



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA:**

“DESARROLLO DE UN MOLDE DE UNA AUTOPARTE SENCILLA  
MEDIANTE HERRAMIENTAS DE PROTOTIPADO E INGENIERÍA INVERSA”.

**AUTOR:**

ANDERSON PATRICIO TOBAR REINA

**DIRECTOR:**

ING. VÍCTOR ALFONSO ERAZO ARTEAGA MSc.

**Ibarra, 2022**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**  
**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN**

**A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**1 IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	1003626676		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Tobar Reina Anderson Patricio		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Barrio 10 de Agosto - Ibarra		
<b>EMAIL:</b>	aptobarr@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	062514423	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0967485374
<b>DATOS DE LA OBRA</b>			
<b>TÍTULO:</b>	DESARROLLO DE UN MOLDE DE UNA AUTOPARTE SENCILLA MEDIANTE HERRAMIENTAS DE PROTOTIPADO E INGENIERÍA INVERSA		
<b>AUTOR:</b>	Tobar Reina Anderson Patricio		
<b>FECHA:</b>	8 de marzo de 2022		
<b>PROGRAMA:</b>	Pregrado		
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mecatrónica		
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Víctor Alfonso Erazo Arteaga MSc.		

## 2 CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 8 días del mes de marzo de 2022

**EL AUTOR:**



(F) \_\_\_\_\_

Anderson Patricio Tobar Reina

C.I.: 100362667-6



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR**

En mi calidad de director certifico que el trabajo de grado titulado **“DESARROLLO DE UN MOLDE DE UNA AUTOPARTE SENCILLA MEDIANTE HERRAMIENTAS DE PROTOTIPADO E INGENIERÍA INVERSA”**, fue desarrollado por el egresado Anderson Patricio Tobar Reina con cédula Nro. 100362667-6, bajo mi supervisión, lo cual certifico en honor a la verdad.

Ibarra, a los 8 días del mes de marzo del 2022



Firmado electrónicamente por:  
**VÍCTOR ALFONSO**  
**ERAZO ARTEAGA**

---

ING. Víctor Alfonso Erazo Arteaga MSc.

C.I.: 171918802-9

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo principalmente a mis padres Rocío y Jorge, y a mi hermana María Belén, quienes siempre han sido mi ejemplo y soporte; a ustedes nunca les podré agradecer todo el cariño, esfuerzo y sacrificio que han hecho por mí.*

*A mi sobrino Nicolás por ser la fuerza de superación que me lleva a seguir esforzándome día a día.*

*Siempre los llevo en mi corazón.*

*Anderson*

## AGRADECIMIENTO

*Agradezco a mis padres, hermana y sobrino, quienes siempre han sido mi principal motivación para alcanzar este logro; por ser las personas que siempre me han impulsado, por confiar y creer en mí, por los consejos, los valores y los principios que han hecho de mí la persona que soy hoy en día.*

*A mis primos Luis y Andrés por todo su apoyo incondicional, a mis tíos Miryan, Alberto y Maritza por sus consejos y palabras de aliento; gracias por todo.*

*A todos aquellos docentes con quienes tuve el privilegio de compartir un aula de clase, en especial a los ingenieros Víctor Erazo, Xavier Lima y Cosme Mejía, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, apoyo y amistad.*

*Anderson*

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo por objetivo determinar la factibilidad de un molde para el embutido de dos autopartes sencillas, empleando herramientas de prototipado e ingeniería inversa. La selección de las piezas se realizó a través del método de criterios ponderados, mediante el cual se determinó que las autopartes en estudio sean la tapa para el brazo del limpiaparabrisas y un tapacubos. La obtención de los parámetros de embutición incluyó la determinación del diámetro del disco de la chapa metálica desarrollada mediante el cálculo de superficies equivalentes. Se establecieron y desarrollaron varios ensayos de prueba con la finalidad de comprobar el diseño y validar la funcionalidad de los moldes, a través de los cuales se encontraron las deficiencias del diseño, las que fueron corregidas de una forma sencilla en el CAD, permitiendo volver a prototipar las matrices de una forma económica y rápida gracias al modelado por deposición de material fundido. Los resultados de los ensayos indican que, pese a que el proceso de prototipado involucra cierta desviación de las dimensiones de las matrices, lo cual provocó una diferencia de 0,68 mm entre las medidas de la pieza física y la diseñada, se ha demostrado que tanto el núcleo como la cavidad son capaces de soportar una fuerza de embutición máxima de 13.295,22 N sin presentar fallas apreciables. Respecto a esto, se obtuvo un error de 12,52 % entre la fuerza de embutición calculada y la fuerza máxima que realmente se aplicó en los ensayos. En conclusión, se determinó que el desarrollo de moldes de embutición mediante la metodología propuesta fomenta el ahorro de recursos económicos y de tiempo al facilitar la identificación de los fallos e inconsistencia en el diseño antes de pasar a un proceso de fabricación que involucre grandes costos.

**Palabras Clave:** embutición, autoparte, prototipado, ingeniería inversa

## ABSTRACT

The objective of this degree work was to determine the feasibility of a mold for the drawing of two simple auto parts, using prototyping and reverse engineering tools. The selection of the parts was carried out through the method of weighted criteria, through which it was determined that the auto parts under study are the cover for the wiper arm and a hubcap. Obtaining the drawing parameters included the determination of the diameter of the developed sheet metal disk by calculating equivalent surfaces. Several test trials were established and developed in order to check the design and validate the functionality of the molds, through which the deficiencies of the design were found, which were corrected in a simple way in the CAD, allowing to go back to prototype the dies cheaply and quickly thanks to molten material deposition modeling. The results of the tests indicate that, despite the fact that the prototyping process involves a certain deviation in the dimensions of the dies, which caused a difference of 0.68 mm between the measurements of the physical part and the designed part, it has been shown that both the core and the cavity are capable of withstanding a maximum drawing force of 13,295.22 N without presenting appreciable failures. Regarding this, an error of 12.52% was obtained between the calculated drawing force and the maximum force that was actually applied in the tests. In conclusion, it was determined that the development of drawing molds using the proposed methodology promotes savings in economic resources and time by facilitating the identification of failures and inconsistencies in the design before moving on to a manufacturing process that involves large costs.

**Keywords:** embossing, auto part, prototyping, reverse engineering



**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN .....	II
1 IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA .....	II
2 CONSTANCIAS .....	III
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR .....	IV
DEDICATORIA .....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XVIII
Problema .....	XVIII
Objetivos .....	XX
Objetivo general .....	XX
Objetivos específicos .....	XX
Justificación .....	XXI
Alcance .....	XXII
Antecedentes .....	XXII
CAPÍTULO 1 .....	25

1	MARCO REFERENCIAL .....	25
1.1	Procesos de formado metálico.....	25
1.2	Prensado .....	26
1.3	Estampado .....	26
1.4	Embutición .....	27
1.4.1	Consideraciones para el embutido.....	29
1.4.2	Parámetros para el embutido .....	30
1.4.3	Determinación del tamaño de la pieza en bruto .....	35
1.4.4	Tipos de embutición .....	36
1.4.5	Otras operaciones de embutido .....	37
1.4.6	Defectos de la embutición .....	38
1.4.7	Herramientas y equipo para embutido .....	39
1.4.8	Lubricación durante el embutido.....	39
1.4.9	Materiales de la chapa metálica para el embutido.....	42
1.5	Matricería .....	42
1.5.1	Matriz .....	43
1.5.2	Tipos de matrices .....	43
1.5.3	Elementos de una matriz de embutición .....	44
1.6	Ingeniería inversa .....	47
1.6.1	Técnicas de diseño aplicando RE.....	49
1.7	Prototipado rápido .....	50

1.7.1	Modelado por deposición de material fundido.....	51
1.7.2	Impresión tridimensional basada en polvos .....	51
1.7.3	Fresado de escritorio .....	51
CAPÍTULO II.....		53
2	METODOLOGÍA.....	53
2.1	Primera autoparte .....	53
2.1.1	Selección de la pieza a embutir .....	53
2.1.2	Ingeniería inversa de la pieza .....	58
2.1.3	Desarrollo de la chapa metálica de la pieza .....	59
2.1.4	Selección del material a embutir .....	60
2.1.5	Cálculo de los parámetros de embutición .....	60
2.1.6	Diseño y fabricación del sistema de embutición.....	62
2.1.7	Diseño de la matriz.....	65
2.1.8	Fabricación e implementación de la matriz.....	67
2.2	Segunda autoparte .....	69
2.2.1	Cálculo de los parámetros de embutición .....	70
2.2.2	Diseño de la matriz.....	70
2.2.3	Fabricación e implementación de la matriz.....	71
CAPÍTULO III.....		73
3	RESULTADOS .....	73
3.1	Pruebas de embutición de la primera autoparte .....	73

3.1.1	Ensayo de embutición #1 .....	73
3.1.2	Ensayo de embutición #2 .....	76
3.1.3	Ensayo de embutición #3 .....	81
3.2	Pruebas de embutición de la segunda autoparte.....	85
3.2.1	Ensayo de embutición #1 .....	85
3.2.2	Ensayo de embutición #2 .....	88
3.2.3	Ensayo de embutición #3 .....	91
3.3	Cálculo del error absoluto de la fuerza de embutición.....	94
3.4	Comparativa de medidas .....	94
3.5	Gasto de material y tiempo de impresión.....	95
3.6	Comparativa económica y tiempo de fabricación .....	95
CAPÍTULO IV.....		98
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	98
4.1	Conclusiones .....	98
4.2	Recomendaciones.....	99
BIBLIOGRAFÍA .....		101
ANEXOS .....		106
A.	Propiedades mecánicas de algunos aceros al carbón .....	106
B.	Composición de las planchas laminas al frío.....	109
C.	Características de la impresora 3D Ender-3 Pro .....	110
D.	Planos del molde de la primera autoparte .....	111

E.	Planos del molde de la segunda autoparte .....	114
F.	Hoja de costos de la fabricación de la segunda autoparte con el molde impreso en 3D.	117
G.	Hoja de costos de la fabricación de la segunda autoparte con el molde fresado (100 piezas).	118
H.	Hoja de costos de la fabricación de la segunda autoparte con el molde fresado (1000 piezas).....	119

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Clasificación general de las operaciones de formado de lámina metálica</i> ..	26
Figura 2 <i>Fases en el proceso de embutido profundo</i> .....	28
Figura 3 <i>Representación de una perla de embutido</i> .....	29
Figura 4 <i>Variables del proceso de embutido</i> .....	31
Figura 5 <i>Proceso de repujado</i> .....	37
Figura 6 <i>Embutido inverso: 1) colocación de la pieza ya embutida y 2) embutido inverso</i> .....	38
Figura 7 <i>Fallas frecuentes tras el embutido: a) arrugamiento en la pestaña, b) arrugamiento en la pared, c) agrietamiento, d) orejado y e) ralladura superficial</i> .....	39
Figura 8 <i>Elementos de una matriz de embutición</i> .....	45
Figura 9 <i>Sufridera y prensa chapas</i> .....	46
Figura 10 <i>Aplicaciones de la ingeniería inversa en la industria</i> .....	48
Figura 11 <i>Metodología de la ingeniería inversa</i> .....	58
Figura 12 <i>Vista isométrica de la pieza</i> .....	59
Figura 13 <i>Vista superior de la pieza</i> .....	59
Figura 14 <i>Vista frontal de la chapa desarrollada</i> .....	60
Figura 15 <i>Prensa digitalizada</i> .....	63
Figura 16 <i>Vista explosionada del sistema de embutición</i> .....	64
Figura 17 <i>Sistema de embutición ensamblado</i> .....	65
Figura 18 <i>Núcleo de la matriz de la primera autoparte</i> .....	66
Figura 19 <i>Cavidad de la matriz de la primera autoparte</i> .....	66
Figura 20 <i>Núcleo prototipado de la primera autoparte</i> .....	68
Figura 21 <i>Cavidad prototipada de la primera autoparte</i> .....	69
Figura 22 <i>Vista isométrica del modelo CAD de la segunda autoparte</i> .....	69

Figura 23 <i>Vista isométrica de la cavidad del molde de la segunda autoparte</i> .....	71
Figura 24 <i>Vista isométrica del núcleo del molde de la segunda autoparte</i> .....	71
Figura 25 <i>Núcleo prototipado de la segunda autoparte</i> .....	72
Figura 26 <i>Cavidad prototipada de la segunda autoparte</i> .....	72
Figura 27 <i>Diagrama de actividades del ensayo de embutición #1</i> .....	74
Figura 28 <i>Núcleo y cavidad de la matriz fracturada</i> .....	75
Figura 29 <i>Vista superior de la pieza embutida con chapa de 0,7 mm</i> .....	75
Figura 30 <i>Diagrama de actividades del ensayo de embutición #2</i> .....	77
Figura 31 <i>Núcleo del molde prototipado con parámetros de impresión modificados</i> .....	78
Figura 32 <i>Cavidad del molde prototipado con parámetros de impresión modificados</i> .....	78
Figura 33 <i>Vista superior de la pieza embutida con chapa de 0,2 mm</i> .....	79
Figura 34 <i>Vista frontal de la pieza embutida con chapa de 0,2 mm</i> .....	79
Figura 35 <i>Vista superior de la pieza embutida con chapa de 0,2 mm cubierta con cinta aislante</i> .....	80
Figura 36 <i>Diagrama de actividades del ensayo de embutición #3</i> .....	82
Figura 37 <i>Vista superior de la pieza embutida con chapa de 0,2 mm sin la perforación interior</i> .....	83
Figura 38 <i>Vista lateral de la pieza embutida con chapa de 0,2 mm sin la perforación interior</i> .....	83
Figura 39 <i>Vista superior de la pieza embutida con chapa de 0,5 mm</i> .....	84
Figura 40 <i>Vista lateral de la pieza embutida con chapa de 0,5 mm</i> .....	84
Figura 41 <i>Diagrama de actividades del ensayo de embutición #1</i> .....	86
Figura 42 <i>Vista exterior de la pieza obtenida en el ensayo de embutición #1</i> .....	87
Figura 43 <i>Vista interior de la pieza obtenida en el ensayo de embutición #1</i> .....	87

Figura 44 <i>Vista lateral de la placa porta cavidad pandeada</i> .....	88
Figura 45 <i>Diagrama de actividades del ensayo de embutición #2</i> .....	89
Figura 46 <i>Vista exterior de la pieza obtenida en el ensayo de embutición #2</i> .....	90
Figura 47 <i>Diagrama de actividades del ensayo de embutición #3</i> .....	92
Figura 48 <i>Vista exterior de la pieza obtenida en el ensayo de embutición #3</i> .....	92
Figura 49 <i>Presión máxima ejercida durante el ensayo de embutición #3</i> .....	93



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Siglas de referencia de los lubricantes más usados según Magnus Chemical Company</i> .....	40
Tabla 2 <i>Lubricante a emplear en el embutido de acuerdo al material en uso</i> .....	41
Tabla 3 <i>Otros lubricantes para el embutido en función del material de la chapa metálica</i> .....	42
Tabla 4 <i>Evaluación del peso específico de cada criterio</i> .....	54
Tabla 5 <i>Evaluación del peso específico del criterio tamaño</i> .....	55
Tabla 6 <i>Evaluación del peso específico del criterio superficie</i> .....	55
Tabla 7 <i>Evaluación del peso específico del criterio profundidad</i> .....	56
Tabla 8 <i>Evaluación del peso específico del criterio disponibilidad</i> .....	56
Tabla 9 <i>Evaluación del peso específico del criterio apto para mejora</i> .....	57
Tabla 10 <i>Evaluación final</i> .....	57
Tabla 11 <i>Fuerza máxima de embutición para diferentes espesores de chapa metálica</i> .....	61
Tabla 12 <i>Parámetros de impresión del molde</i> .....	68
Tabla 13 <i>Parámetros de embutición para la segunda autoparte</i> .....	70
Tabla 14 <i>Comparativa de medidas de la segunda autoparte</i> .....	94
Tabla 15 <i>Material y tiempo de impresión de los moldes</i> .....	95
Tabla 16 <i>Resumen de costos de la fabricación de la segunda autoparte con un molde impreso en 3D</i> .....	96
Tabla 17 <i>Resumen de costos de la fabricación de la segunda autoparte con un molde fresado</i> .....	96
Tabla 18 <i>Resumen de costos de la fabricación de la segunda autoparte con un molde fresado</i> .....	97

## INTRODUCCIÓN

### Problema

En el mercado nacional, según el boletín estadístico de la Cámara de la Industria Automotriz Ecuatoriana (CINAE), la oferta aparente de vehículos acumulada hasta el mes de marzo de 2021 es de 23.844 unidades, estando cubierto en apenas un 14,79% por la producción nacional y el restante por las importaciones [1].

Solo en marzo de 2021 la producción de vehículos muestra un crecimiento del 55% respecto al año anterior. En este mismo mes, 33 unidades fueron destinadas a la exportación, significando un descenso de 114 unidades en comparación con el mismo mes de 2020. Así mismo, la importación de vehículos aumentó 4.010 unidades más que en marzo de 2020 [1].

Por su parte, las exportaciones de autopartes alcanzaron un total aproximado de 7 millones de dólares al mes de marzo de 2021, mientras las importaciones llegan hasta los 39 millones de dólares, lográndose apreciar un crecimiento del 7% en el valor acumulado de las importaciones en comparación con el año anterior [1].

Como lo expone la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador en [2], las actividades de fabricación, comercio y reparación de vehículos y motocicletas generaron 182.492 empleos en el año 2019. De este total, 32.531 trabajadores se dedican a la venta de autopartes y apenas 2.645 trabajadores se especializan en la fabricación de autopartes.

Al analizar los datos anteriormente mencionados, es fácil percatarse de la falta de progreso del sector productivo de autopartes en el país, esto a pesar de la importancia que supone el diseño de elementos mecánicos para el avance tecnológico de la industria automotriz [3].

Además de lo anteriormente expuesto, entre los diferentes problemas que dificultan el progreso del sector automotriz en el Ecuador, los inconvenientes tecnológicos, el tamaño del

mercado y los niveles de producción, se destacan ante la necesidad de reproducir autopartes desarrolladas por empresas automotrices ajenas [4].

En general, las autopartes reproducidas en el Ecuador han de encajar y trabajar adecuadamente con el resto de las piezas que componen el sistema automotriz. La información necesaria para lograr este trabajo en conjunto no es proporcionada libremente por los fabricantes, pues buscan evitar el desarrollo de la posible competencia [4].

En este contexto, los sistemas de ingeniería y manufactura CAD, CAM y CAE juegan un papel primordial en el desarrollo de esta industria. Sin embargo, cuando es necesario disponer de un diseño ya existente, las herramientas convencionales de ingeniería no siempre son lo suficientemente flexibles y ágiles para un desarrollo rápido del trabajo deseado [3][5].

Ante estos inconvenientes, la ingeniería inversa se presenta como una posible alternativa, permitiendo obtener no solamente la geometría de los elementos y la reproducción de estos en menores periodos de tiempo en comparación con técnicas de metrología convencionales, sino que también facilita la creación de moldes y nuevos modelos que son puestos a prueba en simulaciones con la finalidad de optimizar aún más el diseño de la pieza, realizando de esta forma un verdadero proceso de rediseño [6].

A pesar de las facilidades que ofrece la ingeniería inversa, esta metodología y sus herramientas no son ampliamente conocidas y utilizadas en el ámbito local, pese a haberse demostrado su utilidad.

La industria metalmecánica en el Ecuador emplea moldes para embutido en una gran cantidad de aplicaciones, debido a su versatilidad y ahorro económico en producciones en masa. En la actualidad, la fabricación de moldes para embutido, se enfrenta a los retos que suponen el cambio constante de los diseños de las piezas y la producción de series cada vez más cortas e incluso únicas [7].

En este sentido, la fabricación de moldes por medio de procesos de prototipado rápido, ofrece ventajas como la flexibilidad, adaptabilidad y creación de geometrías que no se pueden fabricar de una forma sencilla por medio de los procesos convencionales como la remoción de material [8].

Así mismo, los procesos de remoción de material, que son la forma más común de fabricación de los moldes en general, conllevan un tiempo de elaboración y un costo demasiado elevado, además de no brindar al diseñador la capacidad de validar el diseño u obtener prototipos de forma rápida. En otras palabras, el diseñador corre el riesgo de invertir una gran cantidad de tiempo y dinero, en la fabricación de un molde que puede contener un error de diseño que pudo haber sido pasado por alto [8].

De esta forma, los procesos de prototipado rápido y fabricación aditiva se presentan como alternativas accesibles para la validación de los diseños y la obtención de prototipos de moldes a bajo costo y en un corto periodo de tiempo [8].

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Diseñar un molde para el embutido de una autoparte sencilla, empleando herramientas de prototipado e ingeniería inversa para su posible utilización en el sector metalmecánico ecuatoriano.

### ***Objetivos específicos***

- Determinar las piezas y los métodos de prototipado que se podrían utilizar en el proyecto.
- Diseñar el molde de la pieza para obtener un modelo.
- Prototipar el molde propuesto.
- Determinar la factibilidad del molde.

## **Justificación**

El sector automotriz representa una de las principales industrias a nivel global, gracias a que satisface una de las necesidades fundamentales de la sociedad como lo es el transporte. En este sentido, la fabricación de autopartes surge como una oportunidad de mercado para el desarrollo de la economía del país. En concordancia, el sector de producción de autopartes de Ecuador ha demostrado precisar de una mayor participación en el mercado, presentándose nuevamente como una oportunidad para la implementación de las tecnologías de prototipado rápido en los procesos de fabricación de las piezas automotrices [3].

Una de las formas más eficientes de adquisición del diseño de una autoparte, ya sea porque este se ha perdido, es obsoleto o no es de libre acceso, como es este el caso, es el uso de la ingeniería inversa [5]. Esta metodología posibilita la obtención de la información necesaria para la digitalización de la pieza, a la par que evita el gasto excesivo de tiempo en comparación con los procesos de metrología convencionales [6].

La siguiente fase, tras aplicar la metodología de la ingeniería inversa y diseñar el molde, es el proceso de fabricación de este. La generación del molde mediante los procesos de prototipado rápido, permite a los diseñadores obtener un modelo físico con el cual validar su trabajo de una forma mucho más rápida en contraste con los procesos de manufactura convencionales [9]. De igual forma, se destaca la diferenciación en el procedimiento, el material y, especialmente, en los costos, además de brindar la capacidad de fabricar geometrías que serían demasiado complejas de obtener mediante técnicas convencionales [10].

La propuesta del diseño de un molde para el embutido de una autoparte involucra una aplicación de competencias relacionadas con la formación de ingeniería, de manera que la aplicación de la metodología de ingeniería inversa, o a su vez, de la correcta selección e implementación del proceso de prototipado rápido resultan en un procedimiento fundamental para una correcta reproducción de la pieza seleccionada.

Además de lo anteriormente expuesto, el desarrollo del presente trabajo se ve justificado en base a los Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por las Naciones Unidas. Concretamente, se buscaría contribuir con el objetivo 8 al intentar aumentar la productividad económica a través de la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación. Adicionalmente, se trataría de generar impacto respecto al objetivo 9 al pretender promover la contribución de la industria al empleo y al producto interno bruto, además de aspirar a mejorar el desarrollo tecnológico de los sectores industriales apoyado en la innovación [11].

### **Alcance**

Se determinará la pieza automotriz a trabajar mediante la investigación bibliográfica de los diferentes métodos de prototipado rápido disponibles, de forma que el molde propuesto pueda ser materializado mediante el proceso de fabricación seleccionado. La autoparte seleccionada ha de contar con pocas superficies curvas, de dimensiones menores a 200 mm tanto de largo como de ancho y poca profundidad, además de ser apta para su fabricación mediante el proceso de embutido. Se aplicará la metodología de ingeniería inversa para diseñar un molde para el embutido de la autoparte determinada. La verificación de la factibilidad de uso del molde propuesto se realizará mediante pruebas de embutido.

