

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE MANUFACTURA



Evaluación del proceso de soldadura por ultrasonido como método alternativo para la unión de piezas termoplásticas

PROYECTO QUE PRESENTA

Héctor Adrián Vázquez Flores

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN MANUFACTURA

ASESOR. **Dr. Francisco López Jáquez**

COASESOR. **Dr. Javier Molina Salazar**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente:

A mis padres y hermanos, Héctor Vázquez Alcalá y Bernarda Flores Hernández, Verónica Vázquez Flores y Daniel Vázquez Flores, por su apoyo incondicional, por ser un ejemplo para mí y mis hermanos y por siempre desear y anhelar lo mejor en cada etapa de mi vida. Los Amo.

A mi esposa, Lizbeth Hernández Torres, por su constante apoyo, compañía y paciencia para la elaboración de este proyecto. Esta tesis es un logro el cual estoy orgulloso de compartir contigo, somos el mejor equipo y aún nos quedan muchos proyectos por realizar. Te Amo.

A mis hijas, Sofía Vázquez Hernández y Vanessa Vázquez Hernández, por ser mi fuente de motivación e inspiración para superarme cada día y dar lo mejor de mí. Espero poder ser su guía, su mentor, para que logren sus proyectos de vida. Recuerden siempre una de las frases de Stephen Hawking:

Recuerden mirar hacia arriba, a las estrellas y no abajo hacia sus pies. Traten de darle sentido a lo que ven y pregúntense que es lo que hace que el universo exista. Sean curiosas y a pesar de lo difícil que pareciera la vida, siempre habrá algo que pueden hacer para lograr su éxito. Lo importante es que nunca dejen de intentarlo y no se rindan.

Las Amo.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2.1 Objetivo general	6
1.2.2 Objetivos particulares	6
1.2 Hipótesis.....	7
1.3 Justificación	7
1.4 Alcance.....	8
1.5 Delimitaciones	8
1.6 Cronograma.....	9
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 Introducción	10
2.2 Materiales para Ingeniería.....	10
2.2.1 Polímeros	11
2.3 Técnicas de unión en plásticos.....	13
2.3.1 Uniones mecánicas	13

2.3.2 Uniones por adhesivos.....	14
2.3.3 Uniones por soldadura	14
2.4 Soldadura por ultrasonido.....	15
2.4.1 Definiciones.....	18
2.4.2 Ventajas y desventajas	20
3. METODOLOGÍA	21
3.1 Fases de la metodología	22
3.2 Diagrama de flujo	24
4. RESULTADOS	26
4.1 Definición del problema	26
4.2 Análisis de componentes y del proceso	30
4.2.1 Análisis de componentes	30
4.2.2 Análisis del proceso actual.....	37
4.3 Equipo y herramienta para desarrollo de pruebas.....	42
4.3.1 Equipo de soldadura por ultrasonido.....	42
4.3.2 Medidor de fuerza digital Mark-10, series 4 con base motorizada	44
4.3.3 Báscula digital	44
4.3.3 Otras herramientas.....	45
4.4 Validación de método actual Vs propuesto.....	46
4.4.1 Prueba de tensión método actual con adhesivo doble cara	46

4.4.2 Validación de método propuesto con ultrasonido.....	48
4.5 Desarrollo y análisis de pruebas estadísticas.....	50
4.5.1 Prueba de normalidad en los datos.....	50
4.5.2 Capacidad de proceso	54
4.5.3 Prueba t de 2 muestras	56
4.6 Análisis de resultados.....	58
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
6. BIBLIOGRAFÍA.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Electrolux planta refrigeradores	3
Figura 2. Ensamble de liner con arnés led.....	4
Figura 3. (a)(b)(c) Base led limpia, base led espumada, base led ensamblada	5
Figura 4. (a) (b) Desperdicio de plástico protector de base led	7
Figura 5. Cronograma del proyecto	9
Figura 6. Clasificación de materiales para Ingeniería [6]	11
Figura 7. . Ejemplo unión por encaje (snap fit)	14
Figura 8. Aplicaciones de soldadura por ultrasonido, a) industria médica, b) industria automotriz, c) artículos del hogar	15
Figura 9. Componentes principales del equipo por ultrasonido [11]	17
Figura 10. Definiciones de amplitud, frecuencia y punto nodal [12].....	19
Figura 11. Expansión y contracción de stack [12].....	19
Figura 12. Metodología propuesta	21
Figura 13. Diagrama de flujo.....	25
Figura 14. Reporte de defectos de calidad por base led espumada.....	27
Figura 15. Reporte de defectos de calidad por base led espumada.....	27
Figura 16. Diagrama causa y efecto	28
Figura 17. Documento de resolución de problemas	29
Figura 18. Imagen base led y vista isométrica	31
Figura 19. Propiedades HIPS en base led. (Fuente: compañía AMSTY)	32
Figura 20. Adhesivo doble cara en todo la superficie de la base, con papel protector	33

Figura 21. Propiedades adhesivo doble cara 3M 9629PC. (Fuente: compañía de adhesivos 3M).....	34
Figura 22. Cinta adhesiva de papel	35
Figura 23. Propiedades adhesivo doble cara 3M 9629PC. (Fuente: compañía de adhesivos 3M).....	35
Figura 24. Compartimento plástico liner	36
Figura 25. Propiedades HIPS en liner. (Fuente: compañía AMSTY)	37
Figura 26. Ensamble compartimento liner con arnés led	38
Figura 27. Uso de cinta adhesiva de papel como refuerzo	39
Figura 28. Ensamble de compartimento liner con gabinete	40
Figura 29. Ensamble de gabinete con liners superior e inferior ya espumado.....	41
Figura 30. Imagen Izq. Equipo Herrmann ultrasonic y der. Equipo Branson Ultrasonic	42
Figura 31. Medidor de fuerza digital Mark-10, series 4 con base motorizada.....	44
Figura 32. Báscula digital.....	44
Figura 33. Sujetadores y destornillador phillips	45
Figura 34. Pruebas con método actual adhesivo doble cara	47
Figura 35. Datos de prueba de tensión con método actual adhesivo doble cara.....	47
Figura 36. Desarrollo de pruebas con método propuesto ultrasonido	49
Figura 37. Datos de prueba de tensión con método actual adhesivo doble cara.....	49
Figura 38. Prueba de normalidad, datos de unión por adhesivo.....	50
Figura 39. Prueba de normalidad, datos de unión por ultrasonido	51
Figura 40. Nuevos datos obtenidos en las pruebas de tensión con método actual y método propuesto.....	52
Figura 41. Prueba de normalidad, datos de unión por adhesivo.....	53

Figura 42. Prueba de normalidad, datos de unión por ultrasonido	54
Figura 43. Capacidad de proceso con método actual adhesivo doble cara.....	55
Figura 44. Capacidad de proceso con método actual adhesivo doble cara.....	56
Figura 45. Gráfico Boxplot	58
Figura 46. Unidades de prueba sin fuga de espuma	59
Figura 47. Refrigerador marca Electrolux	62

RESUMEN

El presente proyecto se enfoca en validar la técnica de unión con soldadura por ultrasonido. Una técnica la cual se ha ido perfeccionando a través de los años para unir piezas plásticas y metálicas sin la necesidad de un material de aporte. El alcance de este proyecto es realizar la evaluación solo en piezas plásticas. El proyecto inicia en el proceso de ensamble entre dos componentes plásticos los cuales se unen a través de método por adhesivos y se busca realizar un análisis comparativo con la técnica propuesta de unión por soldadura ultrasónica. Una parte importante del proyecto es el marco teórico, para el cual se consultaron varios artículos referentes a soldadura por ultrasonido, se investigó en diferentes libros, y además, se realizaron consultas con expertos en algunos de los temas, para posteriormente redactar un resumen que ayudará a tener una idea clara de los temas mencionados.

Se plantea una metodología de seis bloques que ayuda a dar estructura durante el desarrollo del proyecto y junto con el apoyo de un diagrama de flujo se puede realizar la fase de pruebas de una forma controlada, logrando la recolección de datos de las dos técnicas, para con esto, realizar pruebas estadísticas que ayuden a tomar una decisión final con respecto a los datos obtenidos y finalmente generar las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

ABSTRACT

The main emphasis of the present Project is the validation of the joining technique of ultrasonic welding. A technique that has been growing and improving during the last years in order to weld plastics to plastic and metal to metal components without using additional materials. The scope of this project is to perform the evaluation only in plastic components. The project begins with the description of the current assembly process where two plastic components are being joint through the use of adhesive technique. Consequently a comparative analysis using the proposed ultrasonic welding technique will determine if this method is a good alternative. The literature section is a very important part of the project, where different articles about ultrasonic welding were consulted, also several books references were important and besides, we had some reviews with two experts in the market. All of this, with the intention to write a resume with the different subjects to have better understanding of the project.

A methodology of six blocks will provide structure to the development of the project, and also, with the help of a flow chart the test phase will be performed in a controlled manner, achieving a good recollection of data from both joining techniques. Eventually, statistic tests will be performed in order to help to take a final decision regarding the data that was analyzed and finally, generate final conclusions and recommendations of the project.

1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación se enfoca en la evaluación de nuevos métodos de manufactura los cuales optimicen los procesos de producción, ayuden a incrementar la calidad de los productos, sean más seguros y reduzcan los costos de producción.

El presente proyecto se desarrolla en la compañía Electrolux, la cual es una empresa líder en la venta de electrodomésticos a través de diferentes marcas en el mercado tales como Electrolux, AEG, Anova, Frigidaire, Westinghouse and Zanussi, generando ventas por más de 60 millones de electrodomésticos anualmente. En la figura 1 se observan algunos de los principales productos manufacturados en la compañía Electrolux.



Figura 1. Electrolux planta refrigeradores

La compañía Electrolux es una empresa multinacional que nace en 1919 a raíz de la fusión de Elektromekaniska y Lux. El corporativo de la compañía se encuentra en Estocolmo, Suecia. Los productos que ofrece la compañía Electrolux incluyen refrigeradores, lavaplatos, lavadoras, secadoras, estufas, aspiradoras, aires acondicionados y otras electrodomésticos pequeños.

La planta de refrigeradores inició operaciones en ciudad Juárez en el año 2005. Generando más de 3800 empleos en la ciudad. Actualmente produce un volumen aproximado de 1, 400,000 unidades anuales en las tres plataformas principales: FDBM, TM y SxS.

- FDBM (Puerta francesa con congelador inferior)
- TM (Congelador superior)
- Side by side (Congelador lateral)

1.1 Planteamiento del problema

En el proceso de ensamble de un refrigerador, existe una operación donde se une un arnés de iluminación led a un compartimento plástico llamado *liner*. El arnés cuenta con siete bases plásticas las cuales tienen una cinta adhesiva doble cara que se utiliza para unir las bases plásticas al *liner*. Este proceso se puede observar en la figura 2.

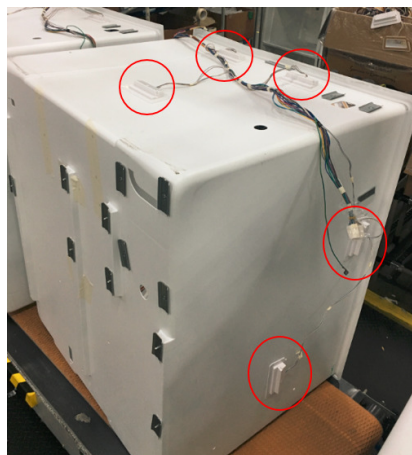


Figura 2. Ensamble de liner con arnés led

El sub-ensamble de *liner* y arnés pasan por diferentes operaciones de ensamble y posteriormente pasan a una línea de *conveyor* donde el sub-ensamble es colocado

dentro de un gabinete. En esta estación se colocan otros componentes para después pasar al área de espumado con poliuretano para crear el aislamiento térmico de la unidad.

En esta estación de espumado de gabinete se han observado problemas de calidad críticos, siendo uno de ellos el espumado de la base led. Este problema de calidad se puede observar en la figura 3. En la imagen (a) se muestra la base led limpia después de que la unidad pasó por el proceso de espuma de poliuretano. En la imagen (b) se observa la base led espumada, la cual inmediatamente es identificada con un punto rojo. En la imagen (c) se muestra la ubicación de la base led dentro de un refrigerador.

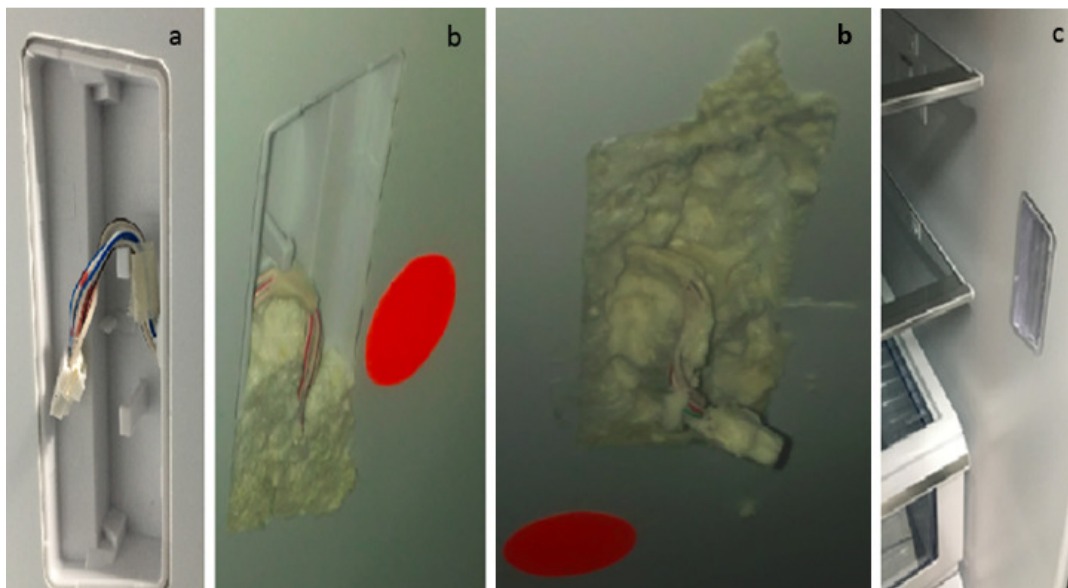


Figura 3. (a)(b)(c) Base led limpia, base led espumada, base led ensamblada

La incidencia de este problema es tal que durante el año 2018 se generaron 491 unidades defectuosas por fuga de espuma en la base led. Por lo tanto, el problema

se define como sigue. Existe una unión ineficiente entre la base led y el compartimento *liner* de un refrigerador, generando fugas de poliuretano en el proceso de espumado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Validar que el método de soldadura por ultrasonido es mejor opción que el proceso actual de unión con adhesivo doble cara para unir 2 piezas plásticas.

