

# **INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE**

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018,  
publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1976.

---

Departamento de Electrónica, Sistemas e Informática

MAESTRÍA EN DISEÑO ELECTRÓNICO



## **ESTUDIO DEL MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LA SOLDADURA DE UN LED DE ALTA POTENCIA**

Trabajo recepcional que para obtener el grado de

MAESTRO EN DISEÑO ELECTRÓNICO

Presenta: Ing. Héctor René Marín Hernández

Asesor: Dr. Luis Rizo Domínguez

San Pedro Tlaquepaque, Jalisco. septiembre de 2018.

## Contenido

|  |    |
|--|----|
| Resumen.....   | 3  |
| Introducción.....  | 4  |
| Descripción de la falla .....  | 4  |
| Metodología para el desarrollo de hipótesis de la falla.....         | 7  |
| 1. Definición del problema.....                                      | 8  |
| 2. Diagrama de Ishikawa .....  | 9  |
| 3. Mapa de procesos .....  | 11 |
| Análisis y pruebas de hipótesis .....                                | 14 |
| Hipótesis 1 LED no conforme .....                                    | 14 |
| Hipótesis 2 La unión de soldadura no cumple con IPC.....             | 16 |
| Hipótesis 3 Perfil de horno inadecuado .....                         | 24 |
| Hipótesis 4 Resistencia mecánica débil de la unión de soldadura..... | 26 |
| Experimentación .....  | 29 |
| Validación de mejora propuesta.....                                  | 33 |
| Conclusiones.....  | 35 |
| Bibliography .....   | 36 |

## Resumen

El presente documento trata del estudio del desprendimiento de un LED de alta potencia utilizado en la industria automotriz que se origina por la falla en un proceso de manufactura del PCB, el nivel de defectivo reportado por la planta armadora de autos fue del orden de 65000 partes por millón. Para encontrar la causa raíz del problema se plantean metodologías y técnicas de análisis que abordan problemas serios de confiabilidad. Normalmente este tipo de fallas se estudia por medio de técnicas de corte seccional que se evalúan en microscopio óptico, a diferencia de los métodos tradicionales, en este documento se aborda el uso de un microscopio electrónico de barrido para caracterizar la unión inter-metálica entre el dispositivo LED y el PCB que es del orden de 1 micra; es de notar que en esta investigación se obtienen resultados diferentes a los métodos tradicionales.

El problema se abordó siguiendo la metodología DMAIC, utilizando diagramas de Ishikawa y mapeo de procesos de manufactura, en seguida se formularon hipótesis sobre las causas que propiciaron el desprendimiento de los LEDs y que posteriormente fueron evaluadas con pruebas de esfuerzo cortante apoyándose en ensayos analíticos realizados en SEM y EDX.

Al concluir la fase de análisis se confirmó que la unión inter-metálica entre el LED y la soldadura era muy pequeña lo que resultaba en una resistencia mecánica débil. Finalmente, se planteó la forma de robustecer la unión inter-metálica utilizando la técnica estadística de diseño de experimentos DoE donde se encontró que las mejores condiciones de proceso fueron el utilizar pasta de soldadura Hereaus, pico de temperatura 245 °C, TAL 70 seg, estencil de 6 milésimas y atmosfera de nitrógeno.

Para validar la mejora se desarrolló un estudio estadístico de Cpk, que es un indicador de la capacidad que tiene un proceso para producir un resultado dentro de los límites de especificación predefinidos.

Por medio de la prueba de esfuerzo cortante se evaluó un grupo de 30 tarjetas PCB para determinar la resistencia mecánica de la unión de soldadura. Después de la implementación de los cambios en el proceso, el estudio arrojó un resultado de Cpk de aproximadamente 6 que es muy superior al nivel mínimo aceptable por la industria de 1.67.

## Introducción

El desarrollo de los dispositivos LED de alta potencia (Diodo Emisor de Luz) en los últimos años ha resultado en una gama de nuevas aplicaciones desde su utilización en la iluminación para hogares hasta el uso en la industria automotriz, esto se debe a una mayor eficiencia en el consumo de energía con respecto a otras fuentes de iluminación, así como a su robustez mecánica y larga vida de operación. Sin embargo, para lograr garantizar estos beneficios a los usuarios finales es necesario seguir procesos de manufactura muy estrictos, así como una selección adecuada de materiales; alguna omisión o falla en el proceso de manufactura podría resultar en un producto de baja calidad o con fallas prematuras.

El presente estudio documenta el proceso que se llevó a cabo para identificar el modo de falla en una luz trasera lateral en un automóvil que utiliza luz LED de alta potencia, las etapas que se realizaron para determinar el mecanismo de falla del dispositivo (causa raíz) así como las acciones correctivas implementadas para garantizar la calidad del producto.

## Descripción de la falla

En esta sección se describirá el proceso lógico para encontrar la falla y determinar su diagnóstico. Durante el proceso de verificación de calidad de los automóviles en la planta armadora se identificaron 38 unidades de las cuales al menos una de sus luces trasera lateral no encendía, por lo que no cumplía con los requerimientos de funcionalidad y calidad. Estos automóviles se pusieron en resguardo y se emitió la alerta de calidad al proveedor de las luces traseras para iniciar el proceso de investigación de la causa de la falla.

En la figura 1, se muestra un dispositivo sin falla dado que la luz trasera enciende (ver círculo verde); sin embargo, la figura 2 presenta una unidad con falla porque la luz lateral no enciende cuando es energizada como se puede observar en la imagen (ver círculo rojo).



Figura 1. Luz trasera sin falla



Figura 2. Luz trasera con falla

Una revisión realizada por el personal de la planta armadora reveló que la tarjeta PCB de la luz trasera le faltaba un LED como se muestra en las figuras 3 y 4, la ubicación donde debería estar este dispositivo se indica con una flecha roja en las imágenes. Este tipo de tarjetas llevan dos dispositivos LED conectados en serie lo que explica porque, aunque había solamente un LED montado en la tarjeta, este no pudo encender.



Figura 3. PCB con LED faltante

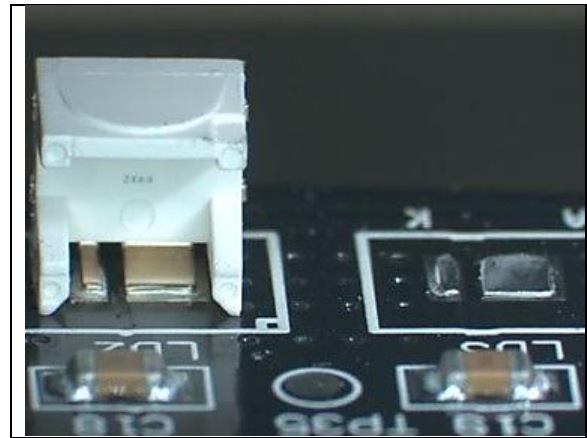


Figura 4. PCB sin LED vista posterior

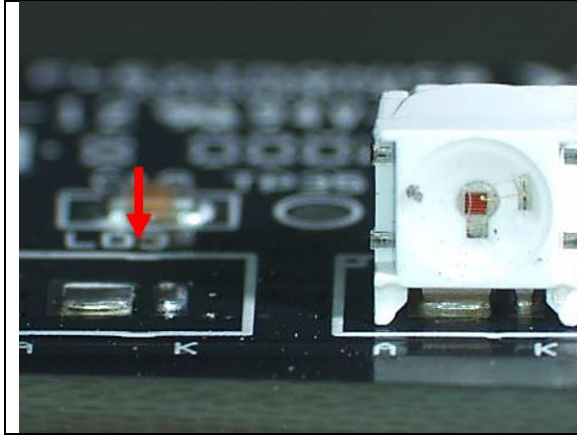


Figura 5. PCB sin LED vista frontal

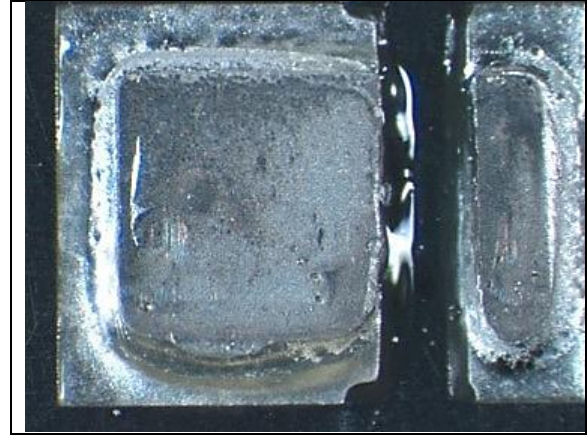


Figura 6. Posición de soldado del LED

También, durante la inspección se descubrió que en la posición donde debería de estar el dispositivo LED se había depositado soldadura como se muestra en la figura 5, por otro lado, cuando se revisaron el resto de las 37 luces traseras que no encendían se encontró el mismo mecanismo de falla. Además, se pudo observar un dispositivo LED faltante que por algún motivo se había desprendido de la tarjeta ya que estas presentaban residuos de soldadura y había rastros de que el LED si se había colocado en esa posición, esta condición se puede observar en la figura 6.

## Metodología para el desarrollo de hipótesis de la falla

Es de notar que el diagnóstico se abordó por un equipo internacional multidisciplinario conformado por integrantes de la planta armadora, el proveedor de las luces traseras y la compañía ensambladora de las tarjetas electrónicas. Este equipo seleccionó seguir la metodología DMAIC (por sus siglas en inglés) que significa Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (Montgomery, 2012) para identificar la causa raíz del problema. En esta sección se presentan las etapas que siguió el equipo para encontrar la causa raíz del problema.

### **1. Definición del problema**

Por medio del uso de la herramienta 5W + 2H se facilita definir el problema de una forma más objetiva y clara para así buscar la causa y la solución del problema

### **2. Diagrama de Ishikawa**

Es una herramienta grafica que se utiliza para organizar las causas potenciales que pudieron originar las fallas

### **3. Mapa de procesos**

Por medio de una representación gráfica de la secuencia de los procesos se localizan los puntos más críticos que pudieron propiciar las fallas y los controles que se tienen para detectar estas anomalías

## 1. Definición del problema

Para la definición del problema se utilizó la técnica de las 5W + 2H (Action Group, 2018), esta es una herramienta utilizada para la solución de problemas. Su desarrollo permite definir cuál es el problema y no la solución, con lo que se privilegia el enfoque sobre las causas.

La técnica consiste en hacer las preguntas ¿Qué?, ¿Dónde?, ¿Quién?, ¿Cuándo?, ¿Por qué?, ¿Cómo?, ¿Cuántos? con referencia al problema, las preguntas que componen esta técnica 5 inician con W y 2 con H en el idioma Ingles, está es la razón por la cual se le llama así. Una vez que se tiene la información, el grupo de trabajo que está abordando el asunto tiene una visión más clara y una dimensión más exacta de la magnitud del problema acotada en el tiempo.

| 5W2H               | Respuestas   |
|--------------------|--|
| What / Que         | Se encontraron luces traseras inoperantes en algunos automóviles   |
| Where / Donde      | En la planta armadora de automóviles   |
| Who / Quien        | El cliente   |
| When / Cuando      | Del 5/24/16 al 5/30/16   |
| Why / Por qué?     | Porque faltaba al menos uno de los dos LEDs que lleva el PCB   |
| How / Como         | Se detectó de forma visual durante la prueba del vehículo y las luces defectuosas indican que el LED se desprendió del PCB |
| How many / Cuantos | 38 luces traseras se encontraron defectuosas, se esperan 65000 ppms  |

Tabla 1. Técnica de las 5W+2H aplicada al problema

Con la aplicación de esta Herramienta el equipo infirió los siguientes axiomas

- Es un problema crítico porque, aunque solo se identificaron 38 fallas, se espera un defectivo de 65000 ppms.
- El número de luces defectuosas están limitadas en una ventana de tiempo muy bien definida.
- Los defectos no fueron detectados por el proceso de prueba eléctrica en la planta de ensamble del PCB.
- El equipo se debe de enfocar en encontrar las causas que propiciaron el desprendimiento del dispositivo LED de la tarjeta PCB.



## 2. Diagrama de Ishikawa

El diagrama de Ishikawa o también conocido como diagrama de causa efecto (Escalante, 2009) es una herramienta grafica que se utiliza para estructurar y clasificar los factores potenciales o causas que pudieran contribuir a generar el efecto o problema que se quiere estudiar. Las causas se clasificaron en 6 categorías que se consideran las más apropiadas al problema que son máquina, mano de obra, material, método, medio ambiente y medición siendo las más comunes en muchos procesos.

En este caso el equipo quiere identificar que causas pueden generar el desprendimiento del dispositivo LED del PCB (circuito impreso) y por medio de una tormenta de ideas el grupo de trabajo identificó los factores mostrados en el diagrama de la figura 7.

