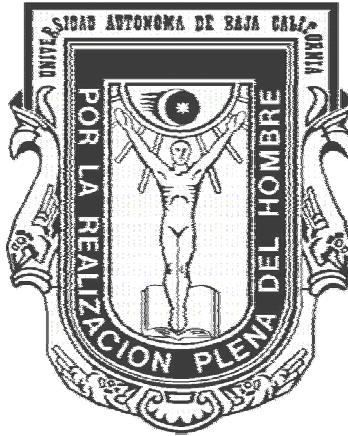


Universidad Autónoma de Baja California

Instituto de Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



“Delaminación de materiales en interfases de microcircuitos”

TESIS

**Que para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería**

Presenta

Lidia Esther Vargas Osuna

Director

Dr. Benjamín Valdez Salas

Agradecimientos

Este trabajo de investigación se llevó a cabo gracias al soporte y orientación de mis maestros y de mis compañeros de trabajo. Al apoyo incondicional de mi familia y amigos que han compartido siempre los momentos más importantes a lo largo de mi vida. A la empresa Skyworks Solutions S.A. de C.V., donde se me dio la oportunidad de realizar el proyecto. Gracias a todos.

ÍNDICE

	Página
Resumen.....	1
Introducción.....	2
Objetivo principal.....	3
Objetivos específicos.....	3
Capítulo 1. Antecedentes	
1.1 Semiconductores.....	4
1.1.1 Tecnología de montaje en superficie.....	6
1.1.2 Productos con matriz densa de terminales esféricas.....	7
1.1.3 Proceso de ensamble de los productos con matriz densa de terminales esféricas.....	8
1.2 Delaminación y el efecto popcorn.....	8
1.2.1 Casos de delaminación.....	11
1.3 Factores que favorecen la delaminación.....	11
1.3.1 Humedad.....	11
1.3.2 Contaminación.....	13
1.3.3 Corrosión.....	13
1.4 Estándares IPC/JEDEC.....	19
1.5 Soldado por reflujo.....	19
1.6 Moldeo por inyección de plástico.....	22
1.7 Micro imagen acústica.....	23
1.8 Microscopia electrónica de barrido.....	26
1.9 Análisis de energía dispersiva de Rayos-X.....	28
Capítulo 2. Materiales y métodos	
2.1 Metodología.....	31
2.1.1 Prueba eléctrica.....	33
2.1.2 Análisis de micro imagen acústica.....	33
2.1.3 Horneado.....	33
2.1.4 Ganancia en peso de las muestras.....	34

2.1.5 Cámara de humedad.....	34
2.1.6 Exposición al horno de reflujo.....	36
2.1.7 Exposición al proceso de moldeo por inyección de plástico.....	40
2.2 Descripción de las muestras.....	40
2.3 Criterio para clasificar el nivel de sensibilidad a la humedad.....	42
2.4 Análisis de fallas.....	43
2.4.1 Análisis de rayos-X.....	43
2.4.2 Corte transversal.....	45
2.4.3 Análisis en microscopio electrónico de barrido (SEM).....	47
2.4.4 Análisis EDX.....	49
Capítulo 3. Análisis y discusión de resultados	
3.1 Resultados de la humedad absorbida por las muestras	50
3.2 Resultados de la prueba eléctrica y del análisis de micro imagen acústica.....	51
3.3 Resultados del análisis de rayos-X y relación de muestras sometidas a corte transversal.....	52
3.4 Resultados del análisis de energía dispersiva de rayos-X.....	53
Conclusiones y recomendaciones.....	55
Bibliografía.....	60
Glosario.....	65
Anexos	
Anexo A Perfiles de reflujo utilizados en la evaluación.....	74
Anexo B Gráficas del porcentaje de ganancia en peso de humedad de las muestras.....	75
Anexo C Imágenes del análisis de rayos-X, de micro imagen acústica y del microscopio electrónico de barrido.....	76

Índice de figuras

Capítulo 1	Página
Figura 1-1 Semiconductor intrínseco.....	4
Figura 1-2 Impurezas pentavalentes y trivalentes.....	5
Figura 1-3 Unión p-n.....	6
Figura 1-4 Productos con matriz densa de terminales esféricas.....	7
Figura 1-5 Casos de delaminación.....	11
Figura 1-6 Fenómeno de difusión.....	12
Figura 1-7 Proceso de corrosión electroquímica.....	15
Figura 1-8 Estimación de costos por corrosión en la industria eléctrica y electrónica.....	16
Figura 1-9 Estándares IPC/JEDEC.....	19
Figura 1-10 Características de un perfil de temperatura.....	21
Figura 1-11 Espectro de frecuencia.....	24
Figura 1-12 Microscopio acústico de barrido	24
Figura 1-13 Relación <i>tiempo-distancia</i> entre ecos.....	25
Figura 1-14 Análisis de <i>Modo-C</i> o <i>C-Sam</i>	26
Figura 1-15 Análisis de <i>Transmisión completa</i>	26
Figura 1-16 Microscopio electrónico de barrido.....	27
Figura 1-17 Adquisición de la imagen SEM.....	28
Figura 1-18 Profundidad a la que se generan las distintas señales en el microscopio electrónico de barrido.....	28
Figura 1-19 Generación de las señales a partir del haz de electrones incidente..	29
Figura 1-20 Localización de los detectores en el interior de la cámara del microscopio electrónico de barrido.....	30
 Capítulo 2	
Figura 2-1 Diagrama de flujo de la evaluación del nivel de sensibilidad a la humedad durante el soldado por reflujo.....	31
Figura 2-2 Diagrama de flujo de la evaluación del nivel de sensibilidad a la humedad durante el proceso de moldeo.....	32
Figura 2-3 Horno de convección.....	34

Figura 2-4	Cámara de humedad.....	35
Figura 2-5	Composición de las terminales esféricas del material 10x10 y 12x12.....	39
Figura 2-6	Productos con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 10x10 y 12x12.....	40
Figura 2-7	Equipo de rayos-X.....	44
Figura 2-8	Equipo de desbaste y pulido.....	45
Figura 2-9	Técnica de encapsulado en frío.....	46
Figura 2-10	Tela de nylon utilizada para el pulido de las muestras.....	47
Figura 2-11	Equipo utilizado para realizar la deposición física del recubrimiento de oro.....	47
Figura 2-12	Proceso de bombardeo catódico o <i>sputtering</i>	48
Capítulo 3		
Figura 3-1	Análisis EDX de la superficie del dado de las dos piezas representativas con delaminación.....	53
Figura 3-2	Análisis EDX de la superficie del plástico encapsulante de las dos piezas representativas con delaminación.....	54

Índice de tablas

Capítulo 1		Página
Tabla 1-1	Proceso de ensamble de los productos con matriz densa de terminales esféricas.....	9
Tabla 1-2	Formas más comunes en que se presenta la corrosión en la infraestructura industrial.....	18
Capítulo 2		
Tabla 2-1	Condiciones de humedad y temperatura de los niveles de sensibilidad a la humedad considerados para la evaluación.....	35
Tabla 2-2	Temperatura pico de reflujo para soldaduras <i>Estaño-Plomo</i>	36
Tabla 2-3	Temperatura pico de reflujo para soldaduras <i>libres de Plomo</i>	36
Tabla 2-4	Clasificación de los perfiles de temperatura.....	37
Tabla 2-5	Relación de muestras utilizadas para la evaluación de la sensibilidad a la humedad durante el soldado por reflujo.....	41
Tabla 2-6	Relación de muestras de tablero de circuito impreso utilizadas para la evaluación de la sensibilidad a la humedad durante el proceso de moldeo.....	42
Capítulo 3		
Tabla 3-1	Porcentaje de ganancia en peso de las muestras.....	50
Tabla 3-2	Relación de fallas eléctricas y piezas con presencia de delaminación obtenidas al final de la evaluación.....	51
Tabla 3-3	Relación de piezas sometidas a rayos-X y corte transversal.....	52
Conclusiones y recomendaciones		
Tabla CR-1	Evaluación del nivel de sensibilidad a la humedad del producto con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 10x10.....	55
Tabla CR-2	Evaluación del nivel de sensibilidad a la humedad del producto con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 12x12.....	56
Tabla CR-3	Evaluación de la sensibilidad a la humedad durante el proceso de moldeo.....	57

Resumen

En este trabajo se investigó la delaminación de materiales en interfaces de microcircuitos utilizando la metodología descrita por el estándar IPC/JEDEC J-STD-020, para evaluar la sensibilidad a la humedad de dispositivos microelectrónicos durante el proceso de soldado por reflujo y durante el proceso de moldeo por inyección de plástico. La humedad en el interior de los paquetes puede inducir a que estos sufran delaminación o algún otro daño cuando son sometidos al esfuerzo térmico durante estos procesos. El proyecto se realizó en la empresa **Skyworks Solutions S.A. de C.V.** la cual se ha dedicado al ensamble y prueba funcional de circuitos integrados por más de 35 años. Esta empresa ha tenido pérdidas mayores a los 300, 000 dólares tan solo en los años fiscales 2004 y 2005, debido al problema de delaminación en los productos con matriz densa de terminales esféricas. Una muestra representativa de estos productos del tamaño 10x10 y 12x12 provenientes del ensamble normal de la línea de producción fue seleccionada para ser sometida a condiciones de humedad y temperatura correspondientes a tres niveles de sensibilidad a la humedad establecidos para la evaluación. Después de pasar las muestras por el proceso de reflujo se obtuvieron algunas piezas delaminadas con características similares a algunas fallas que se han presentado en la empresa. De estas piezas algunas pasaron la prueba eléctrica lo cual nos indica que es posible que el material que presente separación en alguna de sus interfaces puede no ser detectado en la prueba funcional y enviarse al cliente como material bueno y confiable. Los resultados de las muestras sometidas al proceso de moldeo por inyección de plástico y exposición a condiciones de cámara de humedad y temperatura, indican que no se obtuvieron piezas delaminadas ni fallas eléctricas en los tres niveles evaluados. En esta tesis se incluye también un *Glosario* de algunos términos en inglés comúnmente utilizados en la industria de los semiconductores así como su traducción al español y una breve definición de los mismos.

Introducción

La delaminación en la industria de los semiconductores es una separación de materiales en una o varias interfases del microcircuito y puede ocasionar fallas latentes o fallas catastróficas en los productos. Es un mecanismo de falla que ocurre constantemente en la industria de los microcircuitos encapsulados durante su proceso de ensamble. Uno de los factores que favorecen la delaminación es la humedad atrapada dentro del paquete que tiende a expandirse durante el proceso de soldado por reflujo; en los casos más severos puede ocasionar fracturas, que salen hasta el exterior del paquete, conocidas como efecto “popcorn”. Este proyecto de tesis se desarrolló en la empresa **Skyworks Solutions S.A. de C.V.**, líder en el ensamble y prueba de dispositivos microelectrónicos para radiofrecuencia y aplicaciones de comunicaciones móviles e inalámbricas. En esta empresa, a pesar de los estrictos controles de calidad que se manejan durante el ensamble de sus productos, se dan problemas de delaminación, exigiendo la realización de estudios especializados en este mecanismo de falla. El proyecto está basado en la metodología que describen los estándares IPC/JEDEC, internacionalmente reconocidos en la industria de los semiconductores, y está enfocado principalmente en el nivel de sensibilidad de los microcircuitos de sufrir delaminación o algún daño, inducido por la humedad atrapada en su interior, cuando son expuestos al proceso de soldado por reflujo. El objetivo principal de este proyecto de investigación es evaluar el nivel de sensibilidad a la humedad de los productos con matriz densa de terminales esféricas (FPBGA por su sigla en inglés) que ha presentado recurrentemente el problema de delaminación y ocasionado cuantiosas pérdidas económicas a la empresa. Para su evaluación se tomaron muestras representativas de la producción normal de este producto. Los objetivos específicos son determinar si la delaminación está ocurriendo durante el proceso de soldado por reflujo y durante el proceso de moldeo por inyección de plástico, además de verificar si las piezas que presentan delaminación son detectadas en la prueba eléctrica a la que son sometidos estos productos en la etapa final de su proceso normal de producción. Para llevar a cabo este proyecto se utilizó equipo especializado, conocido ampliamente en la industria de los semiconductores, incluyendo la microscopía acústica de barrido (SAM), microscopía electrónica de barrido (SEM) y el análisis de energía dispersiva de rayos-X (EDX).

Objetivo principal

El objetivo principal de este proyecto de investigación es la evaluación del nivel de sensibilidad a la humedad de productos con matriz densa de terminales esféricas en base a los estándares IPC/JEDEC para determinar si éste es el factor principal que está ocasionando delaminación en estos productos.

Objetivos específicos

⇒ Determinar la sensibilidad a la humedad de los productos con matriz densa de terminales esféricas, del tamaño 10x10mm y 12x12mm, durante el soldado por reflujo según la metodología que se describe en el estándar IPC/JEDEC J-STD-020.

⇒ Determinar si la delaminación puede ocurrir durante el proceso de moldeo por inyección de plástico cuando el tablero de circuito impreso de los materiales con matriz densa de terminales esféricas ha sido previamente sometido a condiciones de humedad y temperatura.

⇒ Verificar si la prueba eléctrica detecta las piezas que presenten delaminación al término de la evaluación de los productos con matriz densa de terminales esféricas.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Semiconductores

A partir de la década de 1950, los dispositivos semiconductores, conocidos también como *dispositivos de estado sólido*, reemplazaron los tubos electrónicos de la industria tradicional. Por la enorme reducción de tamaño, consumo de energía y costo, además de una mayor confiabilidad, los dispositivos semiconductores significaron un cambio revolucionario en las telecomunicaciones, la computación, el almacenamiento de información, entre otras aplicaciones. Un semiconductor es un material que tiene propiedades entre un conductor y un aislante. Los *semiconductores puros o intrínsecos* conducen electricidad más fácilmente que un aislante pero menos que un conductor cuando se encuentra a temperatura ambiente, sin embargo a temperaturas más altas pueden ser conductivos y a temperaturas muy bajas se comportan como aislantes. Un cristal de silicio, uno de los semiconductores más utilizados, es diferente de un aislante porque a cualquier temperatura por arriba de la temperatura del cero absoluto, hay una probabilidad finita de que un electrón en la red pueda ser movido de su posición, dejando atrás una deficiencia de electrón llamada “vacante”. Si se aplica un voltaje, entonces tanto el electrón como el orificio pueden contribuir a un flujo pequeño de corriente (*Figura 1-1*). [1]

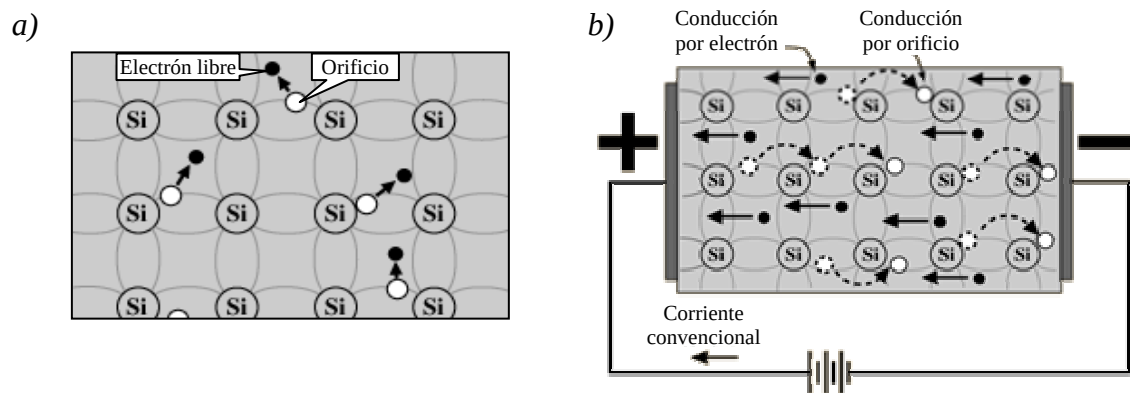


Figura 1-1. Semiconductor intrínseco. En la figura *a)* se observa a los electrones libres y orificios y en la figura *b)* se observa el flujo de corriente al aplicar un voltaje.

La adición de impurezas de manera controlada a un semiconductor intrínseco incrementa drásticamente su conductividad, de esta manera existe la posibilidad de diseñar y fabricar materiales con características eléctricas específicas. Al proceso de introducción de impurezas extrañas se denomina *dopaje* y al realizarlo se producen semiconductores del *tipo-n* y *tipo-p*. Las impurezas pentavalentes como el antimonio, arsénico o fósforo son impurezas de átomos con 5 electrones de valencia y producen semiconductores *tipo-n* al contribuir con electrones adicionales. Al reemplazar algunos átomos de silicio (Si) que tiene cuatro electrones de valencia por átomos de antimonio (Sb) ocurre que cada átomo de Sb utiliza cuatro de sus cinco electrones de valencia para formar enlaces con cuatro átomos de Si vecinos, quedando un electrón extra que necesita liberarse para alcanzar su configuración más estable de ocho electrones. Por otro lado, las impurezas trivalentes como el boro, aluminio o galio son impurezas de átomos con 3 electrones de valencia produciendo semiconductores *tipo-p* al dejar vacantes o deficiencia de electrones. Si se reemplaza ahora algunos átomos de Si por átomos de boro (B), cada átomo de B utiliza sus tres electrones de valencia para formar enlaces con tres átomos de Si vecinos y tratará de capturar un electrón extra para conformar una capa estable de ocho electrones creando una vacante de electrones de valencia (Figura 1-2). [1]

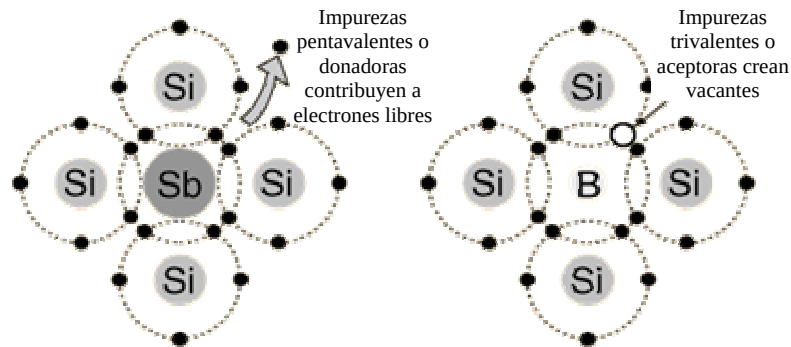


Figura 1-2. Impurezas pentavalentes y trivalentes.

Cuando una región de semiconductor *tipo-p* es colocada junto a una región *tipo-n*, ambas forman un diodo, el cual es un dispositivo de dos terminales que conduce corriente en una sola dirección, y la región de contacto es llamada *unión p-n* (Figura 1-3). Los círculos abiertos en el lado izquierdo de la unión, en la imagen b) de la Figura 1-3, representan las vacantes o deficiencias de electrones, los cuales pueden actuar como transporte de cargas

positivas. Los círculos sólidos del lado derecho de la unión representan los electrones disponibles del dopante *tipo-n*. Los electrones se difunden a través de la unión para combinarse con los orificios creando una región de agotamiento. El nivel de energía arriba a la derecha es una forma de visualizar la condición de equilibrio de la *unión p-n* y la dirección ascendente en el diagrama representa el incremento de energía del electrón.

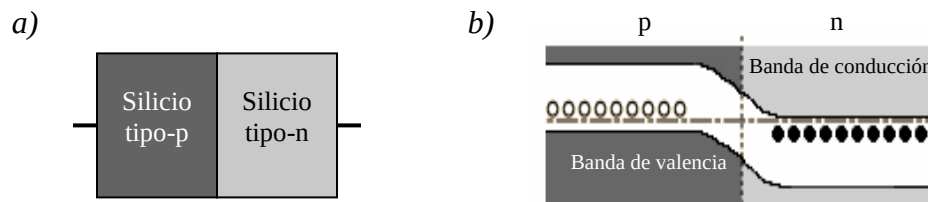


Figura 1-3. Unión p-n.

Las combinaciones de éstas uniones se utilizan para realizar transistores y otros dispositivos semiconductores, en los que el comportamiento eléctrico puede controlarse con estímulos adecuados de electricidad. El resultado de combinar varios transistores y otros componentes activos o pasivos es el *circuito integrado*, un dispositivo electrónico complejo diseñado para realizar ciertas funciones. El proceso de colocar el circuito integrado dentro de un paquete para hacerlo confiable y conveniente para utilizarse es conocido como ensamble de circuitos integrados o de dispositivos microelectrónicos. Por años, tanto la tecnología de circuitos integrados como la de ensamble de los mismos ha estado enfocada en desarrollar paquetes más pequeños, baratos, confiables y más amigables al medio ambiente. [1]

1.1.1 Tecnología de montaje en superficie

La tecnología de montaje en superficie (*SMT* por sus siglas en inglés), es un método que se utiliza en el ensamble de los circuitos integrados. Consiste en construir dispositivos microelectrónicos montando los componentes directamente sobre la superficie de un tablero de circuito impreso. Esto se realiza en forma automatizada depositando pasta de soldadura en las áreas donde se van a colocar posteriormente los componentes; después se somete el tablero al proceso de soldado por reflujo de tal forma que los componentes quedan conectados mecánica y eléctricamente. Estos dispositivos son llamados *dispositivos de montaje en superficie*. Esta tecnología, la

cual vino a hacer un cambio revolucionario en el ensamble de dispositivos microelectrónicos hace ya algunos años, permite el avance de la industria electrónica en la elaboración de productos más pequeños, ligeros, con mayor densidad y más baratos. Anteriormente, el ensamble consistía en insertar componentes en perforaciones hechas sobre una tarjeta electrónica, pero este método por inserción o *THT* por sus siglas en inglés, llegó a sus límites debido a la necesidad de perforar el tablero para cada una de las terminales de los componentes y por lo tanto se incrementaba su costo de producción, además de la dificultad que representaba el perforar los orificios más pequeños de dimensiones menores a 0.1 pulgada. [2]

1.1.2 Productos con matriz densa de terminales esféricas

Los productos con matriz densa de terminales esféricas, o FPBGA por sus siglas en inglés, son dispositivos microelectrónicos de montaje en superficie cuya característica principal es que utilizan un arreglo de esferas o bolas de metal cuya función es proveer una interconexión eléctrica externa. Las esferas están compuestas de soldadura generalmente de estaño (Sn) o de estaño-plomo (Sn-Pb) y son pegadas en la parte del lado inferior del paquete. El dado está conectado al tablero de circuito impreso mediante alambres de oro y el tablero tiene líneas conductoras internas que lo dirigen y conectan con el dado y con las uniones del arreglo de esferas (*Figura 1-4*). Las principales ventajas de este material es su alta densidad de interconexión ya que el número de esferas que ofrece es alto y además ocupan un espacio pequeño de tablero. [2] [3]

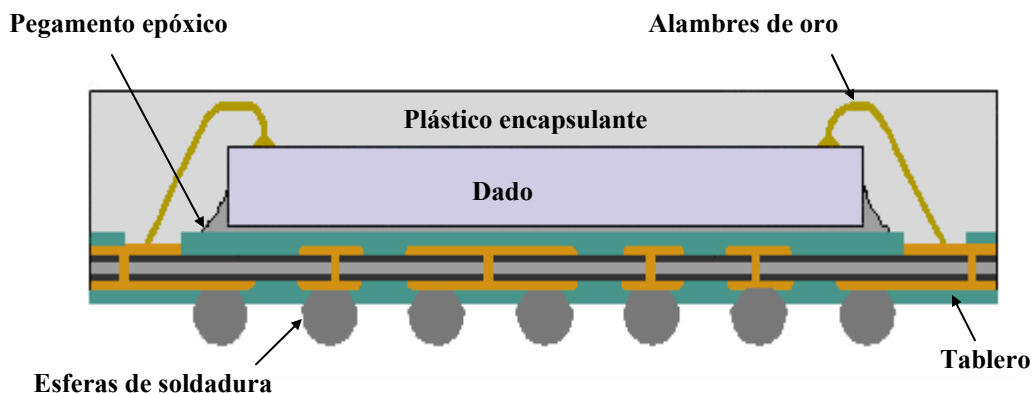


Figura 1-4. Productos con matriz densa de terminales esféricas.

Este proyecto de investigación tiene como finalidad el estudio de la delaminación de materiales en interfaces de dispositivos microelectrónicos de montaje en superficie y para llevarlo a cabo se utilizaron productos con matriz densa de terminales esféricas, ya que han presentado en forma recurrente el problema de delaminación en la empresa donde se realizó el proyecto.

1.1.3 Proceso de ensamble de los productos con matriz densa de terminales esféricas

En la empresa donde se realizó este proyecto se ensamblan, se prueban eléctricamente y se empaquetan los circuitos integrados. Entre los distintos productos que se manejan se encuentran los productos con matriz densa de terminales esféricas y su proceso de ensamble se describe en la *Tabla 1-1*.

1.2 Delaminación y el efecto popcorn

La delaminación en el mundo de los semiconductores es un problema que afecta la funcionalidad de los dispositivos microelectrónicos provocando cuantiosas pérdidas económicas. Es una separación de materiales debido a una falla de adherencia entre el plástico encapsulante y los componentes internos del dispositivo. Los dispositivos de montaje en superficie son más susceptibles a esto debido a que son expuestos a altas temperaturas durante el soldado por reflujo el cual ocurre en el mismo lado del tablero. La presión del vapor de humedad en el interior de paquetes no herméticos incrementa bastante cuando el paquete es expuesto a altas temperaturas durante el soldado por reflujo y bajo ciertas condiciones, esta presión puede causar separación entre el encapsulado y el tablero, entre el encapsulado y el dado e incluso desprendimiento de alambres, desprendimiento del dado, daños en la soldadura y fracturas internas que no se extienden hasta el exterior del paquete. En casos más severos, la presión de vapor dentro de los microcircuitos durante el proceso de soldado por reflujo puede causar fracturas que se extienden hasta el exterior del paquete conocidas como *efecto popcorn*. Esto ocurre debido a que el esfuerzo interno es tan grande que puede causar una protuberancia que se puede observar en el exterior del paquete la cual termina fracturándose con un audible *pop*. El problema de popcorn se aprecia comúnmente en

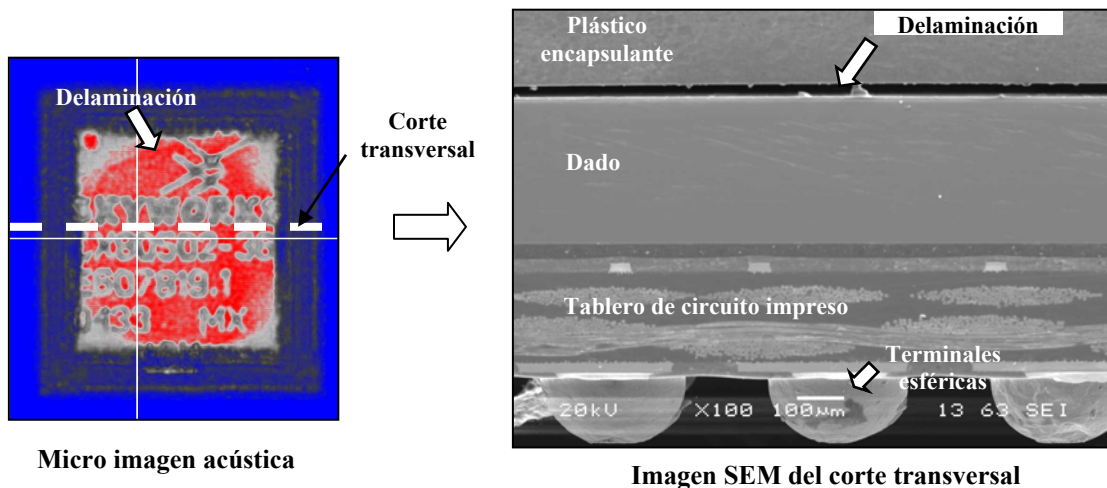
los dispositivos grandes y planos, y ha sido un problema particular con los productos de matriz densa de terminales esféricas. Además de la humedad existen otros factores como la corrosión y los contaminantes atmosféricos que también pueden favorecer a que ocurra alguna falla por adherencia. [4]

El proceso de ensamble comienza con el singulado de las obleas de silicio para individualizar los dados que las componen.	
Los dados son montados en los tableros de circuito impreso utilizando un pegamento epóxico no conductor el cual es curado en un horno de convección a 175°C durante 90 minutos. Después son sometidos a plasma para remover contaminantes.	
Los dados son conectados a sus terminales con alambre delgado de oro de 99.99% de pureza y se somete el material una vez más al proceso de plasma.	
Una vez alambrado se moldea por inyección de plástico encapsulante en una prensa a alta presión y a temperatura de 180°C. Se hornea durante 6 horas a 165±3°C para que el plástico sea curado y quitar la humedad remanente. Después son marcados con información comercial con un equipo láser	
Se montan las esferas que caracterizan a estos productos con la ayuda de un equipo automatizado y se soldan en un horno de reflujo a temperatura pico de 220°C si las esferas son <i>Sn-Pb</i> o 240°C o si son <i>libres de plomo</i>.	
El tablero es singulado para darle al material la forma final y ser probados eléctricamente en equipo automatizado. Se realiza una inspección física también automatizada y por último el producto es empaquetado para ser enviado con el cliente.	

