

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño y simulación de un molde construido mediante el uso de
manufactura aditiva para la fabricación de botellas plásticas”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

José Daniel Espinosa Romero

José Luis Rodríguez Sellán

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi familia, a mi papá que está en el cielo, y a todos los que confiaron en mis capacidades para lograr este pequeño paso en la vida profesional, pero a la vez muy satisfactorio para mí.

José Daniel Espinosa Romero

AGRADECIMIENTO

Agradeciendo a Dios por todas mis capacidades, mi más sincero agradecimiento a mi familia, en especial a mi papá que estuvo al inicio de mi carrera, y me dejó toda la confianza para seguir adelante, a mi mamá que estuvo durante toda la carrera apoyándome y siendo mi soporte y mis fuerzas para continuar, a mis hermanos porque siempre confiaron en mis capacidades. A la empresa Compucad representantes de Stratasys en el Ecuador, que nos permitió conocer de sus productos y resolver ciertas dudas con respecto al trabajo realizado.

José Daniel Espinosa Romero

A todos aquellos que conforman la Escuela Superior Politécnica del Litoral. A mi madre y a mi padre por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, a mis familiares, amigos y a todos aquellos que contribuyeron de manera especial en mi formación académica y personal a lo largo de mi etapa universitaria.

José Rodríguez Sellán

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *José Daniel Espinosa Romero* y *José Luis Rodríguez Sellán* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



José Daniel Espinosa
Romero



José Luis Rodríguez
Sellán

EVALUADORES

RODOLFO
EZEQUIEL
PAZ MORA

Digitally signed by
RODOLFO EZEQUIEL
PAZ MORA
Date: 2020.09.26
11:36:39 -05'00'

Ing. Rodolfo Paz, M. Sc.

PROFESOR COORDINADOR



Ing. Fausto Maldonado, M. Sc.
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Para el presente proyecto se analiza el uso de la manufactura aditiva como una alternativa más rápida y económica para la fabricación de moldes que se utilizan para la producción de botellas plásticas. Por lo que se investiga y se selecciona de la literatura, de entre los procesos de conformado de plásticos, el más idóneo; la tecnología de manufactura aditiva factible; y el material más adecuado para la fabricación y diseño del molde. Y se obtuvo como resultados, que el proceso de soplado, la tecnología de manufactura aditiva PolyJet, y el material ABS digital, son factibles para la fabricación y funcionalidad de estos moldes. Además, se diseñó el molde respectivo para una botella de 300 ml, y fue analizado mediante la técnica de elementos finitos con el material seleccionado de manufactura aditiva, en el software Inventor, y se obtuvo que el esfuerzo máximo en el molde es de 4.6 MPa, con cargas estáticas aplicadas correspondientes a una presión de 0.45 MPa característica en los procesos de soplado. También, fue estimada la durabilidad del molde, mediante la comparación con gráficas de fatiga del material ABS con el valor de esfuerzo máximo obtenido, dando una aproximación de 200.000 ciclos. Por tales razones, se puede concluir que se puede producir moldes utilizando la tecnología PolyJet para ser empleados en procesos de soplado de fabricación de botellas plásticas para bajas demandas de producción, o como uso de prototipado, dando beneficios de ahorros en los costos y tiempos de producción.

Palabras Clave: Moldes para plástico, Manufactura Aditiva, PolyJet, ABS digital.

ABSTRACT

For this project, the use of additive manufacturing is analyzed as a faster and cheaper alternative for the manufacture of molds that are used for the production of plastic bottles. From what is investigated and selected from the literature, among the processes of forming plastics, the most suitable; feasible additive manufacturing technology; and the most suitable material for the manufacture and design of the mold. And the results were obtained that the blowing process, the PolyJet additive manufacturing technology, and the digital ABS material are feasible for the manufacture and functionality of these molds. In addition, the respective mold was designed for a 300 ml bottle, and it was analyzed using the finite element technique with the selected additive manufacturing material, in the Inventor software, and it was obtained that the maximum stress in the mold is 4.6 MPa, with static loads applied corresponding to a pressure of 0.45 MPa characteristic in the blowing processes. Also, the durability of the mold was estimated, by comparing fatigue graphs of the ABS material with the maximum stress value obtained, giving an approximation of 200,000 cycles. For these reasons, it can be concluded that molds can be produced using PolyJet technology to be used in blowing processes for the manufacture of plastic bottles for low production demands, or as the use of prototyping, giving benefits of savings in costs and time of production.

Keywords: Additive manufacturing, blow molding, PolyJet, Digital ABS.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE PLANOS.....	X
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Justificación del problema.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Procesos de moldeo de plástico.....	3
1.4.2 Manufactura aditiva	6
1.4.3 Tecnologías de MA de especial interés.....	9
1.4.3.1 Tecnología de Fotopolimerización con láser o Estereolitografía (SLA).....	9
1.4.3.2 Tecnología de Fotopolimerización por proyección por máscara (DLP).....	11
1.4.3.3 Tecnología de Modelado por deposición fundida (FDM)	12
1.4.3.4 Tecnología de Binder Jetting	14
1.4.3.5 Tecnología de PolyJet	15
CAPÍTULO 2	17

2.	Metodología.....	17
2.1	Metodología de diseño.....	17
2.2	Criterios de diseño	18
2.3	Objetivos de diseño	19
2.4	Análisis de funciones	23
2.5	Alternativas de solución	24
2.6	Selección de las mejores alternativas de solución.....	24
2.7	Guía de aplicación técnica para moldes PolyJet para moldeo por soplado ..	28
2.8	Diseño del molde	29
2.9	Características del montaje.....	30
2.10	Preparación del molde	32
2.11	Ensamblaje del molde.....	32
2.12	Consideraciones clave en el proceso	33
2.13	Detalles de resolución.....	34
2.14	Modelo del molde en 3D	35
2.15	Análisis por elementos finitos.....	36
2.15.1	Análisis de esfuerzos estáticos	37
2.15.2	Parámetros utilizados en la simulación	38
2.16	Análisis de fatiga del molde	41
2.16.1	Máquina de ensayo de fatiga	44
2.16.2	Estandarización de la probeta	45
CAPÍTULO 3		47
3.	Resultados Y ANÁLISIS	47
3.1	Resultados de diseño	47
3.2	Análisis de costos	48
3.2.1	Caso de estudio 1	48
3.2.2	Caso de estudio 2	49

3.2.3	Evaluación de costos del proyecto	50
CAPÍTULO 4		53
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	53
4.1	Conclusiones	53
4.2	Recomendaciones	54
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
MA	Manufactura Aditiva
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
3D	Tres Dimensiones
CAD	Diseño Asistido por Computadora
DLP	Procesamiento Digital de Luz
FDM	Deposición Fundida de Moldeo
SLA	Estereolitografía
UV	Ultravioleta