1.2.2 Objetivos particulares

1. Identificar el valor de tensión máxima utilizando el método de unión por adhesivo.
2. Identificar el valor de tensión máxima utilizando el método por unión con soldadura por ultrasonido.
3. Encontrar la causa raíz del problema por unión ineficiente entre las piezas plásticas entre la base led y el compartimento *liner*.
4. Demostrar que la técnica de soldadura por ultrasonido permite reducir el impacto ambiental en el proceso, eliminando en un 100% el uso de adhesivos doble cara y cinta adhesiva de papel.
5. Disminuir en un 80% los problemas de calidad por fuga de espuma en la base led después del proceso de espumado de gabinete.
6. Eliminar el costo generado por adhesivos.

1.2 Hipótesis

La técnica de soldadura por ultrasonido permite la unión adecuada entre dos piezas plásticas, logrando reducir las fugas de poliuretano durante el proceso de espumado en un gabinete.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 < \mu_2 \quad \text{Donde:}$$

μ_1 = Método de unión por adhesivos

μ_2 = Método de unión con soldadura por ultrasonido

La hipótesis alternativa establece que hay una diferencia entre ambos métodos, siendo esta diferencia una ventaja para el método alternativo.

1.3 Justificación

La validación de este método alternativo de soldadura por ultrasonido permitirá tomar la decisión de continuar con la implementación del proyecto en mayor escala, el cual generará beneficios importantes tanto a la compañía como en el medio ambiente, tal como se muestra en la figura 4. Logrando un gran impacto ambiental positivo al igual que en ahorro de costos a pesar de la inversión del proyecto.



Figura 4. (a) (b) Desperdicio de plástico protector de base led

A continuación se mencionan algunos de los beneficios del proyecto:

- Implementación de técnica moderna de manufactura eficiente.
- Reducir el impacto ambiental eliminando más de 3 Millones de plástico protector de cinta doble cara. Ver figura 4.
- Eliminar 90 mil rollos al año de cinta adhesiva de papel para cubrir las bases led (contención)
- Se reduce el costo del arnés que contiene las 8 bases led debido a que se elimina la cinta doble cara.
- Se reduce al menos en un 80% el problema por base led espumada
- Se eliminan los costos generados por reparación de unidades

1.4 Alcance

Esta investigación será capaz de tomar una decisión referente a la técnica propuesta de soldadura por ultrasonido; siguiendo una metodología que ayude a brindar una estructura durante el proceso de la evaluación.

1.5 Delimitaciones

El presente proyecto se limita al análisis del método actual de unión por adhesivo doble cara y la validación del método propuesto de soldadura por ultrasonido en la unión de piezas plásticas, las cuales se utilizan en la elaboración de un refrigerador.

1.6 Cronograma

El cronograma del proyecto es tal como se indica en la figura 5, donde se consideran los principales bloques del proyecto. Se seguirá un plan concreto y sencillo el cual sea fácil de llevar a cabo.

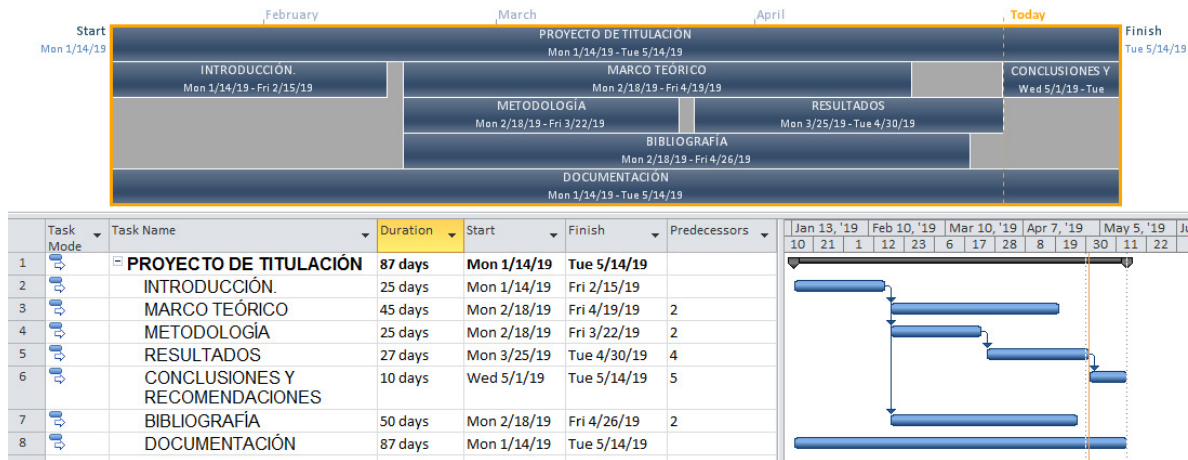


Figura 5. Cronograma del proyecto

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

En este capítulo se presentan los principales temas relacionados con el desarrollo del proyecto, los cuales se fueron seleccionando y estudiando durante el proceso previo y durante el desarrollo de la tesis. Se consultaron varios artículos, se investigó en diferentes libros, y además se realizaron consultas con expertos en algunos de los temas. Siendo estas tres fuentes la base fundamental para el desarrollo del presente proyecto.

El primer tema que se analiza en este capítulo es Materiales para Ingeniería, donde se describen los principales materiales que se utilizan para la elaboración de un producto, haciendo énfasis en los materiales que se utilizarán durante la realización del proyecto. También, se analizarán las principales técnicas de uniones entre piezas plásticas y finalmente, se explica en que consiste la técnica de unión de soldadura por ultrasonido.

2.2 Materiales para Ingeniería

Los materiales para ingeniería se clasifican en cuatro categorías principales, los cuales son: Metales, cerámicos, polímeros y compuestos. Los metales se dividen en metales ferrosos y metales no ferrosos. En el caso de los cerámicos, estos se dividen en cerámicos cristalinos y vidrios. Los polímeros se dividen en tres categorías: Termoestables, termoplásticos y elastómeros. Por otra parte, los materiales compuestos se dividen de la siguiente manera: Matriz metálica, matriz

cerámica y matriz polimérica. Esta clasificación se observa en la figura 6, la cual muestra en forma ordenada la clasificación de los materiales para ingeniería [6].

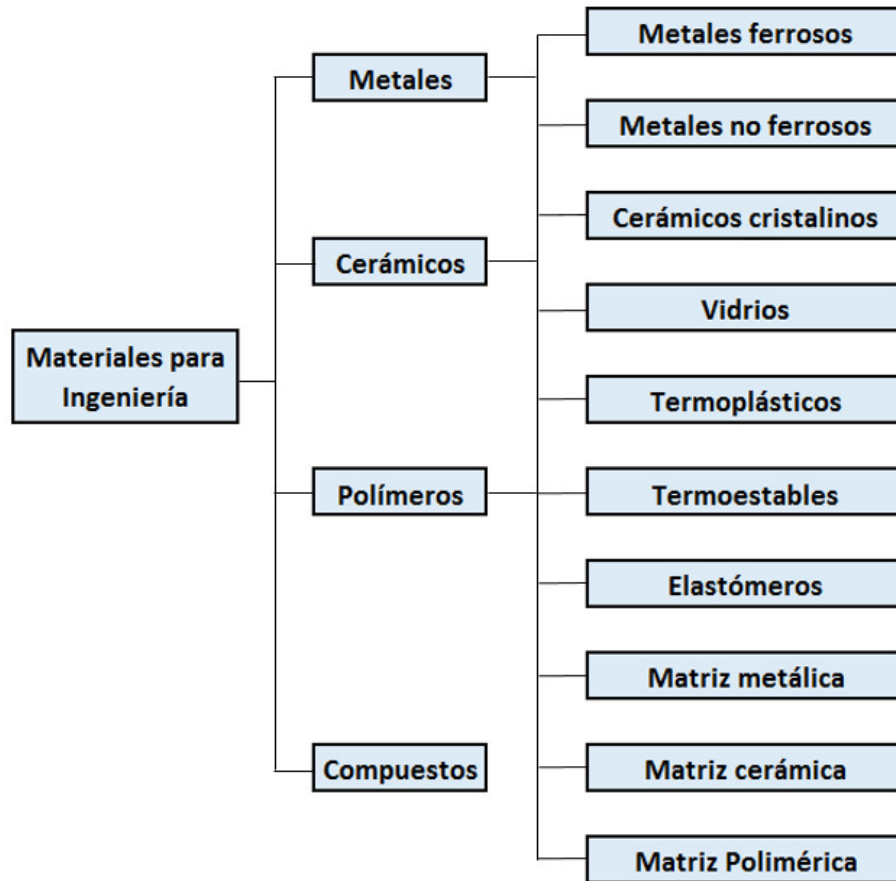


Figura 6. Clasificación de materiales para Ingeniería [6]

2.2.1 Polímeros

Un polímero es un compuesto el cual consiste en moléculas de cadena larga, cada una de estas moléculas está hecha de unidades que se repiten y conectan entre sí. La palabra **polímero** se deriva de los vocablos griegos poli que significa muchos y **meros** que significa parte. La mayoría de los polímeros se basan en carbono. Debido a esto, se les considera productos químicos orgánicos. [6].

Los polímeros se pueden clasificar en 3 categorías: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

Los polímeros termoplásticos son materiales sólidos en temperatura ambiente. Pero si se les aplica calor, empiezan a deformarse hasta volverse líquidos. Esta característica le permite transformarlos en diferentes formas para poder generar un componente o producto. Pueden repetir el ciclo de sólido a líquido a través de calor sin degradar sus propiedades. Algunos ejemplos de polímeros termoplásticos son el Polietileno, polipropileno, poliestireno y nylon.

Los polímeros termoestables no soportan el cambio de estado sólido a líquido y de líquido a sólido. Al ser calentados, se derriten para tomar una forma, pero volverse sólidos, se endurecen y no es posible volverlo a derretir, ya que al volver a aplicar calor, se degradan y se carbonizan.

Los elastómeros son polímeros que tienen propiedades elásticas y al ser estirados pueden volver a tomar su forma original. Su estructura molecular es parecida a la de los termoestables [6].

Poliestireno de alto impacto (HIPS). Es un material termoplástico rígido, pero opaco, este tipo de material utiliza estireno como el bloque principal de construcción. Debido a su estructura amorfa, los polímeros con estireno pueden ser procesados fácilmente en una gran variedad de temperaturas por encima de su punto de reblandecimiento.

Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Es un polímero termoplástico, opaco, dúctil y rígido, es un material fuerte y durable, aun en bajas temperaturas, con buena resistencia al calor y a químicos [6].

2.3 Técnicas de unión en plásticos

La unión entre componentes para crear un ensamble completo o ensamble parcial es una práctica muy común en la industria de la manufactura. Siendo metales y polímeros los materiales más utilizados para su aplicación en ensambles, ya sean sencillos o complejos según lo requiera el producto a desarrollar. Hasta la fecha, no obstante de los esfuerzos realizados por diseñadores y a pesar de la evolución de la tecnología, aún existen piezas cuyas características las hacen difíciles de manufacturar en un solo molde.

Los métodos principales para la unión de componentes plásticos se pueden dividir en tres principales categorías. Unión mecánica, unión por adhesivos y a través de soldadura [1].

2.3.1 Uniones mecánicas

La unión mecánica consiste en la aplicación de componentes externos para la unión de dos o más piezas. Los principales tipos de uniones mecánicas son a través de tornillería plástica o metálica, unión por encaje (*snap fit*) o unión a presión.

Las uniones mecánicas a través de tornillería, tales como remaches, tornillos, tuercas, entre otros, son el método de unión más común. Para usar este método de

unión, se requiere que los plásticos a ser unidos sean capaces de soportar estrés y deformación en el punto de unión [14].

Las uniones por medio de encaje (*snap fit*) se logran a través de un sistema de unión donde las piezas se pueden guiar entre ellas y entrelazar para completar la unión. Un ejemplo sencillo puede ser el que se muestra en la imagen 7.

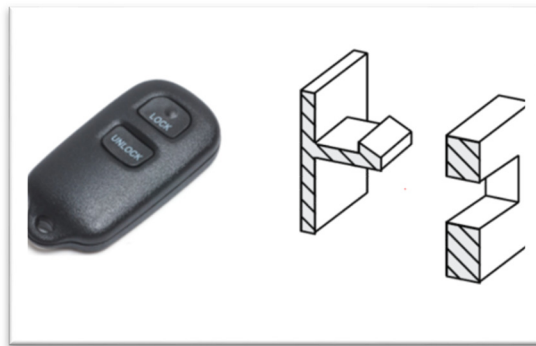


Figura 7. . Ejemplo unión por encaje (*snap fit*)

2.3.2 Uniones por adhesivos

La unión a través de adhesivos es un método muy generoso, donde se puede unir plásticos creados del mismo material, plásticos de diferentes materiales o a una pieza diferente de un plástico. Consiste en colocar un elemento adhesivo entre las piezas a ser unidas existe una alta variedad de adhesivos que asegura un método para cada aplicación en la industria. Se deben considerar diferentes variables en este tipo de unión tales como: Compatibilidad química entre los componentes, Flexibilidad / rigidez, Temperatura a la que va a ser expuesto, Estéticas [7].

2.3.3 Uniones por soldadura

El proceso de soldadura es un método común en la industria para unir plásticos. Tal como se utiliza con los metales, el proceso de soldadura en polímeros

termoplásticos se logra a través de aplicación de calor para lograr una fusión entre los componentes a ser unidos. Existen varios tipos de soldadura para polímeros termoplásticos. Algunos de ellos pueden ser por medio de gas-caliente, calentamiento de herramienta, por inducción y por fricción. La mayor diferencia entre estas técnicas es la forma en la que se aplica calor en las piezas a ser unidas. El nivel de soldadura entre los componentes es basado en varios parámetros, incluyendo las propiedades del material, temperatura, presión y tiempo [1].

2.4 Soldadura por ultrasonido

La técnica de soldadura por ultrasonido se ha utilizado efectivamente por más de 40 años en el área de plásticos. Actualmente se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones como en la industria automotriz, médica, electrónica, empaque, artículos del hogar, entre otros. Un ejemplo sencillo son los tubos con pasta para limpieza dental. Algunos otros ejemplos se pueden observar en la figura 8.



Figura 8. Aplicaciones de soldadura por ultrasonido, a) industria médica, b) industria automotriz, c) artículos del hogar

La técnica de soldadura por ultrasonido se clasifica dentro del ramo de soldadura por fricción, el cual se utiliza para unir plásticos, metales y materiales compuestos. El proceso de soldadura de plásticos por ultrasonido consiste en la unión de materiales a través de vibraciones mecánicas de baja amplitud y de alta frecuencia para lo cual es necesario sujetar bajo presión las piezas. Dichas vibraciones generan una deformación en la superficie de las piezas debido al calor del movimiento mecánico, lo que provoca la unión molecular entre los materiales. Cabe señalar que el calor generado en la superficie de las piezas es suficiente para derretir el material y fusionarlas [2].