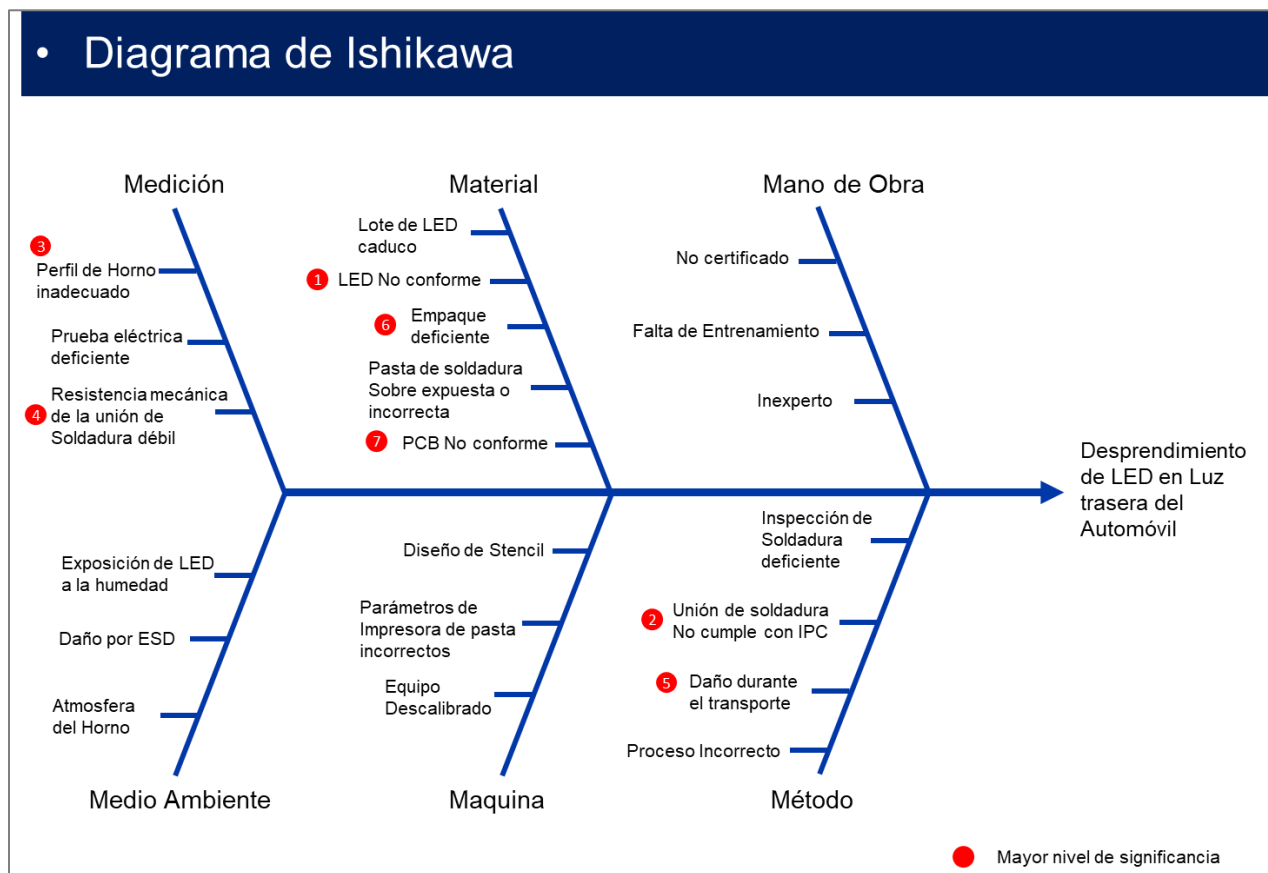


Figura 7. El Diagrama de Ishikawa muestra los factores más significativos.

Posteriormente el equipo basado en su experiencia seleccionó aquellos factores con el mayor nivel de significancia (círculo rojo) con el objetivo de hacer una evaluación más detallada y determinar de una forma analítica su relación con el problema.

Las hipótesis más importantes identificadas fueron las siguientes:

1. LED no conforme
2. La unión de soldadura no cumple con IPC (Instituto para Circuitos Impresos) por sus siglas en inglés
3. Perfil de horno inadecuado
4. Resistencia mecánica débil de la unión de soldadura
5. Daño durante el transporte
6. Empaque deficiente
7. PCB no conforme

### 3. Mapa de procesos

El siguiente paso para el análisis de las luces defectuosas fue ubicar los factores significativos identificados con el diagrama de Ishikawa dentro del proceso de fabricación del producto (círculos rojos). Para ello se desarrolló un mapa de procesos (George, 2005) que consiste en una representación gráfica de la secuencia de etapas y operaciones que ocurren durante la fabricación del PCB. Su importancia radica en la simplificación de un análisis preliminar de las operaciones que tienen lugar al estudiar características de calidad. Esta representación se efectúa a través de formas y símbolos gráficos usualmente estandarizados y de conocimiento general.

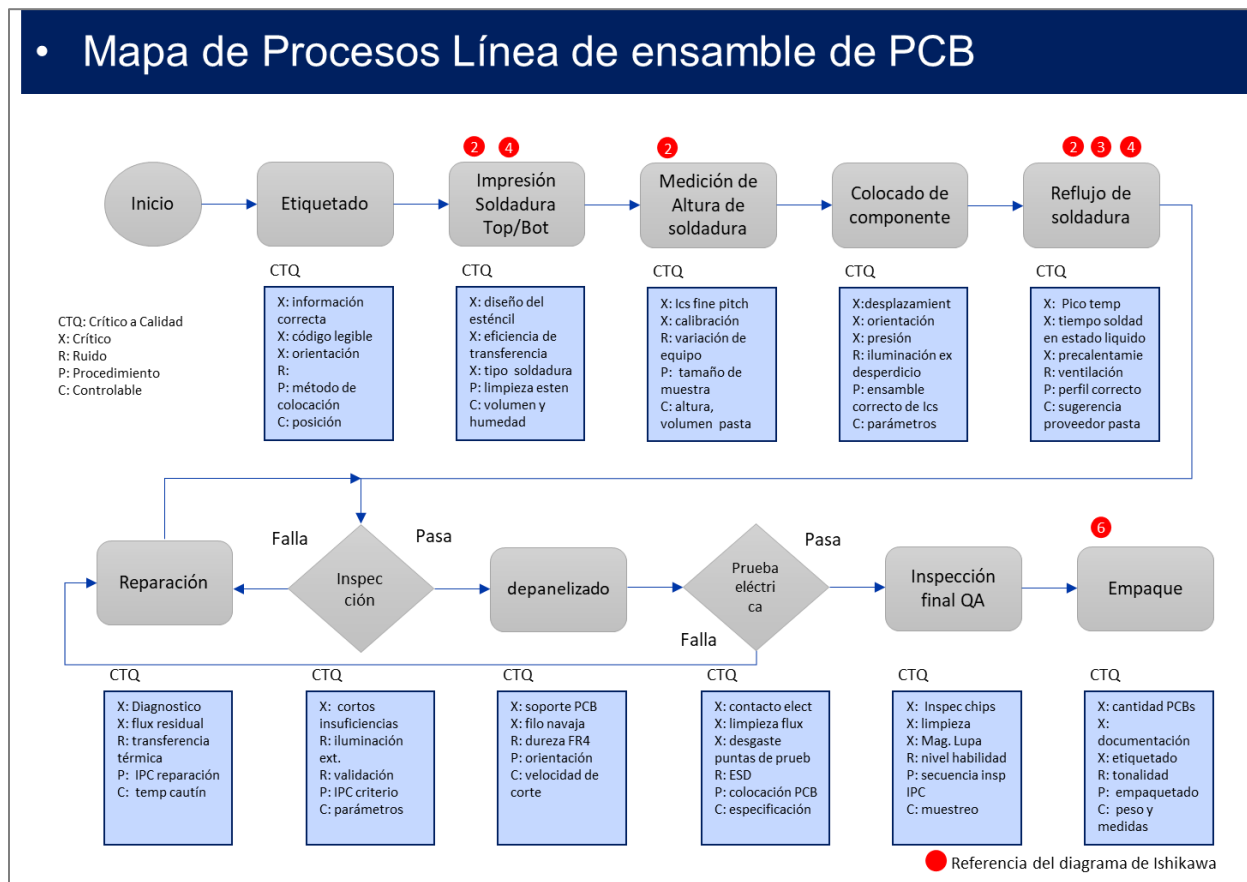


Figura 8. Mapa de procesos para la fabricación del PCB

En las figuras 8 y 9 se señala por medio de un pequeño círculo rojo los procesos que pueden generar las causas identificadas en el diagrama de Ishikawa y proporciona una ruta para el desarrollo de los análisis y pruebas de laboratorio.

En cada proceso se listan los elementos CTQs (Críticos para Calidad) por sus siglas en inglés y que se clasifican en las siguientes categorías:

X: Crítico que es una característica de calidad definida por el cliente

R: Ruido generalmente son variables involucradas en el proceso pero que no son controladas como la humedad

P: Procedimiento es el método como se debe de llevar a cabo el proceso

C: Controlable son todas aquellas variables del proceso que se pueden controlar para lograr el efecto esperado

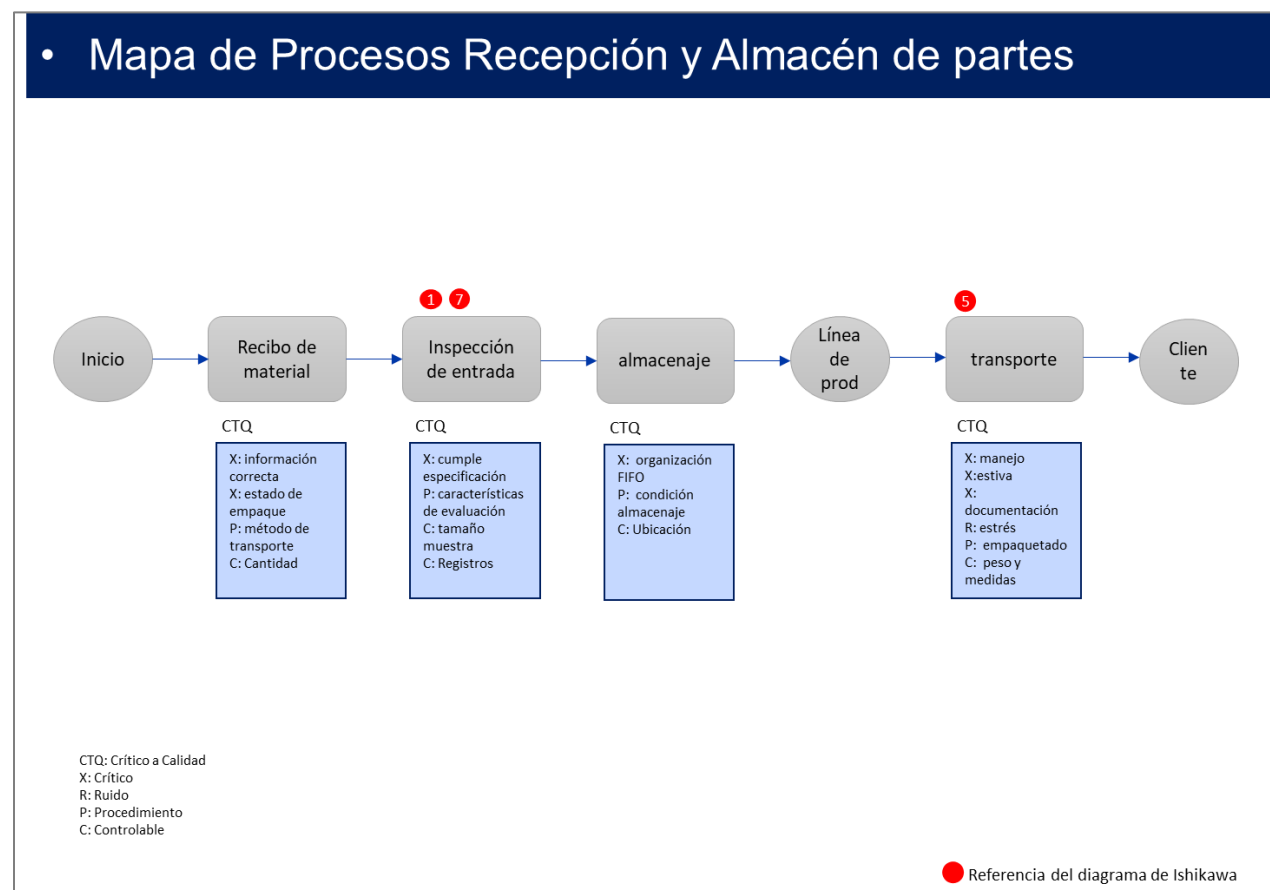


Figura 9. Mapa de procesos para la recepción y almacén de partes

De la aplicación de esta herramienta se desprenden las siguientes observaciones:

- El proceso de impresión de pasta de soldadura puede influir en la resistencia mecánica de la soldadura, así como en su característica de aceptabilidad si no se deposita la cantidad correcta de pasta.