### **Antecedentes**

En [8], se utiliza una impresora 3D con cama de fría a fin de elaborar moldes para el termoformado de un contenedor de tipo embalaje que incluye partes rectas y curvas en su geometría. Se emplean diferentes filamentos, siendo el principal el PLA de 1,75 mm de diámetro, impreso con una altura de capa de 0,2 mm, relleno con un tramado tipo rejilla, a una densidad del 15% y a una velocidad de 40 mm/s. Los moldes fabricados y los resultados son evaluados mediante una inspección visual de defecto y la medida de la rugosidad de la superficie. Los resultados muestran que los moldes obtenidos con PLA presentan los valores

de rugosidad más bajos. Así mismo, debido a que el PLA admite una temperatura de aproximadamente 65 °C, se observan deformaciones en las superficies de los moldes tras haber realizado varios ciclos consecutivos de termoformado. Por lo general, se encuentran problemas de hundimiento y dificultades en el desmoldeo, presuntamente por la baja disipación de calor del molde.

Como se expone en [3], Villarreal estudia la fabricación de una tapa de distribución del Chevrolet Spark 2015 mediante ingeniería inversa e impresión 3D. Emplea el escáner GO! SCAN con el objetivo de obtener la geometría de la autoparte, para posteriormente modelar el CAD mediante el software Geomagic Design Direct. Para el prototipado de la pieza, emplea una impresora ANYCUBIC I3 MEGA y el filamento ABS como materia principal, con unos parámetros de impresión de: espesor de capa de 0,2 mm, velocidad de 40 mm/s, temperatura de extrusión a 240 °C, densidad de relleno de 100% con un patrón de tipo rejilla. Los resultados muestran que la autoparte obtenida posee una desviación geométrica de  $\pm 0,5$  mm comparado con la original. Los mismo sucede con las desviaciones medidas en el prototipo impreso respecto a la pieza original, con valores de 0,0034, 0,0104, 0,0080, y 0,0055, demostrando que la ingeniería inversa y la impresión 3D son procesos de prototipado rápido que permiten obtener partes automotrices muy similares a las originales.

En [12], se expone el trabajo realizado con el propósito de fabricar un molde para el soplado de una botella aplicando la metodología de ingeniería inversa. Para ello, emplea el equipo de escaneo SmartScan R2-C2 y su programa Optocat 2015 ®. El área de trabajo para el escaneo es controlada al disminuir 25 % la iluminación procedente de fuera con la finalidad de prevenir la aparición de ruido en la obtención de las nubes de puntos. El trabajo con las nubes de puntos se realiza en el software Geomagic Design X, mientras que el diseño del molde se realizó en Inventor. El material seleccionado para la impresión 3D de los moldes es ABS-plus, junto a soportes solubles SR-30XL eliminados con lavado ultrasónico. Los

parámetros de impresión son: altura entre capas de 0,25 mm, espesor de capa de 10 mm, densidad de relleno variable entre 60 y 100 % desde el centro hacia el exterior. Para la terminación de la superficie del molde se emplea masilla automotriz y se da un lijado con papel lija de 1000. El molde es puesto a prueba mediante la producción de 25 botellas en material PET. Estos envases se escanean y analizan dimensionalmente respecto al modelo digital, encontrando que la desviación las botellas fabricadas se conserva en el intervalo entre +0,15 y -0,2 mm, validando el uso de moldes impresos de bajas producciones para el modelado de plásticos.



## CAPÍTULO 1

### 1 MARCO REFERENCIAL

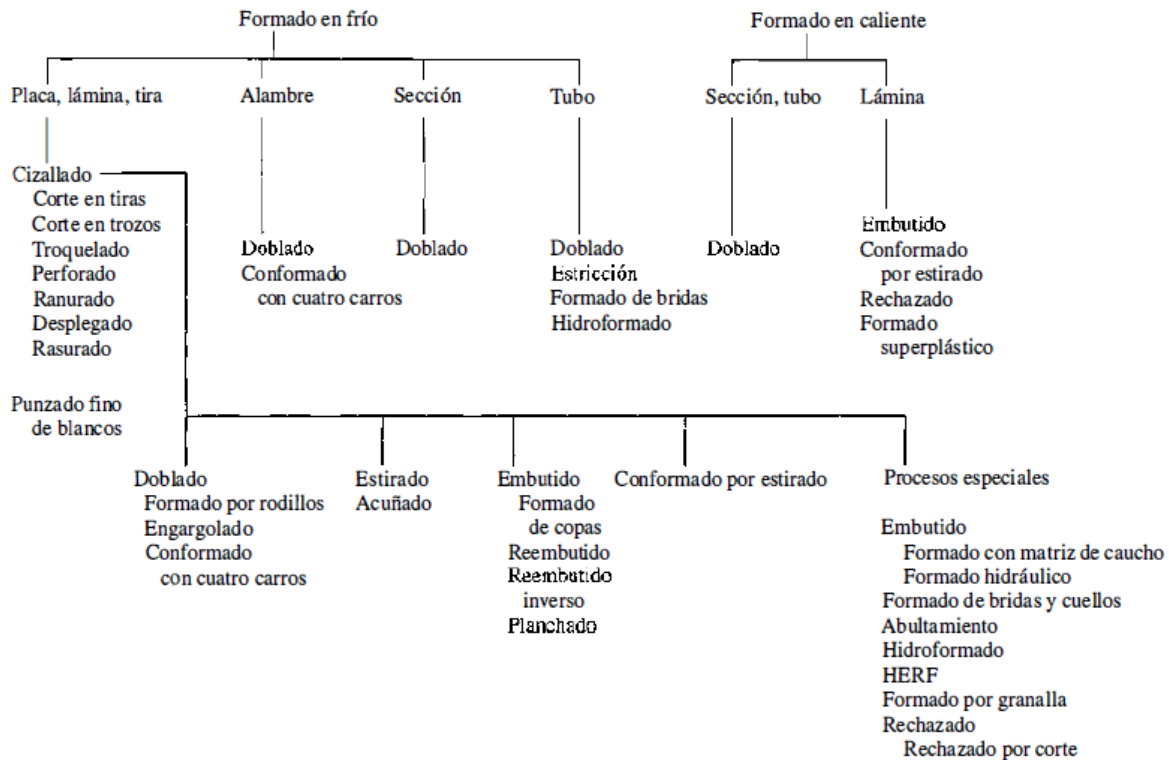
En este capítulo se recopila la información relevante sobre los procesos de conformado, el diseño de matrices, los materiales compuestos y la ingeniería inversa, a fin de emplearlos como base para el desarrollo de los capítulos posteriores.

#### 1.1 Procesos de formado metálico

Desde un punto de vista amplio, cuando se habla del conformado se hace referencia a la modificación de la forma de un cuerpo sólido. Es así, que los procesos de conformado emplean comúnmente materia prima en forma de placa, lámina, barra, varilla, alambre o tubo de diversas dimensiones. Algunos de los procesos de conformado de metales son: laminación, forjado, extrusión, estirado, formado de hojas metálicas, procesamiento de polvos metálicos, procesamiento de cerámicos, vidrio y superconductores, entre otros, tal como se muestra en la Figura 1 [13].

De entre todos los procesos mencionados previamente, el formado de hojas metálicas predomina debido a la amplia gama de productos de uso cotidiano e industriales que se pueden obtener, tales como envases para bebidas, recipientes para alimentos, equipos electrodomésticos, carrocerías automotrices, fuselajes y muebles de cocina u oficina. Entre los procesos de formado de hojas metálicas se encuentran: embutido, martillado, laminado, doblado, con hule, rechazado, por explosión, por pulso magnético, estampado, estiramiento, superplástico, entre otros [13].

Figura 1

*Clasificación general de las operaciones de formado de lámina metálica*

Fuente: [14]

**1.2 Prensado**

Este término es comúnmente empleado para hacer referencia a todas las operaciones de conformado de hoja metálica, llevadas a cabo en presas de alta capacidad mediante moldes permanentes, comúnmente de acero. Este método de formado abarca todas las operaciones necesarias para fabricar una pieza, sea simple o compleja, empleando estampado, punzonado, doblado, embutido y demás procesos [14]. En amplios rasgos, en este proceso el material es presionado contra la cavidad del molde con la finalidad de adquirir la forma y dimensiones deseadas [15].

**1.3 Estampado**

Esta técnica de formado por presión emplea usualmente moldes metálicos, constituidos por dos partes con cavidades con la forma de la parte a obtener, moviéndose a una velocidad

de 20 m/s para generar un encuentro brusco que produce la pieza deseada a partir de un material en bruto. El proceso más común es el estampado en frío debido al gran desempeño, costo accesible y precisión que presenta, además de obtener diferentes piezas de acero y sus aleaciones [15].

#### **1.4 Embutición**

El proceso de formado de láminas metálicas por embutido es una operación que se emplea para la obtención de piezas con geometrías cilíndricas, de cajas huecas y demás elementos cóncavos. Se lleva a cabo al presionar una hoja de metal sobre la cavidad de una matriz mediante un punzón o dado, tal como se muestra en la Figura 2 [16].

De una forma general, se puede decir que la principal diferencia que existe entre el estampado y el embutido radica en que el primero se emplea para obtener piezas con bajas elevaciones o cavidades en comparación con el embutido, en el cual las depresiones de la chapa metálica son más pronunciadas [17].

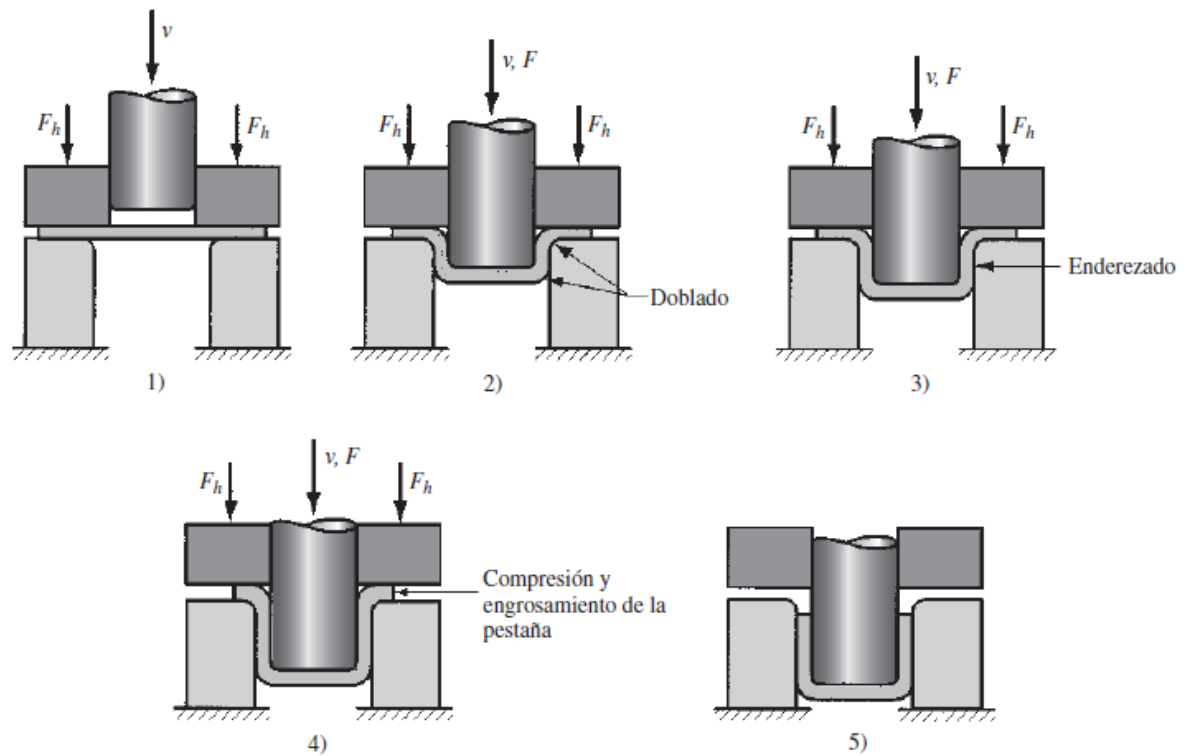
En términos generales, las etapas que se llevan a cabo durante el proceso de embutido, según [16] y mostradas en la Figura 2, son:

- 1) El punzón aplica una fuerza  $F$ , como se ilustra en la Figura 2 (1), para producir la deformación de la lámina de metal mientras el pisador ejerce una fuerza de sujeción.
- 2) A continuación, se efectúa la operación de doblado, producida por el trabajo del punzón.
- 3) Conforme avanza el punzón, se produce un enderezado del material que fue doblado anteriormente.
- 4) Acto seguido, la parte exterior de la lámina de metal se embute hacia el interior de la matriz con la finalidad de reemplazar el material anteriormente doblado y enderezado.

- 5) Finalmente se obtiene la pieza embutida, mostrando la disminución del espesor de las paredes de la pieza. En un proceso de embutido satisfactorio se puede presentar hasta un 25 % de adelgazamiento [16].

Figura 2

*Fases en el proceso de embutido profundo*



Fuente: [16]

Factores como la fricción y la fuerza de sujeción son fundamentales para obtener un proceso de embutido satisfactorio, razón por la cual es común el uso de lubricantes para disminuir las fuerzas de rozamiento. Del mismo modo, si la fuerza de sujeción es insuficiente se produce un arrugamiento, mientras que por el contrario, si la fuerza es excesiva se dificulta la correcta circulación del metal hacia la cavidad del molde, provocando un estirado y una potencial fisura de la hoja de metal [16].

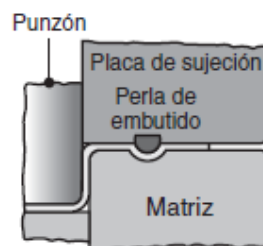
### 1.4.1 Consideraciones para el embutido

Kalpakjian y Schmid en [13] mencionan una serie de recomendaciones con la finalidad de obtener un proceso de embutido adecuado, de entre las cuales se destacan:

- Comúnmente, la fuerza de sujeción se establece entre el 0,7 % y 1 % del resultado de la adición de la resistencia a la fluencia y la resistencia máxima a la tensión de la lámina de metal.
- Las holguras son generalmente más grandes que el espesor de la lámina entre un 7 % a 14 %.
- Habitualmente se requieren perlas de embutido, como la que se muestra en la Figura 3, con la finalidad de regular la circulación del material hacia la cavidad del molde y ayudan a prevenir que la hoja de metal se arrugue. Los diámetros de estas perlas son seleccionados en el rango de 13 mm a 20 mm, siendo necesarias perlas más grandes mientras más grande sea la pieza por embutir.

Figura 3

*Representación de una perla de embutido*



Fuente: [13]

- Con el objetivo de prevenir el desgarre de la lámina metálica, se sugiere considerar e incluir los siguientes elementos: diseño y ubicación adecuada de las perlas de embutido, radios de la matriz amplios, lubricación eficiente, proporciones adecuadas de la lámina en bruto, corte de las esquinas de la lámina

en bruto a 45° para reducir los esfuerzos y el emplear hojas metálicas en buenas condiciones internas y externas.

Adicionalmente, otras consideraciones propuestas por diferentes autores son:

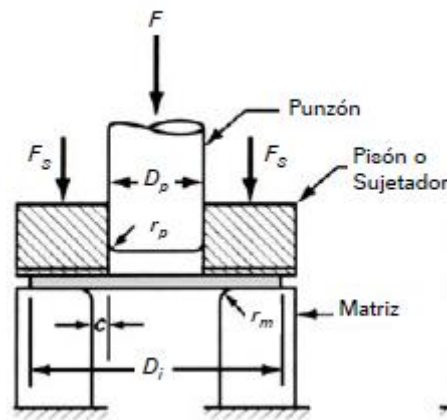
- Incluir una perforación central en el dado de punzonado con la finalidad de prever la el desarrollo de vacío [14].
- Para el desarrollo del embutido con pisador, la fuerza de la placa de sujeción se puede aproximar al 1,5 % del esfuerzo a la cedencia del material a embutir [14].
- Dado que el material tiende a endurecerse durante el proceso de embutido, es recomendable realizar con antelación un recocido a la chapa metálica a fin de disminuir el riesgo de que se produzcan fisuras en las paredes de la pieza [18].
- Una práctica satisfactoria de embutido está condicionada directamente por la calidad de la lámina metálica y del tratamiento que está haya recibido [18].
- Para el moldeo de piezas cúbicas, pese a redondear los bordes, el material tiende a concentrarse en las aristas por lo que estas áreas requieren de menos cantidad de materia [18].

#### ***1.4.2 Parámetros para el embutido***

Para analizar los parámetros de la ejecución del embutido, se emplearán las dimensiones y nomenclatura expuestas en la Figura 4, correspondiente a la operación básica de embutido.

Figura 4

*Variables del proceso de embutido*



Fuente: [19]

Los factores relevantes en el embutido son: las propiedades de la lámina metálica, el diámetro del disco ( $D_i$ ), el diámetro del dado ( $D_p$ ), la separación ( $c$ ) entre los laterales del punzón y la matriz, los radios de redondeo del punzón ( $r_p$ ) y de la matriz ( $r_m$ ), la fuerza de sujeción ( $F_s$ ), y la fricción y la lubricación entre todas las áreas de contacto [19].

#### 1.4.2.1 Fuerza de embutido

A causa de la gran cantidad de variables que intervienen en el proceso de embutido, es complicado determinar la fuerza de punzonado ( $F$ ). No obstante, es posible estimar la fuerza máxima de embutido ( $F_{m\acute{a}x}$ ) empleando la ecuación (1) [13]:

$$F_{m\acute{a}x} = \pi D_p t (UTS) [D_i/D_p - 0,7] \quad (1)$$

Donde es notorio que la fuerza aumenta conforme los valores del diámetro, el espesor ( $t$ ), la resistencia última a la tensión ( $UTS$ ) y la relación entre los diámetros se incrementen [13]. El valor de 0,7 representa una constante de corrección para la fricción [16].

#### 1.4.2.2 Fuerza de sujeción

De manera similar, la fuerza de sujeción puede ser aproximada mediante un valor de 0,015 de la resistencia a la cedencia de la chapa metálica, multiplicado por la fracción de la

superficie de la pieza en bruto que es sostenida por el pisador, tal como se muestra en la ecuación (2) [16].

$$F_s = 0,015Y\pi D_i^2 - (D_p + 2,2t + 2r_m)^2 \quad (2)$$

Usualmente, la fuerza de sujeción es aproximadamente un tercio de la fuerza de embutido [16]. Sin embargo, otros autores sugieren que inicialmente se emplee la fuerza de sujeción mínima, para luego incrementar este valor hasta obtener una pieza embutida satisfactoriamente [18].

La ecuación (3) sugerida por [18], para el cálculo de la presión de sujeción es:

$$F_s = \frac{\pi}{4} (D_i^2 - d^2) p \quad (3)$$

Donde  $d$  hace referencia al diámetro del núcleo de la matriz y  $p$  es la presión específica del material.

#### 1.4.2.3 Holgura entre la matriz y el punzón

Por otro lado, se ha comprobado que el aumento de la holgura entre la matriz y el punzón facilita el avance del punzón, sin embargo, esto también provoca ciertos problemas, como la deformación del perfil de las caras laterales, la desviación del punzón o la aparición de arrugas en las paredes de la pieza final [20].

De la misma forma, si esta holgura es demasiado pequeña, es muy probable que el espesor de la pared se reduzca de forma indeseada. Por estos motivos, es necesario dimensionar adecuadamente el juego entre el punzón y la cavidad. Teóricamente, para el acero, aluminio y otros metales no ferrosos respectivamente, se suelen aplicar las siguientes ecuaciones [20]:

$$c = t + 0,07\sqrt{10t} \quad (4)$$

$$c = t + 0,02\sqrt{10t} \quad (5)$$

$$c = t + 0,04\sqrt{10t} \quad (6)$$



Por norma general, se recomienda que la holgura entre la matriz y el punzón se encuentre entre el 10 % y 20 % adicional al espesor de la lámina metálica, calculado según [19] mediante la ecuación (7):

$$c = t + (1,15 \times t) \quad (7)$$

#### 1.4.2.4 Radio de embutición

A fin de producir una correcta distribución de esfuerzos y por consiguiente, una pieza embutida adecuadamente, es primordial dimensionar apropiadamente el radio de embutición o radio de redondeo de la matriz [20].

Cuando el radio  $r_m=0$  la matriz se convierte en una matriz de corte, mientras que cuando el radio  $r_m$  es máximo, la lámina metálica no es sujeta en absoluto por el pisador, imposibilitando completamente el proceso de embutido. En este sentido, el valor del radio de embutición ha de estar entre estos dos límites, dado por según Wassilieff [20] por la ecuación (8):

$$0 < r_m < \frac{D_i - D_p}{2} \quad (8)$$

De acuerdo a lo expuesto en [20], Kaczmarek propone las ecuaciones (9) y (10) para acero y, aluminio y sus aleaciones respectivamente, obtenidas de forma experimental:

$$r_m = 0,8 \sqrt{(D_i - D_p)t} \quad (9)$$

$$r_m = 0,9 \sqrt{(D_i - D_p)t} \quad (10)$$

#### 1.4.2.5 Redondeo del punzón

Con la finalidad de evitar que el punzón atraviese la lámina metálica, el radio del punzón  $r_p$  ha de ser de tres a cinco veces el radio de la matriz. Para aquellas piezas con vértices vivos en el fondo, se realizan varias operaciones disminuyendo el valor de los radios [20].

#### 1.4.2.6 Ángulo de salida

De igual manera, para disminuir la fricción entre la pieza y la matriz, se añaden ángulos de salida que suelen ser de 1° a 3° y en ciertas circunstancias de hasta 6° [19].

#### 1.4.2.7 Relación límite de embutido

Otro factor importante a tomar en cuenta a fin de obtener un proceso de embutido exitoso, es la relación límite de embutido (LDR), el cual es un indicador de la severidad de la operación del embutido, definida para geometrías cilíndricas mediante la ecuación (11) [16]:

$$LDR = \frac{D_i}{D_p} \quad (11)$$

Mientras más alto sea el valor de la relación límite, mayor intensidad presentará el embutido. Por norma general, se sugiere que este límite sea inferior a 2. El valor real de este límite está condicionado por los radios de las aristas del punzón y la matriz, por el rozamiento, por la profundidad del embutido y por las propiedades de la chapa metálica [16]. Comúnmente, los radios, tanto de la matriz como del punzón, se establecen en un rango superior a cuatro veces el espesor de para láminas gruesas (> 5 mm) y mayor a ocho veces el espesor para láminas delgadas (< 1 mm) [14].

#### 1.4.2.8 Reducción

Así mismo, otro factor característico en el embutido es la reducción ( $r$ ), el cual ha de ser menor que 0,5. Este valor es calculado empleando la ecuación (12) [16]:

$$r = \frac{D_i - D_p}{D_i} \quad (12)$$

Una tercer magnitud a tomar en consideración es la relación entre el espesor y el diámetro  $t/D_i$ , la cual representada en porcentaje aconsejable que supere el 1 %, puesto que a medida que esta relación disminuye, aumenta la probabilidad de que se presente arrugamiento en la pieza embutida [16].

### 1.4.3 Determinación del tamaño de la pieza en bruto

Uno de los principales inconvenientes que se encuentra durante el desarrollo del proceso de embutido es la determinación de las medidas de la lámina de metal de la cual se obtendrá la pieza final [18]. El tamaño de la pieza en bruto ha de ser lo bastante grande como para proveer el material necesario para completar la pieza, al mismo tiempo que se procura no tener demasiado material en exceso que se desaproveche [16].

Para el dimensionamiento de las piezas cilíndricas, se establece que el volumen del elemento final es igual que el del trozo inicial, de forma que el diámetro de la pieza en bruto puede encontrarse despejando  $D_i$ . Dentro de las suposiciones que se establecen, se incluye que la disminución del espesor de las paredes es cero. Para elementos no cilíndricos, el proceso es más complejo pues la pieza no será redonda [16].

En este sentido, en [18] los autores han desarrollado, a través de la experimentación, una serie de métodos basados en la equivalencia de superficies para geometrías regulares, con líneas rectas o con sección circular. Para aquellas piezas con formas irregulares, este método de cálculo no siempre es correcto y suelen requerir de un proceso de prueba y error. En ciertos casos, se acostumbra a dejar un excedente de material en el perfil del material que, tras ser embutido, se retira mediante algún proceso de desbaste.