SIMBOLOGÍA

g	Gramo
N	Newton
°C	Grado centígrado
cm	Centímetro
MPa	Mega Pascal
\$	Dólar
mm	Milímetro
in	Pulgada
ft lb/in	Pie libra/pulgada
J/m	Joule/metro
°F	Grado Fahrenheit
g/cm ³	Gramo/centímetro cúbico
psi	Libra sobre pulgada cuadrada
m	Metro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Conformado de plástico por extrusión	3
Figura 1.2 Conformado de plástico por inyección.....	4
Figura 1.3 Productos del proceso de moldeo por soplado	5
Figura 1.4 Inyección por soplado.....	6
Figura 1.5 Pasos genéricos en la impresión 3D	7
Figura 1.6 Utilización de la manufactura aditiva vs procesos CNC	8
Figura 1.7 Proceso de estereolitografía.....	10
Figura 1.8 Máquinas de SLA (Ilios HD, Form 3L)	11
Figura 1.9 Tecnología DLP (Digital light processing).....	12
Figura 1.10 Proceso de modelado por deposición fundida (FDM).....	13
Figura 1.11 Binder Jetting.....	14
Figura 1.12 Proceso PolyJet.....	15
Figura 1.13 Tecnología PolyJet.....	16
Figura 2.1 Metodología de diseño	17
Figura 2.2 Montado independiente molde PolyJet.....	31
Figura 2.3 Molde PolyJet montado en molde base.....	31
Figura 2.4 Molde montado en carcasa metálica	32
Figura 2.5 Modelado 3D en Inventor Autodesk	36
Figura 2.6 Diagrama de cargas aplicadas en el Molde.....	36
Figura 2.7 Esfuerzo de Von Mises en el Molde	39
Figura 2.8 Análisis de elementos finitos en el Molde	40
Figura 2.9 Esfuerzo Máximos de Von Mises en el Molde.....	40
Figura 2.10 Geometría que muestra orientaciones en los diferentes ejes.....	43
Figura 2.11 Las curvas SN durante la carga uniaxial a tensión.....	44
Figura 2.12 Estructura de la máquina para ensayos de fatiga.....	45
Figura 2.13 Clases de probetas para ensayos de fatiga en polímeros.....	46
Figura 2.14 Dimensiones de probetas para ensayos de fatiga en polímeros	46
Figura 3.1 Estimación del número de ciclos bajo la resistencia.....	47
Figura 3.2 Soplado de plástico con molde impreso en PolyJet	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de los atributos del diseño	19
Tabla 2.2 Clasificación de objetivos de diseño	19
Tabla 2.3 Puntuaciones de ponderación	20
Tabla 2.4 Objetivos de diseño jerarquizados.....	20
Tabla 2.5 Matriz jerarquizada de objetivos de Desempeño	20
Tabla 2.6 Matriz jerarquizada de objetivos de Apariencia	21
Tabla 2.7 Matriz jerarquizada de objetivos de Costo.....	21
Tabla 2.8 Matriz jerarquizada de objetivos de Seguridad.....	21
Tabla 2.9 Requerimientos del usuario final pesadas y ordenas jerárquicamente.....	22
Tabla 2.10 Matriz de decisión del Proceso de Moldeo	25
Tabla 2.11 Matriz de decisión del tipo de material.....	25
Tabla 2.12 Matriz de decisión de la tecnología de MA	25
Tabla 2.13 Parámetros a considerar para el diseño en el proceso de conformado...	26
Tabla 2.14 Parámetros de Tecnología MA PolyJet	27
Tabla 2.15 Propiedades del material ABS Digital	28
Tabla 2.16 Obstáculos de adopción a producción de tecnología PolyJet.....	29
Tabla 2.17 Obstáculos comunes y soluciones en proceso de soplado	34
Tabla 2.18 Parámetros utilizados en la simulación.....	39
Tabla 3.1 Comparativo de un molde de aluminio y un molde PolyJet	48
Tabla 3.2 Detalles para la fabricación de molde PolyJet	48
Tabla 3.3 Comparativo de un molde de acero y un molde PolyJet.....	49
Tabla 3.4 Costo de la tecnología PolyJet	50
Tabla 3.5 Ingresos	50
Tabla 3.6 Valor de producción.....	50
Tabla 3.7 Costos de producción	51
Tabla 3.8 Masa de la pieza del molde	51
Tabla 3.9 Costo de materia prima ABS Digital	52
Tabla 3.10 Cantidad de producción semanal, mensual y anual por molde	52

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Molde MA
- PLANO 2 Botella PET 300 ml
- PLANO 3 Molde macho PolyJet
- PLANO 4 Molde hembra PolyJet Bocín aluminio
- PLANO 5 Bocín aluminio
- PLANO 6 Placa de sujeción

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Actualmente las empresas manufactureras de plásticos utilizan equipos y herramientas especializadas para la fabricación de moldes con geometrías complejas, por lo que representa un alto costo de dicho molde y un tiempo elevado para su fabricación (desde 1 hasta 3 meses).

1.2 Justificación del problema

Diversas empresas ecuatorianas como Seinpack, FADESA, IPESA, Tecnoplast, y entre otras, ofrecen productos plásticos fabricados mediante el proceso de moldeado por soplado, que utiliza la presión del aire para expandir el plástico en la cavidad de un molde. Estos moldes pueden ser de diferentes materiales existentes en el mercado actual: acero, aluminio, resina, y plástico.

Y las empresas que fabrican estas piezas de plástico, utilizan principalmente moldes de acero y de aluminio, que son costosos (decenas de miles de dólares) y tardan un tiempo considerable (hasta 3 meses) en su fabricación, por ser productos importados y por tener geometrías complejas realizadas a través de los procesos de mecanización convencionales, como el torneado y fresado.

Por estas razones, se propone el uso de la manufactura aditiva (MA) como una alternativa económica y rápida para la fabricación de estos moldes, en producciones de baja demanda, lo cual podría generar ahorro en costos de producción y reducción de tiempo en la obtención del molde.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y verificar mediante simulación el molde para una botella plástica fabricada con el uso de Manufactura Aditiva.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Analizar la factibilidad de construcción por MA de los diferentes moldes para fabricación de plásticos. Dando a conocer una aplicación de este tipo de manufactura en el campo de los plásticos.
2. Analizar los materiales de MA más adecuados para la fabricación de moldes para producción de plásticos.
3. Verificar mediante el método de elementos finitos la funcionalidad del molde para fabricación de plásticos desarrollado por MA.

1.4 Marco teórico

Existe una gran variedad de procesos de moldeo para obtener productos plásticos, entre ellos los más usuales en la producción de consumo comercial e industrial son: moldeo por extrusión, moldeo por inyección, y el moldeo por soplado. Cada una de estas tecnologías tiene variaciones en su procesamiento y por lo cual se le da diversos nombres.

Básicamente, en todos estos procesos intervienen tres factores: la materia prima en forma de pellets, gránulos o polvo de algún tipo de polímero, una máquina encargada de procesar el pellet (figura 1.1), y un molde o matriz, que le da forma al producto final: envases, utilería de jardinería, etc.

En los apartados siguientes se tratará las características y aplicaciones principales.

1.4.1 Procesos de moldeo de plástico

1.4.1.1 Proceso de moldeo por extrusión

Este proceso contempla la mayor cantidad de plásticos producidos. Aquí, la materia prima es suministrada a una tolva que alimenta a un cilindro de un extrusor de tornillo helicoidal, que por la fricción ejercida calienta y funde los pellets y los dirige hacia la matriz (un dado, parte que le da forma al producto final). Ver la figura 1.4.

La calidad del producto extruido depende del diseño del extrusor y de los dados. Los diversos productos tienen características alargadas en forma continua: barras redondas y de diversas secciones: canales, hojas, tuberías, etc.

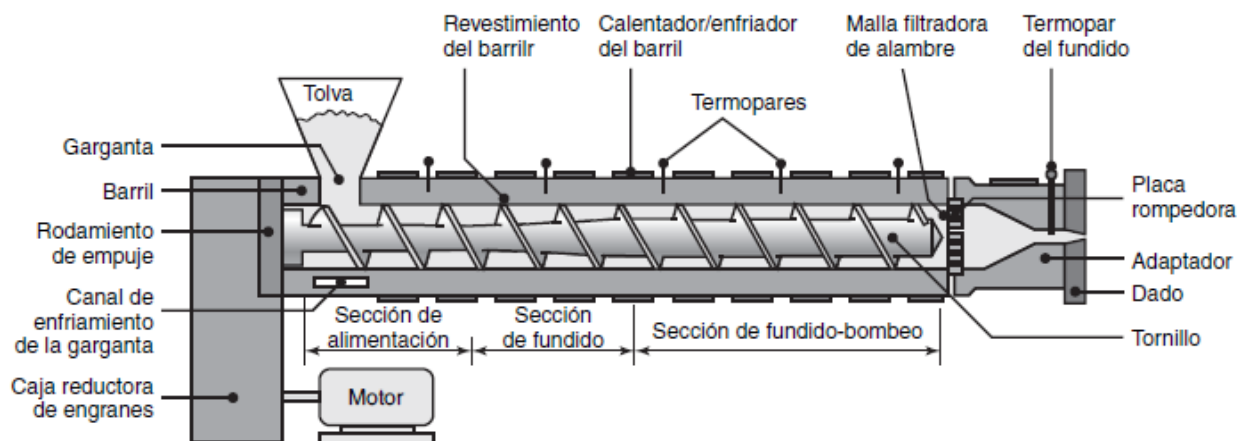


Figura 1.1 Conformado de plástico por extrusión

Fuente: (S. Kalpakjian, 2008)

1.4.1.2 Proceso de moldeo por inyección

En el moldeo por inyección, los pellets se colocan en una tolva dirigida hacia una cámara caliente y el material fundido es forzado a fluir hacia un molde a través de la acción de un sistema extrusor (tornillo giratorio alternativo o plastificante). Las partes de este proceso se pueden observar en la figura 1.2.