- El proceso de reflujo de la soldadura en el horno también influye en la resistencia mecánica, si el perfil de temperatura no es el correcto la soldadura puede quedar con grumos y grietas.
- El proceso de inspección de entradas debe de garantizar que el dispositivo LED y el PCB tienen la condición de calidad especificada por el cliente, Si el LED o la PCB están contaminados pueden producir una soldadura débil.
- Los procesos de empaque y transporte pueden contribuir a precipitar el defecto si el empaque final del producto no reúne las características necesarias para mitigar el estrés mecánico a que se ven sometidas las tarjetas durante el transporte.

## Análisis y pruebas de hipótesis

En esta sección se desarrolla una evaluación experimental de cada una de las hipótesis o causas identificadas en el diagrama de Ishikawa con el objetivo de conocer su relación con el modo de falla del producto. La evaluación se lleva a cabo en un Laboratorio con el equipamiento adecuado para obtener la mayor información posible con respecto al mecanismo de falla y así aportar elementos que guíen en la implementación de acciones correctivas. Cabe mencionar que se inicia la exploración de las hipótesis aleatoriamente y en caso de encontrar la causa por cuestiones de recursos no se continuara con el estudio del resto de las hipótesis.

### Hipótesis 1 LED no conforme

Se seleccionaron muestras nuevas de los dispositivos LED correspondiente a los lotes que fallaron en la planta automotriz con el propósito de verificar la calidad de los mismos.

Con el apoyo de microscopios ópticos tipo estereoscópico y metalográfico se inspeccionó la superficie de soldado de los dispositivos LED, el análisis reveló que las terminales están cubiertas por una película de oro que protege de la oxidación a una capa metálica que parece ser de níquel y que se encuentra por debajo, en la cual se forma la unión de soldadura. También se pudo identificar que en algunas secciones del terminal la capa de oro fue tallada o raspada como resultado del proceso del doblado que hace el proveedor de este dispositivo para preformar los terminales, este tipo de marca se puede observar en las figuras 10 a 13.

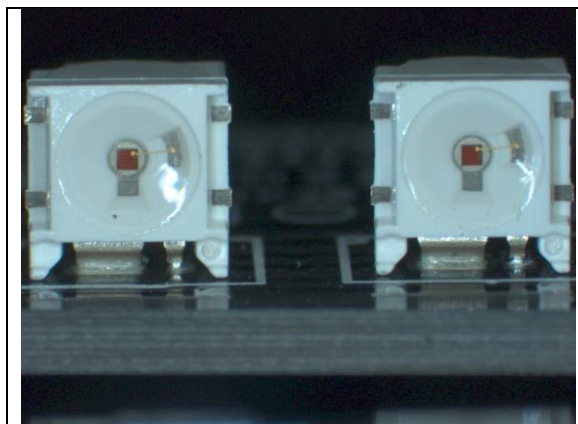


Figura 10. Vista de Frente del LED montado en el PCB.

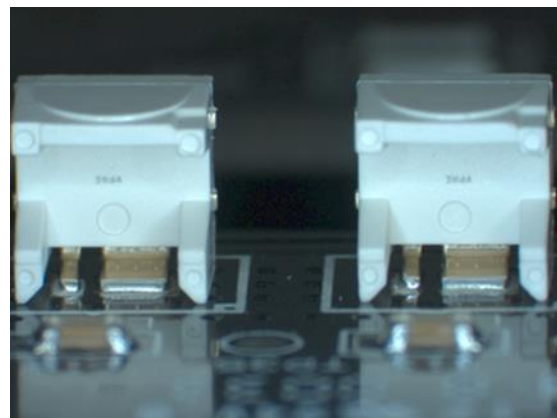


Figura 11. Vista posterior del LED montado en el PCB.

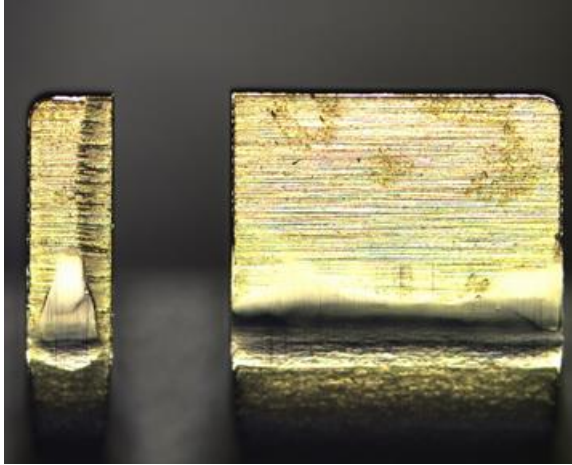


Figura 12. Terminales del LED nuevo

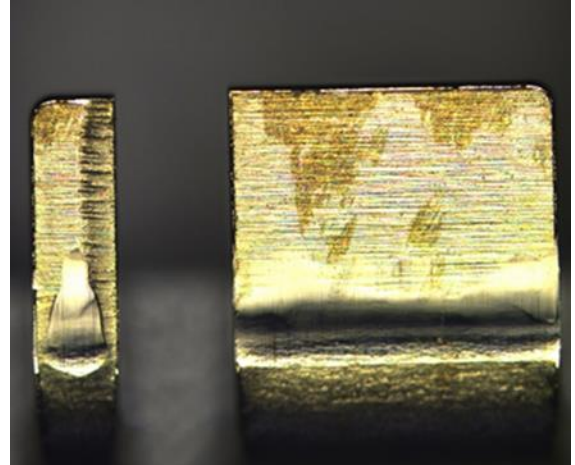


Figura 13. Terminales del LED nuevo

La inspección de componentes nuevos arrojó los siguientes resultados:

- La película protectora de oro se encuentra dañada de manera consistente en todas las unidades en el punto de dobléz de las terminales del LED
- El daño remueve parcialmente algunos segmentos de oro y expone la capa metálica que se encuentra por debajo
- Se descarta que este daño inducido por el proceso de preformado del terminal pueda tener algún impacto en la resistencia mecánica de la soldadura ya que la mayoría del área del terminal está perfectamente cubierta por la película de oro.

## Hipótesis 2 La unión de soldadura no cumple con IPC

El cliente pudo recuperar varias tarjetas PCB que presentaron la falla en campo y que posteriormente se enviaron al laboratorio para su análisis; en algunas tarjetas solo se había desprendido uno de los dos LEDs como se muestra en la figura 14; el segundo LED permanencia unido a la tarjeta por lo que era muy valioso para el estudio.

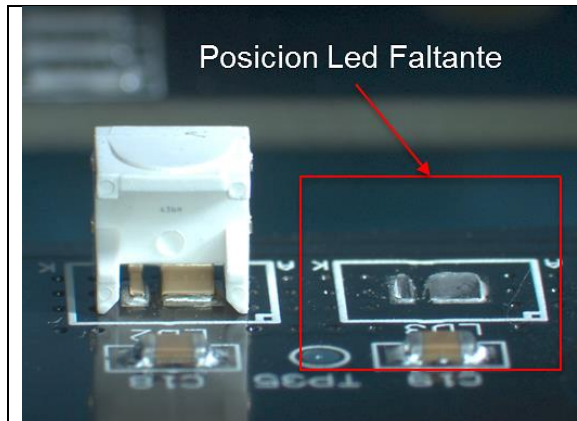


Figura 14. PCB sin uno de los LEDs

Como primer paso en el proceso de análisis, se inspeccionó con ayuda de un microscopio estereoscópico la huella de soldadura remanente en la posición donde faltaba el LED y se pudo identificar que se había depositado la cantidad de soldadura suficiente durante el proceso de fabricación de la tarjeta y que algunas de estas huellas presentaban huecos en la soldadura, figuras 15 a 18.

También se pudo deducir que el problema no era posicional pues en algunos casos el LED que se desprendía era el número 2 y en otras tarjetas era el número 3. Como los huecos en la soldadura no podían explicar el mecanismo de falla se decidió continuar el análisis con otras técnicas que permitieran generar más información sobre el problema.

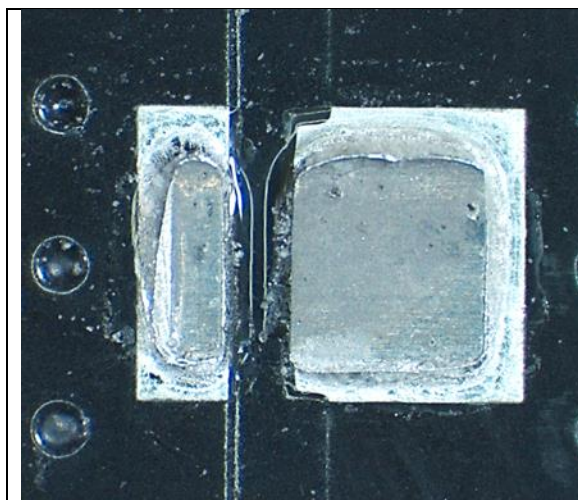


Figura 15. Huella de soldadura en PCB

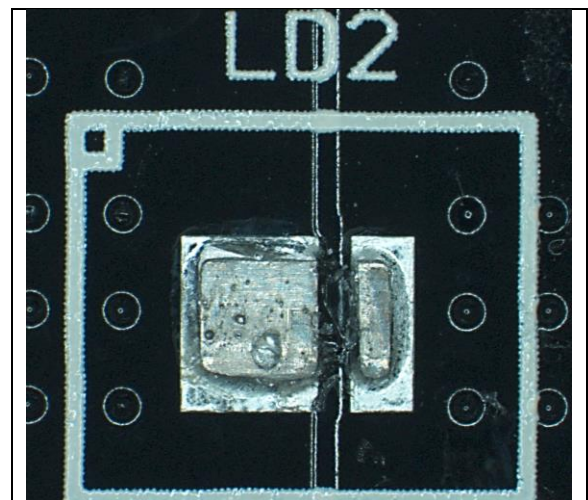


Figura 16. Huella de soldadura en PCB



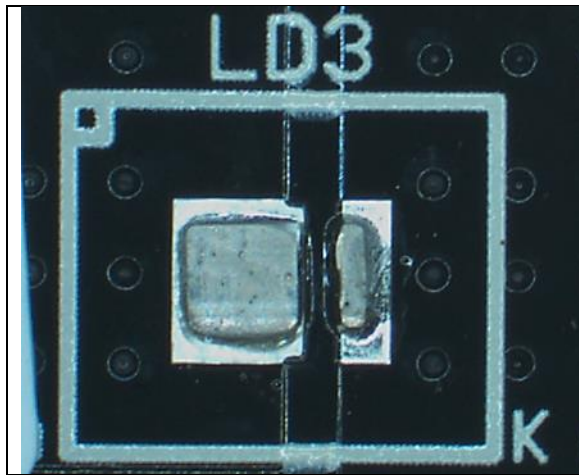


Figura 17. Huella de soldadura en PCB

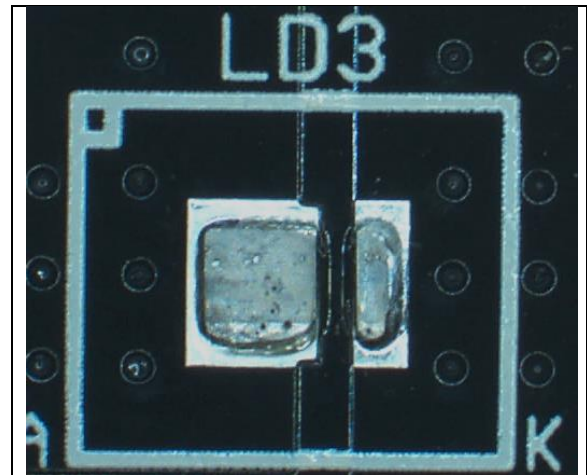


Figura 18. Huella de soldadura en PCB

En la segunda etapa del análisis, una de las tarjetas con LED faltante fue sometida a un estudio por medio de un equipo SEM (Microscopio Electrónico de Barrido) y un EDX (detector de Energía de Dispersión por rayos X) (Martin, 1999) para determinar la composición elemental de los componentes en la superficie. El estudio de composición se realizó sobre la soldadura residual en el PCB en la zona indicada en la Figura 19. La imagen tomada con el SEM a una magnificación de 50X se muestra a la izquierda y en el centro se puede ver un recuadro blanco que comprende el área considerada para el estudio de elementos; el resultado del mapeo arrojó una alta concentración de níquel, cobre y estaño, así como remanentes de carbón y oxígeno.