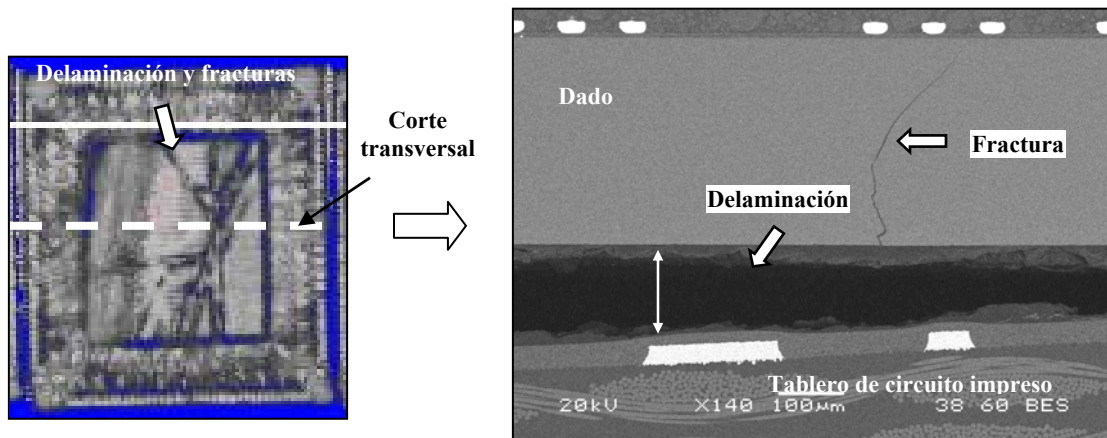
Tabla 1-1. Proceso de ensamble de los productos con matriz densa de terminales esféricas.

1.2.1 Casos de delaminación

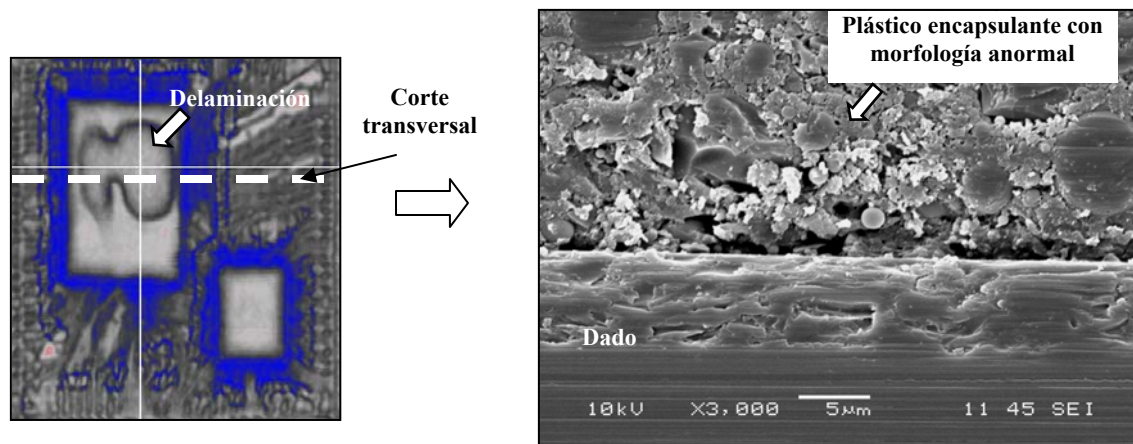
Como ya se mencionó anteriormente, en la empresa donde se desarrolló este proyecto de investigación ha ocurrido el fenómeno de delaminación en forma recurrente. Este problema ha causado cuantiosas pérdidas económicas debido a material que se ha tenido que tirar, además de retrasos de envíos con el cliente, envíos incompletos e incluso ha habido casos donde las piezas han fallado con el cliente debido a la delaminación en alguna interfase del circuito integrado. En las imágenes de la *Figura 1-5* se muestran algunos casos de delaminación que se han dado en productos con matriz densa de terminales esféricas en *Skyworks Solutions*.



a) En esta pieza se puede observar la separación que hubo entre el dado y el plástico de moldeo.



b) Esta pieza presentó delaminación entre el dado y el tablero. También se fracturó el dado.



- c) El plástico encapsulante se observa poco compactado lo que hace que haya espacios sin rellenar y es lo que se detecta en el análisis de micro imagen acústica.

Figura 1-5 Casos de delaminación. En las imágenes a), b) y c) se muestran algunos casos de delaminación en la empresa Skyworks Solutions.

Durante los años fiscales 2004 y 2005 se tuvieron pérdidas económicas de más de \$300,000 dólares en material que se tuvo que tirar debido a que presentaba delaminación, tan solo en esta empresa.

1.3 Factores que favorecen la delaminación

Son varios los factores que pueden llegar a favorecer la delaminación en los dispositivos microelectrónicos. Algunos de estos factores son los contaminantes sobre la superficie del tablero o del dado, las dimensiones y diseño del microcircuito, el uso de plásticos encapsulantes con excesivo agente moldeador, los materiales de pegado, espesores insuficientes de pegamento, la humedad atrapada en su interior y presencia de corrosión en los materiales. A continuación se describen tres de los más comunes.

1.3.1 Humedad

La humedad es uno de los factores críticos que favorecen la separación de materiales en los dispositivos microelectrónicos. La mayoría de los componentes electrónicos utilizados en la industria de los semiconductores son sensitivos a humedades altas debido a que contienen materiales poliméricos. Todos los materiales poliméricos son permeables a la humedad en mayor o menor grado y pueden absorberla por difusión

cuando son expuestos en un ambiente húmedo. Para que tenga lugar el fenómeno de difusión debe existir una diferencia o gradiente de concentración entre dos puntos del medio, en este caso entre los dispositivos microelectrónicos, los cuales presentan materiales poliméricos no-herméticos y la humedad del ambiente en que se encuentran (Figura 1-6). [5]

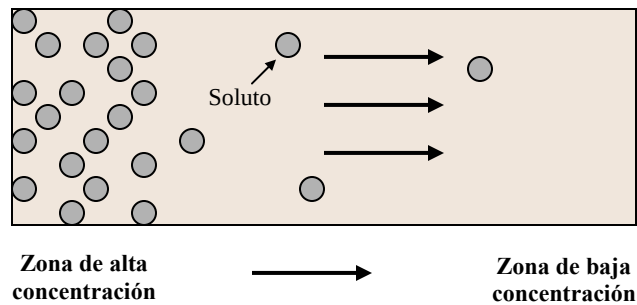


Figura 1-6. Fenómeno de difusión. En la figura el transporte del soluto es de izquierda a derecha y su movimiento ocurre debido al gradiente de concentración (dC/dx).

La cantidad de agua absorbida y la relación a la cual el equilibrio es alcanzado dependerá del tipo de paquete, del material y las condiciones bajo las cuales es almacenado. La presión del vapor de humedad en el interior de paquetes no-herméticos incrementa bastante cuando son expuestos a altas temperaturas durante el soldado por reflujo y es cuando la delaminación e incluso el efecto popcorn pueden ocurrir. El efecto de la humedad no está limitado a los componentes activos, se pueden encontrar efectos similares con tableros expuestos a la humedad y que después son sometidos al soldado por reflujo sin haber sido secados previamente. Al igual que sucede con el efecto popcorn, la mayoría de los problemas relacionados con la humedad se presentan durante el ensamble. La humedad puede impactar en el funcionamiento del circuito afectando sus características eléctricas. Mientras más alta sea la humedad relativa en el ambiente, más grande será la humedad en el interior del material. De esto, se pudiera suponer que lo mejor es mantener el material completamente seco, así como su ensamble en una atmósfera seca. Sin embargo, a humedades por debajo de 30%HR los problemas de cargas estáticas se vuelven severos, es por eso que la mayoría de las empresas de fabricación y ensamble de circuitos integrados operan con una humedad relativa de alrededor de 50%HR.

1.3.2 Contaminación

Se considera contaminación a la presencia de algún material extraño en el interior del microcircuito. Algunos contaminantes pueden afectar el funcionamiento y confiabilidad del dispositivo microelectrónico al impedir una buena adhesión entre los materiales que lo componen, es por esto que necesitan ser identificados inmediatamente y encontrar su origen de raíz. El criterio para rechazar los contaminantes depende de su localización, dimensión y composición. Entre los contaminantes más comunes se incluyen los residuos orgánicos, material de pegamento en la superficie del dado, residuos de resina epóxica, polvo de silicio proveniente del área de cortado de las obleas de silicio, capa de pasivación sin atacar químicamente en las áreas de pegado de los alambres y fibras de materiales de producción. Se ha establecido una cantidad de partículas óptima que permite cumplir con los estándares de calidad. Además, el monitoreo de partículas dentro del cuarto limpio es importante para controlar el ambiente donde el material es ensamblado, que es el lugar donde es más crítica su presencia. El cuarto limpio de la empresa donde se llevó a cabo este proyecto cuenta con un cuarto limpio clase ISO clase 5, es decir, se tiene un criterio de aceptación de 100 000 partículas de 0.1 micrones por unidad de volumen de aire (m^3). El monitoreo de partículas es automático y se realiza mediante el equipo LMS (Lighthouse Monitoring System), por sus siglas en inglés, el cual cuenta con sensores distribuidos estratégicamente en el cuarto limpio. Algunas de las técnicas de análisis de fallas utilizadas para identificar contaminantes internos incluyen el análisis de energía dispersiva de rayos-X (*EDX*), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (*FTIR*), espectroscopía de electrones Auger (*AES*) y el análisis de cromatografía de iones (*IC*). [6]

1.3.3 Corrosión

Corrosión es un proceso electroquímico en el cual la superficie del metal reacciona con su medio ambiente para formar un óxido u otro compuesto. El proceso de corrosión requiere de cuatro componentes para poder ocurrir, estos son: un ánodo, un cátodo, un electrolito y una conexión eléctrica entre el ánodo y cátodo. Para prevenir la corrosión se debe eliminar al menos uno de estos componentes. La presencia de un ánodo y un

cátodo implica que existe una diferencia de potencial entre ellos, es decir, el ánodo tiene mayor tendencia a ceder electrones mientras que un cátodo tiene mayor tendencia a ganarlos. La presencia de esta diferencia de potencial es el principal conductor de la corrosión. El ánodo es el metal o área con más alto potencial para oxidarse (perder electrones), es el metal más activo y puede ser una región estresada como una fractura, un rayón, una frontera de grano, una estructura deformada o un área con variaciones en su composición. El cátodo es el metal o área con más alto potencial para reducirse (ganar electrones) o con menor tendencia a oxidarse. Usualmente es un metal noble, una región sin esfuerzo o algún componente no metálico. El electrolito es el medio a través del cual los iones pueden moverse, el más común es el agua. En la industria de los semiconductores la corrosión es el resultado de problemas de contaminación durante la fabricación de las obleas o durante su ensamble. Un inadecuado enjuague, contaminantes corrosivos como son compuestos de fósforo (*P*), el azufre (*S*) y el cloro (*Cl*) o defectos de pasivación pueden ocasionar que los dados sean muy susceptibles a corroerse. La corrosión del dado se da en las áreas de metal en su superficie, como el aluminio (*Al*) el cual se utiliza con frecuencia en un circuito típico de dado. La presencia de corrosión en los microcircuitos puede inducir delaminación en los materiales al impedir una buena. [7]

a) Reacciones de la corrosión

Una superficie metálica expuesta a un medio húmedo con presencia de sustancias que puedan funcionar como electrolito, sufrirá el proceso electroquímico de corrosión debido a la formación de micro celdas compuestas por zonas anódicas y catódicas. En este caso el metal mismo actuará como conductor electrónico cerrando el circuito corrosivo. Cuando los átomos de la zona anódica se disuelven para formar los iones, los electrones que se liberan en el proceso electroquímico de oxidación (corrosión) hacen que esta zona se torne negativa con respecto a la solución, debido a que se polariza negativamente la capa de difusión entre el ánodo y el electrolito la cual es tan delgada que es imperceptible a simple vista. Los electrones pasan entonces al cátodo a través de la masa metálica que actúa como conductor y neutralizan los iones positivos en un proceso electroquímico de reducción o ganancia de electrones. Por consiguiente, la corrosión es causada por los

procesos simultáneos anódicos y catódicos. En la *Figura 1-7* se muestra un esquema del proceso de corrosión generado por la presencia de una gota de solución electrolítica depositada sobre una superficie metálica de hierro.

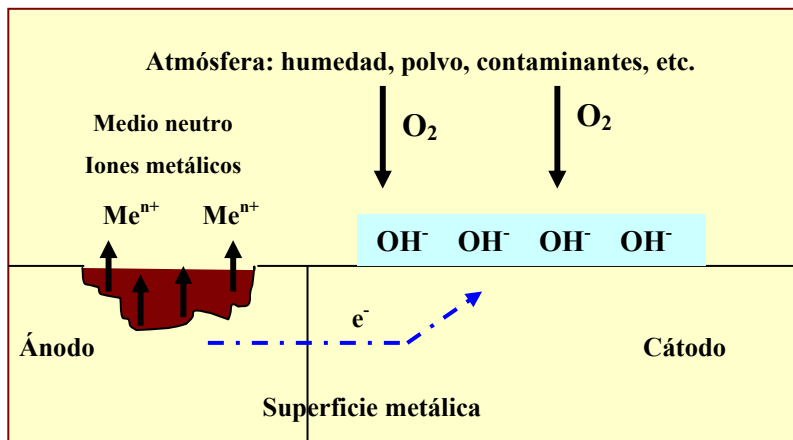
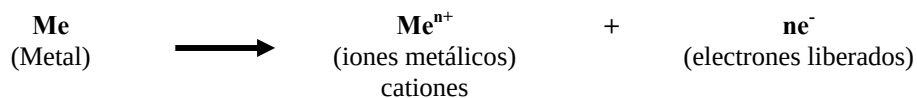


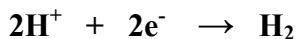
Figura 1-7. Proceso de corrosión electroquímica. El proceso se observa sobre una superficie metálica expuesta en un medio acuoso neutro en presencia de oxígeno.

El esquema de reacción en el ánodo (oxidación o corrosión) de la superficie metálica es el siguiente:

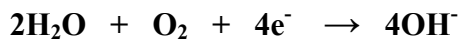
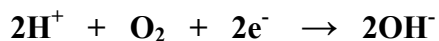


Por otro lado, se pueden llevar a cabo diferentes reacciones catódicas, que dependen de las características fisicoquímicas del medio en el cual se encuentra la especie que se reducirá en las zonas catódicas. Algunas de las reacciones catódicas más comunes son las siguientes:

Medio ácido

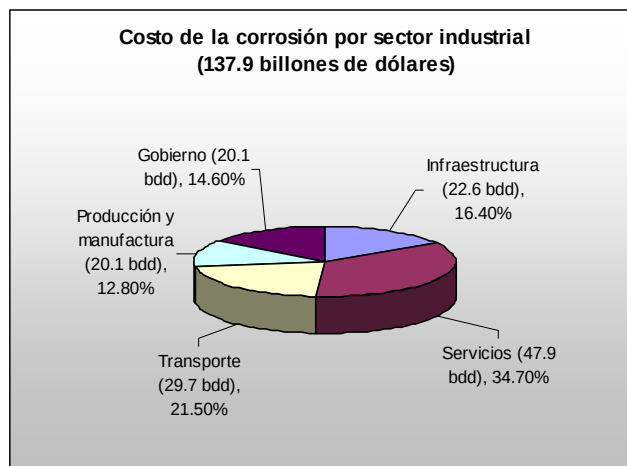


Medio neutro o alcalino

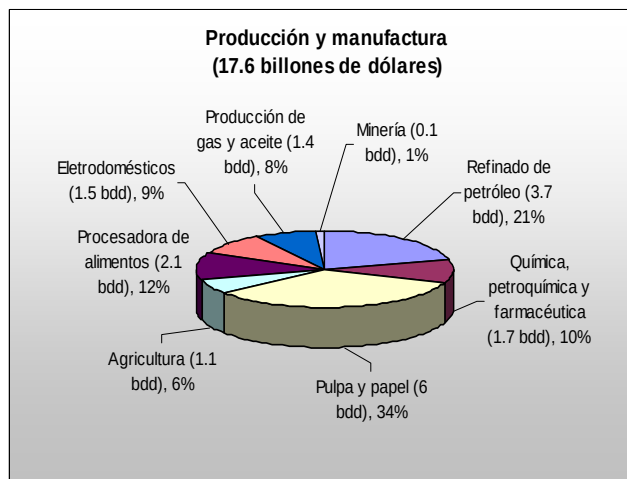


b) Costos por corrosión en la industria electrónica

Aunque los costos por corrosión en esta industria no pueden ser estimados, se cree que una buena parte de las fallas en componentes electrónicos son debidas a la corrosión, un estudio reciente de costos por corrosión en Estados Unidos (NACE, Julio de 2002) nos indica que las pérdidas por corrosión representan un % importante de los recursos económicos de las industrias del sector eléctrico y electrónico, comparables con los de otras industrias con medios más agresivos. En la *Figura 1-8* se muestran unas gráficas con la estimación de los costos por corrosión en la industria eléctrica y electrónica.



Estimación de costos por corrosión en la industria de los EUA (NACE, 2002).



Estimación de costos por corrosión en la industria eléctrica y electrónica (NACE, 2002)

Figura 1-8. Estimación de costos por corrosión en la industria eléctrica y electrónica.

c) Formas de la corrosión

La corrosión es el deterioro de los materiales, principalmente metálicos, por interacción con el medio ambiente que los rodea. Existen dos tipos generales de formas de corrosión, la *corrosión uniforme* o *generalizada* y la *corrosión localizada*. La corrosión uniforme ocurre mediante un proceso de desgaste uniforme del metal, permitiendo que sea detectada o que su comportamiento pueda ser predecido antes de que la falla ocurra. La corrosión localizada, la cual es más común en la industria, puede presentar distintas formas y provoca fallas repentinas que son difíciles de predecir. Es un ataque selectivo sobre un metal que se manifiesta por corrosión en áreas pequeñas del metal en contacto con el ambiente. El tipo más común de corrosión localizada es por *picaduras*, ésta origina que el metal afectado se elimine por corrosión de áreas específicas para producir huecos. Si la corrosión por picaduras ocurre sobre la superficie del metal en un líquido estancado, se le conoce como *corrosión por hendiduras*, otras veces, cuando existen productos de corrosión o suciedad se le llama *corrosión por depósitos*. Cuando hay movimiento, el fenómeno se puede presentar como *cavitación* y *corrosión por fricción*. Otro tipo de daño localizado, es la *corrosión intergranular*, a veces llamada *corrosión intercrystalina*; donde un pequeño volumen de metal se elimina por la trayectoria que siguen los límites de los granos, apareciendo fisuras o grietas. La misma clase de fisuras pueden ser causadas por *corrosión transgranular*, a veces llamada *corrosión transcristalina*. En ésta, una pequeña cantidad de metal se elimina por trayectorias preferentes que siguen a través o por los granos. Los procesos de *corrosión intergranular* y *transgranular* a veces son acelerados por fuerzas de tensión mecánica. En casos extremos, los rompimientos continúan a través del metal causando ruptura o perforación. Esta condición se conoce como *agrietamiento por corrosión bajo tensión*, o SCC por sus siglas en inglés. Las grietas de la subsuperficie intergranular y transgranular también se pueden producir por la presencia de hidrógeno, proceso que es conocido como *fragilización por hidrógeno*. La *fragilización cáustica* y la *corrosión por fatiga*, son otros dos mecanismos de deterioro del metal donde se forman fisuras por encima o bajo la superficie. Otro tipo de corrosión localizada que ha sido causa de muchos estudios es la *corrosión microbiológicamente inducida*. En la *Tabla 1-2* se muestran algunos tipos de corrosión que comúnmente ocurren en instalaciones industriales. [8]

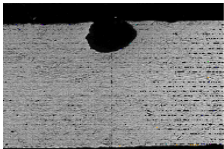
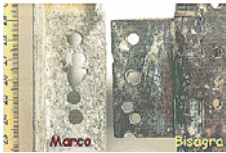
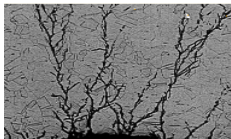
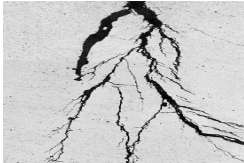
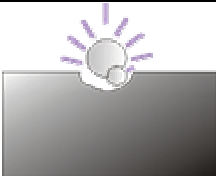
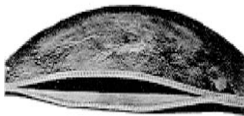
Corrosión uniforme		Corrosión por picaduras	
Corrosión galvánica		Corrosión por hendiduras	
Corrosión bajo esfuerzo		Corrosión intergranular	
Corrosión transgranular		Corrosión fatiga	
Corrosión erosión		Corrosión microbiana	
Corrosión cavitación		Corrosión por fricción	
Fragilización por hidrógeno		Corrosión exfoliación	

Tabla 1-2. Formas más comunes en que se presenta la corrosión en la infraestructura industrial

1.4 Estándares IPC/JEDEC

Los estándares *IPC* anteriormente conocidos por sus siglas en inglés como Institute of Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, pertenecen a la Association Connecting Electronic Industries y los estándares *JEDEC*, antes conocidos por sus siglas en inglés como Joint Electron Device Engineering Council pertenecen a la Solid State Technology Association (*Figura 1-9*). Estos estándares, los cuales son internacionalmente conocidos en la industria de los semiconductores, fueron tomados como referencia para llevar a cabo la metodología que en ellos se describe y poder evaluar la sensibilidad a la humedad de los productos con matriz densa de terminales esféricas cuando estos son sometidos al proceso de soldado por reflujo y al proceso de moldeo por inyección de plástico



Figura 1-9. Estándares IPC/JEDEC

Los estándares y publicaciones IPC y JEDEC están designados para eliminar malos entendidos entre los fabricantes y compradores facilitando el intercambio y la mejora de productos así como asistir al comprador en el proceso de seleccionar y poder obtener con un mínimo de retrasos, el producto con las características adecuadas para su uso particular. La existencia de estos estándares y publicaciones no excluyen a ningún miembro de IPC o JEDEC de manufacturar o vender productos que no sean conformantes con estos estándares ni tampoco excluyen su uso voluntario por otros que no sean miembros. [9]

1.5 Soldado por reflujo

Son dos las etapas del proceso de ensamble de los productos con matriz densa de terminales esféricas que se sometieron a evaluación, por ser donde el material es más susceptible de sufrir alguna separación inducida por la humedad en el interior del

microcircuito. Una de estas etapas, la cual es considerada una de las más críticas en el ensamble de los dispositivos de montado en superficie, es el proceso de soldado por reflujo. El proceso de montado en superficie consiste en la aplicación de pasta de soldadura, en un área específica del tablero para posicionar sobre éste el componente y después ser sometido al soldado por reflujo. Es un proceso que utiliza alta temperatura para que se derrita la pasta de soldadura de manera que se pueda formar la conexión final entre los dispositivos de montado en superficie y el tablero de circuito impreso. Para esto, se utiliza un equipo conocido como el horno de soldado por reflujo. Existen hornos de reflujo infrarrojo (*IR*) y hornos de reflujo por convección e incluso muchos hornos modernos utilizan ambas técnicas para alcanzar excelentes resultados en el proceso de reflujo. De estos dos tipos de hornos, el de convección provee una distribución más uniforme de calor al tablero de circuito impreso. En la empresa donde se realizó este proyecto se utilizan los hornos de reflujo por convección para llevar a cabo el soldado por reflujo de los dispositivos de montado en superficie. Estos hornos transfieren calor al tablero de circuito impreso mediante la circulación de aire o gas caliente a su alrededor. Por lo general son sistemas de zonas múltiples superiores e inferiores en las cuales se puede controlar individualmente la temperatura, la convección se divide en forma distinta dentro de cada zona y el aire o gas utilizado es extraído a través de ductos posicionados entre los paneles perforados. Un proceso de soldado por reflujo debe de seguir un perfil de temperatura optimizado y controlado para prevenir que el tablero experimente un exceso de esfuerzo térmico durante este proceso y sea dañado (*Figura 1-10*). Las temperaturas de reflujo de las soldaduras *libres de Plomo* generalmente son mayores que las de los materiales *Estaño-Plomo* (*Sn-Pb*) debido a que su temperatura de fusión es más alta, es por esto que se tienen que manejar perfiles de temperatura adecuados para el tipo de soldadura que se esté utilizando en el proceso. Un perfil de reflujo inadecuado, en el que la rampa de temperatura no se encuentra adecuadamente controlada y ajustada, es un factor crítico muy importante que se debe considerar para evitar la delaminación. [2]

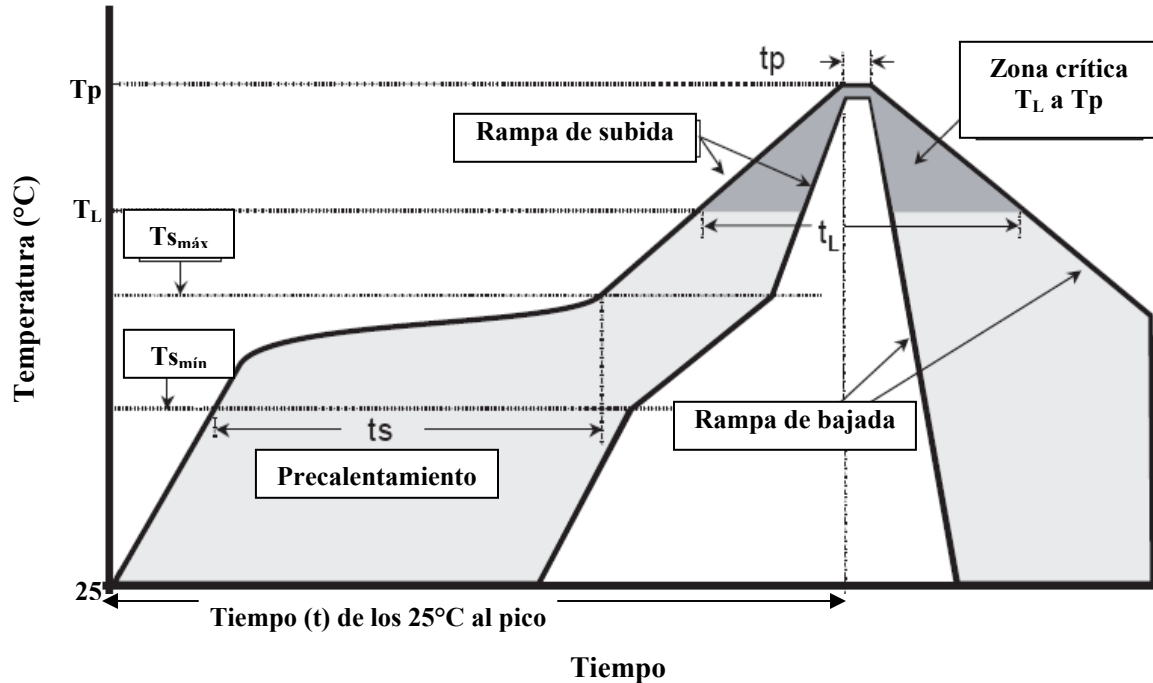


Figura 1-10. Características de un perfil de temperatura

a) Precalentamiento (T_s)

Esta etapa consiste en subir gradualmente la rampa de temperatura hasta alcanzar la temperatura de la zona de precalentamiento en la cual los solventes se van a ir evaporando de la pasta de soldadura.

b) Activación del Flux (T_L)

Consiste en la deshidratación de la pasta de soldadura a una temperatura en la cual se activa químicamente, permitiendo que reaccione con la superficie removiendo óxidos y contaminantes de las superficies donde se van a montar los componentes.

c) Reflujo real (T_p)

Consiste en elevar la rampa de temperatura hasta el punto en que el contenido de aleación de la pasta de soldadura se derrita de manera que cause suficiente humectación en las superficies de interconexión entre los componentes de montado en superficie y el tablero de circuito impreso para formar el relleno necesario entre los dos. La

temperatura pico de reflujo debe ser lo suficientemente más alta que el punto de fusión de la aleación de la soldadura para asegurar una buena humectación, pero no tan alta de manera que pueda ocasionar que se dañen los componentes.

d) Enfriamiento

Esta es la última etapa del proceso de soldado por reflujo y consiste en bajar la rampa de temperatura a una velocidad óptima. Lo suficientemente alta para formar pequeños granos que proporcionen alta resistencia a la fatiga, pero lo suficientemente lenta para prevenir daño térmico-mecánico a los componentes, hasta que la soldadura se vuelva sólida de nuevo y forme buenas uniones metalúrgicas entre los componentes y el tablero.