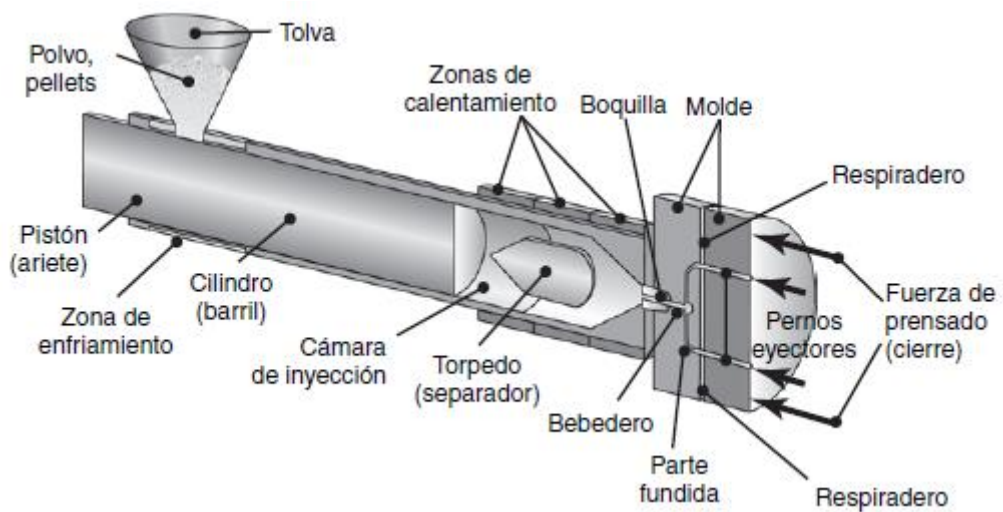


Figura 1.2 Conformado de plástico por inyección

Fuente: (S. Kalpakjian, 2008)

Las presiones desarrolladas dentro del cilindro caliente están comprendidas entre 70 a 200 MPa. Y las temperaturas que se alcanzan dentro de los moldes, dependen de si el polímero es un termoplástico o un termofijo: 90°C y 200°C, respectivamente.

El proceso de producción es de alta velocidad, permitiendo una buena precisión dimensional de la pieza final. Los ciclos de producción van de 5 a 60 segundos por parte, pero este tiempo varía si el material es un termofijo. El peso de las partes va de 100 a 600 g (aunque también pueden ser más elevadas para otras aplicaciones), siendo los productos más comúnmente fabricados: juguetes, envases, perillas y equipamiento eléctrico (S. Kalpakjian, 2008).

1.4.1.3 Proceso de Moldeo por soplado

El proceso de moldeo por soplado es el tercer método más empleado para el procesado de piezas plásticas (ver figura 1.3). Este empezó con la fabricación de botellas plásticas, sin embargo, en la actualidad es capaz de producir piezas mucho más complejas dependiendo de varios factores como: su geometría irregular, espesor de pared, y el material.

Este proceso se utiliza frecuentemente para la fabricación de productos de plásticos huecos.

Dentro del enfoque del proyecto nos enfocamos en 2 procesos que existen en el moldeo por soplado:

Moldeo por soplado-inyección.

Moldeo por soplado-extrusión.



Figura 1.3 Productos del proceso de moldeo por soplado

Fuente: (Maxtech, 2017)

1.4.1.3.1 Moldeo por soplado-inyección

En el proceso de soplado por inyección, las piezas de plástico huecas se logran formar gracias a una expansión del material, donde la presión ejercida en las paredes de la preforma logran moldear la pieza adecuada.

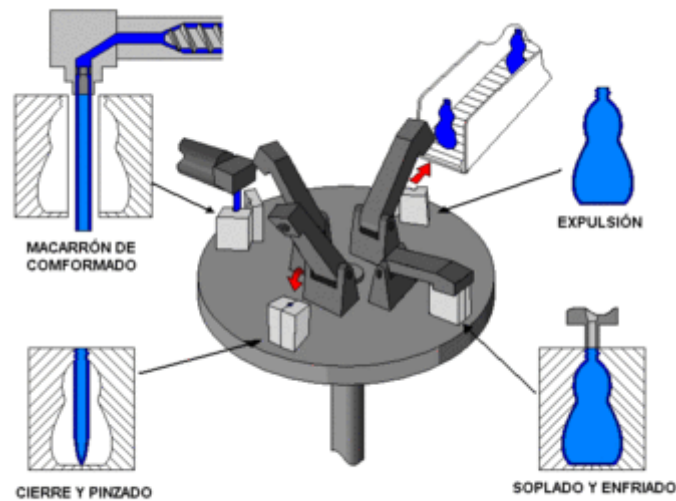


Figura 1.4 Inyección por soplado

Fuente: (Osorio, 2012)

1.4.1.3.2 Moldeo por soplado-extrusión

En el proceso de soplado por extrusión, el material al soplarse a través de la preforma es extruido para formar el polímero con forma de cilindro, donde este se encuentra dentro del molde, y en su interior se ejerce presión de aire lo que da lugar a su forma.

1.4.2 Manufactura aditiva

La manufactura aditiva es conocida por sus siglas MA, y “recientemente adoptado oficialmente por el organismo de normalización ASTM International” (Acevedo, 2016). Y es un proceso que genera objetos en 3 dimensiones (3D), basado en un modelo CAD (Computer Aided Design, por sus siglas en inglés) que procesa en forma de datos a una escala micrométrica, y genera el modelo real en 3D por superposición de filamentos de distintos materiales.



Figura 1.5 Pasos genéricos en la impresión 3D

Fuente: (3dprintcdmx, 2018)

La utilización de los sistemas CAD, han ido desarrollando muchas más tecnologías que reemplazarían a los antiguos modelos de oficinas técnicas. Esta creciente era de digitalización en los últimos años, ha realizado varios cambios en distintos sectores de la industria de la comunicación, medicina, mantenimiento y construcción. La producción en las industrias se ha ido beneficiando por el uso de sistemas de simulación ingenieril (CAE, por sus siglas en inglés) permitiendo innovar y mejorar la calidad de los productos (Romero, 2017).

Los procesos de fabricación convencionales, como el conformado en caliente o en frío; arranque de viruta; moldeo y fundición, se limitan para la creación de nuevos productos, aún con los grandes avances de estas tecnologías, y las limitaciones geométricas en la fabricación de diferentes piezas hacen que sea necesaria la intervención de tecnología de producción que ofrecen los sistemas CAD.

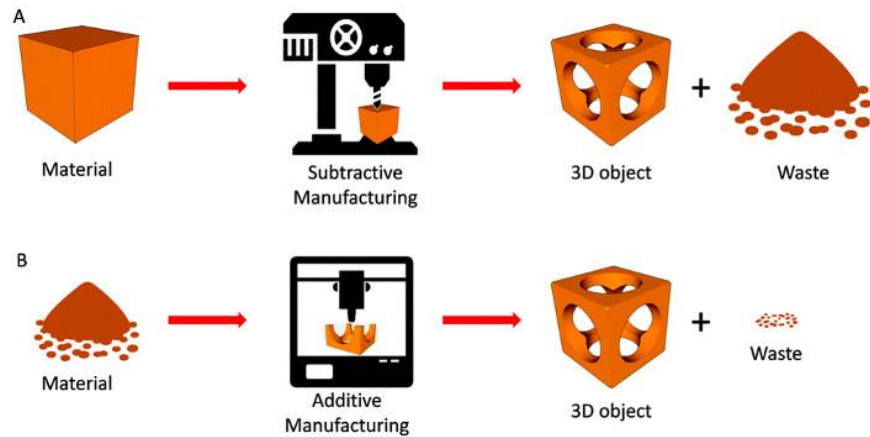


Figura 1.6 Utilización de la manufactura aditiva vs procesos CNC

Fuente: (Contreras, 2018)

La aplicación de MA es ilimitada y abarca modelos de preproducción y un sinnúmero de aplicaciones, tales como: implantes médicos, automóviles, aeronaves, e incluso productos para la moda (Amazing AM, LLC, 2019).

La tecnología de MA se adapta a varias necesidades: la visualización de un producto diseñado, ya sea como un medio para la creación de productos personalizados; una herramienta para la industria; lotes de producción de baja demanda; y, puede que algún día, órganos humanos para trasplantes quirúrgicos (Amazing AM, LLC, 2019).

Pareciera que todas las máquinas de manufactura aditiva emplean el mismo método de fabricación, pero existen diferencias en cuanto a:

- Materiales empleados en la pieza de fabricación
- La creación de capas
- La unión de una capa con otra

Las propiedades mecánicas del material, el acabado superficial y su exactitud con respecto al modelo CAD, son diferencias que determinarán los factores requeridos por las máquinas, así como el tiempo de fabricación y el costo total del proceso.