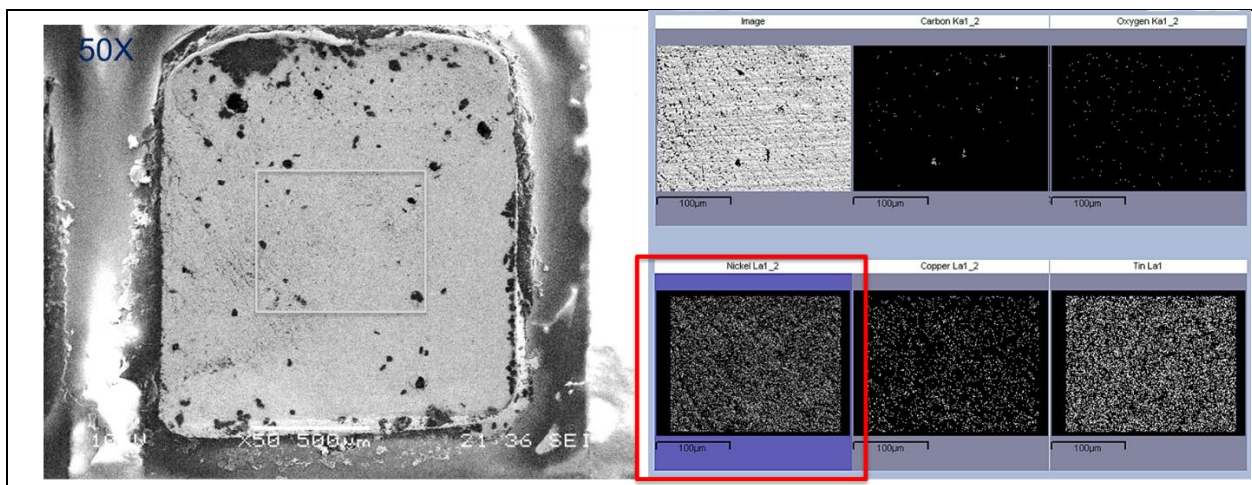


Figura 19. Imagen de SEM (Izquierda) y resultados de EDX (derecha)

El análisis superficial en otras zonas de la soldadura residual con magnificaciones de 200X y 500X continuó mostrando cantidades importantes de Níquel que van desde 9% hasta 11% como se muestra en la figura 20.

En una unión de soldadura es normal encontrar los elementos cobre y estaño sin embargo en este caso se identificó el elemento níquel y que es muy probable que sea parte de la construcción del terminal del LED.

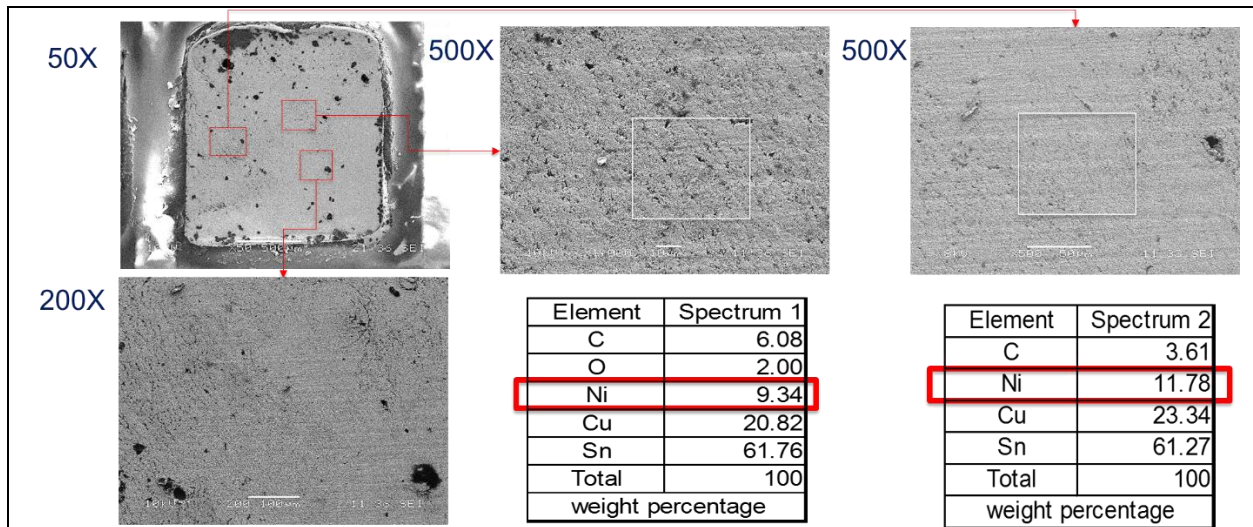


Figura 20. Resultado de EDX en tres zonas muestra contenido importante de Níquel

A continuación, se utilizó los LEDs que todavía estaban presentes en las tarjetas para hacer un corte transversal de los componentes con el propósito de estudiar la calidad de la unión de soldadura. El corte transversal es una técnica de análisis muy utilizada en la industria de ensamble de PCBs para identificar los esquemas de metalización y en el caso de la industria electrónica permite identificar qué tan robusta es la unión de los componentes a la tarjeta (Interconnected Printed Circuit, 2015).

Al finalizar la preparación de la muestra y realizar el corte transversal se pudo observar bajo microscopio óptico el inicio de una separación entre la soldadura y la terminal del componente LED justo en la sección de la rodilla, esto se muestra en la figura 21.

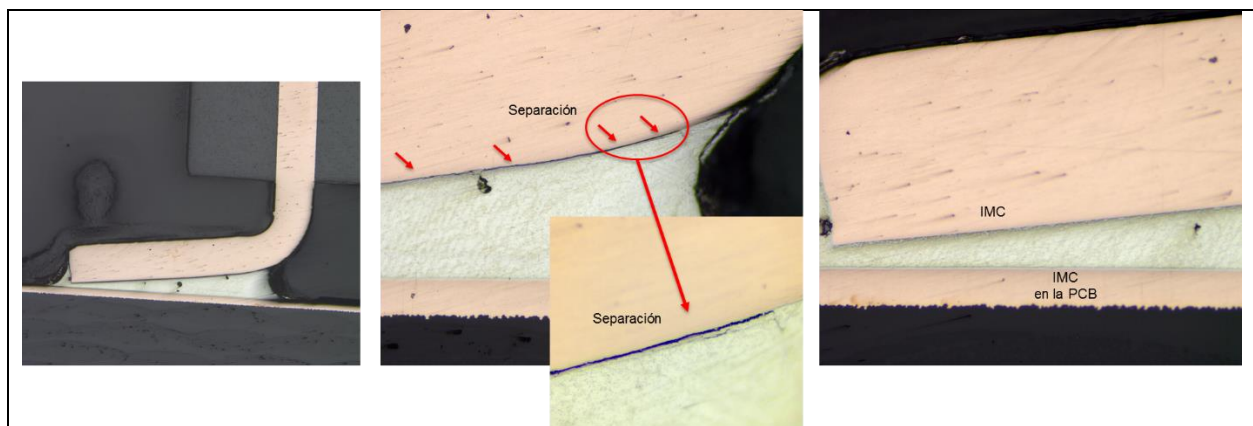


Figura 21. Corte seccional del LED montado en la tarjeta que muestra la separación

Para obtener más información con mejor nivel de detalle el equipo de trabajo decidió utilizar tres tarjetas que presentaron la falla en campo y una tarjeta de reciente fabricación para realizar el corte transversal en cada uno de los LEDs, posteriormente los cortes fueron inspeccionados por medio del SEM y del EDX.

La inspección en SEM del primer corte transversal reveló una separación entre la soldadura y el terminal del LED justo debajo de la rodilla, esta característica se puede observar en la figura 22 donde se muestra en la imagen del lado izquierdo el corte trasversal de la terminal y se indica por medio de dos círculos rojos las posiciones donde se realizó una inspección a mayor nivel de magnificación que corresponde a las imágenes de la derecha. En estas imágenes se puede observar con claridad la separación entre la soldadura y el terminal del LED.

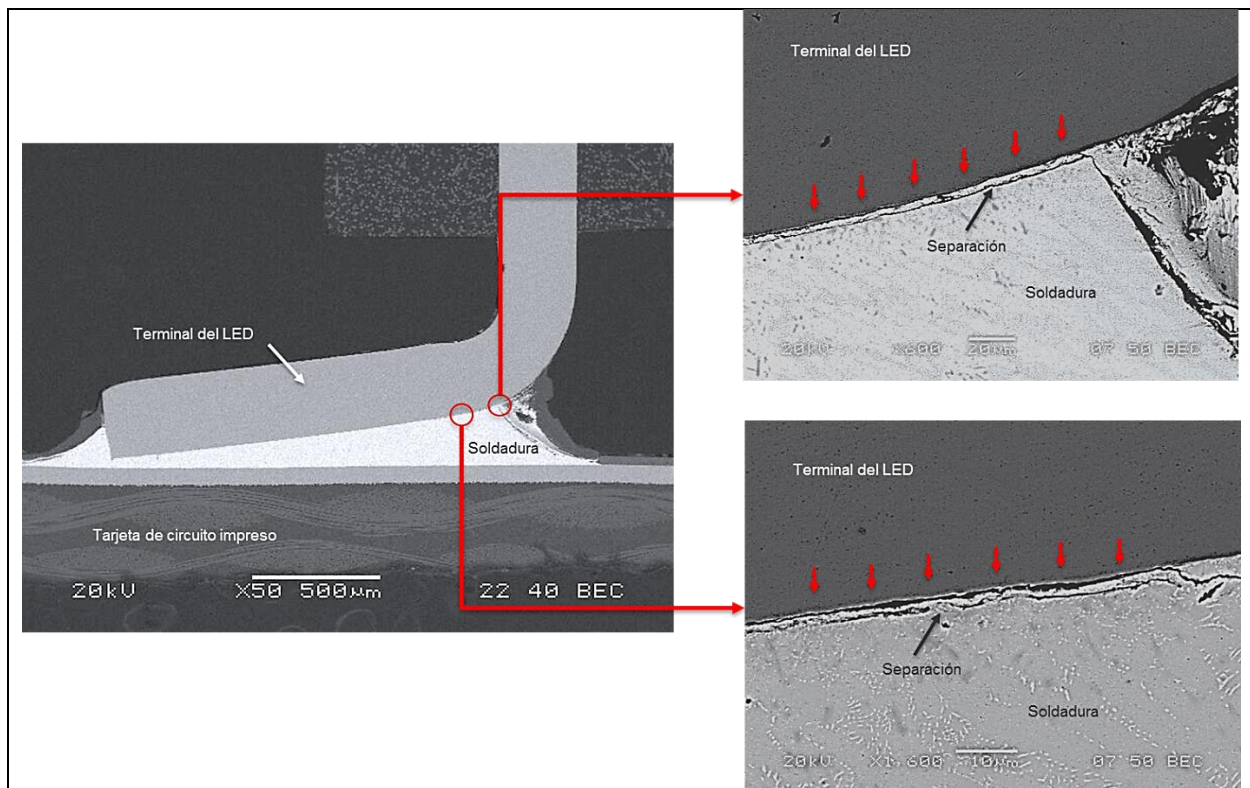


Figura 22. Corte transversal del LED de la primera tarjeta observada bajo el SEM

El segundo corte transversal realizado a otra de las tarjetas mostró características similares que la primera muestra; donde la separación se ubica entre la soldadura y la rodilla del terminal del LED en la figura 23. Como dato adicional se pudo observar en estas imágenes que no hay presencia de unión inter-metálica en la interfaz de la soldadura y el terminal del componente, sin embargo, si existe una unión inter-metálica

en la interfaz soldadura y plano de Cobre del PCB, esta unión se muestra en la imagen de la derecha tomada a 5000X.

La unión inter-metálica (Martin, 1999) o IMC por sus siglas en inglés es una capa muy delgada en el orden de  $0.5\mu\text{m}$  a  $3.0\mu\text{m}$  de espesor que presenta una estructura cristalina formada como resultado de la reacción química de la soldadura de estaño en estado líquido con el material base que en este caso es el cobre del PCB o el níquel del terminal del LED. Esta estructura mantiene unidos los componentes y proporciona la resistencia mecánica en la interfaz. En la figura 23. se pueden ver imágenes con una magnificación de 5000X de la interfaz entre la soldadura y el terminal del LED las cuales no presentan IMC, sin embargo, la imagen de la derecha corresponde a la interfaz entre la soldadura y el trazo de cobre en el PCB y se puede ver claramente esta capa de color gris perfectamente definida a todo lo largo de la unión.

