

# UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Mecánico

Mención en Fabricación De Autopartes De Vehículos

Evaluación del Proceso de Termoformado para la Obtención de la Carcasa de la Alarma

ChevyStar, Utilizando Ingeniería Inversa y Simulación por Elementos Finitos.

Juan Gabriel Espinosa Aguilar

Nota del Autor

Juan Gabriel Espinosa Aguilar, Facultad de Arquitectura e Ingeniería,  
Universidad Internacional SEK.

Director: PhD. Edilberto Antonio Llanes,

Codirector: PhD. Javier Martínez.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:  
[jespinosa.mdm@uisek.edu.ec](mailto:jespinosa.mdm@uisek.edu.ec)

**Declaración Juramentada**

Yo, Juan Gabriel Espinosa Aguilar, con cedula de identidad 1003014931, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente. El presente trabajo pertenece al programa y a la Línea de Investigación Innovación en el Diseño de Procesos y Productos en el Ecuador.

JUAN GABRIEL ESPINOSA AGUILAR

C.I.: 1003014931

**Índice de Contenido**

Declaración Juramentada .....	2
Resumen .....	9
Introducción.....	10
Antecedentes.....	10
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos. ....	12
Justificación .....	13
Estado del Arte .....	15
Plástico y Polímero .....	15
Propiedades térmicas .....	15
Capacidad calorífica. ....	15
Conductividad térmica. ....	15
Densidad. ....	16
Modelos viscoelásticos .....	16
Clasificación de los plásticos .....	19
Termoplásticos.....	19
Termofijos. ....	20
Elastómeros. ....	20
Poliestireno .....	21
Poliestireno de alto impacto.....	21
Moldeo del plástico.....	22
Termoformado .....	23
Preparación y carga de la lámina .....	24
Calentamiento .....	25
Conformado .....	25
Fuerza mecánica. ....	25
Presión atmosférica.....	25
Formado a presión. ....	25
Combinación de fuerzas.....	26
Enfriamiento .....	26
Descarga y corte .....	26
Parámetros del proceso .....	26
Temperatura del horno.....	27

Tiempo de ciclo. ....	27
Tiempo de retardo. ....	27
Presión de vacío. ....	27
Ventana de formado. ....	27
Espesor de pared de piezas termoformadas. ....	28
Ingeniería inversa. ....	28
Herramientas CAD/CAE. ....	28
Control Numérico Computarizado (CNC). ....	29
Software de diseño. ....	32
Software CAM. ....	32
Método de Elementos Finitos (MEF). ....	33
Software especializado en la simulación del termoformado. ....	35
Método. ....	36
Tipo de estudio. ....	36
Descripción de la pieza a fabricar. ....	38
Ingeniería inversa. ....	39
Escaneado. ....	39
Modelado de la carcasa. ....	41
Prototipo rápido carcasa. ....	42
Molde de termoformado. ....	43
Material del molde. ....	44
Criterios para el diseño del molde de termoformado. ....	45
Mecanizado del molde. ....	47
Material de la carcasa. ....	53
Simulación del termoformado por elementos finitos. ....	54
Modelo CAD. ....	54
Proceso de mallado. ....	55
Condiciones de frontera. ....	56
Configuración de simulación. ....	56
Procesamiento. ....	58
Termoformado experimental. ....	58
Preparación y carga de la lámina. ....	59
Calentamiento. ....	60
Termoformado. ....	60
Enfriamiento. ....	61

Descarga y corte. ....	62
Análisis comparativo .....	62
Resultados.....	65
Obtención de la geometría mediante Ingeniería Inversa .....	66
Simulación por elementos finitos.....	70
Mallado.....	70
Desplazamiento del molde. ....	70
Tiempo de activación de la presión de succión. ....	71
Espesor. ....	72
Espesor 1,5 mm (figura 61).....	72
Espesor 2 mm (figura 62). ....	72
Espesor 2,5 mm (figura 63).....	73
Termoformado experimental.....	73
Espesor número 1. ....	74
Espesor número 2. ....	74
Espesor número 3. ....	74
Validación de resultados .....	75
Geometría. ....	75
Espesor. ....	76
Espesor promedio. ....	79
Discusión de resultados.....	81
Obtención de la geometría .....	81
Molde de termoformado .....	81
Simulación por elementos finitos.....	82
Mallado.....	82
Desplazamiento del molde. ....	82
Tiempo de activación de la presión de succión. ....	83
Espesor. ....	83
Validación de resultados .....	84
Conclusiones.....	86
Recomendaciones .....	88
Bibliografía.....	89
Anexos.....	103
Anexo 1. Planos de las piezas .....	103
Anexo 2. Código G.....	104

**Índice de Tablas**

Tabla 1 Proceso a seguir para la obtención de la carcasa de alarma ChevyStar .....	37
Tabla 2 Características del escáner AMETEK.....	39
Tabla 3 Características técnicas de la impresora Prusa i4 modelo mk2 .....	43
Tabla 4 Matriz de variables para la lección del material del molde.....	44
Tabla 5 Características de CNC marca Travis modelo TR-1XP.....	51
Tabla 6 Características de la herramienta .....	52
Tabla 7 Velocidades y avance recomendado en el proceso de face milling (planeado) de aleaciones ferrosas y no ferrosas con herramientas de acero rápido y carburo .....	52
Tabla 8 Velocidades recomendadas y avance para slab milling (desbaste) de aleaciones ferrosas y no ferrosas con herramientas de acero rápido y carburo.....	53
Tabla 9 Velocidades y avances para el fresado de acabado para el aluminio 6011 con herramientas de acero rápido y carburo .....	53
Tabla 10 Matriz de variables selección material de la carcasa .....	53
Tabla 11 Características de la máquina Formech 2440 .....	59
Tabla 12 Valores recorridos del molde .....	70
Tabla 13 Valores presión de vacío para el termoformado .....	71
Tabla 14 Geometría obtenida con el termoformado experimental.....	75
Tabla 15 Resultados espesor tapa 1 .....	79
Tabla 16 Resultados espesor tapa 2 .....	79

## Índice de Figuras

Figura 1. Características de los termoplásticos .....	19
Figura 2. Características de los Termofijos .....	20
Figura 3. Características de los elastómeros .....	20
Figura 4. Poliestireno de alto impacto .....	22
Figura 5. Proceso de moldeo plástico .....	23
Figura 6. Proceso de termoformado para lámina termoplástica .....	24
Figura 7. Interface ingeniería inversa .....	28
Figura 8. Herramientas CAD / CAM .....	29
Figura 9. CNC .....	31
Figura 10. Modelo generado en el software de diseño .....	32
Figura 11. Interfaz CAD/CAM .....	33
Figura 12. Modelo generado por el software especializado en la simulación del termoformado. 35	
Figura 13. Esquema de trabajo para la evaluación de un molde permanente de termoformado ..	36
Figura 14. Fotografía de la cara superior y de la cara posterior de la carcasa .....	38
Figura 15. Fotografía de la cara interna y de la cara superior de la carcasa .....	39
Figura 16. Carcasa .....	40
Figura 17. Papeles reflejantes .....	40
Figura 18. Escaneo de la carcasa .....	41
Figura 19. Resolución escaneado tapa 1 .....	41
Figura 20. CAD carcasa superior en vista interior o exterior .....	42
Figura 21. CAD carcasa inferior en vista interior o exterior .....	42
Figura 22. Proceso de impresión del modelado .....	43
Figura 23. Modelado punzón superior .....	44
Figura 24. Molde 1 .....	46
Figura 25. Molde 2 .....	46
Figura 26. Orificios de vacío .....	46
Figura 27. Pieza centrada .....	48
Figura 28. Asignación material del molde .....	48
Figura 29. Configuración herramental .....	49
Figura 30. Camino del herramental .....	49
Figura 31. Simulación mecanizado molde 1 .....	50
Figura 32. CNC marca Travis modelo TR- $\dot{\imath}$ XP .....	50
Figura 33. Fresa R290-050022-12M .....	52
Figura 34. CAD del molde importado al entorno de simulación .....	54
Figura 35. CAD de la plancha a utilizar .....	55
Figura 36. CAD molde y plancha .....	55
Figura 37. Proceso de mallado .....	56
Figura 38. Condiciones de frontera .....	56
Figura 39. Creación nueva tarea de simulación .....	56
Figura 40. Señalización molde y plancha .....	57
Figura 41. Velocidad desplazamiento del molde .....	57
Figura 42. Tiempo de simulación .....	58
Figura 43. Termoformadora Formech 2440 .....	59
Figura 44. Preparación de la lámina .....	59

Figura 45. Calentamiento del material.....	60
Figura 46. Termoformado.....	61
Figura 47. Sopladora de aire .....	61
Figura 48. Piezas listas para ser cortadas.....	62
Figura 49. Comparación espesores simulación vs termoformado experimental .....	64
Figura 50. Escaneo carcasa .....	66
Figura 51. Tratamiento de la tapa superior .....	67
Figura 52. Tratamiento de la tapa inferior .....	67
Figura 53. CAD tapa 1 .....	68
Figura 54. CAD tapa 2 .....	68
Figura 55. Prototipos de las tapas .....	68
Figura 56. Moldes tapa 1 y 2 .....	69
Figura 57. Métrica de la malla .....	70
Figura 58. Desplazamiento del molde en función del tiempo .....	71
Figura 59. Presión de succión en función del tiempo .....	71
Figura 60. Nomenclatura variación de espesores .....	72
Figura 61. Adelgazamiento material espesor 1,5 mm tapa 1 y 2 .....	72
Figura 62. Adelgazamiento material espesor 2 mm tapa 1 y 2 .....	73
Figura 63. Adelgazamiento material 2,5 mm tapa 1 y 2 .....	73
Figura 64. Tapas espesor 1,5 mm .....	74
Figura 65. Tapas espesor 2 mm .....	74
Figura 66. Tapas espesor 2,5 mm .....	75
Figura 67. Medición geometría.....	75
Figura 68. Variación espesores plancha 1.5 mm, tapa 1.....	76
Figura 69. Variación espesores plancha 2 mm, tapa 1.....	76
Figura 70. Variación espesores plancha 2.5 mm, tapa 1.....	77
Figura 71. Variación espesores plancha 1.5 mm, tapa 2.....	77
Figura 72. Variación espesores plancha 2 mm, tapa 2.....	77
Figura 73. Variación espesores plancha 2.5 mm, tapa 2.....	78
Figura 74. Puntos de medición tapa 1 .....	78
Figura 75. Puntos de medición tapa 2.....	78
Figura 76. Promedio espesor obtenido, tapa 1 .....	79
Figura 77. Promedio espesor obtenido, tapa 2 .....	80
Figura 78. Variación espesores .....	84
Figura 79. Representación de problemas que ocurren durante el termoformado .....	85
Figura 80. Plano tapa 1 .....	103
Figura 81. Plano tapa 2 .....	103
Figura 82. Código G molde tapa 1 .....	104
Figura 83. Código G molde tapa 2.....	104



### **Resumen**

Debido a los altos costos que representa importar autopartes al Ecuador es necesario buscar una alternativa para sustituirlos con productos de similares características que conlleven a una disminución de los valores que estas representan al consumidor. Es así, que en el presente proyecto se obtiene la geometría de la carcasa de la alarma ChevyStar, mediante ingeniería inversa, para su utilización como base en el diseño y la construcción del molde de termoformado. Para este proceso, se realiza la simulación del proceso de termoformado de la carcasa, mediante el software especializado, determinando el espesor óptimo del poliestireno de alto impacto a utilizar para la construcción de la autoparte.

Se compara los resultados dimensionales de la carcasa obtenidas en el proceso de termoformado, con los resultados de la simulación y con las piezas físicas existentes en el mercado, para validar el proceso de fabricación de las mismas. Realizando la comparación entre la pieza existente y los resultados obtenidos en el termoformado y la simulación se valida este proceso pues sus dimensiones son similares a las piezas existentes en el mercado, estos resultados se presentan a la compañía Road Track para que puedan producir las carcasas a nivel nacional.

**PALABRAS CLAVE:** Diseño industrial, polímero, termoformado, carcasa alarma, vehículo automotor, diseño por ordenador, máquina herramienta.

## **Introducción**

### **Antecedentes**

La necesidad de moldear el barro, vidrio y otros materiales con el fin de obtener objetos y recipientes de uso común, tiene su historia tanto como el desarrollo de la humanidad; es así que, cuando aparecen los polímeros se incentivan procesos de mayor grado de dificultad que demuestran un gran talento artístico y habilidad en los métodos de fabricación (Arista, 2016).

En las últimas cinco décadas la industria del plástico ha crecido, superando ampliamente a la del acero, en estos años, materiales como el cloruro de polivinilo, poliamidas, poliestireno, polietileno entre otros; forman parte de la vida cotidiana, sin distinguir condiciones sociales, culturales, económicas (Héctor y Yustos, 2008).

Los desarrollos tecnológicos en el procesamiento de plásticos y la demanda de calidad en los productos, causan que la competitividad en esta industria se encuentre orientada a la disminución de costos de producción y el uso adecuado de técnicas modernas, clave en el desarrollo de procesos y materiales (Osswald et al., 2012).

La crisis energética global, especialmente en el área automotriz permite el ingreso de nuevas tecnologías que incentiven la reducción del consumo de combustibles, motivando el desarrollo de la ingeniería, principalmente en áreas como los materiales, procesos y diseño, que buscan reducir el peso en las partes fabricadas (Osswald et al., 2012).

De acuerdo a lo presentado por Gordillo, Sanchez y Martinez, (1997) diseñar una pieza o artículo de plástico es complejo, pues el diseñador debe conocer el uso que tendrá la pieza y estar familiarizado con el material de trabajo desde sus propiedades, procesos de transformación hasta el servicio que va a prestar.

Los usos de piezas en la industria automotriz procesadas por este método generan varias ventajas entre las que se encuentran los altos niveles de producción en serie, bajo tiempo en su fabricación, una reducción de costos y la elaboración de geometrías complejas, ganando más aceptación en el medio, provocando la necesidad de incrementar la calidad del producto final (Héctor y Yustos, 2008)

Los pocos procesos de elaboración de autopartes plásticas en el Ecuador se basan en su totalidad a la inyección, los mismos que dependen de un elevado costo, tiempo de producción y complejidad del proceso. El problema se plantea debido a que los procesos de termoformado de materiales poliméricos en la fabricación de autopartes en el Ecuador aún no se han desarrollado lo suficiente. En este caso de estudio se evaluará el proceso de termoformado para la obtención de la carcasa de la alarma ChevyStar, utilizando ingeniería inversa como punto de partida para la obtención del molde y mediante la simulación por elementos finitos del proceso de termoformado se determinará cual espesor de la lámina de poliestireno de alto impacto es el más indicado para construir la pieza; con ello se espera que la carcasa y otros componentes plásticos de los automotores se produzcan a nivel nacional mediante este proceso de moldeo, evitando así la importación de la autoparte.

En el proceso termoformado se utiliza presiones y temperaturas más bajas que en la inyección o compresión para el moldeo de plástico, permitiendo el uso de distintos materiales (Mariel, Luque y Canahuire, 2015).

De acuerdo con lo presentado por AEADE (2018), en su boletín del mes de abril 2018 existen 4 empresas ensambladoras de vehículos, 92 empresas de autopartes las que generan 56 860 puestos de trabajo directos, ubicados principalmente en la sierra norte del Ecuador, convirtiéndose en uno de los pilares de la economía del país.

La empresa Road Track Cía. Ltda. en un principio tenía la denominación de Servicios Tecnológicos Road Track Cía. Ltda., se constituyó el 23 de octubre del 2001, en Ecuador inicio sus operaciones a finales del año 2002 en Ecuador. Siendo su actividad principal el proveer sistemas y servicios telemáticos a General Motors Company.

La empresa se dividió en dos empresas, Road Track y GTS; esta última es la encargada de ensamblar todos los componentes de los productos para posteriormente brindar los servicios mediante la primera. Las partes en su totalidad se fabricaban en el exterior con tecnología israelí y eran importadas, con los procesos de globalización, reducción de costos y centralizar los procesos provocó que la compañía abra una planta de producción de las partes y ensamblaje de las mismas en Hong Kong, siguiendo con el problema de la importación de los productos a nuestro país.

Para el presente trabajo de investigación se plantean los siguientes objetivos:

#### **Objetivo general.**

Evaluar el proceso de termoformado para la obtención de la carcasa de la alarma ChevyStar, utilizando ingeniería inversa y simulación por elementos finitos, para la fabricación de la autoparte a nivel nacional.

#### **Objetivos específicos.**

1. Obtener la geometría de la carcasa de la alarma ChevyStar, mediante ingeniería inversa, para su utilización como base para el diseño y la construcción del molde de termoformado.
2. Simular el proceso de termoformado de la carcasa, mediante la herramienta informática especializada, determinando el espesor óptimo del poliestireno de alto impacto a utilizar para la construcción de la autoparte.

3. Analizar los resultados dimensionales de las carcasas obtenidas en el proceso de termoformado, comparando con los resultados de la simulación y con las piezas físicas existentes en el mercado, para la validación del proceso de termoformado en la fabricación de las carcasas.

Con la realización de esta investigación se demuestra que en nuestro país se puede realizar autopartes plásticas mediante el proceso de termoformado y también diversos componentes de productos de la industria, capacitando a la misma con los conocimientos necesarios que le permitan fabricar cualquier componente. Para la investigación se ha tomado como referencia a la carcasa de la alarma, pues esta, no es fabricada por la compañía, por lo que se la adquiere a otro proveedor.

### **Justificación**

Road Track Ecuador Cía. Ltda. ubicada en la ciudad de Quito en el sector de Carcelén Industrial al norte de la urbe, que se dedica a la telecomunicación a través de detección remota por medio de satélites, estaciones de radar, telemetría de comunicaciones, todo esto con aplicaciones especializadas en automotores, siendo su cliente exclusivo en el país la empresa General Motors OMNIBUS BB representante de la marca Chevrolet en Ecuador (EMIS, 2018).

La Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador en su informe del año 2017, examinó la situación de este sector, en el cual se determinó que la empresa con mayores ventas en el país es Chevrolet con 28 375 unidades (AEADE, 2018).

En el estudio presentado por Angulo y Trávez, (2011) se determinó que existe un incremento en el robo de automotores en el país, generando la necesidad de poseer al menos un sistema de seguridad básico, que comprende un kit de alarma y bloqueo central.

La industria del termoformado de plástico ha cambiado con la introducción en el mercado de herramientas informáticas avanzadas que permiten simular su proceso; permitiendo optimizarlos

y disminuir los tiempos para la elaboración de piezas plásticas, que implica una disminución en los costos de fabricación y a la vez generar productos de alta calidad.

El tema propuesto en la presente investigación pretende realizar una carcasa para la alarma de ChevyStar utilizando ingeniería inversa a partir del análisis de la autoparte existente generando un molde para su utilización en el termoformado, mediante la simulación del proceso de moldeo analizar el espesor ideal de la lámina que se debería ocupar para la construcción de la autoparte, y así satisfacer las necesidades de la empresa Road Track.

La fabricación de este elemento es factible pues en el mercado, como se mencionó anteriormente Chevrolet con 28 375 unidades lidera el mercado (AEADE, 2018), y el producto que se pretende producir es de uso exclusivo de los vehículos de la marca y no existe un fabricante local. (Minalla, 2016).

La producción de la carcasa se utilizará en las alarmas completas que están destinadas a los automotores nuevos, a los diferentes concesionarios a nivel nacional para su venta en mostrador y para la venta de la carcasa sola, pues la misma no existe en el mercado, aportando al cambio de la matriz productiva, fomentando la producción local tal como lo establece el Plan de Desarrollo 2017-2021 impulsado por el gobierno del Ecuador (SENPLADES, 2017).

## **Estado del Arte**

### **Plástico y Polímero**

El origen de la palabra Plástico viene del latín plasticus y esta a su vez del griego plastikos, que significa susceptible de ser cambiado o moldeado; mientras que, polímero tiene su origen en las palabras griegas poly: muchos y meros: parte o segmento. El término plástico y polímero tienen características diferentes, siendo estos últimos la materia prima para la preparación de los primeros. Los polímeros son considerados como una macromolécula conformada de monómeros que permiten una gran variación de pesos moleculares. Si se trabaja con monómeros de un mismo tipo el producto final se denomina homopolímeros, si se trabaja con diferentes monómeros en un proceso de adición se los denomina heteropolímeros, que pasan por un proceso de condensación para su utilización (Muñoz, 2014).

### **Propiedades térmicas**

Los polímeros son afectados por la variación de la temperatura generando importantes efectos en la respuesta mecánica, siendo necesario conocer algunas de ellas:

#### **Capacidad calorífica.**

Es la capacidad de los cuerpos para resistir una cantidad de energía que permita elevar la temperatura de su material en un grado centígrado. Los polímeros semicristalinos requieren más energía que polímeros amorfos para aumentar su temperatura. Un ejemplo se puede observar en una pieza de PE la cual requiere de 0.55 J/kgK mientras que una pieza de PS solo requiere 0.30 J/kgK. (Cornement, 2014)

#### **Conductividad térmica.**

Esta propiedad corresponde a la cantidad de energía transmitida a través de una unidad de área, la cual varía de acuerdo al material y su espesor. Es importante analizarlo pues desempeña un

papel importante en las etapas de calentamiento y enfriamiento durante el proceso de termoformado (Hernández Martín, 2015).

### **Densidad.**

Es una propiedad que relaciona la masa de un cuerpo con su volumen, que no se considera una propiedad de la temperatura; sin embargo, al existir un aumento del calor existe una disminución de la densidad, esta propiedad es de suma importancia especialmente en la etapa de enfriamiento en el termoformado (Cornement, 2014).