1.4.3 Tecnologías de MA de especial interés

Se ha considerado pertinente investigar ciertas tecnologías que pueden ser notables para el sector de la fabricación de plásticos, específicamente para los moldes utilizados para el proceso de soplado.

En este proyecto se tomará en cuenta “el sector de fabricación de moldes para plásticos en el proceso de soplado” destacando las siguientes características técnicas:

- Tecnologías que puedan emplearse para la fabricación de moldes de alta calidad superficial, las cuales satisfagan las exigencias del sector de plásticos.
- Tecnologías cuyos materiales utilizados sean característicos del sector de moldes para soplado de plástico. Dichos materiales son principalmente metálicos (acero, aluminio, aleaciones de bronce y aluminio, cobre, grafito) y aleaciones especiales, sin embargo, el objetivo del proyecto es analizar el uso de la manufactura aditiva utilizando materiales que estén en la gama de las tecnologías para manufactura aditiva.
- Tecnologías que permitan fabricar geometrías complejas para los materiales dados.

Aunque habrá características destacadas, se tomará en cuenta las consideraciones del costo, el tiempo del proceso de fabricación, y los materiales; y con las mismas, se analiza las tecnologías presentadas anteriormente.

1.4.3.1 Tecnología de Fotopolimerización con láser o Estereolitografía (SLA)

En esta tecnología (SLA es acrónimo de eStereLitogrAfía) el objeto es fabricado sobre una superficie plana horizontal, en donde se sumerge sobre resina foto polimérica líquida y direccionando un haz de luz sobre

la resina, esta es solidificada, y a su vez, el material foto polimérico permite restringir el grosor de las capas desde 0.1 a 0.2 mm. Al solidificar cada capa de resina, la bandeja se sumerge la misma distancia que se solidificó para que una nueva capa sea trabajada de la misma manera hasta obtener el objeto requerido.

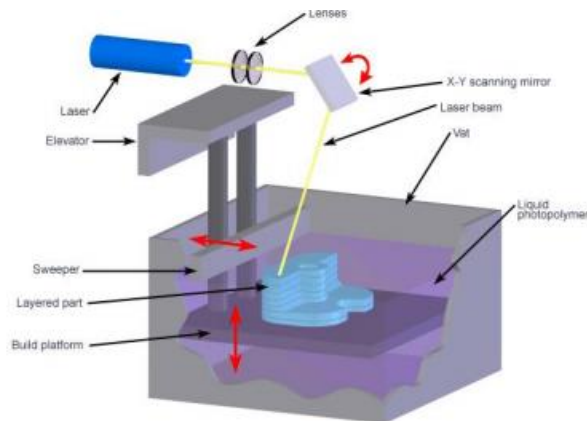


Figura 1.7 Proceso de estereolitografía

Fuente: (Xataka, 2015)

Ventajas y desventajas del proceso:

Una de las mayores ventajas es la rápida velocidad del proceso. La fabricación de una pieza puede durar desde una hora o más de un día, dependiendo de su complicación geométrica y de su tamaño. En el proceso, el acabado superficial de la pieza final es bastante bueno. La mayoría de los equipos podrían fabricar piezas de volúmenes de máximo 50 x 50 x 60 cm, aunque pueden llegar hasta 210 x 70 x 80 cm. Este proceso también fabrica piezas suficientemente duras para poder maquinarlas, y también se utiliza para la fabricación de moldes en los procesos de inyección de plástico, proceso de soplado, termoformado y forja.

Sin embargo, las resinas utilizadas en el proceso de SLA, son relativamente caras, y pueden tener más fragilidad y menor flexibilidad

que las resinas utilizadas en la tecnología SLS (que se verá más adelante). Y también, los objetos obtenidos mediante esta tecnología son perceptibles al deterioro por humedad del ambiente y a la temperatura.



Figura 1.8 Máquinas de SLA (Ilios HD, Form 3L)

Fuente: Izq (Ingenio Triana, 2018)

Der (Formlabs, 2019)

1.4.3.2 Tecnología de Fotopolimerización por proyección por máscara (DLP)

Esta tecnología es conocida por sus siglas en inglés, como DLP (Digital light processing), y trabaja de la misma manera que la SLA, pero no utiliza láser ultravioleta (UV), sino más bien, emplea un sistema de proyección por máscara que consiste en ubicar la resina en una placa de cristal, y luego ésta se expone ante una imagen proyectada por el DLP de la parte inferior de la máquina, la cual comienza un proceso de curación. Una vez terminada la capa, la placa de cristal sube, y una nueva capa de resina fluye, y la placa vuelve a bajar hasta que la capa sólida se una a la resina líquida y continúe el proceso. Este método puede resultar más rápido que la estereolitografía.

El proceso en general utiliza resinas plásticas curables por UV. Muchas compañías usan esta tecnología para la fabricación de moldes de silicona y realizar colada al vacío con resinas de poliuretano.

Ventajas y desventajas del proceso:

Es la mejor opción para prototipado rápido, por su alta precisión y resolución, y sus buenos acabados superficiales. Debido a su buena resolución puede desarrollar piezas de alta complejidad de forma. Aunque cada vez mejoran las propiedades mecánicas de las resinas utilizadas para la fabricación de piezas, la realidad es que los fotopolímeros son frágiles mecánicamente. Sin embargo, son materiales duros como para ser mecanizados. Otro inconveniente de esta tecnología, es que se requiere del uso de estructuras que soporten la impresión y el post proceso de endurecimiento.



Figura 1.9 Tecnología DLP (Digital light processing)

Fuente: (Ingenio Triana, 2018)

1.4.3.3 Tecnología de Modelado por deposición fundida (FDM)

El modelado por deposición fundida (Fused Deposition Modeling, por sus siglas en inglés) se basa en la deposición de un material termoplástico fundido a que fluye por un cabezal de extrusión con regulación de temperatura, el cual va formando el objeto capa por capa sobre una

superficie plana. Cada capa se temple al depositarse sobre la superficie de la capa anterior y así se va generando la pieza hasta su totalidad.

El material empleado en la fabricación determina el espesor mínimo de capa, en el caso del Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS por sus siglas en inglés: Acrylonitrile Butadiene Styrene) va de 0.13 - 0.25 mm, y en el caso del policarbonato (PC) es de 0.18 - 0.25 mm.

La tecnología tiene una variedad de materiales termoplásticos compatibles, y además una gran variedad de colores disponibles, como el azul y el verde.

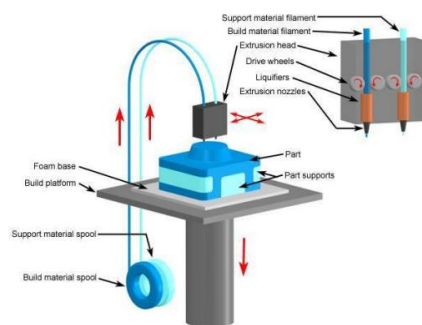


Figura 1.10 Proceso de modelado por deposición fundida (FDM)

Fuente: (Contreras, 2018)

Ventajas y desventajas del proceso:

El proceso utiliza termoplásticos ABS y PC, lo cual conlleva a que posea buenas propiedades estructurales. Las impresoras FDM poseen la mejor relación calidad-costos para producción en pocas cantidades. Sin embargo, tienen una velocidad del proceso y su precisión muy baja, comparado a las otras clases de manufactura aditiva, donde la última depende del tamaño de la boquilla.

1.4.3.4 Tecnología de Binder Jetting

La tecnología fue desarrollada por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en los años 90, y utiliza 2 clases de materiales: un material en polvo (que puede ser polímero o cerámico), y un tipo de aglutinante, normalmente en estado líquido. El material en polvo es depositado sobre una superficie plana en forma de capa, luego la máquina se traslada por el patrón de la pieza, donde va inyectando material aglutinante donde sea preciso, y terminada la primera capa la superficie plana desciende para comenzar la segunda capa. Cada capa tiene un espesor mínimo variando entre 0,013-0,076 mm.

Ventajas y desventajas del proceso:

Como ventaja de esta tecnología es que al variar los distintos tipos de materiales (ABS, PC, y poliamida o PA) y aglutinantes, podemos variar y obtener propiedades mecánicas diferentes, de acuerdo a la necesidad. Aunque su proceso es rápido, algunas piezas deben ser sometidas a procesos posteriores, por lo que se suma el tiempo de fabricación, y no siempre es adecuado para piezas estructurales debido al aglutinante.