Un proceso típico de soldadura por ultrasonido comienza cuando una fuente de energía eléctrica cambia 60Hz a una frecuencia de ultrasonido alta de 20 a 40 KHZ. Una vez generada la energía eléctrica, se utiliza un convertidor para transformarla en energía mecánica. El convertidor es un transductor piezoeléctrico el cual es alimentado a través de corriente de altas frecuencias de la fuente de energía para generar vibraciones mecánicas a la misma frecuencia. Estas vibraciones son transmitidas a un intensificador (*Booster*), el cual ayuda a amplificar o disminuir la vibración. Para transmitir la energía al área de unión de las piezas se utiliza un sonotrodo, en este punto se utiliza el calor generado por la fricción para, temporalmente, derretir el plástico, lo que causa la fusión de los materiales. Este proceso ofrece diversas ventajas ya que es un proceso rápido, el cual realiza el proceso de soldado en fracciones de segundo; es un proceso limpio y no requiere de otros aportes para realizar el proceso de soldadura [3].

Los parámetros principales utilizados en soldadura por ultrasonido son la frecuencia de vibración, amplitud de vibración, fuerza de sujeción y tiempo de ciclo. Todos estos datos varían dependiendo del material y la geometría de las piezas a ser unidas. El método de soldadura por ultrasonido se aplica eficientemente en materiales termoplásticos amorfos y semicristalinos. En la figura 9 se muestran los principales componentes que conforman el equipo de soldadura por ultrasonido. Esta imagen se tomó de un manual de la compañía de Branson ultrasonics [11].

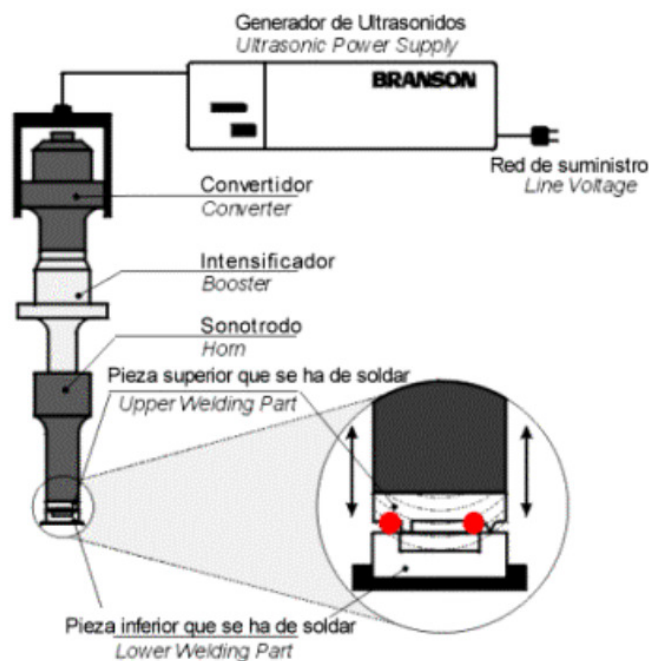


Figura 9. Componentes principales del equipo por ultrasonido [11]

2.4.1 Definiciones

A continuación se muestran algunas definiciones utilizadas previamente durante la descripción de un proceso de soldadura por ultrasonido [12].

Ultrasonido. Es una rama de la acústica que analiza las ondas de sonido en gases, líquidos y sólidos en frecuencias altas, por encima del oído humano, es decir, por encima de 20Khz.

Amplitud. Es la cantidad de expansión o contracción que realiza el sonotrodo.

Frecuencia. Es el número de ciclos por unidad de tiempo, donde 1Hz = 1 ciclo por segundo.

Punto nodal. Es la cantidad de expansión o contracción.

Convertidor. Convierte los pulsos eléctricos de alta frecuencia en vibraciones mecánicas con la ayuda de un componente piezoeléctrico.

Intensificador. Una vez obtenidas las vibraciones mecánicas del convertidor, pasan al intensificador para aumentar o disminuir la amplitud de las vibraciones.

Sonotrodo. Su función principal es transferir la vibración mecánica a los componentes a ser unidos. Pueden tener diferentes formas y tamaños. El material principal del cual se fabrican son titanio y aluminio.

Algunas de las definiciones anteriormente mencionadas se pueden observar en la figura 10, obtenida de manual del equipo Herrmann Ultrasonics [12].

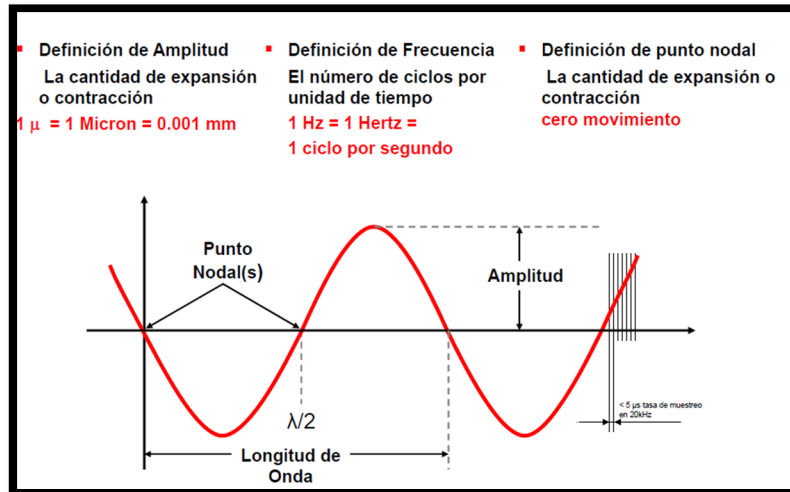


Figura 10. Definiciones de amplitud, frecuencia y punto nodal [12].

A continuación, en la figura 11 se muestran un ensamble de stack, en el cual se muestran las diferentes posiciones del sonotrodo, obtenido del manual de la compañía Herrmann ultrasonics [12].

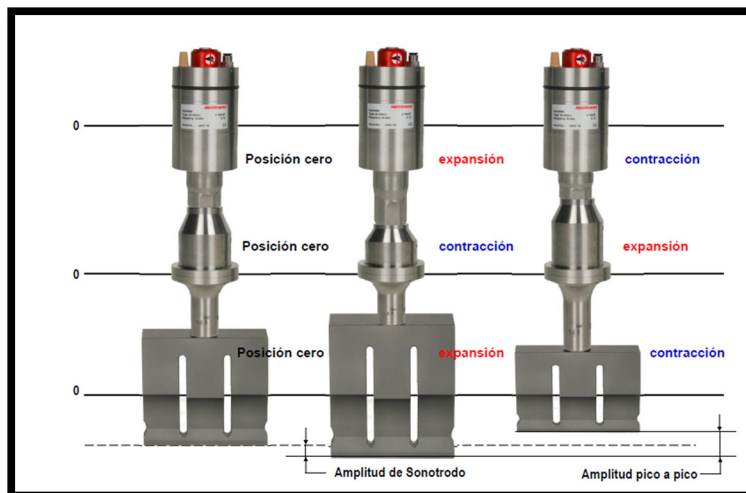


Figura 11. Expansión y contracción de stack [12]

2.4.2 Ventajas y desventajas

Ventajas.

Es un proceso rápido, económico, fácil de automatizar y es buena opción para producción en masa. Produce uniones consistentes de alta fuerza con equipo compacto. Los tiempos de soldadura son menores comparados con otros métodos y no hay necesidad de elaborar sistemas de ventilación para remover humo o calor. El proceso es eficiente en energía y resulta en alta productividad con costos bajos comparado con otros métodos de ensamble. El herramental se puede cambiar fácilmente en contraste con otros métodos de soldadura, resultando en un incremento de flexibilidad y versatilidad. Es una técnica altamente utilizada en la industria médica debido a que no genera contaminantes o fuentes de degradación en la soldadura la cual pudiera afectar la biocompatibilidad del aparato médico [13].

Desventajas

Se complica realizar uniones grandes de aproximadamente 250mm x 300mm, ya que no se pueden soldar en una sola operación. Además, dependiendo de las piezas a ser soldadas, los costos de herramental y *fixturas*, pueden ser altos [13].

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta se deriva de la metodología que se utiliza en la compañía para la generación de nuevos productos o de proyectos de alto impacto. La cual a su vez, tiene bases en la metodología DMAIC. Debido a que se tiene una idea clara de cuál es la principal causa raíz del problema, se optó por seguir la metodología propuesta en la imagen 12, la cual nos ayuda a confirmar la causa raíz, y a su vez poder realizar una comparación entre el proceso actual y el proceso alternativo en evaluación.

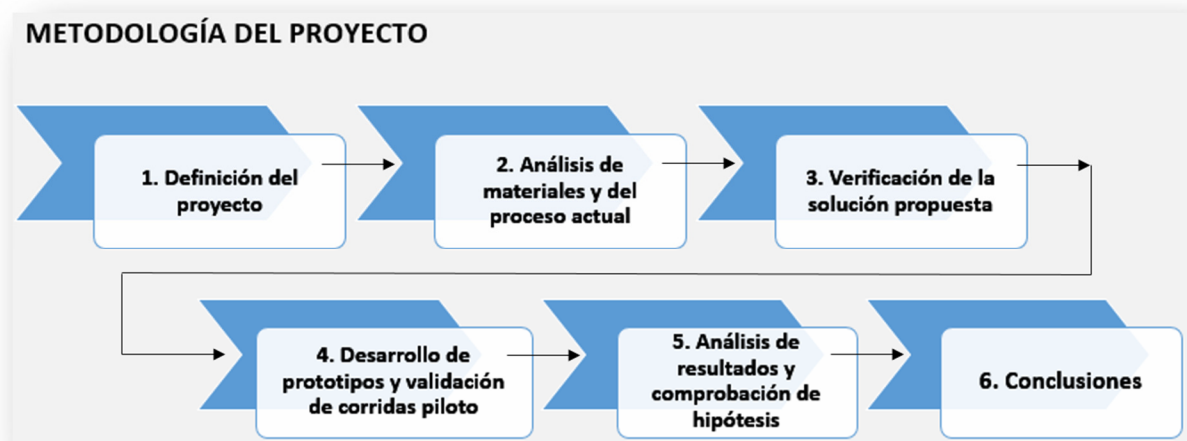


Figura 12. Metodología propuesta

Esta metodología se compone de 6 bloques principales los cuales permitirán realizar la evaluación del método alternativo que es soldadura por ultrasonido. A continuación se describe el contenido de cada bloque.

3.1 Fases de la metodología

1. Definición del proyecto

En esta parte del proyecto se conoce la principal razón del porque se está llevando a cabo la investigación, además de tener una idea general sobre lo que se quiere lograr con el mismo.

- Se define el problema
- Se establecen los objetivos
- Se desarrolla la Hipótesis

2. Análisis de materiales y del proceso actual

En esta etapa de la metodología se analizan los componentes que forman el ensamble que se quiere evaluar. Esto para conocer las propiedades de cada material y así poder tomar mejores decisiones durante la fase de pruebas.

También se analizan los diferentes procesos y estaciones por las cuales va fluyendo el ensamble. Esto con la intención de conocer cómo afecta cada parte del proceso a los componentes mencionados.

- Análisis de los materiales
- Análisis de proceso actual y equipo

3. Verificación de la solución propuesta

El propósito de esta etapa es conocer la propuesta alterna que se quiere evaluar, conocer el equipo, además de establecer los parámetros con los cuales debe funcionar apropiadamente.

- Selección del equipo
- Parámetros del equipo

4. Desarrollo de prototipos y validación de corridas piloto

Esta etapa de la metodología es donde se realizan las pruebas necesarias para poder obtener datos de los diferentes métodos a evaluar. Se seleccionan pruebas estadísticas las cuales ayuden a realizar una comparación de los datos.

- Desarrollo de *Fixturas*
- Primeros prototipos
- Unidades de prueba
- Definir método de prueba comparativa.

5. Análisis de resultados y comprobación de hipótesis

Una vez que se tienen los datos obtenidos en la fase de pruebas, se realizan las pruebas estadísticas, para poder realizar un análisis de los resultados y a su vez, definir si es posible realizar una corrida piloto, la cual ayude a rechazar o aceptar la hipótesis propuesta.

- Analizar resultados obtenidos de ambos métodos

- Comprobación de hipótesis

6. Conclusiones

Finalmente, en base al análisis de resultados previos se establecen las conclusiones del proyecto.

3.2 Diagrama de flujo

El diagrama de flujo que se muestra en la imagen 13, es la guía para realizar el procedimiento de evaluación del proyecto y se basa en la metodología propuesta, previamente explicada en la sección 3.1. Este diagrama parte de la definición del problema, donde se busca tener claro y lo más descriptivo posible el problema por el cual se está desarrollando el proyecto y como afecta al proceso actual. Después se analizan las propiedades de los materiales involucrados en el proceso, al igual que las diferentes estaciones de manufactura por las cuales pasan los componentes a ser evaluados. Posteriormente se analiza el método de soldadura por ultrasonido y se define el equipo a utilizar durante las pruebas experimentales. En esta sección también se definen los parámetros óptimos para la realización de las pruebas. El siguiente paso es preparar los materiales, *fixturas*, herramientas, las cuales ayuden en el proceso de evaluación. Es importante comprobar si los elementos a ser unidos son del mismo material, por lo tanto, existe una toma de decisión que se debe seguir para pasar a la siguiente sección, la cual hace referencia a validar el proceso actual a través de una prueba de fuerza (*pull test*), seguido por otra prueba de fuerza para validar el método propuesto. Una vez que se obtienen los datos de ambos métodos,

se seleccionan pruebas estadísticas que permitan analizar la información y ayuden a evaluar los resultados. Finalmente, se realiza una corrida piloto, construyendo unidades espumadas para evaluar el método propuesto y de esta manera, se desarrollan las conclusiones del proyecto.