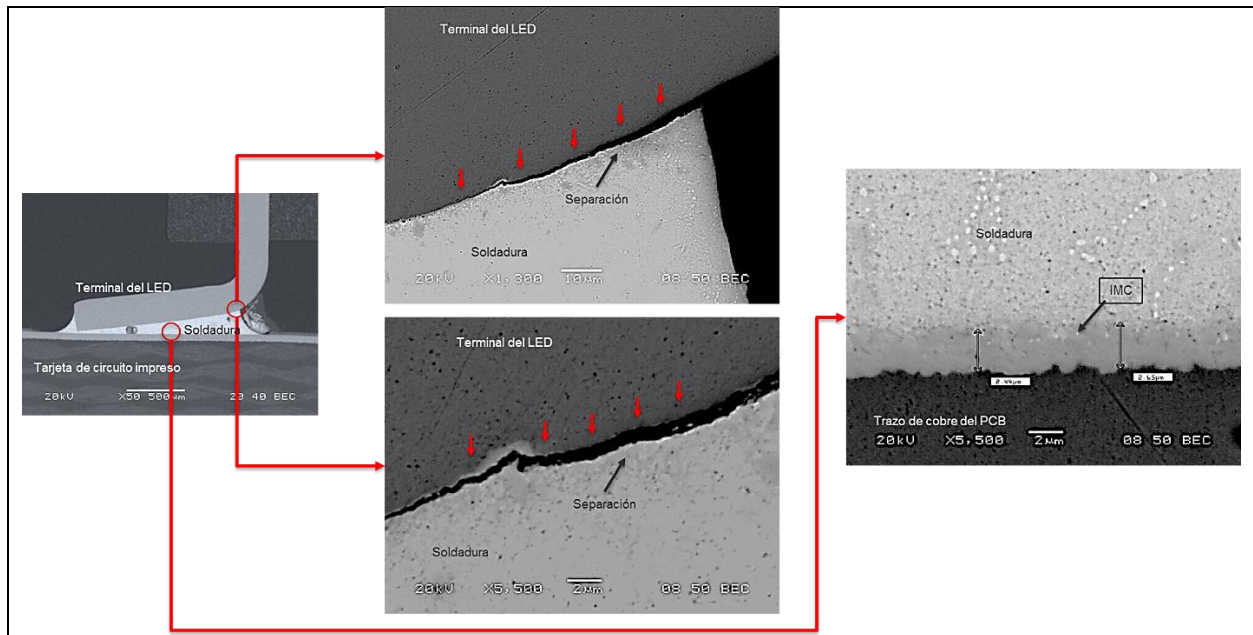


Figura 23. Corte transversal del LED en la segunda tarjeta observado bajo el SEM

El tercer corte transversal mostró información similar a los anteriores y confirma el mismo tipo de falla en donde se presenta una separación en la interfase soldadura y el terminal del LED en la posición de la rodilla, esto se muestra en la figura 24. También en la imagen se puede observar residuos de soldadura adheridos al terminal del LED y que se desprendieron del cuerpo de la soldadura.

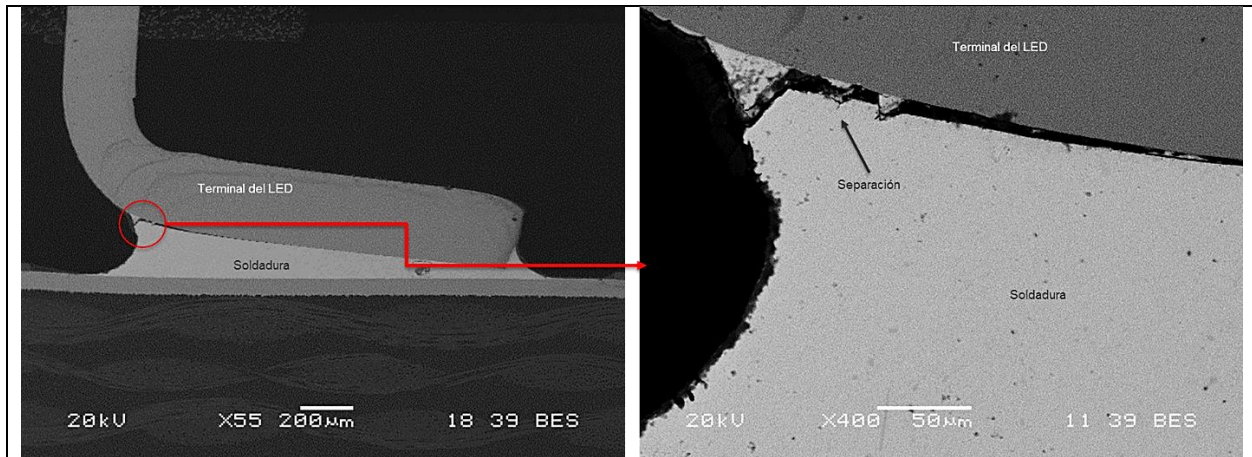


Figura 24. Corte transversal del LED en la tercera tarjeta observado bajo el SEM

El ultimo corte transversal mostrado en la figura 25, se desarrolló en una unidad de reciente fabricación a manera de comparación y se pudo observar que existe una buena unión de la soldadura de estaño con el terminal del LED, también es posible identificar en las imágenes el IMC tanto en la interface de la soldadura con el LED y con el PCB.

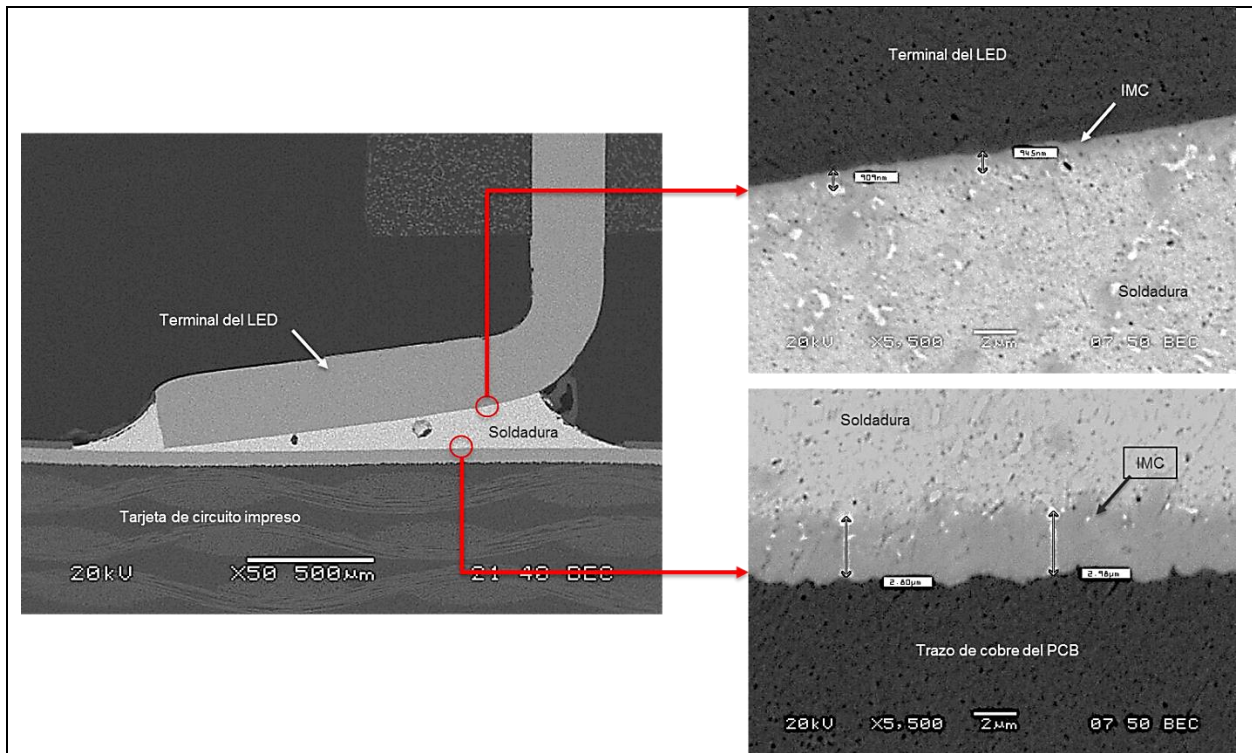


Figura 25. Corte transversal del LED en una tarjeta de referencia observado con el SEM

Como último paso en el proceso de análisis por medio de SEM y EDX se realizó otra prueba en una de las muestras que fallaron para conocer la composición elemental del recubrimiento metálico en el terminal del LED.

Por medio de una técnica conocida como línea de escaneo que consiste en trazar una trayectoria recta sobre la muestra que se desea analizar para que el instrumento de medición EDX vaya tomando la lectura correspondiente a los elementos que se detectan a medida que se avanza sobre esa ruta. En la figura 26 se pueden ver los resultados de la línea de escaneo identificando los elementos de níquel, cobre y paladio.

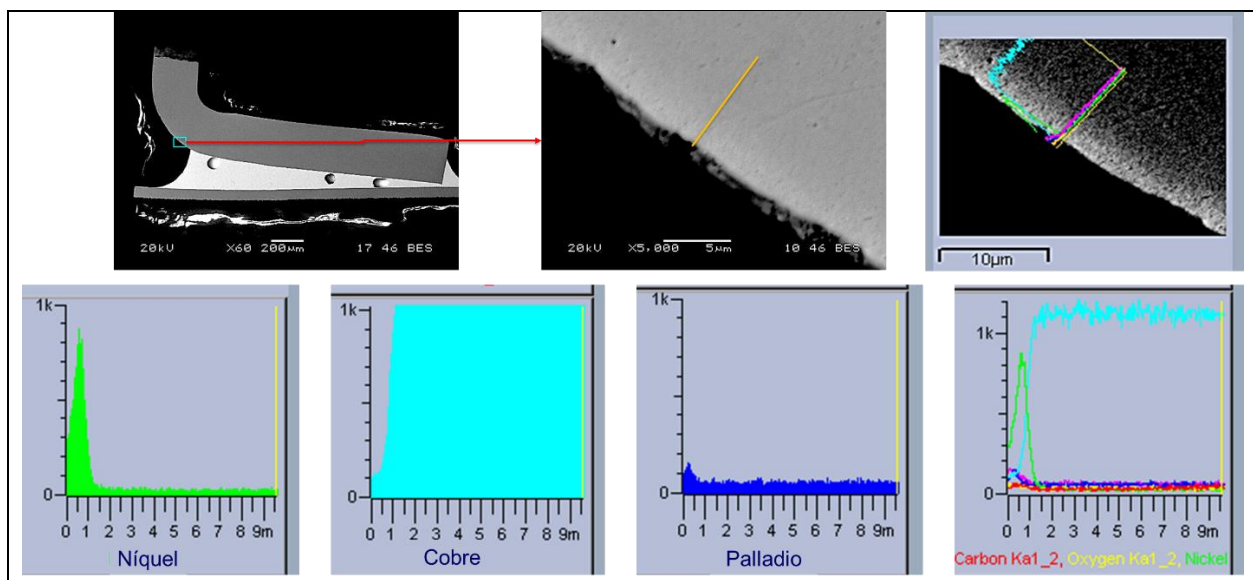


Figura 26. Resultados de la técnica de análisis por medio de línea de escaneo

El punto de inicio de la línea de escaneo es desde afuera del terminal hacia dentro como lo indica la línea amarilla de la imagen y que corresponde al punto cero de la escala en las gráficas. Analizando las gráficas se puede identificar, que en las escalas desde el punto 0 a el punto 1, el instrumento de medición EDX obtiene más lecturas del elemento níquel y en menor proporción se identifica lecturas de cobre y paladio. A medida que el escaneo avanza hacia dentro del terminal la cantidad de níquel y paladio disminuye drásticamente, esto se puede ver en las lecturas de las gráficas a partir del 1 en adelante en la escala.

Una idea más clara de cómo está constituido el esquema de metalización del terminal del LED se puede ver en la cuarta grafica que agrupa la detección de todos los elementos en función de la distancia recorrida. De aquí se puede concluir que el terminal del LED tiene un recubrimiento exterior compuesto principalmente por níquel y con un porcentaje menor de paladio y que el material base es de cobre. Cabe mencionar que este esquema

de metalización no es común en componentes de SMT que deben ser soldados al PCB por medio de procesos estándares.

En la misma muestra se analizó la composición elemental del IMC en el terminal del LED figura 27 resultando que la unión inter-metálica está compuesta de cobre níquel y estaño y que posiblemente se trate de una estructura cristalina ternaria.