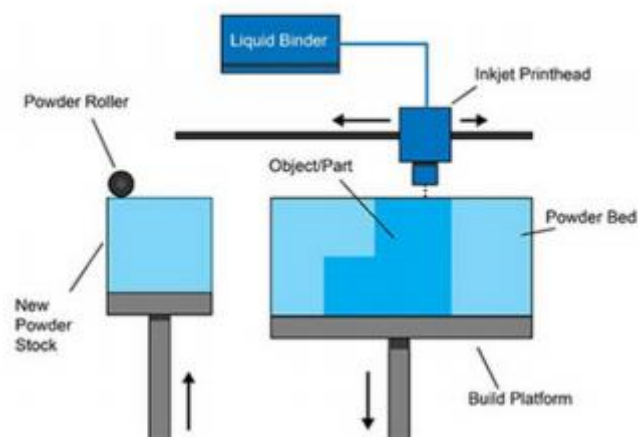


Figura 1.11 Binder Jetting

Fuente: (Loughborough, 2019)

1.4.3.5 Tecnología de PolyJet

La tecnología se asemeja a la impresión en dos dimensiones (2D) convencional, que consiste en la deposición de material por inyección de gotas, comúnmente utilizando fotopolímero.

Por medio de múltiples inyectores, estos curan el material al entrar en contacto con luz UV. Ciertos modelos de impresoras incluyen otro material aparte del fotopolímero que actúa de soporte para después ser removido, debido a su solubilidad.

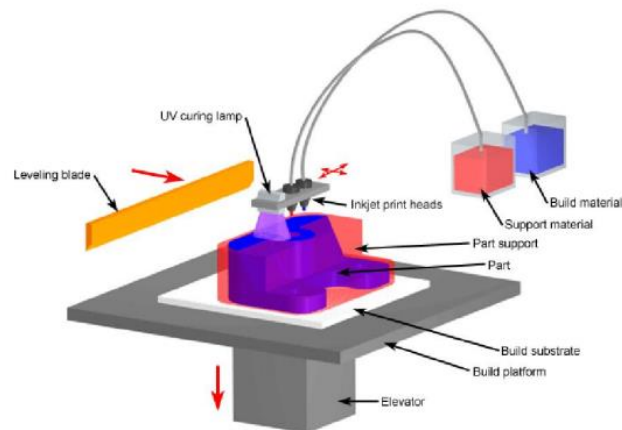


Figura 1.12 Proceso PolyJet

Fuente: (Loughborough, 2019)

Ventajas y desventajas del proceso

La tecnología cuenta con una variedad de materiales que pueden ser utilizados, tales como: resinas translúcidas, resinas elásticas, polipropileno (PP) o ABS. El espesor mínimo de la capa es de 0.017 mm.

Cabe destacar que la tecnología PolyJet fue desarrollada por la empresa Stratasys. Y el proceso de funcionamiento es el siguiente:

- Proceso previo: El proceso parte del archivo CAD 3D, en donde el software de preparación obtiene el material del archivo y también realiza el cálculo de la ubicación de los fotopolímeros.

- Producción: La tecnología se basa en la inyección de gotas de fotopolímeros que son curados instantáneamente por luz UV. Este acumula capas finas en la bandeja de construcción para poder crear la pieza en 3D. En el caso de que sean piezas complejas que requieran soportes, la tecnología es capaz de inyectar un material similar a un gel, que puede ser retirado posteriormente.
- Eliminación del soporte: El material soporte es eliminado con agua o por el usuario. Y luego, las piezas están listas sin necesidad de un proceso posterior.

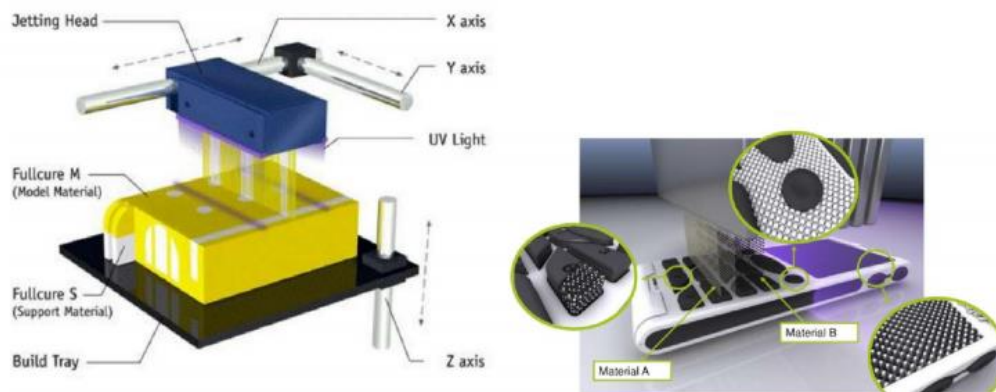


Figura 1.13 Tecnología PolyJet

Fuente: (3D Additive Fabrication, 2019)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Metodología de diseño

El procedimiento que se siguió para el análisis de diseño para la fabricación de un molde por MA se puede observar en la Figura 2.1. Este proceso es iterativo en cada una de sus fases, lo que significa que a medida que se avanza en el análisis, los resultados preliminares permiten retroceder a un escenario previo.

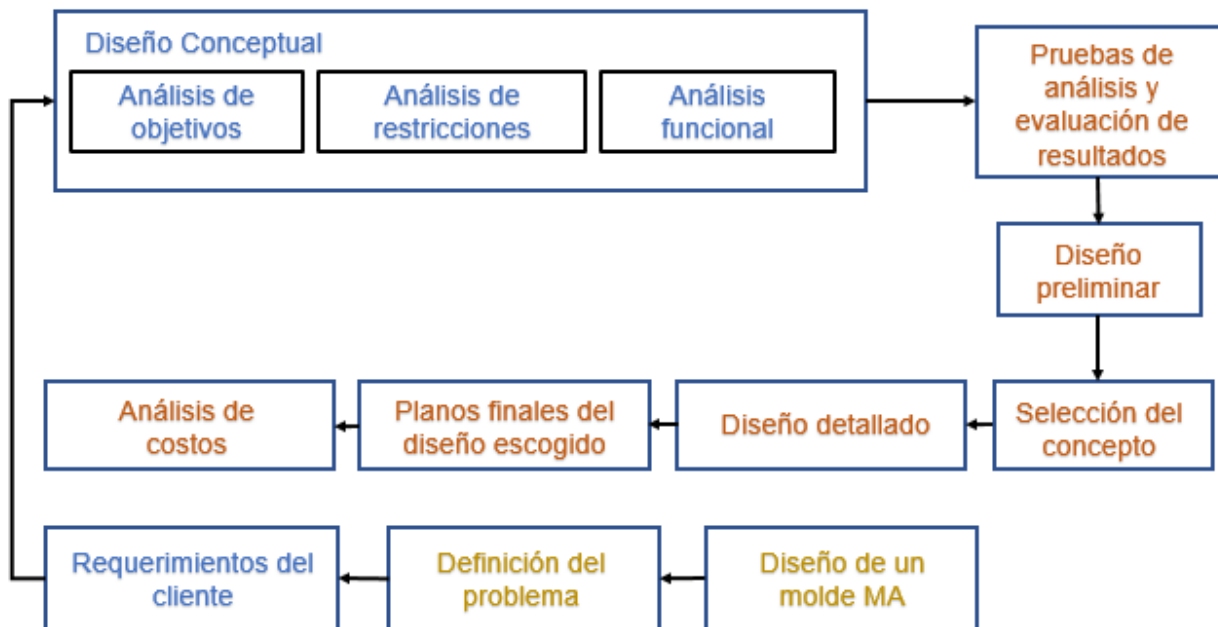


Figura 2.1 Metodología de diseño

Fuente: Elaboración propia

La primera etapa es la identificación de las necesidades del cliente para establecer una lista de atributos requeridos en el molde: es decir, las aplicaciones de interés del molde de plástico. Luego, la búsqueda de parámetros de funcionamiento en la literatura existente acerca de los tipos de conformado de plástico, para seleccionar el proceso que permite la correcta operación del molde fabricado por MA. Después, realizar una investigación

sobre las tecnologías de MA actuales y así como también el material con el cual cada una de estas tecnologías trabajan.

De esta manera, conociendo el tipo de conformado de plástico, la tecnología de MA, y el material plástico utilizado en MA, se seleccionó la mejor alternativa para cada proceso, en base a criterios de diseño que se especifican en la siguiente sección.