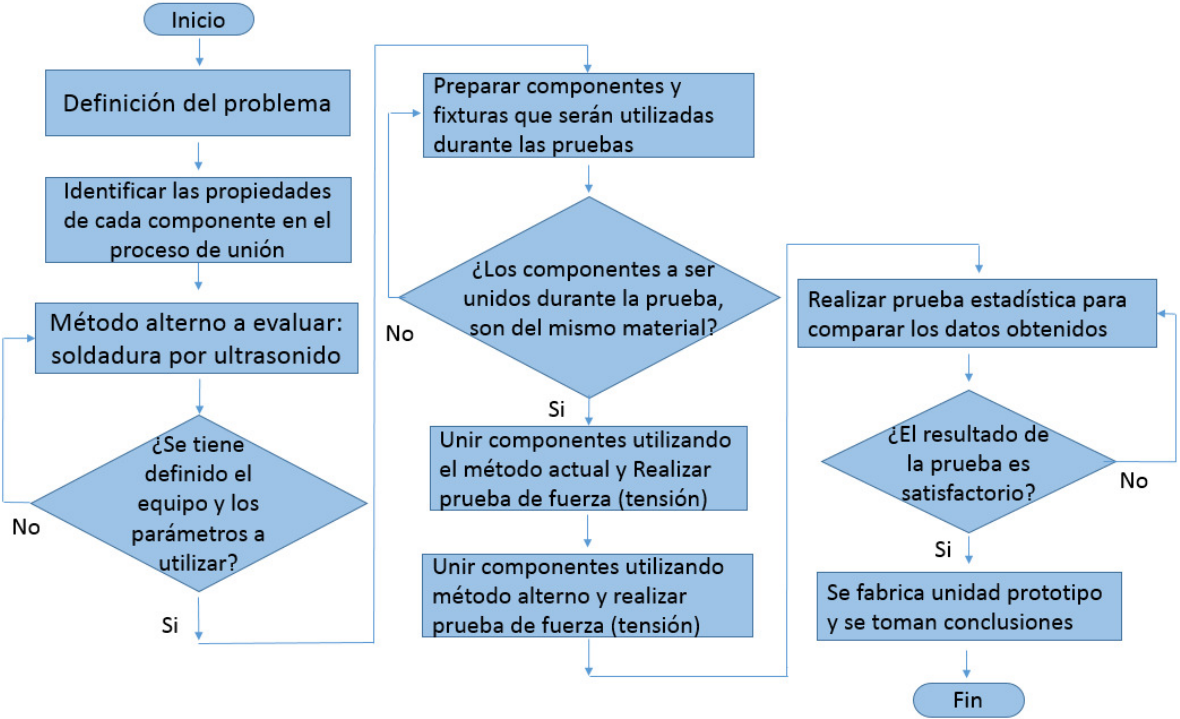


Figura 13. Diagrama de flujo

4. RESULTADOS

En este capítulo se analiza la información que se fue obteniendo tras seguir el diagrama de flujo. Este capítulo se divide en 6 secciones, donde cada sección incluirá su entregable para posteriormente ser analizado.

4.1 Definición del problema

La definición del proyecto se tiene clara desde el capítulo uno y se describe como:

Existe una unión ineficiente entre la base led y el compartimento *liner* de un refrigerador, generando fugas de poliuretano en el proceso de espumado.

Cabe mencionar que el análisis se está generando solo en un tipo de plataforma de refrigerador, el cual es FDBM el cual significa *French door bottom mount*, o bien, refrigerador de puerta francesa con congelador inferior.

En la imagen 14 se muestra un resumen de los defectos relacionados con base led espumada durante el año 2018. Se observa que los meses con mayores contribuciones de este defecto ocurren entre Abril y Agosto. Sin embargo, el mes de Noviembre también se mantiene con un número alto de incidencias. La plataforma de refrigerador tiene un volumen anual de aproximadamente 460000 unidades. Con lo cual, se puede obtener las partes por millón defectuosas o PPM en la plataforma de refrigerador FDBM.

$$PPM = \left(\frac{\text{Total de unidades defectuosas}}{\text{Unidades producidas}} \right) \times 1,000,000$$

Por lo tanto,

$$PPM = (491/460000) \times 1,000,000 = 1067 \text{ defectos por millón de piezas}$$

En base a los datos PPM calculados se observa que se producen alrededor de 1067 unidades con defecto por fuga de espuma en base led, por cada millón de unidades.

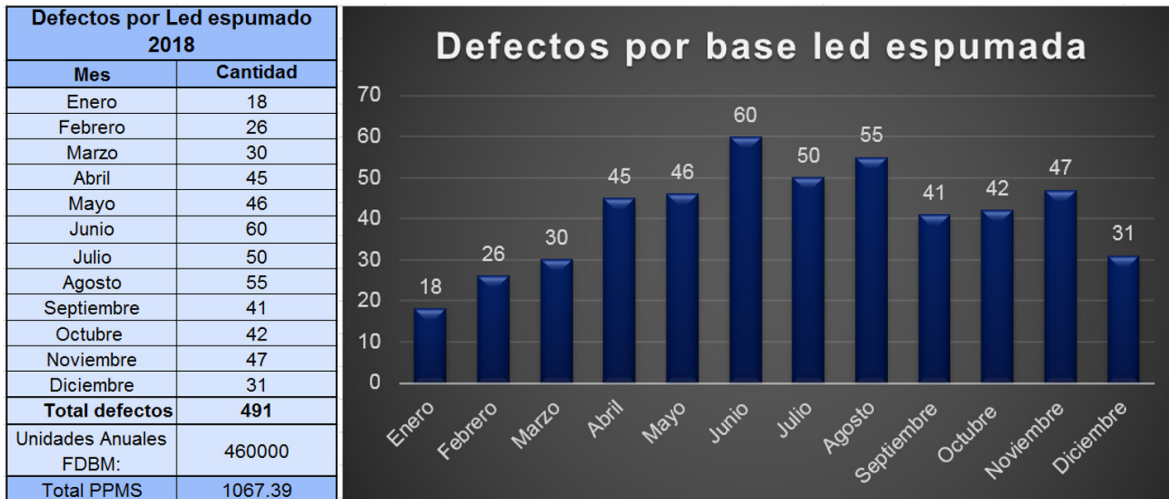


Figura 14. Reporte de defectos de calidad por base led espumada

El costo generado por estos defectos se analiza a continuación en la figura 15, la cual se compone de 3 elementos principales. Mano de obra, material y herramienta. Generando un costo anual de aproximadamente \$25,000 USD.

Costo por reparación de unidad			
Mano de obra	1 Persona por turno	\$8,000.00	\$24,000.00
Material	Conector	\$ 1.75	\$ 900.00
Herramienta	Espátulas y solventes por turno	\$ 27.00	\$ 81.00
TOTAL			\$24,981.00

Figura 15. Reporte de defectos de calidad por base led espumada

También se realizó un diagrama de causa y efecto el cual ayudara a conocer las causas principales por las cuales se estaba generando el problema de unión ineficiente entre base led y *liner*.

En el diagrama de causa – efecto, imagen 16, se observa que los 6 bloques tienen posibles causas por las cuales pudiera estar ocurriendo una unión ineficiente, a lo que posteriormente se evaluarán cada una de ellas.

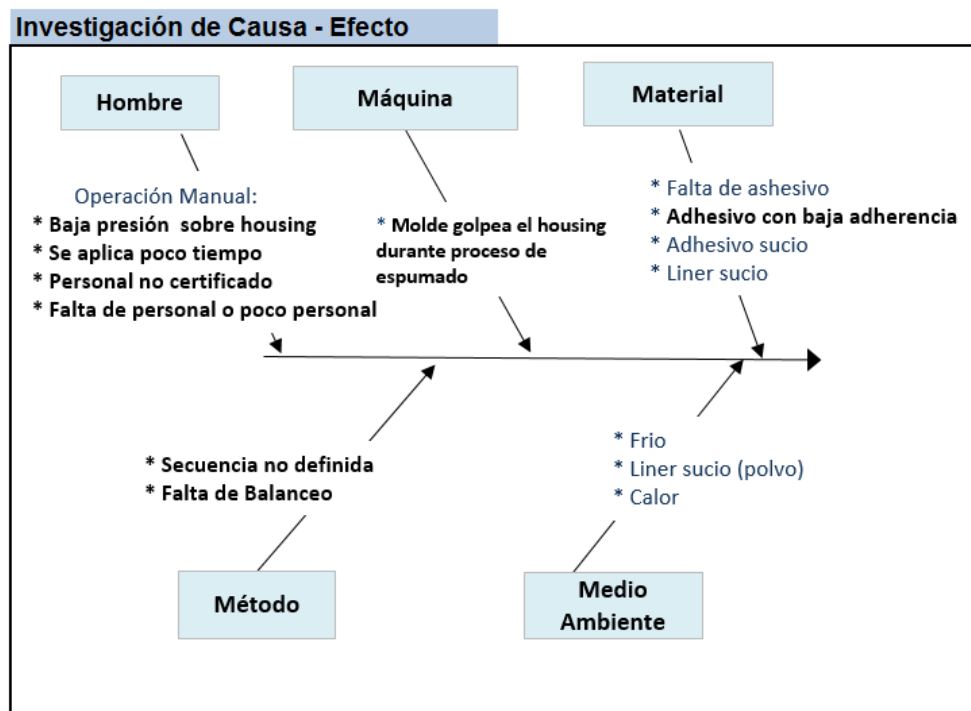


Figura 16. Diagrama causa y efecto

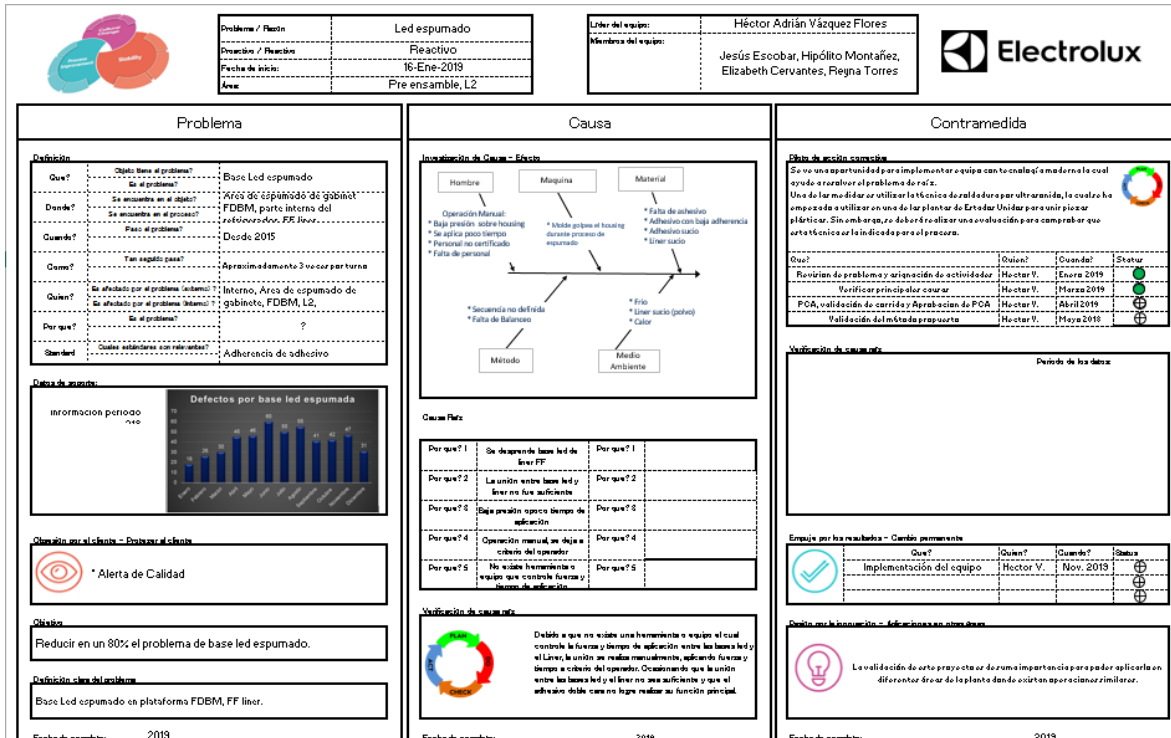


Figura 17. Documento de resolución de problemas

También, en esta etapa, se confirman los objetivos del proyecto y tal como se observó en el capítulo uno, el objetivo general es validar que el método de soldadura por ultrasonido es mejor opción que el proceso actual de unión con adhesivo doble cara para unir piezas plásticas.

Además, se anexan los objetivos particulares, los cuales son:

1. Identificar el valor de adherencia utilizando el método de unión por adhesivo
2. Identificar el valor de adherencia utilizando el método por unión con soldadura por ultrasonido
3. Encontrar la causa raíz del problema por unión ineficiente entre las piezas plásticas entre la base led y el compartimento *liner*

4. Demostrar que la técnica de soldadura por ultrasonido permite reducir el impacto ambiental en el proceso, eliminando en un 100% el uso de adhesivos doble cara y cinta adhesiva de papel.
5. Disminuir en un 80% los problemas de calidad por fuga de espuma en la base led después del proceso de espumado de gabinete.
6. Eliminar el costo generado por adhesivos

4.2 Análisis de componentes y del proceso

En esta sección se realiza un análisis de cada componente involucrado en el ensamble, además se describen los diferentes procesos por los cuales va pasando el ensamble del *liner* con el arnés. Esto con la finalidad de conocer en mayor detalle cada elemento que forma parte en el proceso.

4.2.1 Análisis de componentes

En el análisis de componentes se enlistan los componentes que forman parte del ensamble y se describen propiedades de cada material para así tener mayor información durante la etapa de pruebas.

4.2.1.1 Base led

La base led es una pieza moldeada con material HIPS. Poliestireno de alto impacto y tiene un espesor de 1.6 mm. A continuación se muestra en la figura 18 la imagen física y la vista isométrica del componente.

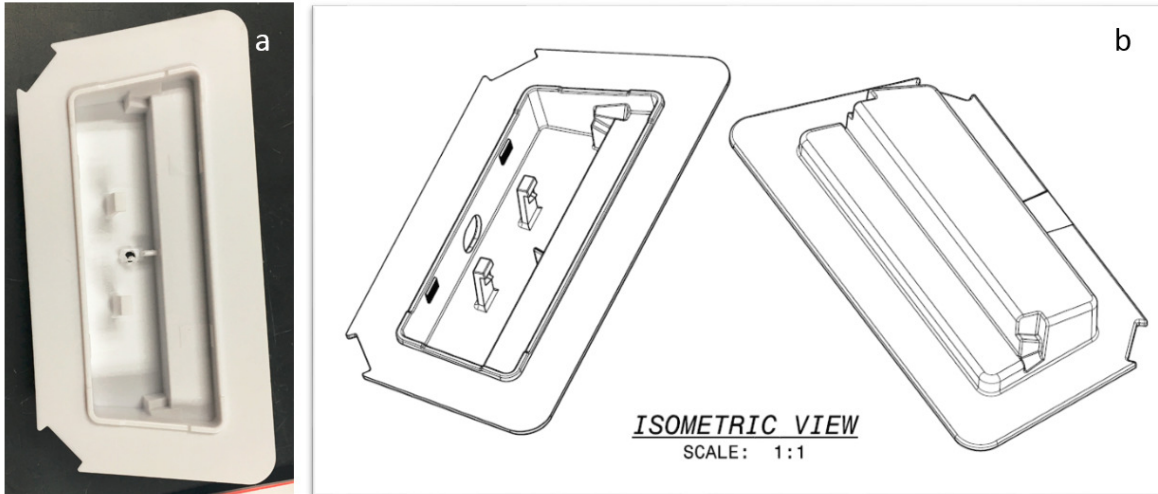


Figura 18. Imagen base led y vista isométrica

El dibujo de la base led especifica material tipo E, clase 1, lo cual se describe a continuación. Donde la clase E según la especificación del material, se refiere a Poliestireno de alto impacto, con un brillo alto. Respecto a la clase del material, se especifica American Styrenics Styron 478. En el cual se muestran las características en la figura 19.