De esta forma, como se indica en [18], la determinación del diámetro del disco inicial para una pieza cilíndrica se realiza de la siguiente manera:

Para la superficie del disco inicial, considerando  $D$  como el diámetro del disco, se aplica la ecuación (13):

$$S_D = \frac{\pi D^2}{4} \quad (13)$$

Para la superficie exterior del cilindro final se emplea la ecuación (14), con  $d$  como el diámetro del cilindro y  $h$  la altura de este:

$$S_E = \frac{\pi d^2}{4} + \pi dh \quad (14)$$

Igualando estas dos ecuaciones y despejando  $D$ , se obtiene que el diámetro inicial de la pieza a embutir está dado por la ecuación (15):

$$D = \sqrt{d^2 + 4dh} \quad (15)$$

#### **1.4.4 Tipos de embutición**

Por lo general, los diferentes autores hacen referencias a las siguientes variantes de embutición.

##### *1.4.4.1 Planchado*

Cuando el espacio entre el punzón y la matriz tiene cierta amplitud, la pieza embutida contará con paredes con un mayor espesor en el borde en comparación con la base. Con la finalidad de ajustar el grosor de la pared de la pieza, se aplica el proceso de planchado, procedimiento mediante el cual una pieza previamente embutida pasa a través de la holgura entre uno o más anillos planchadores y el punzón, obteniendo finalmente una pieza con una pared más delgada y con espesor constante [13].

##### *1.4.4.2 Reembutado*

Cuando el modelo a obtener involucra un cambio muy amplio de la lámina de metal, la pieza puede precisar de más de una etapa del embutido. A estas etapas de embutido posteriores al primer proceso se les denomina reembutado [16].

##### *1.4.4.3 Embutido sin placa de sujeción*

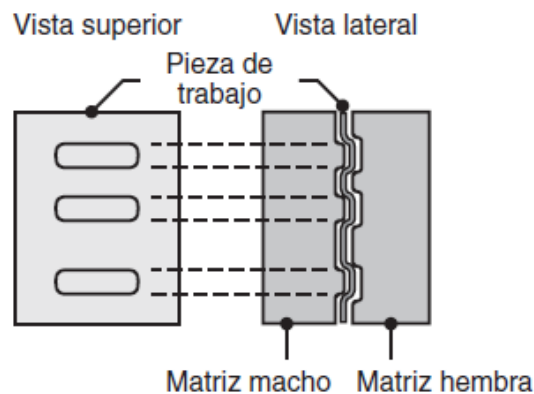
Cuando la lámina de metal tiene un espesor adecuado para evitar ser arrugada durante el embutido, se puede realizar el conformado sin la necesidad del sistema de sujeción [13]. Kalpakjian y Schmid en [13] sugieren aplicar este tipo de embutido cuando la diferencia entre el diámetro máximo de la pieza en bruto ( $D_i$ ) y el diámetro del punzón ( $D_p$ ) es menor a cinco veces el espesor de la lámina ( $T$ ). Por otro lado, Schey en [14] recomienda aplicar el embutido libre cuando la razón de embutido  $D_o/D_p < 1,2$ .

#### 1.4.4.4 Repujado o realzado

Este proceso es adecuado para embutidos de profundidades pequeñas e intermedias, llevado a cabo mediante matrices coincidentes, donde el punzón consta de los contornos positivos, mientras la matriz alberga los negativos, tal como se muestra en la Figura 5 [13][16].

Figura 5

#### Proceso de repujado



Fuente: [13]

#### 1.4.5 Otras operaciones de embutido

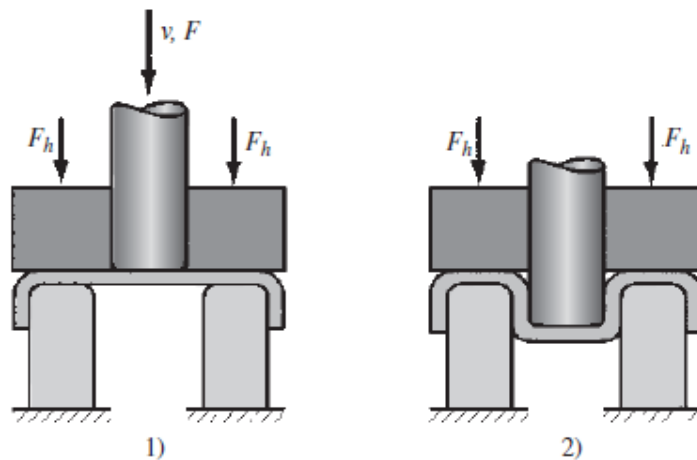
En general, la literatura se centra en la operación convencional de embutido mediante la cual se obtienen piezas de forma cilíndrica en un solo paso. Cuando el proceso básico no es suficiente, se emplean ciertas variantes como las que se describen a continuación [16].

##### 1.4.5.1 Embutido inverso

En esta operación, se ubica en el troquel una pieza ya embutida, dejando la apertura hacia abajo, tal como se muestra en la Figura 6, de forma que obtiene una configuración adecuada para un segundo proceso de embutido [16].

Figura 6

*Embutido inverso: 1) colocación de la pieza ya embutida y 2) embutido inverso*



Fuente: [16]

#### 1.4.5.2 Embutido de piezas no cilíndricas

El embutido de figuras no cilíndricas, con formas cuadradas, rectangulares, conos y demás formas irregulares, involucra la consideración de detalles técnicos para cada caso específico [16]. Por ejemplo, el embutido de contenedores cuadrados o rectangulares representa una mayor complejidad debido al aumento de la razón entre la longitud de la pieza en relación con el vértice [14].

#### 1.4.6 Defectos de la embutición

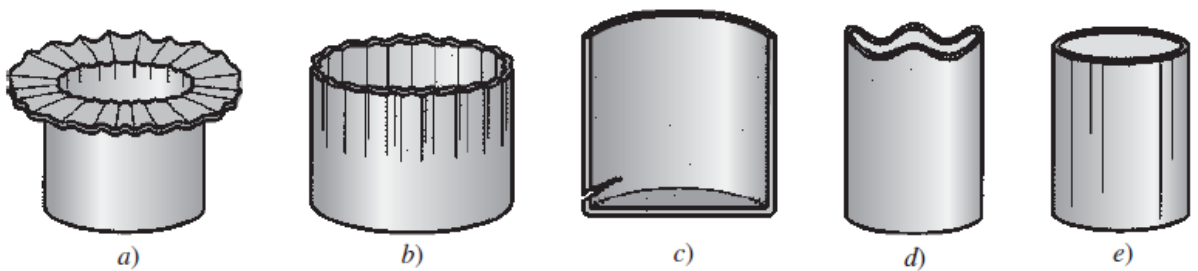
Debido a la complejidad que conlleva el proceso de conformado por embutido, es común la presencia de fallas en una pieza embutida, algunas de las cuales se mencionan a continuación y se muestran en la Figura 7 [16].

- a) Arrugamiento en la pestaña: se produce cuando aparecen pliegues alrededor de la pestaña no embutida causados por el pandeo por compresión.
- b) Arrugamiento en la pared: cuando la pestaña arrugada se embute, es inevitable la presencia de pliegues en la pared de la pieza.

- c) Agrietamiento: es ocasionado comúnmente cerca de la base de la pieza por las fuerzas de tensión que provocan la disminución de la lámina de metal hasta su desgarramiento. También puede ser originado por un borde afilado del molde.
- d) Orejado: representa la aparición de ondulaciones en la orilla superior de la pieza, originado cuando el material no es perfectamente isotrópico.
- e) Ralladura superficial: sucede cuando el punzón y la matriz no poseen una superficie uniforme o si la lubricación no es la adecuada.

Figura 7

*Fallas frecuentes tras el embutido: a) arrugamiento en la pestaña, b) arrugamiento en la pared, c) agrietamiento, d) orejado y e) ralladura superficial*



Fuente: [16]

#### **1.4.7 Herramientas y equipo para embutido**

Los aceros herramienta y los hierros fundidos son los materiales frecuentemente empleados para la fabricación de las herramientas y los moldes para el embutido. Por lo general, la maquinaria empleada en el embutido incluye una prensa hidráulica de doble acción o una prensa mecánica. La velocidad con la que el punzón ejerce presión es comúnmente seleccionada entre 0,1 y 0,3 m/s [13].

#### **1.4.8 Lubricación durante el embutido**

A fin de facilitar el moldeado de la pieza y disminuir las probabilidades de crear fisuras en el material, es fundamental el uso de fluidos que lubriquen las áreas de contacto y

disminuyan la fricción, al mismo tiempo que se extiende la vida útil de las partes del molde [18].

En función del material que se emplee, los lubricante a emplear pueden ser de diferentes tipos, tal como se muestra en la Tabla 1 y Tabla 2 [18].

Tabla 1

*Siglas de referencia de los lubricantes más usados según Magnus Chemical Company*

<b>Sustancia</b>	<b>Sigla de referencia</b>
Pasta de grasa y jabón, no pigmentada, hidrosoluble	421
Pasta de grasa, jabón y polvo lubricante, hidrosoluble	448
Aceite de base clorada, viscoso, soluble en aceite	DO-2A
Aceite de base clorada, poco viscoso, transparente	DC-2
Mezcla de aceite DO-2A y otros emulsionantes, soluble en aceite	DO-29
Aceite graso, no soluble en agua pero sí en aceite	DO-5A
Aceite graso sulfurado, denso, soluble en aceite	CB-66
Aceite graso sulfurado, soluble en aceite lubrificante	DO-6A
Pasta jabonosa, soluble en agua	DC-5
Polvo granular jabonoso de film seco soluble en agua	DC-K
Jabón líquido, soluble en agua	DO-17

Fuente: [18]



Tabla 2

*Lubricante a emplear en el embutido de acuerdo al material en uso*

Tipo de embutido	Tipo de lubricante	Lubricante a emplear			
		Aceros al carbono	Aceros inoxidables y aleados	Aluminio	Cobre, latón, bronce
Poco profundo	Hidrosoluble	448	-	-	DO-17 o 421
	Oleosoluble	CC-2 o mezcla (1 p. DO-2A 1 p. aceite mineral)	DO-29 o mezcla (2 p. DO-2A 1 p. aceite mineral)	CC-2 o mezcla (1 p. DO-2A 1 p. aceite mineral)	CC-2 o DO-6A
		Hidrosoluble	448 o DC-K DO-29 o mezcla (2 p. DO-2A 1 p. aceite mineral)	DO-29 o DO-29	DO-29 o mezcla (2 p. DO-2A 1 p. aceite mineral)

Fuente: [18]

El lubricante adecuado a emplear será aquel que genere la menor elongación de la superficie del material y cumpla con las condiciones de trabajo deseadas [18]. En fusión de esto, en la Tabla 3 se muestran varios productos adicionales, y más fáciles de encontrar, a los ya expuestos anteriormente.

Tabla 3

*Otros lubricantes para el embutido en función del material de la chapa metálica*

<b>Acero</b>	<b>Latón, cobre y bronce</b>	<b>Plomo, zinc, estaño, metal blando</b>	<b>Aluminio y sus aleaciones</b>
Aceite soluble	Agua y jabón	Aceites minerales y grafito	Aceite de vaselina
Aceite de ricino con jabón y talco	Sebo	Sebo	Vaselina
Jabón pastoso diluido en agua y de carácter neutro	Aceite emulsionado	Aceite mineral	Aceite con grafito
Aceite de colza	Aceite mineral denso		70 % de sebo, 2 a 5 % de grafino y 25 a 28 % de aceite de colza
Aceite disoluble, cera virgen y sebo	Jabón muy disuelto en agua		

Fuente: [21]

#### **1.4.9 Materiales de la chapa metálica para el embutido**

Con la finalidad de realizar una deformación plástica adecuada, es recomendable emplear materiales dúctiles y con un bajo límite elástico [22]. En este sentido, hojas metálicas de acero con bajo contenido de carbono son ampliamente empleadas al ser un material económico y con buenas propiedades de resistencia y formabilidad. De igual forma, es común el uso de aluminio por su resistencia a la corrosión y titanio en aplicaciones aeronáuticas [13].

En el Anexo A se muestra la resistencia a la cedencia, la resistencia última a la tensión, el alargamiento y la dureza de algunos aceros al carbón.

### **1.5 Matricería**

Esta especialidad de la mecánica se encarga del análisis y desarrollo de los métodos de producción de herramientas para la manufactura de productos en serie, frecuentemente de conformado de lámina metálica y sin desprendimiento de viruta [17].

En este sentido, se hace referencia a los procesos de matricería como aquellas técnicas de transformación de las hojas metálicas, sin desprendimiento de viruta y que se ejecutan empleando matrices como herramientas. Estos procesos aseguran la obtención de piezas con tolerancias geométricas y dimensionales muy pequeñas, además de prácticamente no precisar operaciones posteriores para obtener un buen acabado superficial [17].

### ***1.5.1 Matriz***

Una matriz es un elemento mecánico no autónomo, apto para cortar o transformar una lámina metálica de acuerdo con su diseño y elementos que la conforman. Normalmente una matriz está formada por una parte fija asegurada a la mesa de la prensa y otra móvil. De igual forma, es común el uso de los términos troquel o estampa para hacer referencia a este tipo de elementos [17].

### ***1.5.2 Tipos de matrices***

Dependiendo del tipo de operación de conformado, existen diferentes tipos de matrices, cada una con características propias a fin de satisfacer ciertas necesidades del proceso en cuestión [17].

#### ***1.5.2.1 Matriz simple***

Es un utillaje empleado para realizar la transformación de la chapa metálica en una etapa. La preparación del material en la prensa, el inicio del proceso y la extracción de la pieza se realiza, normalmente, de forma manual. Por lo general este tipo de matrices son sencillas de diseñar y conllevan un costo de fabricación bajo [23].

#### ***1.5.2.2 Matriz compuesta***

Este tipo de matriz está constituida por diversos punzones y piezas que ejecutan movimientos propios a través de resortes u otros elementos. Es más flexible en comparación a la matriz simple, a pesar de seguir siendo una matriz relativamente fácil de diseñar [23].

### *1.5.2.3 Matriz progresiva*

Esta matriz consta de diversas piezas, desarrollada con el objetivo de efectuar dos o más etapas de conformado al mismo tiempo y de forma automática. Su complejidad varía dependiendo de la pieza a obtener, llegando hasta el punto de obtener la pieza final en un solo ciclo [23].

Otra clasificación de las matrices, en referencia al propósito con el que se las fabrica, es la siguiente:

### *1.5.2.4 Matriz de pruebas*

Es una matriz simple y temporal, elaborada con la finalidad de poner a prueba un proceso de fabricación. Se emplea para validar el procedimiento y las herramientas del conformado [17].

### *1.5.2.5 Matriz de prototipos*

Esta matriz es utilizada para obtener un número reducido de piezas que sirven para confirmar el correcto funcionamiento del diseño, mientras la matriz definitiva con la que se realizará el tiraje grande es fabricada [17].

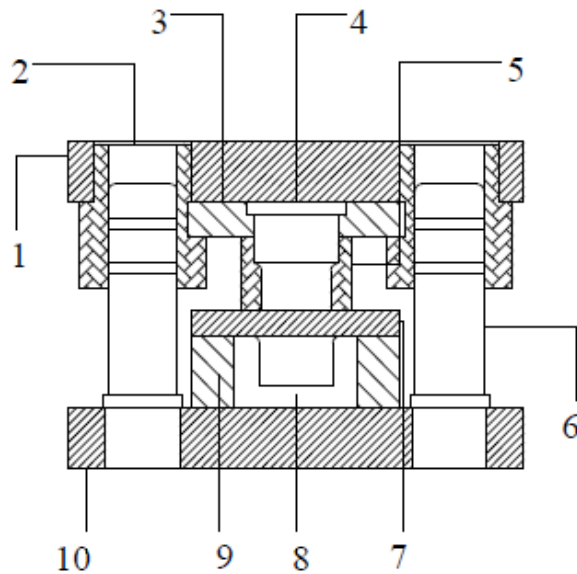
### *1.5.2.6 Matriz de producción*

La matriz de producción es un utillaje destinado para la producción definitiva de una pieza. De acuerdo a sus propiedades constructivas, pueden ser: de guía fija, con pisador, coaxiales, de corte de precisión o de correderas [17].

## ***1.5.3 Elementos de una matriz de embutición***

Según lo expuesto en [24] y citado en [25], un ejemplo común de los elementos que componen una matriz de embutición para piezas pequeñas y medianas se muestra en la Figura 8.

Figura 8

*Elementos de una matriz de embutición*

Fuente: [25]

Donde:

1. Freno de punzón o placa superior
2. Casquillos
3. Porta punzón
4. Punzón
5. Elemento elástico
6. Columnas o guías
7. Prensa chapas
8. Matriz
9. Porta matriz
10. Zócalo o placa inferior

*1.5.3.1 Parte móvil*

Conforme lo citado en [25] según el contenido de [24], los elementos de la parte móvil

de la matriz de embutición son:

Macho: su objetivo es conectar a la matriz con la prensa. Realizar un movimiento lineal descendente conforme la prensa avanza.

Freno de punzón o placa superior: este elemento está vinculado al macho, pues su cometido es parar al punzón.

Placa porta punzón: también denominada sufridera, es el componente que contiene el o los punzones. En esta placa se suelen realizar una o varias perforaciones a fin de asegurar firmemente al punzón, tal como se ejemplifica en la Figura 9, donde:

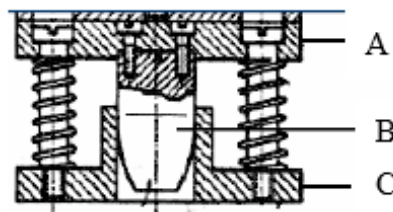
A. Placa porta punzón

B. Punzón

C. Prensa chapas

Figura 9

*Sufridera y prensa chapas*



Fuente: [25]

Punzón: la geometría de este es seleccionada de acuerdo a la forma de la pieza que se requiere embutir. Tal como se ha expuesto anteriormente, tiene bordes redondeados y sus dimensiones influyen en gran medida en proceso de deformación. Además del uso de tornillos y chavetas, los punzones suelen ser asegurados a la placa porta punzón empleando espárragos, tornillos mariposa o tuercas incrustadas en la placa.

Prensa chapas: mostrado en la Figura 9, previene la formación de arrugas en la lámina metálica embutida.

### 1.5.3.2 Parte fija

Las partes que conforman la parte fija de la matriz de embutición, según [24] y citado en [25], son:

Columnas y casquillos laterales: las columnas son componentes de forma cilíndrica, fijadas en la placa inferior de las matrices, con la finalidad de servir como guía para el recorrido de la parte móvil y, asegurar la coincidencia y ensamble correcto entre el punzón y la cavidad.

Por otro lado, los casquillos son incorporados en la placa superior. Normalmente en estos se realizan ranuras para permitir la fluidez del lubricante. Así mismo, estos suelen incluir rodamientos para disminuir las pérdidas de presión debido a la fricción.

Habitualmente, las matrices requieren de dos columnas de guía o centrado, dispuestas de tal forma que no entorpezcan el trabajo de los trabajadores.

Placa matriz: es la parte de la matriz que orienta y moldea la chapa metálica con la forma deseada. Puede estar contenida en una placa porta matriz o ser fijada directamente a la base inferior.

Topes: estos aditamentos buscan asegurar apropiadamente la lámina metálica sobre la matriz de embutición. Regularmente suelen ser de tres tipos: rígidos, de balancín y de corte auxiliar.

Extractores: son componentes auxiliares que previenen que la pieza embutida quede atrapada o atascada en la matriz. En otras palabras, permiten retirar la pieza formada de la matriz. Estos pueden ser impulsados por medio de resortes o gomas.

Zócalo: el zócalo o placa inferior sirve como base para la matriz y porta matriz cuando el punzón ejerce la fuerza de presión.

## 1.6 Ingeniería inversa

La ingeniería inversa (RE) es una metodología para el diseño o la reproducción de un proceso, sistema o elemento, en base a productos ya existentes y en ocasiones desactualizados,

con la finalidad de obtener información referente a las características, funcionalidad, fabricación, desempeño y demás detalles técnicos a fin de recrearlos y, en la medida de lo posible, mejorarlos [26].

Como se enuncia en [26], esta metodología es idónea para recopilar información en base a una referencia física sin la necesidad de contar con material técnico físico o digital. En el campo mecánico, resulta muy práctico para el duplicado de componentes o la adquisición de información que ha desaparecido por fisuras o deterioro de los elementos a producir. Esta réplica de componentes es solo una de las aplicaciones de la ingeniería inversa, como se puede apreciar en la Figura 10 mostrada a continuación.

Figura 10

*Aplicaciones de la ingeniería inversa en la industria*





### ***1.6.1 Técnicas de diseño aplicando RE***

Hoy en día es posible encontrar una gran variedad de técnicas de innovación para el diseño mediante ingeniería inversa, resaltándose la digitalización y el prototipado rápido en el diseño [26].

#### ***1.6.1.1 Tecnologías de escaneado 3D en la RE***

Mediante esta técnica se traslada la información perteneciente a las superficies de un cuerpo físico hacia un formato digital, basado en una nube de puntos adquirida del proceso de escaneado. Algunos sistemas emplean cámaras ópticas para el escaneado, sin embargo, la mejor alternativa es utilizar sistemas de escáner por dispositivo láser, debido a la precisión que ofrecen al adquirir la información perteneciente a la profundidad y textura de la pieza en análisis. [26].

Conforme a lo que se indica en [5], el proceso de escaneado 3D involucra tres etapas principales: escaneado, procesamiento de la nube de puntos y modelado CAD en función de los datos originales.

En la primera fase, se inicia preparando la pieza, ya sea pintándola de un color opaco para que no existan inconvenientes con el escáner o colocando puntos guía. A continuación, se emplea el dispositivo de escaneo seleccionado, sea de contacto o sin contacto. Finalmente, se obtiene la nube de puntos, la cual no es más que un archivo con coordenadas (x, y, z) de cada punto perteneciente a las superficies del cuerpo al cual se está aplicando RE [5].

La fase de procesamiento de la nube de puntos involucra el tratamiento de los datos con la finalidad de reducir la densidad, el ruido y filtrar los puntos que no son necesarios o pueden ser obviados, corregir desalineaciones y reconocer áreas donde hacen falta datos o estos se han perdido. De igual forma, en el caso donde un elemento requiere de varios procesos de escaneado, en esta etapa es posible combinar todas las nubes de puntos obtenidas [5].

La etapa del modelado CAD es la más compleja del proceso de RE. Esto es debido a la necesidad de crear superficies que se ajusten a la mayor cantidad de datos posible de la nube de puntos para posteriormente proceder a la creación de las geometrías necesarias. Este proceso también se dificulta debido a la gran cantidad de información que el software CAD necesita procesar [5].

#### *1.6.1.2 Prototipado en el diseño con RE*

Esta técnica basada en CAM, permite planificar y verificar el proceso de fabricación de un elemento conforme a la información obtenida por el escaneado y modelado de una pieza. De la misma manera, posibilita la comparación de un elemento ya fabricado o la configuración de una máquina mediante la medición digital que involucra la RE [26], permitiendo identificar las variaciones que se pueden haber producido durante el proceso de manufactura [27]. Estas variaciones han de ser valoradas, identificadas y controladas a fin de remediar las deficiencias que pueden presentarse en el proceso de fabricación [27].

### **1.7 Prototipado rápido**

Esta tecnología surge ante la intención de evitar destinar una gran cantidad de dinero y tiempo a la producción de un prototipo que permita evaluar el diseño y solucionar los posibles problemas que se presentarían en su producción y comercialización en masa [13].

Dependiendo del método empleado para la creación del prototipo, los procesos de prototipado rápido (RP) pueden clasificarse en dos grupos principales: sustractivos y aditivos. El proceso de RP sustractivo implica la remoción de material paulatina hasta obtener la pieza deseada, normalmente realizado mediante maquinado asistido por computador. Por el contrario, el proceso de RP aditivo involucra la adición de material capa a capa hasta construir la forma de pieza de interés [28].