1.6 Moldeo por inyección de plástico

La otra etapa del proceso de interés para este proyecto es el proceso de moldeo por inyección de plástico, el cual consiste en encapsular el dispositivo microelectrónico con un material plástico. Esto se realiza para proteger al dado del ambiente exterior, para su aislamiento del medio ambiente, para que tenga buena dispersión de calor y para facilitar su manejo. Este proceso se lleva a cabo con un equipo de moldeo el cual utiliza una prensa a alta presión y una temperatura de 180°C. Después de ser precalentado, el plástico encapsulante es forzado por un pistón hidráulico dentro del recipiente en donde alcanza la temperatura de fusión y se vuelve un fluido. El pistón continúa forzando el fluido de plástico dentro de los corredores del molde. Estos corredores sirven como canales donde el fluido de plástico viaja hasta alcanzar las cavidades, las cuales contienen los tableros para encapsularlos. En las cámaras de flujo convencional, las cavidades son llenadas en forma de árbol de navidad, por ejemplo, las cavidades que están cercas se llenan primero. La velocidad más alta de llenado la experimenta la primera cavidad y disminuye en cuanto ésta es llenada. Las cavidades subsecuentes son llenadas con incrementos de velocidad hasta llegar a la última, la cual termina con la segunda velocidad más alta, próxima solamente a la primera. De esta manera, la primera y las últimas cavidades están más propensas a que se dañen los alambres. Los materiales utilizados para encapsular los dispositivos microelectrónicos son conocidos como compuestos plásticos para moldeo. Generalmente son

compuestos de materiales que consisten en resinas epóxicas, endurecedores fenólicos, sílices, catalizadores, material de relleno, pigmentos y agentes liberadores para moldeo. Cuando se selecciona un compuesto plástico para moldeo se deben considerar algunas propiedades críticas incluyendo su temperatura de transición vítrea (T_g), velocidad de absorción de humedad, coeficiente de expansión térmico, conductividad térmica y sus propiedades de adhesión. Existen muchos tipos de plásticos encapsulantes utilizados en la industria de los semiconductores. Una adecuada selección de éstos puede evitar problemas asociados con su fabricación, esfuerzo del paquete, fracturas del paquete y delaminaciones interfaciales. Además, si no se tiene el cuidado adecuado en los parámetros del proceso de moldeo y en el mantenimiento del equipo se pueden obtener varias fallas incluyendo un llenado incompleto, vacíos y ampollas en el encapsulado, barrido de alambres, entre otros. [10]

1.7 Micro imagen acústica

El análisis de micro imagen acústica es una técnica confiable y no destructiva para detectar delaminación en los microcircuitos encapsulados. Se realiza con la ayuda de un microscopio acústico de barrido el cual utiliza energía ultrasónica de alta frecuencia. El sonido es un disturbio elástico que se propaga a través de gases, líquidos y sólidos a frecuencias menores de los 20 KHz mientras que el ultrasonido es un disturbio elástico que se propaga solo a través de sólidos y líquidos a frecuencias arriba de los 20 KHz. Una onda ultrasónica no se puede propagar a través del vacío o a través del aire a frecuencias arriba de los 10 MHz que es el rango más bajo que utiliza la microscopía acústica (*Figura 1-11*). La delaminación y las fracturas, por ejemplo, ocasionan separaciones en el material y huecos de aire que reflejan el ultrasonido en vez de transmitirlo logrando con esto que el análisis de micro imagen acústica detecte estas discontinuidades con gran sensibilidad. Además, los pulsos de ultrasonido además son sensibles a los cambios en las propiedades del material debido a la presencia de defectos internos. El equipo que se utilizó para llevar a cabo la técnica de micro imagen acústica es el microscopio acústico de barrido C-SAM D-9000 de Sonoscan (*Figura 1-12*). [11]

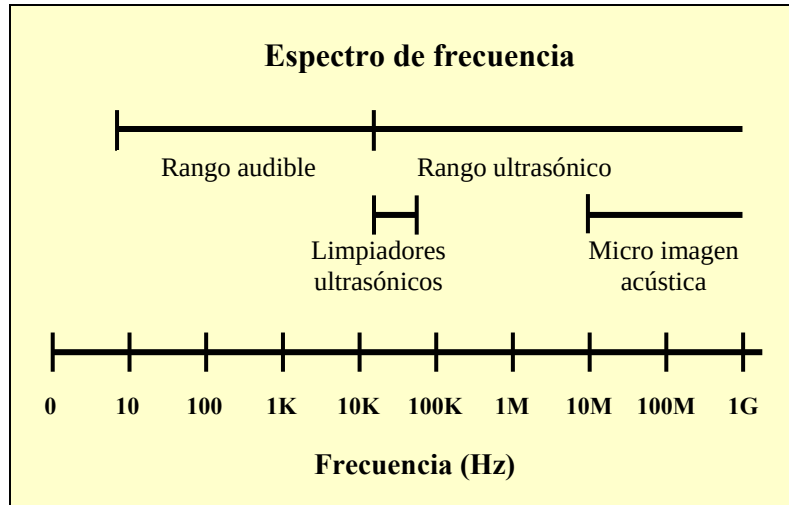


Figura 1-11. Espectro de frecuencia. Se puede observar el rango utilizado en micro imagen acústica por arriba de 10MHz.



Figura 1-12. Microscopio acústico de barrido

Es un microscopio de pulso-eco ultrasónico de muy alta frecuencia que genera imágenes por medio de un barrido mecánico realizado por un transductor piezoeléctrico, el cual transforma una forma de energía en otra, en este caso transforma la energía mecánica en

eléctrica y viceversa. La muestra y el transductor se unen acústicamente con agua deionizada o algún fluido inerte. El transductor actúa como iniciador y receptor de los pulsos. Primero el pulso penetra la muestra y ésta regresa ecos, que surgen de sus interfases internas, los cuales son detectados por el mismo transductor y convertidos en señal eléctrica. En la *Figura 1-13* se muestra una representación en el osciloscopio de la amplitud de los ecos de cada interfase recibidos por el transductor en función del tiempo de regreso del eco. [12]

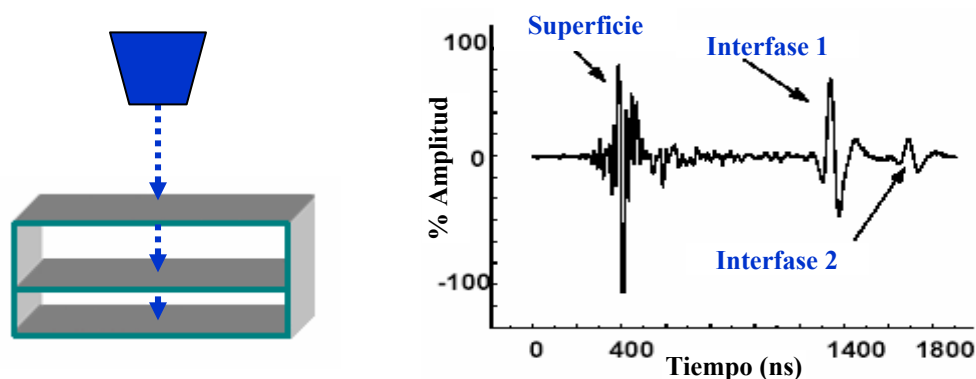


Figura 1-13. Relación tiempo-distancia entre ecos

La cantidad de energía acústica incidente que es reflejada, depende de muchos factores incluyendo los materiales en contacto, propiedades mecánicas, tamaño y orientación de las interfases. La fuerza relativa del ultrasonido transmitido y reflejado en una interfase es gobernada por la *impedancia acústica* de los materiales en cada lado de la interfase. La *impedancia acústica*, es el producto de la densidad del material y la velocidad del ultrasonido. La señal del eco es analizada y sus características son utilizadas para formar imágenes de estructuras internas y defectos. Los defectos internos ocasionan que el ultrasonido sea espacialmente alterado y que la imagen tenga distintos niveles de brillantez en las áreas afectadas de manera que se puedan distinguir fácilmente. En los dispositivos microelectrónicos la imagen acústica no es sencilla de interpretar, es por esto que es recomendable obtener la imagen de *Modo-C* y la imagen de *Transmisión completa* ya que con la ayuda de ambas se puede obtener resultados más confiables. El análisis de *Modo-C*, también conocido como C-Sam, se realiza en el plano X-Y a

determinada profundidad Z y se obtiene seleccionando en el osciloscopio el eco de la interfase que se desea analizar (*Figura 1-14*).

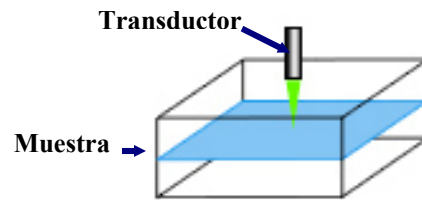


Figura 1-14. Análisis de Modo-C o C-Sam

Las imágenes del modo de *Transmisión completa*, se obtienen colocando un segundo transductor en el lado opuesto de la muestra para recibir los pulsos de ultrasonido que han pasado a través de la muestra entera, de esta manera el grosor completo de la muestra es investigado (*Figura 1-15*). [11]

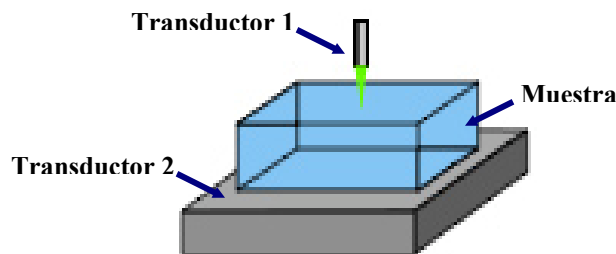


Figura 1-15. Análisis de Transmisión completa.

Existen otros tipos de imágenes que se pueden obtener con el análisis de micro imagen acústica pero las imágenes del modo-C y de transmisión completa son las que más comúnmente se utilizan en la industria de los semiconductores.

1.8 Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido nos proporciona una imagen con una magnificación lo suficientemente alta para poder apreciar los pequeños defectos que con un microscopio óptico convencional sería muy difícil de detectar. El equipo que se utilizó y que se encuentra en el laboratorio de confiabilidad y análisis de fallas dentro de la empresa donde se desarrolló el proyecto, es el microscopio electrónico de barrido JSM-

6360 de JEOL (*Figura 1-16*). El SEM, por sus siglas en inglés Scanning Electron Microscope, produce punto por punto una reconstrucción de la muestra a partir de una señal emitida por la misma muestra.



Figura 1-16. Microscopio electrónico de barrido

El equipo cuenta con un cañón que genera un haz de electrones de intensidad específica para realizar un barrido enfocado finamente en la superficie de la muestra, la cual genera electrones secundarios que son colectados por un detector y después amplificados para obtener la imagen (*Figura 1-17*). La imagen obtenida de la señal de electrones secundarios deriva su contraste, en la escala de los grises, principalmente de la topografía de la muestra. Las áreas que se encuentran frente al detector tienden a ser ligeramente más claras que las áreas más alejadas y los orificios o depresiones tienden a ser más oscuros mientras que las orillas y superficies inclinadas se observan más claras. [13]

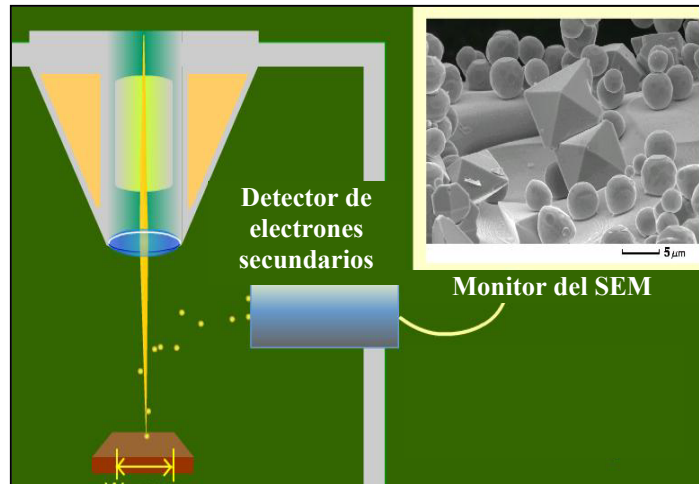


Figura 1-17. Adquisición de la imagen SEM.

1.9 Análisis de energía dispersiva de rayos-X

En el microscopio electrónico de barrido, además de producirse electrones secundarios, también se generan electrones retrodispersados y fotones de rayos-X durante la interacción del haz de electrones con la muestra. La integración de la espectroscopia de energía dispersa con el microscopio electrónico de barrido hace posible que además de obtener la estructura superficial, se obtenga la composición de la muestra. La señal de electrones secundarios se absorbe rápidamente por lo que sólo se detecta la que se origina de 1 a 10 nm de profundidad, la señal de electrones retrodispersados es de mayor energía y se produce a una profundidad de 0.1 a 1 µm mientras que la señal de rayos-X se genera a los 0.2 a 2 µm de profundidad (Figura 1-18). [14]

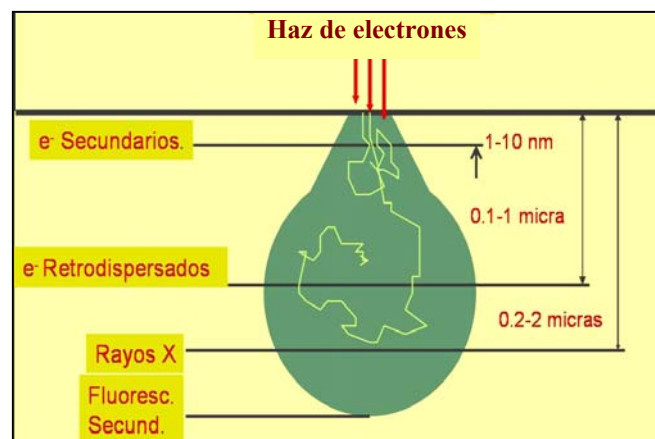


Figura 1-18. Profundidad a la que se generan las distintas señales en el microscopio electrónico de barrido.

La señal de electrones retrodispersados es causada por la colisión elástica del haz de electrones primario con un núcleo dentro de la muestra. Éstas colisiones se presentan más cuando el núcleo es grande, es decir cuando el número atómico es grande y muestran el contraste de números atómicos o de fases. Una fase de mayor número atómico produce más electrones retrodispersados y se obtiene una imagen más clara. Las señales de rayos-X típicamente son producidas cuando el haz de electrones causa la salida de un electrón de una capa interior. Un electrón de una capa exterior toma su lugar y brinda la salida de un fotón de rayos-X cuya energía puede ser relacionada con su masa nuclear y la diferencia en las energías de los orbitales de los electrones involucrados (*Figura 1-19*). [14]

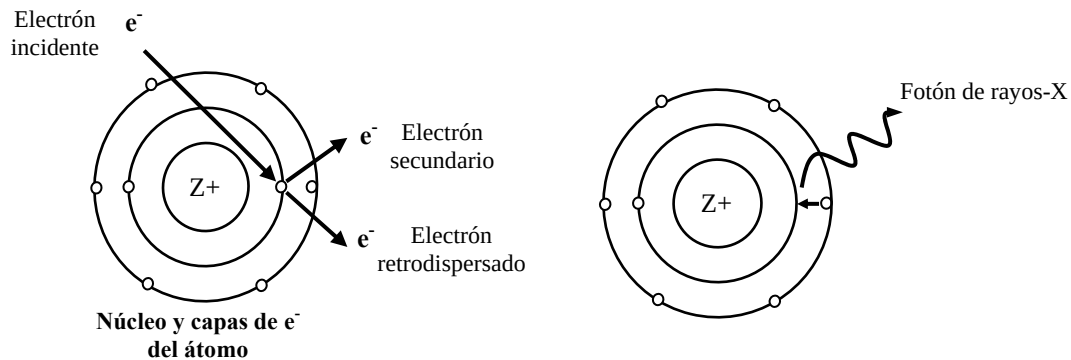


Figura 1-19. Generación de las señales a partir del haz de electrones incidente.

El equipo cuenta con un programa para identificar a los elementos que componen la muestra. Los rayos-X son clasificados en un espectro por su energía en forma ascendente, es decir, de un número atómico bajo el cual presenta baja energía, a un número atómico alto con mayor energía. De esta manera se puede conocer la composición de la muestra de interés que se esté analizando. En el interior de la cámara del microscopio electrónico de barrido (SEM) es donde se encuentran ubicados los detectores para las distintas señales que se generan, el detector de electrones secundarios, el de electrones retrodispersados y el detector de fotones de rayos-X característicos o de energía dispersiva (*Figura 1-20*).

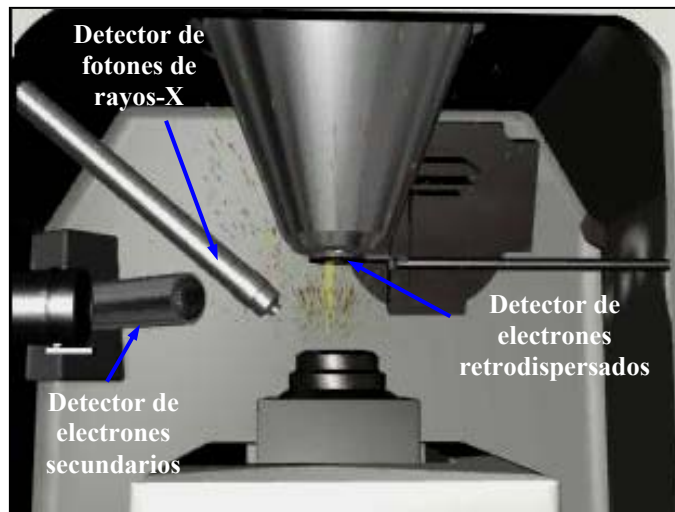


Figura 1-20. Localización de los detectores en el interior de la cámara del microscopio electrónico de barrido

Capítulo 2. Materiales y Métodos

2.1 Metodología

La experimentación se basa principalmente en la metodología que describe el estándar IPC/JEDEC J-STD-020 para identificar la clasificación de los dispositivos no herméticos de acuerdo a su sensibilidad al esfuerzo inducido por la humedad atrapada en el interior del paquete durante el proceso de soldado por reflujo, de manera que el producto se pueda manejar adecuadamente y evitar que sufra algún daño. Para cubrir con el objetivo principal y las metas de este proyecto se evaluó la sensibilidad a la humedad de las muestras durante el proceso de soldado por reflujo y durante el proceso de moldeo por inyección de plástico. En el diagrama de la *Figura 2-1* se muestra el flujo que se llevó a cabo para realizar la evaluación que involucra el proceso de soldado por reflujo. [5]

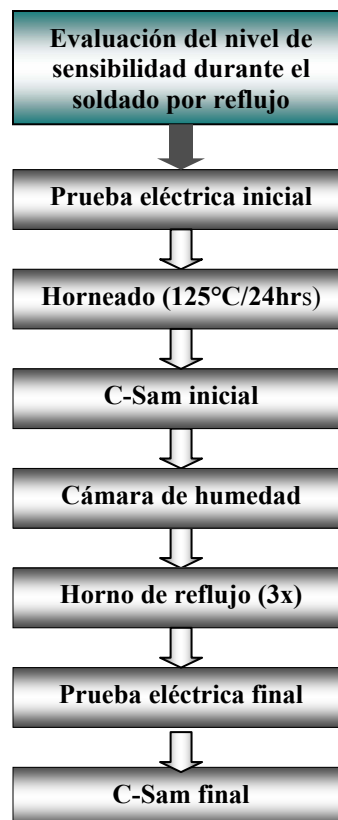


Figura 2-1. Diagrama de flujo de la evaluación del nivel de sensibilidad a la humedad durante el soldado por reflujo

La secuencia en que se llevó a cabo la evaluación del nivel de sensibilidad a la humedad durante el proceso de moldeo se muestra en la *Figura 2-2*.

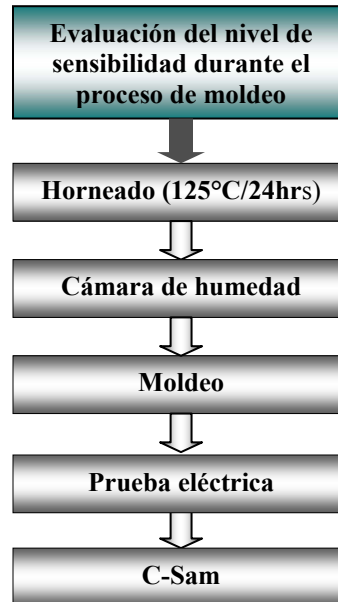


Figura 2-2. Diagrama de flujo de la evaluación del nivel de sensibilidad a la humedad durante el proceso de moldeo

Los paquetes terminados son higroscópicos y pueden absorber humedad del aire, tanto como 4,000 ppm (0.4%) por peso. Los paquetes almacenados por un periodo largo de tiempo pueden presentar un contenido de humedad uniforme y mayor cantidad en las interfaces críticas internas que un paquete que ha recibido la misma cantidad total de humedad durante un periodo de preacondicionamiento de humedad más corto y acelerado. Una humedad obtenida a 85°C para un determinado paquete es alrededor de cien veces más rápida que a 30°C. El espesor del plástico encapsulante en paquetes muy delgados permite facilitar la difusión de absorber humedad y alcanzar el equilibrio en preacondicionamientos cortos. El espesor de los paquetes también puede ser un factor en determinar el impacto que puede tener la humedad absorbida durante el soldado por reflujo, la cual puede ocasionar delaminación, fracturas e incluso el efecto popcorn. Por lo tanto es importante que cada paquete sea procesado y caracterizado en forma independientemente para obtener su nivel de sensibilidad a la humedad. Un control preciso de humedad y temperatura en la cámara de humedad es importante ya que un

error de 1°C en la temperatura puede resultar en un 5% de diferencia en la humedad relativa. Los dispositivos microelectrónicos utilizados para evaluar su sensibilidad a la humedad cuando son sometidos al proceso de soldado por reflujo, se evaluaron en tres distintos niveles de sensibilidad a la humedad, el MSL2, MSL2a y MSL3. Por sus siglas en inglés, MSL significa *Moisture Sensitive Level*. A continuación se describen las etapas de la evaluación.

2.1.1 Prueba eléctrica

La prueba eléctrica se realiza en equipos automatizados (ATE) para asegurar su funcionabilidad antes de someterlas a cualquier esfuerzo y también después de haberlas esforzado para verificar si fueron afectadas funcionalmente. Esta etapa del proceso normal de ensamble es de valiosa importancia ya que actúa a la vez como filtro para detectar las piezas que no son eléctricamente funcionales y así evitar que sean embarcadas y enviadas con el cliente. Para el caso de las piezas con delaminación, una de las metas de este proyecto de investigación es observar si son detectables en prueba eléctrica. [5]

2.1.2 Análisis de micro imagen acústica

Las muestras se sometieron al análisis de microscopia acústica antes y después de ser esforzadas, para evaluar si debido a este esfuerzo sufrieron delaminación o algún otro daño como fracturas e incluso el efecto popcorn, aunque este último es visible al ojo humano ya que la fractura llega hasta el exterior del paquete. Se obtuvieron imágenes del *Modo-C* para observar las interfaces del dispositivo y también imágenes de *Transmisión completa* para complementar el análisis y asegurar si hay o no delaminación independientemente de la interfase donde se encuentre. [5]

2.1.3 Horneado

Las piezas se hornearon en un horno de convección a 125 +5/0 °C durante 24 horas para quitarles cualquier remanente de humedad que pudiera estar atrapada en su interior y poder someterlas a las condiciones controladas de humedad y temperatura en la cámara

de humedad de acuerdo al nivel que se pretende evaluar. El horno que se utilizó es modelo *Blue-M* y se muestra en la *Figura 2-3*. [5]



Figura 2-3. Horno de convección.

2.1.4 Ganancia en peso de las muestras

La humedad absorbida por las muestras se mide en porciento de su ganancia en peso utilizando una balanza analítica. Para esto se registró el peso de las *muestras secas* dentro de la primera hora después de que se retiraron del horno y el segundo peso, necesario para verificar la ganancia en peso de la humedad absorbida por las muestras, se tomó de las *muestras humectadas* dentro de la primera hora después de haberlas retirado de la cámara de humedad. [5]

2.1.5 Cámara de humedad

La cámara de humedad modelo *Tenney* que se utilizó para la exposición de las muestras, tiene la capacidad de mantener las condiciones de humedad y temperatura con tolerancia de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y $\pm 3\%\text{HR}$ como lo especifica el estándar IPC/JEDEC J-STD-020 (*Figura 2-4*).

Las muestras se evaluaron para tres niveles de sensibilidad a la humedad, los cuales fueron seleccionados tomando en cuenta las características de los productos con matriz densa de terminales esféricas que se utilizaron para el desarrollo del proyecto. Las condiciones estándar y aceleradas de humedad y temperatura en cámara de humedad para cada nivel, se describen en la *Tabla 2-1*. [5]



Figura 2-4. Cámara de humedad

MSL Nivel de sensibilidad a la humedad	Condiciones Estándar		Condiciones Aceleradas	
	Horas de exposición	Condiciones cámara de humedad	Horas de exposición	Condiciones cámara de humedad
2	168 (+5/0)	85°C / 60% HR	-	-
2a	696 (+5/0)	30°C / 60% HR	120 (+1/0)	60°C / 60% HR
3	192 (+5/0)	30°C / 60% HR	40 (+1/0)	60°C / 60% HR

Tabla 2-1. Condiciones de humedad y temperatura de los niveles de sensibilidad a la humedad considerados para la evaluación

Las condiciones de preacondicionamiento en cámara de humedad son menos críticas en forma ascendente de acuerdo al nivel de sensibilidad a la humedad, es decir, un *Nivel 2* es más crítico que un *Nivel 2a* y a su vez éste es más crítico que un *Nivel 3*.

2.1.6 Exposición al horno de reflujo

Los dispositivos de montaje en superficie con espesores delgados o pequeños volúmenes alcanzan mayor temperatura durante el soldado por reflujo que los paquetes grandes según estudios de ingeniería que se han realizado. En el estándar IPC/JEDEC J-STD-020 se muestra una clasificación de la temperatura de reflujo que se debe utilizar de acuerdo al espesor de los paquetes y a la composición de la soldadura, sin embargo si el proveedor y el usuario están de acuerdo, el material se puede clasificar para otras temperaturas. En la *Tabla 2-2* se muestran las temperaturas pico que se utilizan para procesos donde se utilicen soldaduras de *Estaño-Plomo (Sn-Pb)* y en la *Tabla.2-3* se muestran las temperaturas pico utilizadas en los procesos con soldadura *libre de Plomo*. [5]

Temperatura pico de reflujo para soldaduras <i>Estaño-Plomo (Sn-Pb)</i>		
Espesor del paquete	Volumen mm³ <350	Volumen mm³ ≥350
<2.5 mm	240 +0/-5 °C	225 +0/-5 °C
≥2.5 mm	225 +0/-5 °C	225 +0/-5 °C

Tabla 2-2. Temperatura pico de reflujo para soldaduras Estaño-Plomo

Temperatura pico de reflujo para soldaduras <i>libres de Plomo</i>			
Espesor del paquete	Volumen mm³ <350	Volumen mm³ 350 - 2000	Volumen mm³ >2000
<1.6 mm	260 +0 °C	260 +0 °C	260 +0 °C
1.6 mm - 2.5 mm	260 +0 °C	250 +0 °C	245 +0 °C
≥2.5 mm	250 +0 °C	245 +0 °C	245 +0 °C

Tabla 2-3. Temperatura pico de reflujo para soldaduras libres de Plomo

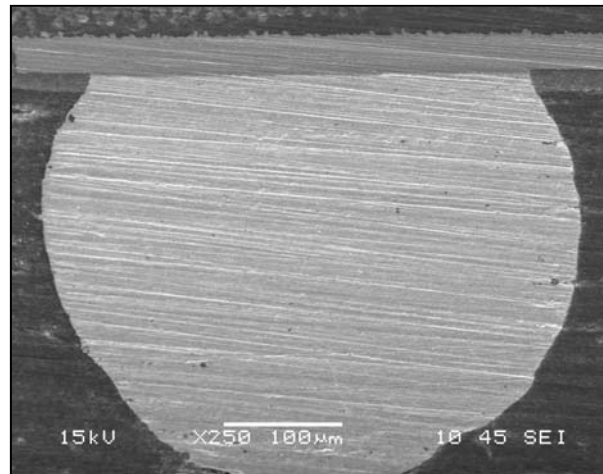
Al realizar un perfil en el horno de reflujo se debe tomar la temperatura en la superficie de los paquetes con la ayuda de un termopar y en base a eso hacer los ajustes en las diferentes zonas del horno para cumplir con las condiciones que se mencionan en la *Tabla 2-4* según el tipo de soldadura que se utiliza en el proceso. [5]

Características del perfil	Proceso con soldadura <i>Sn-Pb</i>	Proceso con soldadura <i>sin-Pb</i>
Promedio de la velocidad de subida de la rampa	3°C/segundo máximo	3°C/segundo máximo
Precalentamiento -Temperatura mínima ($T_{s_{min}}$) -Temperatura máxima ($T_{s_{max}}$) -Tiempo ($t_{s_{min}}$ a $t_{s_{max}}$)	100°C 150°C 60-120 segundos	150°C 200°C 60-180 segundos
Tiempo de mantenerse arriba -Temperatura (T_L) -Tiempo (t_L)	183°C 60-150 segundos	217°C 60-150 segundos
Temperatura Pico/Clasificación (T_p)	De acuerdo a <i>Tabla 2-2</i>	De acuerdo a <i>Tabla 2-3</i>
Tiempo dentro de los 5°C de la temperatura pico actual (t_p)	10-30 segundos	20-40 segundos
Velocidad de bajada de la rampa	6 °C/segundo máximo	6 °C/segundo máximo
Tiempo de los 25°C a la temperatura pico	6 minutos máximo	8 minutos máximo

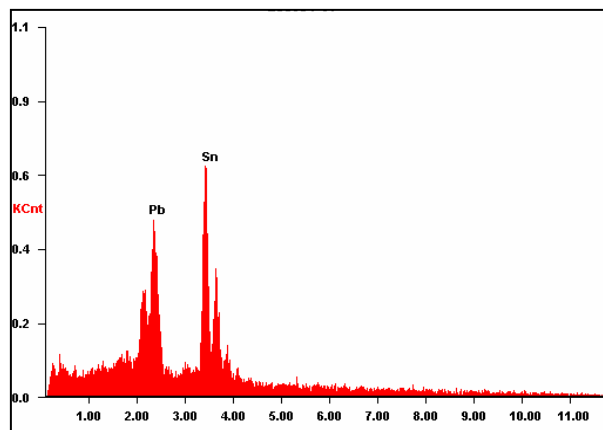
Tabla 2-4. Clasificación de los perfiles de temperatura

Después de la cámara de humedad, las muestras se sometieron al horno de reflujo tres veces (3x) para simular las veces que el material es expuesto a este proceso durante su ciclo de ensamble y con el cliente. Las piezas se deben pasar por reflujo no menos de 15 minutos y no más de 4 horas después de haberlas sacado de cámara de humedad y el tiempo entre cada reflujo debe ser de 5 minutos mínimo y 60 minutos máximo. Las

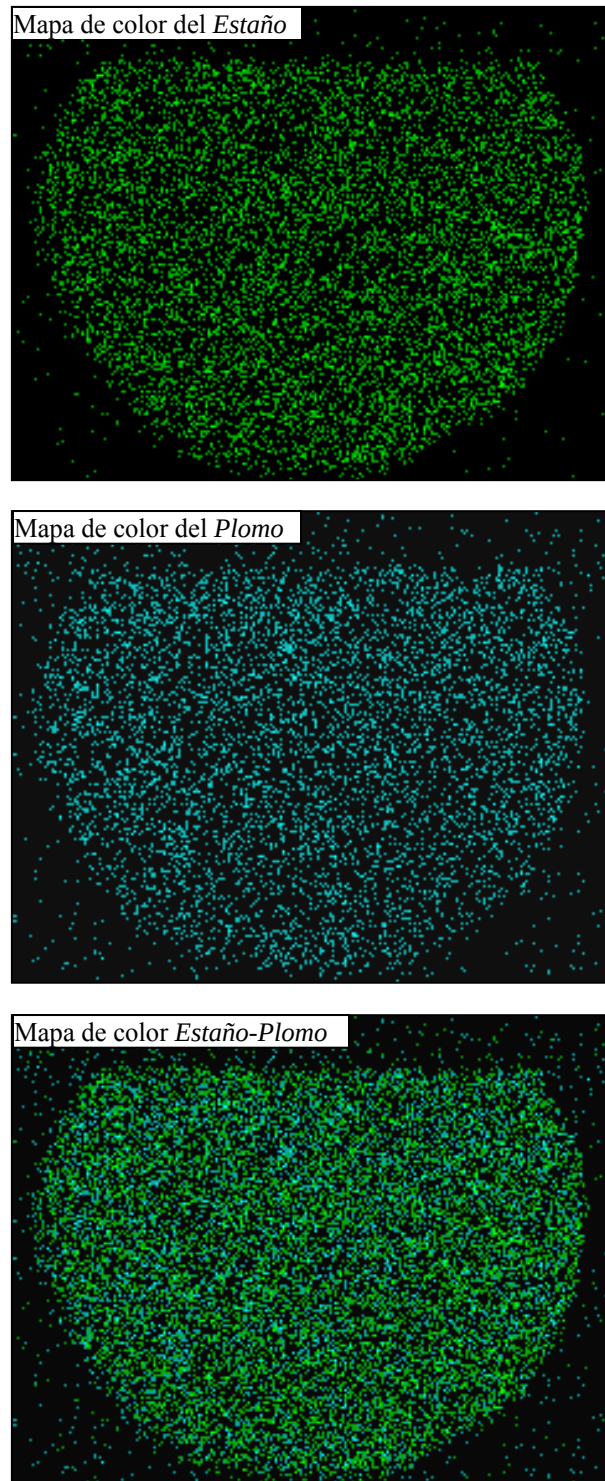
muestras de los productos con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 10x10 y 12x12 que se utilizaron para la evaluación utilizan esferas de soldadura *Sn-Pb* por lo que aplican las condiciones de un perfil para el ensamble con soldadura *Sn-Pb*. En la *Figura 2-5* se puede observar el análisis EDX realizado a una esfera de soldadura representativa de estos productos, así como un mapa de color de los elementos que la componen. De acuerdo a su espesor y volumen, la temperatura pico de reflujo que se debe utilizar para estos productos es de 240°C, sin embargo también se evaluaron las muestras a 260°C para observar el impacto que esto ocasiona en los productos. En el *Anexo A* se muestran los perfiles de reflujo con temperatura pico de 240°C y 260°C utilizados en este proyecto para evaluar a los productos con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 10x10 y 12x10.



a) Imagen SEM de terminal esférica del material 10x10 y 12x12



b) Análisis EDX donde se muestra la composición de las terminales esféricas del material 10x10 y 12x12



c) Mapa de color de los elementos que componen a las terminales esféricas del material 10x10 y 12x12.