### **Modelos viscoelásticos**

El polímero al contar con grandes cadenas permite que en estado fundido se comporta como un sólido elástico el cual se caracteriza por ser un proceso reversible, generando una cantidad importante de energía almacenada, el momento que la fuerza externa desaparece el material es capaz de regresar a su estado inicial. Mencionado comportamiento depende del tiempo, y la velocidad con la que la fuerza fue aplicada (R. Morales, Candal, & Robles Jennifer, 2009).

En la Ecuación 1 se representa el modelo de Cross, este describe la viscosidad en función del esfuerzo de corte, combinando una región newtoniana y una región de viscosidad proporcional a una potencia del esfuerzo de corte (modelo de la ley potencia). La ecuación 1 describe el comportamiento de este modelo:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 + \gamma}{\gamma}\right)^{1-n}}$$

*Ecuación 1. Modelo de Cross*

Donde:  $\eta_0$  = Viscosidad newtoniana,

$\gamma$  = Velocidad de deformación,

$\tau$  = Esfuerzo de corte de transición entre regímenes de flujo



$n$  = Índice de Fluidez de Cross.

El modelo de Kaye-Bermstien-KeraslyZapas permite describir el comportamiento no lineal de algunos polímeros, este es empleado cuando se requiere recrea con precisión el comportamiento de un material específico. Este modelo es representado en la Ecuación 2 (Castañeda, Hernández, & Gómez, 2010).

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t u(t-t') h(I_1-I_2) B(t,t') dt'$$

*Ecuación 2. Modelo de Kaye-Bermstien-Kerasly Zapas*

Donde:  $\sigma(t)$  = tensor de esfuerzo,

$h(I_1 \text{ y } I_2)$  = función amortiguada de los 2 tensores invariantes de deformación,

$B(t,t')$  = tensor de deformación

$\mu(t-t')$  = función de memoria dependiente del tiempo

La ecuación a con la cual es definida como:

$$u(t-t') = \sum_{k=1}^N \left[ \frac{a_i}{T_i} \exp\left(-\frac{t-t'}{T_i}\right) \right]$$

*Ecuación 3. Ecuación de Kaye-Bermstien-Kerasly Zapas*

Donde:  $a_i$  = módulo de relajación,

$\tau_i$  = tiempo de relajación,

$N$  = número de pares módulo/tiempo.

Además, la función amortiguada Ecuación 4 corresponde a:

$$h(I_1, I_2) = \frac{1}{1 - \alpha \sqrt{(I_1 - 3)(I_2 - 3)}}$$

*Ecuación 4. Función amortiguada*

Donde:  $\alpha$ =parámetro ajustable,

I1 y I2 = Primer y segundo tensor invariante de deformación

$B(t,t')$  = tensor de deformación que viene dado por la Ecuación 5 (Castañeda et al., 2010)

$$B(t, t') = \begin{pmatrix} \lambda^2(t, t') & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{2m}(t, t') & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^{-2(1+)}(t, t') \end{pmatrix}$$

*Ecuación 5. Tensor de deformación*

Donde:  $\lambda$  es el radio de extensión descrito mediante la Ecuación 6:

$$\lambda(t, t') = e^{\alpha_o(t-t')}$$

*Ecuación 6. Radio de Extensión*

Por otro lado, la viscosidad es fuertemente dependiente de la temperatura, comportamiento generalmente dividido en dos regiones gobernadas por funciones semiempíricas que envuelven varios parámetros ajustables. La primera región se encuentra a temperaturas 100 °C por encima de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y puede ser representada por la Ecuación 7 de Arrhenius (Castañeda et al., 2010).

$$n(t) = A \exp \frac{Ea}{RT}$$

*Ecuación 7. Ecuación de Arrhenius*

Dónde: A = Factor pre exponencial relacionado al coeficiente de fricción monomérica y al peso molecular y su distribución, Ea = Energía de activación del flujo, R = constante de los gases ideales y T= temperatura absoluta.

La segunda se encuentra en el rango que va desde la  $T_g$  del polímero hasta 100°C por encima de su  $T_g$ . Esta región corresponde a la zona cauchosa del polímero y posee un comportamiento que puede representarse mediante la Ecuación 8. (Hernández Martín, 2015)

$$\log n(T) = \log n(T_s) - \frac{c_1(T - T_s)}{c_2 + (T - T_s)}$$

*Ecuación 8. Ecuación de Williams-Landel-Ferry*

Donde  $C_1$  y  $C_2$  = Constantes relacionadas con el volumen libre entre las moléculas,

$T$  = Temperatura de estudio,

$T_s$  = Temperatura de referencia ( $T_s \sim T_g$ ) y

$\eta(T_s)$  = Viscosidad a la temperatura de referencia.

### Clasificación de los plásticos

Para Cornish (1997) los plásticos de acuerdo a su respuesta mecánica frente a temperaturas elevadas se dividen en tres grandes grupos:

#### Termoplásticos.

Son plásticos que tienen sus moléculas colocadas de tal manera que cuando se calienta el material sus relaciones intermoleculares se debilitan volviéndose más suaves; esto conlleva a que se puedan modelarlos por diferentes métodos (Callister, 1997).

Entre los principales compuestos de este tipo tenemos al ABS, PVC, poliestireno, polipropileno, poliamidas (Cornish, 1997).

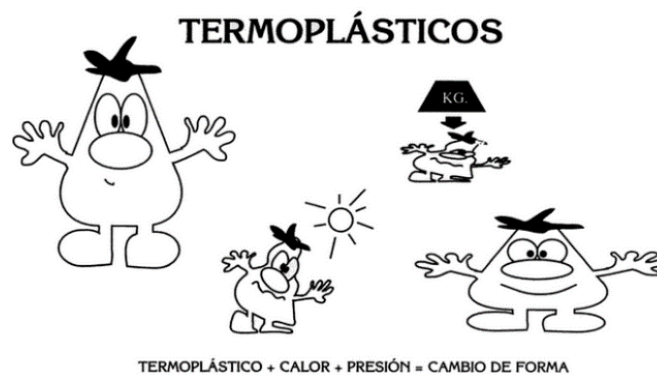


Figura 1. Características de los termoplásticos

Fuente: Cornish, (1997)

### Termofijos.

Este tipo de plástico no sufre deformación al ser calentado, cuando se solidifican no se pueden reprocesar; generalmente se los encuentra en forma líquida al que se añade un catalizador para que se polimericen (Cornish, 1997).

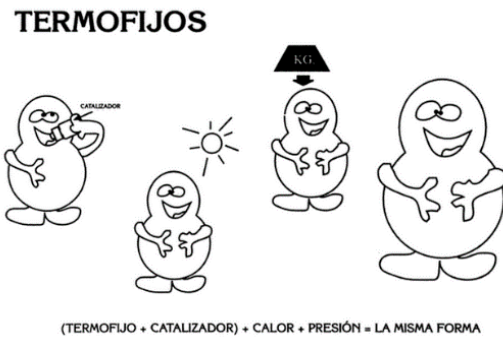


Figura 2. Características de los Termofijos  
Fuente: Cornish, (1997)

### Elastómeros.

Son los materiales de origen vegetal o sintético que tienen la cualidad de sufrir una elongación de hasta alrededor de 30 veces su tamaño original pudiendo regresar a su forma inicial sin sufrir modificaciones (Cornish, 1997).

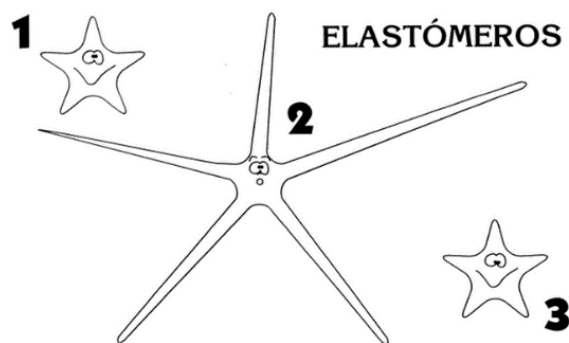


Figura 3. Características de los elastómeros  
Fuente: Cornish, (1997)

**Poliestireno**

El poliestireno es un polímero cuyo monómero se conoce como estireno, es de origen hidrocarbúrico, que pertenece al grupo de los alquenos, su estado natural es líquido y está conformado por un anillo bencénico unido a un grupo etileno en una posición alílica (Perdomo, 2002).

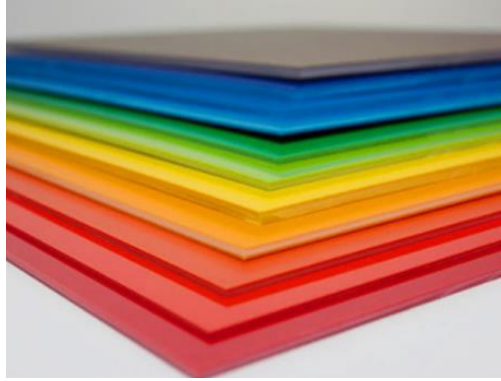
La versatilidad de este material permite ser sintetizado por diferentes métodos, lo que facilita una gran utilización en diferentes industrias, es por ello que Arista (2016) y Osswald et al., (2012) manifiestan que el poliestireno es el material adecuado para trabajar en este tipo de componentes.

Para Perdomo, (2002) el poliestireno tiene diferentes aplicaciones las cuales dependen de las variantes que se presenten, entre las principales encontramos:

1. Poliestireno de alto impacto
2. Poliestireno cristal
3. Poliestireno expandido

**Poliestireno de alto impacto.**

Este tipo de poliestireno es altamente resistente al impacto, siendo translúcido, pero susceptible a la acción de los químicos. Se utiliza en refrigeración, vasos desechables, cubetas, lámparas y otros accesorios de uso común. En la figura 4 se observa las distintas tonalidades de poliestireno disponibles en Ecuador.



*Figura 4.* Poliestireno de alto impacto

Fuente: LAMINEX (2015)

### **Moldeo del plástico**

El plástico en las últimas décadas alcanzó una importancia muy elevada en la industria en general, la automotriz no ha sido la excepción, debido a que los polímeros tienen propiedades físicas con valores similares a la de los metales (Tull, 1992) ; además que, ayudan a la disminución de peso del vehículo y con ello a la disminución a de emisiones contaminantes; también la facilidad al momento de reciclarlo y reutilizarlo (Moreno y Padilla, 2012).

Ramírez et al., (2015) mencionan que para el desarrollo del molde es aconsejable seguir un flujograma establecido, debido a la importancia que este tiene en la calidad de la pieza que se desea realizar; el proceso que se aconseja seguir es el siguiente:

1. Realizar el análisis de la pieza a fabricar.
2. Reconocer las características de la maquina termoformadora que se utilizara.
3. Determinar los parámetros y cálculos de diseño.
4. Desarrollo de modelos y selección de componentes.
5. Validación de propuesta de diseño final.

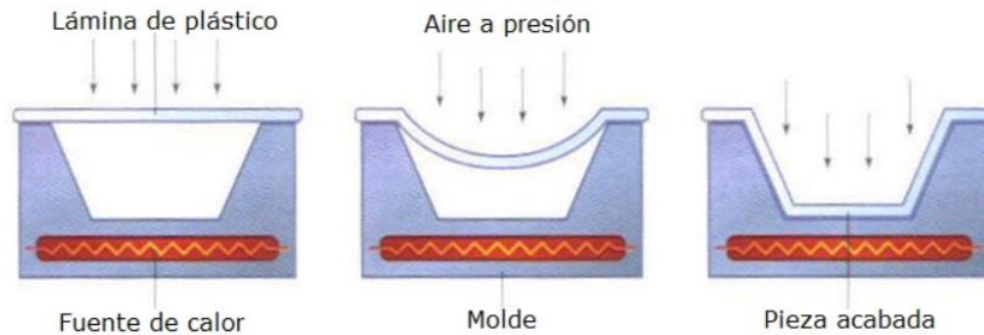


Figura 5. Proceso de moldeo plástico

Fuente: Camos (2015)

### Termoformado

El proceso de termoformado se basa en la transformación de una plancha de plástico a una forma que puede ser tridimensional, mediante la aplicación de calor, vacío y presión de aire (Chuta, 2014).

Para Kalpakjian y Schmid (2002) el termoformado, se lleva a cabo cuando una película de plástico o lámina de plástico se lo lleva a un horno con la temperatura necesaria para llegar a un punto de hundimiento (colgamiento), luego de lo cual se lo saca y se lo coloca en un molde ya listo, siendo presionado sobre este. El molde a utilizar debe encontrarse con una temperatura ambiente que permitirá que la lámina de plástico tome la forma del molde al toparlo

De acuerdo a lo expresado por Morales y Candal (2006) para la realización de este proceso de moldeo se requiere de las siguientes herramientas:

1. Un sistema de calentamiento que permite obtener la temperatura idónea para el termoformado.
2. Una matriz en la cual la lámina se apoya y que dará la forma al producto deseado.
3. Un sistema enfriador para que el material recobre las características de su rigidez original.
4. El dado o contrapunzón que es el elemento que empuja a la lámina sobre la matriz y se mueve en una forma alternativa; aunque no necesariamente este elemento debe estar presente.

5. El pisador o también anillo prensa-lámina cuya finalidad es el evitar la formación de arrugas y pliegues en el proceso.

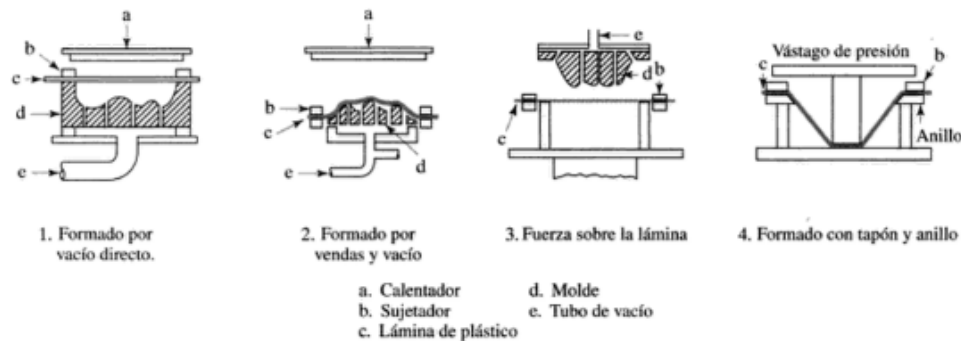


Figura 6. Proceso de termoformado para lámina termoplástica

Fuente: Kalpakjian y Schmid (2002)

Para que el termoformado se lo realice adecuadamente de acuerdo a Garrido et al., (2004) es necesario cumplir las siguientes etapas:

1. Preparación y carga de la lámina.
2. Calentamiento.
3. Conformado.
4. Enfriamiento.
5. Descarga y corte.
6. Parámetros del proceso.
7. Ventana de formado.
8. Espesor de la pared de piezas termo formadas

### Preparación y carga de la lámina

Dentro del proceso de conformación de la estructura es necesario prepara la lámina con la que se va a trabajar y está dependerá del espesor como del trabajo a realizar. Para la clasificación de las láminas se tomó en cuenta el espesor siendo la de mayor de 13mm como placa, entre 3 y 13mm calibre grueso, menor a 1.5mm calibre delgado y película u hoja menor de 0.25mm. La



flexibilidad de estas últimas, facilitan el enrollamiento y la alimentación automatizada de la lámina a la termoformadora (UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2011).

### **Calentamiento**

En esta etapa del proceso de termoformado se suministra calor a la lámina mediante efectos de conducción y radiación para alcanzar la temperatura deseada; sin embargo debido a la naturaleza aislante de los polímeros, esta etapa suele ser el paso más largo del proceso y la energía para llegar a la temperatura de reblandecimiento depende de cada material (Fernandez, 2004).

### **Conformado**

De acuerdo a lo presentado por Ortiz, Ruiz, y Juan (2018) existen 4 maneras de aplicar una fuerza para conformar la lámina:

#### **Fuerza mecánica.**

Con el fin de estirar la lámina hasta formar una nueva figura se puede aplicar una fuerza manual.

#### **Presión atmosférica.**

Esta fuerza se encuentra limitada a un máximo de 0.1 GPa y es ampliamente usada para piezas de alto volumen y calibre delgado, es la fuerza comúnmente usada en el proceso de termoformado, empuja la lámina hacia las paredes internas del molde mediante la aplicación de vacío entre la lámina y la cavidad.

#### **Formado a presión.**

Se emplea cuando la presión atmosférica es inadecuada para proporcionarle detalles a una lámina conformada y tiene un límite alrededor de 10 veces la presión de conformado por vacío atmosférico.

**Combinación de fuerzas.**

Este tipo de fuerza se emplea cuando se requiere deformar la lámina para alcanzar geometrías grandes y detalladas, en este caso se trabaja con todas las fuerzas. Generalmente, se emplea para reducir la variación de espesores en las paredes de la pieza.

**Enfriamiento**

Para tener una estabilidad dimensional en la pieza trabajada en el proceso de termoformado es necesario empezar con el enfriamiento en el momento en que la superficie del molde con la lámina que se trabaja. La velocidad de enfriamiento es influenciada por el espesor de la pieza y el material del molde. Adicionalmente, es posible enfriar por convección, mediante la aplicación de soplado de aire o una bruma de agua sobre la pieza conformada (SENA, 2009)

**Descarga y corte**

Para realizar la separación del molde y la lámina es necesario realizar una eyección que puede ser mecánica o por aire que faciliten la separación. La descarga debe realizarse en el tiempo apropiado debido a que tiempos de ciclo muy cortos pueden ocasionar deformaciones de la pieza y tiempos de ciclo muy largos pueden ser económicamente desfavorables. Una vez completa la descarga, la lámina conformada es desplazada hasta llegar a la zona de corte, donde la pieza es separada (Ortiz et al., 2018).

**Parámetros del proceso**

Según lo expresado por Ortiz (2018) durante el proceso de termoformado existe variables controlables que permiten establecer las condiciones más convenientes para garantizar la calidad del producto denominados parámetros de control que se coordinan optimizando y facilitando la identificación de puntos críticos y problemas en el proceso. Algunos parámetros son:

**Temperatura del horno.**

Controla el flujo uniforme del calor sobre la lámina empleando resistencias que irradian calor dentro de un horno.

**Tiempo de ciclo.**

Es el tiempo requerido para calentar la lámina hasta su temperatura de reblandecimiento y su duración se mide desde la carga del material hasta la descarga de la pieza.

**Tiempo de retardo.**

Es el tiempo que permanece el molde cerrado durante la etapa de conformado y enfriamiento y su duración permite controlar la estabilidad dimensional de la pieza para que no colapse bajo su propio peso.

**Presión de vacío.**

Su función es controlar la salida de aire de la cavidad del molde de una manera rápida, promoviendo el contacto de la lámina con las paredes de la cavidad.

**Ventana de formado**

Ortiz (2018) menciona que en la relación que se entre esfuerzo-deformación existe una dependencia a la temperatura en la cual el polímero puede ser estirado hasta la forma deseada, la misma varía desde las propiedades del material y está definida por indicadores que permiten delimitarla. Por un lado, el hundimiento excesivo de lámina, la salida excesiva de gases, la decoloración y la aparición de ampollas denotan el empleo de temperaturas superiores a la temperatura de formado, mientras que el llenado incompleto de la pieza y el copiado imperfecto de la superficie de la cavidad denotan el empleo de temperaturas inferiores a la temperatura de formado.

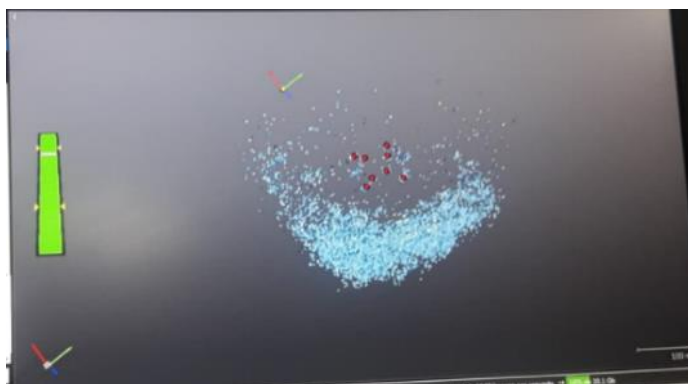
### **Espesor de pared de piezas termoformadas**

Es en muchos casos, el atributo más importante de las piezas, debido a que suele determinar la utilidad del producto final. Es por ello que se han desarrollado criterios de tolerancia que permiten mantener un control de calidad en los productos (Padrón, 2002).

### **Ingeniería inversa**

La ingeniería inversa es un método para crear un modelo virtual en 3D a partir de una pieza física existente para su uso en sistemas CAD 3D, CAM, CAE y otro software determinado para este tipo de actividades, el cual combina datos escaneados activo, diseño CAD, puntos 3D, edición de mallas, moldeado y construcción de dibujos 2D (Parras, Romero, Cavas, Nieto, et al., 2016).

En la figura 7 se puede observar la interface de trabajo que resulta útil para analizar la funcionalidad del producto, el procesamiento de datos escaneados, análisis de subcomponentes, costos. Esta combinación de funcionalidad CAD y análisis 3D proporciona facilidades en el desarrollo de productos, acelerando los procesos de producción. (Parras et al., 2016).



*Figura 7.* Interface ingeniería inversa

### **Herramientas CAD/CAE**

El avance de las herramientas computacionales en prototipado, control, simulación y construcción de moldes, ha favorecido a la industria del plástico, pues ha permitido que la

industria automotrice y optimice sus procesos, permitiendo brindar mejores productos y un mayor rédito económico para la industria (Morales y Candal, 2006).