### ***1.7.1 Modelado por deposición de material fundido***

El modelado por deposición fundida (FDM) es un método, donde un filamento termoplástico o de cera, se extruye desde un cabezal con un orificio de matriz caliente hasta formar una capa de la pieza. La cabeza extrusora se mueve sobre los ejes  $x$ - $y$  durante la creación de cada capa y en el eje  $z$  para iniciar el formado de una nueva [13][28].

La materia prima suele ser un filamento de sólido, generalmente de 1,25 mm de diámetro, que se calienta a una temperatura de 0,5 °C por encima de su punto de fusión previo a ser depositado. En este sentido, un criterio fundamental para la selección del material es que este ha de ser fácil de fundir y solidificar. Comúnmente los materiales empleados son cera fundida por inversión, ABS, poliamida, polietileno y polipropileno [28].

### ***1.7.2 Impresión tridimensional basada en polvos***

Esta técnica emplea como material base el polvo, de forma que la pieza se conforma capa a capa, empleando una impresora de deposición de tinta para arrojar una capa de material adhesivo sobre cada capa de polvo. El aglutinante tiene la finalidad de mantener unidas las capas de polvo a fin de formar la pieza final y dejar que el material excedente sirva como base de soporte para el resto de la geometría. Tras finalizar el proceso de impresión, se suele dar un tratamiento térmico a la pieza con el objetivo de fortalecerla y remover el material suelto [28].

Por lo general, los polvos empleados en esta técnica son cerámicos, de metal o cermet. Así mismo, los aglutinantes son sílices poliméricos, coloidales o de carburo de silicio. Los espesores de capa usuales van desde 0,10 a 0,18 mm. La cabeza de impresión suele tener una velocidad de 1,5 m/s [28].

### ***1.7.3 Fresado de escritorio***

Esta alternativa implica primordialmente el uso de una fresadora de control numérico por computadora (CNC). Se emplea un software de control numérico para la elaboración del programa a partir del modelo CAD. Frecuentemente, los materiales empleados para este

proceso son cera o nylon debido a su maquinabilidad. También es común el uso de madera, plástico o metales, tales como el aluminio o latón [28].

Generalmente, las maquinas CNC empleadas para el prototipado rápido son de pequeñas dimensiones, por lo que los bloques del material en bruto que soportan son de hasta 180 x 150 x 150 mm en las coordenadas  $x$ - $y$ - $z$  respectivamente. De aquí que reciban el nombre de fresadoras de escritorio o maquinado de escritorio [28].

## CAPÍTULO II

### 2 METODOLOGÍA

En este capítulo se exponen las etapas para el desarrollo del presente proyecto como son ingeniería inversa, diseño, cálculos y selección de materiales para la construcción del molde, a fin de que quede como referencia para investigaciones posteriores relacionadas con este tema.

#### 2.1 Primera autoparte

Para la fabricación de la primera autoparte mediante un molde de embutido obtenido a través de herramientas de ingeniería inversa y procesos de prototipado rápido, se desarrolla el proceso descrito a continuación.

##### 2.1.1 Selección de la pieza a embutir

Para la selección de la pieza, se aplica el método ordinal corregido de criterios ponderados expuesto por Riba C. en [29].

Los criterios bajo los cuales se selecciona la pieza a obtener, con la finalidad de que esta sea apta para fabricar mediante el proceso de embutición, son los siguientes:

- a) Tamaño, ya que el molde de la pieza debe poder fabricarse mediante un proceso de prototipado rápido disponible, los cuales cuentan con dimensiones de trabajo específicas.
- b) Superficie, a fin de que la pieza seleccionada posea pocas superficies curvas y sea capaz de desdoblarse para obtener la forma de la chapa metálica original.
- c) Profundidad, debido a que el alcance propuesto en este trabajo se centra en el conformado por embutición poco profundo.
- d) Disponibilidad, referente a la capacidad de obtener, de una manera sencilla, la pieza original para realizar el proceso de ingeniería inversa y compararla con las piezas que se obtendrían.

- e) Apto para mejora, en el sentido en que la pieza seleccionada pueda admitir modificaciones con la finalidad de mejorar su funcionamiento o apariencia.

Una vez se han decidido los criterios de selección de la pieza, se procede a realizar la evaluación del peso específico de cada criterio, presentada en la Tabla 4.

Tabla 4

*Evaluación del peso específico de cada criterio*

<b>Criterio</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Superficie</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Apto para mejora</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Pondera.</b>
Tamaño		1	1	0	0.5	3.5	0.23
Superficie	0		0.5	0	0.5	2	0.13
Profundidad	0	0.5		0	0.5	2	0.13
Disponibilidad	1	1	1		1	5	0.33
Apto para mejora	0.5	0.5	0.5	0		2.5	0.17
					Suma	15	1

A continuación, se procede a la valoración del peso específico de cada criterio por individual, para lo cual se proponen las siguientes alternativas de piezas a elegir:

- a) Tapa para brazo de limpiaparabrisas
- b) Cubierta de espejo de retrovisor
- c) Retenedor de batería

En las tablas desde la 5 hasta la 9 se presenta la evaluación de cada una de las piezas a seleccionar con respecto a cada criterio. Finalmente, la evaluación total se presenta en la Tabla 10.

Tabla 5

*Evaluación del peso específico del criterio tamaño*

<b>Alternativa</b>	<b>Tapa para brazo de limpiaparabrisas</b>	<b>Cubierta de espejo de retrovisor</b>	<b>Retenedor de batería</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Pondera.</b>
Tapa para brazo de limpiaparabrisas		1	0,5	2,5	0,42
Cubierta de espejo de retrovisor	0		0	1	0,16
Retenedor de batería	0,5	1		2,5	0,42
			Suma	6	1

Tabla 6

*Evaluación del peso específico del criterio superficie*

<b>Alternativa</b>	<b>Tapa para brazo de limpiaparabrisas</b>	<b>Cubierta de espejo de retrovisor</b>	<b>Retenedor de batería</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Pondera.</b>
Tapa para brazo de limpiaparabrisas		1	1	3	0,5
Cubierta de espejo de retrovisor	0		0	1	0,17
Retenedor de batería	0	1		2	0,33
			Suma	6	1

Tabla 7

*Evaluación del peso específico del criterio profundidad*

<b>Alternativa</b>	<b>Tapa para brazo de limpiaparabrisas</b>	<b>Cubierta de espejo de retrovisor</b>	<b>Retenedor de batería</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Pondera.</b>
Tapa para brazo de limpiaparabrisas		1	0	2	0,33
Cubierta de espejo de retrovisor	0		0	1	0,17
Retenedor de batería	1	1		3	0,5
			Suma	6	1

Tabla 8

*Evaluación del peso específico del criterio disponibilidad*

<b>Alternativa</b>	<b>Tapa para brazo de limpiaparabrisas</b>	<b>Cubierta de espejo de retrovisor</b>	<b>Retenedor de batería</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Pondera.</b>
Tapa para brazo de limpiaparabrisas		1	1	3	0,5
Cubierta de espejo de retrovisor	0		0	1	0,17
Retenedor de batería	0	1		2	0,33
			Suma	6	1



Tabla 9

*Evaluación del peso específico del criterio apto para mejora*

<b>Alternativa</b>	<b>Tapa para brazo de limpiaparabrisas</b>	<b>Cubierta de espejo de retrovisor</b>	<b>Retenedor de batería</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Pondera.</b>
Tapa para brazo de limpiaparabrisas		1	1	3	0,5
Cubierta de espejo de retrovisor	0		0,5	1,5	0,25
Retenedor de batería	0	0,5		1,5	0,25
			Suma	6	1

Tabla 10

*Evaluación final*

<b>Conclusión</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Superficie</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Apto para mejora</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Prioridad</b>
Tapa para brazo de limpiaparabrisas	0,23x0,42	0,13x0,5	0,13x0,33	0,33x0,5	0,085	0,455	1
Cubierta de espejo de retrovisor	0,23x0,16	0,13x0,17	0,13x0,17	0,33x0,17	0,043	0,180	3
Retenedor de batería	0,23x0,42	0,13x0,33	0,13x0,5	0,33x0,33	0,043	0,356	2

De la Tabla 10 se obtiene la conclusión que la mejor alternativa de la pieza a seleccionar para el desarrollo del presente trabajo es la tapa para el brazo del limpiaparabrisas, dado que es la mejor situada con un valor de 0,455. Esta cifra es indicador de que es la opción que más se apega a los criterios de selección establecidos.

### 2.1.2 Ingeniería inversa de la pieza

En esta fase se inicia con el proceso de digitalización de la pieza mediante ingeniería inversa, para lo cual se emplea como instrumento un calibrador pie de rey para el levantamiento de medidas y el software de SolidWorks®. para el diseño CAD de la pieza. Esto debido a que la geometría de la pieza en estudio no es muy compleja.

En este sentido y conforme a lo expuesto en [30] y [31], la metodología aplicada para la ejecución de la ingeniería inversa de la pieza es la presentada en el Figura 11.

Figura 11

#### *Metodología de la ingeniería inversa*

Fase 1	Conocimiento previo de la pieza de referencia A.
Fase 2	Elaboración de una estrategia de investigación.
Fase 3	Implementación de la estrategia a la pieza A.
Fase 4	Recoger y resumir la información producida por el plan, generar la pieza B y demostrar que $B \sim A$ .
Fase 5	Definir la pieza B.
Fase 6	Emplear B para los fines pertinentes.

Bajo esta metodología, en las fases 1 y 2 se estudia el producto inicial que se va a reproducir y se establece la forma en que se la analizará, determinando las herramientas, instrumentos y programas necesarios para la ejecución de la estrategia. En la fase 3 se aplica todo el proceso planificado, de forma que en la fase 4 se genere el modelo replicando al objeto de referencia. La fase 5 hace referencia a la caracterización de la réplica con el fin de comprobar la validez de la pieza. Finalmente, en la fase 6 se emplea el modelo generado para darle el uso

deseado, sea este la replicación del modelo original o la modificación a fin de brindar una mejora [31].

El modelo CAD obtenido de la pieza, tras aplicar esta metodología de la ingeniería inversa, se expone en la Figura 12 y Figura 13 a continuación.

Figura 12

*Vista isométrica de la pieza*

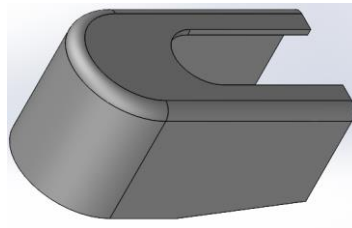
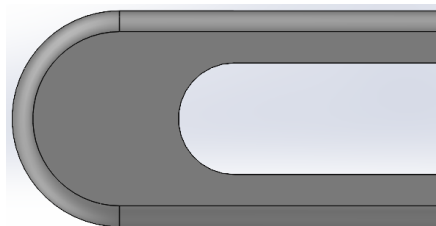


Figura 13

*Vista superior de la pieza*



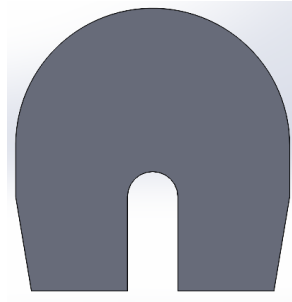
### **2.1.3 Desarrollo de la chapa metálica de la pieza**

Una vez seleccionada y digitalizada la pieza a obtener, la siguiente etapa involucra el desdoblamiento del componente con la finalidad de obtener la geometría de la chapa metálica original, para lo cual se emplea la extensión de Logopress® para SolidWorks®.

El resultado de la chapa metálica desarrollada se presenta en la Figura 14.

Figura 14

*Vista frontal de la chapa desarrollada*



#### ***2.1.4 Selección del material a embutir***

Para la selección del material con el que se va a desarrollar el embutido se considera materiales de comercialización nacional, costos y propiedades mecánicas, siendo las más destacadas las planchas de acero laminadas en frío, entre otros, que son específicos para trabajos de embutición debido al bajo porcentaje de carbono que poseen, tal como se expone en el Anexo B.

#### ***2.1.5 Cálculo de los parámetros de embutición***

Una vez definida la forma de la chapa metálica original, se procede a calcular los parámetros de embutición en base a la literatura y las ecuaciones planteadas anteriormente.

##### ***2.1.5.1 Diámetro equivalente***

Para el cálculo del diámetro equivalente se utiliza el método expuesto en la sección 1.4.3. Para ello, se emplea el valor de la superficie total de la pieza desdoblada provisto por el software, el cual es de 6300,92 mm<sup>2</sup>. Este valor es reemplazado en la ecuación (13).

De esta forma, al igualar las superficies y despejar se obtiene que el diámetro equivalente de la pieza es el mostrado en la ecuación (16):

$$D_i = 89,57 \text{ mm} \quad (16)$$

Ahora, para el diámetro equivalente del punzón, se tiene una superficie de 4720,85 mm<sup>2</sup>. Al aplicar el mismo procedimiento anterior, se obtiene el resultado expuesto en la ecuación (17):

$$D_p = 77,53 \text{ mm} \quad (17)$$

#### 2.1.5.2 Fuerza de embutición

De la página de Matweb [32], para la chapa metálica hecha de Acero AISI 1010, estirado en frío, se obtiene un valor del esfuerzo último a la tensión de 365 MPa. Reemplazando este valor, los diámetros equivalentes encontrados previamente y los diferentes espesores del material seleccionado en la ecuación (1), se obtienen los resultados de fuerza de embutición máxima expuestos en la Tabla 11.

Tabla 11

*Fuerza máxima de embutición para diferentes espesores de chapa metálica*

<b>D<sub>i</sub> (mm)</b>	<b>D<sub>p</sub> (mm)</b>	<b>UTS (MPa)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>F<sub>máx</sub> (mm<sup>2</sup> MPa)</b>	<b>F<sub>máx</sub> (N)</b>
89.57	77.53	365	0,5	20238,35	20238,35
			0,7	28333,69	28333,69
			0,75	30357,53	30357,53
			0,9	36429,03	36429,03
			1,1	44524,37	44524,37

Del mismo modo, con los diámetros equivalentes ya calculados, se procede a determinar el resto de los parámetros de diseño del molde reemplazando los datos en las ecuaciones (7) y (9), obteniendo:

#### 2.1.5.3 Redondeo de la matriz

$$r_m = 0,8\sqrt{(89,57 - 77,53)0,5}$$

$$r_m = 1,96 \text{ mm}$$

#### 2.1.5.4 Redondeo del punzón

$$r_p = 1,96 \times 3$$

$$r_p = 5,89 \text{ mm}$$

#### 2.1.5.5 Holgura $c$

$$c = 0,5 + (1,15 \times 0,5)$$

$$c = 1,075 \text{ mm}$$

#### 2.1.5.6 Espesor final

$$\text{espesor} = 0,5 + 1,075$$

$$\text{espesor} = 1,575 \text{ mm}$$

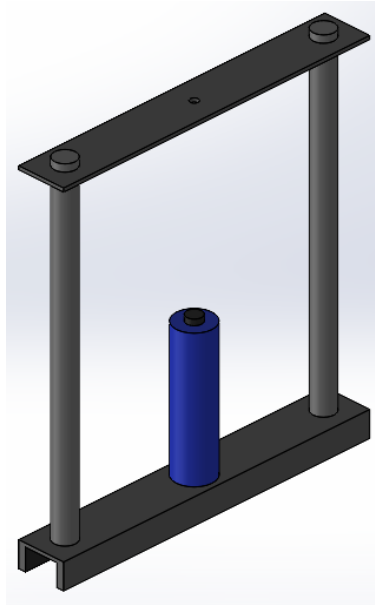
### 2.1.6 Diseño y fabricación del sistema de embutición

Tal como se expone en [33] y [34], la metodología de diseño para la fabricación y ensamble (DFMA) es una serie de técnicas y metodologías para el diseño o rediseño de un producto, a fin de simplificar y optimizar los procesos de fabricación, ensamble y costes del sistema, respetando los requerimientos y ajustándose a un sistema de fabricación que asegure su manufactura y el aprovechamiento de los recursos disponibles.

En este sentido, se parte del precedente de la disponibilidad del equipo de prensado, por lo cual se aplica la metodología DFMA, diseñando las piezas necesarias para la creación de un sistema de embutición que se adapte y permita emplear el equipo de prensado ya disponible.

En consecuencia, se inicia con la digitalización del sistema de prensado existente, tal como se muestra en la Figura 15. A partir de este CAD y, tomando en consideración las restricciones de tamaño, material, equipo y herramientas disponibles, se desarrolla el diseño del resto de los elementos.

Figura 15

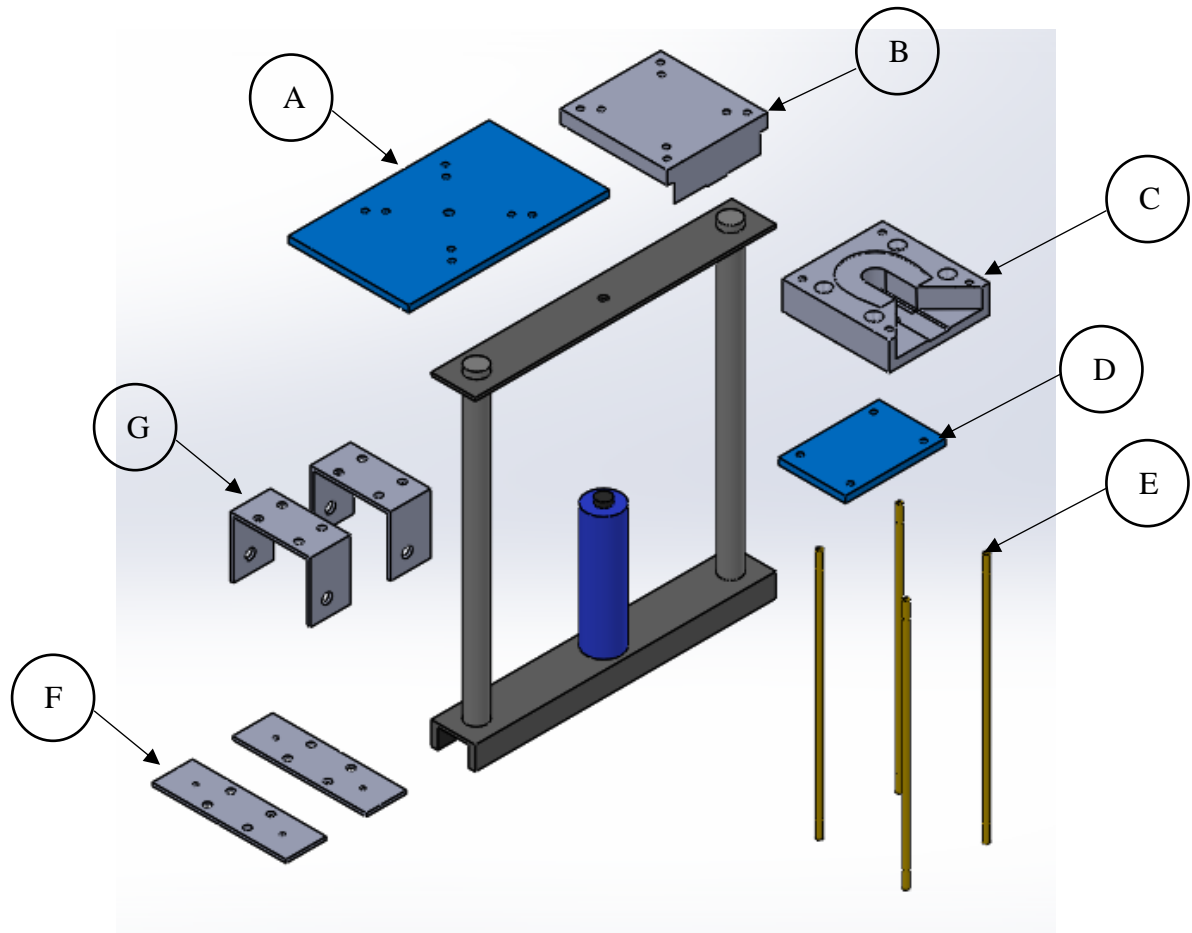
*Prensa digitalizada*

A continuación, en la Figura 16 se muestra una vista explosionada del ensamble del sistema de embutición, donde se aprecian los siguientes elementos:

- A. Placa porta núcleo
- B. Núcleo
- C. Cavidad
- D. Placa porta cavidad
- E. Columnas guía
- F. Platinas de aseguramiento de las columnas guía
- G. Elemento de sujeción en forma de C

Figura 16

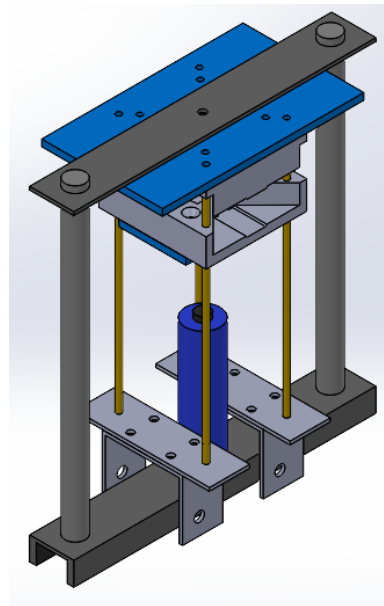
*Vista explosionada del sistema de embutición*



En la Figura 17 se observa el sistema de embutición ensamblado, apreciándose los elementos en forma de C y las platinas que se asientan sobre estos, que sirven como base y ajuste para las columnas guía. Las columnas guía están elaboradas a partir de ejes cilíndricos con perforaciones roscadas en ambos lados. Así mismo, se muestran las placas que desempeñan las funciones del porta núcleo y porta cavidad, a las cuales precisamente estos elementos del molde se aseguran mediante pernos.



Figura 17

*Sistema de embutición ensamblado*

Todo el sistema se ha diseñado con la finalidad de que pueda ser desmontable, de fácil ensamblaje y con elementos simples, intercambiables y disponibles en el mercado nacional a fin de que estos se puedan reemplazar de ser necesario y de acuerdo con las necesidades.

**2.1.7 Diseño de la matriz**

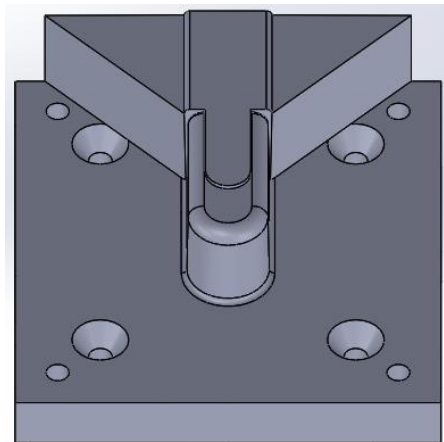
Para el diseño de la matriz se empleó el software SolidWorks®, y concretamente su barra de herramientas de moldes, la cual cuenta con las opciones necesarias que van desde el análisis inicial hasta el desarrollo del núcleo y cavidad de la matriz.

Adicionalmente, en el CAD del molde se tomó en consideración la necesidad de asegurar este a las placas porta núcleo y cavidad mediante pernos avellanados y tuercas, motivo por el cual, tanto el núcleo como la cavidad cuentan con perforaciones avellanadas. Así mismo, estas cuentan con perforaciones para el ajuste de las columnas guía.

Adicionalmente, para el diseño del núcleo se incluyó un redondeo en la parte inferior del punzón a fin de evitar la formación de esquinas, en las cuales se podrían producir fallas debido a los esfuerzos del molde, tal como se aprecia en la Figura 18.

Figura 18

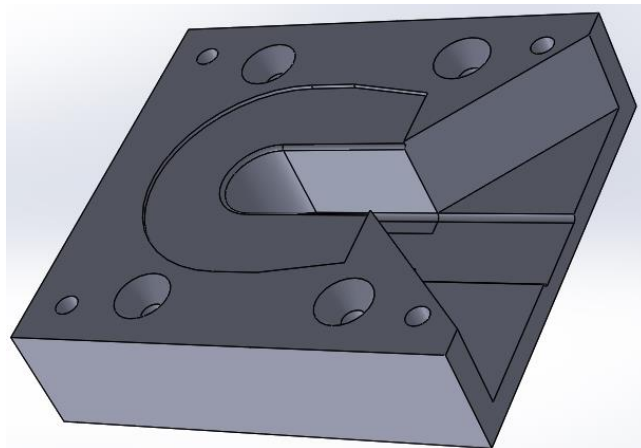
*Núcleo de la matriz de la primera autoparte*



Otro factor importante en el diseño es la inclusión de un espacio con la forma y el espesor de la chapa desarrollada para el posicionamiento de esta en la parte de la cavidad de la matriz, tal como se muestra en la Figura 19.