Product Information

STYRON™ 478

North America, Central America and South America



High Impact Polystyrene

Product Characteristics

Good Gloss
 Excellent balance of flow and stiffness
 Food Contact Compliant⁽¹⁾
 UL Classification 94 HB⁽²⁾
 USP Class VI⁽³⁾

Typical Applications

Appliances
 Medical
 Housewares
 Consumer Electronics

Properties ⁽⁴⁾	English System		International System		ASTM Method
	Value	Units	Value	Units	
Physical Properties					
Melt Flow Index (200°C/5 Kg)	6.0	g/10 min	6.0	g/10 min	D-1238
Specific Gravity	1.04		1.04		D-792
Coefficient of Linear Thermal Expansion (10 ⁻⁵)	5	in/in/°F	9	cm/cm/°C	D-696
Rockwell Hardness – R scale	110		110		D-785
Mold Shrinkage(10 ⁻³)	4 to 8	in./in.	4 to 8	cm/cm	D-955
Injection Molded Properties					
Mechanical Properties					
Tensile Strength	4300	psi	30	MPa	D-638
Tensile Rupture	3700	psi	25.5	MPa	D-638
Elongation	60	%	60	%	D-638
Tensile Modulus	290000	psi	2000	MPa	D-638
Flexural Strength	5700	psi	39	MPa	D-790
Flexural Modulus	300000	psi	2100	MPa	D-790
Izod Impact @ 23°C	2.0	ft-lb/in	107	J/m	D-256
Izod Impact @ 23°C (Compression Molded)	1.6	ft-lb/in	85	J/m	D-256
Thermal Properties					
Heat Deflection Temperature					
@ 264 psi	177	°F	81	°C	D-648
@ 66 psi	194	°F	90	°C	D-648
Vicat Softening Temperature	216	°F	102	°C	D-1525

Figura 19. Propiedades HIPS en base led. (Fuente: compañía AMSTY)

En la imagen 19 se muestran las principales características con las cuales debe cumplir la resina. En índice de flujo de derretimiento es una de las características que nos interesa saber en este estudio, de igual manera se comparara con el del *liner*. El índice de este material debe ser de 6g/10min. Es decir, el peso del material derretido en gramos que fluye a través de un tubo delgado en 10 minutos.

4.2.1.2 Adhesivo doble cara y protector

El adhesivo doble cara es una tira la cual se coloca uniformemente sobre la base led tal como se muestra en la figura 20. El tipo de adhesivo es 3M 9629PC el cual es un adhesivo que provee unión alta en la mayoría de superficies plásticas.

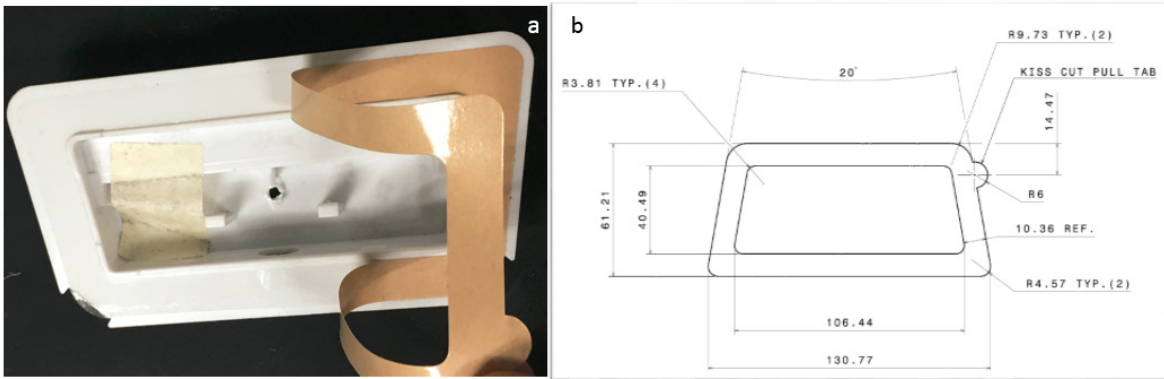


Figura 20. Adhesivo doble cara en todo la superficie de la base, con papel protector

El adhesivo doble cara 3M 9629PC tiene un espesor de 0.04mm, de color claro, el cual tiene una cubierta color café claro de *polycoat*

A continuación se muestra en la figura 21 las principales características del adhesivo 3M, obtenida de la página oficial de 3M.

3M™ Double Coated Tape with Quick Bonding Adhesive 360

9628B • 9628FL • 9629PC • 9629B • 9629FL

Construction						
Product Number	Faceside ¹ Adhesive Type/ Thickness	Carrier Type/ Thickness	Backside ² Adhesive Type/ Thickness	Liner Color, Type, Print	Liner Caliper ³	Total Tape Thickness (w/o liner)
3M™ Double Coated Tape 9629PC	0.00175" (0.04 mm)	0.0005" (0.013 mm) Clear PET	0.00175" (0.04 mm)	Tan, 58# Polycoated	0.0042" (0.11 mm)	0.004" (0.10 mm)

Typical Physical Properties and Performance Characteristics

Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

Product Number	2.0 mil (0.05 mm) 3M™ Double Coated Tape 9628B • 9628FL		4.0 mil (0.10 mm) 3M™ Double Coated Tape 9629PC • 9629B • 9629FL	
	Oz/in (N/25 mm) Faceside / Backside		Oz/in (N/25 mm) Faceside / Backside	
Adhesion to Polypropylene ASTM D3330 – 180 degree, 2 mil al foil				
- 30 seconds RT	60 (17) / 60 (17)		100 (28) / 100 (28)	
- 15 minutes RT	65 (18) / 65 (18)		120 (34) / 120 (34)	
- 72 hours RT	90 (25) / 90 (25)		150 (42) / 150 (42)	
Adhesion to other surfaces ASTM D3330 – 180 degree, 2 mil al foil, 72 hour RT				
ABS	90 (25) / 90 (25)		160 (45) / 150 (42)	
Polycarbonate	115 (32) / 115 (32)		170 (48) / 160 (45)	
Stainless Steel	100 (28) / 100 (28)		170 (48) / 160 (45)	
LDPE	50 (14) / 50 (14)		65 (18) / 65 (18)	
HDPE	60 (17) / 60 (17)		75 (21) / 65 (18)	
Shear Strength - ASTM D3654 Modified – (.5 inch ² sample size)				
1000 grams at 72°F (22°C)	>10,000 minutes		>10,000 minutes	
500 grams at 158°F (70°F)	>10,000 minutes		>10,000 minutes	
Relative High Temperature Operating Ranges:				
Long Term (days, weeks)	200°F (93°C)		200°F (93°C)	
Short Term (minutes, hours)	350°F (177°C)		350°F (177°C)	
Relative Solvent Resistance:	Very Good		Very Good	

Figura 21. Propiedades adhesivo doble cara 3M 9629PC. (Fuente: compañía de adhesivos 3M)

4.2.1.3 Cinta adhesiva de papel

En las especificaciones del dibujo, se requiere una cinta adhesiva de papel sensible a la presión, clase IV. Esta clase indica que el material debe ser papel, el tipo de adhesivo es sensible a la presión, con fuerza de tensión de al menos 20lbs/pulgada y adherencia de 35oz/pulgada. En la imagen 22 se puede observar la cinta adhesiva colocada sobre la base.



Figura 22. Cinta adhesiva de papel

A continuación se muestran las principales especificaciones que debe tener la cinta adhesiva de papel, la cual se utiliza como contención para disminuir el problema de fugas de espuma de poliuretano en la unión de base led y *liner*.

Spec. SP000001146

Class	Backing Material	Adhesive	Tensile Strength (/in.width minimum)	Adhesion (/in.width minimum)	Thickness (mils)	Temp Range (F)
IV	Paper	Pressure Sensitive	20 lbs.	35 oz.	0.0075	32-100 F

Figura 23. Propiedades adhesivo doble cara 3M 9629PC. (Fuente: compañía de adhesivos 3M)

4.2.1.4 Compartimento *liner*

El compartimento *liner* se genera a partir de una pieza extruida de 4.5 mm de espesor, fabricada con material HIPS Poliestireno de alto impacto. La cual posteriormente pasa a ser termoformada, terminando con un espesor de 1.52mm. En el dibujo de la pieza extruida se especifica material tipo G, clase 2. En donde el tipo G refiere a piezas extruidas para *liners* de gabinetes y *liners* de puertas. La clase 2 se refiere al tipo de resina y proveedor aprobado. En la imagen 24 se muestra una imagen del *liner* ya termoformado, pirceado y con algunos componentes ensamblados.

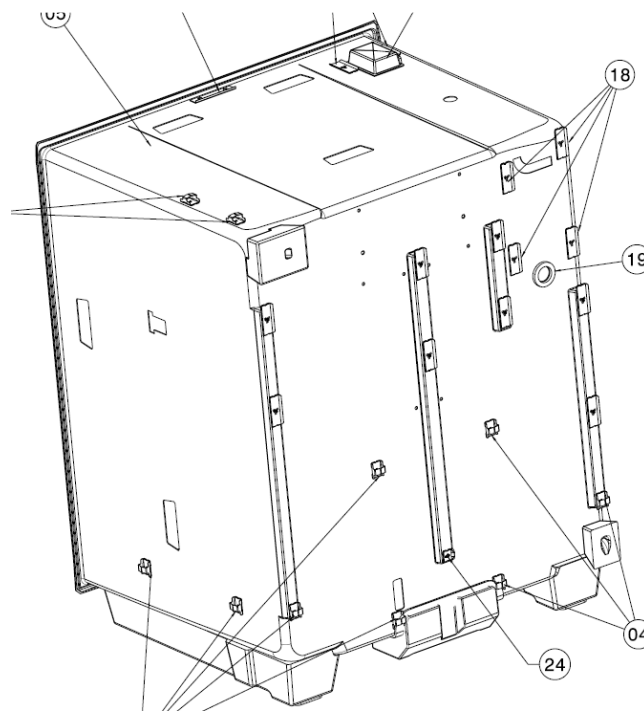


Figura 24. Compartimento plástico *liner*

El proveedor de la resina es American styrenics, el tipo de resina es Atech 1170.

Mismo proveedor que la resina de la base led.

Product Information

STYRON™ A-TECH™ 1170 

North America, Central America and South America

High Impact Polystyrene

Product Characteristics

Good Impact Resistance
 Consistent Colorability
 Easy Processing
 Food Contact Compliant⁽¹⁾
 UL Classification 94 HB⁽²⁾

Typical Applications

Extruded Sheet
 Refrigeration Accessories
 Small Appliances

Properties ⁽⁴⁾	English System		International System		ASTM Method
	Value	Units	Value	Units	
Physical Properties					
Melt Flow Index (200°C/5 Kg)	1.9	g/10 min	1.9	g/10 min	D-1238
Specific Gravity	1.04		1.04		D-792
Coefficient of Linear Thermal Expansion (10 ⁻⁵)	5	in/in/°F	9	cm/cm/°C	D-696
Rockwell Hardness – R scale	103		103		D-785
Mold Shrinkage(10 ⁻³)	4 to 8	in./in.	4 to 8	cm/cm	D-955
Injection Molded Properties					
Mechanical Properties					
Tensile Strength	3200	psi	22	MPa	D-638
Tensile Rupture	4200	psi	29	MPa	D-638
Elongation	75	%	75	%	D-638
Tensile Modulus	200000	psi	1400	MPa	D-638
Flexural Strength	4600	psi	32	MPa	D-790
Flexural Modulus	210000	psi	1450	MPa	D-790
Izod Impact @ 23°C	1.7	ft-lb/in	91	J/m	D-256
Izod Impact @ 23°C (Compression Molded)	1.4	ft-lb/in	75	J/m	D-256
Thermal Properties					
Heat Deflection Temperature					
@ 264 psi	175	°F	79	°C	D-648
@ 66 psi	195	°F	90.5	°C	D-648
Vicat Softening Temperature	219	°F	104	°C	D-1525

Figura 25. Propiedades HIPS en liner. (Fuente: compañía AMSTY)

4.2.2 Análisis del proceso actual

En esta sección se describen los procesos por los cuales van pasando el sub-ensamble de *liner* con el arnés led.

4.2.2.1 Ensamble de arnés led con compartimento liner

En la figura 26 se muestra el compartimento liner con el arnés led ensamblado. Esta es una operación totalmente manual donde no se utiliza ningún equipo ni herramienta. Las operaciones que realiza el operador son las siguientes:

- Colocar el *liner* sobre el *conveyor*,
- Tomar el arnés led para direccionarlo (rutearlo) sobre el *liner*,
- Remover los plásticos protectores de las ocho bases
- Unir las ocho bases sobre el *liner*.

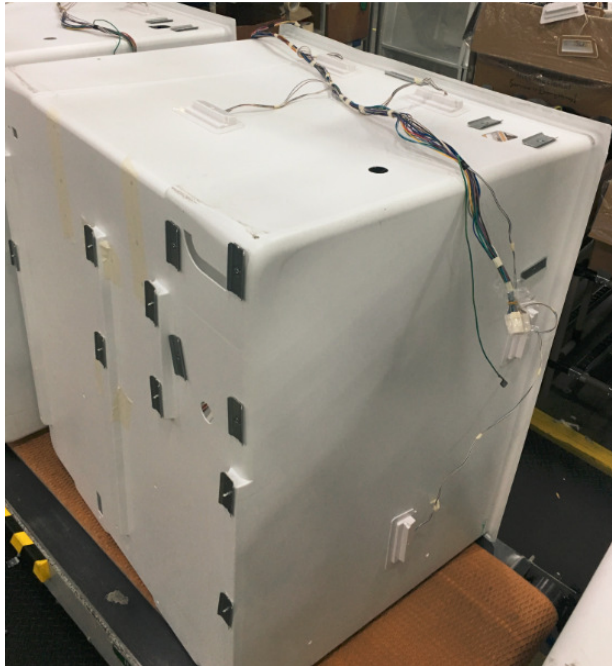


Figura 26. Ensamble compartimento liner con arnés led

4.2.2.2 Colocación de cinta adhesiva de papel como contención.

El sub-ensamble de *liner* con el arnés led pasa a otro *conveyor* donde se colocan diversos componentes, además, se colocan 2 tiras de cinta de papel de 2.00" x 6.00"

de longitud como contención para disminuir el problema de fugas de espuma de poliuretano en la unión de base led y *liner*.