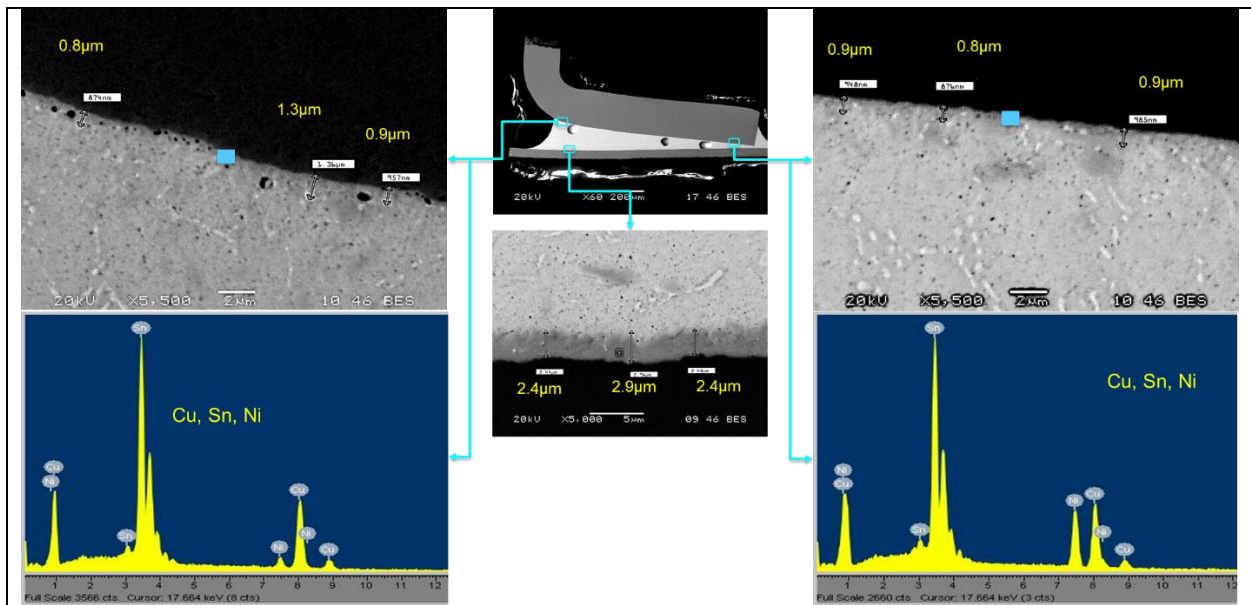


Figura 27. Identificación de los elementos que componen el IMC en el terminal del LED

Una vez concluido el análisis de las unidades que fallaron en campo y organizando los datos se derivan las siguientes conclusiones preliminares:

- El desprendimiento de los dispositivos LED de las tarjetas se debe a que no hay una unión inter-metálica robusta en la interfaz de la terminal con la soldadura.
- La separación de la soldadura con el LED inicia en la rodilla del terminal que parece ser el punto de mayor estrés mecánico.
- El terminal del LED contiene un recubrimiento compuesto por níquel y paladio, este no es un esquema de metalización común para componentes que se sueldan al PCB utilizando un proceso estándar de ensamble por montaje superficial.
- La carencia de IMC en la interfaz es posible que se deba a falta de energía térmica durante la fusión de la soldadura ya que el elemento níquel tiene una proporción de disolución en el estaño fundido mucho menor que el del cobre, se recomienda revisar los perfiles de temperatura en el horno de soldado y las especificaciones del fabricante para el soldado de este componente

### Hipótesis 3 Perfil de horno inadecuado

Para investigar si la debilidad de la unión inter-metálica se debe a que el perfil de temperatura del horno de reflujo que se utilizó para soldar los dispositivos LEDs no es el adecuado, se comparó el perfil utilizado durante la fabricación de las tarjetas que presentaron las fallas contra el perfil de temperatura recomendado por el fabricante de los dispositivos LED (OSRAM Opto Semiconductors, 2013). En la figura 28 se muestra el perfil de temperatura utilizado en la línea de ensamble y en la figura 29 se muestra el perfil recomendado por el fabricante.

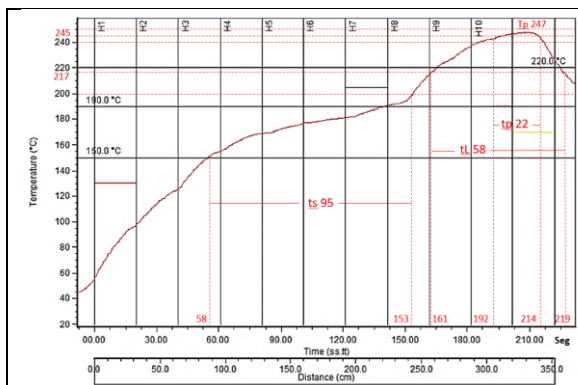


Figura 28. Perfil utilizado en el ensamble

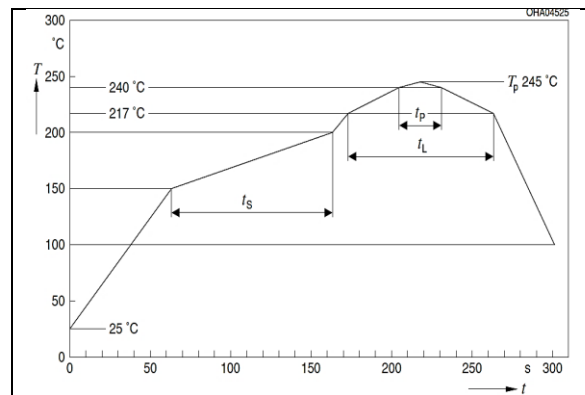


Figura 29. Perfil recomendado por el fabricante del LED

| Valores Recomendados por el fabricante del LED   |         |     |             |     | Perfil utilizado en línea |          |                |
|--|---------|-----|-------------|-----|---------------------------|----------|----------------|
| Característica del Perfil                        | Símbolo | Min | Recomendado | Max | Valor                     | Unidades | Comentarios    |
| Rampa de Pre calentamiento de 25°C a 150°C       |         |     | 2           | 3   | 2.5                       | °C/s     | Valor correcto |
| Tiempo $t_s$                                     | $t_s$   | 60  | 100         | 120 | 95                        | s        | Valor correcto |
| Rampa a pico $t_{smax}$ a $t_p$                  |         |     | 2           | 3   | 1.5                       | °C/s     | Valor correcto |
| Temperatura en liquido                           | $T_l$   | 217 |             |     | 217                       | °C       | Valor correcto |
| Tiempo por arriba de la temperatura en liquido   | $t_L$   |     | 80          | 100 | 58                        | s        | Valor muy bajo |
| Pico de Temperatura                              | $T_p$   |     | 245         | 250 | 247                       | °C       | Valor correcto |
| Tiempo entre la temperatura de pico y menos 5 °C | $t_p$   | 10  | 20          | 30  | 22                        | s        | Valor correcto |
| Rampa de enfriamiento de TP a 100 °C             |         |     | 3           | 4   | 3                         | °C/s     | Valor correcto |
| Tiempo total de 25 °C a $T_p$                    |         |     |             | 480 | 210                       | s        | Valor correcto |

Tabla 2. Comparación de las características más importantes del perfil de temperatura



El resultado de la comparación de las características más importantes de los dos perfiles se vació en la tabla 2 y se encontró que el **tiempo por arriba de la temperatura en estado líquido del estaño (tL)** está muy por debajo del valor recomendado por el fabricante que es de 80 a 100 segundos ya que el perfil de ensamble mostró un resultado de 58 segundos.

El tL **tiempo por arriba de la temperatura en estado líquido del estaño** es un factor muy importante para generar una unión inter-metálica robusta porque cuando el estaño se encuentra en estado líquido comienza a disolver los metales que se encuentran en contacto con él, que en este caso se trata del níquel – paladio que recubre las terminales del dispositivo LED y del cobre que forma los trazos en el PCB; una vez que termina el periodo en que el estaño está en estado líquido, los átomos del cobre o níquel se recombinan y forman un compuesto químico que tiene la función de ser la unión inter-metálica IMC y que mantiene unidos a los componentes. Un ejemplo de una unión inter-metálica se puede observar en la figura 30.

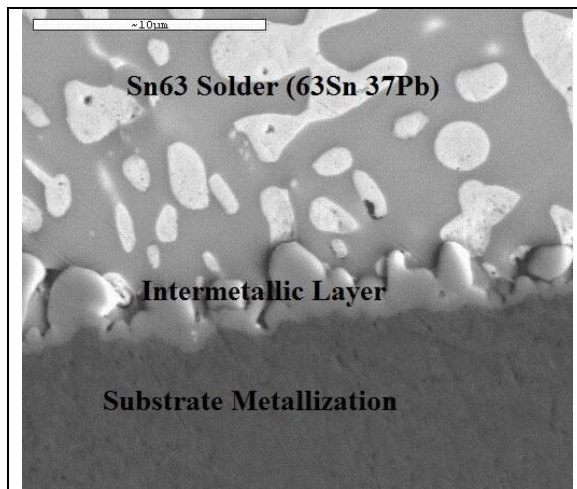


Figura 30. Unión inter-metálica.

## Hipótesis 4 Resistencia mecánica débil de la unión de soldadura

Desde el principio, el equipo identificó que solo algunos LEDs se desprendían del PCB, pero la gran mayoría se mantenían unidos firmemente a la tarjeta sin causar algún problema. Con el propósito de conocer las condiciones en que se encuentra el proceso, se hizo un estudio estadístico para caracterizar la resistencia mecánica de la unión de soldadura por medio de una prueba de esfuerzo cortante. Esta prueba consiste en empujar el LED por el frente a una velocidad constante e ir midiendo la fuerza de resistencia hasta que el LED se desprende de la tarjeta tal como se muestra en la figura 31. Los valores de configuración del equipo para el desarrollo de esta prueba se muestran en la imagen 32.



Figura 31. Prueba de esfuerzo cortante

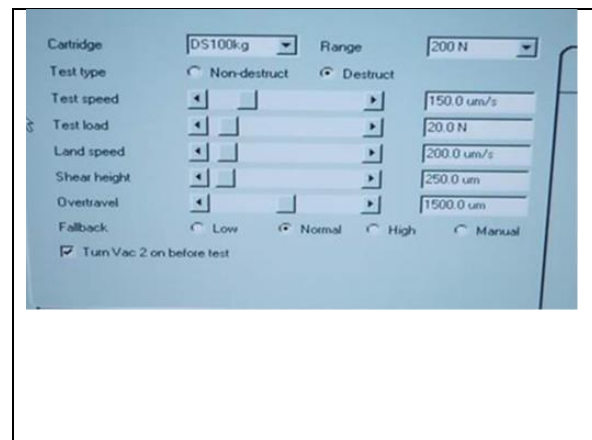


Figura 32. Valores del equipo para la prueba

Con el empleo de esta técnica se evaluó la resistencia mecánica de algunos lotes de producción midiendo los LED 2 y LED 3 de 30 tarjetas, posteriormente se hizo el estudio estadístico de los datos obtenidos que se muestran en las figuras 33 y 34. La interpretación de la información es la siguiente:

a) En las figuras 33 y 34 las gráficas tituladas como “Process Capability Report” muestran la distribución de las lecturas obtenidas en la prueba de esfuerzo cortante para el LED 2 y LED 3 respectivamente, se puede observar que hay datos que están por debajo del límite de especificación LSL (Low Specification Limit) indicado con una línea roja vertical y que representan los elementos no conformes; la cantidad de elementos no conformes que puede producir el proceso se estima en el recuadro inferior en la columna titulada “Expected Overall”, que en el caso del LED 2 es de 12,598 partes por millón (PPM) y en el del LED 3 es de 65,557 PPMs.

b) En la sección identificada como “Process Capability Sixpack” se obtuvieron las gráficas de control “Xbar Chart” y “R Chart” con estas gráficas se monitorea la estabilidad del

proceso. Cuando el proceso es estable los puntos deberán caer dentro los límites de control que están definidos a una distancia de  $\pm 3\sigma$  o tres desviaciones estándar desde la media de medias que está representada por la línea central en la gráfica Xbar. Para el caso de la gráfica de rangos “R” cada punto representa el valor resultante de restar el valor máximo menos el valor mínimo dentro de un grupo de cinco lecturas tomadas consecutivamente.

De los datos obtenidos para el LED2 se observa en la figura 33 que hay un punto cerca del límite de control en la gráfica de “R” y en el LED 3 la figura 34 muestra que hay un punto fuera de los límites de control en la gráfica “Xbar”, lo cual indica que el proceso no es robusto y que estará produciendo producto no conforme.

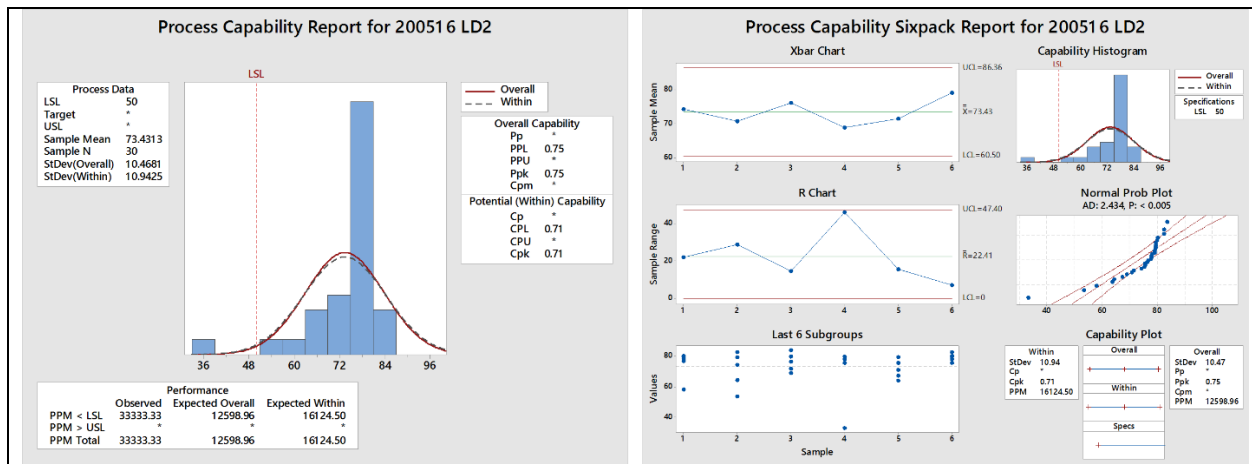


Figura 33. Resultados estadísticos de la prueba de esfuerzo cortante en el LED 2.

c) Este estudio también nos proporciona información de cómo se distribuye la población, en las gráficas identificadas como “Normal Prob Plot” se observa que para los dos casos las lecturas de los LED 2 y LED 3 las distribuciones no son normales porque los puntos no se alinean siguiendo la trayectoria de la línea recta que indica normalidad y hay puntos que están fuera del intervalo de confianza.