Figura 2-5. Composición de las terminales esféricas del material 10x10 y 12x12.

2.1.7 Exposición al proceso de moldeo por inyección de plástico

Después de haber sido sometidas a las distintas condiciones en la cámara de humedad, las muestras de tableros de circuito impreso se sometieron al proceso de moldeo por inyección de plástico el cual utiliza una prensa a alta presión y una temperatura de 180°C. Después se hornearon durante 6 horas a $165\pm 3^{\circ}\text{C}$ para quitar la humedad remanente y dar dureza al encapsulado. Una vez moldeado, el material siguió el flujo normal del proceso de ensamble hasta la operación de pegado de esferas en donde es sometido también al proceso de soldado por de reflujo con una temperatura pico de 220°C. Al término de su ensamble se probaron eléctricamente.

2.2 Descripción de las muestras.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron los productos con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 10x10 y 12x12 los cuales fueron ensamblados en la empresa donde se realizó el proyecto y que han presentado el problema de delaminación en repetidas ocasiones (*Figura 2-6*). Del producto 10x10 se seleccionaron muestras de dos lotes distintos de producción y del producto 12x12 se seleccionaron muestras de dos numero de parte.

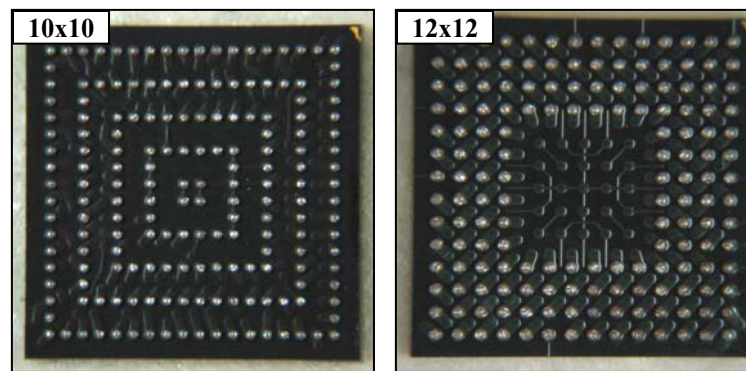


Figura 2-6. Productos con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 10x10 y 12x12

En el estándar IPC/JEDEC J-STD-020 se describen los requerimientos de la cantidad de muestras de dispositivos de montaje en superficie según el tipo de evaluación que se

requiera realizar. Para los dispositivos de montaje en superficie que ya han sido clasificados y que se requieren recalificar sin realizar pruebas adicionales de confiabilidad, como es el caso de las muestras utilizadas para este proyecto, se debe seleccionar una muestra mínima de 22 piezas por cada nivel de sensibilidad a la humedad a evaluar. Las muestras deben completar todo el proceso de ensamble normal y deben evaluarse en uno o más niveles de sensibilidad. Se sometieron a la evaluación un total de 6 muestras de 22 piezas cada una por cada tipo de producto (*Tabla 2-5*).

Producto FPBGA		Nivel de sensibilidad a la humedad / Temperatura de reflujo	No. de piezas por tipo de material
10x10 mm	12x12 mm		
M1	M2	MSL3 / 240°C	22
M1-1	M2-1	MSL 2a / 240°C	22
M1-2	M2-2	MSL 2 / 240°C	22
M1a	M2a	MSL 3 / 260°C	22
M1a-1	M2a-1	MSL 2a / 260°C	22
M1a-2	M2a-2	MSL 2 / 260°C	22

Tabla 2-5. Relación de muestras utilizadas para la evaluación de la sensibilidad a la humedad durante el soldado por reflujo

El estándar IPC/JEDEC J-STD-020 no se dirige a todos los posibles componentes, ensamble de tableros de circuitos impresos y combinaciones en los diseños de productos. Sin embargo, provee un método de prueba y un criterio de aceptación y rechazo que se puede utilizar para este tipo de tecnologías. Es por esto que basándose en este mismo método de prueba se llevó a cabo la evaluación de la sensibilidad a la humedad durante el proceso de moldeo. Se utilizaron tableros del material 10x10 y se expusieron a las mismas tres condiciones en cámara de humedad, MSL2, MSL2a y MSL3. En total se utilizaron tres tableros, uno para cada condición (*Tabla 2-6*).

Muestra de Tablero	Nivel de sensibilidad a la humedad
PCB1	MSL3
PCB2	MSL 2a
PCB3	MSL 2

Tabla 2-6. Relación de muestras de tablero de circuito impreso utilizadas para la evaluación de la sensibilidad a la humedad durante el proceso de moldeo

2.3 Criterio para clasificar el nivel de sensibilidad a la humedad

En el estándar IPC/JEDEC J-STD-020 se describe el criterio para clasificar el nivel de sensibilidad a la humedad de los dispositivos no herméticos durante el soldado por reflujo. Si una o más piezas presentan cualquiera de las características que a continuación se mencionan, se considera que falló el nivel evaluado. [5]

- Fractura externa visible con un microscopio óptico de 40x.
- Si falla la prueba eléctrica.
- Si presenta fracturas internas que intersecten alambres, bolas o cualquier unión. que se extienden de cualquier parte del paquete hacia cualquier parte interna del mismo.
- Fracturas que se extiendan más de $\frac{2}{3}$ de distancia de cualquier parte interna hacia el exterior del paquete.
- Cambios en la forma plana del tablero.
- Hinchazones o protuberancias visibles al ojo humano.

Por otro lado, se considera que el nivel de sensibilidad a la humedad evaluado pasa satisfactoriamente si presenta las siguientes características:

- Las muestras conservan su forma plana y sus dimensiones.

- Si no hay evidencia de delaminación o fracturas observadas con microscopía acústica o alguna otra técnica.

Para evaluar el impacto en la confiabilidad del paquete se miden los cambios de delaminación antes y después del horno de reflujo. El porcentaje del cambio de delaminación se calcula en relación al área total que se está evaluando. En los productos BGA se consideran los siguientes puntos:

- Que no haya delaminación en la superficie del dado.
- Que no haya cambio de delaminación mayor al 10% en los alambres pegados, en la interfase entre el plástico de moldeo y el tablero, en las interfases del tablero o en el área del pegado de dado
- Que no haya delaminación o fracturas en las metalizaciones, vías, etc.

2.4 Análisis de fallas

Al término de la evaluación se separaron las piezas que fallaron la prueba eléctrica final y las piezas que presentaron delaminación. El análisis de estas piezas, además de la prueba eléctrica y el análisis de micro imagen acústica, se complementó con otras técnicas de análisis de fallas para poder relacionar la delaminación, o algún otro daño que pudieron haber sufrido las muestras con la funcionabilidad eléctrica del material y con su nivel de sensibilidad a la humedad. A continuación se describe como se llevaron a cabo estas técnicas.

2.4.1 Análisis de rayos-X

La radiografía de rayos-X es utilizada para examinar los detalles internos de los dispositivos microelectrónicos y se lleva a cabo con equipos generadores de radiaciones ionizantes tipo rayos-X, siendo uno de los métodos de mayor uso en la industria ya que es una técnica no destructiva. Opera con el principio de distinguir la transmisión de rayos-X a través de distintos materiales, los cuales tienen la habilidad de bloquear los rayos-X con su densidad. Los rayos-X transmitidos son colectados por un detector, trasladados en señales eléctricas, amplificados y transformados en imagen de rayos-X. La variación de

las densidades de los distintos materiales hace que pasen diferentes cantidades de rayos-X resultando en una variedad de niveles en la escala de grises en la imagen de rayos-X. La calidad de la imagen de rayos-X formada depende no solo en la adecuada operación del equipo utilizado sino en la composición del espécimen. Algunos materiales utilizados en el ensamble de semiconductores, son transparentes a rayos-X y por lo tanto invisibles en las imágenes. La radiografía de rayos-X se utiliza comúnmente para inspeccionar problemas como alambres desprendidos, interconectados, falta de alambres, falta de algún componente, burbujas en los adhesivos conductivos, fracturas entre otros. Se analizaron todas las piezas que fallaron eléctricamente para observar algún defecto de ensamble que pudo haber sido la causa de la falla y también se analizaron las piezas que presentaron delaminación para observar si ésta provocó desprendimiento o interconexiones de alambres. El equipo de rayos-X modelo X-TEK que se utilizó para analizar las muestras se puede observar en la *Figura 2-7*. [15]



Figura 2-7. Equipo de rayos-X

2.4.2 Corte transversal

Se seleccionaron muestras representativas de cada nivel evaluado en el que se obtuvieron piezas con delaminación al final de la evaluación. A éstas muestras se les realizó un corte transversal para observar y verificar la interfase en la que ocurrió la delaminación, según las imágenes obtenidas del análisis de micro imagen acústica. El corte transversal es una técnica metalográfica que se realiza para exponer mecánicamente un plano del paquete de interés para el análisis. Para llevar a cabo el corte transversal se utilizó un equipo de desbaste y pulido de Buehler modelo *Ecomet 3* (Figura 2-8). Debido a las características de las muestras, con presencia de delaminación, fue necesario encapsularlas para poder realizarles el corte transversal. Después de encapsularlas, las muestras fueron desbastadas y por último se pulieron para su posterior observación con la ayuda del microscopio electrónico de barrido.



Figura 2-8. Equipo de desbaste y pulido

a) Encapsulado

Se utilizó la técnica de encapsulado en frío, la cual consiste en mezclar homogéneamente una resina epóxica con un endurecedor también epóxico a una relación 5:1 según las recomendaciones del proveedor. La mezcla se realiza durante aproximadamente 3 minutos y lentamente para no inducir la formación de burbujas. La superficie limpia del molde, donde se va a colocar la muestra, se recubrió con un agente liberador para que el

encapsulado se libere fácilmente después de que haya curado. El curado de la mezcla es a temperatura ambiente y tarda aproximadamente un día (*Figura 2-9*). [16]

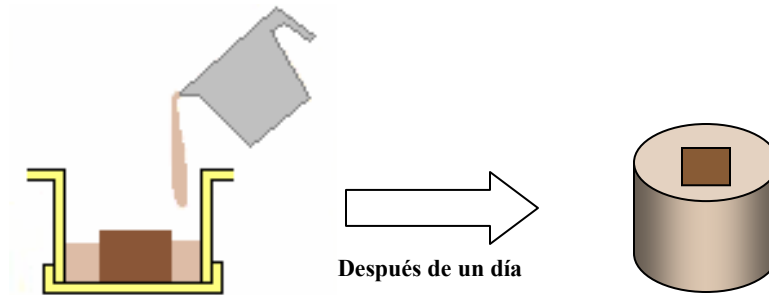


Figura 2-9. Técnica de encapsulado en frío

b) Desbaste

Para desbastar las muestras hasta llegar al plano de interés, se utilizaron lijas de papel arena de distintos números de granos y un equipo de desbaste y pulido. Las lijas de número menor tienen granos más grandes por lo que son más agresivas y por el contrario las lijas de números grandes tienen granos más finos lo que las hace menos agresivas. Se comenzó a desbastar utilizando una lija de papel arena de 400 granos hasta estar cerca del plano de interés, después se utilizó una lija de 600 granos para llegar y por último una lija de 1200/4000 granos para suavizar los rayones de las lijas anteriores. La lija se coloca en el plato giratorio del equipo de desbaste y se utiliza agua deionizada como lubricante. Entre cada lija utilizada se debe lavar la pieza con agua deionizada (*DI*) para quitar las partículas remanentes de la lija anterior y no ocasionar rayones a la muestra. [16]

c) Pulido

El pulido es el último paso que se realizó para obtener el corte transversal de las muestras. Se utilizó el mismo equipo de desbaste y pulido pero en vez de lijas de papel arena se utilizó una tela especial de tejido de nylon libre de lana la cual nos sirve para pulir muestras que presenten materiales de distinta dureza como es el caso de los dispositivos microelectrónicos (*Figura 2-10*). Para el pulido con la tela se utilizó una suspensión de diamante de $9\mu\text{m}$ y un líquido expansor como lubricante. Después de finalizar con el pulido de las muestras, se lavaron con agua deionizada para quitarles

cualquier remanente de la suspensión de diamante y del expansor que se utilizó como lubricante. [16]

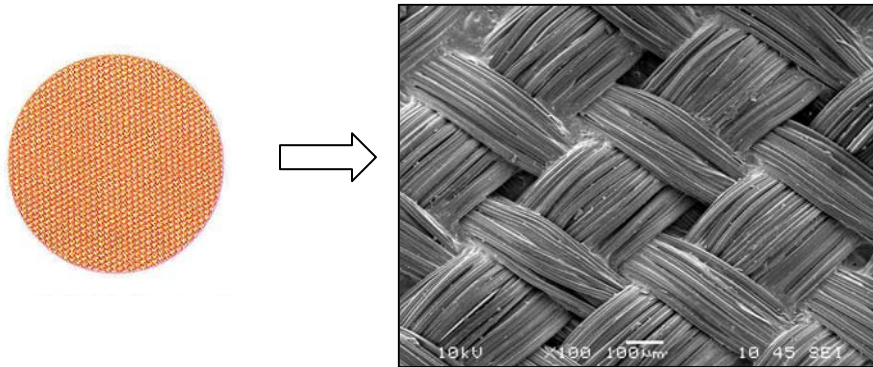


Figura 2-10. Tela de nylon utilizada para el pulido de las muestras

2.4.3 Análisis en microscopio electrónico de barrido (SEM)

Las muestras sometidas a corte transversal se analizaron con la ayuda del microscopio electrónico de barrido para observar la interfase en la que ocurrió la delaminación. Para esto fue necesario recubrir las piezas con un baño de oro y montarlas en un porta muestras con una cinta adhesiva doble de carbón para aterrizarlas y evitar que se carguen durante el análisis. El recubrimiento de oro se realizó con la ayuda del equipo *Desk II*, cuyo principio de operación es la deposición física a partir de la fase vapor (*Figura 2-11*).



Figura 2-11. Equipo utilizado para realizar la deposición física del recubrimiento de oro

La técnica utilizada para la deposición física es la de bombardeo catódico o *sputtering*, que esta basada en la *pulverización* del material a depositar mediante un bombardeo intenso con partículas cargadas en forma de iones. De esta manera se realiza la extracción de átomos de la superficie de un electrodo debido al intercambio de momento con iones que bombardean los átomos de la superficie. Los iones proceden de una descarga eléctrica entre dos electrodos en forma de plasma, utilizando un gas generalmente inerte. En la *Figura 2-12* se muestra un diagrama del proceso de bombardeo catódico o *sputtering*.

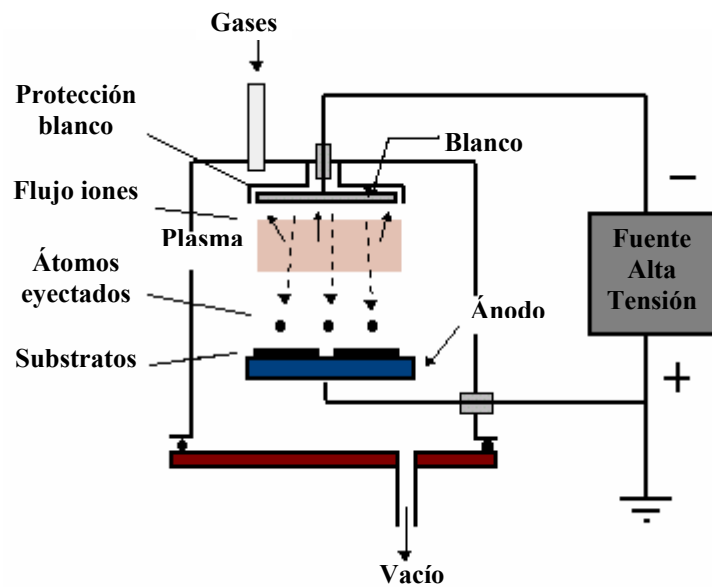


Figura 2-12. Proceso de bombardeo catódico o sputtering

El proceso de bombardeo catódico es básicamente un proceso de ataque, frecuentemente utilizado para la limpieza de superficies y la delineación de pistas. Sin embargo, como se produce vapor del material del electrodo, es también un método utilizado en la deposición de películas, similar a la evaporación. Con el término deposición por bombardeo catódico o *sputtering* se enmarcan una gran cantidad de procesos, pero todos tienen en común el empleo de un blanco del material que va a ser depositado como cátodo en la descarga luminosa. El material es transportado desde el blanco hasta el substrato donde se forma la película, de esta forma se depositan películas de metales puros o aleaciones.

[17]

2.4.4 Análisis EDX

Del total de muestras delaminadas al final de la evaluación se seleccionaron dos piezas representativas para analizarlas con la ayuda del microscopio electrónico de barrido y utilizando la aplicación que tiene para realizar el análisis de energía dispersiva de rayos-X o EDX, a fin de encontrar algún contaminante que pudiera haber favorecido alguna separación en los dispositivos microelectrónicos. Una de estas muestras falló la prueba eléctrica mientras que la otra pieza la paso satisfactoriamente, ambas presentaron delaminación. La preparación de las muestras sometidas al análisis EDX consistió en rebajar los cuatro lados del paquete con una lija de papel arena de 600 granos y con la ayuda del equipo de desbaste hasta llegar al dado y pasar las bolas de los alambres de oro que lo interconectan con el tablero de circuito impreso. Después se separó mecánicamente el plástico encapsulante de la superficie del dado. Esto fue fácil de realizar ya que, de acuerdo al análisis de micro imagen acústica, la delaminación que presentaron estas dos muestras se encontraba en esta interfase por lo que no había buena adherencia entre estas dos superficies. Una vez separadas, ambas superficies fueron recubiertas con un ligero baño de oro y se montaron en un porta muestras con una cinta adhesiva doble de carbón para evitar que se carguen durante el análisis.

Capítulo 3. Análisis y discusión de resultados

3.1 Resultados de la humedad absorbida por las muestras

La humedad absorbida por las muestras se obtuvo por su diferencia en peso con la ayuda de una balanza analítica y las mediciones se realizaron antes y después de someterlas a las condiciones de cámara de humedad. Para los niveles MSL3 y MSL2a se utilizaron las condiciones aceleradas en la cámara de humedad para optimizar el tiempo de la evaluación, sin embargo el nivel MSL2 sólo se realiza en condiciones estándares de acuerdo a la metodología que se describe en el estándar IPC/JEDEC J-STD-020. En la *Tabla 3-1* se muestra la relación de las muestras y su porcentaje de ganancia en peso.

No.	Muestra	Tipo de producto	Peso después de Horneado (g)	Condiciones Cámara de Humedad	Peso después de Cámara de Humedad (g)	Ganancia de peso (%)
1	M1	10x10	5.0821	MSL3 40hrs 60°C/60%HR	5.0948	0.2498
2	M2	12x12	7.9905		8.0104	0.2490
3	M1a	10x10	5.0965		5.109	0.2452
4	M2a	12x12	7.984		8.0035	0.2442
5	PCB1	10x10	8.7547		8.7737	0.2170
6	M1-1	10x10	5.05	MSL2a 120hrs 60°C/60%HR	5.0641	0.2792
7	M2-1	12x12	8.0288		8.049	0.2515
8	M1a-1	10x10	5.0528		5.0659	0.2592
9	M2a-1	12x12	8.0509		8.072	0.2620
10	PCB2	10x10	8.7417		8.7715	0.3408
11	M1-2	10x10	5.0485	MSL2 168hrs 85°C/60%HR	5.0627	0.2812
12	M2-2	12x12	8.0989		8.1211	0.2741
13	M1a-2	10x10	5.0434		5.057	0.2696
14	M2a-2	12x12	8.0366		8.0589	0.2774
15	PCB3	10x10	8.8843		8.9159	0.3556

Tabla 3-1. Porcentaje de ganancia en peso de las muestras

Las muestras sometidas al nivel MSL3 presentaron menos porcentaje de la ganancia en peso debido a que en este nivel las condiciones de cámara de humedad son menos críticas que en los otros dos niveles evaluados. El porcentaje de la ganancia en peso de las muestras fue incrementando de acuerdo a las condiciones de la cámara de humedad, es decir, del nivel menos crítico MSL3 hacia el nivel más severo MSL2. En el *Anexo B* se muestran las gráficas donde se aprecia el incremento de humedad absorbida por las muestras en las distintas condiciones de humedad y temperatura.

3.2 Resultados de la prueba eléctrica y del análisis de micro imagen acústica

En la *Tabla 3-2* se muestra la relación de fallas eléctricas y piezas con delaminación al final de la evaluación.

No.	Muestra	Tipo de producto	Nivel / Temperatura de reflujo (°C)	Fallas con delaminación	Buenas con delaminación	Fallas sin delaminación
1	M1	10x10	MSL3/240	-	-	-
2	M2	12x12		-	-	-
3	M1a	10x10	MSL3/260	-	-	-
4	M2a	12x12		-	1	-
5	PCB1	10x10	MSL3/Moldeo	-	-	-
6	M1-1	10x10	MSL2a/240	-	-	-
7	M2-1	12x12		-	-	2
8	M1a-1	10x10	MSL2a/260	-	-	-
9	M2a-1	12x12		-	-	-
10	PCB2	10x10	MSL2a/Moldeo	-	-	1
11	M1-2	10x10	MSL2/240	-	-	2
12	M2-2	12x12		-	1	-
13	M1a-2	10x10	MSL2/260	6	2	2
14	M2a-2	12x12		2	10	-
15	PCB3	10x10	MSL2/Moldeo	-	-	-

Tabla 3-2. Relación de fallas eléctricas y piezas con presencia de delaminación obtenidas al final de la evaluación

En ésta relación se clasifican las piezas que fallaron y las piezas que pasaron la prueba eléctrica, ambas con presencia de delaminación, así como las piezas que fallaron la prueba eléctrica pero que no presentaron alguna separación.

3.3 Resultados del análisis de rayos-X y relación de muestras sometidas a corte transversal

Las piezas que fallaron eléctricamente y las piezas que presentaron delaminación se sometieron a rayos-X para observar cualquier anomalía interna en el ensamble de las muestras. De este grupo de piezas se seleccionaron muestras representativas para realizarles corte transversal y poder observar, con la ayuda del microscopio de barrido electrónico, la interfase en la que ocurrió la separación (*Tabla 3-3*).

Muestra	Fallas con delaminación	Buenas con delaminación	Fallas sin delaminación	Resultados Rayos-X	Piezas sometidas a corte transversal
M2a	-	1	-	Sin anomalías	1
M2-1	-	-	2	Alambres desprendidos	-
PCB2	-	-	1	Falta de alambres	-
M1-2	-	-	2	Sin anomalías	-
M2-2	-	1	-	Sin anomalías	1
M1a-2	6	2	2	Sin anomalías	3 (2 fallas y 1 buena con delaminación)
M2a-2	2	10	-	Sin anomalías	2 (1 falla y 1 buena con delaminación)

Tabla 3-3. Relación de piezas sometidas a rayos-X y corte transversal

En el *Anexo C* se muestran las imágenes así como su interpretación del análisis de micro imagen acústica, del análisis de rayos-X y las imágenes SEM de las piezas sometidas a corte transversal.

3.4 Resultados del análisis de energía dispersiva de rayos-X

Las dos piezas representativas del total de muestras delaminadas que fueron sometidas al análisis de energía dispersiva de rayos-X o EDX, no presentaron ninguna contaminación obvia que pudiera haber favorecido la delaminación durante el ensamble de los dispositivos microelectrónicos. En la *Figura 3-1* se muestra el análisis que se realizó a la superficie del dado en ambas piezas. La pieza número uno corresponde a la falla eléctrica y la número dos a la pieza que pasó satisfactoriamente la prueba funcional.