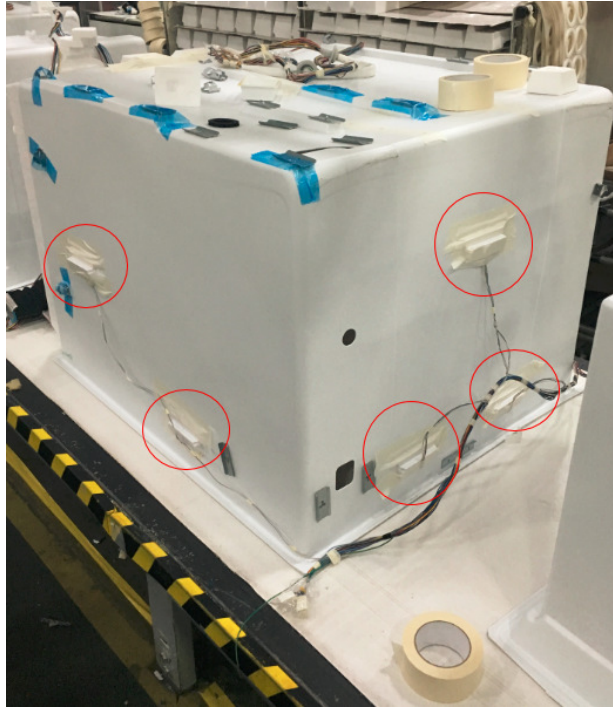


Figura 27. Uso de cinta adhesiva de papel como refuerzo

Esta contención lleva años en la operación ya que en su momento ayudo a disminuir el problema por bases espumadas en el área de espumado de gabinete. Lo cual significa que el problema tiene varios años sin llegar a una solución óptima.

4.2.2.3 Ensamble de liner terminado con gabinete

Una vez que el sub-ensamble de *liner* superior es terminado, pasa a otra estación de *conveyor*, donde se ensambla dentro del gabinete, junto con el *liner* inferior del congelador.



Figura 28. Ensamble de compartimento liner con gabinete

4.2.2.4 Espumado de gabinete con poliuretano

En el área de espumado de gabinete se genera introduce el poliuretano por una entrada inferior del gabinete. Este proceso dura aproximadamente 90 segundos. La temperatura del gabinete llega a alcanzar los 150 grados Fahrenheit.



Figura 29. Ensamble de gabinete con liners superior e inferior ya espumado.

4.3 Equipo y herramienta para desarrollo de pruebas

4.3.1 Equipo de soldadura por ultrasonido

En el equipo de soldadura por ultrasonido se evaluaron 2 equipos. Un equipo de la compañía Herrmann Ultrasonics y Branson Ultrasonics tal como se indica en la figura 30.

Ambos equipos son están diseñados para trabajo manual. A continuación se muestran sus características.



Especificaciones eléctricas equipo Herrmann		
Linea de voltaje:	230 V @ 50/60 Hz	
Modelo	Potencia	Máxima potencia
35 KHz	500 W	No Disp.

Especificaciones eléctricas equipo Branson		
Linea de voltaje:	100 a 120 V @ 50/60 Hz	
Modelo	Potencia	Máxima potencia
20 KHz	550 W	635W

Figura 30. Imagen Izq. Equipo Herrmann ultrasonic y der. Equipo Branson Ultrasonic

Ambos equipos tienen un sistema de operación muy parecido, en donde la fuente de energía de cada equipo convierte voltaje de corriente alterna a 20, 30 o 40 KhZ de energía eléctrica. Esta energía eléctrica de alta frecuencia se direcciona al

convertidor, donde es transformada en movimiento mecánico a frecuencias de ultrasonido con la ayuda del elemento piezoeléctrico el cual hace que el convertidor se expanda y se contraiga. El convertidor vibra en dirección longitudinal y transmite el movimiento a un intensificador (*Booster*), el cual ayuda a amplificar o disminuir la vibración. Finalmente, el sonotrodo o cuerno se encarga de transmitir a energía al área de unión de las piezas que se quieren ensamblar.

Ambos equipos cuestan alrededor de \$9000 USD, sin contemplar los sonotrodos y pueden unir materiales termoplásticos entre 1mm (0.039”) y 3mm (.118”) de espesor.

Los materiales más comunes para ser unidos por soldadura por ultrasonido son:

- Poliestireno (PS)
- polipropileno (PP)
- Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)
- Poliamida (PA)

4.3.2 Medidor de fuerza digital Mark-10, series 4 con base motorizada

Otro equipo importante que se utilizará durante la evaluación es un medidor de fuerza diseñado para medir fuerza de tensión y compresión. Con capacidades de 0.12 lb a 500 Lb (0.5 N to 2500 N).



Figura 31. Medidor de fuerza digital Mark-10, series 4 con base motorizada

4.3.3 Báscula digital

También se utilizará una báscula digital para controlar la fuerza aplicada en las muestras con adhesivo doble cara. También se reportará el peso de la pistola del equipo de soldadura por ultrasonido y se tratará de aplicar la misma fuerza al unir las piezas por el método de ultrasonido.



Figura 32. Báscula digital

4.3.3 Otras herramientas

Para desarrollar las pruebas se hará uso de varios sujetadores, los cuales ayuden a detener las piezas a ser unidas sobre una mesa. También se utilizarán sujetadores para evitar el movimiento de las piezas cuando se realice las pruebas de tensión. El destornillador se utilizará para colocar un tornillo sobre la base led.

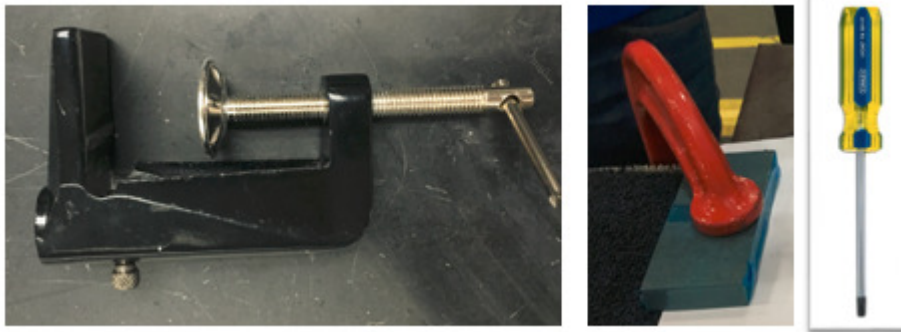


Figura 33. Sujetadores y destornillador phillips

4.4 Validación de método actual Vs propuesto

En esta sección se documenta el proceso para realizar las pruebas de tensión, utilizando los dos métodos que se describieron en la hipótesis. Unión por adhesivo y unión por soldadura por ultrasonido.

4.4.1 Prueba de tensión método actual con adhesivo doble cara

Para realizar la prueba de tensión con el método actual, se siguieron una serie de pasos, los cuales se describen a continuación:

1. Separar 16 bases led de los arneses para mejor manejo.
2. Cortar 16 piezas de *liner* con el corte para montar la base led.
3. Barrenar parte superior de base led para colocar tornillo autorroscante.
4. Retirar cubierta de adhesivo doble cara.
5. Colocar base led sobre *liner*, aplicar fuerza de aproximadamente 10kg por 3 segundos.
6. Repetir hasta terminar las 16 muestras.
7. Colocar ensamble en mesa de trabajo y colocar gancho.
8. Realizar prueba de tensión (Prueba de jalón) con equipo medidor de fuerza Mark-10 series 4.
9. Documentar resultados.

En la figura 34 se muestran cada uno de los pasos realizados durante la realización de la prueba con el método actual.



Figura 34. Pruebas con método actual adhesivo doble cara

Los datos obtenidos de las 16 muestras se muestran en la figura 35, obteniendo un promedio de 4.84 Kg F (47.46 N).

Unión por adhesivo	
Muestra	Kg F
Muestra 1	6.85
Muestra 2	2.00
Muestra 3	12.95
Muestra 4	1.35
Muestra 5	0.75
Muestra 6	2.90
Muestra 7	3.25
Muestra 8	4.85
Muestra 9	12.20
Muestra 10	7.80
Muestra 11	3.30
Muestra 12	2.15
Muestra 13	6.85
Muestra 14	3.25
Muestra 15	3.00
Muestra 16	4.00
	77.45
Promedio	4.84

Figura 35. Datos de prueba de tensión con método actual adhesivo doble cara

4.4.2 Validación de método propuesto con ultrasonido

Para realizar la prueba de tensión con el método propuesto de soldadura por ultrasonido, se siguieron los siguientes pasos:

1. Separar 16 bases led de los arneses para mejor manejo.
2. Retirar el adhesivo doble cara de la superficie de la base aplicando calor.
3. Cortar 16 piezas de *liner* con el corte para montar la base led.
4. Barrenar parte superior de base led para colocar tornillo autorroscante.
5. Colocar base led sobre *liner*.
6. Preparar equipo de soldadura con los siguientes parámetros. Amplitud de 95%, con un tiempo de 1 segundo, fuerza de aplicación aproximadamente 20 kg F.
7. Iniciar con prueba, soldando cada sección lateral de la base led, tal como se muestra en las imágenes de la figura XX.
8. Colocar ensamble en mesa de trabajo y colocar gancho.
9. Realizar prueba de tensión (Prueba de jalón) con equipo medidor de fuerza Mark-10 series 4.
10. Documentar resultados.

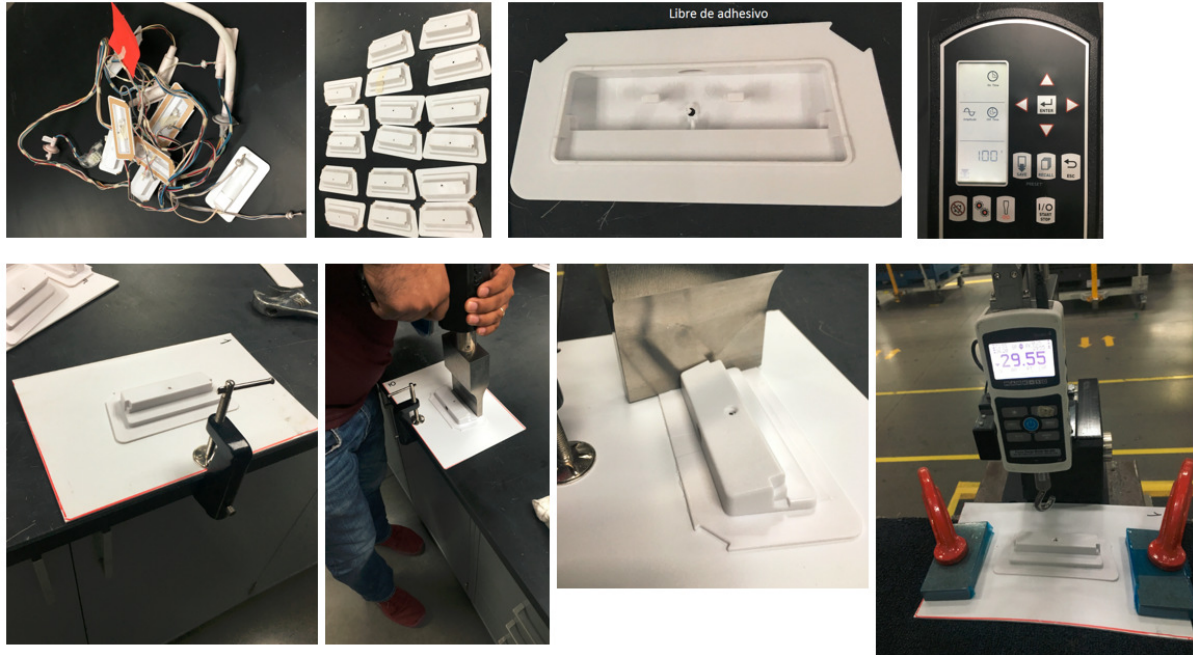


Figura 36. Desarrollo de pruebas con método propuesto ultrasonido

A continuación se muestran en la figura 37 los datos obtenidos de las 16 muestras, con un promedio de datos de 26.16 Kg F (256.54N).

Soldadura por ultrasonido	
Muestra	Kg F
Muestra 1	29.55
Muestra 2	29.95
Muestra 3	29.80
Muestra 4	34.10
Muestra 5	26.30
Muestra 6	27.05
Muestra 7	25.60
Muestra 8	24.80
Muestra 9	11.95
Muestra 10	32.65
Muestra 11	31.65
Muestra 12	28.00
Muestra 13	28.60
Muestra 14	13.95
Muestra 15	21.20
Muestra 16	23.40
	418.55
Promedio	26.16

Figura 37. Datos de prueba de tensión con método actual adhesivo doble cara

4.5 Desarrollo y análisis de pruebas estadísticas

En este apartado se realizan varias pruebas estadísticas en base a los datos obtenidos de las pruebas de tensión utilizando el método actual y el método propuesto. Se inicia analizando la normalidad de los datos, después la capacidad del proceso. En caso de tener normalidad en el proceso, se realizará una prueba t de dos muestras para comparar las medias de las poblaciones.

4.5.1 Prueba de normalidad en los datos

La primera prueba estadística que se realizó con los datos obtenidos fue la prueba de normalidad en los datos. Iniciando con los datos de la unión por adhesivo, se puede observar en la imagen 38 que los datos no provienen de una distribución normal ya que el valor $P < 0.05$. Utilizando la prueba de Anderson Darling.