El Diseño Asistido por Computadoras (CAD) se encuentra en constante evolución proporcionando una variedad de herramientas que permiten crear una representación gráfica del diseño propuesto en tres dimensiones, visualización desde cualquier ángulo, realizar modificaciones a un diseño, así como, funciones de extrusión, redondeado, revolución, agujeros; adicional a esto se logra obtener información sobre el modelo de forma sencilla y ágil (Parras et al., 2016).

El uso de herramientas de Ingeniería Asistida por Computadoras (CAE) optimiza los procesos de termoformado pues analiza algunas posibilidades de diseño sin necesidad de llevarlos los nuevos modelos a producción, ahorrando costo en equipos, materiales y tiempo. Este proceso de modelado predice la calidad de la pieza final en base a las condiciones de los materiales que se van a utilizar el proceso de producción (Morales y Candal, 2006).



Figura 8. Herramientas CAD / CAM

Fuente: Mendoza, Moreno, Sánchez, y Rodríguez (2011)

### Control Numérico Computarizado (CNC)

Se considera control numérico computarizado a todo dispositivo en el cual se realice los posicionamientos de una parte mecánica móvil mediante órdenes totalmente automática a partir

de información ingresada de forma numérica que puede ser ingresada mediante un software específico (García y Castillo, 2007).

El CNC utiliza un micro controlador o microcomputadora como parte integral del control de la máquina que permite que los trabajos a realizarse se los programe desde un lugar remoto, con gran precisión y utilizando la información que se obtiene de un software de diseño y simulación de maquinado (García y Castillo, 2007).

De acuerdo a lo presentado por Ruíz (2008) la utilización de CNC sigue el proceso descrito a continuación:

1. Mapa del proceso
2. Establecimiento de un programa
3. Interface
4. Maquinas herramientas CNC
5. Características CNC

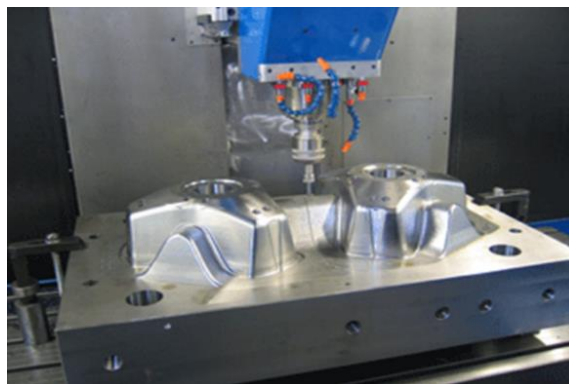
Para el mismo autor la utilización del CNC presenta las siguientes ventajas.

1. Mejor calidad de producto final y mayor precisión.
2. Uniformidad en los productos terminados.
3. Disminución en la mano de obra pues un operador puede trabajar simultáneamente en varias máquinas.
4. La complejidad del producto procesado no limita su producción.
5. El cambio de diseño y modelos se lo puede realizar en un periodo muy corto.
6. Control de calidad optimizado
7. Costos reducidos en inventario.
8. Permite realizar pedidos urgentes.

9. El operador no necesita experiencia previa.
10. Las jornadas de trabajo son menos extensas.
11. Los riesgos laborales disminuyen pues el operador no interviene directamente en el proceso de producción.
12. El periodo de operación de la maquinaria puede ser continuo.
13. Incremento en la competitividad del mercado con un adecuado control de la producción
14. Permite realizar simulacros en el proceso de corte.

Las desventajas que presenta el uso de CNC para Ruíz (2008) son las siguientes:

1. Alta inversión inicial
2. Un eficiente funcionamiento se logra con una adecuada programación.
3. Es necesario la contratación de personal especializado para los mantenimientos incrementando los costos.
4. Para obtener una mayor eficiencia en la producción es necesario mantener un gran volumen de producción.



*Figura 9. CNC*  
Fuente: (HERRATEC, 2012)

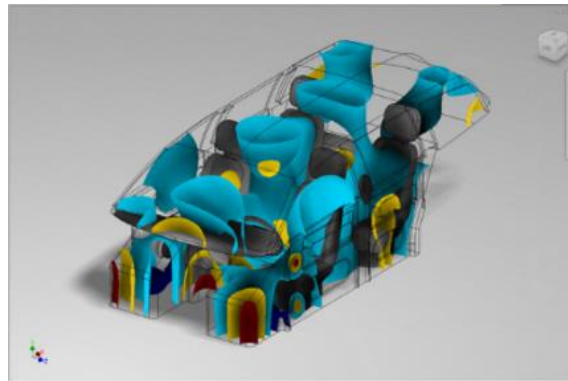
### Software de diseño

Es un sistema de diseño mecánico, con la capacidad de integrar los datos 3D y AutoCAD en un solo modelo con el fin de crear un prototipo digital que permitirá estudiar o producir un producto.

Los datos que proporciona el modelo 3D pueden ser utilizados por las diferentes áreas de la ingeniería lo que disminuye la fabricación física de prototipos.

Con el fin de realizar diseño de productos, moldes, láminas o chapas metálicas se utiliza el software de diseño que integra diferentes formas, diseños, simulación en 3D.

En la figura 10 se puede observar lo que el software presenta dentro de su paquete informático, funciones como diseño mecánico 3D con layouts, perfiles, trazos, diseño de piezas plásticas, diseño de ensambles, diseño de piezas de lámina para chapas, entre otras; además, se incluye las herramientas de productividad CAD, integración e interoperabilidad DWG (Parras, Romero, Cavas, & Nieto, 2016) (3DCADPORTAL, 2018).



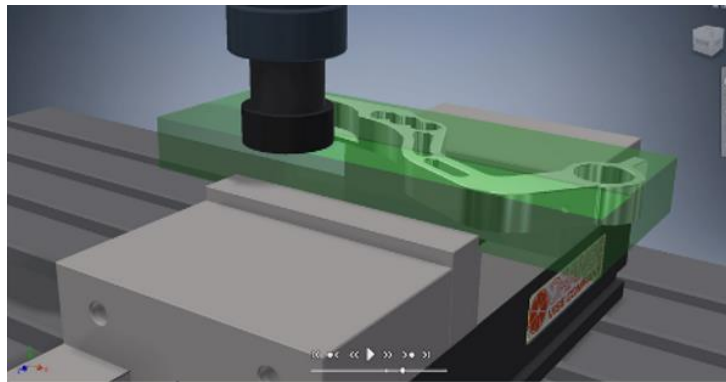
*Figura 10.* Modelo generado en el software de diseño  
Fuente: Olasz (2013)

### Software CAM

Para diseñar un producto y programar diversos procesos de manufactura especialmente el mecanizado por CNC, se utiliza aplicaciones CAD/CAM. La interacción existente entre el software CAM y el CAD permite generar un matriz o trayectoria en base a los modelos creados



en el software y transformarlos en piezas físicas. Estos software generalmente se utilizan para la construcción de prototipos y piezas terminadas (AUTODESK, 2018a).



*Figura 11.* Interfaz CAD/CAM  
Fuente: AUTODESK (2018b)

### **Método de Elementos Finitos (MEF)**

La resolución de problemas de matemática e ingeniería son solventados a través de la utilización de un análisis estructural mediante el método de elementos finitos como una herramienta numérica. Para que este método operacional funcione se trabaja con un sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas, en el cual se modela el cuerpo mediante su división en un sistema equivalente de cuerpos más pequeños (elementos finitos), interconectados por puntos en común (nodos) y líneas de frontera. Por lo tanto, esta estrategia hace posible obtener soluciones aceptables a problemas que involucran geometrías y propiedades complicadas.

Hoy en día, el desarrollo de las computadoras ha dado pie a la creación de programas computacionales con numerosos propósitos generales y especiales encargados de manejar métodos de elemento finito (Otero, 2006).

Con el fin de facilitar los trabajos a realizar se trabaja con el uso de ordenadores en el cual se debe definir el modelo de elemento finito, suministrar al programa la posición de los elementos, nodos y como están conectados. Se debe establecer las propiedades de los elementos, las cargas aplicadas, las condiciones y el análisis a desarrollar. La computadora se encarga de organizar

toda esta información y generar las ecuaciones necesarias para llevar a cabo el análisis, donde puede emplear dos enfoques asociados a la resolución de problemas de mecánica estructural. (Otero, 2006).

El primero de ellos es llamado el método de la fuerza o de flexibilidad, el cual considera las fuerzas internas como incógnitas del problema. Para obtener las ecuaciones gobernantes primero se usan las ecuaciones de equilibrio y luego se introducen las ecuaciones de compatibilidad, resultado en un grupo de ecuaciones capaces de determinar las fuerzas desconocidas.

El segundo enfoque es llamado el método de desplazamiento o método de rigidez, el cual asume el desplazamiento de los nodos como la incógnita del problema. Este método requiere que los elementos conectados a un nodo en común a lo largo de un extremo permanezcan conectados luego de aplicar una carga.

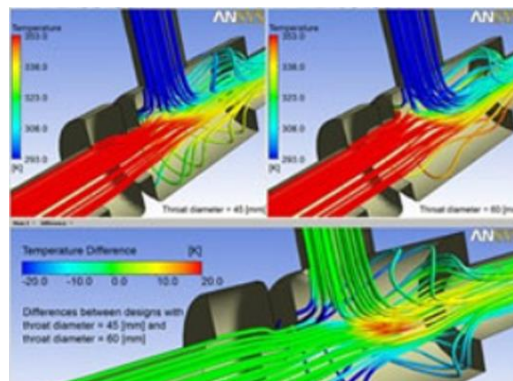
Para Ortiz et al., (2018) este último método es de mayor interés debido a que su formulación es más simple para la mayoría de los análisis de problemas estructurales. Como consecuencia, la mayoría de los programas destinados a emplear MEF han incorporado este enfoque para la solución de problemas, la cual sigue los pasos mostrados a continuación:

1. Discretización y selección del tipo de elementos.
2. Selección de la función de desplazamiento.
3. Definición de la deformación, esfuerzo deformación o relación de deformación.
4. Derivación de la rigidez de elementos de la matriz y de las ecuaciones.
5. Ensamblaje de las ecuaciones de elementos para obtener las ecuaciones globales e introducción de condiciones de frontera.
6. Resolución de los grados de libertad desconocidos.
7. Resolución de los esfuerzos y deformaciones de elementos.

## 8. Interpretación de resultados.

### Software especializado en la simulación del termoformado

Se trata de un programa computacional CFD, que se basa en elementos finitos para el análisis de flujos laminares que ocurren en la fabricación de polímeros de diseño de matrices inversas, los usuarios pueden cortar. Debido a su capacidad de diseño de matrices inversas, los usuarios pueden cortar troqueles mucho más rápido que con el método tradicional de construcción y prueba. Lo que reduce el ahorro de recursos económicos y tiempo. Además, la calidad de los productos soplados y termoformados se mejora enormemente al ejecutar procesos de prueba y error con la herramienta informática especializada en lugar de en la línea de producción (PADT, 2018). En la figura 12 se observa algunas de las aplicaciones que nos ofrece este software.



*Figura 12.* Modelo generado por el software especializado en la simulación del termoformado  
Fuente: PADT (2018)

## Método

### Tipo de estudio

En la investigación se utilizó el método deductivo que se basa en el estudio a base de la descripción de los componentes, que permite identificar los diversos fenómenos ocurridos en el proceso de termoformado; así, la relación entre la geometría de la pieza, los espesores del material y las variables que puedan presentarse en el proceso de obtención de la carcasa y de esta forma comparar los resultados obtenidos con la pieza existente. Adicionalmente se utilizó el método experimental en el cual se determinó las especificaciones técnicas de la carcasa.

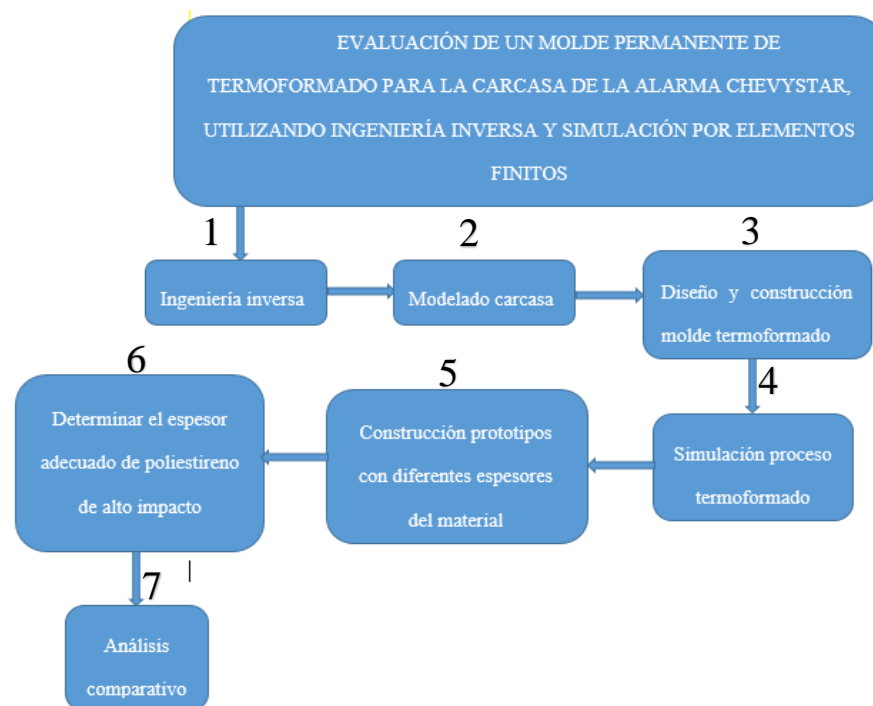


Figura 13. Esquema de trabajo para la evaluación de un molde permanente de termoformado

En la Tabla 1 se resume la metodología a utilizar para la obtención de la carcasa.

Tabla 1

Proceso a seguir para la obtención de la carcasa de alarma ChevyStar

<b>sistema de modelado CAD (Vxelements, Geomagic, Inventor)</b>	<b>construcción de geometría</b>  escaneo geometría / desarrollar modelo  Impresión 3D del modelado
<b>sistema generación molde (Inventor CAM,CNC)</b>	<b>generación del molde</b>  escoger material  obtener código G  Mecanizado
<b>Termoformado-Método de Elementos Finitos (ANSYS Poliflow)</b>	<b>Simulación termoformado</b>  Geometría  ingresar material  seleccionar espesor material  generar malla  definición de condiciones de frontera  Resolver  Generar resultados
<b>Termoformado experimental</b>	<b>Construcción de carcasas</b>  Calentar  Termoformar Enfriar
<b>Análisis de resultados (variación de espesores)</b>	<b>Validación de resultados</b>  Resultados MEF vs Termoformado experimental

### Descripción de la pieza a fabricar

Se trata de una carcasa de geometría rectangular, teniendo de largo 95 mm, ancho 85 mm y 25 mm de profundidad, el espesor del material es uniforme de 1,5 mm; en su interior se aloja el sistema integrado de la alarma en su totalidad, la misma está compuesta por dos partes; una superior que podríamos decir es la principal ya que en la parte exterior de esta se encuentra el logo de la marca Chevrolet, en la parte interna debe llevar dos orificios que se utilizan para unir con la segunda parte de la carcasa mediante unos tornillos de sujeción; además en las partes laterales lleva unas ranuras que sirven para poder ubicar los conectores hacia el cableado de la instalación. La segunda parte de la carcasa en la parte frontal posee dos orificios que atraviesan en su totalidad a la misma para poder instalar los tornillos que sujetan que la unen con la primera parte de la carcasa, en su parte exterior de igual manera que la anterior posee unas ranuras para que puedan sobresalir los conectores, y para finalizar posee dos orejas que sirven para sujetar a la alarma hacia el chasis del vehículo. En las figuras 14 y 15 se observa las partes externas e internas que conforma la carcasa respectivamente.



Figura 14. Fotografía de la cara superior y de la cara posterior de la carcasa



Figura 15. Fotografía de la cara interna y de la cara superior de la carcasa

### Ingeniería inversa

Para la realización de esta técnica se empezó por utilizar escáner 3D, el cual realiza una exploración de la superficie de un objeto que da como resultado sus medidas de acuerdo con un punto de referencia. Para procesar los datos obtenidos por el escáner fue necesario trabajar con los programas informáticos especializados para este tipo de trabajo, estos permiten utilizar técnicas de tratamiento y reconstrucción geométrica (Parras et al., 2016).

### Escaneado

Para la realización esta técnica se utilizó el escáner 3D, cuyas características se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2  
Características del escáner 3D

<b>Peso</b>	<b>0,85kg</b>
Dimensiones	122 x 77 x 294mm
Velocidad de medición	205000mediciones/s
Área de escaneado	225 x 250mm
Fuente de luz	cruces laser
Tipo de laser	II(seguro para la vista)
Resolución	0,1 mm
Precisión	hasta 0,04 mm
Precisión volumétrica	0,02 mm +0,1 mm/m
Distancia de seguridad	300 mm
Profundidad de campo	250 mm
Tamaño de las piezas recomendado	0,1 - 0,4 m
Software	VXelements

Formatos de salida	.dae,.fbx,.ma,.obj,.ply,.stl,.txt,.wrl,. X3d,.x3dz,. Zpr
Software compatible	3D Systems (Geomagic Soltutions), InnovMetric Software (PolyWorks), Dessault Systemes(Catya V5, SolidWorks), Siemens (NX, Solid Edge)
Estándar de conexión	1 x USB 3.0
Rango de temperaturas de funcionamiento	15 - 40 grados Celsius

Fuente: Malavé y Ojada (2017)

Previo al escaneo de la carcasa original; se definió si el color de esta podía ser reconocido por el escáner 3D, como se observa en la figura 16 el material de la pieza existente es polipropileno y generalmente es de color negro, estas características presentadas por la pieza a ser replicada no son reconocidas por el scanner; por lo que fue necesario pintar de color blanco las dos piezas que conforman el conjunto de la carcasa.



Figura 16. Carcasa

Como se detalla en la figura 17 una vez que la pieza fue pintada de color blanco se procedió a pegar los papeles reflejantes para obtener un buen seguimiento en el escaneado.



Figura 17. Papeles reflejantes

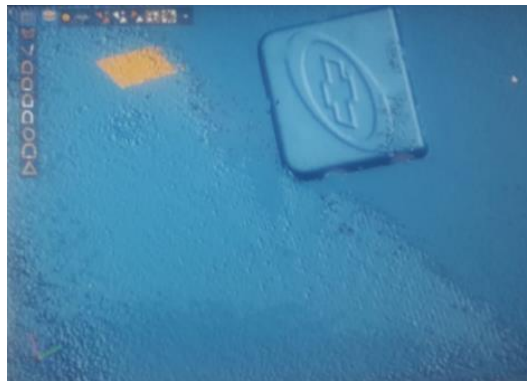


Como se puede ver en la figura 18, a continuación se procedió al reconocimiento del movimiento en el escáner donde se realizó el primer intento de escaneo, la escala utilizada es de una resolución media a una distancia de 10 cm entre el sensor y las dos piezas de acuerdo a lo sugerido por Rodriguez (2017).



*Figura 18.* Escaneo de la carcasa

En la figura 19 se observa como ejemplo la realización del correcto escaneado de la tapa 1 con la ayuda del software requerido, después se procedió a guardar el archivo en formato .stl para continuar con el tratamiento adecuado para diseñar la imagen obtenida.

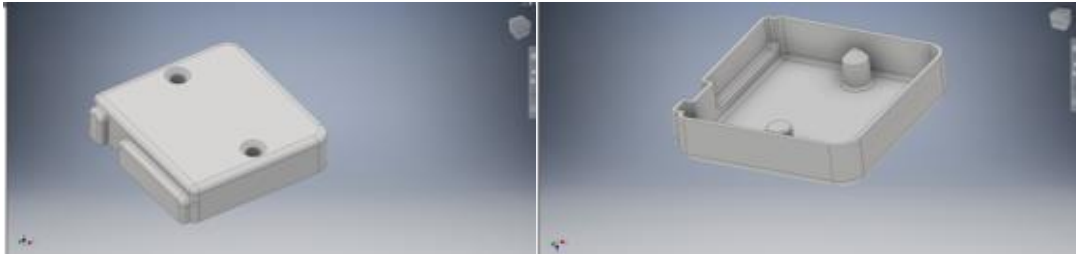


*Figura 19.* Resolución escaneado tapa 1

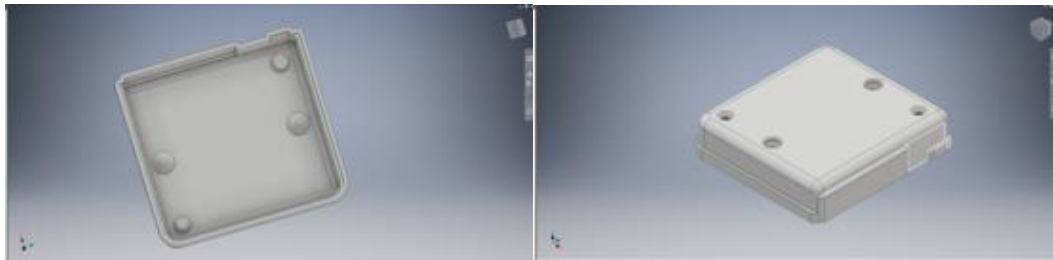
### **Modelado de la carcasa**

La pieza escaneada sirvió como gran ayuda para el modelamiento, se procedió a dibujar la carcasa que posteriormente sirvió para obtener el diseño del molde para su construcción.