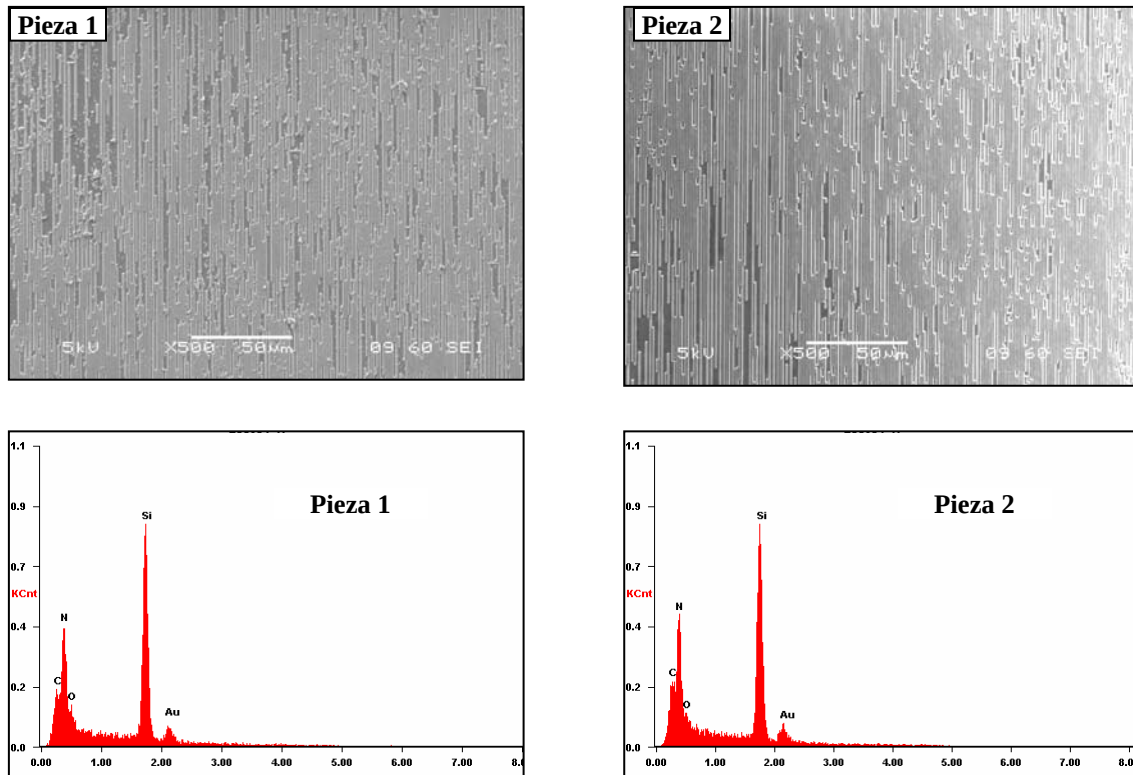


Figura 3-1. Análisis EDX de la superficie del dado de las dos piezas representativas con delaminación

La composición que se obtuvo de ambas incluye carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O) y silicio (Si), estos tres últimos son parte de la composición de la capa dieléctrica de pasivación en la superficie del dado y el carbono proviene de los remanentes del plástico encapsulante que estuvo adherido en la superficie del dado. Las capas de pasivación son depositadas en las obleas de silicio para proveer un aislamiento eléctrico entre las metalizaciones y proteger a los dados del medio ambiente. Normalmente están

compuestas de silicio policristalino, dióxido de silicio o nitruro de silicio. El oro proviene del recubrimiento conductivo que se le aplicó a las piezas para poder someterlas al análisis. En la *Figura 3-2* se muestra el análisis que se realizó a la superficie del plástico encapsulante que estaba en contacto con el dado en ambas piezas. La pieza número uno corresponde a la falla eléctrica y la número dos a la pieza que pasó satisfactoriamente la prueba funcional. La composición que se obtuvo de ambas incluye carbono (C), oxígeno (O) y silicio (Si), lo cual es normal en la composición del plástico encapsulante. La composición del plástico de moldeo generalmente incluye resinas epóxicas, endurecedores fenólicos, sílices, catalizadores, material de relleno, pigmentos y agentes liberadores para moldeo. El análisis EDX detecta principalmente compuestos inorgánicos por lo que en composiciones orgánicas se puede observar en el espectro el elemento carbono como principal componente. El oro proviene del recubrimiento conductivo que se realizó a las piezas durante su preparación para someterlas al análisis.

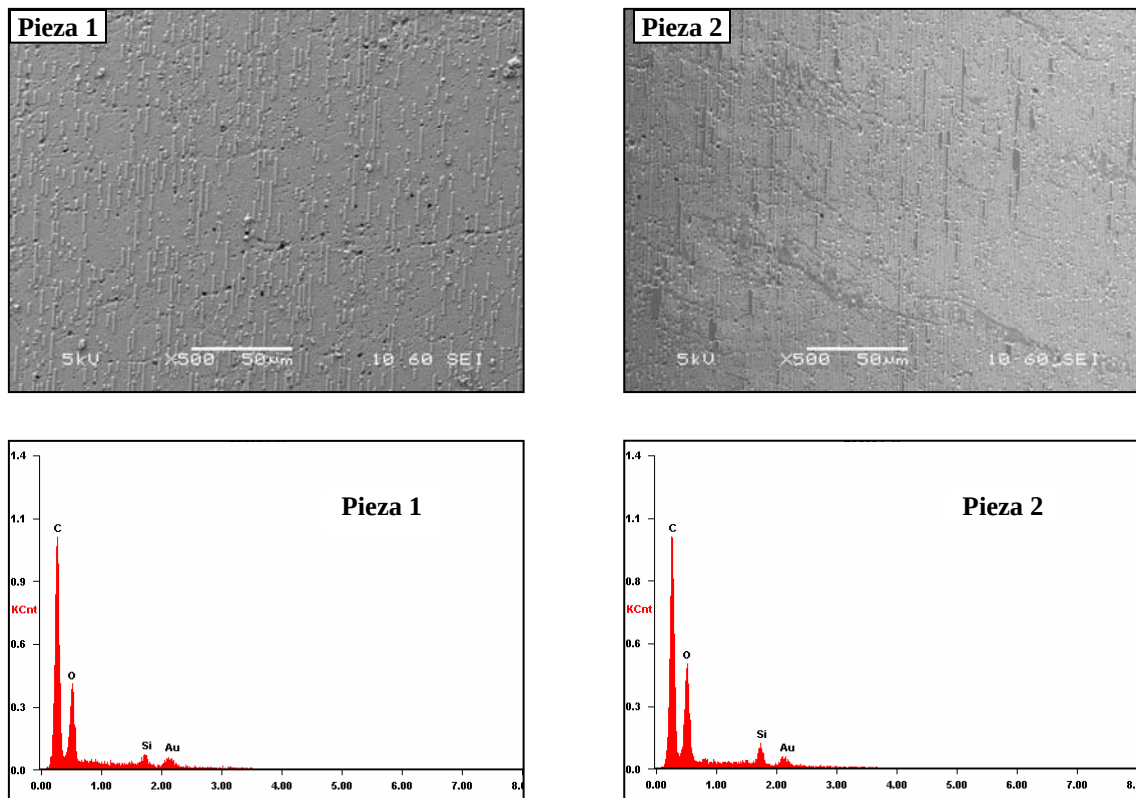


Figura 3-2. Análisis EDX de la superficie del plástico encapsulante de las dos piezas representativas con delaminación

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

1. Se aplicó el criterio que se describe en el estándar IPC/JEDEC J-STD-020 para reclasificar el nivel de sensibilidad a la humedad de los dispositivos no herméticos durante el proceso de soldado por reflujo.
2. Las piezas delaminadas obtenidas de al final de la experimentación presentan características similares a algunos casos de delaminación que se han presentado en Skyworks Solutions, S.A. de C.V.
3. La etapa más crítica durante el ensamble de los productos con matriz densa de terminales esféricas, en la que se puede presentar el fenómeno de delaminación debido a la humedad en su interior, es el proceso de soldado por reflujo.
4. Los productos con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 10x10 pueden soportar hasta un nivel de sensibilidad a la humedad MSL2a y hasta una temperatura pico de reflujo de 260°C sin presentar daño o alguna delaminación por la humedad atrapada en su interior (*Tabla CR-1*).

Muestra del producto 10x10	Nivel /Temperatura de reflujo (°C)	Pasó/Falló el nivel
M1	MSL3/240	Pasó
M1-1	MSL2a/240	Pasó
M1-2	MSL2/240	Falló
M1a	MSL3/260	Pasó
M1a-1	MSL2a/260	Pasó
M1a-2	MSL2/260	Falló

Tabla CR-1. Evaluación del nivel de sensibilidad a la humedad del producto con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 10x10

La muestra **M1-2** no pasó el nivel MSL2/240°C debido a que las piezas fallaron la prueba funcional al final de su evaluación.

La muestra **M1a-2** evaluada en el nivel MSL2/260°C además de presentar delaminación en piezas eléctricamente malas y buenas, también presentó una pieza con efecto *popcorn* que falló la prueba funcional.

5. Los productos con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 12x12 pueden soportar un nivel de sensibilidad a la humedad MSL3 y una temperatura pico de reflujo de 240°C (*Tabla CR-2*).

Muestra del producto 12x12	Nivel /Temperatura de reflujo (°C)	Pasó/Falló el nivel
M2	MSL3/240	Pasó
M2-1	MSL2a/240	Falló
M2-2	MSL2/240	Falló
M2a	MSL3/260	Falló
M2a-1	MSL2a/260	Pasó
M2a-2	MSL2/260	Falló

Tabla CR-2. Evaluación del nivel de sensibilidad a la humedad del producto con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 12x12

La muestra **M2-1** evaluada en el nivel MSL2a/240 presentó una pieza que no pasó la prueba eléctrica final debido a alambres desprendidos e interconectados.

La muestra **M2-2** falló el nivel evaluado MSL2/240°C debido a que una pieza presentó delaminación a pesar de haber pasado satisfactoriamente la prueba eléctrica final.

La muestra **M2a** evaluada en el nivel MSL3/260°C también presentó una pieza eléctricamente buena con delaminación.

La muestra **M2a-2** evaluada en el nivel MSL2/260°C, además de piezas eléctricamente buenas y malas con presencia de delaminación, presentó una pieza con *popcorn* al igual que el producto 10x10 evaluado en este nivel.

6. El tamaño del producto es un factor que influye para que sea más susceptible de sufrir alguna separación. De acuerdo a los resultados obtenidos el material 10x10 puede soportar condiciones más severas de humedad que el material 12x12, sin presentar delaminación después del horno de reflujo.
7. Los tableros utilizados en la experimentación pueden soportar cualquiera de los tres niveles evaluados sin presentar delaminación o algún otro daño durante el proceso de moldeo por inyección de plástico (*Tabla CR-3*).

Muestra de tablero	Nivel	Pasó/Falló
PCB1	MSL3	Pasó
PCB2	MSL2a	Pasó
PCB3	MSL2	Pasó

Tabla CR-3. Evaluación de la sensibilidad a la humedad durante el proceso de moldeo

8. La delaminación que presentaron los productos con matriz densa de terminales esféricas, debido a la humedad atrapada en su interior, se caracteriza porque las interfases afectadas se separan totalmente y en casos extremos ocurre el efecto *popcorn*.
9. Los casos donde la morfología del plástico encapsulante tiene la apariencia de poco compactado justo en la superficie del dado, no está totalmente relacionado con la

sensibilidad a la humedad en el interior del material durante el soldado por reflujo, ya que la delaminación debido a la humedad es una separación muy característica en donde las interfases se separan completamente.

10. El análisis de micro imagen acústica es una prueba no destructiva y muy confiable para detectar delaminación en los dispositivos microelectrónicos.
11. El programa de prueba eléctrica que normalmente se maneja para los productos con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 10x10 y 12x12 detecta solo algunas de las piezas que están severamente delaminadas y los casos extremos con *popcorn*.
12. Se realizó un *Glosario* de términos en inglés comúnmente utilizados en la industria de los semiconductores, así como su traducción al español y una breve definición de los mismos.

Recomendaciones

1. El perfil de temperatura utilizado en el horno de reflujo es un factor crítico para prevenir que suceda la delaminación en las interfases de los microcircuitos por un sobre esfuerzo durante este proceso. Se debe asegurar que se realice cumpliendo con las características que se especifican en el estándar IPC/JEDEC J-STD-020.
2. Se deben realizar auditorias frecuentes a los perfiles de temperatura utilizados en el horno de reflujo para asegurarse que no hayan sido alterados con el paso del tiempo debido a factores como mantenimiento del horno, falla del horno, un perfil inadecuado para el tipo de material y soldadura, por mencionar algunos.
3. El material se debe mantener en condiciones de humedad controlada antes de ser sometido al proceso de soldado por reflujo para asegurarse de que la delaminación no suceda debido al exceso de humedad en el interior de los paquetes.

4. Los resultados obtenidos aplican a los productos con matriz densa de terminales esféricas 10x10 y 12x12 utilizados en la evaluación y a los tableros del material 10x10. Evaluaciones similares deberán realizarse con los distintos productos de interés para su estudio.
5. Una adecuada ambientación del plástico encapsulante antes de ser utilizado en el proceso de moldeo y un buen curado del mismo después de este proceso es importante para que el plástico adquiriera sus propiedades finales y para que se libere cualquier remanente de humedad.
6. Estudios sobre la composición del plástico encapsulante y las condiciones y parámetros óptimos durante el proceso de moldeo deben ser realizados para evitar que adquiriera la apariencia de poco compactado.
7. A los productos que presenten características en el plástico de poco compactado en la superficie del dado, se les debe realizar evaluaciones de confiabilidad, como es el preacondicionamiento en cámara de humedad y seguido del horno de reflujo para verificar el impacto que esto puede ocasionar al material al ser sometido a un esfuerzo.
8. El diseño de un programa confiable de prueba eléctrica, que sea capaz de detectar al menos todos los casos severos de piezas que presenten delaminación, sería de gran ayuda para evitar que este material llegue con el cliente.

Bibliografía

- [1] C.R. Nave, *HyperPhysics* (2006), <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>, (Abril 2006).
- [2] Ning-Cheng Lee (2002), *Reflow soldering processes and troubleshooting: MST, BGA, CSP and Flip chip technologies*, USA, Newnes.
- [3] J.H. Lau (1995), *Ball Grid Array Technology*, New York, McGraw-Hill.
- [4] Tay, A.A.O.; Lin, T.Y. (1998), *Moisture-induced interfacial delamination growth in plastic IC packages during solder reflow*, IEEE Electronic Components and Technology Conference 48th
- [5] IPC/JEDEC Standard J-STD-020C (2004), *Moisture/Reflow sensitivity classification for nonhermetic solid state surface mount devices*, Arlington, VA., JEDEC Solid State Products Engineering Council.
- [6] SiliconFarEast (2005), *Internal Package and Die Contamination*, <http://www.siliconfareast.com/contam-int.htm>, (Agosto 2005).
- [7] SiliconFarEast (2005), *Corrosion in Die and Package*, <http://www.siliconfareast.com/corrosion.htm>. (Agosto 2005)
- [8] Pierre R. Roberge (2000), *Handbook of corrosion engineering*, New York, NY., Mc Graw Hill.
- [9] T. Hasegawa (2004), *JEDEC Standards for Failure Analysis*, ASM Microelectronics Failure Analysis Desk Reference Fifth Edition.
- [10] SiliconFarEast (2005), *Semiconductor Packaging: Molding/Plastic Encapsulation*, <http://www.siliconfareast.com/molding.htm>, (Septiembre 2005).
- [11] Sonoscan (2003), *Acoustic Micro Imaging*, Elk Grove Village, IL., Sonoscan.
- [12] Cheryl D. Hartfield, Thomas M. Moore (2004), *Acoustic Microscopy of Semiconductor Packages*, ASM Microelectronics Failure Analysis Desk Reference Fifth Edition.
- [13] Robert E. Lee (1992), *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, Englewood Cliffs, NJ., PTR Prentice Hall.
- [14] W. Vanderlinde (2004), *Energy Dispersive X-ray Analysis*, ASM Microelectronics Failure Analysis Desk Reference Fifth Edition.

- [15] Steve Wang (2004), *X-ray Microtomography Tools for Advanced IC Packaging Failure Analysis*, ASM Microelectronics Failure Analysis Desk Reference Fifth Edition.
- [16] L. Bjerregaard, K. Geels, B. Ottesen, M. Ruckert (1996), *Metallog guide*, Denmark, Struers.
- [17] Hugh O. Pierson (1999), *Handbook of Chemical Vapor Deposition, Second Edition: Principles, Technologies and Applications*, Norwich, NY., Noyes.
- [18] JEDEC Standards JESD22-A120 (2001), *Test Method for the measurement of moisture diffusivity and water solubility in organic materials used in integrated circuits*, Arlington, VA., JEDEC Solid State Products Engineering Council.
- [19] IPC/JEDEC Standard J-STD-033 (2002), *Handling, packing, shipping and use of moisture/reflow sensitive surface mount devices*, Arlington, VA., JEDEC Solid State Products Engineering Council.
- [20] IPC/JEDEC Standard J-STD-035 (1999), *Acoustic microscopy for nonhermetic encapsulated electronic components*, Arlington, VA., JEDEC Solid State Products Engineering Council.
- [21] K. Van doorselaer, T.M. Moore, R. Tiziani, W.Baelde (1992), *Evaluation of methods for delamination detection by acoustic microscopy in plastic-packaged integrated circuits*, Los Angeles, Ca., ASM/ISTFA Symposium '92.
- [22] Hutt, D.A.; Webb, D.P.; Hung, K.C.; Tang, C.W.; Conway, P.P.; Whalley, D.C., Chan, Y.C. (2000), *Scanning acoustic microscopy investigation of engineered flip-chip delamination*, IEEE/CPMT Electronics Manufacturing Technology Symposium.
- [23] JEDEC Standard JESD-625 (1999), *Requirements for handling electrostatic discharge sensitive (ESD) devices*, Arlington, VA., JEDEC Solid State Products Engineering Council.
- [24] JEDEC Standard JESD-47 (2004), *Stress test, driven qualification specification of integrated circuits*, Arlington, VA., JEDEC Solid State Products Engineering Council.
- [25] IPC Test methods IPC-TM-650 (2004), *Microsectioning*, Northbrook, IL., IPC Association Connecting Electronics Industries.

- [26] B. Engel, E. Levine, J. Petrus, and A. Shore (2004), *The Art of Cross Sectioning*, ASM Microelectronics Failure Analysis Desk Reference Fifth Edition.
- [27] J. Goldstein, D.E. Newbury, D.C. Joy, C.E. Lyman, P.Echlin, E. Lifshin, L.C. Sawyer, J.R. Michael (2003), *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, New York, NY., Springer Science.
- [28] W. Vanderlinde (2004), *Scanning Electron Microscopy*, ASM Microelectronics Failure Analysis Desk Reference Fifth Edition.
- [29] EDAX (2002), *Genesis User's Manual*, USA, EDAX.
- [30] Kerry Oren (2002), *Detecting Die Surface Delamination*, San Clemente, CA., COTS journal.
- [31] John McDonald (2004), *Optical Microscopy*, ASM Microelectronics Failure Analysis Desk Reference Fifth Edition.
- [32] Perry L. Martin (1999), *Electronic failure analysis handbook*, USA., McGraw-Hill.
- [33] Milton Ohring (1998), *Reliability and failure of electronic materials and devices*, San Diego, Academic press.
- [34] Thomas W. Lee and Dr. Seshu V.Pabbisetty (1993), *Microelectronic failure analysis*, Ohio, ASM.
- [35] J. McHardy, F. Ludwig (1992), *Electrochemistry of semiconductors and electronics*, Park Ridge, NJ., Noyes.
- [36] Bharat Bhushan (2004), *Handbook of nanotechnology*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.
- [37] Stephen M. Rossnagel, Jerome J. Cuomo, William D. Westwood (1999), *Handbook of Plasma Processing Technology: Fundamentals, Etching, Deposition, and Surface Interactions*, Norwich, NY., Noyes.
- [38] P. Walker, W.H. Tarn (1991), *CRC Handbook of Etchants for Metals and Metallic Compounds*, Florida, CA., CRC Press LLC.
- [39] Ryan Ong (2004), *Failure Analysis Terms and Definitions*, ASM Microelectronics Failure Analysis Desk Reference Fifth Edition.
- [40] Rajen Dias (2004), *Failure Analysis Flow for Package Failures*, ASM Microelectronics Failure Analysis Desk Reference Fifth Edition.

- [41] David C. C. Lam, I. T. Chong, and Pin Tong (2000), *Parametric Analysis of Steam Driven Delamination in Electronics Packages*, IEEE. Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 23, No. 3.
- [42] A. A. O. Tay and T. Y. Lin (1998), *Influence of Temperature, Humidity and Defect Location on Delamination in Plastic IC Packages*, IEEE Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm '98.
- [43] Wong, W.H.; Cheng, L (2000), *Initiation and propagation of interface delamination in plastic IC packages*, IEEE Electronics Packaging Technology Conference 3rd.
- [44] T.R. Conrad and R.L. Shook (1994), *Impact of Moisture/Reflow Induced Delaminations on Integrated Circuit Thermal Performance*, IEEE Electronic Components and Technology Conference 44th.
- [45] Ho, K.; Teng, A. (2000), *Survey on delamination of IC packages in electronic products*, IEEE Electronic Materials and Packaging Symposium.
- [46] Van Driel, W.D.; Van Gils, M.A.J.; Zhang, G.Q. (2005), *Prediction of Delamination in Micro-electronic Packages*, IEEE Electronic Packaging Technology International Conference 6th.
- [47] Edwards, D.; Stearns, B.; Helmick, M. (1995), *The effect of internal package delaminations on the thermal performance of PQFP, thermally enhanced PQFP, LOC, and BGA packages*, IEEE Electronic Components and Technology Conference 45th.
- [48] Semicon Physics (2006), *Semiconductors*, <http://www.semiconphysics.com/>, (Enero 2006).
- [49] JEDEC (2005), *Solid State Technology Association*, <http://www.jedec.org/>, (Septiembre 2005).
- [50] IPC (2006), *Association connecting electronic industries*, <http://www.ipc.org/>, (Enero 2006).
- [51] SemiconFarEast (2005), *Semiconductor manufacturing*, www.SemiconFarEast.com, (Mayo 2005).
- [52] Sonoscan (2005), *Acoustic microscopy*, <http://www.sonoscan.com/>, (Mayo 2005).

- [53] Allied (2004), *Allied High Tech Products*, <http://www.alliedhightech.com/>, (Marzo 2005).
- [54] Buehler (2001), *Buehler home page*, <http://www.buehler.com>, (Marzo 2005).
- [55] EDAX (2006), *EDAX home page*, <http://www.edax.com/>, (Enero 2006).
- [56] JEOL (2005), *JEOL home page*, <http://www.jeol.com/>, (Noviembre 2005).
- [57] IEEE (2006), *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, <http://www.ieee.org/portal/site>, (Febrero 2006).

Glosario

Glosario de términos en inglés comúnmente utilizados en la industria de los semiconductores, así como su traducción al español y una breve definición.

Término en Inglés	Traducción al español	Definición
A		
Alloy	Aleación	Sustancia con propiedades metálicas compuesta de dos o más elementos químicos de los cuales al menos uno es metal.
Anode	Ánodo	Electrodo donde ocurre la reacción de oxidación.
Array	Matriz	Conjunto de elementos arreglados en filas y columnas.
Assembly	Ensamble	Proceso de colocar un circuito integrado en un paquete. Usualmente consiste en una serie de pasos que incluyen, preparación del dado, pegado del dado, alambrado y encapsulado.
B		
Back-end or End-of-line	Último proceso de ensamble	Se refiere colectivamente a los últimos procesos de ensamble a partir de moldeo.
Backgrinding	Rebajado	Proceso de rebajado de la parte trasera de una oblea hasta el espesor deseado.
Ball grid array (BGA)	Matriz de esferas	Paquete de montaje en superficie que utiliza una matriz de esferas o bolas de metal las cuales le proporcionan una interconexión eléctrica externa.
Bonding diagram	Diagrama de alambrado	Diagrama donde se especifica cómo debe alambrarse el dado.

C

Cathode	Cátodo	Electrodo donde ocurre la reacción de reducción.
Chip-out	Despostillamiento	Falla donde a partir de un pequeño daño en una parte del dado o paquete éste se empieza a quebrar.
Corrosion	Corrosión	Deterioro de un material (generalmente un metal) por con tacto con el medio ambiente.
Cratering	Cráteres	Mecanismo de falla donde el silicio debajo del bloque donde se pegan los alambres se fractura.
C-Sam	Modo-C	Modo-C del microscopio acústico de barrido donde se analiza el plano X-Y a una profundidad Z mediante pulsos y ecos. Se utiliza para inspeccionar delaminación entre interfaces. También se conoce como C-Scan o C-Mode.
Curing	Curado	Tratamiento a base de calor para promover el enlace molecular en un adhesivo o el compuesto de moldeo endurecerse para alcanzar su forma final.

D

Defect	Defecto	Imperfección física o química, la cual es una característica que no cumple con las especificaciones requeridas.
Degradation	Degradación	Cambio no deseado en un paquete o producto.
Delamination	Delaminación	Pérdida parcial o completa de adhesión o separación entre dos interfases. Usualmente esta pérdida de adhesión ocurre entre el plástico encapsulante del paquete y la superficie del dado.
Design of	Diseño de	Diseño sistemático de un experimento usualmente con

experiments (DOE)	experimento	el fin de optimizar algún proceso.
Destructive physical analysis (DPA)	Análisis destrutivo	Serie de pasos destructivos realizados en fallas eléctricas para analizarlas de algún daño físico o defectos en el paquete o dado.
Die	Dado	Microcircuito individualizado proveniente de una oblea.
Die attach	Pegado de dado	Etapla dentro del proceso de ensamble donde el dado es montado en la superficie del tablero de circuito impreso.

E

Echo	Eco	Una señal (voltaje) indicando la energía acústica reflectada en el microscopio acústico de barrido.
Energy dispersive X-ray Analysis (EDX)	Análisis de energía dispersiva de rayos-X	Análisis utilizado para identificar elementos presentes en una muestra. En el ensamble de semiconductores se utiliza comúnmente para identificar contaminantes. También es conocida como análisis EDAX o EDS.
Electrochemical potential	Potencial electroquímico	Voltaje necesario para el proceso de electrodeposición.
Electroplating	Electrodeposición	Proceso que consiste en depositar un recubrimiento de metal al dejar pasar una corriente a través de un medio conductor.
Epoxy	Pegamento epóxico	Adhesivo utilizado como material de pegado del dado.

F

Failure	Falla	La inhabilidad de un producto de cumplir con las
---------	-------	--

especificaciones eléctricas o físicas.

Failure mode and effects analysis (FMEA)	Análisis de modo y efecto de falla	Metodología para identificar los modos de fallas potenciales que puedan tener un producto o proceso.
Fatigue failure	Falla por fatiga	Falla debido a la aplicación de esfuerzo repetitivo o cíclico.
Fillers	Material de relleno	Materiales inertes usualmente incluidos en el compuesto de moldeo. No cambian químicamente durante el curado pero afectan las propiedades del compuesto como la flexibilidad y la expansión térmica.
Flux	Fundente	Material utilizado para promover fusiones o uniones de metales durante el soldado. Remueve los óxidos en una superficie de metal.
Fracture	Fractura	Rompimiento de un material.
Frequency	Frecuencia	Numero de oscilaciones por segundo (Hz)
Fourier transform infrared analysis (FTIR)	Análisis infrarrojo por transformada de Fourier	Técnica utilizada para identificar contaminantes mediante el análisis de la transmitancia de las muestras y la reflectancia de rayos infrarrojos a diferentes frecuencias.
Front-end or Front-of-line	Primer proceso de ensamble	Se refiere en forma colectiva a las primeras etapas de ensamble hasta antes del proceso de moldeo.

G

Gate	Ventana	Una ventana electrónica para monitorear señales en un segmento seleccionado en el osciloscopio del microscopio acústico de barrido.
------	---------	---

Glass transition temperature (Tg)	Temperatura de transición vítrea	Temperatura en la cual un polímero pierde sus propiedades vítreas y adquiere propiedades elastoméricas.
-----------------------------------	----------------------------------	---

Grain boundary	Frontera de grano	Interfase entre dos regiones de cristal que difieren en la orientación de sus arreglos atómicos.
----------------	-------------------	--

I

Intermetallic compound (IMC)	Compuestos intermetálicos	Compuesto formado entre dos metales que se encuentran en íntimo contacto uno con otro.
------------------------------	---------------------------	--

Acoustic impedance	Impedancia acústica	Propiedad de un material definida como el producto de la densidad y velocidad del ultrasonido para un material específico.
--------------------	---------------------	--

L

Laminate	Laminado	Capa de plástico o algún otro material con líneas de metal utilizado como materia prima para los circuitos impresos.
----------	----------	--

Leadframe	Armadura	Estructura de metal con terminales utilizada como esqueleto de soporte para muchos tipos de paquetes.
-----------	----------	---

Lead free	Libre de plomo	Proceso que utiliza soldadura libre del elemento plomo (<i>Pb</i>).
-----------	----------------	---

Lifted ball	Bola desprendida	Unión de una bola que falló el pegado adecuado al dado.
-------------	------------------	---

Lot	Lote	Grupo de dispositivos semiconductores, de proceso similar y de la misma corrida de producción, que tratados como población homogénea.
-----	------	---

M

Multi-chip module (MCM)	Módulo de dados múltiples	Paquete que contiene más de un dado en su interior.
Moisture sensitive level	Nivel de sensibilidad a la humedad	Número que denota el grado de vulnerabilidad de un paquete a fracturarse debido a la vaporización de humedad interna durante el proceso de reflujo.

O

Out of control plan (OCAP)	Plan de fuera de control	Diagrama de flujo o procedimiento documentado donde se definen las acciones requeridas si un proceso se sale de control.
----------------------------	--------------------------	--

P

Package	Paquete	Estructura que sirve como contenedor o cubierta para proteger el dado del ambiente exterior y proporcionarle una conexión eléctrica externa.
Polymer	Polímero	Material que consiste de cadenas largas de combinaciones moleculares similares de carbón, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, etc.
Popcorn	Popcorn	Fractura del paquete causada por la vaporización de la humedad interna del paquete durante el proceso de reflujo.
Pulse	Pulso	En el microscopio acústico de barrido, es una señal que tiene un corto tiempo de anchura (150 ns) y posee energía de ultrasonido sobre un rango ancho de frecuencia.

R

Reflow	Reflujo	Proceso de soldar los dispositivos de montaje en superficie en un tablero al hacerlos pasar a través de un
--------	---------	--

horno de reflujo.