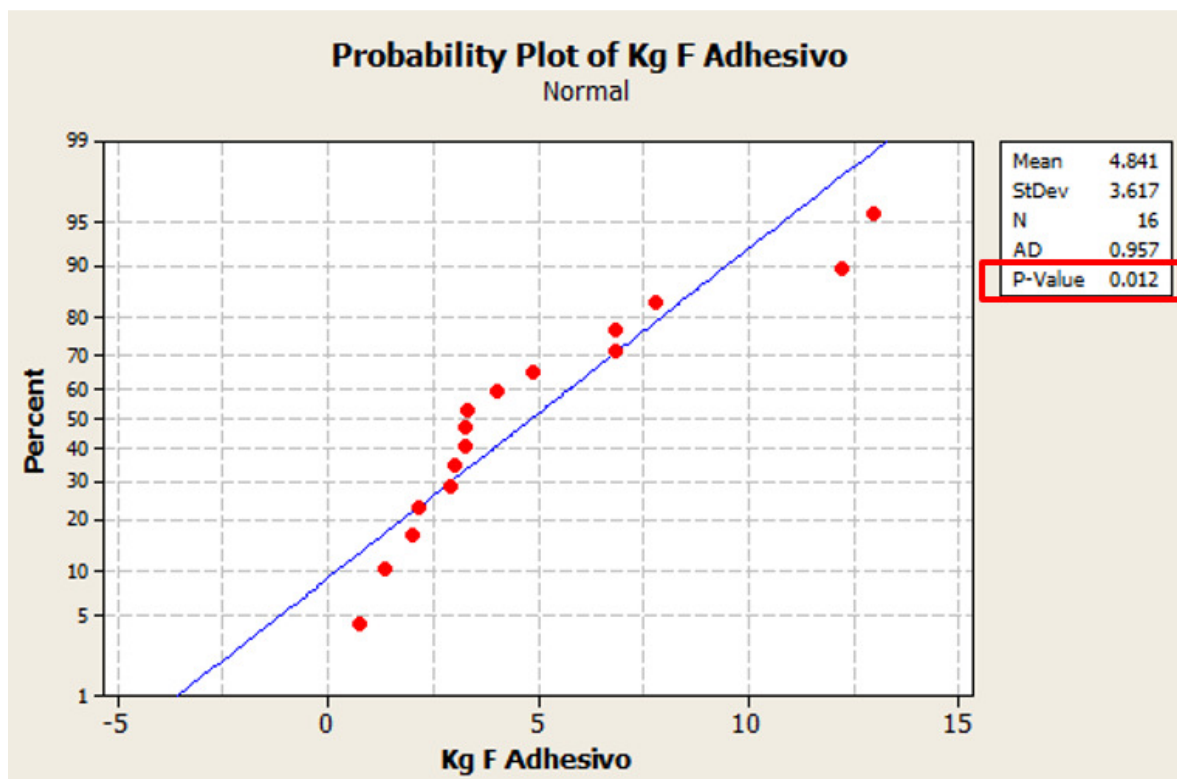


Figura 38. Prueba de normalidad, datos de unión por adhesivo

Respecto a los datos obtenidos con la unión de soldadura por ultrasonido, se mostró que los datos si presentaron una distribución normal. Esto se puede observar en la imagen 39, donde se muestra que el valor $P > 0.05$. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, la cual establece que existe normalidad en los datos.

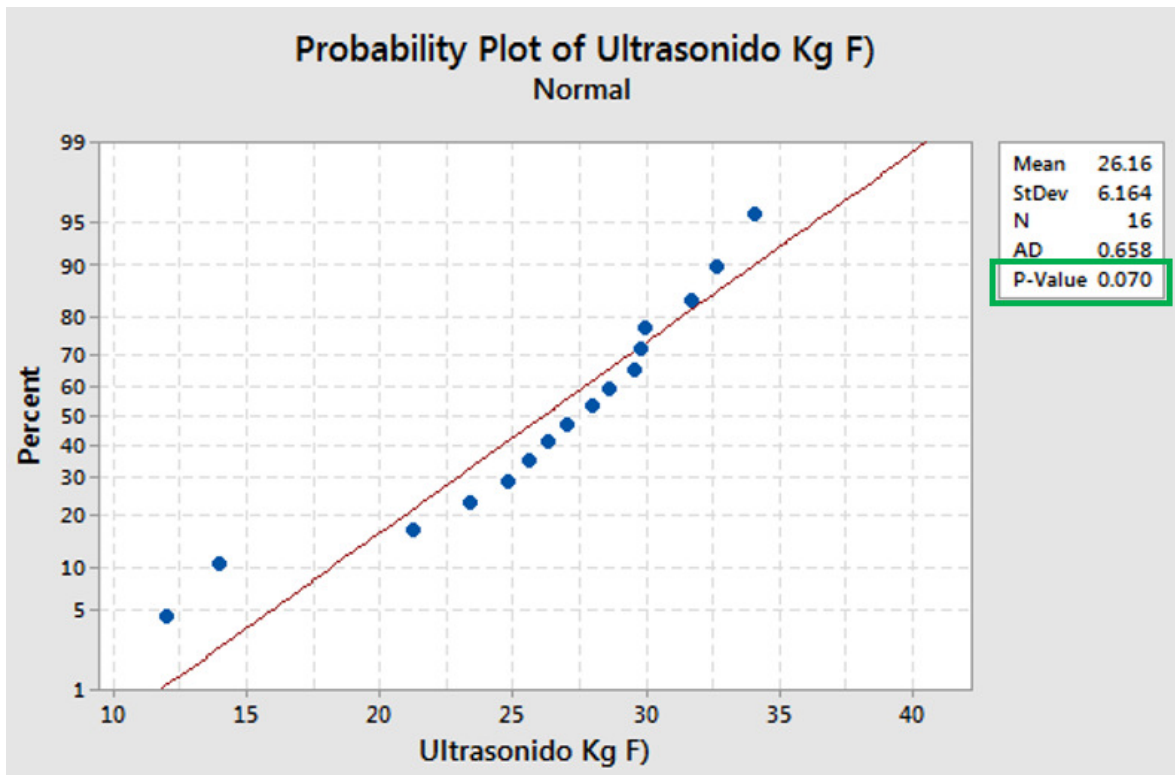


Figura 39. Prueba de normalidad, datos de unión por ultrasonido

Debido a que en la primera recolección de datos no se obtuvo normalidad en los datos obtenidos en la unión por adhesivo, se decidió incrementar las poblaciones de las dos técnicas de unión, a pesar de que los datos de ultrasonido si presentaba normalidad en los datos.

Se agregaron 5 muestras más en cada tipo de unión para tratar de obtener normalidad en los datos. Los nuevos datos obtenidos, se muestran en la tabla 40. En los nuevos datos se observa un promedio de 5.47 Kg F en la unión por adhesivo y 21.59 en la unión por ultrasonido.

Unión por adhesivo		Unión por Ultrasonido	
Muestra 1	6.85	Muestra 1	29.55
Muestra 2	2.00	Muestra 2	29.95
Muestra 3	12.95	Muestra 3	29.80
Muestra 4	1.35	Muestra 4	34.10
Muestra 5	0.75	Muestra 5	26.30
Muestra 6	2.90	Muestra 6	27.05
Muestra 7	3.25	Muestra 7	25.60
Muestra 8	4.85	Muestra 8	24.80
Muestra 9	12.20	Muestra 9	11.95
Muestra 10	7.80	Muestra 10	32.65
Muestra 11	3.30	Muestra 11	31.65
Muestra 12	2.15	Muestra 12	28.00
Muestra 13	6.85	Muestra 13	28.60
Muestra 14	3.25	Muestra 14	13.95
Muestra 15	3.00	Muestra 15	21.20
Muestra 16	4.00	Muestra 16	23.40
Muestra 17	10.10	Muestra 17	24.30
Muestra 18	4.65	Muestra 18	15.95
Muestra 19	4.45	Muestra 19	24.05
Muestra 20	9.65	Muestra 20	14.65
Muestra 21	8.55	Muestra 21	18.95
	114.85		516.45
Promedio	5.47	Promedio	24.59

Figura 40. Nuevos datos obtenidos en las pruebas de tensión con método actual y método propuesto

Se volvió a realizar la prueba de normalidad en los datos, iniciando por la unión con adhesivo, donde se muestra que si presentaron una distribución normal. Esto se puede observar en la imagen 41, donde se observa que el valor P obtenido fue de 0.066. Por lo tanto, debido a que el valor $P > 0.05$, entonces, no se rechaza la hipótesis nula, la cual establece que existe normalidad en los datos de unión con adhesivo doble cara.

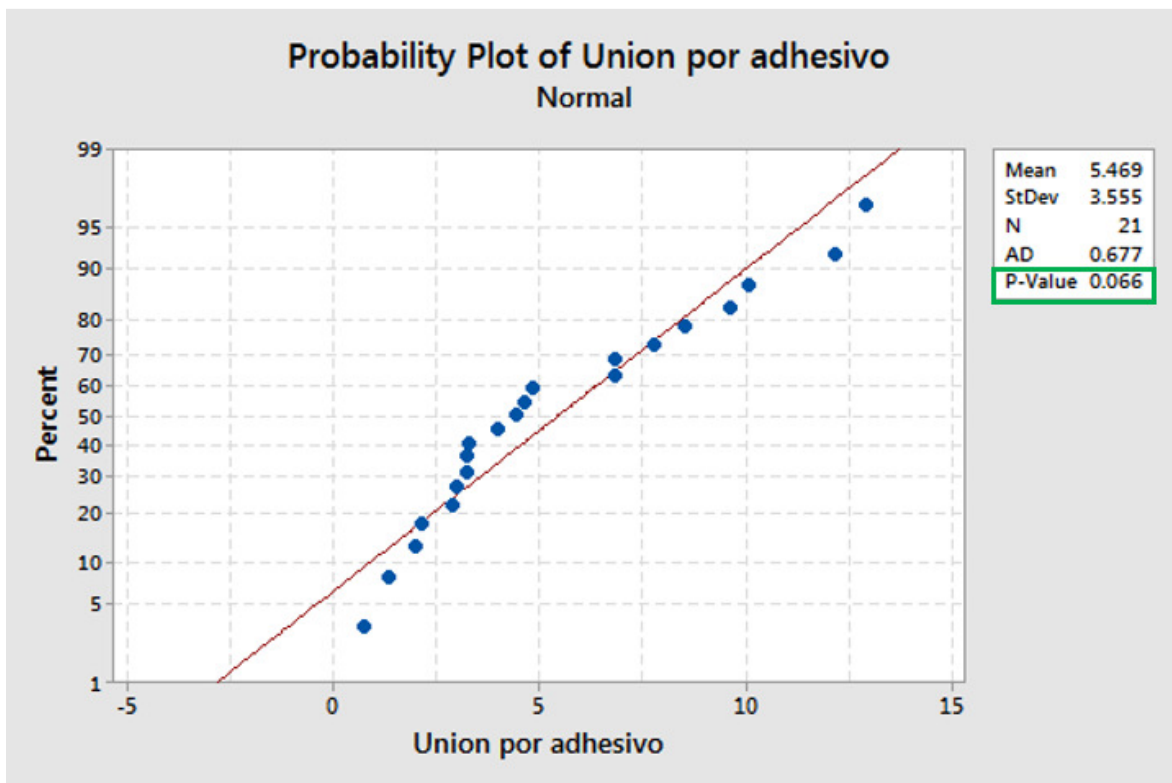


Figura 41. Prueba de normalidad, datos de unión por adhesivo

Como se mencionó anteriormente, también se aumentó la cantidad de muestras en la unión con soldadura por ultrasonido, a pesar de que inicialmente los datos si presentaban normalidad. La nueva gráfica de normalidad se muestra en la figura XX, la cual también muestra normalidad en los datos.

En la figura 42 se puede observar que el valor P obtenido fue de 0.231. Entonces, debido a que $P > 0.05$, no se rechaza la hipótesis nula, la cual establece que existe normalidad en los datos de unión con soldadura por ultrasonido.

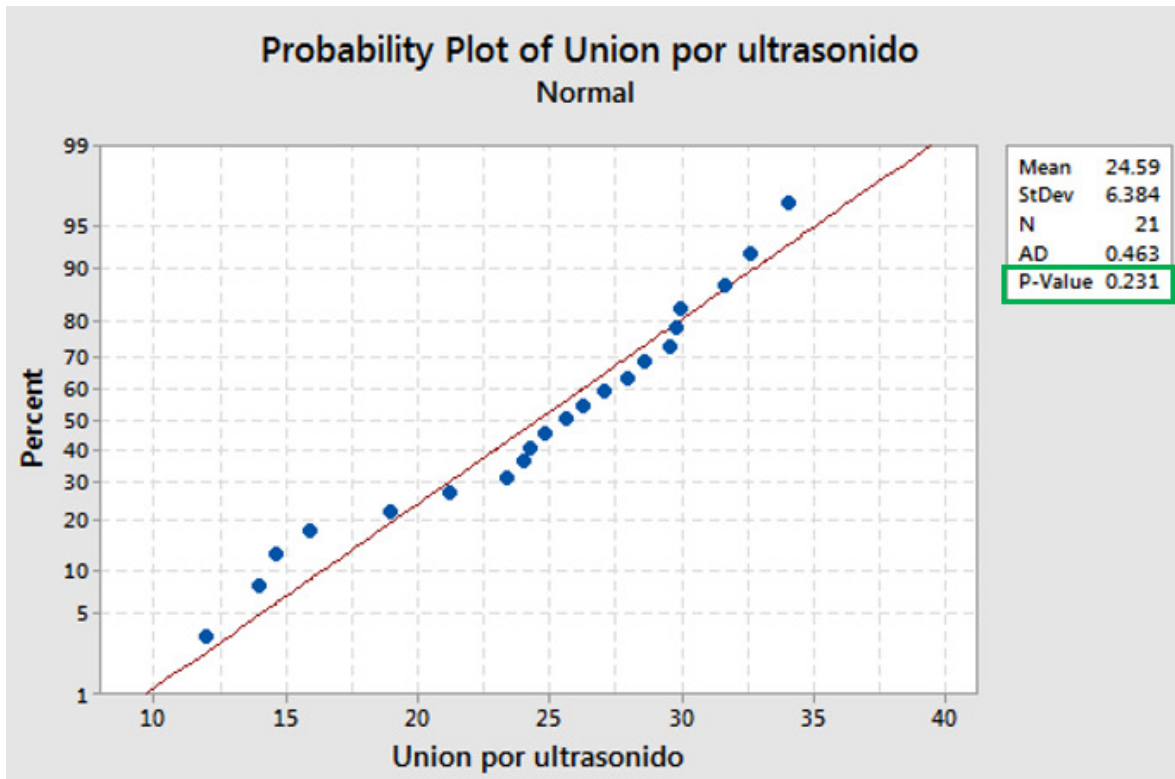


Figura 42. Prueba de normalidad, datos de unión por ultrasonido

4.5.2 Capacidad de proceso

Ya que se obtuvo normalidad en los datos, se realizaron pruebas de capacidad de proceso en las dos técnicas de unión. Iniciando por el método de adhesivo doble cara, en la figura XX se observa valor de PPK = 0.22 y CPK de 0.23.