En las figuras 20 y 21 se presenta el trabajo en el programa de modelamiento, aquí se dieron los últimos detalles del CAD, muchos de los cuales no pudieron ser detectados en el proceso de escaneo (Parras, Romero, Cavas, & Nieto, 2016).



*Figura 20.* CAD carcasa superior en vista interior o exterior



*Figura 21.* CAD carcasa inferior en vista interior o exterior

### **Prototipo rápido carcasa**

Con el fin de validar la geometría obtenida en los pasos anteriores se realizó un prototipo de la carcasa, una vez ejecutado este paso se procedió a realizar el diseño y construcción de los dos moldes.

En la figura 22 se encuentra la impresión 3D de las dos tapas que conforman la carcasa en una escala de 2 a 1, se midió y comparó con la carcasa en medidas reales.



Figura 22. Proceso de impresión del modelado

Para la impresión del prototipo se utilizó una impresora 3D, cuyas características se describen en la Tabla 3.

Tabla 3

Características técnicas de la impresora 3D

<b>Volumen de impresión</b>	<b>25 x 21 x 20 cm</b>
Altura de capa	0,05 – 0,35 mm
Velocidad	100 mm/s
Superficie de impresión	cama caliente con compensación de temperatura / PEI hassle free
Número de extrusores	1
Materiales soportado	Cualquier termoplástico incluyendo Nylon y Policarbonato
Sensores avanzados	2 termistores
Calibración	Automática 9 points XYZ / Compensación de ejes

Fuente: PRUSA (2018)

### **Molde de termoformado**

Una vez obtenido el modelo definitivo de la pieza, se trabajó en el diseño del molde. Previo a este trabajo fue necesario tener en cuenta aspectos como la geometría de la pieza lo que condiciona la posición en el molde en la máquina termoformadora, en definitiva todo el molde girara entorno a la geometría de esta (Cabañez & Sánchez, 2010). En la figura 23 se detalla el proceso para el diseño del punzón superior.

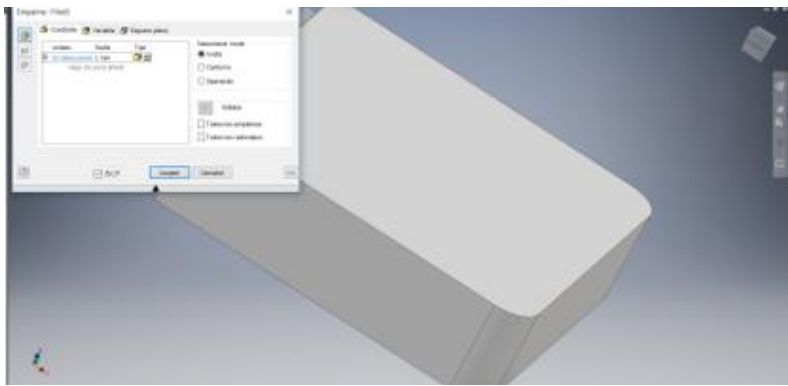


Figura 23. Modelado punzón superior

Material del molde

Tabla 4  
Matriz de variables para la lección del material del molde

Características	Material		
	Aluminio (6011)	Acero (astm a36)	Madera pino)
DENSIDAD (kg/m3)	2,698	7,85	900
RESISTENCIA A LA COMPRESION (kg/mm2)	40-44	48-55	40
Tensión de rotura (Mpa)	483	400-550	40
Manufactura	Alta mano de obra. Soldadura MIG, corte CNC por chorro de agua. Permite plegado, doblado, remaches, etc.	Soldadura MIG y TIG. Corte Plasma y Oxicorte	Herramientas de carpintería, manuales y eléctricas
Mantenimiento	Baja Mantención, no se oxida y puede recibir golpes	Alta Mantención, Requiere pintado constante y ánodos de sacrificio	Alta Mantención, requiere limpieza, pintado y protección al fouling

Fuente: Paz (2015)

De acuerdo a la información presentada por Paz (2015) y luego de revisar las necesidades del trabajo de investigación el material a utilizó en la construcción del molde es el Aluminio 6011, como se detalla en la Tabla 4 las características favorables que este posee en comparación con la

madera y el acero; además que este material ofrece velocidades de corte más elevadas; lo que repercute en tiempos de mecanizado menores y también se trata de un material que posee una gran transferencia de calor. También, el molde no va a ser sometido a grandes esfuerzos.

### **Criterios para el diseño del molde de termoformado**

La producción de piezas de termoformado es el resultado de varios factores, que son el punto medular para cualquier desarrollo dentro de la industria de fabricación. Una vez realizado el diseño es necesario considerar criterios básicos y las consideraciones finales en el diseño de los moldes que serán los parámetros fundamentales para la construcción de los mismos, sin importar la complejidad que se presenten. Con el fin de garantizar la construcción es importante considerar los siguientes conceptos:

1. Forma y dimensiones de la pieza.
2. Apariencia de la pieza.
3. Volumen estimado de fabricación.

El factor más importante, es el volumen estimado de producción, pues este concepto definirá el tipo de molde, material, acabado, técnica de termoformado, etc. A continuación, se presentará los criterios para el diseño del molde de termoformado para la carcasa:

1. Se eligió realizar dos moldes machos pues estos son más fáciles de usar, cuestan menos y son los más adecuados para formar piezas profundas. En las figuras 24 y 25 se encuentra la apariencia de los dos moldes.

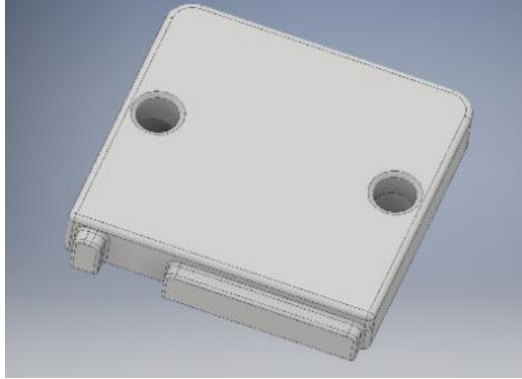


Figura 24. Molde 1

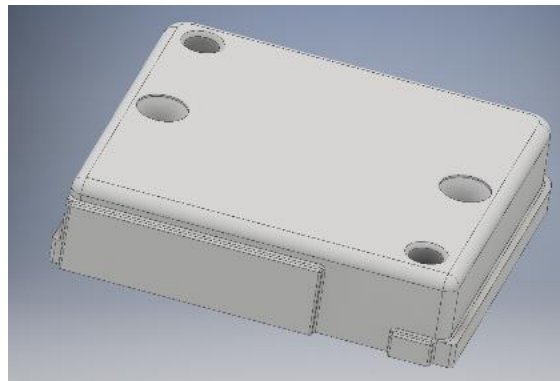


Figura 25. Molde 2

2. Para Perez (2011) “los moldes deberán contar con suficientes orificios de vacío para que la lámina revenida pueda conformarse a las partes críticas del molde, los orificios de vacío deberán hacerse en las partes más profundas y en las áreas en donde el aire pueda quedar atrapado, deben ser lo suficientemente pequeños para no causar marcas (de 1/32" a 1/8" de diámetro)” Como se puede ver en la figura 26 se puede lograr un vacío más efectivo si el orificio es agrandado por la parte interna.



Figura 26. Orificios de vacío

3. De acuerdo a lo manifestado por Rodríguez (2012) la retracción que se espera de la temperatura de moldeo hasta llegar a la temperatura ambiente es de 1% máximo.
4. En las áreas grandes y planas, una mínima curvatura del molde, permitirá obtener áreas sin modificación al momento de enfriar el material.
5. El mayor ángulo de salida de una pieza es de 3%, que limita la obtención de piezas con paredes a 90°.
6. Con el fin de disminuir los esfuerzos internos especialmente en el vértice es recomendable redondear las aristas. La resistencia de cualquier pieza se incrementa el momento de diseñar orillas, esquinas y cantos redondeados.
7. Las partes delgadas o más débiles, pueden reforzarse con costillas de refuerzo. Las costillas reforzarán también áreas planas de gran tamaño.
8. Si es necesario moldear incrustando un inserto permanente, debe considerarse, la diferencia del coeficiente de expansión de los diferentes materiales, de lo contrario podrá fallar a causa de un inserto forzado, por la diferencia de expansiones y contracciones de los materiales en contacto.

### **Mecanizado del molde**

La manufactura se basó en el sistema CAD/CAM, por parte del CAD los moldes se definen mediante los planos, mientras que el CAM se basa en el uso de computadores para el manejo de equipos CNC, usa códigos numéricos y alfanuméricos para establecer posiciones entre la pieza y la herramienta.

La herramienta CAM obtiene el proceso de mecanizado, es decir, el lenguaje de programación de la geometría para mecanizar la pieza, en la que proporciona el tiempo de mecanizado y

permite una simulación del proceso, después de generar el código, este es exportado hacia la máquina.

Se utilizó el módulo de manufactura (CAM), dispone funciones variadas dentro las cuales se encuentra la programación de control numérico y otras como el mecanizado de eje múltiple de alta velocidad, permitiendo realizar muchas tareas con alto nivel de complejidad.

Para obtener el código de programación para la máquina CNC o código G para los dos moldes se procedió de la siguiente forma:

1. Inicialmente se importó cada pieza al módulo CAM y se procede a centrar la pieza en cada uno de los ejes (X, Y, Z) mostrado en la figura 27.

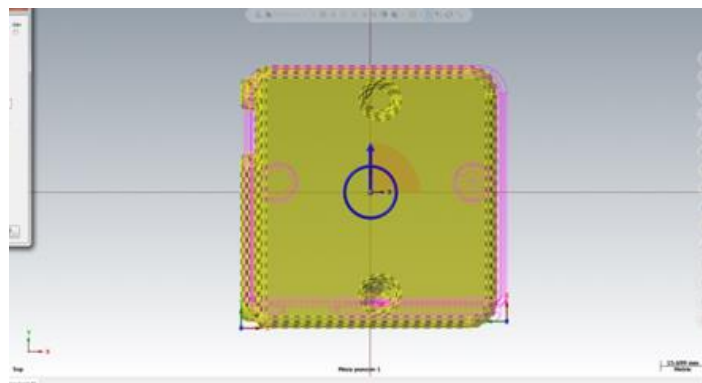


Figura 27. Pieza centrada

2. En la figura 28 se observa cómo se reconoció el material de la pieza a fabricar, para el caso en estudio se trabajó con Aluminio 6011.

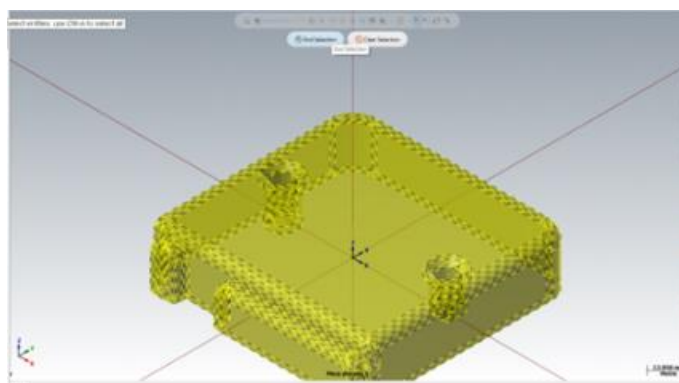


Figura 28. Asignación material del molde



3. Una vez seleccionado el material a mecanizar se configuró los parámetros para el programa de CNC, entre ellos el tipo de herramienta y operaciones a realizar que se presentan en la figura 29.

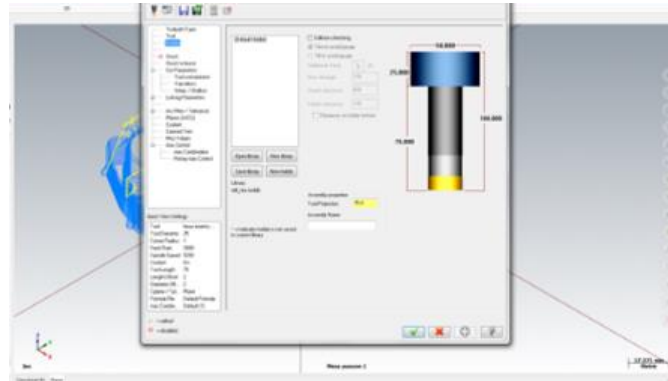


Figura 29. Configuración herramental

4. A continuación, se verificó el camino que va a seguir la herramienta antes de correr el programa como se observa en la figura 30.

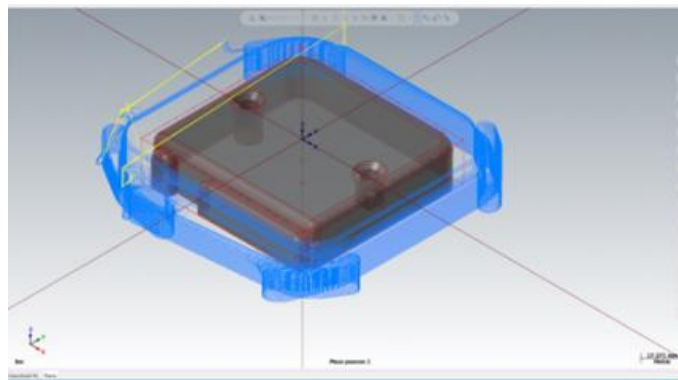


Figura 30. Camino del herramental

5. En la figura 31 se detalla cómo se realizó la simulación del mecanizado del molde 1.

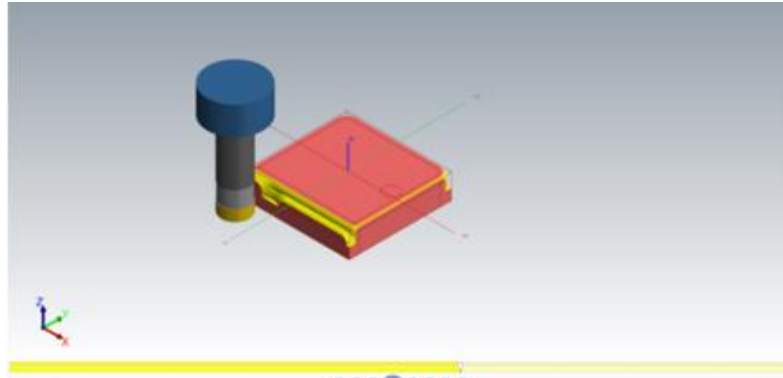


Figura 31. Simulación mecanizado molde 1

6. Por último, se generó el código G para ser ingresado en el centro de mecanizado para la fabricación del molde.

Con el fin de elaborar la segunda tapa se repitió el mismo proceso, obviamente con las variaciones de la forma, como el camino de la herramienta, código G.

Los dos modelos necesarios para la fabricación de la carcasa se lo hicieron en un centro de mecanizado CNC de la marca Travis, modelo TR-1XP, similar al presentado en la figura 32.



Figura 32. CNC marca Travis modelo TR-1XP  
Fuente: Rodríguez (2011)

Las características que posee esta máquina se las detalla en la Tabla 5.

Tabla 5

Características de CNC marca Travis modelo TR-1XP

<b>Carreras y distancias</b>	<b>Carrera longitudinal eje Z 810 mm</b>
<b>Cabezal</b>	Carrera transversal eje X 280 mm Gama de velocidades 150 - 3200 rpm Diámetro agujero husillo (con unidad hidráulica) 45 mm Nariz de husillo A1 – 6 Diámetro agujero husillo (sin unidad hidráulica) 56 mm
<b>Avances</b>	Avance rápido eje Z 1500 mm/min Avance rápido eje X 1000 mm/min
<b>Capacidades</b>	Distancia entre centros: 1000 mm Volteo sobre bancada: 460 mm Volteo sobre carro transversal: 230 mm Altura de centro: 230 mm Ancho de bancada: 300 mm Diámetro de plato: 200 mm Número de herramientas 8
<b>Tornillos Contrapunta</b>	Diámetro de tornillos X,Y,Z; X 25 / Z 40 mm Curso de manga: 170 mm Cono de manga: MT4 Diámetro manga 58 mm
<b>Potencia</b>	Motor principal 10 HP Servomotores X,Y,Z 6 Nm Motor de bomba refrigerante 1/6 HP Motor de sistema hidráulico 0.75 HP
<b>Peso y dimensiones</b>	Área ocupada 1480 x 2950 x 2100 mm. Peso 2200 Kgs. Marca: Travis

Fuente: Travis (2018)

Para la realización del maquinado se utilizó una fresa de 50 mm de diámetro R290-050022-12M con capacidad para 4 insertos, los insertos utilizados son de Tungsteno SANDVIK R290-12t308M, estos insertos tienen una calidad ideal para aceros inoxidables, aceros de bajo contenido de carbono sin tratamientos térmicos, aleaciones de aluminio, bronce, cobre y latón. La figura 33 muestra los insertos acoplados en la fresa descritos anteriormente. (Sandvik Coromant, 2017)



Figura 33. Fresa R290-050022-12M

Fuente: Sandvik Coromant (2017)

Para la ejecución del trabajo técnico se utilizó una herramienta para el desbaste de 8mm de diámetro y otra para el acabado de 5mm de diámetro, las especificaciones se pueden ver en la Tabla 6.

Tabla 6

Características de la herramienta

**Fresas de carburo 4 flancos Marca Sandvik**

	Acabado	Desbaste
OAL:	63 mm	50 mm
LOC:	19 mm	16 mm
DIA:	8 mm	5 mm

Fuente: Sandvik Coromant (2017)

Según Castro (2016) los parámetros recomendados para el desbaste del Aluminio 6011, son los que se detallan en las Tablas 7, 8 y 9.

Tabla 7

Velocidades y avance recomendado en el proceso de face milling (planeado) de aleaciones ferrosas y no ferrosas con herramientas de acero rápido y carburo

Material (Dureza)	Profundidad de corte (mm)	Herramienta de acero rápido			Herramienta de carburo		
		Velocidad de corte (m/min)	Avance por diente (mm)	Material de la herramienta	Velocidad de corte (m/min)	Avance por diente (mm)	Material de la herramienta
<b>Al 6011 (30-80 HB)</b>	1	365	0,25	S4, S2	610	0,25	K10,M20
	4	245	0,4	S4, S2	550	0,5	K10,M20
	8	200	0,5	S4, S2	365	0,65	K10,M30

Fuente: Castro (2016)

Tabla 8

Velocidades recomendadas y avance para slab milling (desbaste) de aleaciones ferrosas y no ferrosas con herramientas de acero rápido y carburo

Material	Dureza (HB Brinell)	Condición (en frio)	Profundidad de corte (mm)	Velocidad (m/min)	Avance por diente (mm)
<b>Aluminio 6011</b>	30-80	En frio	1	365	0,3
			4	320	0,4
			8	260	0,4

Fuente: Castro (2016)

Tabla 9

Velocidades y avances para el fresado de acabado para el aluminio 6011 con herramientas de acero rápido y carburo

Material (Dureza)	Profundidad de corte (mm)	Herramienta de acero rápido			Herramienta de carburo		
		Velocidad de corte (m/min)	Avance mm/diente, respecto al diámetro de la herramienta (mm/diente)			Material de la herramienta	
<b>Al 6011 (30-80 HB)</b>	0,5	245	0,075	0,0102	0,13	0,18	S4,S5,S2
	1,5	185	0,102	0,15	0,2	0,25	S4,S5,S2

Fuente: Castro (2016)

### Material de la carcasa

En base a los datos mostrados en la Tabla 10 se definió que el material para la construcción de la carcasa sea el poliestireno de alto impacto, se construyó tres prototipos con planchas de diferentes espesores para determinar el más adecuado.

Tabla 10

Matriz de variables selección material de la carcasa

Polímeros	Temperatura de deflexión al calor			Temperatura de termoformado		
	A 264 PSI (°C)	A 66 PSI (°C)	SIN CARGA (°C)	Temp. de la hoja (°C)	Temp. del molde (°C)	Temp. de ayuda (°C)
<b>Acrílico extruido</b>	94	98		135-175	65-75	
<b>Acrílico cell-cast</b>	96	110		160-180	65-75	
<b>Acetoburitato de celulosa</b>	65-75	75-80	120-150	140-160		
<b>Poliétileno de alta densidad</b>		60-80	100	145-190	95	170
<b>Polipropileno</b>	55-85	110-115	140	145-200		
<b>Poliestireno</b>	70-95	70-100	100	140-170	45-65	90

<b>Poliestireno de alto impacto</b>	85-95	90-95	120	170-180	45-65	90
<b>SAN</b>	100	105		220-230		
<b>ABS</b>	75-115	80-120	95	120-180	70-85	90
<b>Polivinilo de cloruro (RV.C)</b>	70	75	110	135-175	45	80
<b>Policarbonato</b>	130	140	160	180-230	95-120	140

Fuente: Melorose, Perroy y Careas (2015)

### Simulación del termoformado por elementos finitos

Se realizó la simulación con la herramienta informática especializada al para este tipo de trabajo, aquí se establecieron todas las condiciones necesarias para simular la construcción de la pieza; como por ejemplo los tiempos y las velocidades de los desplazamientos de los moldes, parámetros visco elásticos, propiedades del material (poliestireno de alto impacto).

Con el fin de garantizar el producto final se realizó la simulación por elementos finitos como lo establece Capilla, Plascencia, Salazar, Aguilera, & Negrete (2011) convirtiéndose en la base de este proyecto, pues se hizo las respectivas simulaciones con las planchas del poliestireno de alto impacto en los tres espesores propuestos y con la utilización del programa especializado.