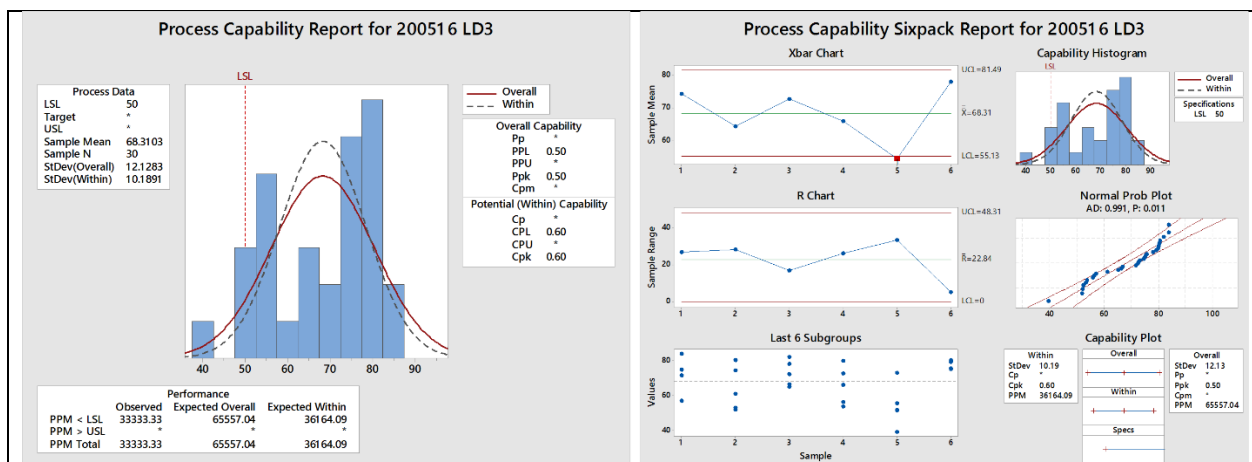


Figura 34. Resultados estadísticos de la prueba de esfuerzo cortante en el LED 3.

d) Finalmente el resultado del estudio estadístico se sintetiza en el recuadro indicado como “Capability Plot” donde se obtienen dos tipos de resultados, uno para “Overall” que significa la capacidad general del rendimiento real del proceso que el cliente experimenta con el tiempo y que se expresa con el indicador Ppk. La información en el recuadro de “Within” representa los resultados obtenidos con los datos de la prueba y se expresa la capacidad del proceso en esas condiciones con el indicador Cpk.

De esta prueba se concluye lo siguiente:

- Se observaron mediciones por debajo del límite inferior especificado por el fabricante del dispositivo LED que es de 50 Kg
- El Cpk que es un indicador de la capacidad del proceso para producir unidades que cumplan el estándar de calidad, resultó muy por debajo en el rango de 0.6 y 0.71, cuando lo mínimo esperado en la industria automotriz es de 1.67
- La distribución de las mediciones no sigue una distribución normal o también conocida como campana de Gauss, lo que indica que los mecanismos que subyacen a gran parte de este tipo de fenómenos son desconocidos, por la enorme cantidad de variables incontrolables que en ellos intervienen. En un modelo normal se asume que cada observación se obtiene como la suma de pocas causas independientes
- La media de las lecturas está muy cerca del límite inferior con valores de 68 y 73 Kg
- En las condiciones en que se encuentra el proceso, se proyecta un total de fallas del orden de 65000 por cada millón de unidades producidas.

## Experimentación

En esta etapa se describe la solución para robustecer la resistencia mecánica de la unión de soldadura. Ahora que se cuenta con la información obtenida durante el proceso de análisis y prueba de hipótesis, donde se produce suficiente información cualitativa y cuantitativa del problema, también se identifica el mecanismo de falla de las tarjetas y se encuentra que el perfil de temperatura de ensamble no cumple con los valores recomendados por el fabricante del LED. Además, se pudo establecer un método objetivo para medir la resistencia mecánica de la unión del LED con la PCB, aunque este sea un método destructivo puede servir para ajustar bien los procesos.

Con estos elementos el siguiente paso es identificar qué modificaciones se pueden hacer al proceso de ensamble de tarjetas PCB para mejorar la resistencia mecánica de la soldadura. Para lograr este propósito se plantea desarrollar un diseño de experimentos.

### Diseño de Experimentos (DoE)

El diseño de experimentos DoE por sus siglas en Ingles es una técnica estadística que consiste en desarrollar una serie de grupos de evaluación siguiendo un plan bien establecido y estructurado donde cada grupo recibe tratamientos o factores de proceso diferentes y se selecciona la variable de salida más adecuada para evaluar el efecto de cada factor, así como sus interacciones (Pulido, 2012).

En este caso se planteó un DoE fraccional con 6 factores y dos niveles con puntos centrales y cuatro réplicas. Los factores considerados son los siguientes:

| <i>Factor</i>                                     | <i>Nivel Bajo (-)</i> | <i>Punto Central</i> | <i>Nivel Alto (+)</i> |
|---|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| <i>Atmósfera de Nitrógeno</i>                     | Off (210K ppm O2)     |                      | On (500 ppm O2)       |
| <i>Lote del LED</i>                               | 1606                  |                      | 1610                  |
| <i>Pico de temperatura del perfil de ensamble</i> | 240°C                 | 245°C                | 250°C                 |
| <i>tL</i>   | 40 seg                | 70 seg               | 100 seg               |
| <i>Espesor de esténcil</i>                        | 5 mil                 |                      | 6 mil                 |
| <i>Pasta de soldadura</i>                         | Senju                 |                      | Heraeus               |

Por medio de un programa de software especializado en análisis estadístico se determinan el número y orden de las corridas para cada grupo, una vez que todos los grupos fueron ensamblados se hace la prueba de esfuerzo cortante y se obtiene la medida de la resistencia mecánica de cada LED. Esta información es vaciada en la

estructura del DoE en el software y se analiza el efecto de cada factor en la variable de salida.

El procesamiento estadístico del DoE arroja que los factores más significativos son el lote de fabricación del dispositivo LED, el fabricante de pasta de soldadura y una interacción triple que está compuesta por la atmosfera de nitrógeno + el espesor de estencil + el fabricante de pasta de soldadura, estos factores se pueden identificar en la tabla 3 donde el valor de la columna P es menor a 0.05 o en la figura 35, el dato de R-Sq(adj) resulta en un 43.9%, lo que se interpreta como el porcentaje explicado de la variación observada entre los grupos con diferentes tratamientos considerados en estos experimentos.

| Factorial Fit: LD3-Shear versus Nitrogen (O2 PPMs), Lot, Stencil, Paste |         |         |         |        |       |
|---|---------|---------|---------|--------|-------|
| Estimated Effects and Coefficients for LD3-Shear (coded units)          |         |         |         |        |       |
| Term  | Effect  | Coef    | SE Coef | T      | P     |
| Constant  |         | 89.2416 | 0.3352  | 266.23 | 0.000 |
| Nitrogen (O2 PPMs)  | 0.9421  | 0.4710  | 0.2737  | 1.72   | 0.093 |
| Lot   | -1.4112 | -0.7056 | 0.2737  | -2.58  | 0.014 |
| Stencil   | 0.9321  | 0.4660  | 0.2737  | 1.70   | 0.096 |
| Paste   | 2.4521  | 1.2260  | 0.2737  | 4.48   | 0.000 |
| Stencil*Paste   | 0.9396  | 0.4698  | 0.2737  | 1.72   | 0.094 |
| Nitrogen (O2 PPMs)*Stencil*Paste  | 1.2571  | 0.6285  | 0.2737  | 2.30   | 0.027 |
| Ct Pt   |         | 1.0072  | 0.5806  | 1.73   | 0.090 |

|               |                     |                    |
|---------------|---------------------|--------------------|
| S = 1.89620   | PRESS = 210.694     | R-Sq(adj) = 43.92% |
| R-Sq = 52.27% | R-Sq(pred) = 30.08% |                    |

Tabla 3. Resultado estadístico del procesamiento de datos del DoE

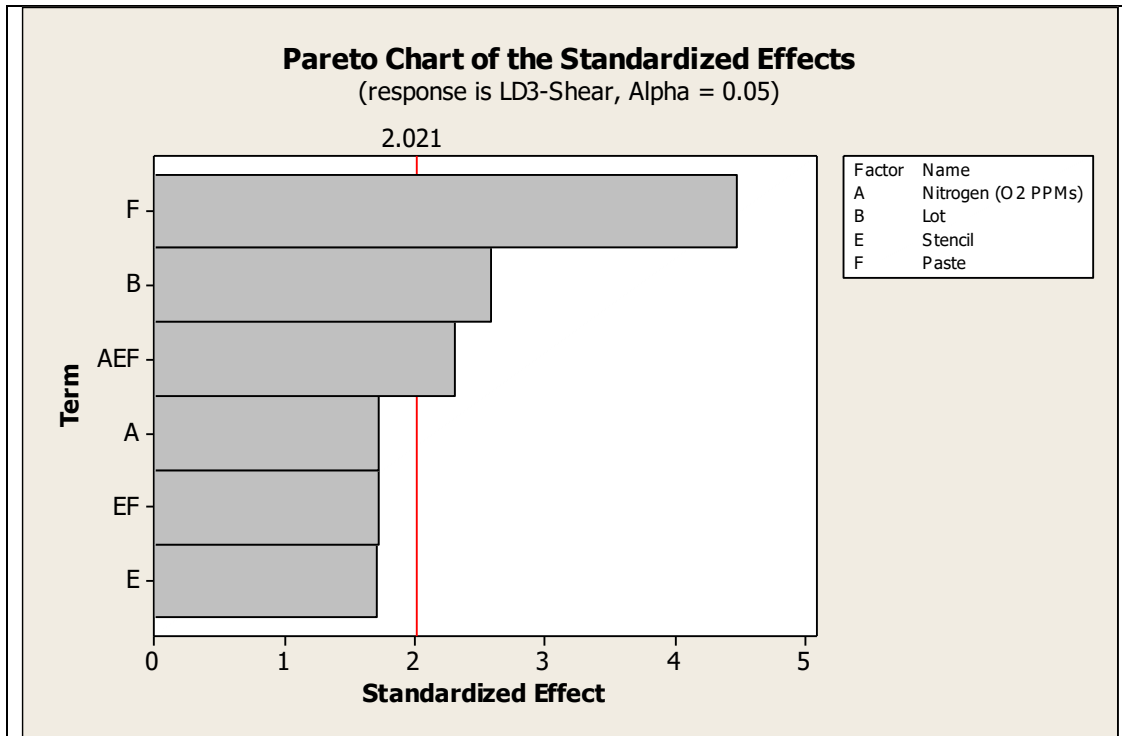


Figura 35. Factores con mayor nivel de significancia para crear una IMC resistente

El software de análisis estadístico proporciona graficas adicionales, mostradas en la figura 36, donde se indica en el eje de las Ys el valor de resistencia mecánica de la unión de soldadura obtenido por medio de la prueba de esfuerzo cortante y en el eje de las Xs el valor de cada factor que se utilizó en el DoE. Entonces, estudiando la primera gráfica de izquierda a derecha, identificada con el título “Nitrogen”, se puede ver que el mejor valor de resistencia mecánica se logra con la atmosfera de nitrógeno encendida. En la segunda grafica identificada con el título “Lot” se puede observar que la resistencia mecánica puede cambiar de lote a lote y en este caso el lote de LED 1606 tiene mejor desempeño.