Figura 19

*Cavidad de la matriz de la primera autoparte*



Los planos pertenecientes a este molde se encuentran en el Anexo D.

### ***2.1.8 Fabricación e implementación de la matriz***

Una vez definido todo el sistema de embutición, los parámetros de embutición a emplear y el diseño del molde conforme a estos, se procede a la fabricación de la matriz, para lo cual la Universidad Técnica del Norte dispone del laboratorio de prototipado rápido e ingeniería inversa, que consta de una impresora 3D modelo Ender-3 Pro con unas dimensiones de impresión de 22 x 22 x 25 cm (demás parámetros técnicos son mostrados en el Anexo C) [35]. Como material para la construcción del molde se emplea un filamento de ácido poliláctico, comúnmente llamado por sus siglas PLA, debido a las ventajas que presenta, tales como su facilidad de impresión, estabilidad, resistencia a la humedad y su elevado módulo de elasticidad [36]. Además, este material es relativamente económico y fácil de adquirir en el mercado nacional, volviéndolo la materia prima idónea para el desarrollo del presente proyecto.

Debido a que la matriz impresa resulta en una composición de capas, la conformación de esta resulta en una estructura anisotrópica, por lo cual las características mecánicas del molde no serán las mismas en todas las direcciones. En este sentido, con la finalidad de modificar las propiedades mecánicas y el acabado superficial, se ajustan los parámetros de impresión, tales como el espesor de capa, retracción, cantidad de capas sólidas, soportes, porcentaje y ángulos de relleno, velocidad de impresión, entre otros [37].

En este contexto y basado en lo expuesto en [38] y [39], se seleccionan como parámetros de impresión los expuestos en la Tabla 12.

Tabla 12

*Parámetros de impresión del molde*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Diámetro de boquilla	0.4 mm
Multiplicador de extrusión	0.98
Distancia de retracción	2.4 mm
Velocidad de retracción	4200 mm/min
Altura de capa	0.24 mm
Capas de sólidas de techo	10
Capas de sólidas de suelo	10
Capas de sólidas del perímetro	10
Temperatura de extrusión	205
Temperatura de la cama	60
Porcentaje de relleno	70 %
Tipo de relleno	Cuadrícula

El resultado obtenido al fabricar el molde mediante impresión 3D se muestra en la Figura 20 y Figura 21.

Figura 20

*Núcleo prototipado de la primera autoparte*

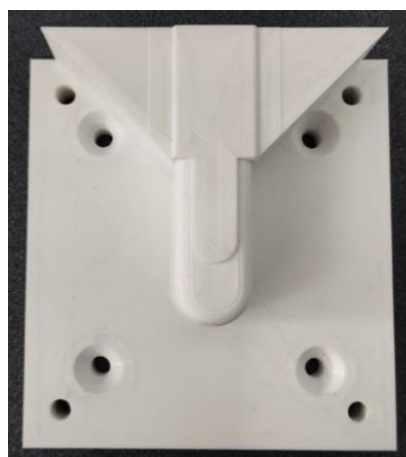


Figura 21

*Cavidad prototipada de la primera autoparte*



Una vez culminado el proceso de fabricación, se procede a realizar el ensamblaje de todo el sistema y ejecutar la operación de embutido.

## **2.2 Segunda autoparte**

El proceso aplicado para la selección de la pieza, ingeniería inversa, desarrollo de la chapa metálica y selección de material a embutir para la segunda autoparte es el mismo ya mostrado en las secciones anteriores para la primera autoparte.

En este sentido, el modelo CAD obtenido de la pieza se expone en la Figura 22 a continuación.

Figura 22

*Vista isométrica del modelo CAD de la segunda autoparte*



### 2.2.1 Cálculo de los parámetros de embutición

De la misma manera en que se hizo para la primera autoparte, el cálculo de los parámetros de embutición es el expuesto a continuación.

#### 2.2.1.1 Diámetro equivalente

El procedimiento para calcular los diámetros equivalentes de la chapa desarrollada y del punzón es el mismo ya expuesto anteriormente en la sección 2.1.5. El valor provisto por el software de la superficie total de la pieza desdoblada es de 4353,81 mm<sup>2</sup>. Este valor es reemplazado en la ecuación (13), obteniendo como resultado el valor mostrado en la ecuación (18).

$$D_i = 74,45 \text{ mm} \quad (18)$$

Para el cálculo del diámetro equivalente del punzón se tiene una superficie de 3684,69 mm<sup>2</sup>. El resultado de esta operación se muestra en la ecuación (19).

$$D_p = 68,49 \text{ mm} \quad (19)$$

El resto de parámetro de embutición se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13

*Parámetros de embutición para la segunda autoparte*

$D_i$ (mm)	$D_p$ (mm)	UTS (MPa)	t (mm)	F <sub>máx</sub> (mm <sup>2</sup> MPa)	F <sub>máx</sub> (N)	r <sub>m</sub> (mm)	r <sub>p</sub> (mm)	Holgura c (mm)	Espesor final (mm)
74,45	68,49	365	0,5	15197,54	15197,54	1,38	4,14	1,075	1,575

### 2.2.2 Diseño de la matriz

Al igual que el procedimiento desarrollado en la sección 2.1.7, el diseño de la cavidad de la matriz de la segunda autoparte se muestra en la Figura 23, mientras que el núcleo se presenta en la Figura 24.

Figura 23

*Vista isométrica de la cavidad del molde de la segunda autoparte*

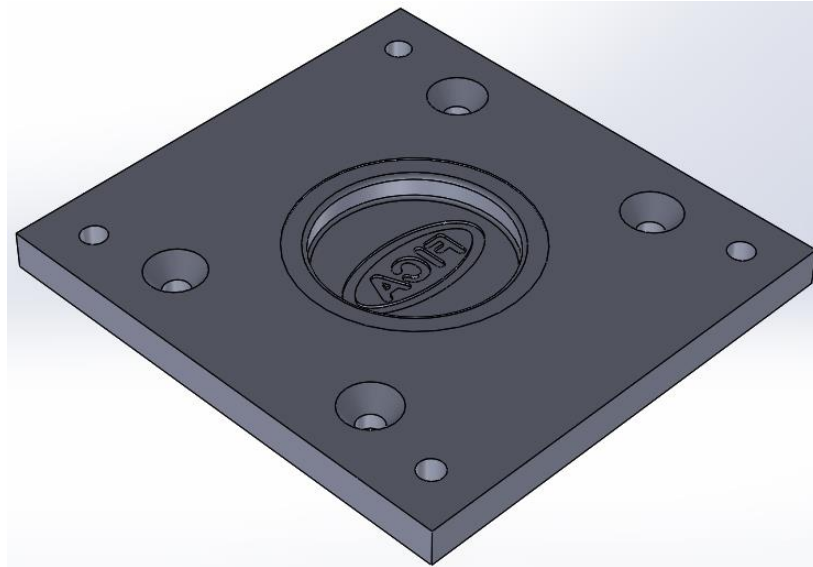
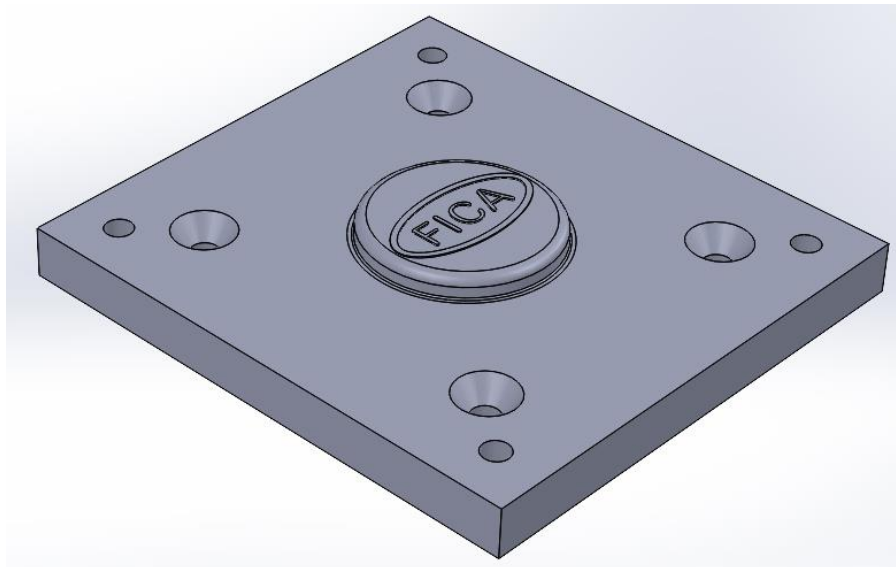


Figura 24

*Vista isométrica del núcleo del molde de la segunda autoparte*



Los planos pertenecientes a este molde se encuentran en el Anexo E.

### ***2.2.3 Fabricación e implementación de la matriz***

El resultado obtenido al fabricar el molde mediante impresión 3D se muestra en la Figura 25 y Figura 26.

Figura 25

*Núcleo prototipado de la segunda autoparte*



Figura 26

*Cavidad prototipada de la segunda autoparte*



Al igual que para la primera autoparte, tras culminar el proceso de fabricación, se procede a realizar el ensamblaje de todo el sistema con el nuevo molde y ejecutar la operación de embutido.



## CAPÍTULO III

### 3 RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos, tanto de los ensayos del molde de la primera como de la segunda autoparte, y de las piezas obtenidas del conformado por embutido con estos.

#### **3.1 Pruebas de embutición de la primera autoparte**

La metodología, resultados, conclusiones y demás información correspondiente a los ensayos realizados de la primera autoparte se exponen a continuación.

##### ***3.1.1 Ensayo de embutición #1***

###### *3.1.1.1 Objetivo*

Comprobar la funcionalidad del sistema de embutido diseñado y el desempeño del molde prototipado por medio de la ejecución del proceso de embutición para validar el diseño de estos.

###### *3.1.1.2 Responsables*

Anderson Tobar

Xavier Lima

Víctor Erazo

###### *3.1.1.3 Materiales.*

Sistema de embutición

Chapa metálica de 0,7 mm

###### *3.1.1.4 Metodología (procedimiento).*

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de embutición y del molde diseñado, se sigue el siguiente procedimiento:

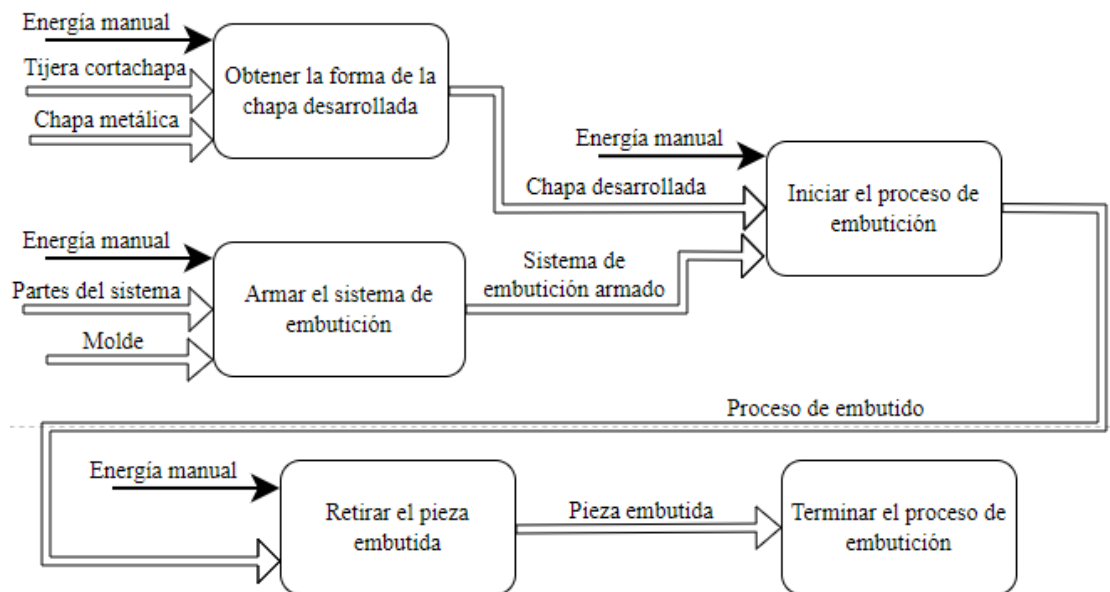
1. Obtener la forma de la chapa desarrollada.
2. Armar el sistema de embutición.

3. Iniciar el proceso de embutición.
4. Retirar la pieza embutida.
5. Terminar el proceso de embutición.

### 3.1.1.5 Esquema del ensayo.

Figura 27

Diagrama de actividades del ensayo de embutición #1



### 3.1.1.6 Resultados.

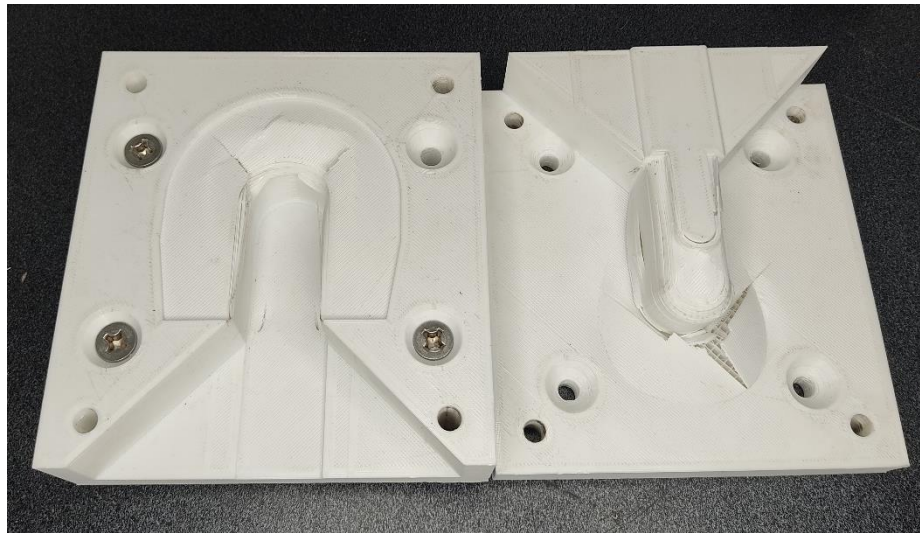
Tras este primer ensayo, se evidencia el correcto desempeño del sistema de embutición diseñado, observándose que el mecanismo de las columnas guía permite la correcta alineación y deslizamiento del molde. Así mismo, las placas porta núcleo y porta cavidad aseguran firme y adecuadamente al molde.

En lo referente al funcionamiento del molde, se observa que este presenta roturas tanto en el núcleo como en la cavidad, tal como se muestra en la Figura 28. Estas fallas se adjudican al espesor de la chapa, dado que el molde fue diseñado para el embutido de una lámina de 0,5 mm y la empleada en este ensayo es de 0,7 mm. Otro factor que tiene influencia en la aparición

de estas fracturas son los parámetros de impresión del molde, tales como el porcentaje de relleno y la cantidad de capas sólidas en los perímetros.

Figura 28

*Núcleo y cavidad de la matriz fracturada*



A pesar de lo anteriormente expuesto, se aprecia que la pieza se encontraba en el proceso de adquirir la forma deseada, sobre todo en las paredes rectas de la pieza, como se observa en la Figura 29.

Figura 29

*Vista superior de la pieza embutida con chapa de 0,7 mm*



### *3.1.1.7 Conclusiones.*

El diseño del sistema de embutido es el apropiado, dado que permite la correcta alineación, recorrido y soporte de las partes del molde.

Los parámetros de impresión del molde son un factor primordial para el desempeño y durabilidad de este durante el proceso de embutición. Un bajo porcentaje de relleno y pocas capas sólidas en los perímetros provocan que el molde no tenga la robustez necesaria para el proceso de conformado en desarrollo.

Un conformado por embutición con una lámina metálica de mayor espesor al considerado en el diseño, provoca que el molde enfrente un mayor esfuerzo, llegando a provocar, en este caso en específico, que el molde falle.

### *3.1.1.8 Recomendaciones*

Emplear una chapa metálica de menor espesor a fin de validar el diseño del molde.

Cambiar los parámetros de impresión del molde, concretamente el porcentaje de relleno y la cantidad de capas sólidas en los perímetros con el objetivo de aumentar la solidez del molde.

## **3.1.2 Ensayo de embutición #2**

### *3.1.2.1 Objetivo.*

Comprobar la funcionalidad del molde prototipado por medio del proceso de conformado por embutición para validar el diseño de este.

### *3.1.2.2 Responsables.*

Anderson Tobar

Xavier Lima

Víctor Erazo

### *3.1.2.3 Materiales.*

Sistema de embutición

Chapa metálica de 0,1, 0,2, y 0,4 mm

### 3.1.2.4 Metodología (procedimiento).

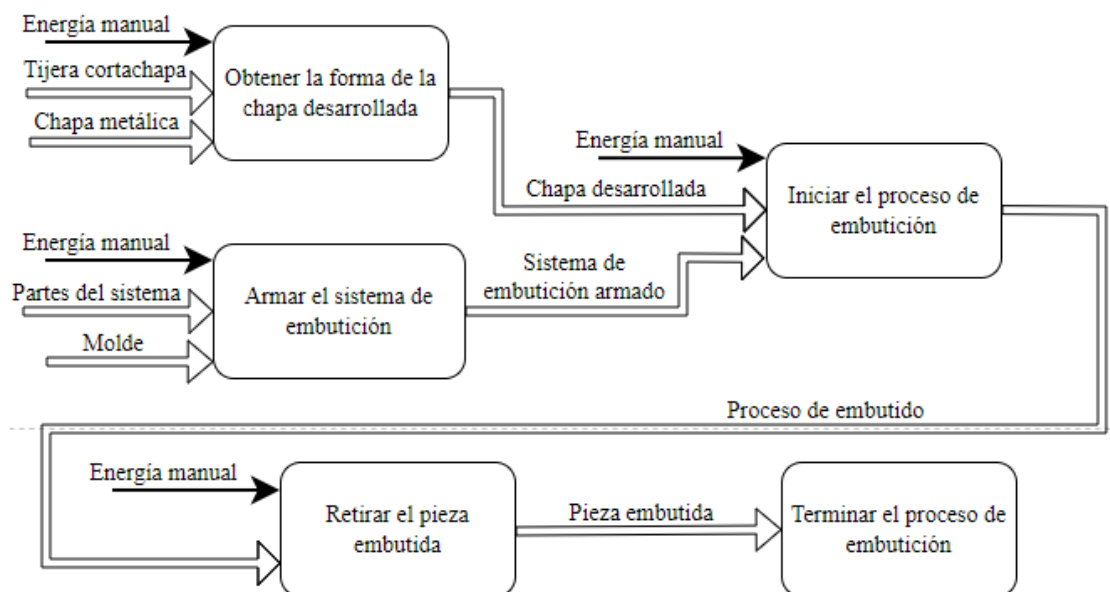
Para comprobar el correcto funcionamiento del molde diseñado, se sigue el siguiente procedimiento:

1. Obtener la forma de la chapa desarrollada.
2. Armar el sistema de embutición.
3. Iniciar el proceso de embutición.
4. Retirar la pieza embutida.
5. Terminar el proceso de embutición.

### 3.1.2.5 Esquema del ensayo.

Figura 30

Diagrama de actividades del ensayo de embutición #2



### 3.1.2.6 Resultados.

Respecto al desempeño del molde, ahora prototipado con parámetros de impresión de relleno y cantidad de capas sólidas en el perímetro modificados para hacerlo más robusto, se

evidencia la resistencia del molde a varios procesos de embutido. El molde prototipado se presenta en la Figura 31 y Figura 32.

Figura 31

*Núcleo del molde prototipado con parámetros de impresión modificados*

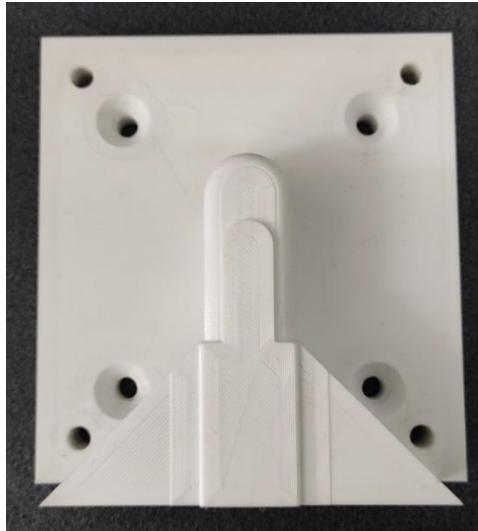
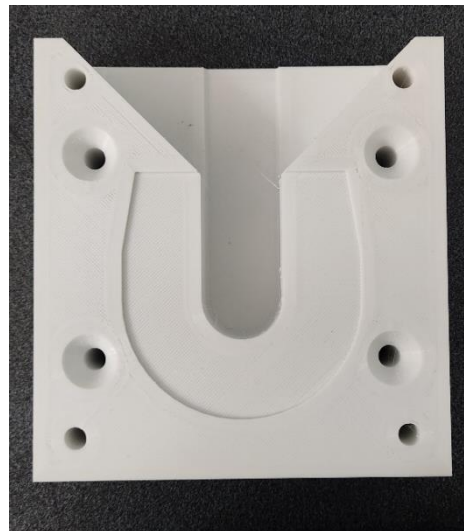


Figura 32

*Cavidad del molde prototipado con parámetros de impresión modificados*



Para el embutido con las chapas metálicas de 0,1 y 0,2 mm, se observa que las láminas no tienen la rigidez suficiente para permanecer alineadas adecuadamente en el molde durante el proceso de embutición, impidiendo que el conformado se complete. En las piezas obtenidas

en estos ensayos, se observa la presencia de arrugas en la parte circular de las piezas debido a que el molde no ha sido diseñado para estos espesores de la chapa metálica, tal como se puede apreciar en la Figura 33 y en la Figura 34.

Figura 33

*Vista superior de la pieza embutida con chapa de 0,2 mm*



Figura 34

*Vista frontal de la pieza embutida con chapa de 0,2 mm*



Algo similar ocurre con la chapa metálica de 0,4 mm, la cual fue obtenida al cubrir una lámina de 0,2 mm de espesor con cinta taípe por las dos caras. Esta chapa ya permanece adecuadamente posicionada en la cavidad del molde durante una mayor cantidad de tiempo del

proceso de embutido, sin embargo, aún se desplaza y presenta arrugas en la parte circular exterior, tal como se aprecia en la Figura 35. Además, en esta lámina se evidencia una gran fractura en la parte circular debido a la fricción que añade la cinta aislante entre la pieza y la matriz.

Figura 35

*Vista superior de la pieza embutida con chapa de 0,2 mm cubierta con cinta aislante*



#### *3.1.2.7 Conclusiones.*

Debido a que todos los parámetros de diseño del molde fueron calculados en base al espesor de chapa de 0,5 mm, la embutición con espesores de chapa diferentes provoca que el proceso de embutición no se complete de forma satisfactoria.

#### *3.1.2.8 Recomendaciones*

Utilizar la chapa metálica desarrollada de 0,2 mm sin la perforación interior a fin de evitar el desplazamiento de la pieza durante el avance del molde y validar el molde previo a emplear un espesor mayor.

Emplear una chapa metálica de 0,5 mm de espesor.



### **3.1.3 Ensayo de embutición #3**

#### *3.1.3.1 Objetivo.*

Comprobar la funcionalidad del molde prototipado por medio del proceso de conformado por embutición para validar el diseño de este.