2.2 Criterios de diseño

Para poder definir los criterios de diseño, primero se realizó una lista preliminar de atributos de diseño que debe poseer el molde fabricado bajo MA en función de las necesidades del usuario final y de los requerimientos encontrados en el estudio de la literatura relacionada:

- Alcanzar requerimientos de esfuerzo y temperatura
- Bajo costo de producción
- Bajo costo de mantenimiento
- Durabilidad
- Dimensiones máximas: 30 x 30 x 30 cm (para botella de 300 ml)
- Buen acabado superficial
- No ser inflamable
- No tener filos vivos
- Costo del molde no mayor a \$1500
- Sostener la preforma plástica
- Moldear botellas plásticas

Luego, estas necesidades se las categorizó en objetivos, funciones y restricciones, tal como se puede observar en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de los atributos del diseño

Objetivos	Funciones	Restricciones
Alcanzar requerimientos de esfuerzo y temperatura	Moldear botellas plásticas	Máxima altura 30 cm
Durabilidad	Sostener la preforma plástica	Costo del molde no mayor a \$1.500
No ser inflamable		
Dimensiones máximas		
Resistente a la corrosión		
Buen acabado superficial		
Bajo costo de producción		
Bajo costo de mantenimiento		
No tener filos vivos		

Fuente: Elaboración propia

Los objetivos de esta tabla se los clasificó (tabla 2.2) en base a criterios de desempeño, seguridad, apariencia, y costo, los mismos que fueron pesados mediante el uso de matrices de ponderación.

Tabla 2.2 Clasificación de objetivos de diseño

Desempeño	Seguridad	Apariencia	Costo
Alcanzar requerimientos de esfuerzo y temperatura	No ser inflamable	Dimensiones máximas	Bajo costo de producción
Durabilidad		Resistente a la corrosión	Bajo costo para el cliente
		Buen acabado superficial	

Fuente: Elaboración propia

2.3 Objetivos de diseño

Los criterios de los objetivos fueron jerarquizada a través de una matriz de ponderación como se puede observar en la tabla 2.3. En la tabla 2.2 se

muestra la escala del 1 al 10 utilizada, en donde 1 significa un valor de igual importancia y 10, de mayor relevancia.

Tabla 2.3 Puntuaciones de ponderación

Ponderación				
Igualmente importante	Más importante	Muy importante	Menos importante	Poco importante
1	5	10	1/5	1/10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.4 Objetivos de diseño jerarquizados

Criterio de selección	Desempeño	Apariencia	Costo	Seguridad	Total	Peso
Desempeño	1	5	7	7	20	0.49
Apariencia	0.20	1	5	7	13	0.33
Costo	0.14	0.20	1	5	5.8	0.14
Seguridad	0.14	0.14	0.20	1	1.5	0.04
				Total neto	40.53	1.00

Fuente: Elaboración propia

Este mismo procedimiento se repite para evaluar la importancia relativa de cada uno de los atributos de diseño de cada categoría, es decir, para el desempeño, la apariencia, el costo y el tamaño.

Tabla 2.5 Matriz jerarquizada de objetivos de Desempeño

Criterio	1.1	1.2	Total	Peso relativo	Peso absoluto
1.1	1	5	6.00	0.83	0.41
1.2	0.20	1	1.20	0.17	0.08
		Total neto	7.20	1.00	0.49

Fuente: Elaboración propia

Criterios
1.1 Alcanzar requerimientos de esfuerzo y temperatura
1.2. Durabilidad

Tabla 2.6 Matriz jerarquizada de objetivos de Apariencia

Criterio	2.1	2.2	2.3	Total	Peso relativo	Peso absoluto
2.1	1	5	10	16.00	0.66	0.21
2.2	0.20	1	5	6.20	0.25	0.08
2.3	1.00	0.20	1	2.20	0.09	0.03
Total neto				24.40	1.00	0.33

Fuente: Elaboración propia

Criterios

- 2.1. Buen acabado superficial
- 2.2. Resistente a la corrosión
- 2.3. Dimensiones máximas: 50 x 50 x 50 cm

Tabla 2.7 Matriz jerarquizada de objetivos de Costo

Criterio	3.1	3.2	Total	Peso relativo	Peso absoluto
3.1	1	10	11.00	0.91	0.13
3.2	0.10	1	1.10	0.09	0.01
Total neto			12.10	1.00	0.14

Fuente: Elaboración propia

Criterios

- 3.1. Bajo costo de producción
- 3.2. Bajo costo de mantenimiento

Tabla 2.8 Matriz jerarquizada de objetivos de Seguridad

Criterio	4.1	4.2	Total	Peso relativo	Peso absoluto
4.1	1	8	9.00	0.89	0.03
4.2	0.13	1	1.13	0.11	0.00
Total neto			10.13	1.00	0.04

Fuente: Elaboración propia

Criterios

- 4.1. No ser inflamable
- 4.2. Filos vivos

Tabla 2.9 Requerimientos del usuario final pesadas y ordenas jerárquicamente

<p>1. Desempeño (0.49)</p> <p>1.1. Alcanzar requerimientos de esfuerzo y temperatura</p> <p>1.2. Durabilidad</p>	<p>2. Apariencia (0.33)</p> <p>2.1. Buen acabado superficial</p> <p>2.2. Resistente a la corrosión</p> <p>2.3. Dimensiones máximas: 30 x 30 x 30 cm</p>
<p>3. Costo (0.14)</p> <p>3.1. Bajo costo de producción</p> <p>3.2. Bajo costo de mantenimiento</p>	<p>4. Seguridad (0.04)</p> <p>4.1. No ser inflamable</p> <p>4.2. Filos vivos</p>

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los objetivos de diseño se muestran jerarquizados en la Fig. 2.2. donde se muestra el árbol de objetivos de nuestro diseño.

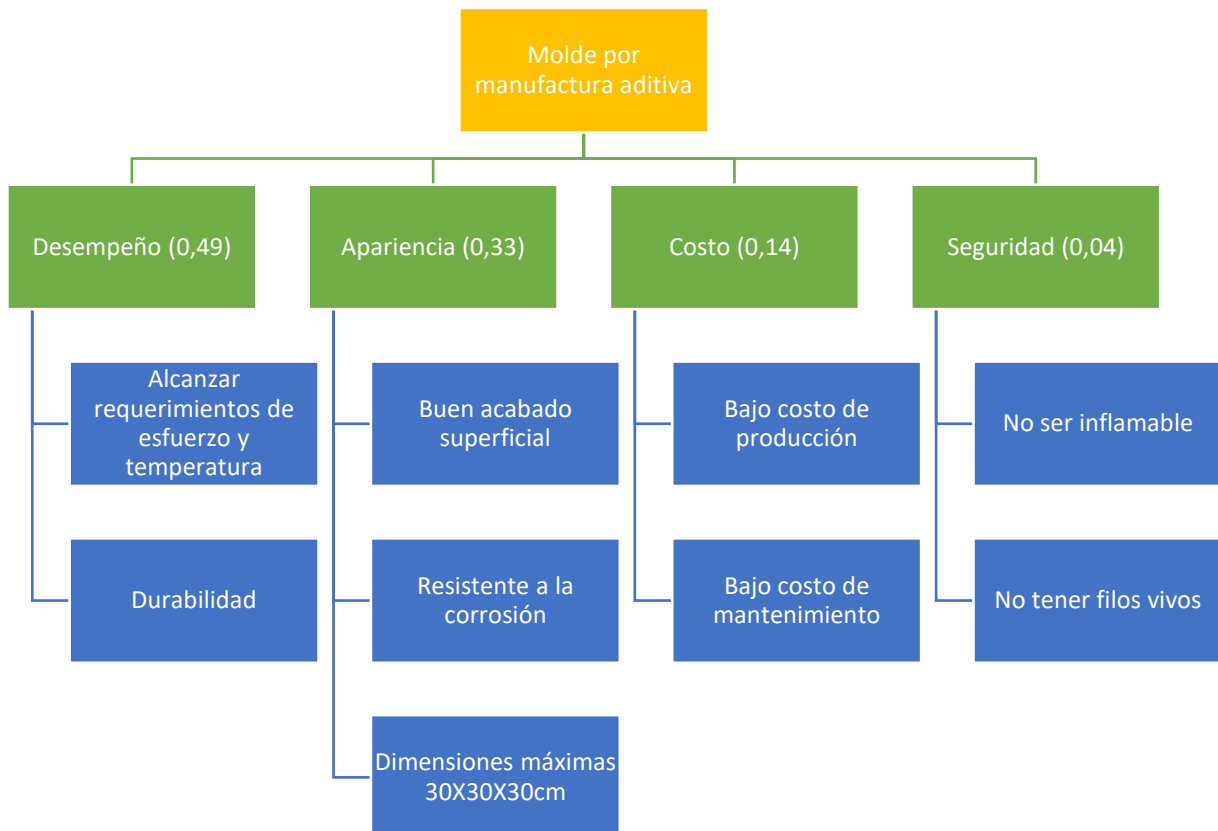


Figura 2.2 Árbol de objetivos jerarquizados

Fuente: Elaboración propia

2.4 Análisis de funciones

En la siguiente sección analizaremos las funciones que debe tener nuestro diseño, para poder llegar a nuestro diseño conceptual. Para lo siguiente se realiza una caja negra y caja transparente para mostrar las funciones y sus variables dependientes e independientes mostrados en la figura

Luego de obtener nuestra caja negra con las entradas y salidas de nuestro diseño, se procede a realizar la caja transparente para poder colocar las subfunciones.