La metodología que se utilizó fue similar en los tres casos propuestos, con resultados diferentes de acuerdo a las especificaciones particulares bajo el siguiente proceso:

#### Modelo CAD.

En la figura 34 se observa cómo se importó el modelo CAD de los moldes de las dos tapas que componen la carcasa a spaceclaim.

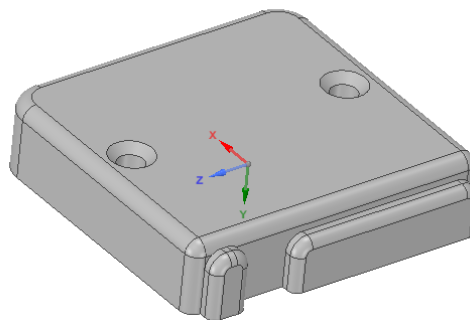


Figura 34. CAD del molde importado al entorno de simulación

El CAD de la plancha también se lo hizo en spaceclaim, detallado en la figura 35.

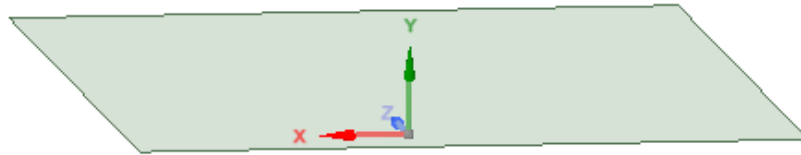


Figura 35. CAD de la plancha a utilizar

En la figura 36 se presenta la vista final del modelo que consta del molde y la plancha, en superficie.

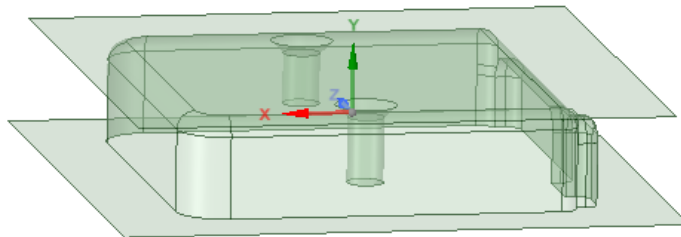
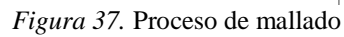


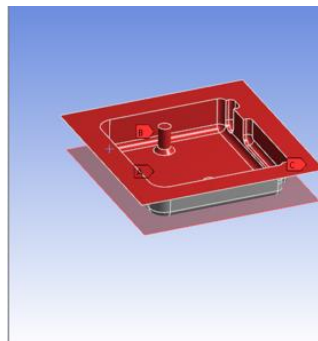
Figura 36. CAD molde y plancha

### Proceso de mallado.

Como lo realizó Gómez (2017) en su trabajo se procede a mallar las piezas para ser simuladas, durante este proceso se determinó el tipo y tamaño de las mallas, que son presentados en detalle en la figura 37.



Como se puede ver en la figura 38 en este paso se señaló el molde, la plancha y zonas de sujeción.



*Figura 38. Condiciones de frontera*

La figura 39 muestra el momento en que se creó una nueva tarea. La nueva tarea consiste en un modelo F.E.M., simulación dinámica y una geometría en superficie.

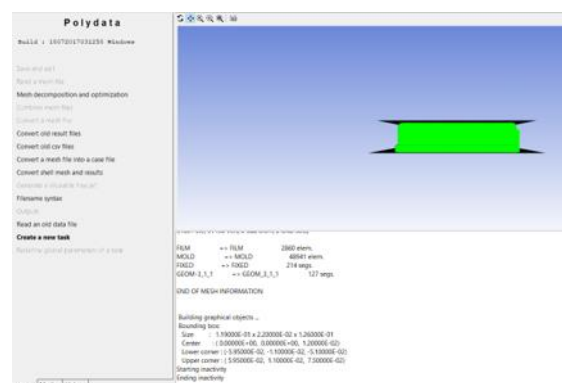


Figura 39. Creación nueva tarea de simulación



Seguidamente como se detalla en la figura 40 se indicó cual es el molde y cuál es la plancha en la geometría cargada.

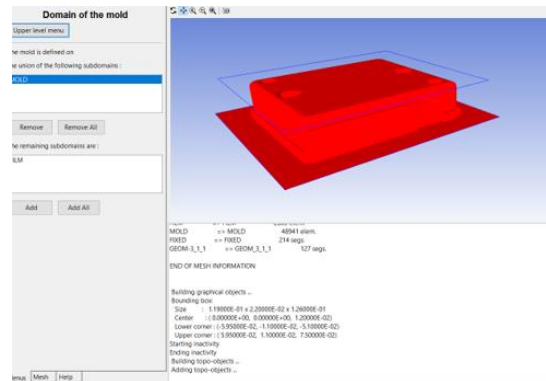


Figura 40. Señalización molde y plancha

En la figura 41 se detalla la velocidad de desplazamiento del molde.

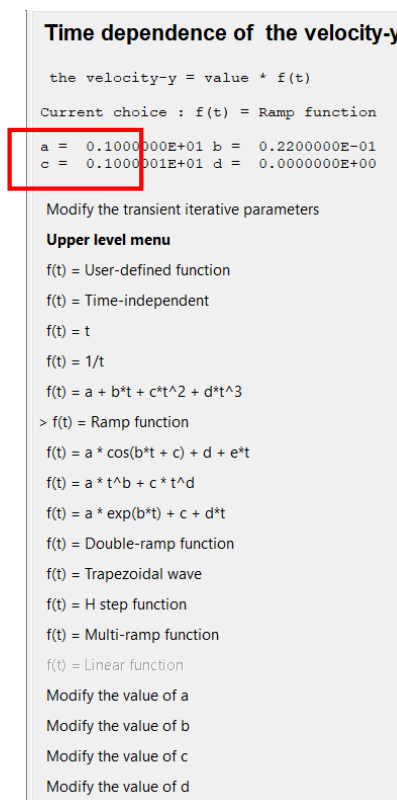


Figura 41. Velocidad desplazamiento del molde

En la figura 42 se detalla el tiempo de duración de la simulación fueron 2 segundos.

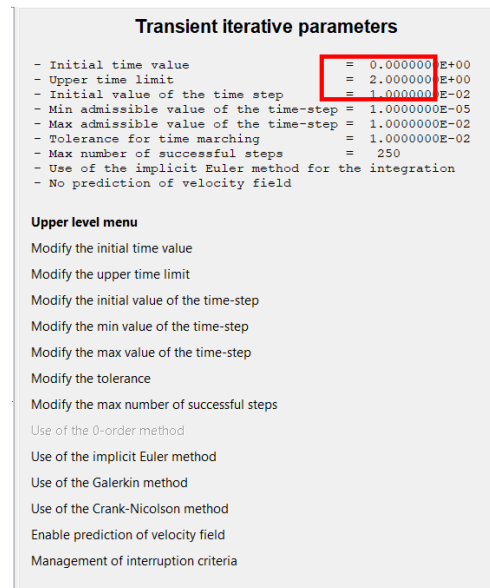


Figura 42. Tiempo de simulación

### Procesamiento.

Una vez introducidos todos los parámetros de la simulación se procedió a correr el programa para ver los resultados nos genera el software.

### Termoformado experimental

Una vez que se realizó la simulación se hizo el termoformado experimental en planchas de poliestireno de alto impacto en los espesores de 1.5, 2 y 2.5 mm; para ver la variación de los espesores en diferentes puntos de las piezas y determinar así cuál de los tres espesores propuestos es el más adecuado para realizar la producción en serie, comparando con el espesor de la carcasa existente, sabiendo que la misma es actualmente fabricada mediante el proceso de inyección y tienen un espesor uniforme de 1.5 mm. Para realizar el termoformado se utilizó una maquina Formech 2440 (figura 43), utiliza gas como medio para realizar la transferencia de calor, cuyas características técnicas son detalladas en la Tabla 11.

Tabla 11  
Características de la máquina Formech 2440

Área de formado	Tamaño de la lámina	Profundidad de termoformado máxima	Grosor máximo del material
2380 x 1160 mm	2440 x 1220 mm	600 mm	500 mm

Fuente: Formech 2018



Figura 43. Termoformadora Formech 2440

Para la realización del termoformado con cada espesor seleccionado se realizó el siguiente proceso:

#### **Preparación y carga de la lámina.**

En este paso lo q se seleccionó la plancha según el espesor q se desea moldear, para seguidamente fijarla a la máquina termoformadora, además se debe realizar una inspección del área para que no se encuentren anomalías al momento de moldear las piezas, que se lo observa en la figura 44.



Figura 44. Preparación de la lámina

**Calentamiento.**

En la figura 45 se detalla esta etapa del proceso, en donde se suministró calor a la lámina mediante efectos de conducción para alcanzar la temperatura deseada; debido a la naturaleza aislante de los polímeros, esta etapa suele ser el paso más largo.

Para evitar fisuras o craqueos es necesario realizar un control intenso de la temperatura pues un calentamiento menor al recomendado puede causar esfuerzos internos que llegarán a estos problemas; así mismo el realizar el calentamiento de la plancha a una temperatura superior al recomendado podría ocasionar que en la pieza se produzcan burbujas y marcas de molde; para el poliestireno de alto impacto se recomienda que la lámina debe alcanzar una temperatura de 170 a 180 grados Celsius (FORMECH, 2015)



*Figura 45.* Calentamiento del material

**Termoformado.**

Se empleó el formado a presión, este se utiliza cuando la presión atmosférica es inadecuada para proporcionarle detalles a una lámina conformada y tiene una ventaja considerable con la técnica por vacío atmosférico, ya que puede soportar alrededor de 10 veces más la presión de conformado.

Para esta técnica el molde debe contar con orificios para ventilación del aire atrapado y así evitar arrugas o formados deficientes.

Con lo establecido por Lupino (2016) las piezas pequeñas se ha vuelto populares formarles con presión de aire, provocando ventajas como la mejora a las tolerancias dimensionales, sin embargo la velocidad de formado se puede incrementar considerablemente y mejorando la definición de los detalles finos. En la figura 46 se observa el material termoformado.



Figura 46. Termoformado

### **Enfriamiento.**

Para tener una estabilidad dimensional en la pieza trabajada en el proceso de termoformado es necesario empezar con el enfriamiento en el momento en que la lámina entra en contacto con la superficie del molde. En este caso se realizó un enfriamiento por convección mediante la aplicación de soplado de aire, como se puede observar en la figura 47.



Figura 47. Sopladora de aire

**Descarga y corte.**

La descarga debe realizarse en el tiempo apropiado debido a que tiempos de ciclo muy cortos pueden ocasionar deformaciones de la pieza y tiempos de ciclo muy largos pueden ser económicamente desfavorables. Después de que el ciclo de formado ha terminado, las piezas deben ser cortadas para eliminar el material excedente.

La selección de la técnica y el equipo son importantes para un adecuado terminado de la pieza, y consideran algunos factores como la medida de la hoja, la profundidad y tamaño de la pieza, el nivel aceptable de aspereza de la superficie del corte, la velocidad de corte, la tolerancia dimensional requerida entre otros.

Al tratarse de piezas de prueba en este caso se realizó el corte de una forma manual con una sierra; sin embargo, al momento de realizar una producción en serie se recomienda utilizar procesos de corte más efectivos como, por ejemplo: corte con láser, rúter, sierras eléctricas. En la figura 48 se observa las piezas termoformadas listas para ser cortadas.



*Figura 48.* Piezas listas para ser cortadas

**Análisis comparativo**

Para realizar la validación de los resultados se efectuó una comparación dimensional con los datos de la simulación y en la construcción de los tres prototipos fabricados con diferentes espesores del poliestireno de alto impacto; además, se los comparó con la pieza existente en el

mercado, para determinar posibles mejoras en el producto final y posibles fallas como lo realizaron Pelliccioni, Müller-Karger, y Candal (2008) en su estudio.

Las validaciones q se dan en este proyecto se enfocaron a la variación del espesor de las planchas luego de ser termoformadas; para ellos se tomaron en cuenta los resultados de la simulación y del termoformado experimental y se comparó las medidas obtenidas con el espesor de las piezas originales (1.5 mm), así determinó el espesor de la plancha q más se acerque en promedio a el rango de 1.5 mm.

Bajo todas las condiciones de termoformado donde las piezas son formadas por una hoja o lámina de plástico, el área de la superficie se volverá más larga, habrá un estiramiento y por lo tanto el espesor del material se volverá más delgado.

Uno de los factores decisivos para este adelgazamiento es el radio, definido generalmente como el radio máximo de profundidad o altura con el mínimo espacio a través de la abertura.

Para estimar este adelgazamiento, deberá determinar el área de la hoja disponible para el termoformado y dividirla entre el área de la pieza final, incluyendo el desperdicio. Siempre es deseable que los moldes y las piezas termoformadas tengan radios de curvatura generosos.

Lupino (2016) en su trabajo menciona que existe una fórmula que permite determinar el porcentaje de adelgazamiento del material, tomando como dato inicial que el material es uniformemente revenido y estirado.

$$\% \text{ de adelgazamiento} = \frac{\text{espesor final del material}}{\text{espesor original del material}} = \frac{\text{area disponible de la hoja}}{\text{area total de la pieza}}$$

*Ecuación 9. Ecuación para determinar el porcentaje de adelgazamiento del material*

Fuente: Lupino (2016)

Para determinar el espesor en las piezas de termoformado se utilizó un micrómetro, señalando de esta forma diferentes puntos de la pieza fabricada. En la figura 49 se detalla uno de los puntos utilizados para medir los espesores obtenidos en la simulación y en las piezas existentes.

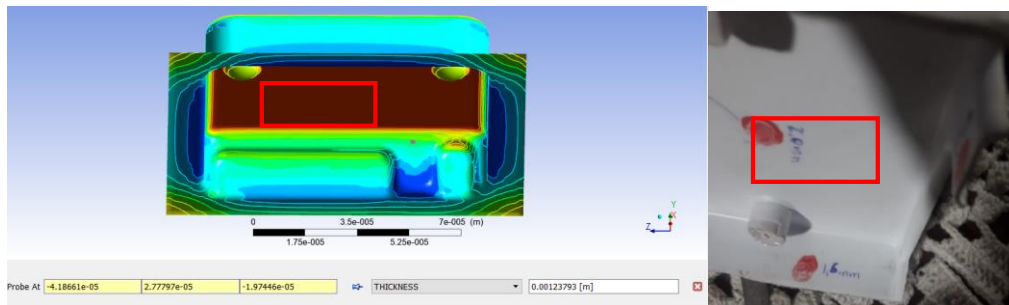


Figura 49. Comparación espesores simulación vs termoformado experimental



## Resultados

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos en la aplicación de los métodos desarrollados en el capítulo anterior, partiendo por la obtención del CAD de las carcasas utilizando ingeniería inversa y su posterior tratamiento con la ayuda del software de diseño; seguidamente se imprimió un prototipo de las tapas para verificar la similitud de la forma de las carcasas redibujadas con la existentes.

A continuación, se muestra la simulación de la construcción y la generación del código G de los dos moldes mediante el módulo CAM, así se los construyó mediante un centro de mecanizado de 3 ejes (CNC).

Con los CAD de las carcasas y los moldes obtenidos, se procedió a realizar la simulación del proceso de termoformado proponiendo planchas de poliestireno de alto impacto de tres espesores distintos para verificar el más adecuado para la fabricación de las piezas en serie.

Luego se construyó las dos carcasas con los tres espesores de las planchas del material propuesto para validar los resultados obtenidos en la simulación por elementos finitos.

A continuación, se realizó un análisis dimensional en diferentes puntos críticos para observar la variación de los espesores de las piezas físicas vs. las obtenidas en la simulación, para de esta forma validar el espesor ideal del material que se debe utilizar.

Se logró demostrar que mediante el proceso de termoformado se puede producir en serie autopartes plásticas no muy complejas en nuestro país, ya que este proceso resulta ser más económico y menos complejo que el moldeo por inyección.

Se presentó los resultados obtenidos en este proyecto de investigación a la empresa Road Track Cia. Ltda., para que quede a su disposición la fabricación de las carcasas en el medio nacional y de esta forma aportar al cambio de la matriz productiva y por ende a la disminución de las importaciones.

A continuación, se detalla los resultados obtenidos en cada una de las etapas explicadas anteriormente.

### **Obtención de la geometría mediante Ingeniería Inversa**

Como se observa en la figura 50 al momento de realizar el escaneado se pudo reconocer en el porcentaje esperado la geometría de las carcasas, esto se debe a que el scanner que se utilizó posee las prestaciones técnicas que se requieren para este tipo de trabajo, lo que desembocó en la utilización de menor cantidad de tiempo para la creación de los modelos.



*Figura 50. Escaneo carcasa*

Con la ayuda de programa especializado se pudo corregir en su gran mayoría las imperfecciones producidas en el escaneo, el tratamiento realizado para cada tapa se puede observar en las figuras 51 y 52.

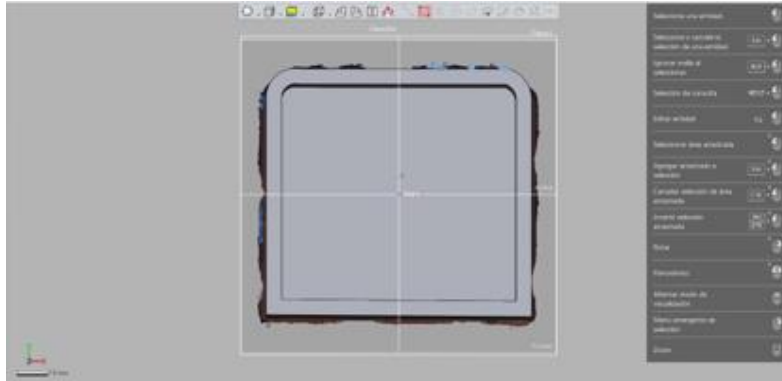


Figura 51. Tratamiento de la tapa superior

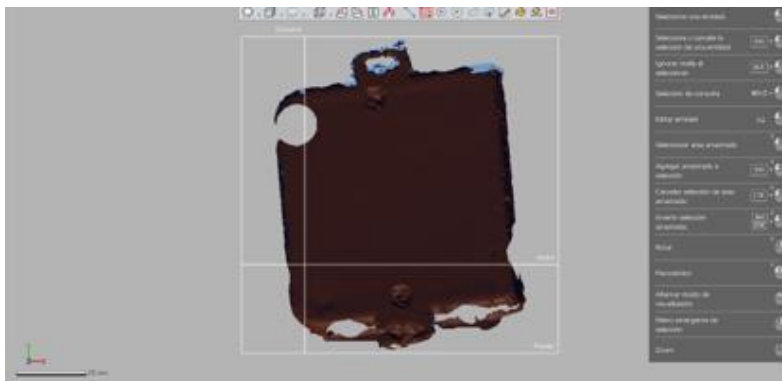
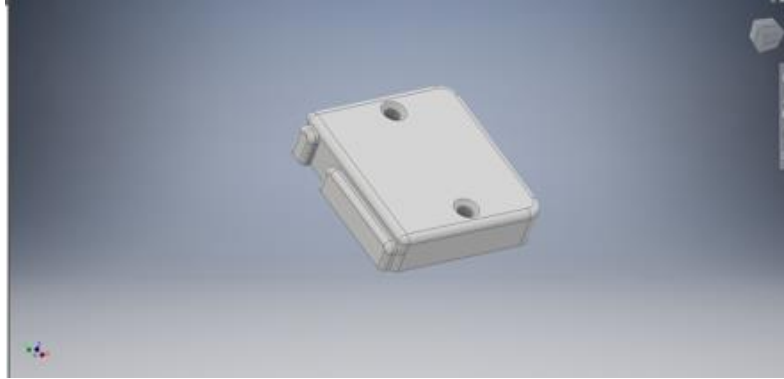


Figura 52. Tratamiento de la tapa inferior

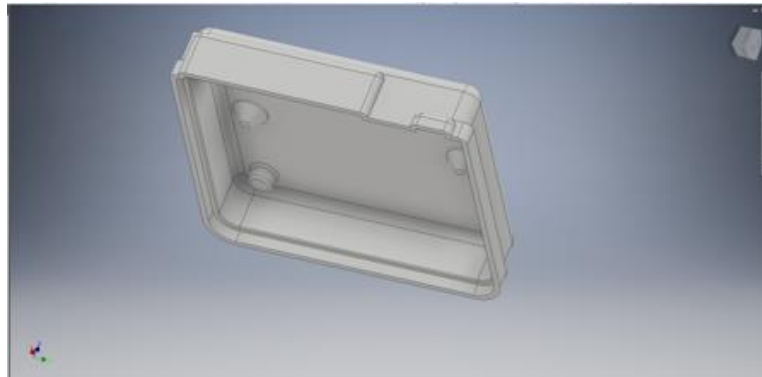
El producto final del modelado de las carcasas se lo obtuvo importando los archivos generados en formato .stl hacia el software de diseño, en donde se pudo realizar las ultimas correcciones del modelado de las dos piezas, obteniendo así cada una de las geometrías esperadas.

En cuanto a la tapa número 1 se logró realizar cada uno de los detalles que poseen las carcasas existentes, inclusive las curvaturas más complejas como se muestra en la figura 53.



*Figura 53. CAD tapa 1*

De la misma forma en la segunda tapa se logró obtener un diseño similar al de la carcasa existente, incluso en los detalles más pequeños, como se observa en la figura 54.



*Figura 54. CAD tapa 2*

Como se ve en la figura 55 para tener una certeza concreta de que el diseño fue bien realizado se imprimió un prototipo para validar el CAD realizado.