S

Scanning acoustic microscopy (SAM)	Microscopia acústica de barrido	Técnica que emplea ondas ultrasónicas para analizar separaciones dentro de un paquete.
Scanning electron microscopy (SEM)	Microscopio electrónico de barrido	Técnica de microscopia que alcanza una alta resolución empleando electrones en vez de luz para su proceso de imagen.
Semiconductor	Semiconductor	Elemento que tiene una resistividad eléctrica en el rango entre un conductor (como el aluminio) y un aislante (como el dióxido de silicio). Los circuitos integrados están comúnmente fabricados de materiales semiconductores como el silicio, germanio, o arsenuro de galio.
Singulation	Singulado	Etapas del proceso de ensamblaje donde los paquetes son finalmente individualizados del tablero de circuito impreso.
Silicon nitride (Si ₃ N ₄) (abbr. SiN)	Nitruro de silicio	Capa de pasivación químicamente depositada a temperatura entre 600°C y 900°C sobre las obleas de silicio para protegerlas del ambiente, contaminantes y también actúa como aislante.
Surface mount device (SMD)	Dispositivo de montaje en superficie	Dispositivo que es montado en un tablero de circuito impreso mediante el proceso de soldado por reflujo.
Surface mount	Tecnología de	Tecnología utilizada para el proceso de montar los

technology (SMT)	montado en superficie	dispositivos directamente en el tablero.
Solder	Soldadura	Aleación de metal, usualmente compuesta por estaño y plomo, utilizada para unir componentes.
Substrate	Substrato	Superficie donde el dado u otros componentes son montados.

T

Tape and reel	Encintar y embobinar	Proceso en el que se empaquetan los dispositivos microelectrónicos en unos contenedores pequeños con cinta y después son embobinados en un carrete para facilitar su transporte.
Thermocouple	Termopar	Sensor de temperatura formado por la unión de dos metales diferentes que tienen un voltaje de salida proporcional a la diferencia en temperatura entre la unión caliente y la unión fría.
Through hole	Método por inserción	Tecnología de ensamble en donde se necesitan hacer perforaciones para realizar el soldado de los componentes por el otro lado del tablero.
Thermoplastics	Termoplástico	Tipo de polímero que puede recalentarse y enfriarse repetidamente sin sufrir degradación.
Thermosets	Termofijo	Tipo de polímero que sólo puede calentarse una vez convirtiéndose en resina dura al cambiar los enlaces de su estructura molecular.

U

Underfill	Relleno	Material encapsulante depositado en el hueco entre un dado y su substrato para minimizar el coeficiente de
-----------	---------	--

expansión térmica y mejorar la confiabilidad de su unión.

V

Void	Hueco	Ausencia de material o imperfecciones localizadas en el material de pegado del dado o el compuesto de moldeo.
------	-------	---

W

Wafer	Oblea	Una delgada y pulida oblea de material semiconductor en la que se fabrica una matriz de dados de circuitos
-------	-------	--

Wafer saw	Cortado de oblea	Etapla del proceso de ensamble donde la oblea es cortada en dados individuales.
-----------	------------------	---

Wirebonding	Alambrado	Etapla del proceso de ensamble en la que se conectan alambres entre el dado y el substrato o tablero de circuito impreso.
-------------	-----------	---

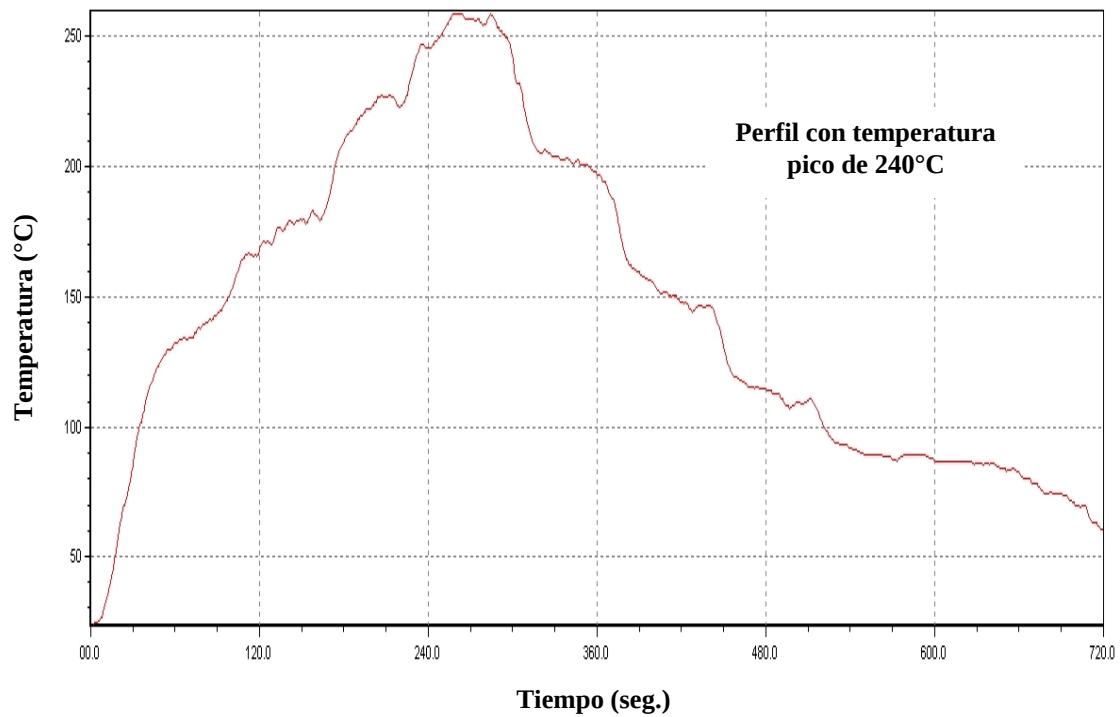
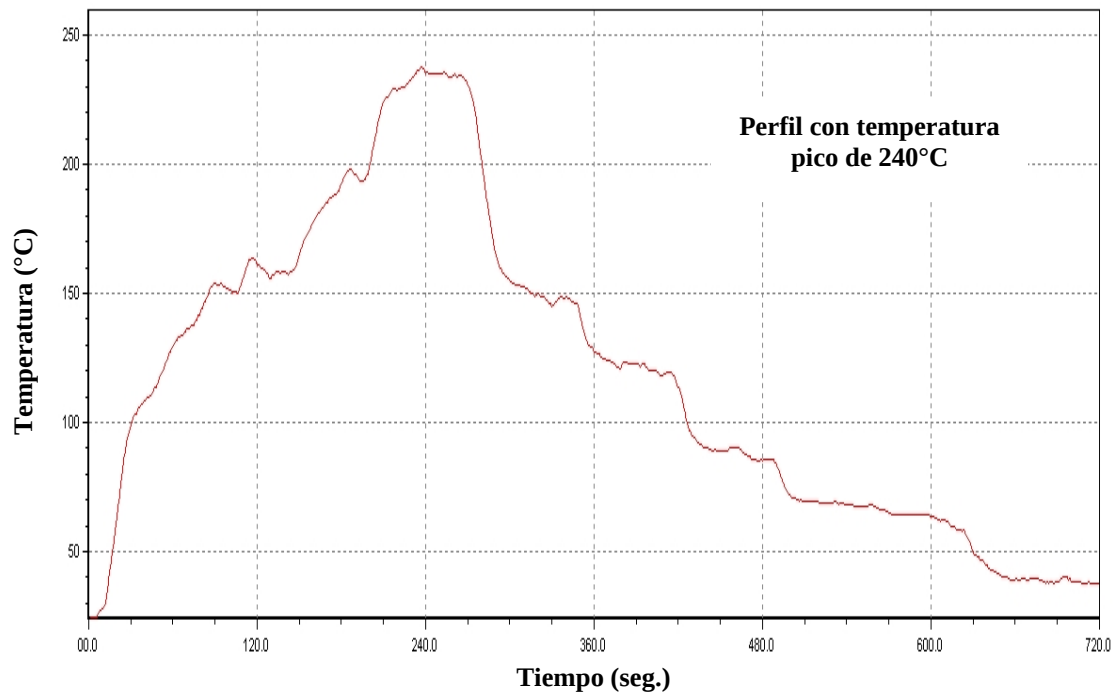
Wire sweeping	Alambres barridos	Fenómeno donde el flujo del plástico encapsulante durante el moldeo ladea los alambres en su dirección.
---------------	-------------------	---

Y

Yield	Rendimiento	Proporción de piezas buenas en un lote
-------	-------------	--

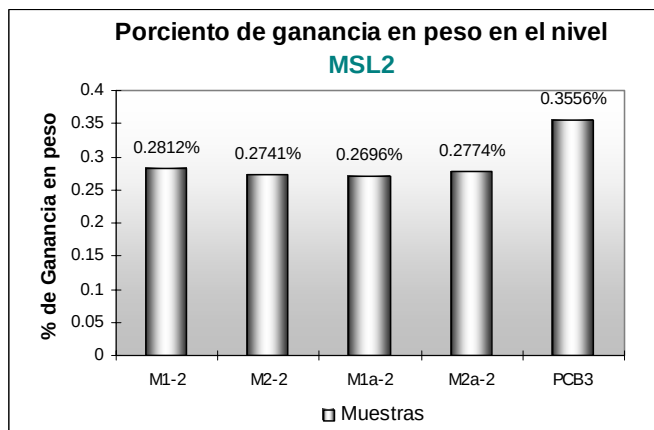
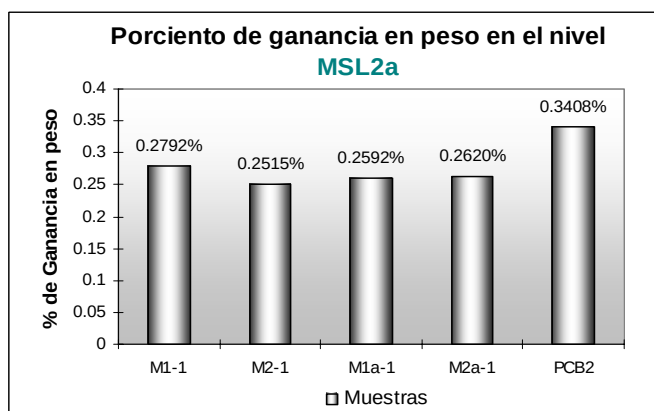
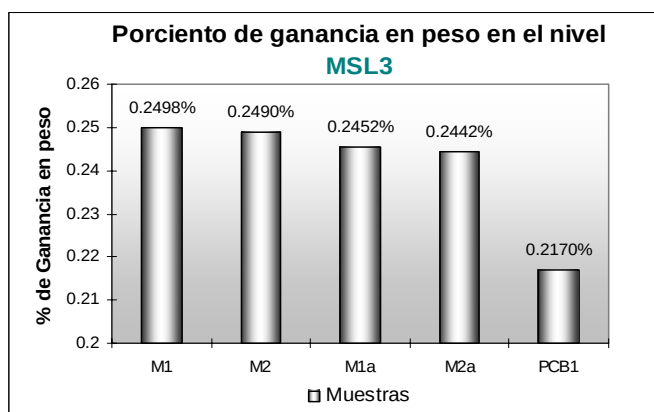
Anexo A

Estos son los perfiles de reflujo con temperatura pico de 240°C y 260°C que se utilizaron para evaluar a los productos con matriz densa de terminales esféricas del tamaño 10x10 y 12x12.



Anexo B

En estas gráficas se aprecia el incremento de humedad de las muestras durante su exposición a la cámara, con condiciones controladas de humedad y temperatura para cada nivel de sensibilidad evaluado.



Anexo C

En este anexo se muestran las imágenes del análisis de rayos-X, del análisis de micro imagen acústica y las imágenes SEM de las fallas obtenidas al término de la evaluación.

⇒ **Muestra M2a (12x12)**. Esta muestra se evaluó en el nivel MSL3 y a una temperatura pico de 260°C en el horno de reflujo. Al final de la evaluación sólo una pieza, que pasó satisfactoriamente la prueba eléctrica, presentó separación en la interfase entre el dado y el tablero de circuito impreso. En el análisis de rayos-X no se observaron anomalías de ensamble.

Análisis de rayos-X

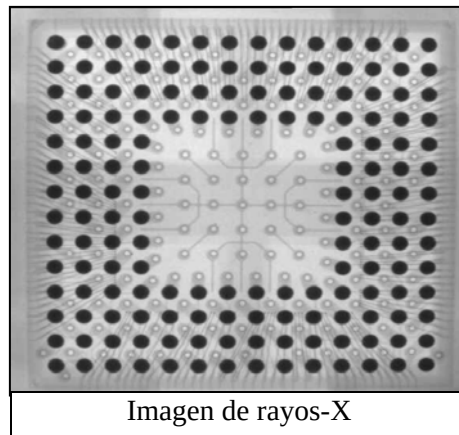


Imagen de rayos-X

Análisis de micro imagen acústica

En las imágenes se observa toda la superficie del dado con delaminación.

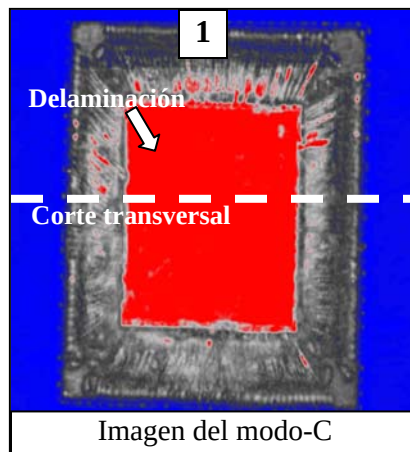


Imagen del modo-C

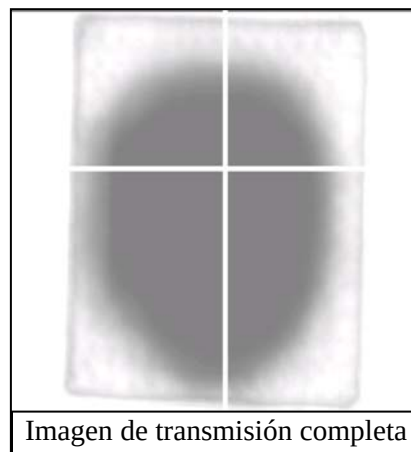
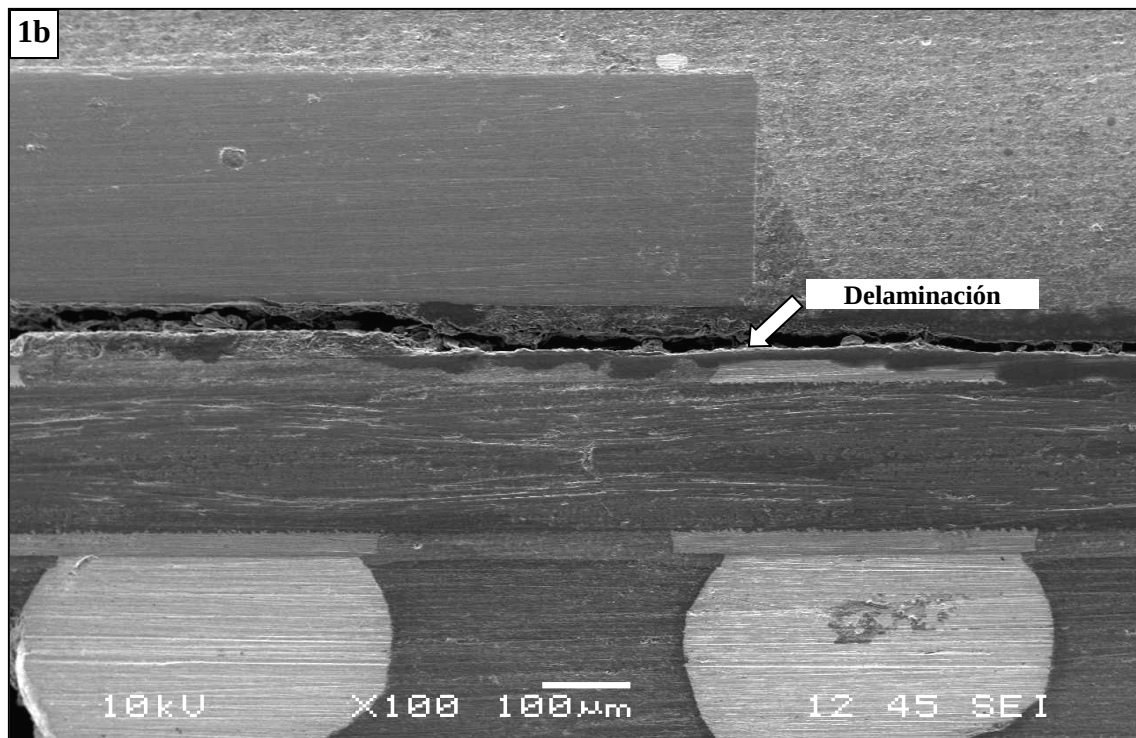
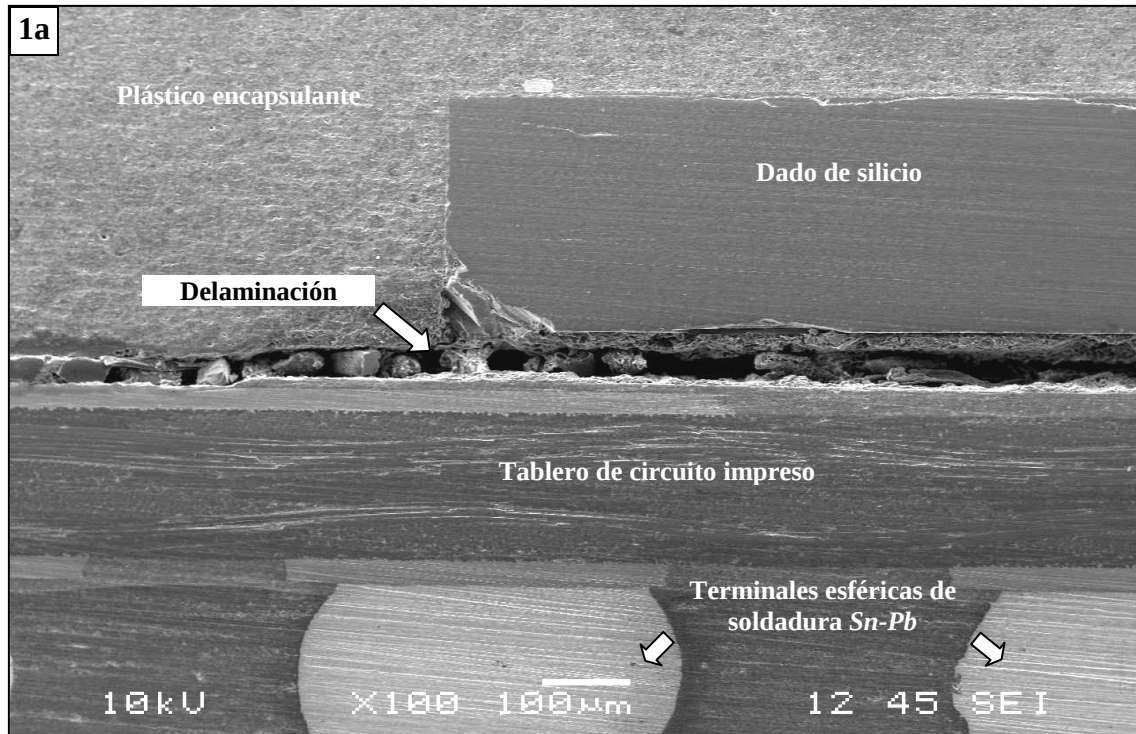


Imagen de transmisión completa

Imágenes SEM del corte transversal

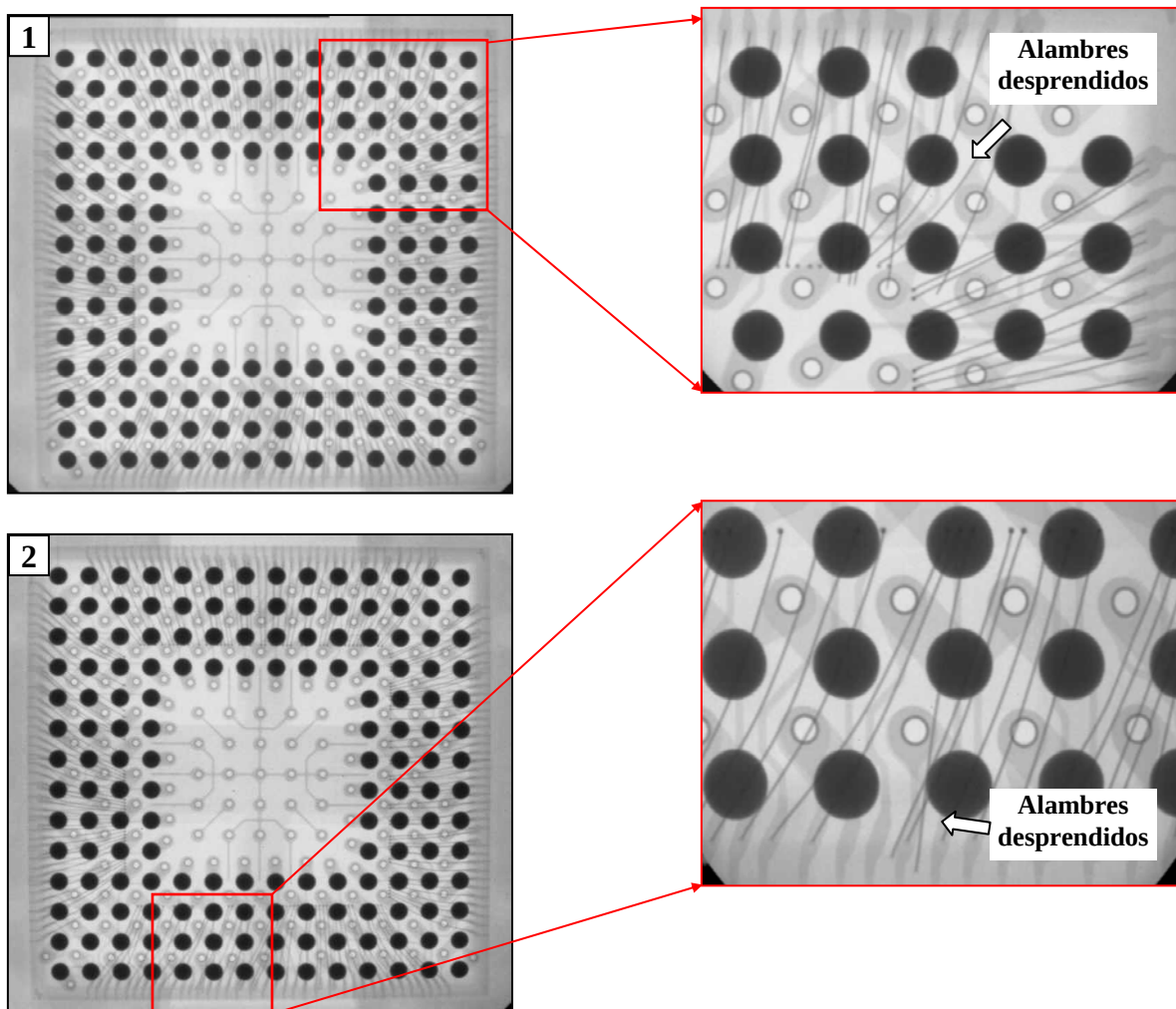
Las imágenes SEM muestran la interfase del dispositivo microelectrónico donde ocurrió delaminación.



⇒ **Muestra M2-1 (12x12).** Esta muestra se evaluó en el nivel MSL2a y a una temperatura pico de 240°C en el horno de reflujo. Al final de la evaluación dos piezas fallaron eléctricamente pero no presentaron delaminación. En el análisis de rayos-X se encontraron algunos alambres de oro desprendidos en las dos fallas.

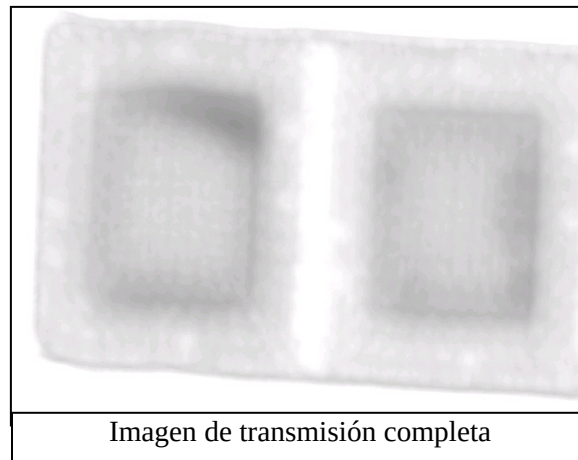
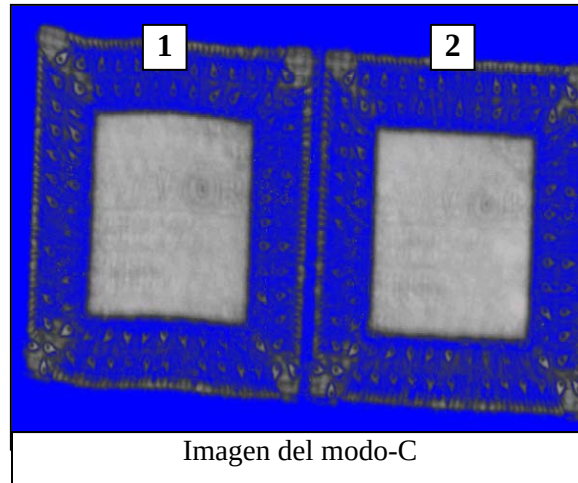
Análisis de rayos-X

Las imágenes de rayos-X muestran claramente las áreas donde se encontraron los alambres de oro desprendidos en las dos fallas eléctricas al final de la evaluación. La prueba eléctrica inicial no las detectó como fallas lo cual indica que los alambres no estaban interconectándose unos con otros, aunque probablemente sí presentaban una pobre adhesión y con el esfuerzo a que fueron sometidas las piezas se interconectaron haciendo que fallaran en la prueba eléctrica final.



Análisis de micro imagen acústica

El análisis de micro imagen acústica no muestra presencia de delaminación en las dos fallas eléctricas. En la imagen de transmisión completa de la pieza número 1 se muestra un área oscura debido al desarreglo de los alambres desprendidos en ese lugar.

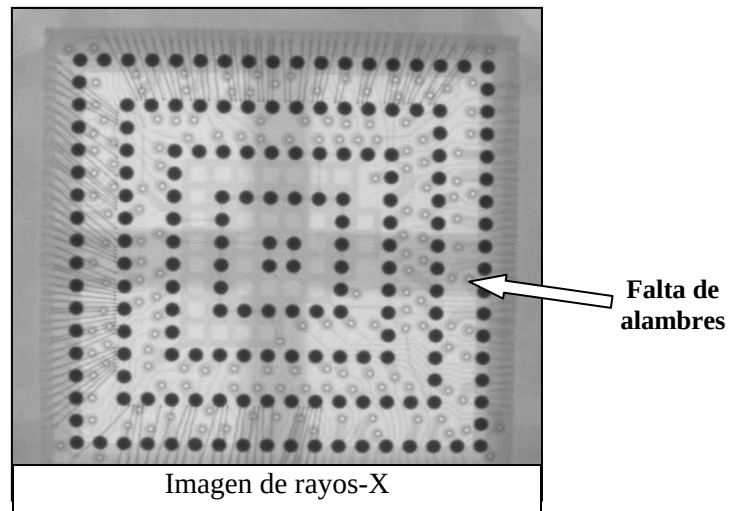


⇒ **Muestra PCB2.** En esta muestra, se sometió el tablero de circuito impreso al nivel MSL2a y después al proceso de moldeo por inyección de plástico. Al final de la evaluación una pieza falló eléctricamente pero no presentó delaminación. En el análisis de rayos-X se encontró que faltaban algunos alambres. A las muestras evaluadas en el proceso de moldeo no se les realizó prueba eléctrica inicial ya que en un principio las

piezas estaban en el tablero sin moldear y sin ser individualizadas, debido a esto se detectó la falla hasta la prueba eléctrica final.

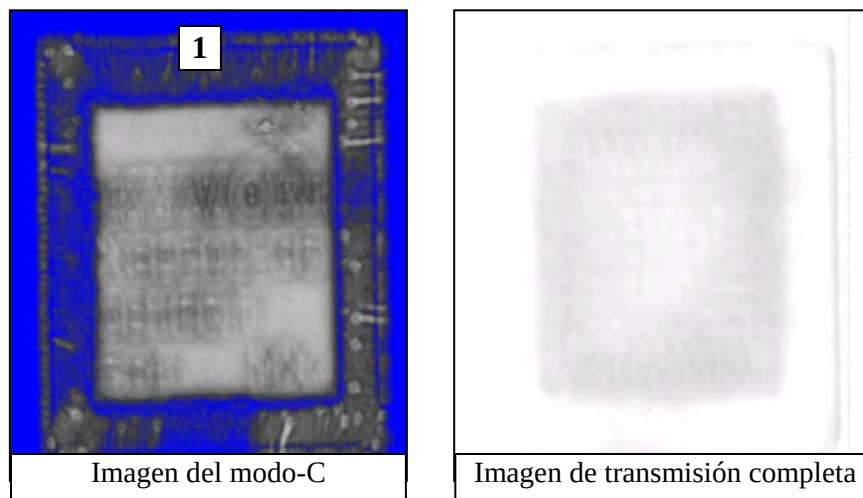
Análisis de rayos-X

En la imagen de rayos-X se puede apreciar que todo un lado del dado no presenta alambres.