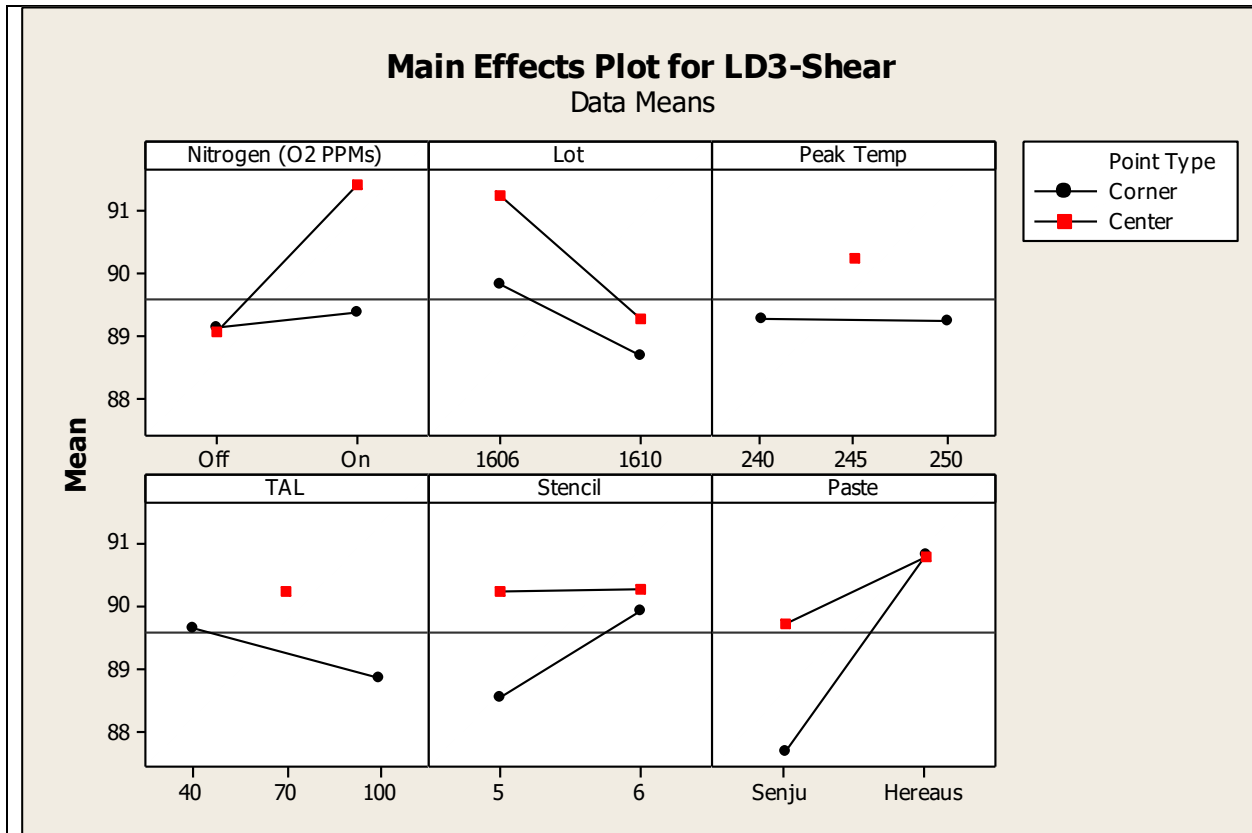


Figura 36. Gráficas de los principales efectos del DoE

En el caso de la tercera gráfica, con título “Peak Temp”, las condiciones del punto central con un valor de 245°C son las mejores, así como en la gráfica titulada “TAL” el mejor resultado se obtiene a los 70 segundos. En la gráfica de “stencil” se observa un mejor desempeño para el punto central y para la gráfica de “Paste” se puede observar que la pasta de soldadura Hereaus es la que se desempeña mejor.

De los resultados derivados por el diseño de experimentos se puede concluir que la unión mecánica de la soldadura del LED se puede robustecer cambiando los siguientes parámetros en el proceso:

- Utilizar la pasta de soldadura Hereaus
- Pico de temperatura de 245 °C
- Tiempo de la soldadura en estado líquido (TAL) 70 segundos
- Habilitar atmosfera de nitrógeno en el horno
- Esténcil para la impresión de soldadura de 6 milésimas



## Validación de mejora propuesta

Posterior al DoE se adoptan las recomendaciones de cambio de parámetros en el proceso, así como en el tipo de pasta de soldadura y se corre la línea de manufactura con un lote de 100 unidades de las cuales se toman 30 tarjetas para hacer la prueba destructiva de esfuerzo cortante. Los resultados son significativamente diferentes, pues el valor promedio para desprender el LD2 es de 80.7Kg y antes del cambio el valor promedio era de 73.4Kg, en el caso del LD3 el nuevo resultado es de 80.88Kg y el anterior era de 68.3Kg.

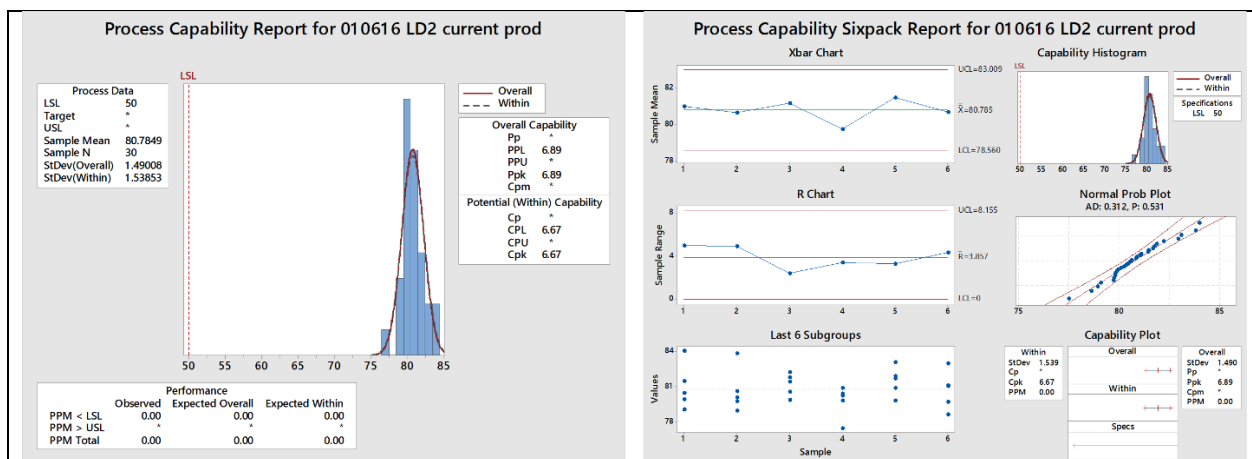


Figura 37. Resultados de la prueba de esfuerzo cortante en el LED 2 después de implementar los cambios en el proceso.

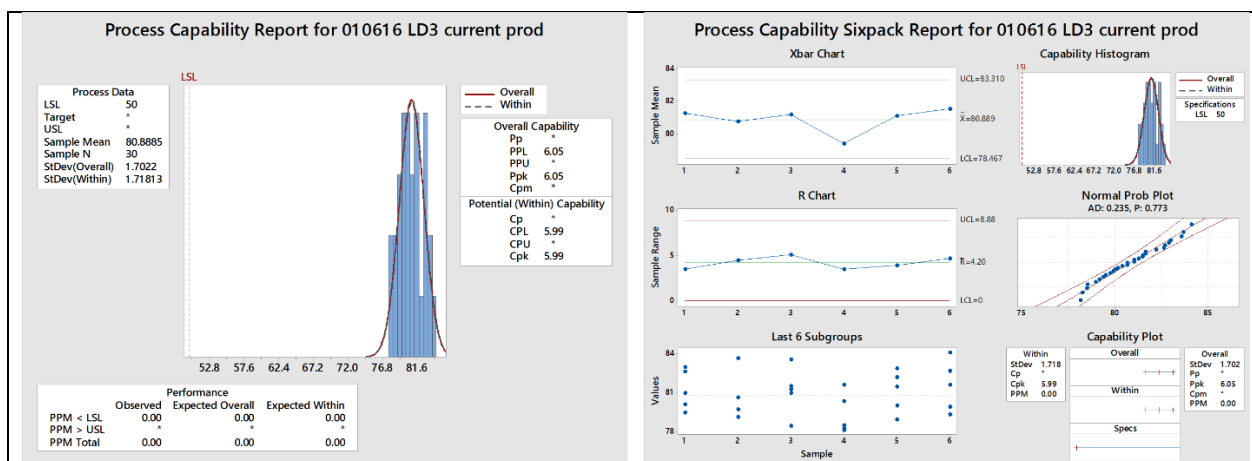


Figura 38. Resultados de la prueba de esfuerzo cortante en el LED 3 después de implementar los cambios en el proceso.

Sin embargo, los resultados más contundentes son que la distribución de lecturas es normal y más estrecha con una desviación estándar de 1.53 para LD2 y 1.71 para LD3.

La distribución normal (en ocasiones llamada distribución gaussiana) es la distribución continua que se utiliza más comúnmente en estadística porque proporciona la base para la estadística inferencial clásica por su relación con el teorema de límite central.

Ninguna de las lecturas se encuentra por debajo del límite mínimo establecido por el cliente que es de 50Kg; el conjunto de estos indicadores resulta en una capacidad de proceso Cpk de 6.67 para LD2 y de 5.99 para LD3. El pronóstico de defectos por cada millón de unidades producidas es de cero. Las gráficas del estudio estadístico se pueden ver en las figuras 37 y 38.

En la tabla 4 se hace una comparación del desempeño del proceso antes y después del cambio con el análisis estadístico de los resultados obtenidos de la prueba de esfuerzo cortante.

| Indicador de Procesos    | Valor antes del cambio |        | Valor después del cambio |      | Comentario                       |
|--------------------------|------------------------|--------|--------------------------|------|----------------------------------|
|                          | LD2                    | LD3    | LD2                      | LD3  |                                  |
| Límite de especificación | 50Kg                   | 50Kg   | 50Kg                     | 50Kg |                                  |
| Media de las lecturas    | 73.4                   | 68.3   | 80.7                     | 80.8 | Ligera mejora en las medias      |
| Desviación estándar      | 10.9                   | 10.1   | 1.53                     | 1.7  | Mejora muy significativa         |
| Cpk                      | 0.71                   | 0.6    | 6.67                     | 5.99 | Mejora muy significativa > 1.67  |
| Ppk                      | 0.75                   | 0.5    | 6.89                     | 6.05 | Mejora muy significativa > 1.67  |
| Distribución normal      | no                     | no     | si                       | si   | Mejora                           |
| PPM < LSL                | 16,124                 | 36,164 | 0                        | 0    | Fallas esperadas por cada millón |

Tabla 4. Resultados comparativos antes y después del cambio en el proceso

De esta comparación se derivan los siguientes resultados en el proceso de ensamble de la tarjeta:

- Existe una mejora muy importante en el desempeño del proceso, el Cpk y Ppk superaron por mucho el límite establecido en los estándares de calidad que es de 1.67
- Se determinó estadísticamente que el proceso funcionando con estos parámetros tiene una probabilidad de producir cero fallas por cada millón de unidades producidas
- Las gráficas de medias y rangos indican que es un proceso estable y en control

## Conclusiones

Por medio de la información obtenida en este estudio se identificó que el proceso de fabricación del PCB para la luz trasera del automóvil tiene varias oportunidades de mejoras que pueden contribuir para aumentar la calidad y confiabilidad del producto.

La aplicación de un método de estudio bien definido y estructurado, así como el empleo de técnicas analíticas adecuadas, como la inspección de las uniones inter-metálicas por medio del microscopio electrónico de barrido, proporcionaron datos valiosos que permitieron identificar la causa raíz del problema e implementar acciones de mejora. El soporte y validación de los datos por medio de procedimientos y herramientas estadísticas como el diseño de experimentos y los estudios de capacidad de procesos fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación que culminó en la toma de decisiones importantes con respecto al proceso: como el de sustituir la pasta de soldadura Senju por la pasta Hereaus. Otro cambio importante fue el de habilitar la atmosfera de nitrógeno dentro del horno de reflujo para evitar la oxidación de las terminales de los LEDs mientras se van calentando en cada zona del mismo; el tL (tiempo por arriba de la temperatura en estado líquido del estaño) se aumentó de 58 a 70 segundos. Todos estos cambios permitieron robustecer la unión de soldadura entre los dispositivos LEDs y el PCB, resultando en un promedio de 80 Kg fuerza necesarios para desprenderlos. Así el Cpk del proceso quedó en un nivel superior a 6, cuando el límite inferior normalmente aceptado por la industria automotriz es de 1.67. Estos indicadores pronostican estadísticamente una razón de falla de cero partes por millón de PCBs producidas, a diferencia de los 65000 ppms observados inicialmente.

El equipo de trabajo que se encargó de abordar este problema de calidad lo hizo de una manera muy profesional y expedita lo que permitió reconstruir la confianza del cliente final y ayudó a mitigar el impacto ocasionado por las fallas de automóviles en campo.

## Bibliography

Action Group. (2018, February 26). *Action Group*. Retrieved from Técnica para el Análisis de Problemas: 5W + 2H: [www.actiongroup.com.ar/download/5w2h.pdf](http://www.actiongroup.com.ar/download/5w2h.pdf)

Escalante, E. J. (2009). *Seis-Sigma Metodología y Técnicas*. Mexico: Limusa.

George, M. L. (2005). *The Lean Six Sigma Pocket ToolBook*. New York, United State of America: McGraw Hill.

Interconnected Printed Circuit. (2015, 6). IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL. United States of America.

Martin, P. L. (1999). *Electronic Failure Analysis Handbook*. New York: McGraw Hill.

Montgomery, D. (2012). *Statistical Quality Control*. John Wiley & Sons.

OSRAM Opto Semiconductors. (2013). LA B6SP Datasheet.

Pulido, H. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Mexico, D.F.: McGraw Hill.