Figura 2.3 Caja negra del molde

Fuente: Elaboración propia

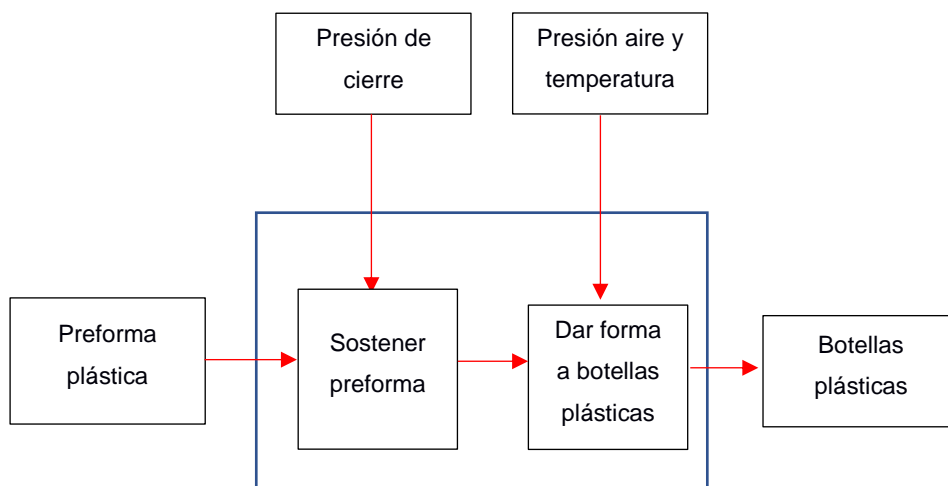


Figura 2.4 Caja transparente del molde por manufactura aditiva

Fuente: Elaboración propia

2.5 Alternativas de solución

Para el análisis de factibilidad de la fabricación del molde por MA se realizó una lista de atributos deseadas del molde, la misma que se mostró en la tabla 2.8.

Y se procedió a analizar mediante el uso de una Carta morfológica mostrada en la figura 2.5, las diferentes alternativas para seleccionar el proceso de moldeo; la tecnología de MA; y el material plástico, para cumplir con los objetivos de diseño del molde.

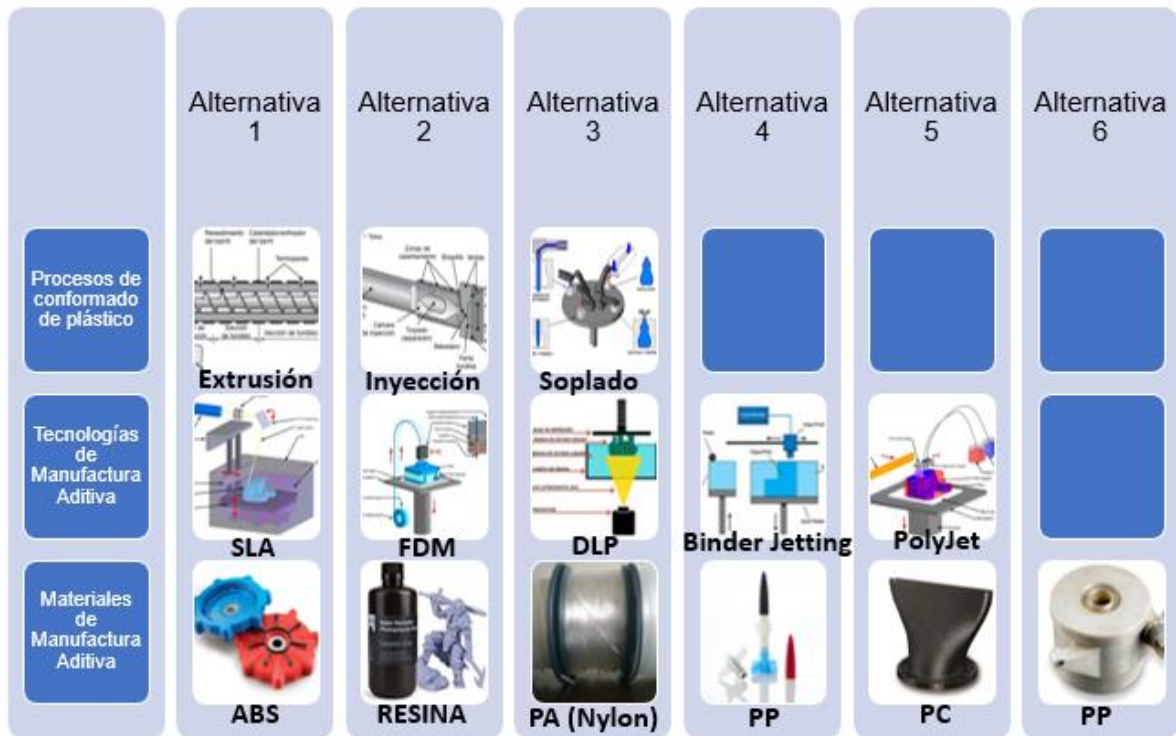


Figura 2.5 Carta Morfológica

Fuente: Elaboración propia

2.6 Selección de las mejores alternativas de solución

Para escoger la mejor solución de todas las propuestas mostradas en la carta morfológica, se utilizó matrices de puntajes ponderados, que consiste en

evaluar cada alternativa propuesta con los criterios de diseño, en base a una escala de importancia relativa (establecida en la tabla 2.2).

Tabla 2.10 Matriz de decisión del Proceso de Moldeo

Criterio de selección	Peso	Soplado		Extrusión		Inyección	
		Puntaje	Peso ponderado	Puntaje	Peso ponderado	Puntaje	Peso ponderado
Desempeño	49	10	493	5	247	3	148
Apariencia	33	8	261	8	261	7	228
Costo	14	5	72	5	72	5	72
Seguridad	4	8	29	7	26	3	11
Puntaje total		855		579		448	
Orden		1		2		3	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.11 Matriz de decisión del tipo de material

Criterio de selección	Peso	ABS		Resina		PA		PLA		PC		PP	
		Puntaje	C.P.	Puntaje	C.P.	Puntaje	C.P.	Puntaje	C.P.	Puntaje	C.P.	Puntaje	C.P.
Desempeño	49	8	395	6	296	7	345	6	296	5	247	3	148
Apariencia	33	10	326	7	228	5	163	5	163	4	130	4	130
Costo	14	3	43	8	115	5	72	7	101	5	72	5	72
Seguridad	4	3	11	5	18	6	22	5	18	5	18	5	18
Puntaje total		775		658		602		578		467		369	
Orden		1		2		3		4		5		6	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.12 Matriz de decisión de la tecnología de MA

Criterio de selección	Peso	POLYJET		FDM	
		Puntaje	Peso ponderado	Puntaje	Peso ponderado
Desempeño	49	9	441	7	343
Apariencia	33	10	333	8	264
Costo	14	6	84	8	112
Seguridad	4	5	20	3	12
Puntaje total		878		731	
Orden		1		2	

Fuente: Elaboración propia

La tabla 2.13 expresa los parámetros a considerar para los diferentes procesos de conformado de plásticos donde se escoge los parámetros del proceso de soplado.

Tabla 2.13 Parámetros a considerar para el diseño en el proceso de conformado

Proceso de moldeo	Rango de Temperatura de trabajo (°C)	Rango de Presión de inyección (MPa)
Inyección	90 – 200	70 – 200
Extrusión	180 – 240	60
Soplado	75 – 125	0.3 – 0.5

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2.14 se describe los parámetros de las diferentes máquinas de MA, con tecnología PolyJet (no necesita acabado superficial debido a su alta resolución: ~20 µm) para la fabricación de piezas.