Análisis de micro imagen acústica

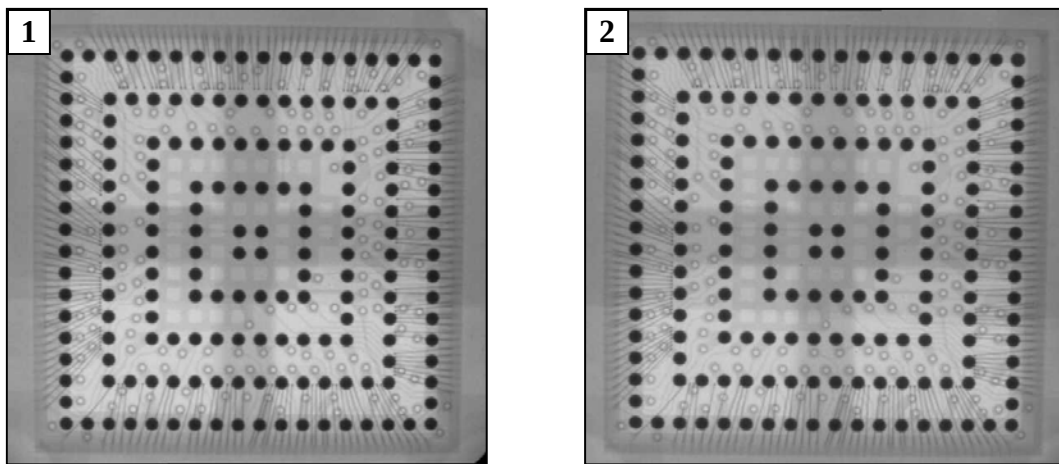
En las imágenes del modo-C y de transmisión completa se puede observar que no hay presencia de delaminación en la pieza que fallo la prueba eléctrica.



⇒ **Muestra M1-2 (10x10).** Esta muestra se evaluó en el nivel MSL2 y a una temperatura pico de 240°C en el horno de reflujo. Al final de la evaluación dos piezas fallaron eléctricamente pero no presentaron delaminación. En el análisis de rayos-X no se encontraron anomalías en el interior del dispositivo microelectrónico.

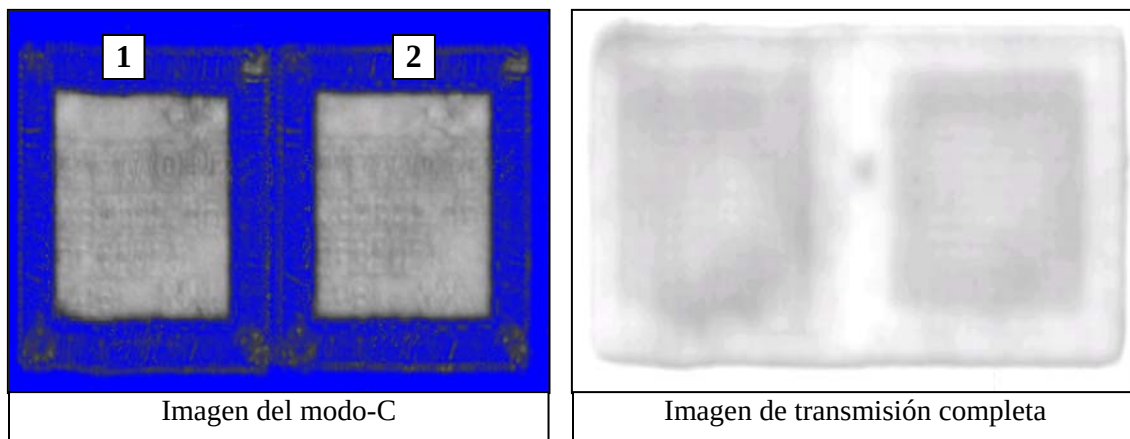
Análisis de rayos-X

Las imágenes de rayos-X muestran que las dos piezas que fallaron eléctricamente no presentan ninguna anomalía obvia de ensamble.



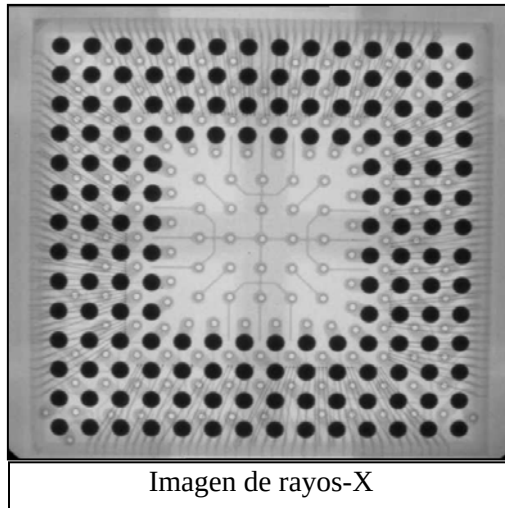
Análisis de micro imagen acústica

Las imágenes del análisis de micro imagen acústica muestran que no hay delaminación en las dos piezas que fallaron eléctricamente.



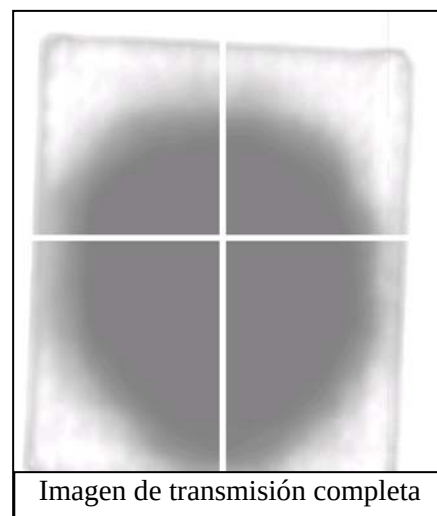
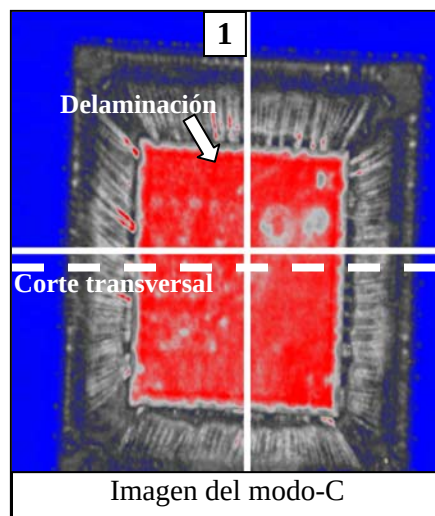
⇒ **Muestra M2-2 (12x12).** Esta muestra se evaluó en el nivel MSL2 y a una temperatura pico de 240°C en el horno de reflujo. Al final de la evaluación una pieza que pasó satisfactoriamente la prueba eléctrica presentó delaminación en la interfase entre el dado y el tablero de circuito impreso. El análisis de rayos-X no mostró anomalías.

Análisis de rayos-X



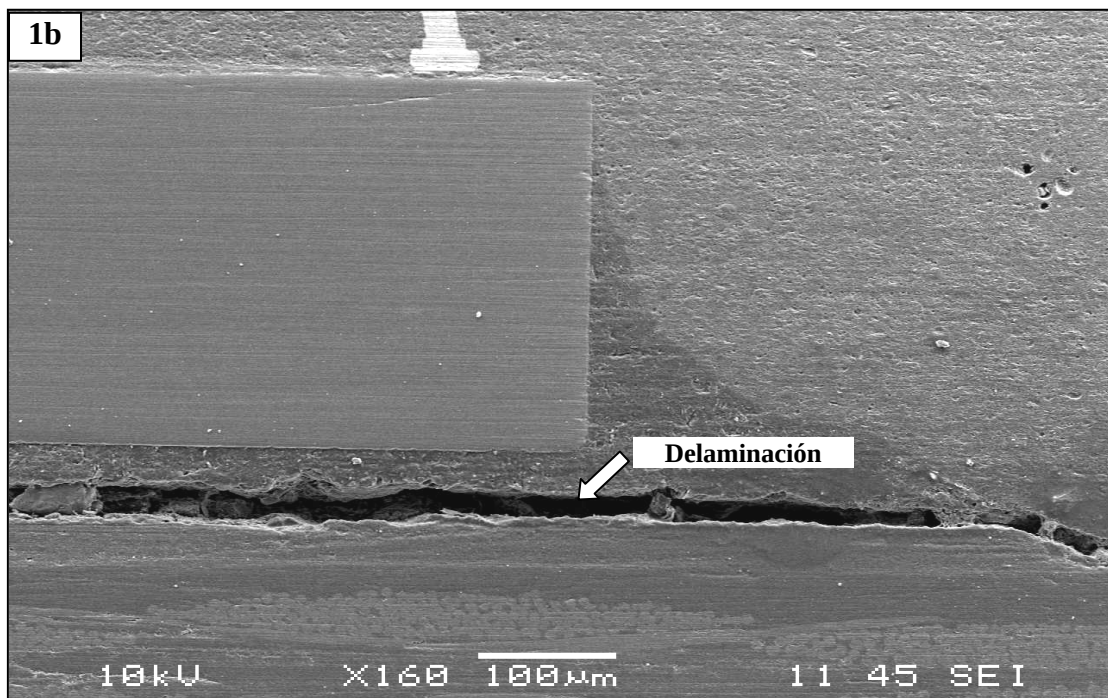
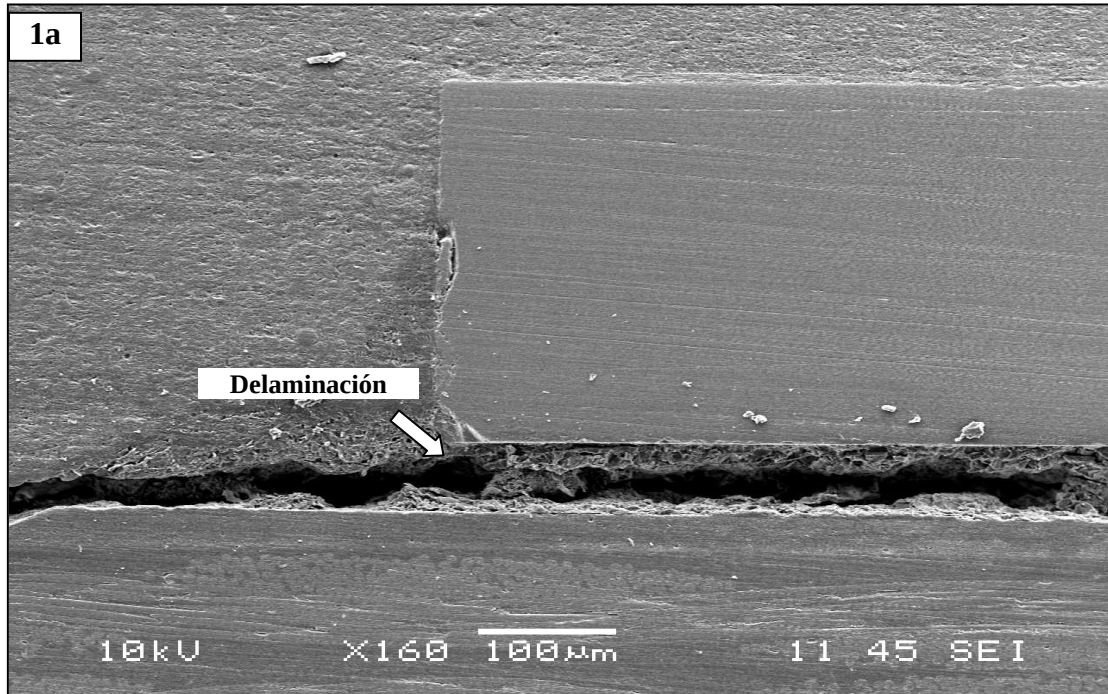
Análisis de micro imagen acústica

En las imágenes se observa toda la superficie del dado y también parte del tablero con presencia de delaminación.



Imágenes SEM del corte transversal

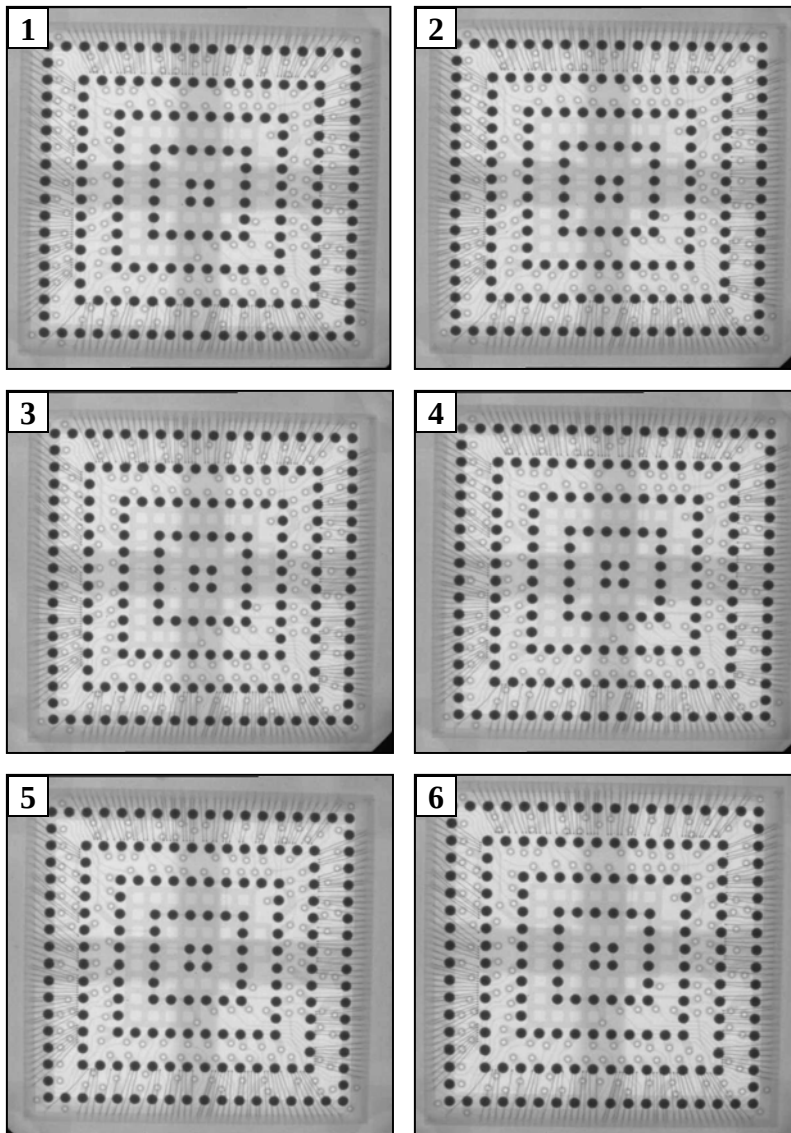
Las imágenes SEM muestran la interfase en la que ocurrió delaminación en la pieza que pasó la prueba eléctrica. Se observan los dos extremos del dado.



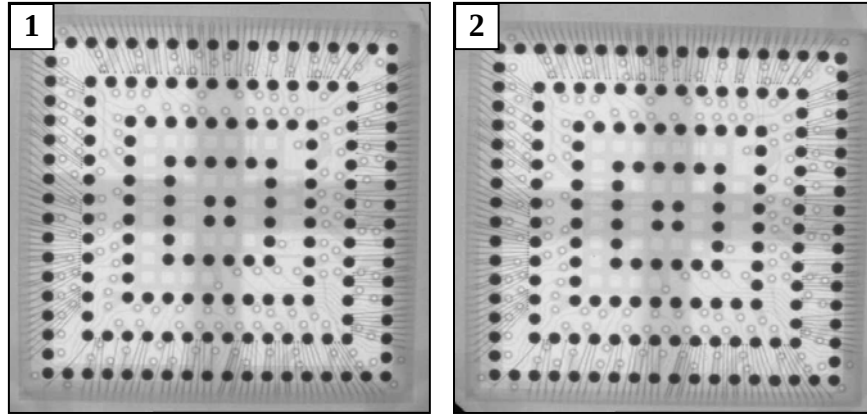
⇒ **Muestra M1a-2 (10x10).** Esta muestra se evaluó en el nivel MSL2 y a una temperatura pico de 260°C en el horno de reflujo. Al final de la evaluación se obtuvieron seis fallas eléctricas y dos piezas buenas con presencia de delaminación. También se obtuvieron dos piezas que fallaron eléctricamente pero que no tuvieron alguna separación. El análisis de rayos-X no mostró anomalías de ensamble en todas las piezas.

Análisis de rayos-X

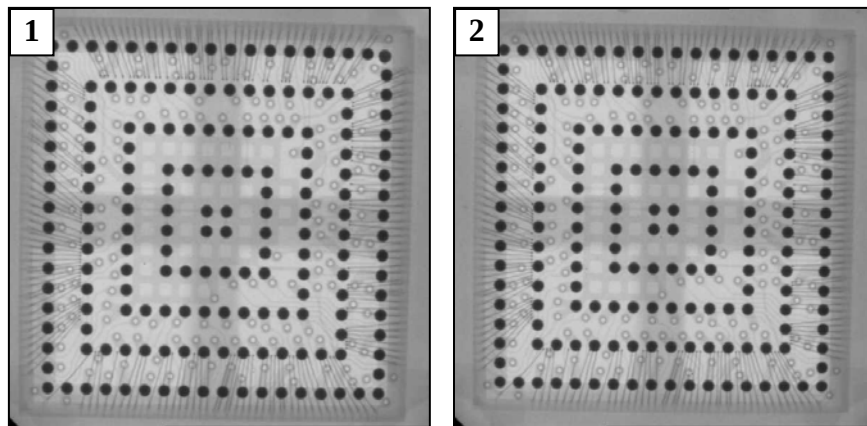
Estas son las imágenes de rayos-X, de las seis piezas con delaminación que fallaron eléctricamente, donde se aprecia que no presentaron anomalías de ensamble.



Estas son las imágenes de rayos-X de las dos piezas que pasaron la prueba eléctrica y que sí presentaron delaminación. No hay anomalías de ensamble en las dos piezas.



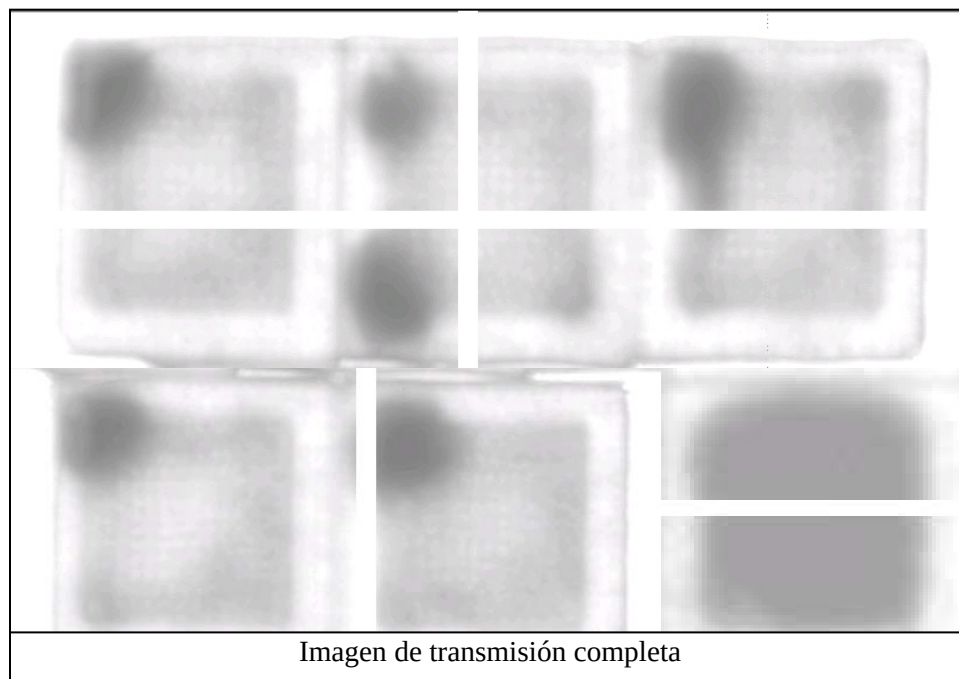
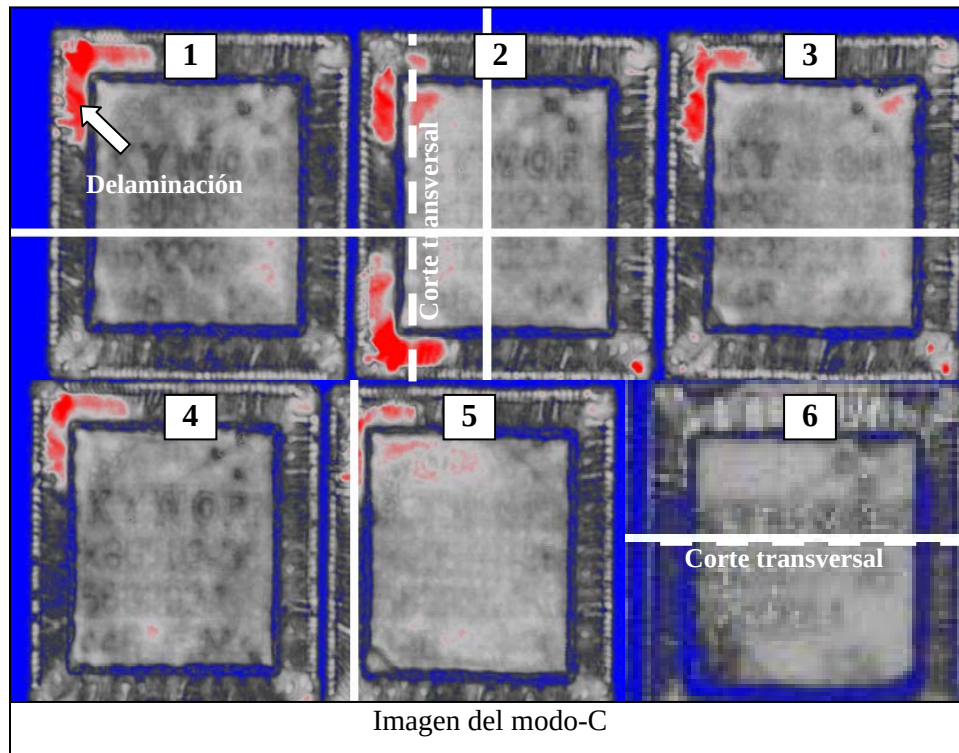
Las dos piezas que fallaron eléctricamente pero que no tuvieron delaminación tampoco presentaron anomalías de ensamble.



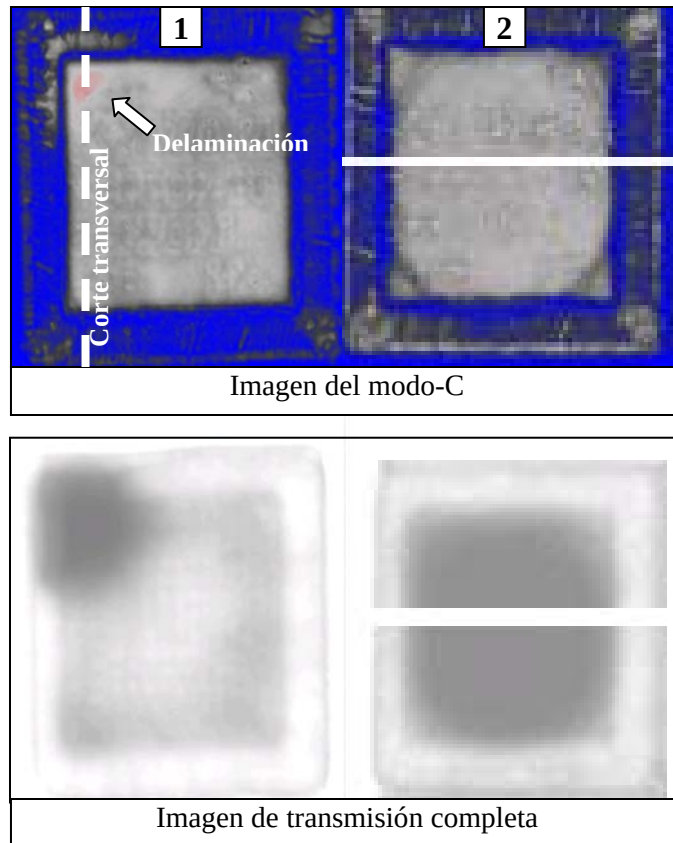
Análisis de micro imagen acústica

Según el análisis de micro imagen acústica de las seis piezas que fallaron eléctricamente y que sí presentaron delaminación., la separación se encuentra en las esquinas del dado en las piezas 1 a 5 mientras que en la pieza numero 6 en toda la superficie del dado. De

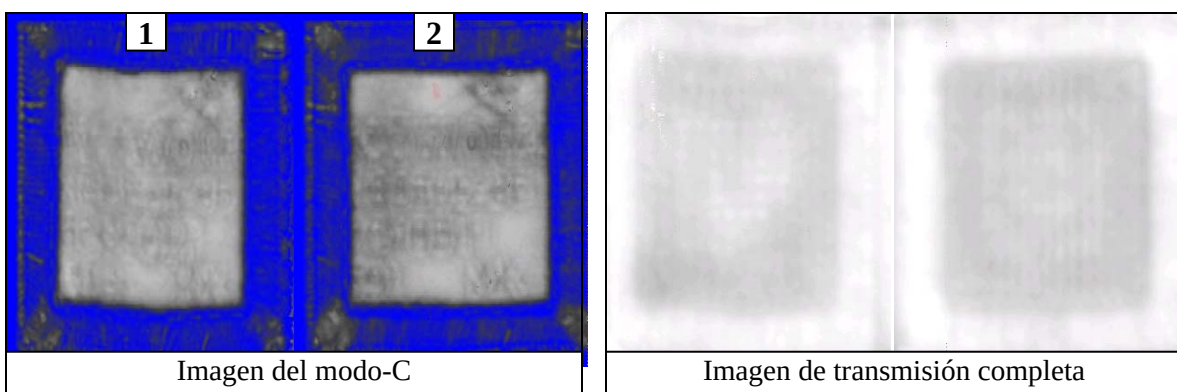
estas piezas se seleccionaron dos para realizarles corte transversal y poder observar la interfase de la separación.



A continuación se muestran las imágenes de las dos piezas que pasaron la prueba eléctrica y que si tuvieron delaminación. Una de estas dos piezas se sometió a corte transversal y a la otra pieza se le realizó el análisis de energía dispersiva de rayos-X.

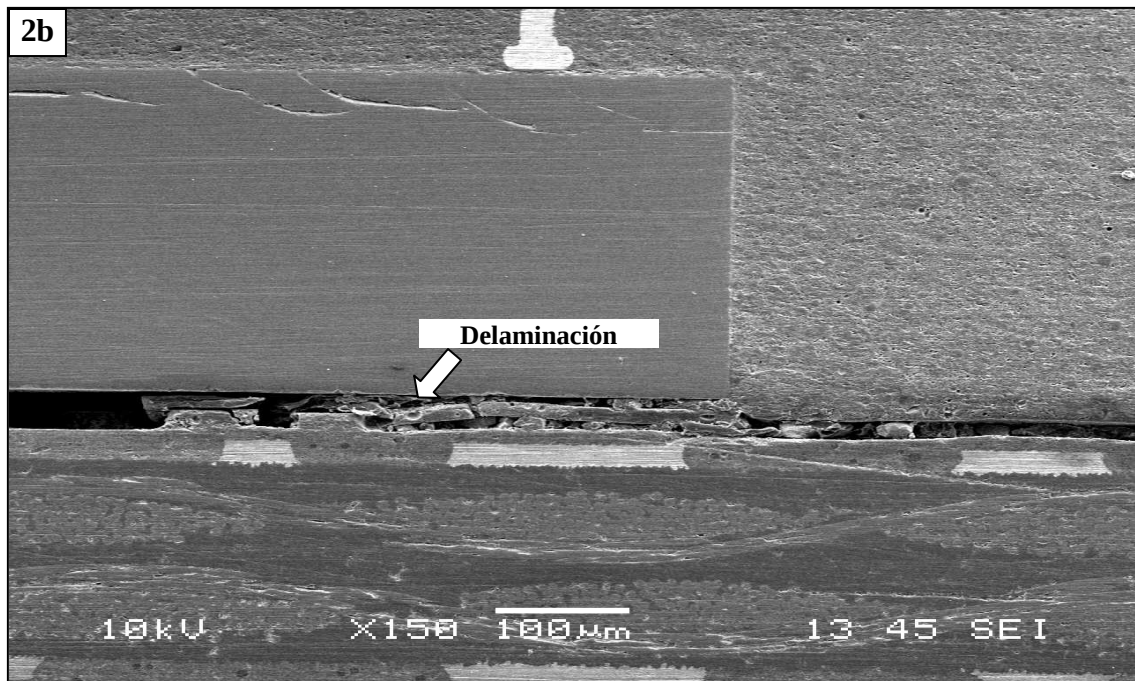
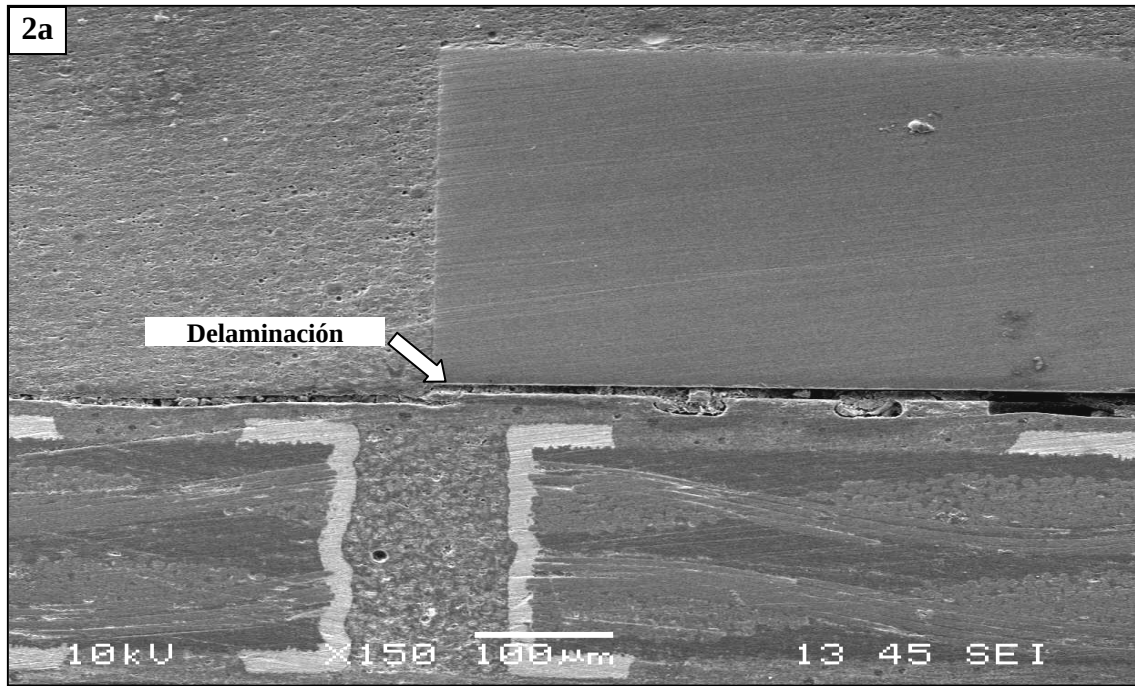


Las siguientes imágenes corresponden a las dos piezas que fallaron la prueba eléctrica y que no presentaron delaminación.