*Figura 55. Prototipos de las tapas*

De esta forma se pudo determinar que la realización del CAD de las dos piezas fue exitosa, por lo que de esta forma se pudo proceder con total seguridad a la realización del molde.

### **Molde de termoformado**

Una vez obtenida la geometría deseada se procedió a realizar el diseño y la construcción de los dos moldes para cada una de las tapas.

En la primera fase se obtuvo el código G mediante el módulo CAM. En la segunda fase se procedió a realizar la construcción de los moldes en un centro de mecanizado CNC de 3 ejes utilizando el material seleccionado que se describe en el método (Aluminio 6011), se obtuvo así los dos moldes de termoformado destinados para cada una de las dos tapas que conforman la carcasa, una cualidad única que deben tener los moldes de termoformado es una superficie de acabado del molde totalmente plana. Los moldes obtenidos luego del mecanizado son presentados en la figura 56.



*Figura 56. Moldes tapa 1 y 2*

## Simulación por elementos finitos

### Mallado.

Se realizó la simulación del proceso de termoformado para cada uno de los espesores propuestos con el fin de determinar la disminución del grosor del material en cada uno de los casos evaluados.

La malla que generó el programa especializado tiene una calidad del 97 %, tratándose entonces de una malla de excelentes características, que son expuestas en la figura 57.

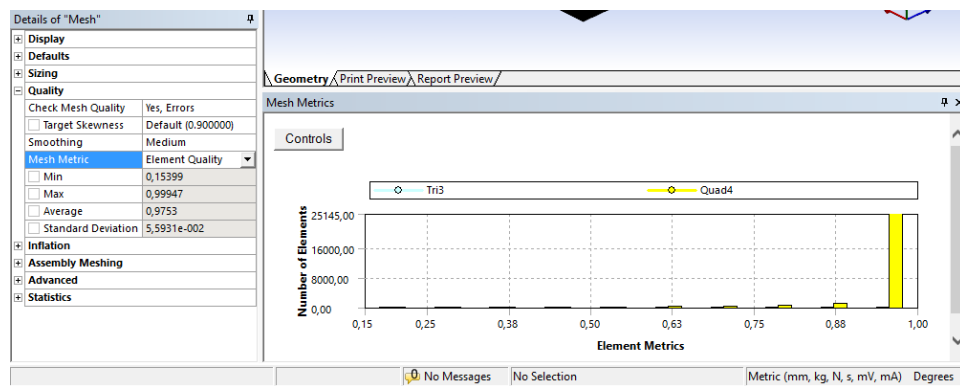


Figura 57. Métrica de la malla

### Desplazamiento del molde.

En la Tabla 12 y en la figura 58 se observa que para realizar el termoformado el molde tuvo un desplazamiento de 23 mm solamente hasta el primer segundo de la simulación, es decir hasta la mitad del tiempo en el que se realiza el termoformado, el segundo restante se lo utilizó para el vacío y así se generó la pieza deseada.

Tabla 12

Valores recorridos del molde

TIEMPO (s)	RECORRIDO (m)
0	0
1	0.023
1.000001	0

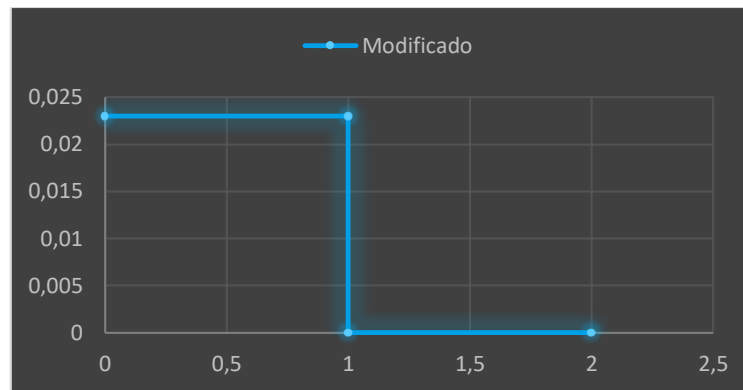


Figura 58. Desplazamiento del molde en función del tiempo

### Tiempo de activación de la presión de succión.

En la Tabla 13 y la figura 59 se observa la presión de succión de 1 MPa a partir de 1.2 segundos hasta los 2 segundos en donde finaliza el tiempo del termoformado.

Tabla 13  
Valores presión de vacío para el termoformado

TIEMPO (s)	PRESION (Mpa)
0	0
1	0
1.2	1
2	1

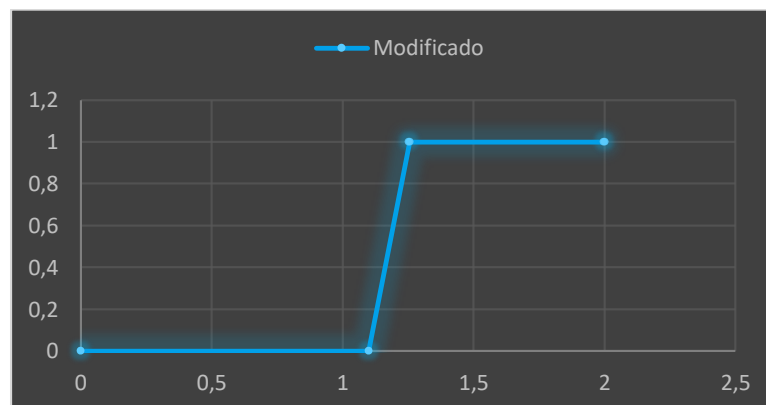


Figura 59. Presión de succión en función del tiempo

### Espesor.

Cada espesor del material sufrió un adelgazamiento diferente luego de ser realizada la simulación. Como se observa en la figura 60 el programa especializado indica las variaciones del espesor desde el mínimo color rojo hasta el máximo color azul.

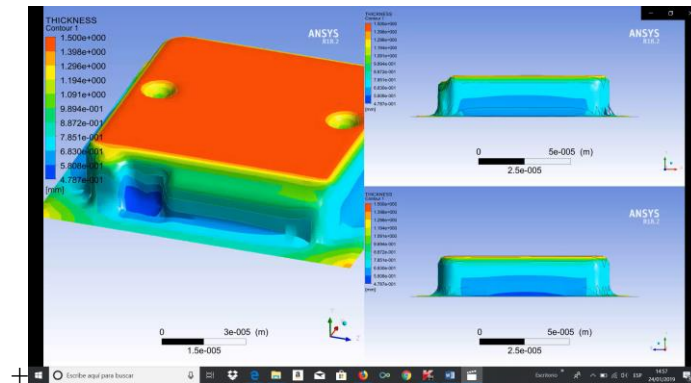


Figura 60. Nomenclatura variación de espesores

### Espesor 1,5 mm (figura 61).

El espesor máximo se consiguió es de 1,5 mm, representado con el color rojo, el mismo está ubicado en la parte central de la pieza, y el espesor mínimo bordea los 0,089 mm, representados por el color verde, este está ubicado en las partes donde sufre mayor deformación la pieza.

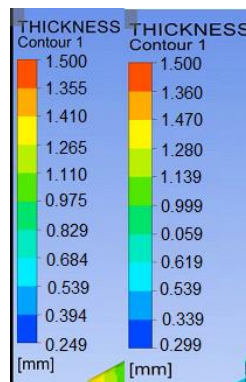


Figura 61. Adelgazamiento material espesor 1,5 mm tapa 1 y 2

### Espesor 2 mm (figura 62).

El espesor máximo que se consiguió es de 2 mm, representado con el color rojo, el mismo está ubicado en la parte central de la pieza, y el espesor mínimo bordea los 1,159 mm,



representados por el color verde, este está ubicado en las partes donde sufre mayor deformación la pieza.

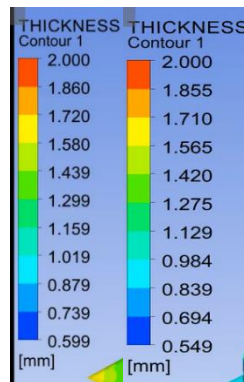


Figura 62. Adelgazamiento material espesor 2 mm tapa 1 y 2

### Espesor 2,5 mm (figura 63).

El espesor máximo que se consiguió es de 2,5 mm, representado con el color rojo, el mismo está ubicado en la parte central de la pieza, y el espesor mínimo bordea los 1,937 mm, representados por el color verde, este está ubicado en las partes donde sufre mayor deformación la pieza.

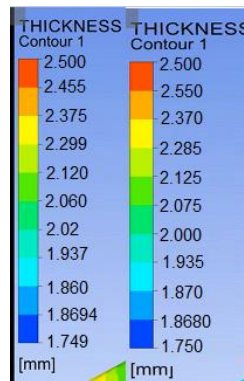


Figura 63. Adelgazamiento material 2,5 mm tapa 1 y 2

### Termoformado experimental

En esta fase del proceso se procedió a realizar el termoformado de las dos tapas que conforman la carcasa con las tres planchas propuestas de poliestireno del alto impacto.

**Espesor número 1.**

En este caso se trabajó con planchas de poliestireno de alto impacto con un espesor de 1,5 mm. Como se observa en la figura 64 se pudo obtener las dos tapas con el espesor utilizado.



Figura 64. Tapas espesor 1,5 mm

**Espesor número 2.**

En este caso se trabajó con planchas de poliestireno de alto impacto con un espesor de 2 mm que son presentados en la figura 65.



Figura 65. Tapas espesor 2 mm

**Espesor número 3.**

En este caso se trabajó con planchas de poliestireno de alto impacto con un espesor de 2,5 mm. Como se observa en la figura 66 se pudo obtener las dos tapas con el espesor utilizado.



Figura 66. Tapas espesor 2,5 mm

## Validación de resultados

### Geometría.

Con el fin de realizar la validación de la geometría de las piezas se comparó las dimensiones entre la carcasa que se encuentra en el mercado y las obtenidas por el proceso de termoformado, así se valoró la funcionalidad de la misma. La medición de la geometría obtenida se la realizó con un calibrador pie de rey como se observa en la figura 67.



Figura 67. Medición geometría

En la tabla 14 se detalla las geometrías obtenidas en el termoformado experimental.

Tabla 14

Geometría obtenida con el termoformado experimental

Dimensiones mm	Largo	Ancho	Profundidad
<b>Tapa 1</b>	95,5	85,5	12,5
<b>Tapa2</b>	95	85	12,5

**Espesor.**

Conociendo que la carcasa existente tiene un espesor uniforme de 1,5 mm, se realizó la medición en algunos puntos con un micrómetro a cada una de las tapas termoformadas experimentalmente y se verificó si el comportamiento del material concuerda con los resultados obtenidos en la simulación.

En las figuras 68, 69 y 70 se detallan los datos que se obtuvieron tanto en la simulación como en el termoformado experimental, en lo que concierne a la variación de los espesores en la tapa 1.

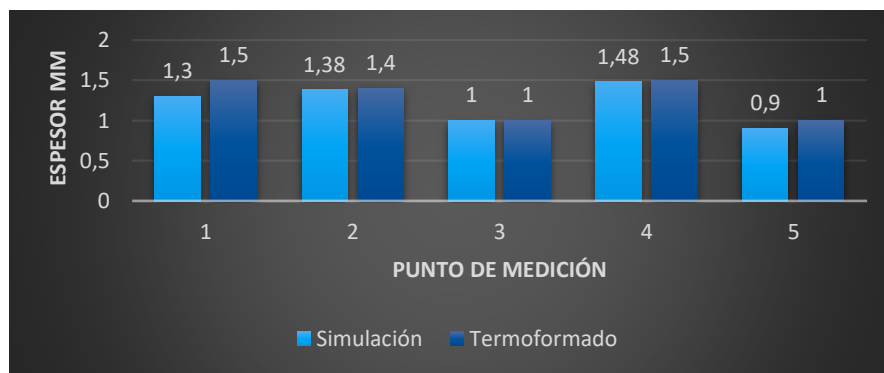


Figura 68. Variación espesores plancha 1.5 mm, tapa 1

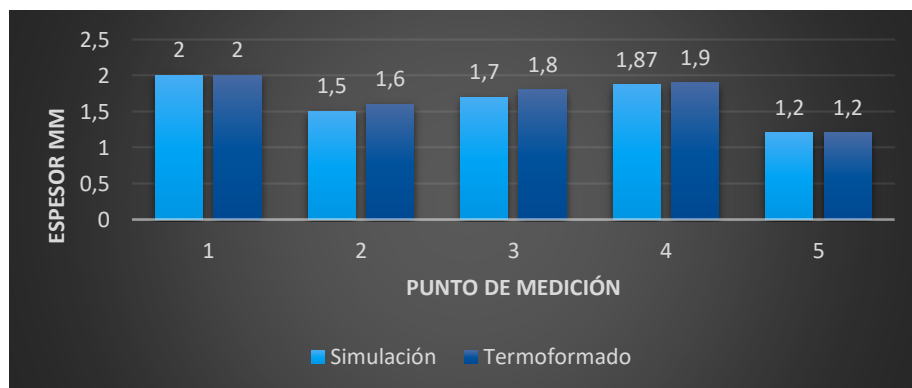


Figura 69. Variación espesores plancha 2 mm, tapa 1

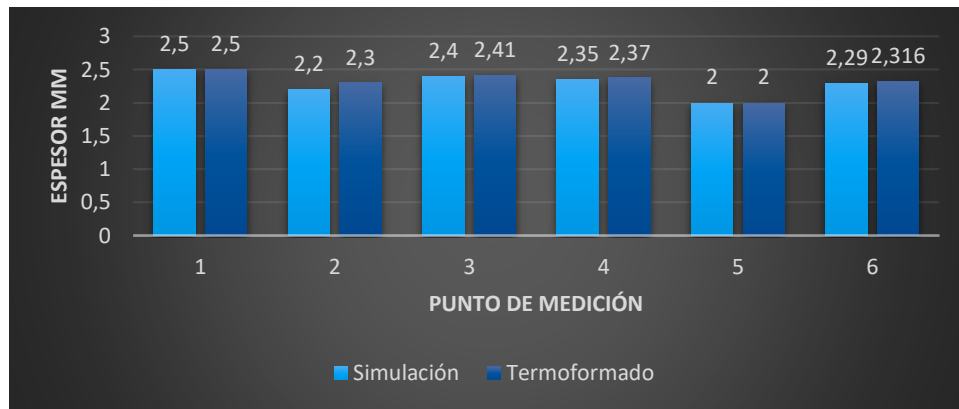


Figura 70. Variación espesores plancha 2.5 mm, tapa 1

En las figuras 71, 72 y 73 se detallan los datos obtenidos tanto en la simulación como en le termoformado experimental, en lo que concierne a la variación de los espesores en la tapa 2.

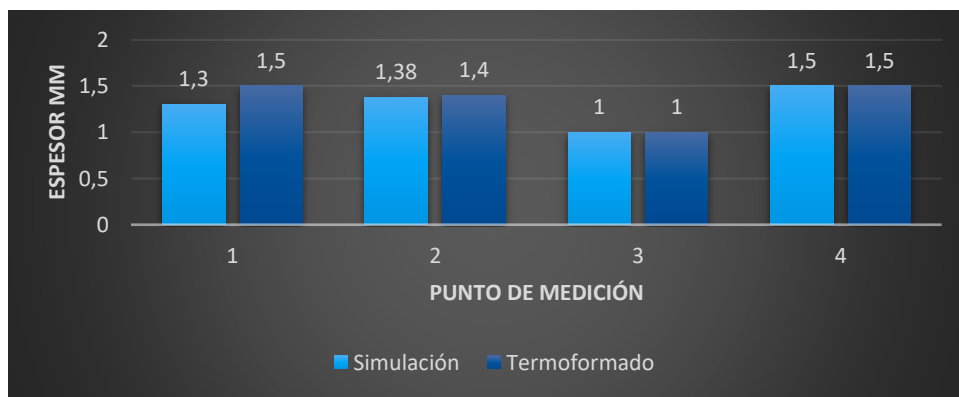


Figura 71. Variación espesores plancha 1.5 mm, tapa 2

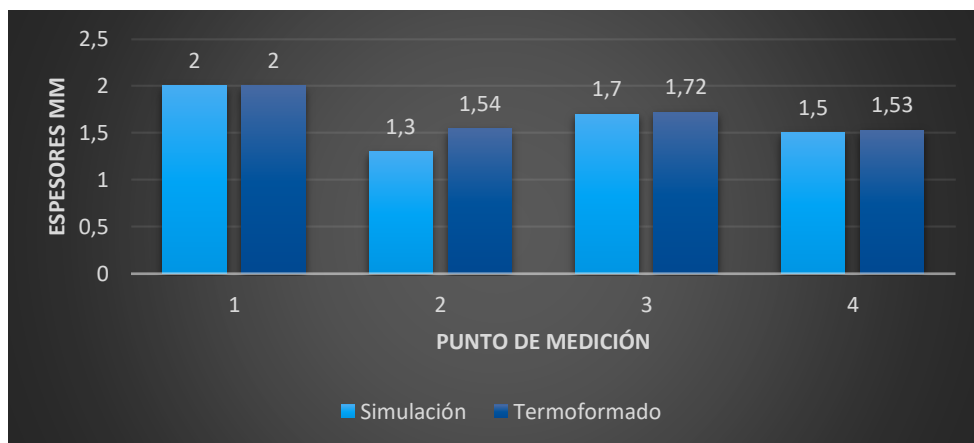


Figura 72. Variación espesores plancha 2 mm, tapa 2

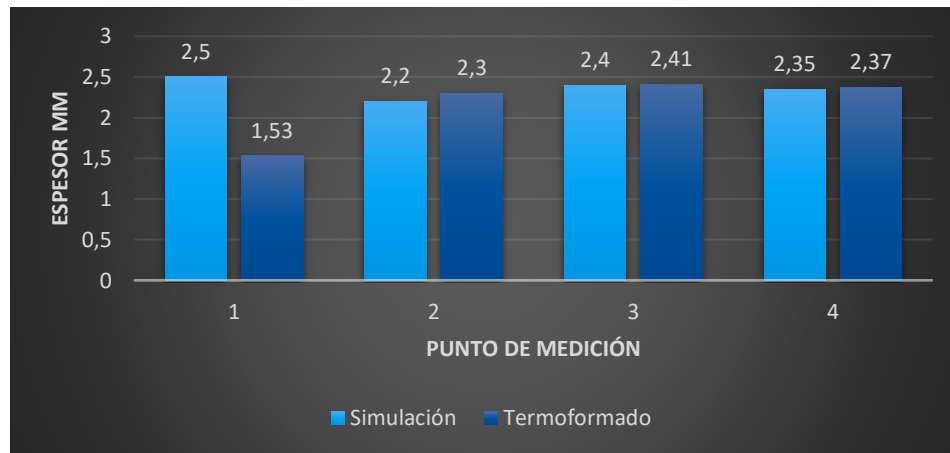


Figura 73. Variación espesores plancha 2.5 mm, tapa 2

La variación de los espesores que se obtuvo tanto en la tapa 1 y 2 se resumen en las tablas 15 y 16 respectivamente.

Para realizar esta comparación se tomó en cuenta los siguientes puntos de medición, detallados en las figuras 74 y 75, correspondientes a la tapa 1 y 2 respectivamente.

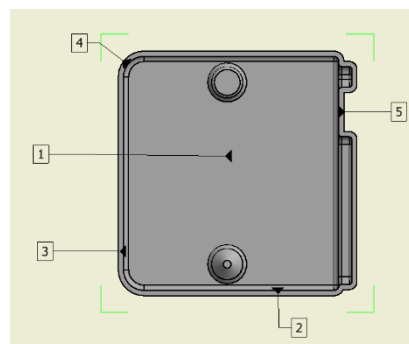


Figura 74. Puntos de medición tapa 1

Nota: (1) Parte central vista frontal y (2, 3, 4, 5) paredes

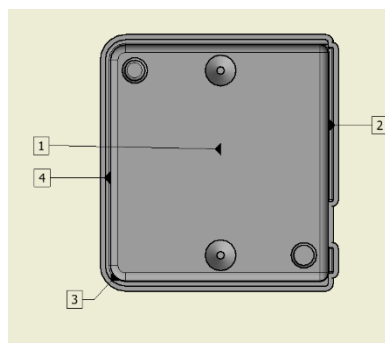


Figura 75. Puntos de medición tapa 2

Nota: (1) Parte central vista frontal y (2, 3, 4) paredes

Tabla 15  
Resultados espesor tapa 1

Espesor plancha mm	1,5					2					2,5				
Punto de medición	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Simulación	1,3	1,38	1	1,48	0,9	2	1,5	1,7	1,87	1,2	2,5	2,2	2,4	2,35	2
Termoformado experimental	1,5	1,4	1	1,5	1	2	1,6	1,8	1,9	1,2	2,5	2,3	2,41	2,37	2

Tabla 16  
Resultados espesor tapa 2

Espesor plancha mm	1,5				2				2,5			
Punto de medición	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Simulación	1,3	1,38	1	1,5	2	1,3	1,7	1,5	2,5	2,2	2,4	2,35
Termoformado experimental	1,5	1,4	1	1,5	2	1,54	1,72	1,53	1,53	2,3	2,41	2,37

### Espesor promedio.

En las figuras 76 y 77 se detallan los espesores promedio que se obtuvieron tanto en la simulación como en el termoformado experimental en la tapa 1 y 2 respectivamente.