#### *3.1.3.2 Responsables.*

Anderson Tobar

Xavier Lima

Víctor Erazo

#### *3.1.3.3 Materiales.*

Sistema de embutición

Chapa metálica de 0,5 mm

#### *3.1.3.4 Metodología (procedimiento).*

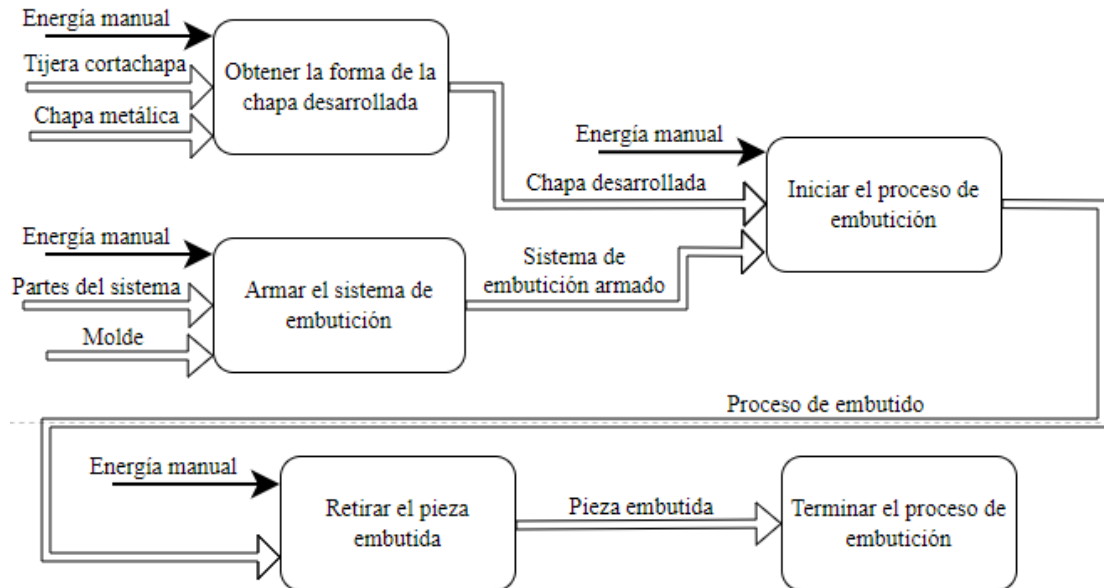
Para comprobar el correcto funcionamiento del molde diseñado, se sigue el siguiente procedimiento:

1. Obtener la forma de la chapa desarrollada.
2. Armar el sistema de embutición.
3. Iniciar el proceso de embutición.
4. Retirar la pieza embutida.
5. Terminar el proceso de embutición.

### 3.1.3.5 Esquema del ensayo.

Figura 36

Diagrama de actividades del ensayo de embutición #3



### 3.1.3.6 Resultados.

Se realizó el embutido con la chapa metálica de 0,2 mm sin la perforación interior, buscando evitar el desplazamiento de la pieza. Se observa que a pesar de esto la lámina se desalinea durante el proceso de conformado, creando un pliegue en el lugar donde iría la perforación interior debido al exceso de material, como se observa en la Figura 37. Además, aún se presentan arrugas en la parte circular de la pieza, como se muestra en la Figura 38, destacando el pliegue que se forma en los laterales y que no parece tener una tendencia a alisarse a medida que avance el embutido.

Figura 37

*Vista superior de la pieza embutida con chapa de 0,2 mm sin la perforación interior*



Figura 38

*Vista lateral de la pieza embutida con chapa de 0,2 mm sin la perforación interior*



Por otro lado, el embutido con la chapa metálica de 0,5 mm no presenta ningún tipo de arrugas, ni en la parte circular ni en los laterales, confirmando que con el espesor de lámina para el cual el molde fue diseñado el desempeño de este es el correcto, como se observa en la Figura 39 y Figura 40. Sin embargo, persiste el inconveniente de la desalineación de la chapa durante el embutido, provocando que las paredes rectas de la pieza se introduzcan demasiado rápido en la cavidad del molde y obstaculicen el avance del punzón, impidiendo que el embutido se complete correctamente.

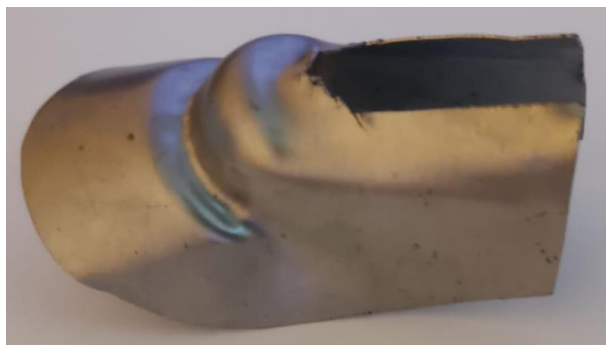
Figura 39

*Vista superior de la pieza embutida con chapa de 0,5 mm*



Figura 40

*Vista lateral de la pieza embutida con chapa de 0,5 mm*



### *3.1.3.7 Conclusiones.*

Emplear la chapa metálica de espesor de 0,2 mm sin la perforación interior no evita la desalineación de esta durante el embutido. Además, persiste el inconveniente de la formación de arrugas debido a que la lámina no tiene el espesor adecuado para el cual el molde fue diseñado.

El embutido con la lámina metálica de 0,5 mm tampoco puede desarrollarse en su totalidad debido a la fluencia irregular de la chapa. A pesar de esto, la pieza obtenida no presenta la formación de arrugas en su geometría.

#### *3.1.3.8 Recomendaciones*

Rediseñar el sistema de embutido y el molde a fin de implementar un método de prensachapas para regular la forma en que el material fluye en el molde durante el conformado.

### **3.2 Pruebas de embutición de la segunda autoparte**

La metodología, resultados, conclusiones y demás información correspondiente a los ensayos realizados de la segunda autoparte se exponen a continuación.

#### **3.2.1 Ensayo de embutición #1**

##### *3.2.1.1 Objetivo*

Comprobar el desempeño del molde prototipado por medio de la ejecución del proceso de embutición para validar el diseño de este.

##### *3.2.1.2 Responsables*

Anderson Tobar

##### *3.2.1.3 Materiales.*

Sistema de embutición

Chapa metálica de 0,5 mm

##### *3.2.1.4 Metodología (procedimiento).*

Para comprobar el correcto funcionamiento del molde diseñado, se sigue el siguiente procedimiento:

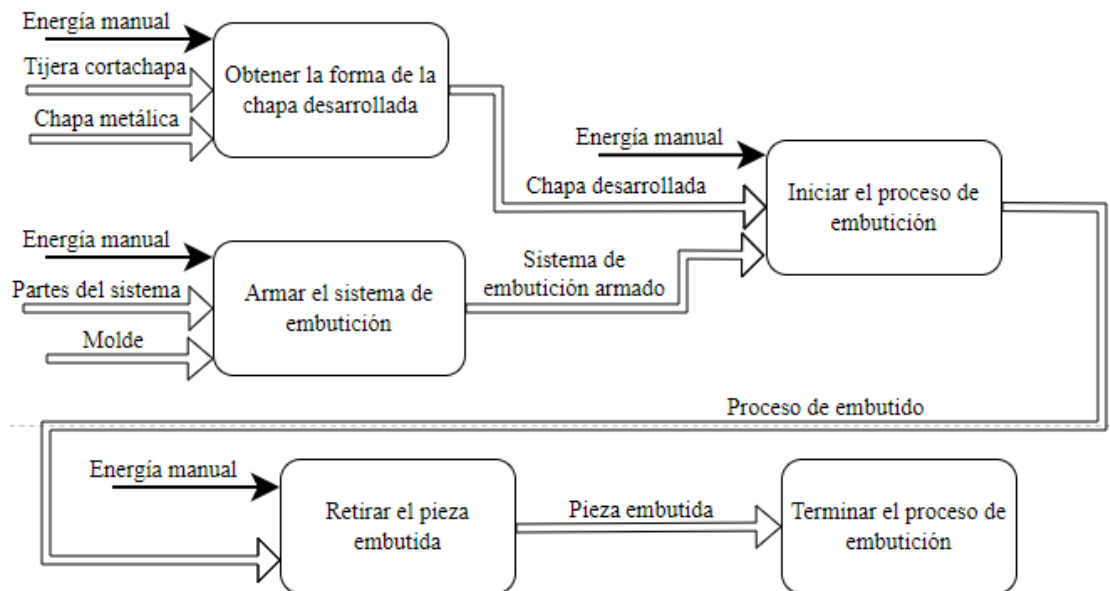
1. Obtener la forma de la chapa desarrollada.
2. Armar el sistema de embutición.
3. Iniciar el proceso de embutición.
4. Retirar la pieza embutida.

5. Terminar el proceso de embutición.

### 3.2.1.5 Esquema del ensayo.

Figura 41

Diagrama de actividades del ensayo de embutición #1



### 3.2.1.6 Resultados.

Tras realizar el primer embutido, el molde no presenta ningún tipo de fractura evidente. En lo referente a la pieza obtenida, se observa que el conformado de la autoparte no se ha completado satisfactoriamente pese a que la parte móvil del sistema realizó todo su recorrido y el molde se cerró adecuadamente. Como se muestra en la Figura 42, la pieza presenta un embutido incompleto donde no se ha obtenido la profundidad deseada ni el estampado de las letras.

Como consecuencia del embutido incompleto, en la Figura 43 se muestra que el exceso de material en el exterior de la chapa presenta el arrugamiento de la pestaña, ya antes descrito en la sección 1.4.6.

Figura 42

*Vista exterior de la pieza obtenida en el ensayo de embutición #1*



Figura 43

*Vista interior de la pieza obtenida en el ensayo de embutición #1*



Luego de obtener este resultado, se realizaron dos reembutidos consecutivos a esta misma pieza buscando completar el embutido, para lo cual se aplicó la máxima fuerza de embutido que se pudo producir mediante el sistema diseñado. Aunque el molde no evidencia ningún tipo de fallo, la placa porta cavidad manifiesta un pandeo debido a la gran presión ejercida, tal como se presenta en la Figura 44.

Figura 44

*Vista lateral de la placa porta cavidad pandeada*



Como resultado de estos dos reembutidos se obtiene una pieza con un embutido aun incompleto y sin el relieve deseado de las letras.

#### *3.2.1.7 Conclusiones.*

El conformado de la segunda pieza no se ha completado adecuadamente puesto que no se ha obtenido la profundidad adecuada ni las letras en relieve buscada, además de la formación de arrugas en la pestaña.

Los dos procesos de reembutido aplicados a la autoparte no permitieron obtener un embutido satisfactorio y por el contrario ocasionaron el pandeo de la placa porta cavidad.

#### *3.2.1.8 Recomendaciones*

Por el espesor del punzón y la cavidad, configurar el sistema de embutido de tal forma que el recorrido de la parte móvil sea menor a fin de que el molde se cierre lo antes posible y el embolo del sistema no se extienda hasta el extremo.

Rigidizar o reemplazar la placa porta cavidad con el propósito de evitar que esta pandee y asegurarse que esta distribuya la fuerza de embutido uniformemente.

### **3.2.2 Ensayo de embutición #2**

#### *3.2.2.1 Objetivo*

Comprobar la funcionalidad del molde prototipado por medio del proceso de conformado por embutición a fin de validar el diseño de este.



### 3.2.2.2 Responsables

Anderson Tobar

### 3.2.2.3 Materiales.

Sistema de embutición

Chapa metálica de 0,5 mm

### 3.2.2.4 Metodología (procedimiento).

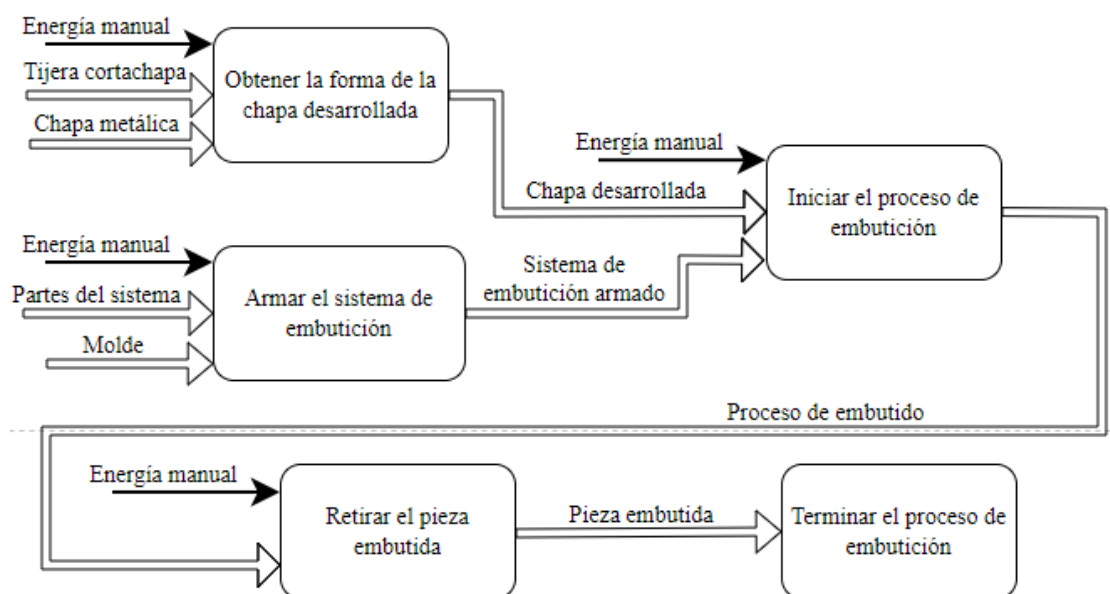
Para comprobar el correcto funcionamiento del molde diseñado, se sigue el siguiente procedimiento:

1. Obtener la forma de la chapa desarrollada.
2. Armar el sistema de embutición.
3. Iniciar el proceso de embutición.
4. Retirar la pieza embutida.
5. Terminar el proceso de embutición.

### 3.2.2.5 Esquema del ensayo.

Figura 45

Diagrama de actividades del ensayo de embutición #2



### 3.2.2.6 Resultados.

Como resultado de la embutición en este ensayo, ya se ha logrado obtener la profundidad deseada en la pieza. Sin embargo, persiste la presencia de la pestaña de material extra, como se observa en la Figura 46. Esto puede deberse a que el conformado de las letras no se ha realizado por a la falta de profundidad de estas en el diseño del molde.

Figura 46

*Vista exterior de la pieza obtenida en el ensayo de embutición #2*



Tanto el molde como la placa porta cavidad no presentan ningún tipo de falla apreciable a simple vista. Esto a pesar de los 280 bar aplicados en el proceso, lo cual resulta en una fuerza de embutición de 11633,32 N.

### 3.2.2.7 Conclusiones.

El embutido de la segunda pieza se ha completado en lo referente al conformado de la profundidad deseada. Sin embargo, persiste el inconveniente del grabado de las letras debido a la poca profundidad de estas en el diseño del molde.

El exceso de material al no producirse el relieve de las letras provoca la aparición de la pestaña en borde exterior de la autoparte embutida.

### 3.2.2.8 Recomendaciones

Modificar el diseño del molde a fin de aumentar la profundidad del conformado de las letras de la autoparte.

### **3.2.3 Ensayo de embutición #3**

#### **3.2.3.1 Objetivo**

Comprobar la funcionalidad del molde prototipado por medio del proceso de conformado por embutición a fin de validar el diseño de este.

#### **3.2.3.2 Responsables**

Anderson Tobar

#### **3.2.3.3 Materiales.**

Sistema de embutición

Chapa metálica de 0,5 mm

#### **3.2.3.4 Metodología (procedimiento).**

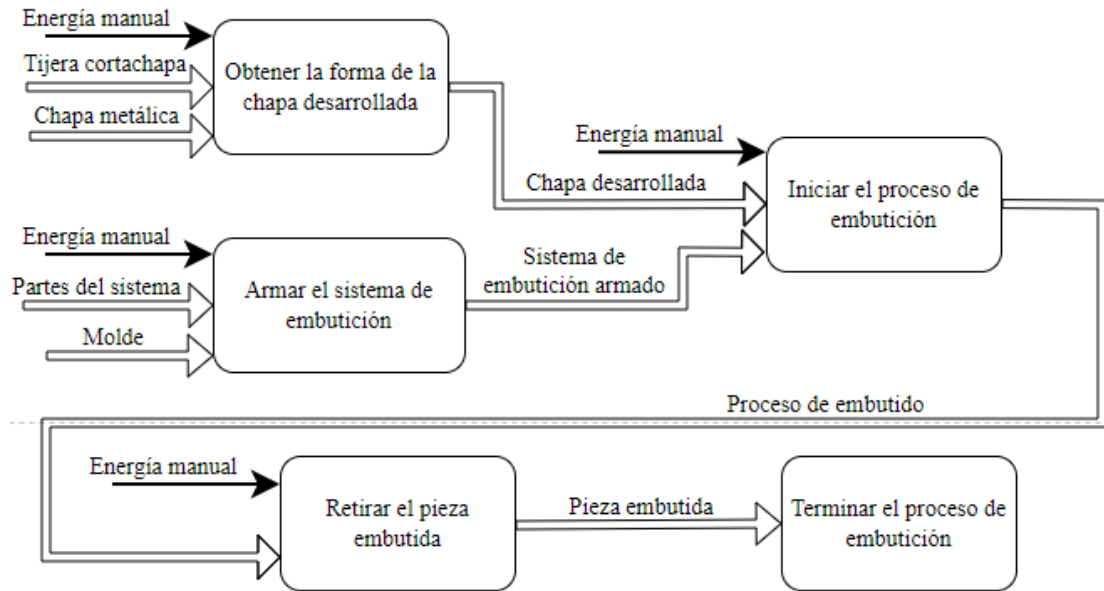
Para comprobar el correcto funcionamiento del molde diseñado, se sigue el siguiente procedimiento:

1. Obtener la forma de la chapa desarrollada.
2. Armar el sistema de embutición.
3. Iniciar el proceso de embutición.
4. Retirar la pieza embutida.
5. Terminar el proceso de embutición.

### 3.2.3.5 Esquema del ensayo.

Figura 47

Diagrama de actividades del ensayo de embutición #3



### 3.2.3.6 Resultados.

El resultado de este ensayo se muestra en la Figura 48, en la cual se aprecia el leve relieve de las letras en la parte central de la tapa. Del mismo modo, persiste la presencia de la pestaña en el borde exterior de la pieza, indicativo de que el diámetro de la chapa desarrollada es demasiado grande.

Figura 48

Vista exterior de la pieza obtenida en el ensayo de embutición #3



Como se muestra en la Figura 49, la máxima presión ejercida durante este ensayo fue de aproximadamente 320 bar, lo que se traduce en una fuerza de embutición de 13295,22 N. Esta fuerza de embutición muestra no ser suficiente para provocar que el molde falle, pues este no muestra ningún tipo de marca o fractura apreciable.

Figura 49

*Presión máxima ejercida durante el ensayo de embutición #3*



### *3.2.3.7 Conclusiones.*

A pesar de incrementar el espesor del grabado de las letras en el molde, estas aún no se marcan completamente, indicativo de que el espesor de estas todavía es insuficiente para formar un relieve significativo en la pieza.

La pestaña de exceso de material indica un diámetro de la lámina metálica desarrollada demasiado grande.

El molde es lo suficientemente robusto como para soportar la fuerza de embutición aplicada sin sufrir ningún tipo de fractura significativa.

### 3.2.3.8 Recomendaciones

Incrementar significativamente más la profundidad de las letras en el molde a fin de completar el conformado de estas adecuadamente.

Reducir el diámetro de la chapa metálica original con el objetivo de prevenir la formación de la pestaña en el borde de la pieza.

### 3.3 Cálculo del error absoluto de la fuerza de embutición

Con la finalidad de conocer el porcentaje del error absoluto entre la medida de la fuerza de embutición calculada y la fuerza de embutición máxima obtenida en el conformado de la segunda autoparte, se realiza el cálculo mostrado en la ecuación (20).

$$e_{abs} = \frac{15197,54 - 13295,22}{15197,54} \times 100\% = 12,52\% \quad (20)$$

Cabe mencionar que este cálculo no se realiza para la primera autoparte ya que el conformado de esta no se llegó a completar.

### 3.4 Comparativa de medidas

En la Tabla 14 se muestra la comparación de las medidas planteadas en el diseño CAD de la segunda autoparte frente a las medidas de la pieza tras ser embutida. La comparación de medidas de la primera autoparte no puede llevarse a cabo debido a que la pieza no pudo obtenerse completamente tras ser embutida.

Tabla 14

*Comparativa de medidas de la segunda autoparte*

Medida	Diseño CAD (mm)	Autoparte física (mm)	Diferencia (mm)
Diámetro exterior	59	58,2	0,8
Diámetro interior	58	57	1
Altura	7,5	7,25	0,25
<b>Promedio</b>			<b>0,68</b>

### 3.5 Gasto de material y tiempo de impresión

A fin de comparar el gasto del material y el tiempo empleado para la impresión de los moldes empleados en los ensayos, se presenta la Tabla 15.

Tabla 15

*Material y tiempo de impresión de los moldes*

<b>Molde</b>	<b>Material (g)</b>	<b>Tiempo de impresión (h)</b>
Primera autoparte	1441,01	69,36
Segunda autoparte	558,84	28,08

De esta tabla, se observa que la primera autoparte involucra 2,57 veces más material que la segunda y 2,5 veces más de tiempo de impresión.

### 3.6 Comparativa económica y tiempo de fabricación

A continuación, se presenta una comparativa entre el gasto económico y el tiempo empleado para la fabricación de la matriz de la segunda autoparte impresos en 3D con respecto a un proceso de manufactura convencional como es el fresado. El resumen de la hoja de costos de la fabricación mediante impresión 3D se muestra la Tabla 16.

Del mismo modo, en la Tabla 17 se muestran los costos del proceso de fabricación del molde mediante fresado. Tanto para este proceso como para el de impresión 3D se supuso la producción de 100 piezas.

Tabla 16

*Resumen de costos de la fabricación de la segunda autoparte con un molde impreso en 3D*

<b>Rubro</b>	<b>Valor (\$)</b>	<b>Valor unitario (\$)</b>
Materia prima directa	82,00	0,82
Mano de obra directa	560,40	5,60
Costos indirectos	33,22	0,33
Costo de producción	675,62	6,76
Gasto de administración	26,00	0,26
Gasto de venta	10,36	0,10
Gasto financiero	0,00	0,00
Costo total	711,98	7,12
Porcentaje de utilidad	10%	0,00
Utilidad	71,20	0,71
Precio de venta	783,17	7,83

Tabla 17

*Resumen de costos de la fabricación de la segunda autoparte con un molde fresado*

<b>Rubro</b>	<b>Valor (\$)</b>	<b>Valor unitario (\$)</b>
Materia prima directa	87,96	0,88
Mano de obra directa	3173,30	31,73
Costos indirectos	33,22	0,33
Costo de producción	3.294,48	32,94
Gasto de administración	26,00	0,26
Gasto de venta	10,36	0,10
Gasto financiero	0,00	0,00
Costo total	3.330,84	33,31
Porcentaje de utilidad	10%	0,00
Utilidad	333,08	3,33
Precio de venta	3.663,92	36,64

De las anteriores tablas se puede observar que, pese a que se han supuesto los mismos gastos y la misma cantidad de piezas a producir, el costo de producción del proceso de



mecanizado es aproximadamente 4,87 veces mayor que el de impresión 3D. Esto debido principalmente a la gran inversión que supone la contratación del servicio de fresado.

Adicionalmente, el proceso de mecanizado implica un trabajo de alrededor de 55,07 horas, lo cual supone un gasto de casi el doble de tiempo para la obtención de la matriz.

En consecuencia, el precio de venta unitario del tapacubos en una producción de 100 unidades resulta aproximadamente 4,68 veces más bajo mediante la fabricación por impresión 3D en comparación con en el proceso de fresado.

Es importante mencionar que los moldes elaborados mediante mecanizado están pensados y resultan factibles para la fabricación de grandes lotes de piezas, tal como se puede apreciar en la Tabla 18, donde para una producción de 1000 unidades, el precio de venta unitario de la pieza se reduce hasta \$ 4,77.

