Identificar plásticos encapsulantes con mejores propiedades mecánicas y de adhesión a las superficies. El modulo elástico, el abultamiento higroscópico y el encogimiento volumétrico son algunos ejemplos de propiedades que pueden ser evaluadas para identificar un material robusto que permita la reducción o eliminación definitiva del fenómeno de extrusión.
3) Evitar la exposición del material al medio ambiente cuando este se encuentre en condición de material en proceso entre operaciones de ensamble. Con esto se podrá minimizar la acumulación de contaminantes ambientales en los dispositivos previo al proceso de encapsulación.
4) Minimizar el estrés mecánico y termo-mecánico al cual se someten los dispositivos una vez completado el proceso de encapsulación o durante los procesos de ensamble de segundo nivel de este tipo de dispositivos MCM.
5) Asegurar que el usuario de este tipo de dispositivos se adhiere a las recomendaciones de exposición máxima al ambiente de estos dispositivos antes de ser sometidos a procesos de soldadura por refusión.
6) Limitar a 3 el número máximo de procesos de refusión al cual son sometidos los dispositivos MCM de forma que el estrés termo-mecánico resultante no se convierta en un factor para la ocurrencia de este fenómeno de extrusión de soldadura.

Algunas observaciones importantes que resultan de los experimentos realizados como parte de este trabajo de investigación son:

1) El residuo de fundente localizado en las superficies de los componentes de SMT no representa un riesgo significativo para la ocurrencia de este fenómeno. Sin embargo, se recomienda tomar las previsiones necesarias para evitar su presencia en material que haya de ser encapsulado.
2) La condición de concentración de contaminantes presentes en el solvente, utilizado para realizar la limpieza de dispositivos MCM después del proceso de refusión, no parece tener un efecto importante en la ocurrencia del fenómeno de extrusión de soldadura. Sin embargo, se sugiere la búsqueda de un método cuantitativo para determinar el grado de concentración de contaminantes en la solución como un método de control de proceso que impida la existencia de efectos adversos en otras etapas de proceso previas al encapsulamiento, como, por ejemplo, el alambrado de dispositivos.
3) La implementación de procesos de horneado y limpieza de plasma con el uso de oxígeno y argón, previos al proceso de encapsulación, podrían continuar siendo estudiados para entender sus efectos de largo plazo y en alto volumen en la ocurrencia del fenómeno de extrusión.
4) El volumen de pasta impreso en los componentes de SMT no aparece como un efecto significativo para la ocurrencia del fenómeno de extrusión de soldadura. Tampoco lo es la atmósfera bajo la cual se lleva a cabo el proceso de refusión.

### 5.1 Trabajo futuro

De acuerdo con lo expuesto en el presente trabajo de investigación, se presume que los varios factores de estrés que actúan sobre los dispositivos encapsulados, son responsables de una buena parte de las fallas ocasionadas por el fenómeno de extrusión de soldadura. Es a la luz de estos hechos, que se buscará continuar con una caracterización detallada, a través de herramientas de simulación por elemento finito, de los varios niveles de estrés que se encuentran asociados a distintos factores de diseño y condiciones de ensamble de estos dispositivos electrónicos.

## Bibliografía


| | |
|---|---|
| Angiolani, 1960 | Andrés Bello, 1960. Introducción a la química industrial: Fundamentos químicos y tecnológicos; Editorial Andrés Bello; pp. 238. |
| Bergeron, 1990 | Bergeron, Bryan, 1990. "A Surface-Mount Technology Primer – *Part1*", Revista: *QST, Diciembre* 1990, pp. 48-51. |
| Hollander, 1987 | Hollander, David, 1987. "The Mystique Behind Miniaturization - Surface Mount Technology.", Revista: QST, Octubre 1987, pp. 15-18. |
| Kattner, 2002 | JOM 202; December. Phase Diagrams for Lead-Free Solder Alloys. Kattner, Ursula. |
| Mangonon, 2001 | Mangonon, Pat I, 2001. Ciencia de materiales: Selección y diseño. Pearson Educación, México, 2001. ISBN: 970-26-0027-8. pp. 32-36, 184-238. |
| N. C. Lee, 2002 | N. C. Lee, 2002. "Reflow Soldering Processes and Troubleshooting SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies", Editorial Newness, pp 1-105. |
| Pan, 2004 | Pan, Jianbiao, et al, 2004. "Critical Variables of Solder Paste Stencil Printing for Micro-BGA and Fine-Pitch QFP", Publicación: IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS PACKAGING MANUFACTURING, VOL. 27, NO. 2, APRIL 2004, pp. 125-132. |
| Tummala, 2001 | Tummala, Rao R. 2001. "Fundamentals of Microsystems Packaging", McGRAW-HILL, pp 297-303; 582-603. |
| Vasil'ev, 2003 | A Complex Study of the Phase Diagram of the Sn-Sb System. Russian Journal of Physical Chemistry; Vol 79, No. 1, 2005, pp. 20-28. |
| Wells, 1978 | A.F. Wells; Química inorgánica estructural. Editorial Reverte, 1978. pp 1056. |
| Lidia, 2013 | Lidia Vargas, et al, 2013. "Failure analysis method to study solder wicking phenomena in modern microelectronic devices", J Mater Sci: Mater Electron (2014) 25:609–617. DOI 10.1007/s10854-013-1634-z |