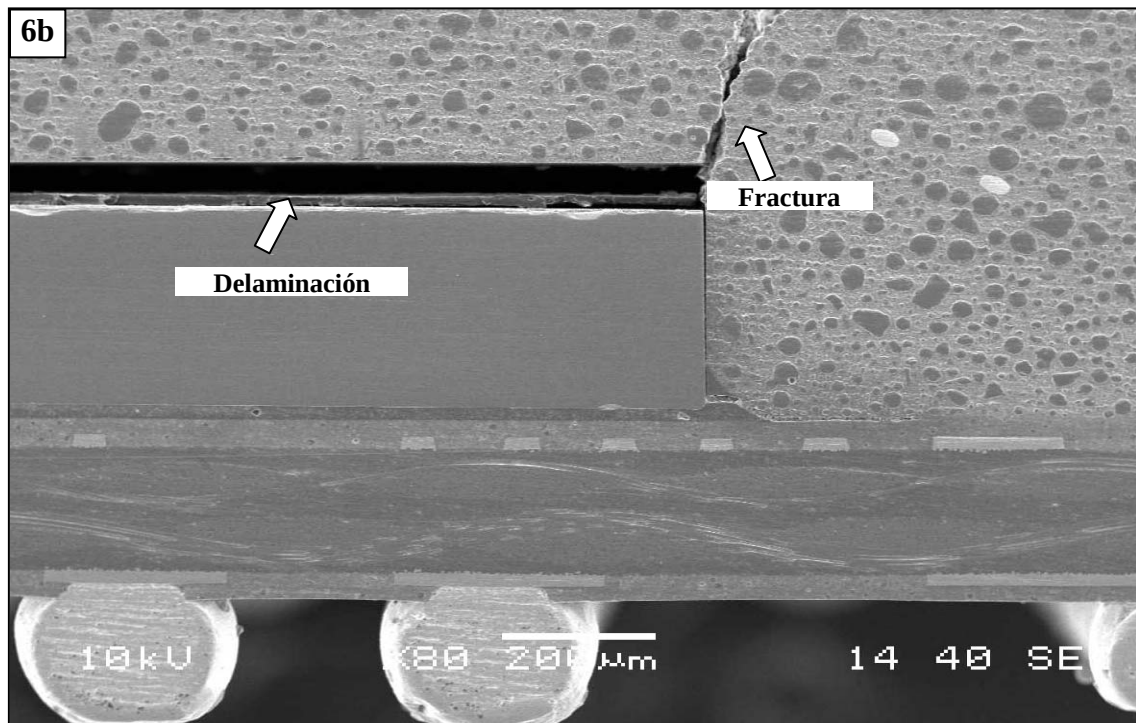
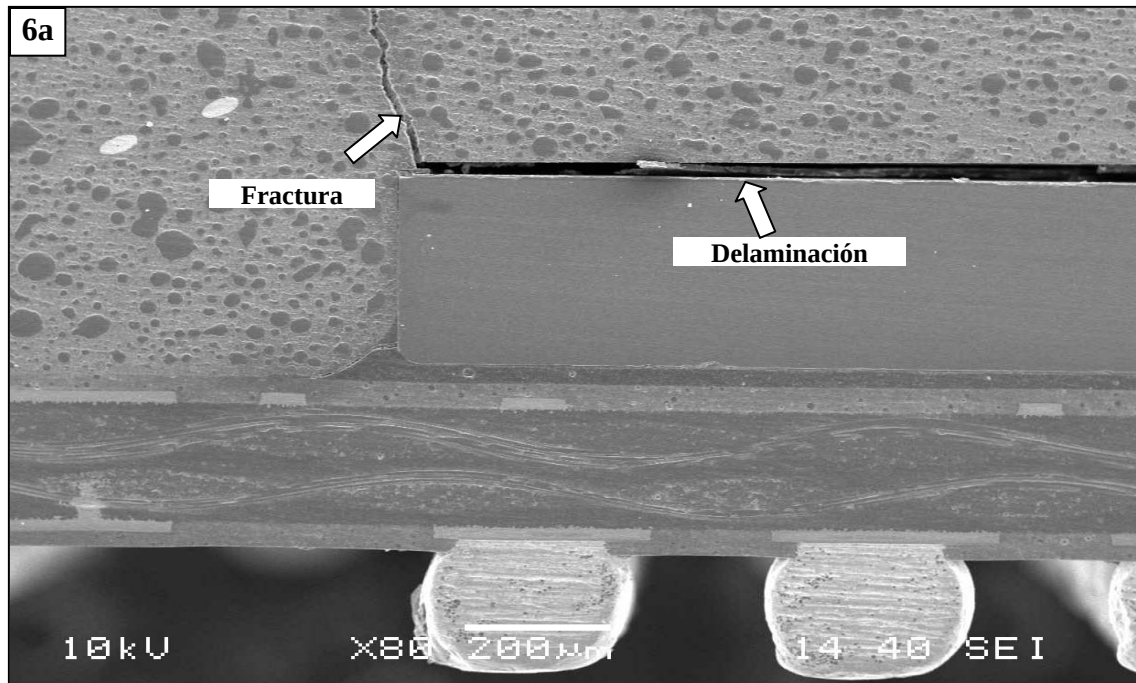


Imágenes SEM del corte transversal

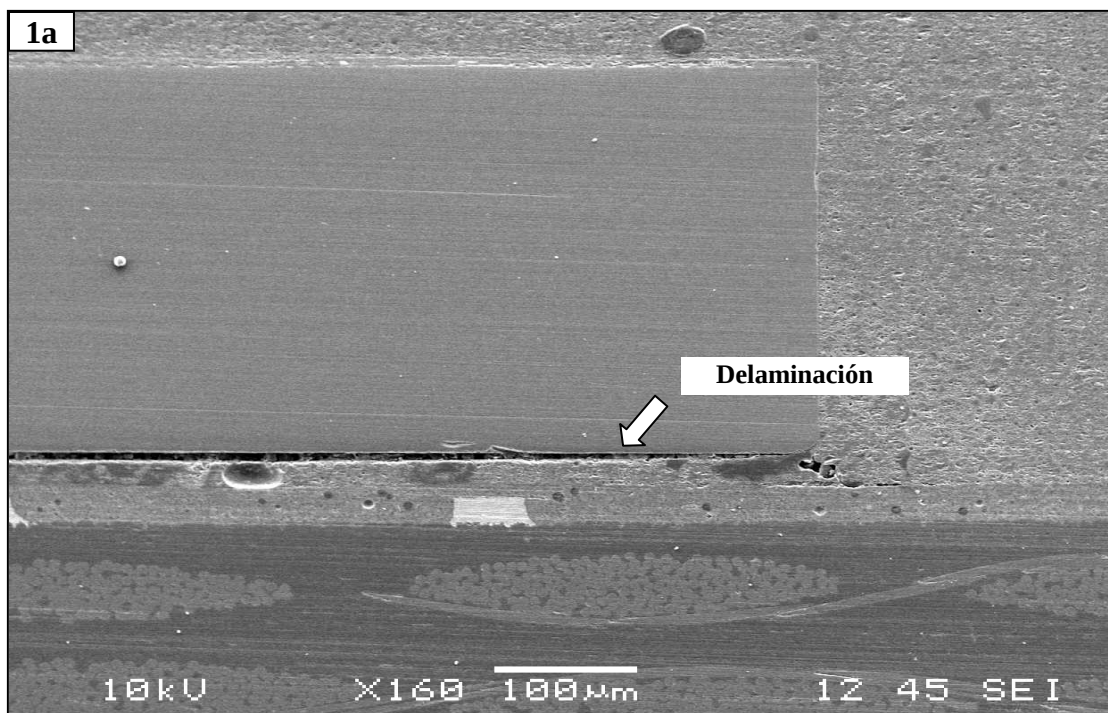
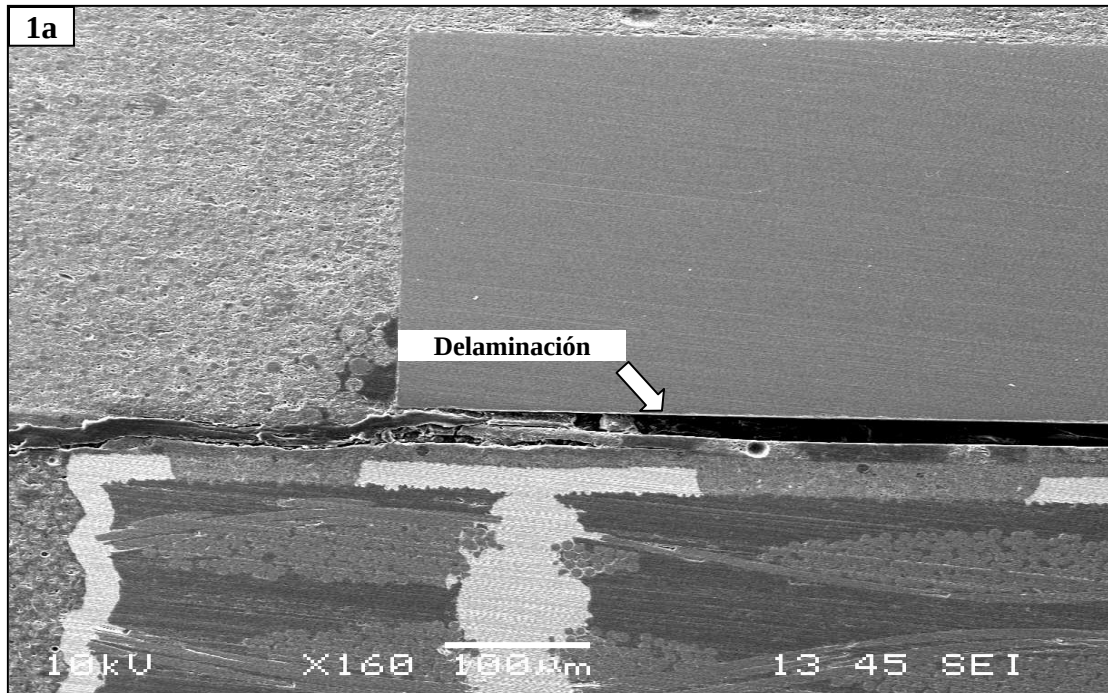
Las piezas 2 y 6 de las fallas eléctricas que presentaron delaminación se sometieron a corte transversal. Las siguientes imágenes corresponden a la pieza número 2, la cual presentó separación en la interfase entre el dado y el tablero de circuito impreso. Se pueden observar los dos extremos del dado.



La pieza número 6 además de presentar delaminación en la interfase entre el dado y el plástico encapsulante, también presentó unas fracturas que se extienden hasta el exterior del paquete siendo este un caso de *popcorn*.



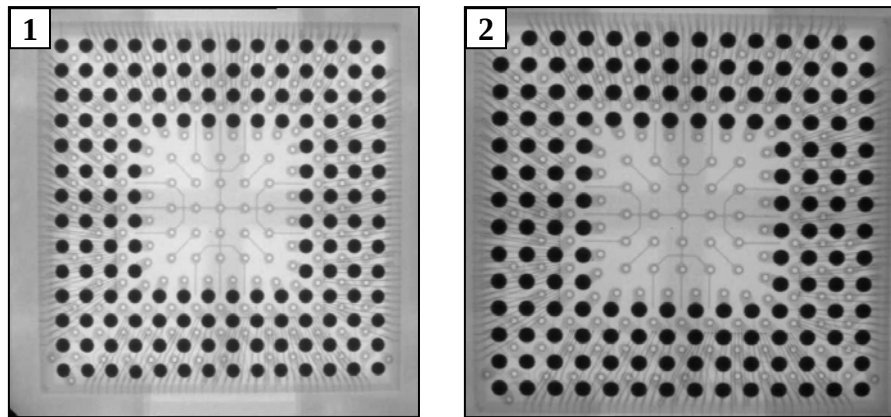
De las dos piezas que pasaron la prueba eléctrica y que presentaron delaminación se realizó corte transversal a la número 1. La separación se puede observar entre el dado y el tablero de circuito impreso.



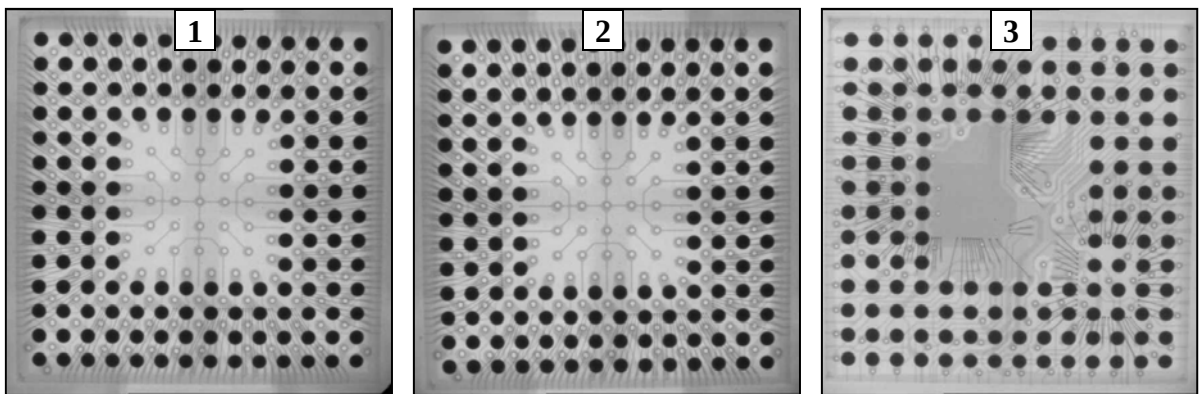
⇒ **Muestra M2a-2 (12x12).** Esta muestra se evaluó en el nivel MSL2 y a una temperatura pico de 260°C en el horno de reflujo. Al final de la evaluación se obtuvieron dos fallas eléctricas y diez piezas buenas con presencia de delaminación. De las diez piezas, tres presentaron separación en toda la superficie del dado y siete presentaron delaminación en las esquinas del dado. No se observaron anomalías de ensamble en el análisis de rayos-X.

Análisis de rayos-X

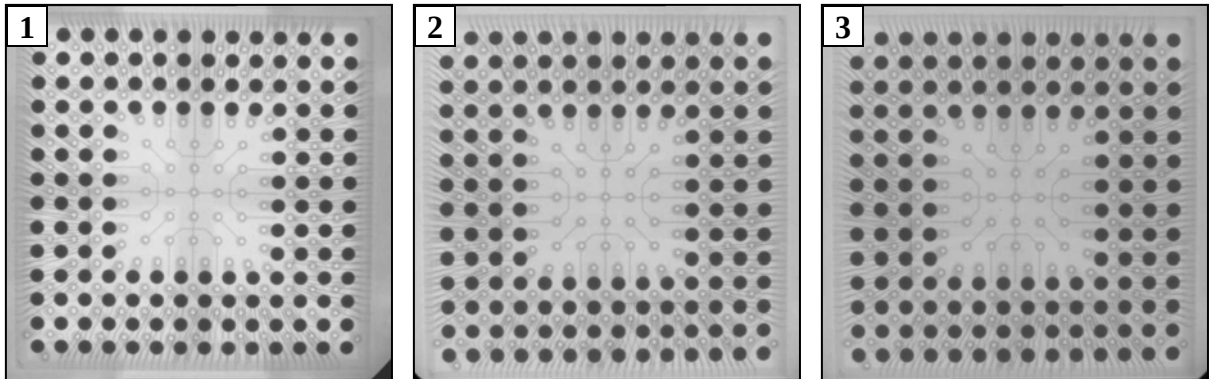
Estas son las imágenes de rayos-X de las piezas que fallaron la prueba eléctrica y que presentaron delaminación.



Estas son las imágenes de rayos-X de las tres piezas que pasaron satisfactoriamente la prueba eléctrica y que presentaron delaminación en toda el área del dado.

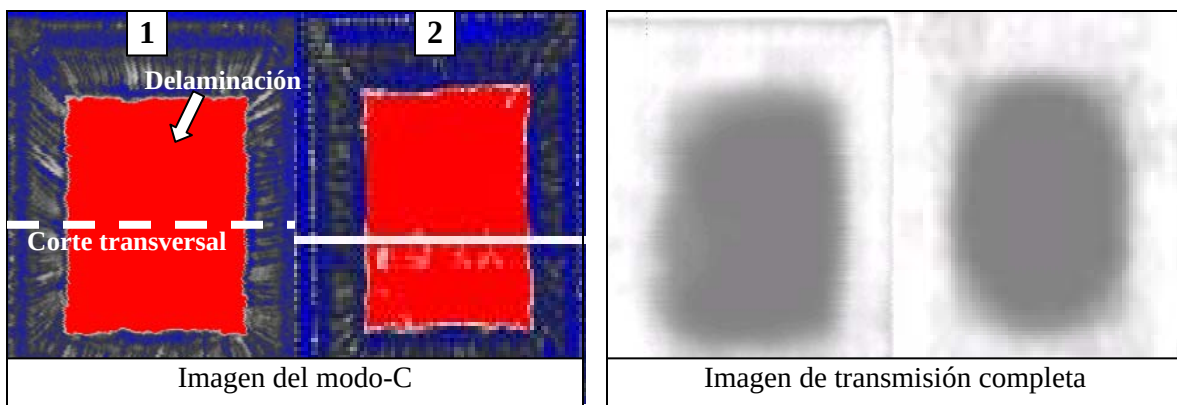


Estas son imágenes de rayos-X de tres piezas representativas de las siete que pasaron la prueba eléctrica y que presentaron delaminación en las esquinas del dado. No presentaron anomalías de ensamble, sin embargo en algunas de las esquinas afectadas por la delaminación, los alambres se observan un poco inclinados de manera que casi se interconectan algunos de ellos.

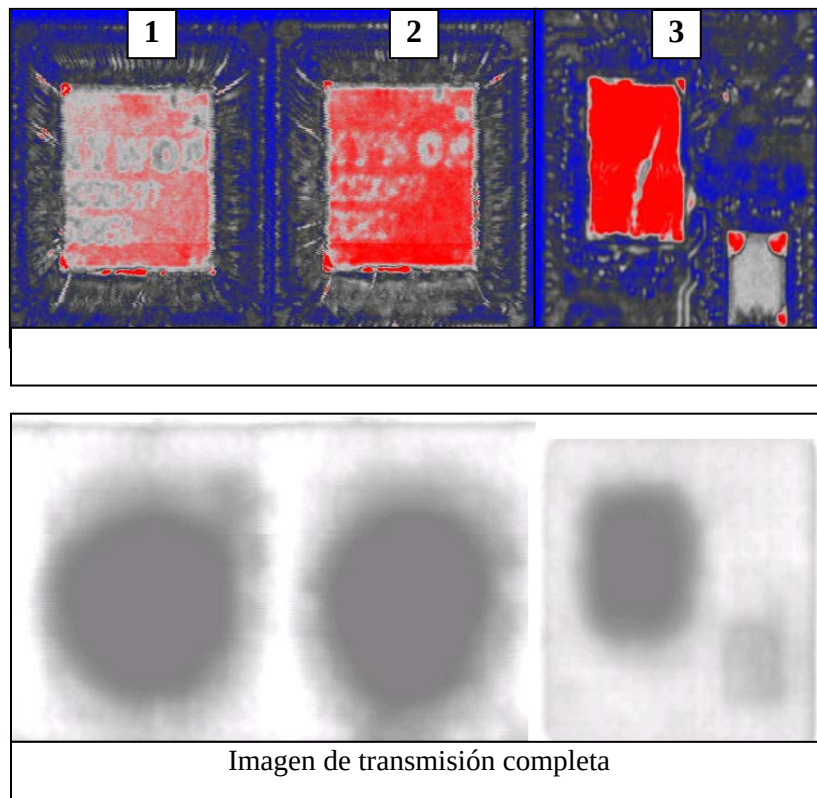


Análisis de micro imagen acústica

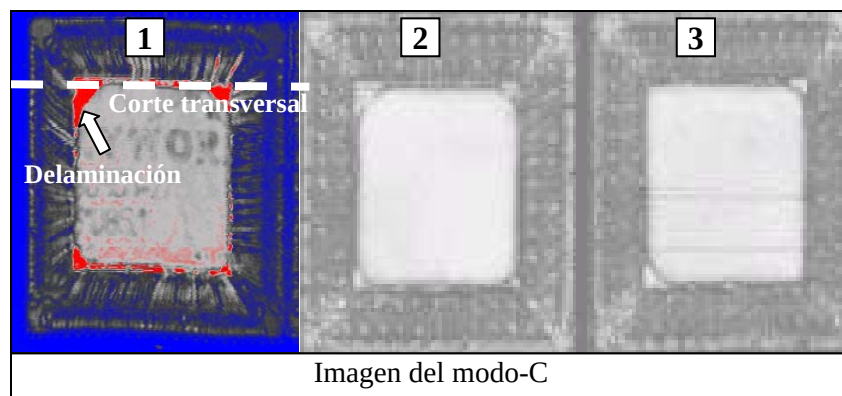
A continuación se muestran las imágenes del análisis de micro imagen acústica de las dos piezas que fallaron eléctricamente y que presentaron delaminación. La pieza número 1 se sometió a corte transversal y a la pieza número 2 se le realizó el análisis de energía dispersiva de rayos-X.

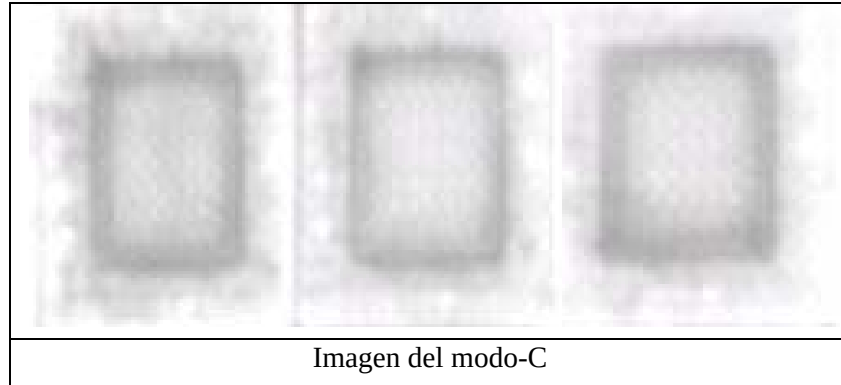


Las imágenes siguientes corresponden a las tres piezas que pasaron satisfactoriamente la prueba eléctrica y que tuvieron presencia de delaminación en toda el área del dado.



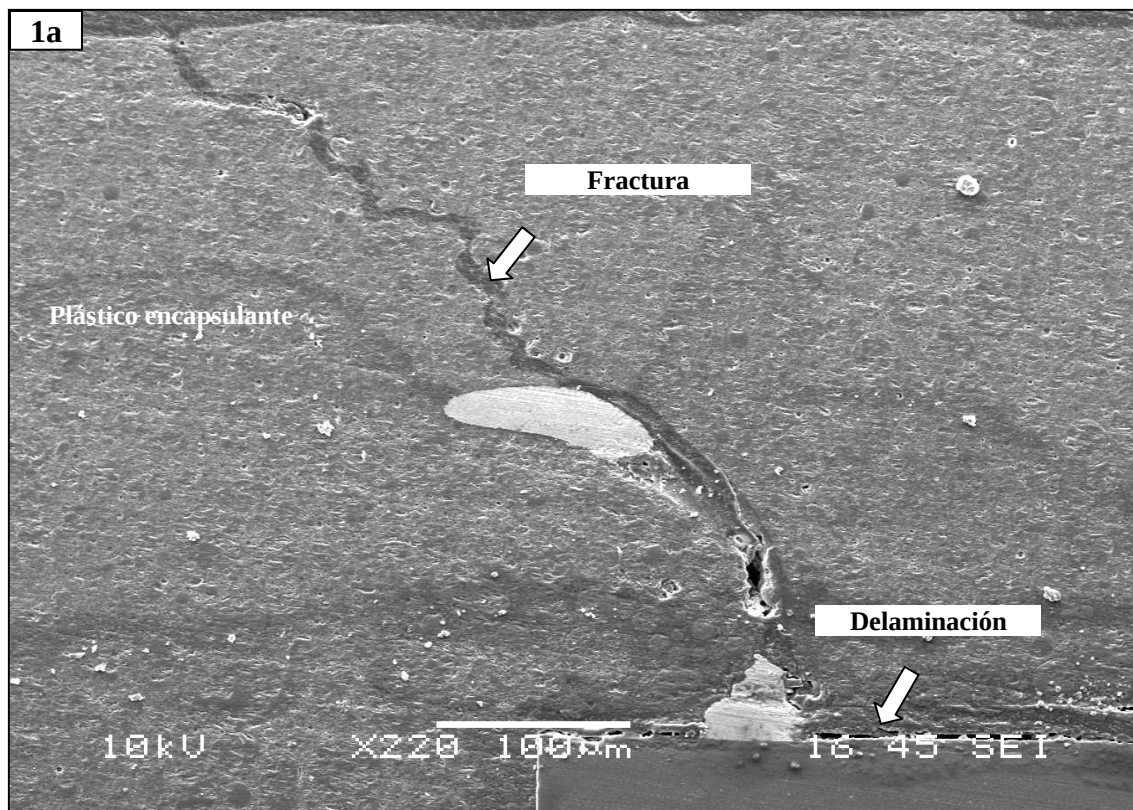
Las imágenes de las 3 piezas representativas de las siete que pasaron la prueba eléctrica y que presentaron delaminación en las esquinas del dado se muestran a continuación.

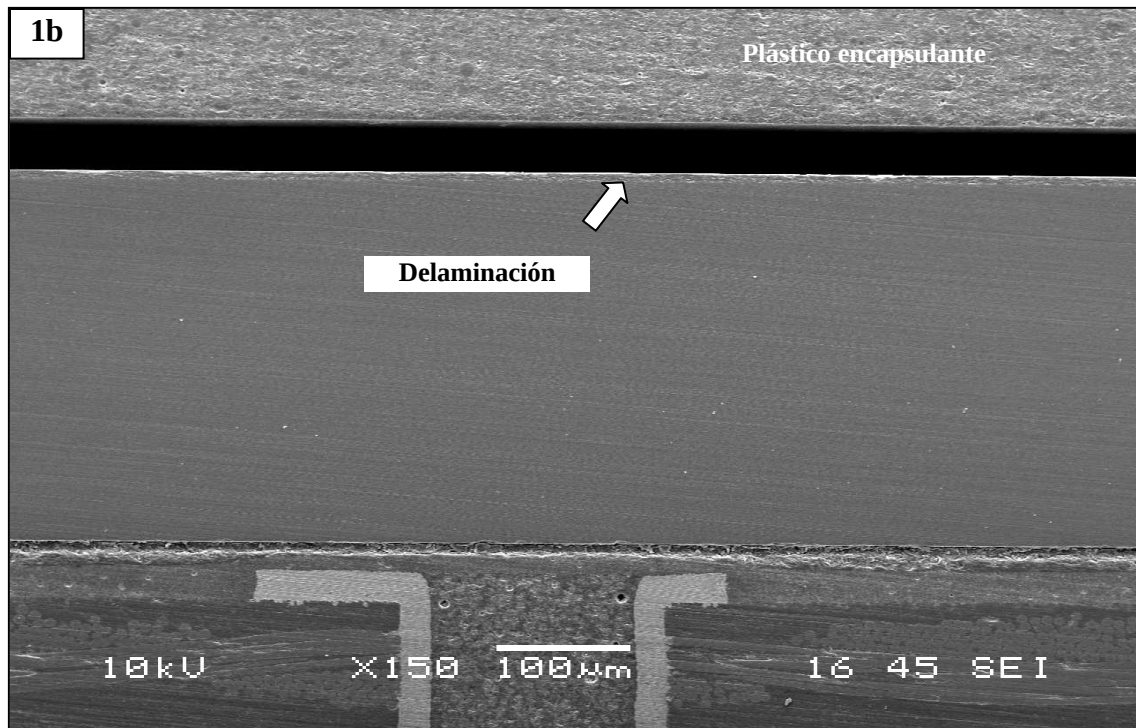




Imágenes SEM del corte transversal

La pieza número 1 con delaminación que falló la prueba eléctrica, presentó fracturas que se extendieron hasta la superficie del paquete. Este comportamiento es lo que caracteriza al efecto *popcorn*.





La pieza número 1 que pasó la prueba eléctrica y que presentó delaminación en las esquinas del dado, además presenta una fractura que afecta la conexión de los alambres de oro.