Tabla 18

*Resumen de costos de la fabricación de la segunda autoparte con un molde fresado*

<b>Rubro</b>	<b>Valor (\$)</b>	<b>Valor unitario (\$)</b>
Materia prima directa	555,96	0,56
Mano de obra directa	3713,30	3,71
Costos indirectos	33,22	0,03
Costo de producción	4.302,48	4,30
Gasto de administración	26,00	0,03
Gasto de venta	10,36	0,01
Gasto financiero	0,00	0,00
Costo total	4.338,84	4,34
Porcentaje de utilidad	10%	0,00
Utilidad	433,88	0,43
Precio de venta	4.772,72	4,77

Las hojas de costos de la fabricación de la segunda autoparte, ya sea mediante el molde impreso o con el molde fresado, se exponen en los Anexos F, G y H.

## CAPÍTULO IV

### 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones, en base al desarrollo de los capítulos anteriores.

#### 4.1 Conclusiones

La metodología propuesta para la selección de las piezas muestra que la tapa para brazo de limpiaparabrisas resulta idónea como primera autoparte, mientras que el tapacubos es la adecuada para la segunda.

Ante la evidente necesidad de manufacturar nuevos moldes con las modificaciones identificadas en el proceso, se determina que el método de prototipado rápido seleccionado es el apropiado para el trabajo desarrollado ya que permite identificar las fallas en el molde, corregir y volver a fabricar el molde con un menor costo y tiempo comparado con la manufactura tradicional.

Se ha evidenciado que los parámetros de embutición influyen directamente sobre el correcto desempeño del molde. Además, se ha demostrado que los métodos empleados para su cálculo son útiles a pesar de ser ecuaciones y procedimientos obtenidos, de acuerdo con los diferentes autores, a través de aproximaciones y experimentación.

Dado que ninguno de los moldes prototipados empleando los parámetros de impresión mostrados en la Tabla 12 falló durante los ensayos realizados, a excepción del molde del primer ensayo de la primera autoparte el cual fue elaborado con un porcentaje de relleno de 30%, se concluye que la configuración utilizada es la adecuada para la obtención de un molde capaz de resistir el embutido de una autoparte sencilla.

Un factor propio del proceso de prototipado seleccionado es la dilatación del polímero debido a la fundición y solidificación de este, ocasionando que las dimensiones del molde físico

no sean exactamente las mismas que las del CAD, razón por la cual se ha obtenido la diferencia promedio de 0,68 mm entre las medidas reales y las planteadas en el diseño.

En base a la experimentación, se puede inferir que el error del 12,52 % entre la fuerza de embutición calculada y la real se debe principalmente al valor del esfuerzo último de la chapa empleada, el cual varía del material real en comparación al obtenido de la base de datos de Matweb. Además, debido a que el sistema de embutición empleado no permite aplicar la presión de forma constante, el material tiende a recuperar su forma original en cada pausa, ocasionando el aumento de la presión necesaria para el conformado.

En general, en base a los resultados obtenidos, se concluye que el molde de la primera autoparte no es viable debido a que las piezas obtenidas con este no llegan a ser funcionales. Por otro lado, el molde de la segunda autoparte ha probado ser funcional al permitir obtener la pieza con la forma y detalles deseados.

Se ha encontrado que la embutición con el molde del tapacubos es un proceso factible en cuanto respecta al material y tiempo de impresión empleado, en comparación con el molde de la tapa para el brazo del limpiaparabrisas. A esto se le añade la posibilidad de personalizar la pieza al modificar de una forma sencilla y rápida el grabado superior de la tapa.

Finalmente, la factibilidad del presente proyecto se ve reflejada en el ahorro del 79,49 % en los costos de producción y del 49,01 % en el tiempo de fabricación que supone el prototipado de los moldes mediante la metodología propuesta, la cual ha permitido identificar los fallos e inconsistencias en el diseño de los moldes antes de pasar a una producción más costosa como ha demostrado ser el fresado de matrices de metal.

## **4.2 Recomendaciones**

Elaborar plantillas mediante el proceso de prototipado en uso con el objetivo de identificar las desviaciones que se producen en la fabricación y compensarlas en el diseño del molde.

Emplear un sistema de embutición donde se aplique fuerza de forma continua, evitando que la chapa tienda a recuperar su forma original sino hasta el final del conformado.

Para el embutido de piezas con geometrías como la de la primera autoparte, resulta fundamental el uso de un sistema de prensa chapas para evitar el desplazamiento irregular de la lámina de metal durante el conformado.

Fabricar el molde con variaciones de los parámetros de impresión a fin de encontrar una configuración que permita emplear la menor cantidad de material y tiempo posible, manteniendo la robustez del molde.

Utilizar otros tipos de filamentos de impresión 3D que cuenten con mejores propiedades mecánicas a fin de ampliar la vida útil del molde.

Emplear un relleno de materiales compuestos en el interior del molde con el objetivo de aumentar la resistencia a la compresión y por ende la factibilidad de este al ser capaz de soportar una mayor producción de piezas.

Realizar una comparativa económica a fin de comparar los costos de fabricación de moldes para embutición e inyección de plástico de las autopartes estudiadas a fin de verificar la factibilidad económica del proceso planteado en este trabajo.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] CINAE, “Boletín Estadístico y Autopartes,” pp. 1–10, Mar. 2021.
- [2] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, “Sector Automotor en Cifras,” Quito, pp. 1–19, Apr. 2021.
- [3] C. A. Villarreal, “Alternativa para la construcción de Autopartes Vehicular por medio de la Ingeniería Inversa e Impresión 3D. Caso de estudio tapa de distribución inferior del Chevrolet Spark 2015,” UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, 2019.
- [4] B. J. Cedeño, “Estudio para el modelado e impresión 3D de autopartes,” Universidad Internacional del Ecuador, 2018.
- [5] R. H. Helle and H. G. Lemu, “A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.828.
- [6] J. G. Valverde Bastidas, “Desarrollo de metodologías enfocadas a aplicaciones de ingeniería inversa para reproducir objetos mediante escaneo 3D, sistemas CAD/CAM y prototipado rápido,” Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [7] M. G. Ortiz, “Diseño y fabricación de una matriz de embutido y corte para producir un casquillo bipolar de resistencias eléctricas industriales en la empresa Redanse S.A.,” Universidad Técnica De Ambato, 2018.
- [8] L. Rodríguez-Parada, P. F. Mayuet, and A. J. Gámez, “Industrial product design: Study of FDM technology for the manufacture of thermoformed prototypes,” *Procedia Manuf.*, vol. 41, pp. 587–593, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.046.
- [9] H. S. Kleespies and R. H. Crawford, “Vacuum Forming of Compound Curved Surfaces with a Variable Geometry Mold,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 17, no. 5, pp. 325–337, 1998, doi: 10.1016/S0278-6125(98)80001-0.
- [10] S. Junk, J. Sämman-Sun, and M. Niederhofer, “Application of 3D printing for the rapid

- tooling of thermoforming moulds,” *Proc. 36th Int. MATADOR Conf.*, vol. 2010-Janua, pp. 369–372, 2010, doi: 10.1007/978-1-84996-432-6\_83.
- [11] Naciones Unidas, “Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización,” *Nac. Unidas*, vol. 1, no. 1, pp. 1–88, 2015, [Online]. Available: <https://undocs.org/es/A/70/1>.
- [12] G. Carrillo, C. Nuila, and J. Láinez, “Prototipado rápido en la fabricación de moldes impresos en 3D para soplado de plástico,” *Ingenius*, no. 24, pp. 28–35, 2020, doi: 10.17163/ings.n24.2020.03.
- [13] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, 5th ed. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [14] J. A. Schey, *Procesos de manufactura*, 3rd ed. México D.F.: Mc Graw Hill, 2002.
- [15] A. Kucher, *Tecnología de matabales*, 1st ed. Moscú: Editorial Mir Moscú, 1989.
- [16] M. P. Groover, *Introducción a los procesos de manufactura*, 1st ed. México D.F.: Mc Graw Hill, 2014.
- [17] A. Florit, *Fundamentos de matricería: Corte y punzonado*, 1st ed. Barcelona: Ediciones Ceac, 2007.
- [18] M. Rossi, *Estampado en frío de la chapa*, 9th ed. Madrid: Editorial Dossat, 1979.
- [19] A. Ginjaume and F. Torre, *Ejecución de Procesos de Mecanizado, Conformado y Montaje*, 2nd ed. Ediciones Paraninfo, S.A., 2005.
- [20] B. Wassilieff, *Embutición*, 1st ed. Barcelona: Ed. Hispano Europea, 1966.
- [21] T. López Navarro, *Troquelado y Estampación con aplicaciones al punzonado, doblado, embutición y extrusión*, 5th ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1976.
- [22] D. Sandoval and K. Caiza, “Análisis y simulación del comportamiento mecánico en el proceso de embutido para una lámina de aluminio ASTM A 1200 de espesor de 0,5mm,” Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2017.

- [23] R. Ghardache, “Diseño de una matriz progresiva para corte y doblado de un componente mecánico,” *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2020.
- [24] O. Gerhard, *Herramientas de Troquelar, Estampar y Embutir*, 6th ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1977.
- [25] M. Fuentes and M. Mullapa, “Matriz de embutición y corte para la implementación del laboratorio de matricería,” *Escuela Politécnica Nacional*, 2008.
- [26] J. Carro Suárez, F. Flores Salazar, I. Flores Nava, and R. Hernández Hernández, “Industry 4.0 and Digital Manufacturing: a Design Method Applying Reverse Engineering,” *Ingeniería*, vol. 24, no. 1, pp. 6–28, 2018, [Online]. Available: <https://doi.org/10.14483/23448393.13821>.
- [27] M. A. Núñez-Andrés, F. Buill, J. M. Regot, and A. Mesa, “Ingeniería inversa en modelos de pequeño tamaño,” *Sem. Geomática Int.*, no. April 2014, pp. 1–9, 2009, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2117/6214>.
- [28] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, 3rd ed. México D.F.: Mc Graw Hill, 2007.
- [29] C. Riba, *Diseño Concurrente*, 1st ed. Barcelona: Edicions Univ. Politèc. de Catalunya, 2002.
- [30] J. Delfin and E. Jiménez, “INGENIERIA INVERSA: metodología y aplicaciones,” *Foro de análisis de Investigación, Desarrollo y Gestión Tecnológica en ITESCA*, Sonora, pp. 1–11, 2011.
- [31] E. J. López, A. L. Bracamontes, L. Andrés, G. Velázquez, and V. Manuel, “La ingeniería inversa como metodología para potenciar la enseñanza de la metrología,” no. 11, pp. 1–8, 2010, [Online]. Available: <https://www.cenam.mx/sm2010/info/carteles/sm2010-c11.pdf>.
- [32] L. MatWeb, “AISI 1010 Steel, cold drawn,” 2022.

- <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=025d4a04c2c640c9b0eaaef28318d761&ckck=1> (accessed Feb. 14, 2022).
- [33] Fundación Prodimtec, *Diseño para la fabricación y ensamblaje: Guía metodológica DFMA*, 1st ed. Gijón Asturias: Fundación Prodimtec, 2007.
- [34] C. M. Sánchez R. and C. J. Cortés, “Conceptos de diseño para manufactura (DFM) de piezas microfundidas,” *Ing. e Investig.*, vol. 25, no. 3, pp. 49–60, 2005, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v25n3/v25n3a07.pdf>.
- [35] Creality 3D Technology, “Impresora 3D-Ender-3 Pro,” *Ender Series*, 2021. <https://www.creality.com/es/goods-detail/ender-3-pro-3d-printer> (accessed Dec. 08, 2021).
- [36] F. Bordignon, A. Iglesias, and Á. Hahn, *Diseño e impresión de objetos 3D*, 1st ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: UNIPE: Editorial Universitaria, 2018.
- [37] K. L. C. Alvarez, R. F. C. Lagos, and M. Aizpun, “Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM),” *Ingeniare*, vol. 24, no. September, pp. 17–24, 2016, doi: 10.4067/S0718-33052016000500003.
- [38] 3D Matter, “What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints?,” 2015. [https://pc7x.net/archive/3dPrinting/What is the influence of infill %25, layer height and infill pattern on my 3D prints\\_ – 3D Matter.pdf](https://pc7x.net/archive/3dPrinting/What is the influence of infill %25, layer height and infill pattern on my 3D prints_ – 3D Matter.pdf) (accessed Nov. 30, 2021).
- [39] M. L. Dezaki, M. K. A. M. Ariffin, A. Serjouei, A. Zolfagharian, S. Hatami, and M. Bodaghi, “Influence of infill patterns generated by cad and fdm 3d printer on surface roughness and tensile strength properties,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 16, p. 17, 2021, doi: 10.3390/app11167272.
- [40] R. L. Norton, *Diseño de maquinaria. Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*, 4th



ed. México D.F., 2009.

- [41] DIPAC S.A., “Planchas laminadas en frío,” Manta, 2021. [Online]. Available: <https://www.dipacmanta.com/planchas-de-acero/planchas-laminadas-en-frio>.

## **ANEXOS**

### **A. Propiedades mecánicas de algunos aceros al carbón**

Número SAE/AISI	Condición	Resistencia a la		Resistencia		Alargamiento mayor de 2 pulg	Dureza Brinell
		cedencia a		a la última			
		tensión (2% de deformación)		tensión		%	-HB
		kpsi	MPa	kpsi	MPa		
1010	Rolado en caliente	26	179	47	324	28	95
	Laminado en frío	44	303	53	365	20	105
1020	Rolado en caliente	30	207	55	379	25	111
	Laminado en frío	57	393	68	469	15	131
1030	Rolado en caliente	38	259	68	469	20	137
	Normalizado @ 1650°F	50	345	75	517	32	149
	Laminado en frío	64	441	76	524	12	149
	Q&T @ 1000°F	75	517	97	669	28	255
	Q&T @ 800°F	84	579	106	731	23	302
1035	Q&T @ 400°F	94	648	123	848	17	495
	Rolado en caliente	40	276	72	796	18	143
	Laminado en frío	67	462	80	552	12	163
	Rolado en caliente	42	290	76	524	18	149
	Normalizado @ 1650°F	54	372	86	593	28	170
1040	Laminado en frío	71	490	85	586	12	170
	Q&T @ 1200°F	63	434	92	634	29	192
	Q&T @ 800°F	80	552	110	758	21	241
	Q&T @ 400°F	86	593	113	779	19	262

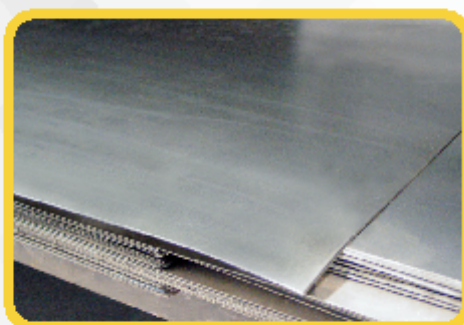
1045	Rolado en caliente	45	310	82	565	16	163
	Laminado en frío	77	531	91	627	12	179
1050	Rolado en caliente	50	345	90	621	15	179
	Normalizado a 1650°F	62	427	108	745	20	217
	Laminado en frío	84	579	100	689	10	197
	Q&T @ 1200°F	78	538	104	717	28	235
	Q&T @ 800°F	115	793	158	1089	13	444
1060	Q&T @ 400°F	117	807	163	1124	9	514
	Rolado en caliente	54	372	98	676	12	200
	Normalizado @ 1650°F	61	421	112	772	18	229
	Q&T @ 1200°F	76	524	116	800	23	229
	Q&T @ 1000°F	97	669	140	965	17	277
	Q&T @ 800°F	111	765	156	1076	14	311
	Rolado en caliente	66	455	120	827	10	248
1095	Normalizado @ 1650°F	72	496	147	1014	9	13
	Q&T @ 1200°F	80	552	130	896	21	269
	Q&T @ 800°F	112	772	176	1213	12	363
	Q&T @ 600°F	118	814	183	1262	10	375

---

Fuente: [40]

## B. Composición de las planchas laminadas al frío.

### PLANCHAS LAMINADAS AL FRÍO



#### Especificaciones Generales:

Norma:	NTE INEN 115
Calidad:	JIS 3141 SPCC SD
Espesores:	0,45mm a 1,90mm
Rollos:	X 1219mm
Planchas:	4 x 8 pies y medidas especiales
Acabado:	Acero negro

Calidad	Designación	Carbon	Manganeso	Fósforo	Acidulo	Aluminio
Calidad Comercial	CS TIPO A	0,10	5,6	0,03	0,035	
	CS TIPO B	0,02 a 0,10	5,6	0,03	0,030	
	CS TIPO C	0,08	5,6	0,10	0,035	
Enbuido leve	FB TIPO A	0,10	5,5	0,02	0,035	
	FB TIPO B	0,02 to 0,10	5,5	0,02	0,030	
Enbuido profundo	DDB	0,08	5,5	0,02	0,035	0,81
	EDDB	0,02	5,4	0,02	0,030	0,81
Estructural BS Grd	30 (236)	0,30		0,040	0,040	
	37 (266)	0,30		0,10	0,040	
	40(275)	0,35		0,10	0,040	
	50(346)	0,40		0,20	0,040	
	55(346)	0,60		0,340	0,040	
	60 (358)	0,20		0,340	0,040	

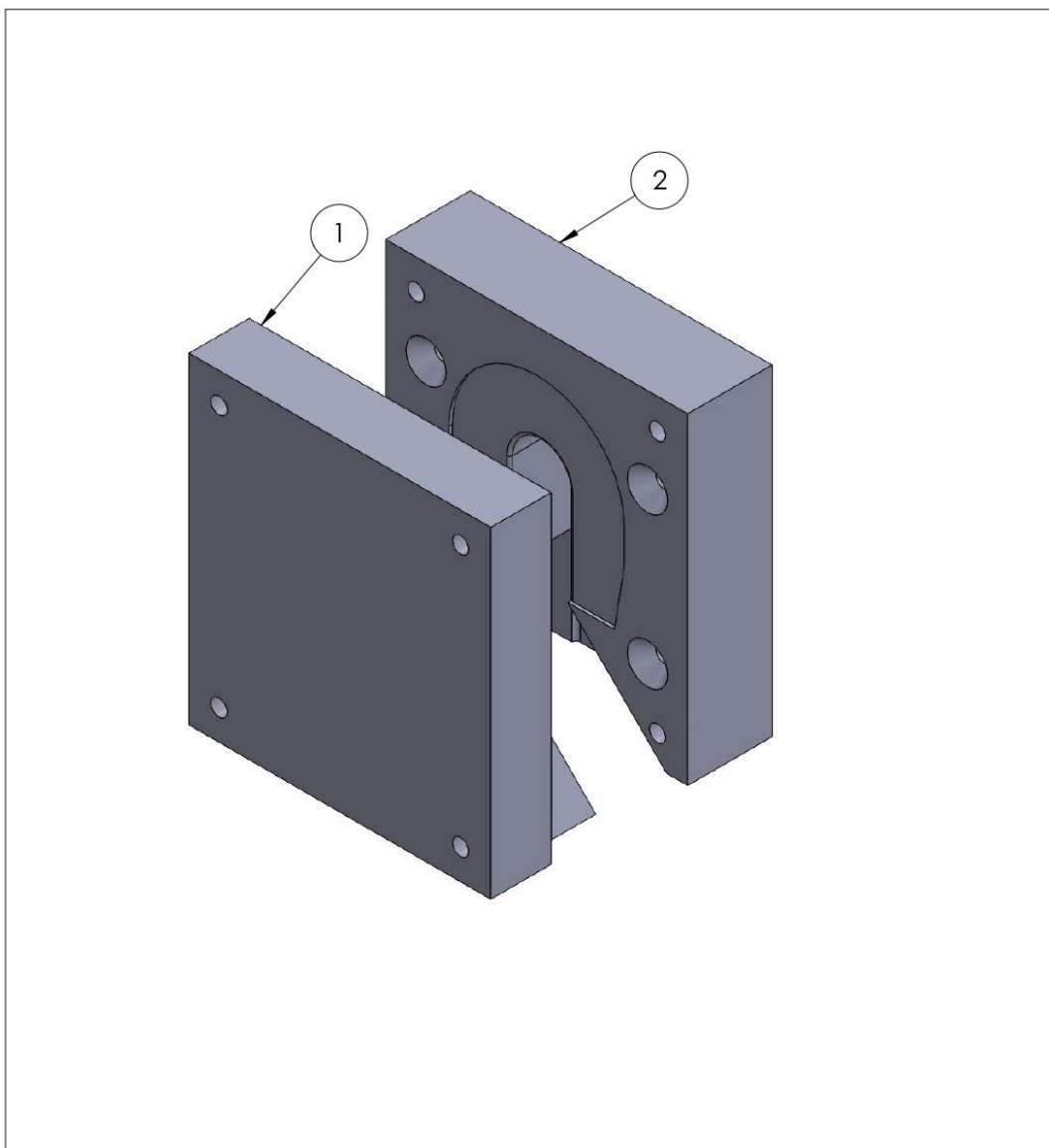
[www.dipacmanta.com](http://www.dipacmanta.com)

### C. Características de la impresora 3D Ender-3 Pro

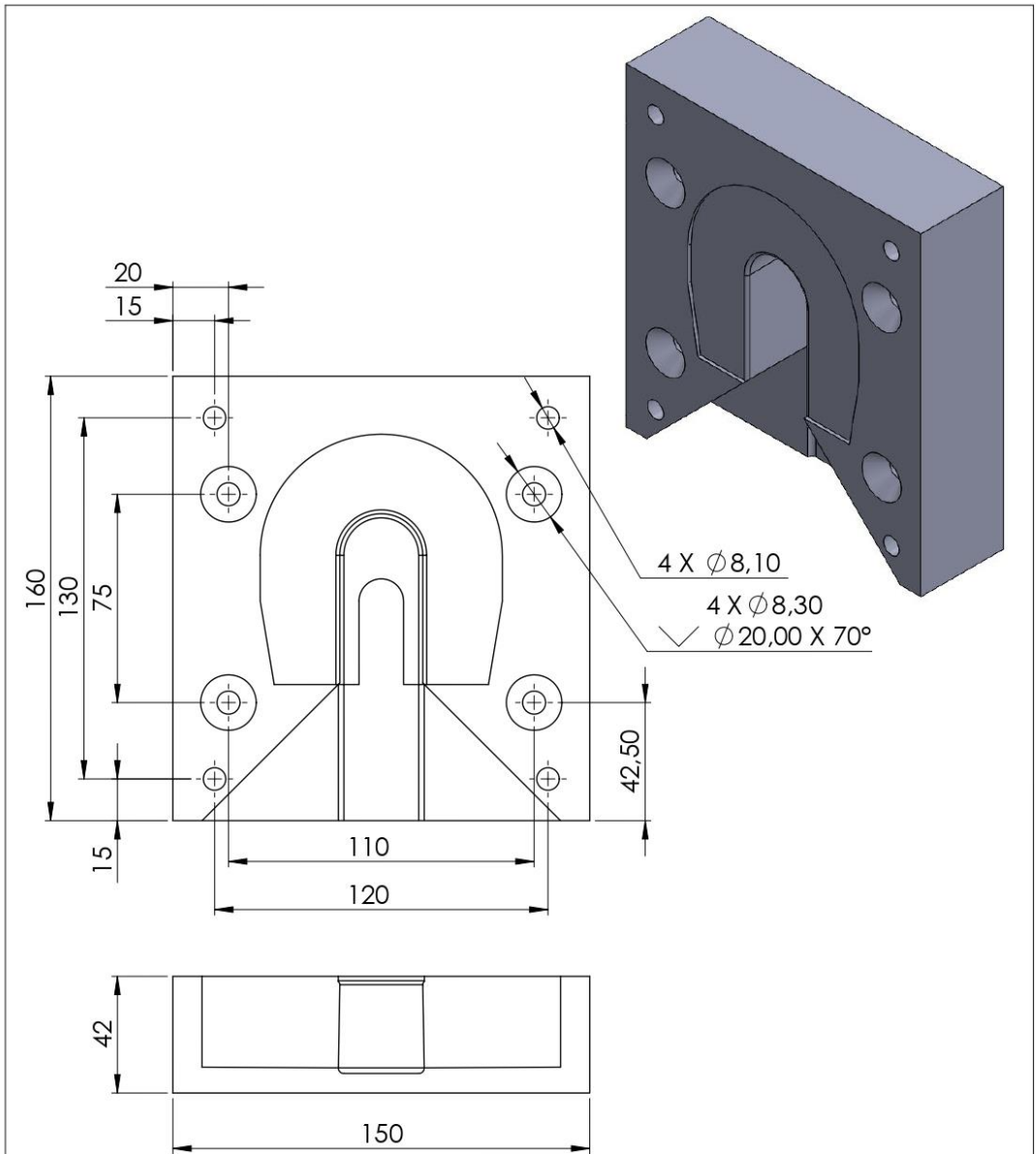
Parámetro técnico	Valor
Volumen de impresión	22 x 22 x 25 cm
Precisión de impresión	± 0,1 mm
Boquilla	0.4 mm por defecto / compatible con otros diámetros
Diámetro de filamento	1.75 mm
Materiales soportados	PLA, ABS, TPU, madera, cobre, degradado, etc.
Velocidad de impresión	≤ 180 mm/s, normal 30-60 mm/s
Temperatura máxima de la cama	≤ 100 °C
Transferencia de archivos	En línea o mediante tarjeta SD
Formato de archivo	STL, OBJ, AMF
Software de corte	Cura/ Repetier-Host/ Simplify3D
Fuente de alimentación	Entrada: AC 100-120 V/ 6,8 A 200-240 V/ 3,4 A 50/ 60 Hz Salida: DC 24 V 270 W
Dimensiones de la máquina	440 x 420 x 465 mm