La capacidad de proceso de unión por adhesivo es inaceptable debido a que los valores de PPK y CPK se encuentran muy por debajo del valor aceptable 1.3. Este valor de referencia es aceptado por muchas industrias quienes toman como aceptable valores de PPK y CPK mayores a 1.3

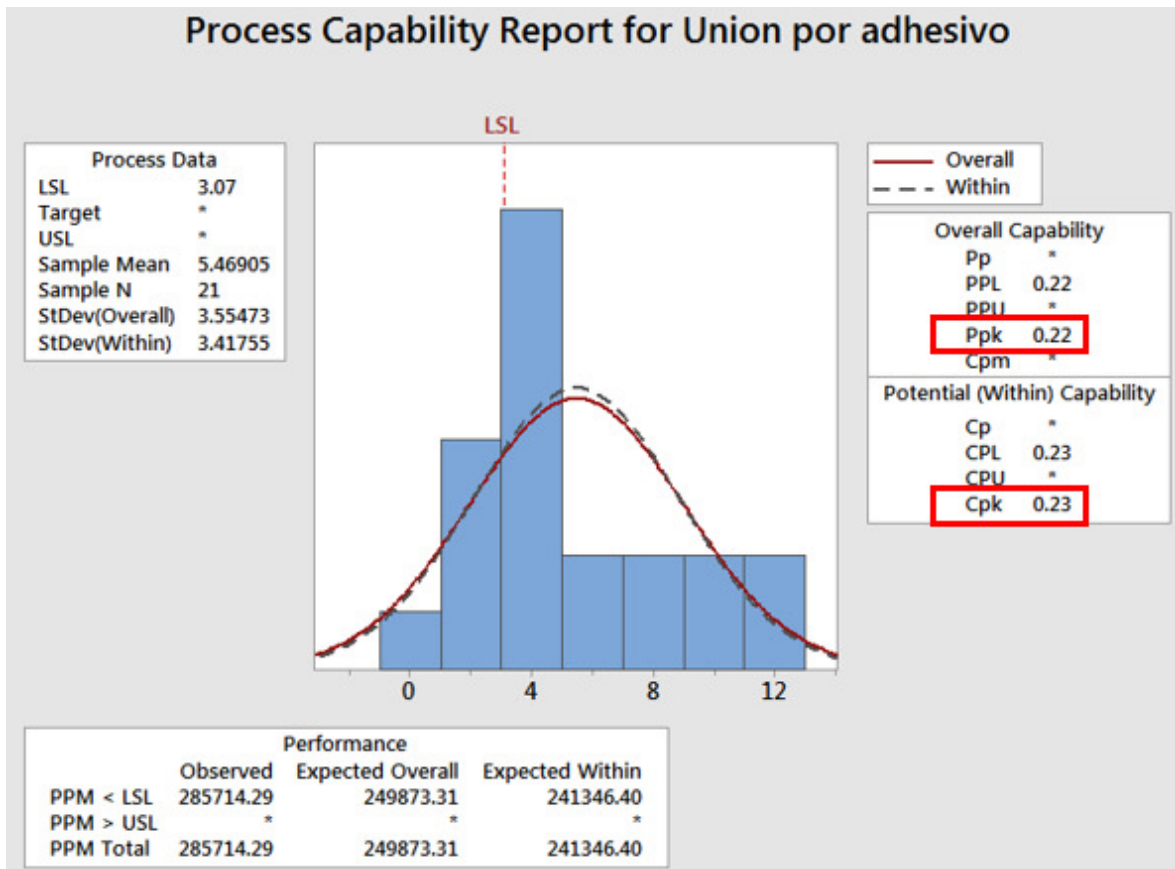


Figura 43. Capacidad de proceso con método actual adhesivo doble cara

En la siguiente figura XX se analizó la capacidad de proceso con el método propuesto de soldadura por ultrasonido. En donde al igual que en la gráfica anterior, se realiza una comparación de los valores PPK y CPK contra el valor de referencia de 1.3.

El valor obtenido de Ppk fue de 1.05 y CPK de 1.38. Comparando con el valor de referencia de 1.3, el valor de Ppk se encuentra ligeramente debajo del valor de referencia, pero definitivamente mejor que en la unión por adhesivo. El valor de Cpk se encuentra por encima del valor de referencia. Mostrando un proceso adecuado.

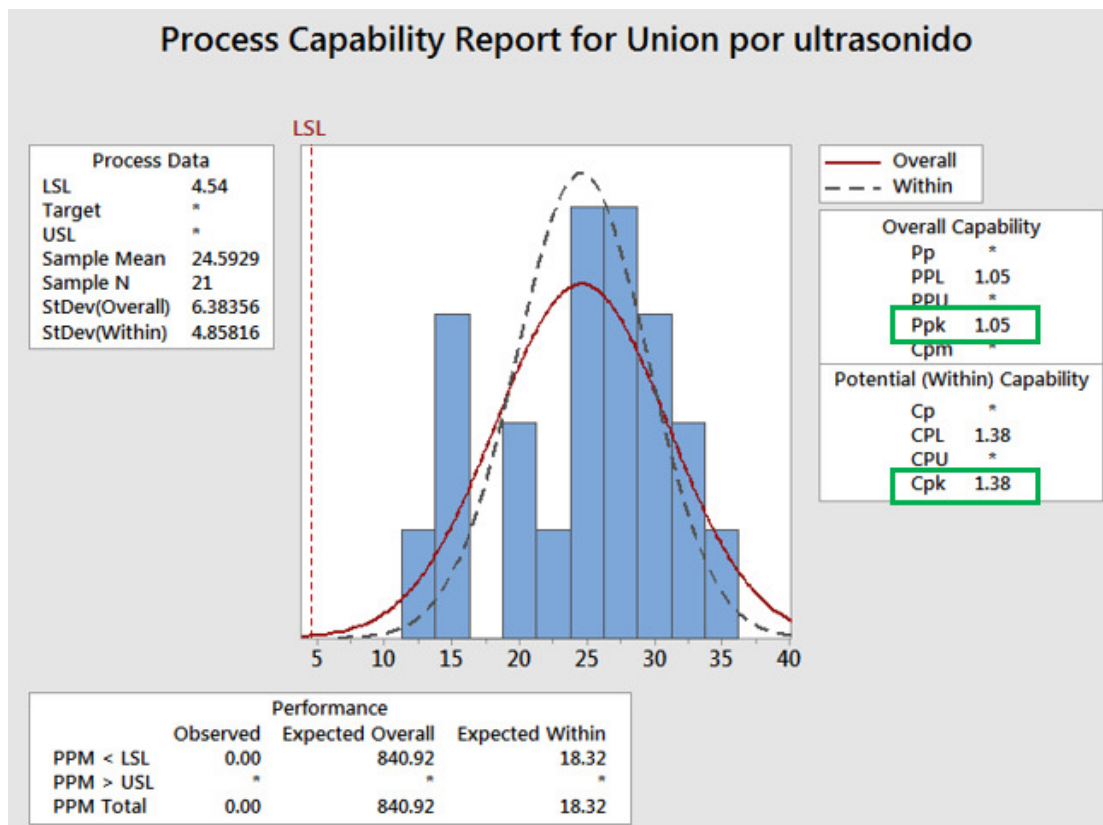


Figura 44. Capacidad de proceso con método actual adhesivo doble cara

4.5.3 Prueba t de 2 muestras

Se realizó la prueba t de dos muestras para comparar si las medias entre las dos técnicas de unión son diferentes. Es por eso que al realizar las pruebas de normalidad, se tuvo que incrementar las muestras para encontrar normalidad en los datos.

Para realizar esta prueba, se define la hipótesis nula y la hipótesis alterna, las cuales se consideran como:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 < \mu_2 \quad \text{Donde:}$$

μ_1 = media método de unión por adhesivos

μ_2 = media método de unión con soldadura por ultrasonido

A continuación, en los datos obtenidos de la prueba t se muestra un valor P de 0.000. Por lo tanto, debido a que el valor $P < 0.05$, se concluye que existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, se demuestra que la unión de soldadura por ultrasonido es mejor que la unión por adhesivos.

Two-Sample T-Test and CI: Union por ultrasonido, Union por adhesivo

Two-sample T for Union por ultrasonido vs Union por adhesivo

	N	Mean	StDev	SE Mean
Union por ultrasonido	21	24.59	6.38	1.4
Union por adhesivo	21	5.47	3.55	0.78

Difference = μ (Union por ultrasonido) - μ (Union por adhesivo)

Estimate for difference: 19.12

95% CI for difference: (15.87, 22.38)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 11.99 **P-Value = 0.000** DF = 31

En la siguiente imagen se analiza el gráfico de *boxplot*, en el cual se comparan las medias de las dos técnicas, en donde se observa que el método alterno por ultrasonido, requiere mayor fuerza para separar los dos componentes.

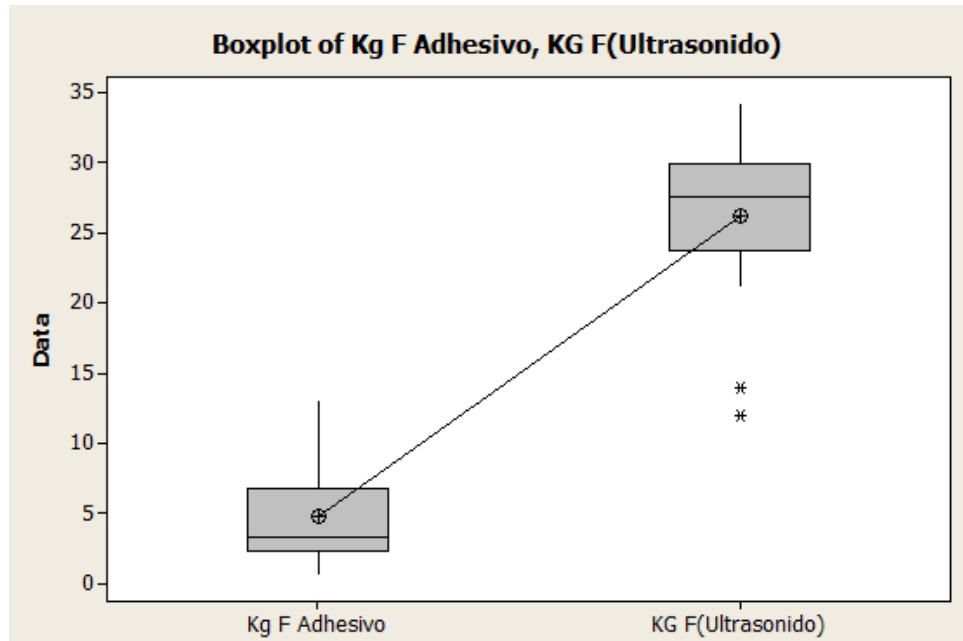


Figura 45. Gráfico Boxplot

4.6 Análisis de resultados

Siguiendo el diagrama de flujo presentado en el capítulo de la metodología, ahora que efectivamente se comprobó que el método de unión alterno por ultrasonido es mejor que el método de unión por adhesivo, se fabrican 2 unidades como corrida de pruebas, para validar los resultados obtenidos durante la etapa de las pruebas.

En las 2 unidades que se fabricaron de prueba, utilizando el método de soldadura por ultrasonido, no se presentaron fugas de poliuretano durante el proceso de espumado del gabinete. Las imágenes se pueden observar en la figura 46.



Figura 46. Unidades de prueba sin fuga de espuma

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el capítulo anterior se ha demostrado que el método alternativo de soldadura por ultrasonido es mejor que el método actual de unión por adhesivo y es en este capítulo donde revisaremos si se cumplieron los objetivos establecidos en el capítulo 1.

1. El valor de tensión máxima promedio requerida para separar los la base led y *liner* con unión por adhesivo fue de 5.47 Kg F.
2. El valor de tensión máxima promedio requerida para separar los la base led y *liner* con unión por soldadura por ultrasonido fue de 24.59 Kg F.
3. La causa raíz del problema es: de la fuga de espuma de poliuretano entre la base led y el *liner* se define como:

Debido a que la unión entre la base led y el *liner* se realiza manualmente, no existe un equipo o herramienta que permita aplicar la fuerza correcta ni el tiempo necesario para que el adhesivo pueda realizar una unión óptima entre los dos componentes.

4. Utilizando la técnica de soldadura por ultrasonido permite reducir el impacto ambiental eliminando al 100% el uso de adhesivos doble cara, protector de adhesivo y cinta adhesiva de papel. Además se genera un ahorro considerable, para poder invertir en la nueva tecnología de ultrasonido.
5. Al utilizar la técnica de soldadura por ultrasonido se disminuye al menos un 80% los problemas de calidad por fuga de espuma entre la base led y el *liner*, ya que la base queda herméticamente sellada, con un valor de adherencia de 26 Kg F.

Finalmente, se comprueba la hipótesis general planteada en el capítulo uno, donde se establece que:

La técnica de soldadura por ultrasonido permite la unión adecuada entre dos piezas plásticas, logrando reducir las fugas de poliuretano durante el proceso de espumado en un gabinete.

Como recomendaciones se sugiere que en la siguiente etapa del proyecto, cuando se tenga el desarrollo del equipo por ultrasonido final, y con el diseño de sonotrodo completo, se realice un diseño de experimentos con el equipo final para obtener los mejores parámetros, los cuales permitan la unión óptima entre las piezas termoplásticas.

Por último, en la imagen 47 se muestra una refrigerador marca Electrolux el cual cuenta con una iluminación adecuada en el interior de la unidad.



Figura 47. Refrigerador marca Electrolux

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] D. Grewell, A. Benatar "Welding of plastics: Fundamentals and new developments", Agricultural and Biosystems Engineering, Iowa state University, (2007) 49–52.

[2] Mohd Azam Musa, Wan Ahmad Najmuddin, "A review on ultrasonic welding capability: Break away from traditional plastic", Applied Mechanics and Materials Vols. 789-790 (2015).

[3] D. E. a. L. J. Bond, Ultrasonics, Third ed. Boca Raton London New York: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2012.

[4] K.S. Suresh, M. Roopa Rani, K. Prakasan, "Modeling of temperature distribution in ultrasonic welding of thermoplastics for various joint designs", Department of Production Engineering, PSG College of Technology, Peelamedu, Coimbatore 641004, India.

[5] Umang Parmar*, D. H. Pandya, "Experimental investigation of ultrasonic welding on Non- Metallic Material" Mechanical Engineering Department, LDRP Institute of Technology and Research, Gandhinagar-382015, INDIA.

[6] Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing, sixth edition, 2016.

[7] K.S. Suresh, M. Roopa Rani, K. Prakasan, R. Rudramoorthy, Modeling of temperature distribution in ultrasonic welding of thermoplastics for various joint designs. Department of Production Engineering, PSG College of Technology, Peelamedu, Coimbatore 641004, India, 14 December 2006.

- [8] Md Shakibul Haque*, Mohd. Anees Siddiqui, Plastic Welding: Important Facts and Developments. Department of Mechanical Engineering, Integral University, Lucknow, INDIA, Published: September 22, 2016.
- [9]. L.W.M. Roos (s1019430) V. Kalas (s1557688), Welding of thermoplastic composites. Faculty of Engineering Technologies (CTW) University of Twente The Netherlands, June 2016.
- [10]. Chinnadurai T. Arungalai Vendan S. Mohan Raj, Prakash N. Studies on ultrasonic welding of polycarbonate and acrylonitrile butadiene styrene blends, School of Electrical Engineering (SELECT), VIT University, Vellore, India. 2016.
- [11]. Branson Ultrasonic corporation. Instruction Manual. 100-412-196 REV. 05.
- [12]. Herrmann Ultraschalltechnik GmbH & Co. KG. Training manual.
- [13]. Michael J. Throughton. Handbook of plastics joining, Second edition. The Welding Institute, Cambridge, UK. 2008.
- [14]. Fatih Karpat and Ayca Kucukoglu. A Review of the Mechanical Joining Techniques for Thermoplastics. 1 Department of Mechanical Engineering, Uludag University, Turkey, Published: December 04, 2017.