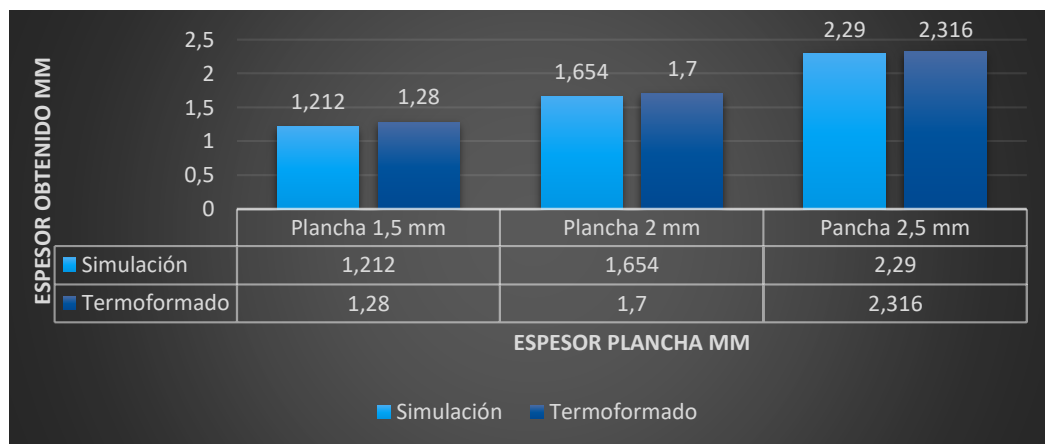


Figura 76. Promedio espesor obtenido, tapa 1



Figura 77. Promedio espesor obtenido, tapa 2



## **Discusión de resultados**

### **Obtención de la geometría**

Morales & Candal (2006) en su investigación para obtener la geometría de una pieza utiliza un modelo de  $\frac{1}{4}$  de la geometría total que concuerda con las diferentes fuentes bibliográficas consultadas cuya recomendación es utilizar el segmento más pequeño posible que represente a toda la estructura. Esto se debe a que, si el sistema físico exhibe simetría en la geometría, propiedades, cargas o deformaciones resulta computacionalmente ventajoso modelar solo un segmento representativo de toda la geometría, permitiéndole obtener resultados más detallados y reducciones considerables en el tiempo de simulación; además, considera una geometría de simetría axial, la cual es simplemente usada en procesos de simulación, consiguiendo buenos resultados para representar figuras sencillas que no requerían modelar detalles complicados en las piezas de estudio. En la presente investigación a diferencia de Morales & Candal (2006) en la obtención de la geometría se la realiza utilizando ingeniería inversa, con el fin de obtener hasta el mínimo detalle de la pieza de estudio, con la utilización de esta técnica se logra reducir el tiempo de diseño de la pieza, se evita realizar mediciones que pueden tener fallas, un paso muy importante fue la impresión del CAD en donde se comprueba que la geometría es la esperada; el duplicado de cada una de las tapas son muy importantes para la obtención del molde.

### **Molde de termoformado**

Para el diseño del molde Bravo (1999) en su caso utiliza AUTOCAD Ver 13. y Ver 14.; y para la simulación del maquinado del molde utiliza el software de CAM ANVIL Express; esto conlleva a que tenga que utilizar dos programas para obtener su molde, lo que le repercute en pérdida de tiempo, pues importar los archivos de un programa a otro, a diferencia de nuestro caso

que se decide realizar tanto el diseño y la simulación del maquinado en un solo programa CAD/CAM, por las facilidades que este software ofrece para este tipo de trabajos en cada uno de sus módulos de modelado y CAM. Además, se tiene la confianza de que el mismo código generado controla las máquinas herramientas de control numérico que realizan el maquinado.

### **Simulación por elementos finitos**

#### **Mallado.**

Morales & Candal (2006) en su estudio realiza 6 mallas variando la cantidad de nodos y elementos hasta alcanzar un valor de espesor de pared constante que se obtuvo al llegar a un espesor de 0,1183 con 862 elementos y en un tiempo de 83 minutos. La razón de la pequeña cantidad de nodos y elementos radica en la simplicidad y tamaño de la geometría estudiada, donde una vez definidas las mallas para el pistón y el molde, se concentra la discretización sobre la lámina cuadrada. Números de nodos y elementos superiores a la malla, solo se traducen en considerables tiempos de simulación sin otorgar grandes diferencias en el espesor mínimo. En la presente investigación para mallar la plancha se utiliza un número de elementos proporcionados por el mismo programa 25145; pues se trata de una geometría más compleja, esto proporciona un resultado muy cercano a la realidad, aunque el tiempo de cada simulación es de alrededor de 4 horas debido al gran número de elementos utilizados, a continuación se presenta las variaciones de los espesores obtenidos del material en diferentes puntos con las planchas de los espesores designados como se detalla en las tablas 11 y 12.

#### **Desplazamiento del molde.**

En el software especializado se requiere configurar la simulación describiendo el desplazamiento de los moldes en función de la distancia y tiempo. Por lo tanto, se miden los desplazamientos de cada molde y el tiempo que se mantienen moviendo para calcular las

velocidades requeridas por el software. Morales & Candal (2006) en su estudio realiza termoformado para vasos utilizando dos moldes una hembra (110 mm) y otro macho (65 mm), el programa especializado determina el desplazamiento de cada molde, de manera similar en la presente investigación se determina el desplazamiento para cada uno de los moldes para nuestro caso solamente se utilizaran dos moldes machos correspondientes a cada tapa los cuales tienen un desplazamiento de 23 mm, además se añade una variante más para entender de mejor manera el desplazamiento que tiene el molde en este caso en función del tiempo, cabe recalcar que la tratarse de geometrías similares los dos moldes tienen el mismo desplazamiento en el mismo tiempo.

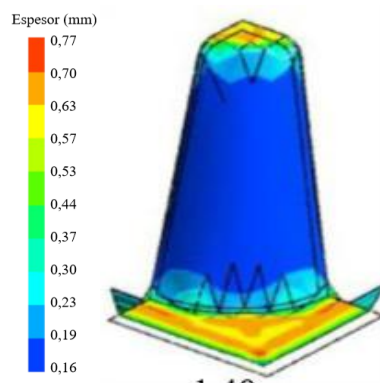
#### **Tiempo de activación de la presión de succión.**

Se obtiene una presión de succión de 1 MPa a partir de 1.2 segundos hasta los 2 segundos en donde finaliza el tiempo del termoformado, como se detalla en la tabla 9, esta depresión es similar en cada simulación pues se trabaja a una temperatura similar de 160 grados Celsius que es la temperatura ideal para realizar el termoformado con el poliestireno de alto impacto, como se explicó anteriormente. En el trabajo que presenta Morales et al., (2009) se analiza la depresión que necesita para realizar el termoformado a diferentes temperaturas, lo que el busca es tener la temperatura y depresión ideales para la realización los vasos, esta tarea es infructuosa ya que dentro de las características de los fabricantes de poliestireno de alto impacto detallan que la temperatura ideal para su moldeo esta entre los 150 y 280 grados Celsius.

#### **Espesor.**

Los resultados de las simulaciones utilizando las planchas de 1,5; 2 y 2,2 mm denotan una variación nula del espesor en el fondo de la piezas y espesores menores a lo largo de la pared lateral. Comportamiento que se atribuye al alargamiento que sufre el material a medida que se va

moldeando. Un efecto similar obtiene en su investigación Morales & Candal (2006) en donde los resultados de las simulaciones denotan espesores mayores en el fondo y en el borde superior del vaso y espesores menores a lo largo de la pared lateral. Comportamiento que atribuye al empleo de un conformado predominantemente mecánico. En la figura 78 se puede observar los resultados que le da el programa especializado, en donde se puede determinar que los espesores van variando a lo largo de las paredes efecto similar que se produce la presente investigación.



*Figura 78. Variación espesores*  
Fuente: Morales & Candal (2006)

### **Validación de resultados**

Morales & Candal (2006) en su investigación recopila los resultados obtenidos para 4 condiciones de prueba, las cuales exhiben valores de presión y temperatura inadecuados para el proceso.

La figura 79 recopila alguna de las representaciones visuales de defectos comunes durante el termoformado donde se pueden apreciar problemas de hundimiento, fractura durante el formado y formado incompleto.



*Figura 79. Representación de problemas que ocurren durante el termoformado*

*Nota: (a) Paredes contraídas (b) fractura de lámina durante formado y (c) formado incompleto y detalles pobres*

*Fuente: Morales & Candal (2006)*

En el estudio se trabajó con una temperatura constante de moldeo de 180 °C, ya que es la temperatura ideal de la lámina de poliestireno de alto impacto para ser termoformada como se muestra en la Tabla 6; lo que permite que el programa calcule la depresión y desplazamiento del molde, para validar los resultados se propone realizar un termoformado experimental para verificar si los resultados coinciden con los obtenidos en la simulación; tanto en lo que tiene que ver en la geometría, así como la variación de los espesores de las paredes de las piezas, para este último punto se observa en los resultados que la plancha de poliestireno de 2 mm en promedio es la que más se aproxima al espesor de las piezas existentes como se detalla en las figuras 79 y 80, para la tapa 1 el promedio de espesor en la simulación es de 1,654 mm y en el termoformado es de 1,7 mm; así mismo para la tapa 2 el promedio de espesor en la simulación es de 1,654 mm y en el termoformado es de 1,7 mm

## Conclusiones

Se obtuvo la geometría de la carcasa de la alarma ChevyStar, mediante ingeniería inversa, gracias a la resolución de 0.1mm que brindó el escáner utilizado se redujo el tiempo de trabajo y su posterior tratamiento en los programas CAD disponibles. Este resultado sirvió como insumo para la realización del diseño y simulación de la construcción de los moldes en el programa CAD/CAM lo que permitió obtener el código G, el mismo se ingresó en el centro de mecanizado CNC para su fabricación.

La herramienta informática especializada en la simulación del termoformado determinó que el desplazamiento que debían tener los moldes sea de 23 mm durante el primer segundo de trabajo, en el siguiente segundo se obtuvo una depresión de 1 MPa con el fin de que el proceso de moldeo experimental sea realizado con gran exactitud, la calidad de mallado que se obtuvo fue del 97 %, esto permitió que el error de discretización sea de un 3 %, por ende la solución fue equivalente al resultado experimental. La herramienta informática sirvió de gran ayuda para determinar el espesor óptimo de la plancha de poliestireno de alto impacto que se utilizó en la construcción de la autoparte.

Realizando la comparación entre la pieza existente con los resultados que se obtuvo en el termoformado y la simulación se determinó que el espesor de la plancha del poliestireno de alto impacto con el cual se debe trabajar es de 2 mm, pues en los resultados obtenidos en la simulación presenta un valor promedio de 1.6 mm y en el termoformado experimental tiene un valor promedio de 1.7 mm, acercándose al espesor de la pieza real que es de 1,5 mm; además, las dimensiones obtenidas en las piezas experimentales superan en 0.5 mm de las medidas reales, lo que no genera problemas en su funcionalidad.

Se pudo validar este proceso de moldeo que además en su tiempo de desarrollo (desde el diseño, molde y pruebas) se necesita alrededor de un mes contrariamente a la inyección en donde se necesita de 3 a 6 meses, estos resultados fueron presentados a la compañía Road Track para que en futuro inicien su proceso de producción de carcasas a nivel nacional.

**Recomendaciones**

Para optimizar el tiempo de modelado de las piezas de estudio mediante ingeniería inversa se recomienda disponer de un escáner con una resolución de al menos 0.1 mm para obtener una gran cantidad de nube de puntos que permitan generar el modelo rápidamente.

En el proceso de termoformado para generar la pieza requerida se debe considerar el porcentaje de adelgazamiento del material debido a la expansión térmica que sufre al momento de ser calentado y estirado; este valor se obtiene entre la relación del espesor inicial y final del material a moldear, lo que fue detallado en la Ecuación 9, esto depende más que nada del tamaño y forma de la pieza sobre todo en las curvaturas que se convierten en los puntos más críticos de estiramiento y por ende de adelgazamiento.

Para la producción a gran escala de las carcasas se debe tomar en cuenta que a las piezas obtenidas se las puede hacer cualquier tipo de tratamiento o acabado posterior para su comercialización, entre los cuales se recomienda utilizar el metalizado, pintado, hot stamping y serigrafía con el fin mejorar su presentación final.



### Bibliografía

- 3DCADPORTAL. (2018). AUTODESK INVENTOR | MCAD | 3D SOFTWARE. Retrieved October 17, 2018, from <http://www.3dcadportal.com/autodesk-inventor.html>
- AEADE. (2018). Perfil del sector automotor del Ecuador – AEADE.
- Angulo, D., & Trávez, C. (2011). FLACSO – MIPRO.
- Arista, D. (2016). DISEÑO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE CUBETAS ODONTOLÓGICAS INFERIORES UTILIZANDO SISTEMAS CAD/CAM/CAE &quot; TESIS INGENIERO MECÁNICO. *INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL*, 79.
- AUTODESK. (2018a). CAD/CAM | Diseño y manufactura asistidos por computadora | Autodesk. Retrieved November 8, 2018, from <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/cad-cam>
- AUTODESK. (2018b). Inventor HSM, solución de CAD/CAM integrada en Inventor. Retrieved November 8, 2018, from <https://www.asidek.es/inventor-hsm-pro-la-solucion-de-cad-cam/>
- Bravo, A. (1999). Diseño y simulación de maquinado de un molde de termoformado para la industria del plástico. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Cabañez, S., & Sánchez, M. (2010). DISEÑO DE UN MOLDE PARA LA INYECCIÓN DE UNA PIEZA DE PLÁSTICO.
- Callister, W. (1997). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. (Reverte, Ed.). Reverte.
- Camos, E. (2015). La máquina de Antikythera: Tema 1: Los plásticos. Retrieved October 16, 2018, from <http://enriquethekno.blogspot.com/2015/03/tema-1-los-plasticos.html>

- Capilla, G., Plascencia, H., Salazar, A., Aguilera, A., & Negrete, G. (2011). SIMULACIÓN POR ELEMENTO FINITO DE PRUEBA DE TENSIÓN DE EPS. *Memorias Del XVII Congreso Internacional Anual de La SOMIM*. Retrieved from [http://somim.org.mx/memorias/memorias2011/pdfs/A3/A3\\_62.pdf](http://somim.org.mx/memorias/memorias2011/pdfs/A3/A3_62.pdf)
- Castañeda, M., Hernández, R., & Gómez, G. (2010). Análisis del Módulo Elástico y Resistencia a la ruptura en mezclas de Nanocompuestos de ABS/TPU, 5–11. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94415753002>
- Castro, K. (2016). *Relación entre parámetros de corte y rugosidad en operaciones de acabado para superficies cóncavas y convexas para aluminio EN-AW-*. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12133/1/T-ESPE-053505.pdf>
- Chuta, R. (2014). Estudio de la fluencia térmica del pet en el proceso de termoformado.
- Cornement, F. (2014). *Comportamiento térmico y mecánico de mezclas de PC/PET con altos contenidos de PC*. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3235/53324-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cornish, M. L. (1997). *El ABC de los plásticos* (Primera). Universidad Iberoamericana.
- EMIS. (2018). Road Track Ecuador S.A. Perfil de Compañía | EMIS.
- Fernandez, J. M. (2004). *Transmisión del calor*. Retrieved from <http://www.marioloureiro.net/ciencia/termodinam/TCalor.pdf>
- FORMECH. (2015). Maquinas termoformadoras de grand formato semi automático. Retrieved from <http://formech.es/wp-content/uploads/Hoja-Tecnica-2440.pdf>
- García, A., & Castillo, F. (2007). *CIM, el computador en la automatización de la producción*.

Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.

Garrido, C., Celentano, D., Flores, F., Computacional, M., Xxiii, V., Buscaglia, G., ...

Zamonsky, O. (2004). *SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE TERMOFORMADO DE LÁMINAS*.

Gómez, S. (2017). *Mallado y simulación CFD de automóvil*. ETSEIB, Barcelona. Retrieved from

[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108947/Mallado\\_y\\_simulacion\\_CFD\\_de\\_automovil\\_-\\_GOMEZGONZALEZsamuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108947/Mallado_y_simulacion_CFD_de_automovil_-_GOMEZGONZALEZsamuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Gordillo, A.;Sanchez ,M.;Martinez, A. (1997). Simulación del proceso de inyección en el diseño de piezas de plástico - Plástico.

Héctor, D., & Yustos, L. (2008). TESIS DOCTORAL APLICACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA REALIZACIÓN DE HERRAMIENTAS PARA MOLDES DE INYECCIÓN DE TERMOPLÁSTICOS.

Hernández Martín, D. (2015). *COMPORTAMIENTO FRENTE A IMPACTO DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS EN APLICACIONES AERONÁUTICAS: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL PEEK*. Retrieved from [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23364/TFG\\_Daniel\\_Hernandez\\_Martin\\_2015.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23364/TFG_Daniel_Hernandez_Martin_2015.pdf)

HERRATEC. (2012). Herratec: Ventajas: Control Numérico Computarizado. Retrieved October 17, 2018, from <http://wikiherratec.blogspot.com/2012/09/ventajas-control-numerico-computarizado.html>

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.

- LAMINEX. (2015). Laminas y Rollos de Poliestireno de Alto Impacto | LAMINEX. Retrieved October 16, 2018, from <https://www.laminex.mx/portfolio/poliestireno/>
- Lupino. (2016a). *Teórica\_Termoformado*. Retrieved from [https://fido.palermo.edu/servicios\\_dyc/blog/docentes/trabajos/27377\\_91603.pdf](https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/blog/docentes/trabajos/27377_91603.pdf)
- Lupino. (2016b). *Teórica\_Termoformado*.
- Malavé Cariello, J., & Ojada Melendez, A. (2017). *INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MÉTODO DE LAS FUERZAS*. Retrieved from <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/4292/mfuerzas.pdf?sequence=1>
- Mariel, K., Luque, P., & Canahuire, G. R. (2015). Estudio de la variación de espesor de láminas de pet en el proceso de termoformado.
- Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). POLIESTIRENO DEL ALTO IMPACTO. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015*, 1, 2. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mendoza, H., Moreno, C., Sánchez, M., & Rodríguez, J. (2011). Cad cae -cam. Retrieved October 17, 2018, from <https://es.slideshare.net/jacobo8a/cad-cae-cam>
- Minalla, C. (2016). Avances Tecnológicos en Ecuador.
- Morales, R., Candal, M., & Robles Jennifer. (2009). *Efecto del proceso de transformación sobre el coeficiente de endurecimiento por deformación en polímeros. Efecto del proceso de transformación sobre el coeficiente de endurecimiento por deformación en polímeros* (Vol. 24). La Universidad. Retrieved from [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652009000400006](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652009000400006)
- Morales, V., & Candal, M. (2006). Diseño y fabricación de un molde de termoformado

utilizando herramientas CAD/CAE. *Revista de La Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 21(1), 83–99.

Moreno, A., & Padilla, G. (2012). ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN LOCAL DE AUTOPARTES PLÁSTICAS EN LA EMPRESA SISEC S.A. EN EL CANTÓN QUITO. *FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS*.

Muñoz, F. (2014). Procesamiento y propiedades de algunas poliolefinas. *Universidad Del País Vasco*, 13.

Olasz, L. (2013). Multiphysics Simulations inside the Autodesk® Inventor® User Interface | COMSOL Blog. Retrieved October 17, 2018, from <https://www.comsol.com/blogs/multiphysics-simulations-inside-the-autodesk-inventor-user-interface/>

Ortiz, A., Ruiz, O., & Juan, O. (2018). *Procesos de manufactura*.

Osswald, T. A., Aquite, W., Ramírez, D., López, L., Puentes, J., & Pérez, C. (2012). RETOS EN LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO DE PLÁSTICOS Y COMPUESTOS SYLVANA GARCÍA RODRÍGUEZ, 20–28.

Otero, L. (2006). Aprendiendo sobre el Método de los Elementos finitos. *Ingeniería Mecánica*, 7–17.

Padrón, V. (2002). El control de los estándares de calidad. Retrieved from [https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/4/4326/MODULO\\_5\\_MECANICA.pdf](https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/4/4326/MODULO_5_MECANICA.pdf)

PADT. (2018). ANSYS Meshing, ANSYS Workbench Meshing, ANSYS TGrid, ANSYS TurboGrid, ANSYS ICEM CFD :: Phoenix Analysis & Design Technology (PADT) :: Tempe Arizona, Littleton Colorado. Retrieved October 17, 2018, from

<http://www.padtinc.com/products/software/ansys/index.html>

Parras, D. ., Romero, L., Cavas, F., & Nieto, J. (2016). La herramienta definitiva de escaneo 3D a CAD.

Parras, D., Romero, L., Cavas, F., Nieto, J., Cañavate, F. J. F., & Fernández-Pacheco, D. G. (2016). USE OF 3D SCANNING AND REVERSE ENGINEERING FOR THE PROTOTYPING OF MECHANICAL PARTS UTILIZACIÓN DEL ESCANEADO 3D E INGENIERÍA INVERSA PARA EL PROTOTIPADO DE PIEZAS MECÁNICAS.

Paz, J. (2015). *Construcción y Estructura Náutica*. Retrieved from [https://wiki.ead.pucv.cl/images/a/ab/Cuadro\\_Comparativo\\_-\\_Construccion\\_y\\_estructura\\_nautica\\_-\\_Javier\\_Paz.pdf](https://wiki.ead.pucv.cl/images/a/ab/Cuadro_Comparativo_-_Construccion_y_estructura_nautica_-_Javier_Paz.pdf)

Pelliccioni, O., Müller-Karger, C., & Candal, M. V. (2008). EVALUACIÓN NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS DE MATERIALES PROPUESTOS PARA LA FABRICACIÓN DE UNA PRÓTESIS DE PIE USANDO MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICO, 7. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2745.9046>

Perdomo, G. (2002). Plásticos Y Medio Ambiente. *Revista Iberoamericana Polímeros*, 3(2), 1–13.