Fuente: [35]

**D. Planos del molde de la primera autoparte**



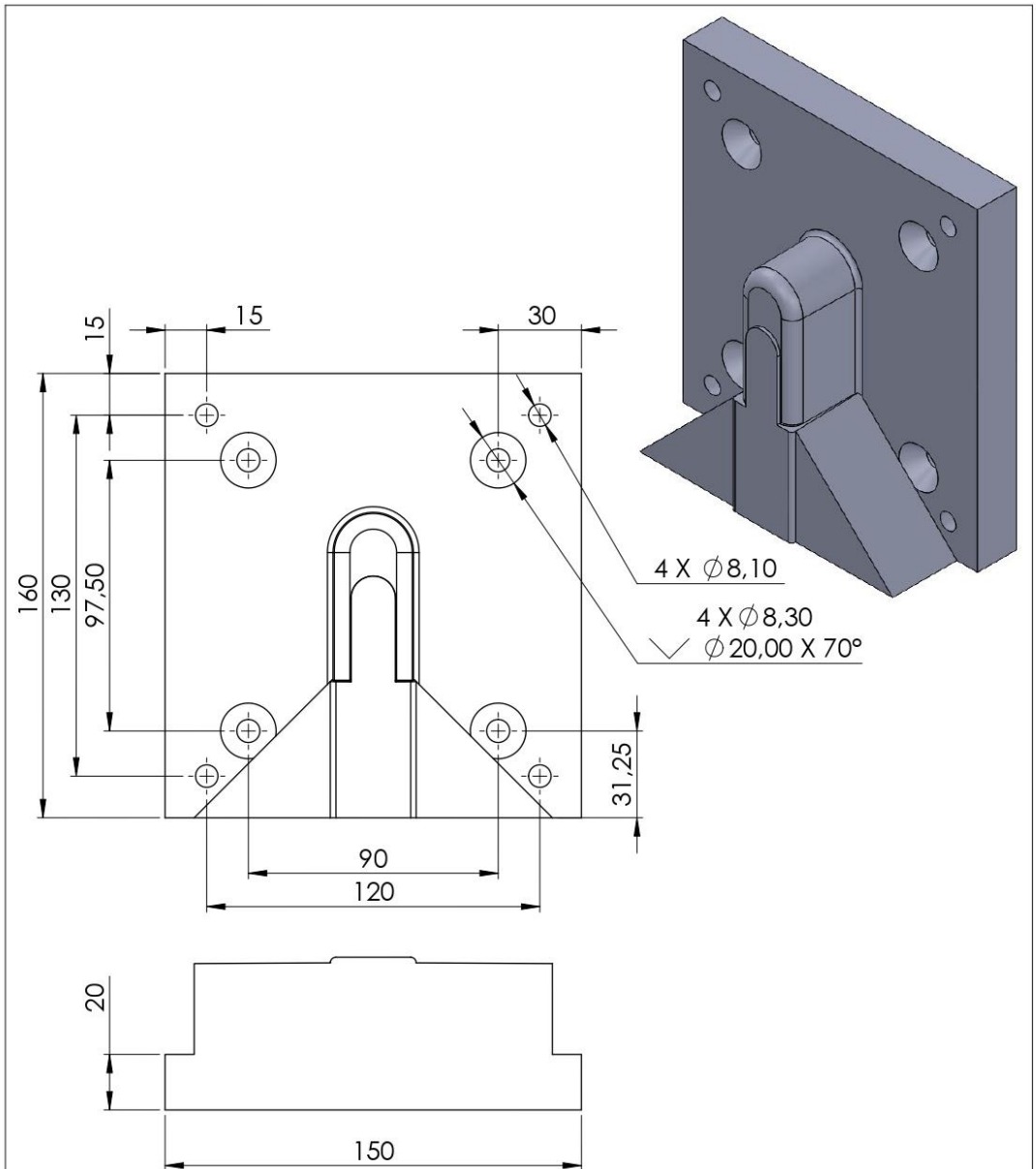
2	CAVIDAD	UTN22-MTL-C-01	1	PLA	
1	NÚCLEO	UTN22-MTL-N-01	1	PLA	
Nº. PIEZA	DESCRIPCIÓN	Nº. DIBUJO	CANTIDAD	MATERIAL	OBSERVACIÓN
		Tolerancia	Peso	Materiales	
		±0.1		PLA	
		Fecha	Nombre	Denominación	Escala
		Dib. 24/2/2022	Anderson Tobar	MOLDE DE TAPA DE BRAZO DE LIMPIAPARABRISAS	1:2
		Rev. 24/2/2022	Victor Erazo		
		Apro. 24/2/2022	Victor Erazo		
				Número del dibujo	
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	UTN22-MTL-1	



Notas:  
 Perforaciones pasantes a menos que se indique lo contrario.  
 Perforación de la chapa desarrollada de 1,58 mm

				Tolerancia	Peso	Materiales		
				±0.1		PLA		
					Fecha	Nombre	Denominación	Escala
				Dib.	24/2/2022	Anderson Tobbar	CAVIDAD MOLDE DE TAPA DE BRAZO DE LIMPIAPARABRISAS	1:3
				Rev.	24/2/2022	Victor Erazo		
				Apro.	24/2/2022	Victor Erazo		
							Número del dibujo	
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre			UTN22-MTL-C-01		

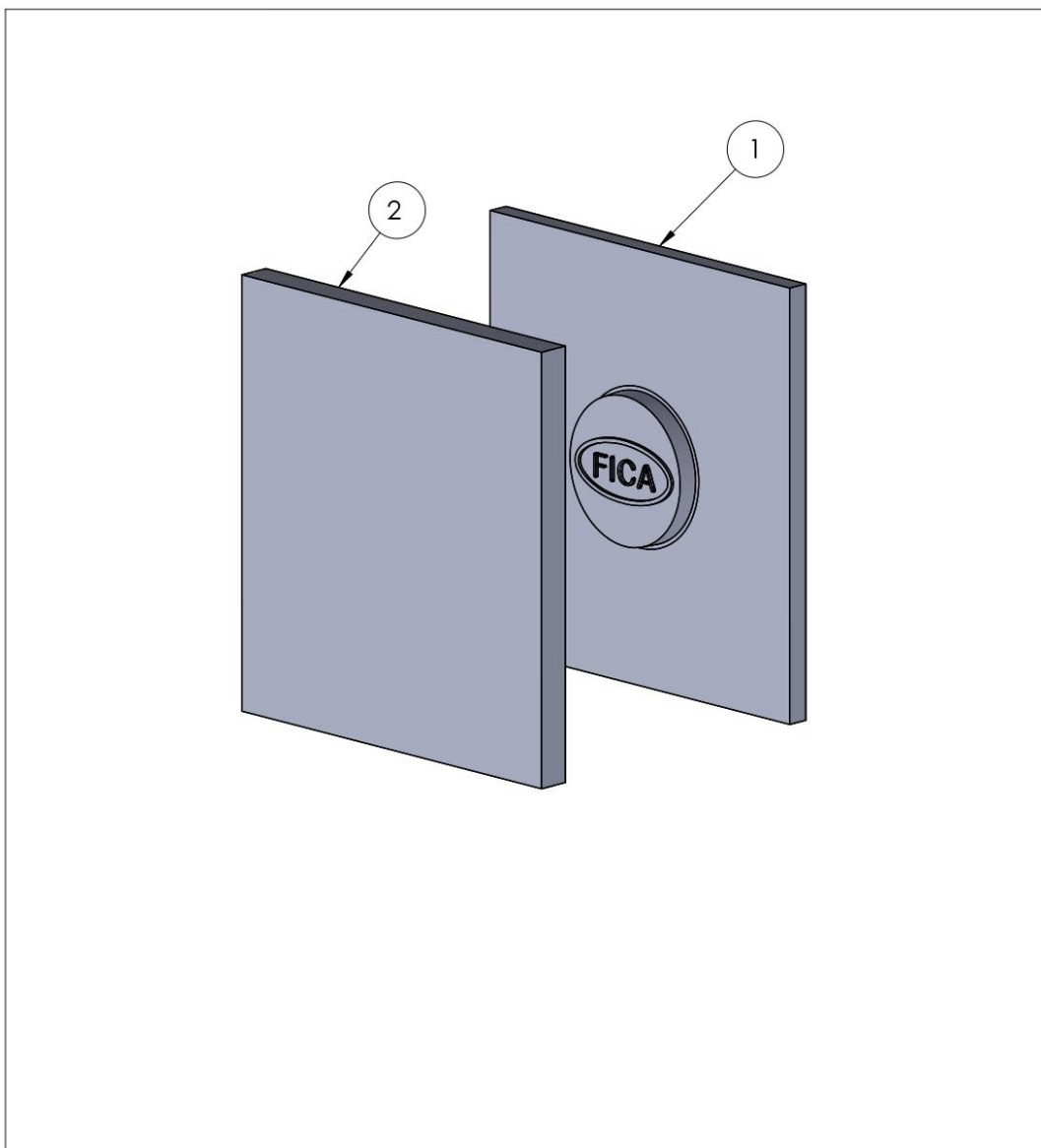




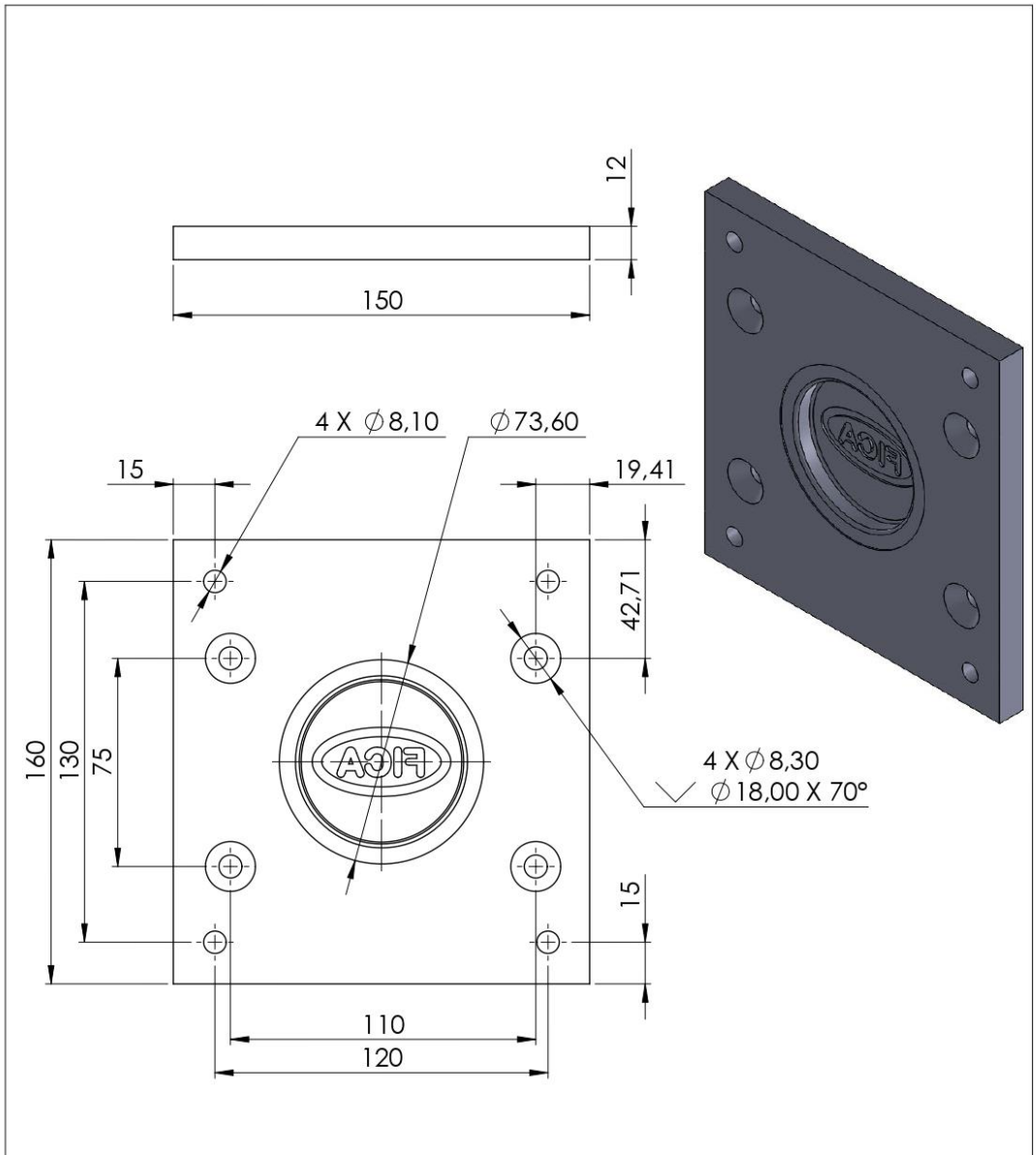
Notas:  
Perforaciones pasantes a menos que se indique lo contrario.

				Tolerancia	Peso	Materiales		
				±0.1		PLA		
					Fecha	Nombre	Denominación	Escala
				Dib.	24/2/2022	Anderson Tobar	NÚCLEO MOLDE DE TAPA DE BRAZO DE LIMPIAPARABRISAS	1:3
				Rev.	24/2/2022	Victor Erazo		
				Apro.	24/2/2022	Victor Erazo		
							Número del dibujo	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			UTN22-MTL-N-01		

**E. Planos del molde de la segunda autoparte**

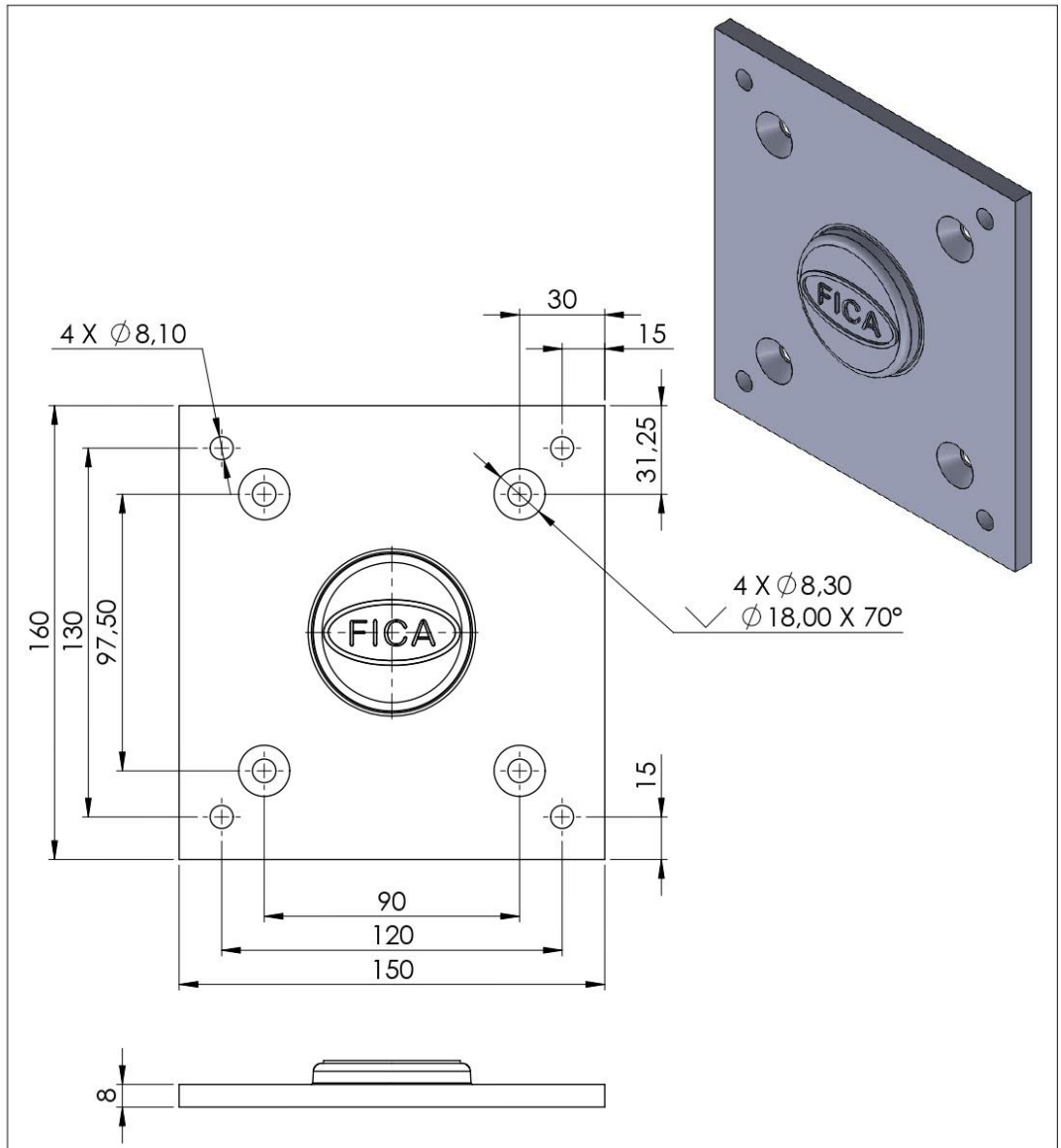


2	CAVIDAD	UTN22-DMT-C-01	1	PLA	
1	NÚCLEO	UTN22-DMT-N-01	1	PLA	
Nº. PIEZA	DESCRIPCIÓN	Nº. DIBUJO	CANTIDAD	MATERIAL	OBSERVACIÓN
		Tolerancia	Peso	Materiales	
		±0.1		PLA	
		Fecha	Nombre	Denominación	Escala
		Dib. 24/2/2022	Anderson Tobar	MOLDE DE TAPACUBOS	1:2
		Rev. 24/2/2022	Victor Erazo		
		Apro. 24/2/2022	Victor Erazo		
				Número del dibujo	
Edi- ción	Modificación			Fecha	



Notas:  
 Perforaciones pasantes a menos que se indique lo contrario.  
 Perforación de  $\phi 73,6 \times 0,55$  mm

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				±0.1		PLA	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	24/2/2022	Anderson Tobbar	CAVIDAD MOLDE DE TAPACUBOS
				Rev.	24/2/2022	Victor Erazo	
				Apro.	24/2/2022	Victor Erazo	
							Número del dibujo
							UTN22-DMT-C-01
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre				



Notas:  
Perforaciones pasantes a menos que se indique lo contrario.

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				±0.1		PLA	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	24/2/2022	Anderson Tobbar	NÚCLEO MOLDE DE TAPACUBOS
				Rev.	24/2/2022	Victor Erazo	
				Apro.	24/2/2022	Victor Erazo	
							Número del dibujo
							UTN22-DMT-N-01
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



### G. Hoja de costos de la fabricación de la segunda autoparte con el molde fresado

(100 piezas).

HOJA DE COSTOS								
NOMBRE						CANTIDAD	LOTE	100
ORDEN	1							
PRODUCTO	Tapacubos					PRECIO DE VENTA UNIRARIO		\$ 36,64
FECHA INICIO	8/1/2022							
FECHA TERMINACIÓN	8/2/2022							
MATERIA PRIMA DIRECTA			MANO DE OBRA DIRECTA			COSTO INDIRECTO DE FÁBRICA		
FECHA	REFERENCIA	VALOR	FECHA	REFERENCIA	VALOR	FECHA	PARÁMETRO	VALOR
8/1/2022	Tocho de acero A36	35,96	8/1/2022	Diseñador	360,00	8/1/2022	Mano de obra indirecta	0,00
	Chapa metálica	52,00		Servicio de mecanizado	2753,30		Depreciaciones	31,82
				Servicio de corte de chapa metálica	10,00		Amortizaciones	0,00
				Servicio de prensado	50,00		Materia prima indirecta	1,40
TOTAL		87,96	TOTAL		3173,30	TOTAL		33,22
		Unitario		Estructura				
Materia prima directa	87,96	0,88		3%				
Mano de obra directa	3173,30	31,73		95%				
Costos indirectos	33,22	0,33		1%				
<b>Costo de producción</b>	<b>\$ 3.294,48</b>	<b>32,94</b>		<b>99%</b>				
Gasto de administración	26,00	0,26		1%				
Gasto de venta	10,36	0,10		0%				
Gasto financiero	0,00	0,00		0%				
<b>Costo total</b>	<b>\$ 3.330,84</b>	<b>33,31</b>		<b>100%</b>				
Porcentaje de utilidad	10%	0,00		0%				
Utilidad	\$ 333,08	3,33		10%				
Precio de venta	\$ 3.663,92	36,64		110%				

## H. Hoja de costos de la fabricación de la segunda autoparte con el molde fresado

(1000 piezas).

HOJA DE COSTOS								
NOMBRE						CANTIDAD	LOTE	1000
ORDEN	1							
PRODUCTO	Tapacubos					PRECIO DE VENTA UNIRARIO		\$ 4,77
FECHA INICIO	8/1/2022							
FECHA TERMINACIÓN	8/2/2022							
MATERIA PRIMA DIRECTA			MANO DE OBRA DIRECTA			COSTO INDIRECTO DE FÁBRICA		
FECHA	REFERENCIA	VALOR	FECHA	REFERENCIA	VALOR	FECHA	PARÁMETRO	VALOR
8/1/2022	Tocho de acero A36	35,96	8/1/2022	Diseñador	360,00	8/1/2022	Mano de obra indirecta	0,00
	Chapa metálica	520,00		Servicio de mecanizado	2753,30		Depreciaciones	31,82
				Servicio de corte de chapa metálica	100,00		Amortizaciones	0,00
				Servicio de prensado	500,00		Materia prima indirecta	1,40
TOTAL		555,96	TOTAL		3713,30	TOTAL		33,22
		Unitario		Estructura				
Materia prima directa		555,96		0,56				13%
Mano de obra directa		3713,30		3,71				86%
Costos indirectos		33,22		0,03				1%
<b>Costo de producción</b>	<b>\$</b>	<b>4.302,48</b>		<b>4,30</b>				<b>99%</b>
Gasto de administración		26,00		0,03				1%
Gasto de venta		10,36		0,01				0%
Gasto financiero		0,00		0,00				0%
<b>Costo total</b>	<b>\$</b>	<b>4.338,84</b>		<b>4,34</b>				<b>100%</b>
Porcentaje de utilidad		10%		0,00				0%
Utilidad	\$	433,88		0,43				10%
Precio de venta	\$	4.772,72		4,77				110%