Perez, F. (2011). *FORMADO AL VACIO DE CHAROLAS DE SERVICIO*. Retrieved from <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10491/31.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PRUSA. (2018). Kit Original Prusa i3 MK3 on LCD de 1.75mm. Retrieved December 23, 2018, from <https://shop.prusa3d.com/es/impresoras-3d/180-kit-original-prusa-i3-mk3.html#>

Ramírez, A., Alvarado, M., del Campo, R., & Yáñez, P. (2015). Diseño de un molde de inyección de plástico de dos cavidades. *Academia Journal*.

Rodriguez, E. (2017). DESARROLLO DE UNA IMPRESORA 3D OPEN SOURCE BAJO EL CONCEPTO DE DESARROLLO DE PRODUCTO.

RODRIGUEZ, P. (2012). *ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ESTRUCTURA MACROMELECULAR PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS-TERMOFORMABILIDAD DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS SEICRISTALINOS*. Retrieved from [https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/413/1/Perla Patricia Rodriguez Salazar.pdf](https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/413/1/Perla%20Patricia%20Rodriguez%20Salazar.pdf)

Ruíz, L. (2008). El control numerico computarizado en el desarrollo industrial, 6.

Sandvik Coromant. (2017). Herramientas de corte de metal, plaquitas de corte y portaherramientas. Retrieved February 13, 2019, from <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/pages/tools.aspx>

SENA. (2009). *La importancia de la refrigeración del molde en el proceso de inyección de material plástico*.

SENPLADES. (2017). *Toda una Vida. Senplades*.

Tull, B. D. (1992). Quality and Productivity in Injection Mold Tool Construction: A View From Manufacturing. *AT&T Technical Journal*, 71(4), 61–68. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1992.tb00175.x>

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. (2011). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS*. Retrieved from <https://www.utp.edu.co/cms-utp/data/bin/UTP/web/uploads/media/contratacion/documentos/ET-Lic-14-2011.pdf>

3DCADPORTAL. (2018). AUTODESK INVENTOR | MCAD | 3D SOFTWARE. Retrieved October 17, 2018, from <http://www.3dcadportal.com/autodesk-inventor.html>

AEADE. (2018). Perfil del sector automotor del Ecuador – AEADE.

Angulo, D., & Trávez, C. (2011). FLACSO – MIPRO.

Arista, D. (2016). DISEÑO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE CUBETAS ODONTOLÓGICAS INFERIORES UTILIZANDO SISTEMAS CAD/CAM/CAE &quot; TESIS INGENIERO MECÁNICO. *INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL*, 79.

AUTODESK. (2018a). CAD/CAM | Diseño y manufactura asistidos por computadora | Autodesk. Retrieved November 8, 2018, from <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/cad-cam>

AUTODESK. (2018b). Inventor HSM, solución de CAD/CAM integrada en Inventor. Retrieved November 8, 2018, from <https://www.autodesk.com/inventor-hsm-pro-la-solucion-de-cad-cam/>

Bravo, A. (1999). Diseño y simulación de maquinado de un molde de termoformado para la industria del plástico. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

Cabañez, S., & Sánchez, M. (2010). DISEÑO DE UN MOLDE PARA LA INYECCIÓN DE UNA PIEZA DE PLÁSTICO.

Callister, W. (1997). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. (Reverte, Ed.). Reverte.

Camos, E. (2015). La máquina de Antikythera: Tema 1: Los plásticos. Retrieved October 16, 2018, from <http://enriquethekno.blogspot.com/2015/03/tema-1-los-plasticos.html>

Capilla, G., Plascencia, H., Salazar, A., Aguilera, A., & Negrete, G. (2011). SIMULACIÓN POR ELEMENTO FINITO DE PRUEBA DE TENSION DE EPS. *Memorias Del XVII Congreso Internacional Anual de La SOMIM*. Retrieved from



[http://somim.org.mx/memorias/memorias2011/pdfs/A3/A3\\_62.pdf](http://somim.org.mx/memorias/memorias2011/pdfs/A3/A3_62.pdf)

Castañeda, M., Hernández, R., & Gómez, G. (2010). Análisis del Módulo Elástico y Resistencia a la ruptura en mezclas de Nanocompuestos de ABS/TPU, 5–11. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94415753002>

Castro, K. (2016). *Relación entre parámetros de corte y rugosidad en operaciones de acabado para superficies cóncavas y convexas para aluminio EN-AW-*. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12133/1/T-ESPE-053505.pdf>

Chuta, R. (2014). Estudio de la fluencia térmica del pet en el proceso de termoformado.

Cornement, F. (2014). *Comportamiento térmico y mecánico de mezclas de PC/PET con altos contenidos de PC*. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3235/53324-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cornish, M. L. (1997). *El ABC de los plásticos* (Primera). Universidad Iberoamericana.

EMIS. (2018). Road Track Ecuador S.A. Perfil de Compañía | EMIS.

Fernandez, J. M. (2004). *Transmisión del calor*. Retrieved from <http://www.marioloureiro.net/ciencia/termodinam/TCalor.pdf>

FORMECH. (2015). Maquinas termoformadoras de grand formato semi automático. Retrieved from <http://formech.es/wp-content/uploads/Hoja-Tecnica-2440.pdf>

García, A., & Castillo, F. (2007). *CIM, el computador en la automatización de la producción*. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.

Garrido, C., Celentano, D., Flores, F., Computacional, M., Xxiii, V., Buscaglia, G., ...

Zamonsky, O. (2004). *SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL*

*PROCESO DE TERMOFORMADO DE LÁMINAS.*

- Gómez, S. (2017). *Mallado y simulación CFD de automóvil*. ETSEIB, Barcelona. Retrieved from [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108947/Mallado\\_y\\_simulacion\\_CFD\\_de\\_automovil\\_-\\_GOMEZGONZALEZsamuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108947/Mallado_y_simulacion_CFD_de_automovil_-_GOMEZGONZALEZsamuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gordillo, A.;Sanchez ,M.;Martinez, A. (1997). Simulación del proceso de inyección en el diseño de piezas de plástico - Plástico.
- Héctor, D., & Yustos, L. (2008). TESIS DOCTORAL APLICACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA REALIZACIÓN DE HERRAMIENTAS PARA MOLDES DE INYECCIÓN DE TERMOPLÁSTICOS.
- Hernández Martín, D. (2015). *COMPORTAMIENTO FRENTE A IMPACTO DE POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS EN APLICACIONES AERONÁUTICAS: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL PEEK*. Retrieved from [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23364/TFG\\_Daniel\\_Hernandez\\_Martin\\_2015.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23364/TFG_Daniel_Hernandez_Martin_2015.pdf)
- HERRATEC. (2012). Herratec: Ventajas: Control Numérico Computarizado. Retrieved October 17, 2018, from <http://wikiherratec.blogspot.com/2012/09/ventajas-control-numerico-computarizado.html>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.
- LAMINEX. (2015). Laminas y Rollos de Poliestireno de Alto Impacto | LAMINEX. Retrieved October 16, 2018, from <https://www.laminex.mx/portfolio/poliestireno/>
- Lupino. (2016a). *Teórica\_Termoformado*. Retrieved from

[https://fido.palermo.edu/servicios\\_dyc/blog/docentes/trabajos/27377\\_91603.pdf](https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/blog/docentes/trabajos/27377_91603.pdf)

Lupino. (2016b). *Teórica\_Termoformado*.

Malavé Cariello, J., & Ojada Melendez, A. (2017). *INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS*

*ESTRUCTURAL MÉTODO DE LAS FUERZAS*. Retrieved from

<http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/4292/mfuerzas.pdf?sequence=1>

Mariel, K., Luque, P., & Canahuire, G. R. (2015). Estudio de la variación de espesor de láminas de pet en el proceso de termoformado.

Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). POLIESTIRENO DEL ALTO IMPACTO.

*Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015, 1, 2.*

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Mendoza, H., Moreno, C., Sánchez, M., & Rodríguez, J. (2011). Cad cae -cam. Retrieved

October 17, 2018, from <https://es.slideshare.net/jacobo8a/cad-cae-cam>

Minalla, C. (2016). Avances Tecnológicos en Ecuador.

Morales, R., Candal, M., & Robles Jennifer. (2009). *Efecto del proceso de transformación sobre*

*el coeficiente de endurecimiento por deformación en polímeros. Efecto del proceso de*

*transformación sobre el coeficiente de endurecimiento por deformación en polímeros* (Vol.

24). La Universidad. Retrieved from

[http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652009000400006](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652009000400006)

Morales, V., & Candal, M. (2006). Diseño y fabricación de un molde de termoformado

utilizando herramientas CAD/CAE. *Revista de La Facultad de Ingeniería Universidad*

*Central de Venezuela*, 21(1), 83–99.

Moreno, A., & Padilla, G. (2012). ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA

PRODUCCIÓN LOCAL DE AUTOPARTES PLÁSTICAS EN LA EMPRESA SISEC  
S.A. EN EL CANTÓN QUITO. *FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS*.

Muñoz, F. (2014). Procesamiento y propiedades de algunas poliolefinas. *Universidad Del País Vasco*, 13.

Olasz, L. (2013). Multiphysics Simulations inside the Autodesk® Inventor® User Interface | COMSOL Blog. Retrieved October 17, 2018, from <https://www.comsol.com/blogs/multiphysics-simulations-inside-the-autodesk-inventor-user-interface/>

Ortiz, A., Ruiz, O., & Juan, O. (2018). *Procesos de manufactura*.

Osswald, T. A., Aquite, W., Ramírez, D., López, L., Puentes, J., & Pérez, C. (2012). RETOS EN LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO DE PLÁSTICOS Y COMPUESTOS SYLVANA GARCÍA RODRÍGUEZ, 20–28.

Otero, L. (2006). Aprendiendo sobre el Método de los Elementos finitos. *Ingeniería Mecánica*, 7–17.

Padrón, V. (2002). El control de los estándares de calidad. Retrieved from [https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/4/4326/MODULO\\_5\\_MECANICA.pdf](https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/4/4326/MODULO_5_MECANICA.pdf)

PADT. (2018). ANSYS Meshing, ANSYS Workbench Meshing, ANSYS TGrid, ANSYS TurboGrid, ANSYS ICEM CFD :: Phoenix Analysis & Design Technology (PADT) :: Tempe Arizona, Littleton Colorado. Retrieved October 17, 2018, from <http://www.padtinc.com/products/software/ansys/index.html>

Parras, D. ., Romero, L., Cavas, F., & Nieto, J. (2016). La herramienta definitiva de escaneo 3D a CAD.

Parras, D., Romero, L., Cavas, F., Nieto, J., Cañavate, F. J. F., & Fernández-Pacheco, D. G.

(2016). USE OF 3D SCANNING AND REVERSE ENGINEERING FOR THE  
PROTOTYPING OF MECHANICAL PARTS UTILIZACIÓN DEL ESCANEADO 3D E  
INGENIERÍA INVERSA PARA EL PROTOTIPADO DE PIEZAS MECÁNICAS.

Paz, J. (2015). *Construcción y Estructura Náutica*. Retrieved from

[https://wiki.ead.pucv.cl/images/a/ab/Cuadro\\_Comparativo\\_-  
\\_Construccion\\_y\\_estructura\\_nautica\\_-\\_Javier\\_Paz.pdf](https://wiki.ead.pucv.cl/images/a/ab/Cuadro_Comparativo_-_Construccion_y_estructura_nautica_-_Javier_Paz.pdf)

Pelliccioni, O., Müller-Karger, C., & Candal, M. V. (2008). EVALUACIÓN NUMÉRICA POR  
ELEMENTOS FINITOS DE MATERIALES PROPUESTOS PARA LA FABRICACIÓN  
DE UNA PRÓTESIS DE PIE USANDO MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICO, 7.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2745.9046>

Perdomo, G. (2002). Plásticos Y Medio Ambiente. *Revista Iberoamericana Polímeros*, 3(2), 1–  
13.

Perez, F. (2011). *FORMADO AL VACIO DE CHAROLAS DE SERVICIO*. Retrieved from

<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10491/31.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PRUSA. (2018). Kit Original Prusa i3 MK3 on LCD de 1.75mm. Retrieved December 23, 2018,  
from <https://shop.prusa3d.com/es/impresoras-3d/180-kit-original-prusa-i3-mk3.html#>

Ramírez, A., Alvarado, M., del Campo, R., & Yáñez, P. (2015). Diseño de un molde de  
inyección de plástico de dos cavidades. *Academia Journal*.

Rodriguez, E. (2017). DESARROLLO DE UNA IMPRESORA 3D OPEN SOURCE BAJO EL  
CONCEPTO DE DESARROLLO DE PRODUCTO.

RODRIGUEZ, P. (2012). *ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ESTRUCTURA MACROMELECULAR*

*PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS-TERMOFORMABILIDAD DE POLÍMEROS**TERMOPLÁSTICOS SEICRISTALINOS*. Retrieved from

[https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/413/1/Perla Patricia Rodriguez Salazar.pdf](https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/413/1/Perla%20Patricia%20Rodriguez%20Salazar.pdf)

Ruíz, L. (2008). El control numerico computarizado en el desarrollo industrial, 6.

Sandvik Coromant. (2017). Herramientas de corte de metal, plaquitas de corte y portaherramientas. Retrieved February 13, 2019, from <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/pages/tools.aspx>

SENA. (2009). *La importancia de la refrigeración del molde en el proceso de inyección de material plástico*.

SENPLADES. (2017). *Toda una Vida. Senplades*.

Tull, B. D. (1992). Quality and Productivity in Injection Mold Tool Construction: A View From Manufacturing. *AT&T Technical Journal*, 71(4), 61–68. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1992.tb00175.x>

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. (2011). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS*.

Retrieved from <https://www.utp.edu.co/cms-utp/data/bin/UTP/web/uploads/media/contratacion/documentos/ET-Lic-14-2011.pdf>

Anexos

Anexo 1. Planos de las piezas

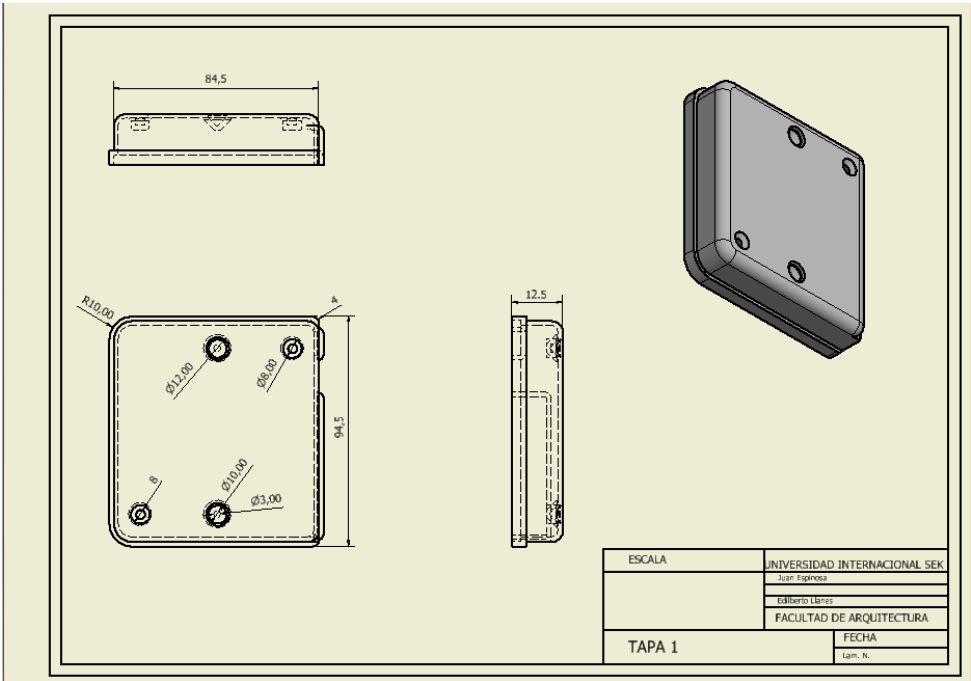


Figura 80. Plano tapa 1

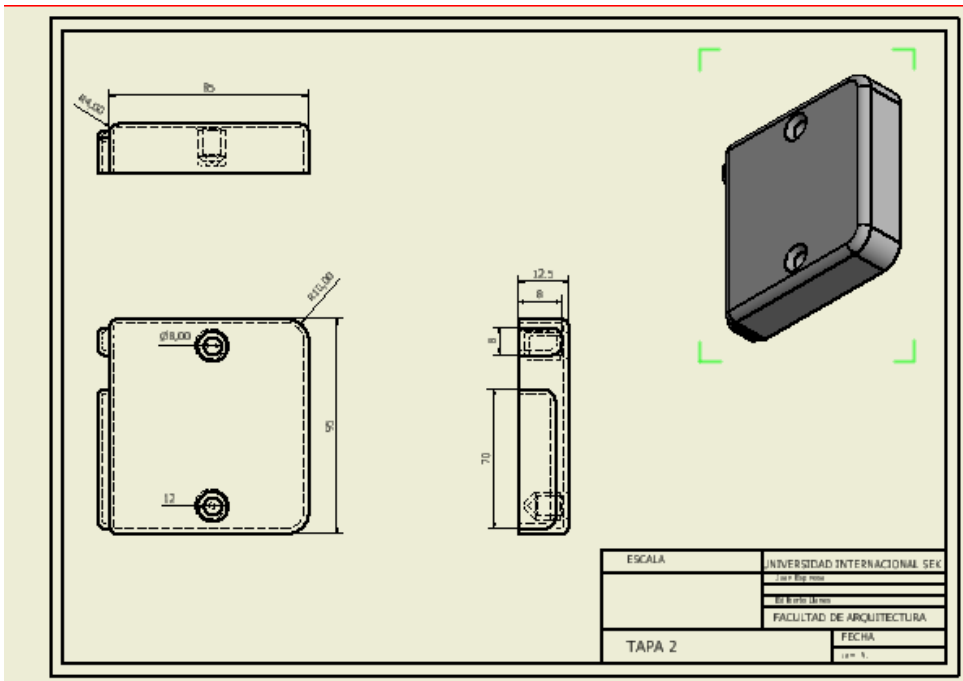


Figura 81. Plano tapa 2

## Anexo 2. Código G

```
%
00000(PIEZA PUNZON 1 CODIGO G)
( DATE=DD-MM-YY - 26-12-18 TIME=HH:MM - 10:43)
(MCX FILE - F:\NUEVA CARPETA\PIEZA PUNZON 1.MCAM)
(NC FILE - F:\NUEVA CARPETA\PIEZA PUNZON 1 CODIGO G.NC)
(MATERIAL - ALUMINUM MM - 2024)
( T2 | FRESA INSERTOS 25MM | H2 )
N100 G21
N110 G0 G17 G40 G49 G80 G90
N120 T2 M6
N130 G0 G90 G54 X-45.124 Y-70.027 A0. S5200 M3
N140 G43 H2 Z15. M8
N150 Z2.877
N160 G1 Z2.377 F820.
N170 X-45.133 Y-70.031 Z2.178
N180 X-45.16 Y-70.043 Z1.98
N190 X-45.206 Y-70.062 Z1.787
N200 X-45.269 Y-70.088 Z1.6
N210 X-45.348 Y-70.122 Z1.42
N220 X-45.444 Y-70.162 Z1.25
N230 X-45.555 Y-70.209 Z1.091
N240 X-45.68 Y-70.262 Z.945
N250 X-45.818 Y-70.32 Z.813
N260 X-45.967 Y-70.383 Z.697
N270 X-46.126 Y-70.45 Z.597
N280 X-46.294 Y-70.52 Z.515
N290 X-46.468 Y-70.594 Z.451
N300 X-46.647 Y-70.669 Z.407
N310 X-46.844 Y-70.74 Z.37 F3000.
N320 X-47.047 Y-70.79 Z.333
```

Figura 82. Código G molde tapa 1

```
%
00
(PUNZON 2_17_01_2019)
( DATE=DD-MM-YY - 17-01-19 TIME=HH:MM - 16:22)
(MCX FILE - F:\PUNZON 2_17_01_2019.MCAM)
(NC FILE - F:\PUNZON 2_17_01_2019.NC)
(MATERIAL - ALUMINUM MM - 2024)
(T12|FRESA ACABADO 6MM|H12|D12|TOOL DIA. - 6.)
N100 G21
N110 G0 G17 G40 G49 G80 G90
(ACABADO)
N120 T12 M6
N130 G0 G90 G54 X-40.919 Y-51.04 A0. S5200 M3
N140 G43 H12 Z10.
N150 M8
N160 Z-15.127
N170 G1 Z-15.627 F820.
N180 X-40.927 Y-51.032 Z-15.836
N190 X-40.95 Y-51.009 Z-16.043
N200 X-40.989 Y-50.971 Z-16.245
N210 X-41.042 Y-50.918 Z-16.44
N220 X-41.109 Y-50.85 Z-16.627
N230 X-41.189 Y-50.77 Z-16.803
N240 X-41.283 Y-50.677 Z-16.965
N250 X-41.387 Y-50.572 Z-17.113
N260 X-41.502 Y-50.457 Z-17.245
N270 X-41.626 Y-50.333 Z-17.359
N280 X-41.758 Y-50.201 Z-17.454
N290 X-41.897 Y-50.063 Z-17.529
N300 X-42.04 Y-49.92 Z-17.583
```

Figura 83. Código G molde tapa 2