Algunos datos sobre esta tecnología es que (Mueller, Kim, Shea, & Daraio, 2015) investigaron que los efectos de la impresión, las pruebas y el almacenamiento de piezas terminadas en las propiedades mecánicas y geométricas de las piezas impresas con PolyJet, el número de intersecciones entre capas y boquillas a lo largo de la dirección de carga tiene el mayor efecto sobre las propiedades mecánicas. El tiempo de exposición a los rayos UV también tiene un efecto significativo en las propiedades mecánicas. También observaron que el tiempo de calentamiento de la máquina y la limpieza de la boquilla afectan las propiedades geométricas o la dispersión de los datos obtenidos.

También, (Cazon, Morer, & Matey, 2014) encontraron que la rigidez y el esfuerzo de fractura se vieron significativamente afectados por la orientación de la pieza, pero no hubo un efecto significativo en la resistencia a la tracción final. Las piezas impresas con PolyJet a diferentes operaciones de acabado, como la opción mate o brillante; el uso presión de agua para quitar el soporte; y un baño de soda causal, dieron como resultado que las operaciones de acabado no tuvieron ningún efecto sobre la resistencia a la tracción de las

piezas impresas, pero sí afectaron las propiedades de rugosidad, aunque el acabado superficial brillante podría mejorar la vida útil de las piezas impresas.

Tabla 2.14 Parámetros de Tecnología MA PolyJet

Disponibilidad de sistema	Capacidad de espesor de capa	Estructura de soporte	Disponibilidad de colores
Objet260/350/500 Connex3™	Material digital 2/3 modo: 30 microns (0.0012 in.)	SUP705 (WaterJet removable) SUP706* (soluble) Objet1000 único uso SUP705	Verde (RGD515 Plus y RGD535) Ivory (RGD515 Plus y RGD531)
Stratasys J735™ Stratasys J750™	Modo de alta mezcla o alta velocidad: 27 micrones (0.0011 in.) Modo alta calidad: 14 micrones (0.00055 in.)		
Objet1000 Plus™	Modo material digital 2: 36 micrones (0.0014 in.)		

Fuente: (Stratasys, Ink, 2018)

En la siguiente tabla se describe las propiedades del material ABS digital que se utilizará para analizar el comportamiento del molde, el cual es un material similar al ABS estándar que es no tóxico, y combina *resistencia a la temperatura elevada* con *tenacidad*, mejorando de esta manera las propiedades de resistencia al impacto y absorción de impactos. Este material es ideal para la fabricación de piezas de ajuste rápido, en aplicaciones de baja o alta temperatura, prototipos de moldes, herramientas de fabricación, piezas eléctricas, entre otras.

Tabla 2.15 Propiedades del material ABS Digital

Propiedades mecánicas	Método de prueba	Sistema inglés	Sistema internacional
Esfuerzo de tensión	D-638-03	8,000-8,700 psi	55-60 MPa
Elongación a ruptura	D-638-05	25-40%	25-40%
Módulo de elasticidad	D-638-04	375,000-435,000 psi	2,600-3,000 MPa
Esfuerzo de flexión	D-790-03	9,500-11,000 psi	65-75 MPa
Módulo de flexión	D-790-04	245,000-320,000 psi	1,700-2,200 MPa
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	136-154 °F	58-68 °C
HDT, °C @ 0.45MPa Luego de tratamiento post-térmico procedimiento A	D-648-06	180-194 °F	82-90 °C
HDT, °C @ 0.45MPa Luego de tratamiento post-térmico procedimiento B	D-648-06	198-203 °F	92-95 °C
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	124-131 °F	51-55 °C
Impacto Izod	D-256-06	1.69-2.15 ft lb/in	90-115 J/m
Tg	DMA, E»	117-127 °F	47-53 °C
Dureza Shore (D)	Scale D	85-87 Scale D	85-87 Scale D
Dureza Rockwell	Scale M	67-69 Scale M	67-69 Scale M
Densidad polimerizada	ASTM D792	-	1.17-1.18 g/cm ³

Fuente: (Stratasys, Ink, 2018)

2.7 Guía de aplicación técnica para moldes PolyJet para moldeo por soplado

El molde se utilizó como un proyecto piloto, donde este fue instalado en una máquina de soplado, la cuál es una BP Solvay Fortiflex HP 58. Hay que tener ciertas consideraciones para poder aplicar un molde impreso en 3D en producción. Stratasys posee una guía de aplicación de la tecnología PolyJet para moldeo por soplado (Stratasys, 2014).

Tabla 2.16 Obstáculos de adopción a producción de tecnología PolyJet

Obstáculos	Soluciones
Adherirse a prácticas tradicionales	Ajustar diseño de moldes Ajustar parámetros de molde
Fabricación de moldes demasiado grandes	Limitar el tamaño del molde para mantener el ahorro de costos y tiempo.
Asemejar apariencia de producción	Lijar y pulir cavidades del molde Ajustar los parámetros de moldeo como se recomienda

Fuente: (Stratasys, 2014)

2.8 Diseño del molde

Existen ciertas consideraciones que se toman en cuenta para poder diseñar un molde impreso con la tecnología PolyJet.

Se comienza diseñando la cavidad del molde para que pueda incluir una compensación para el material moldeado. Estos no se pueden realizar a todo el modelo CAD, ya que se producirían ajustes deficientes durante el montaje y su alineación.

- Compensación por contracción

También se toma en cuenta que las tasas de contracción son menores que los moldes metálicos, debido al tiempo de solidificación, estos se reducen en un 50%-100%.

- Ajustar la línea de separación

Las superficies de separación de las 2 partes del molde deben estar al ras, y este debe poseer un filo esquina que se encuentra con la cavidad, de otra manera existirá un destello excesivo en el producto. También las líneas de separación que no son rectas pueden afectar la apariencia del molde.

- Ajustar pin de soplado

Para mejorar la vida útil del material y prevenir pérdidas de presión, se debe incorporar un pin metálico. Estas placas eliminan el desgaste al entrar en

contacto con el soplete, como también mejoran el sellado del molde. Seleccionar una placa adecuada y determinar su tamaño.

- Agregar características de alineación de moldes

Para la alineación de los moldes, utilizar pasadores y agujeros de recepción que permitan. La una mitad tendrá los pasadores y la otra tendrá agujeros de recepción. Los pines pueden imprimirse o agregarse después de su impresión.

- Pin impreso

Agregar varios y largos pines de un tamaño de 10mm recomendado. Los agujeros deben ser 0.1mm más grandes que el diámetro del pin. Agregar 2mm al radio ayudará a que los pines encajen. Realizar los agujeros 1-2 mm más profundos que el largo de los pines.

- Pin insertado

Seleccionar un pin, y medir para determinar el tamaño requerido. Crear agujeros en una mitad del molde para donde los pines se ajustan a presión. Realizar el diámetro de los agujeros 0.1mm más grandes que los pines y 1mm - 2mm más profundos que el largo de los pines.

2.9 Características del montaje

Los moldes PolyJet se pueden montar de 3 maneras:

- Montaje independiente: los moldes son montados directamente en la moldura de soplado, que es la platina de la máquina.



Figura 2.2 Montado independiente molde PolyJet

Fuente: (Stratasys, 2014)

- Molde base: los insertos del molde PolyJet se montan en un metal base del molde.



Figura 2.3 Molde PolyJet montado en molde base

Fuente: (Stratasys, 2014)

- Carcasa del molde: los insertos de PolyJet son montados en una carcasa metálica que están montados en una base de metal del molde.



Figura 2.4 Molde montado en carcasa metálica

Fuente: (Stratasys, 2014)

2.10 Preparación del molde

- Remoción del material de soporte: Para los moldes independientes e insertos en molde base, raspar el material de soporte de las 2 mitades.
- Suavizado de la superficie: La suavidad de la superficie define la calidad de los materiales. La apariencia de la pieza soplada contribuye al cosmético.

2.11 Ensamblaje del molde

- Preparación de las superficies: utilizar una fresadora para dejar las superficies que se unen al ras.
- Integración de insertos roscados: para orificios diseñados a utilizar tornillos auto roscantes, no se requiere ninguna acción, lo de más se requiere crear hilos de tamaño apropiado.
- Integración de pines: si el molde utiliza pines de ajuste, insertar en los agujeros diseñados.

- Montaje en el molde base o carcasa metálica: presionar el molde PolyJet en insertos de base metálica, o carcasa metálica.
- Montaje del molde: fijar las mitades del molde a los platos de la máquina de moldeo.
- Ajustaje de configuración: los moldes PolyJet requieren de ajustar parámetros tomando en cuenta la resistencia, el umbral de temperatura, y conductividad térmica del plástico.
- Presión de sujeción: evitar fuerzas de sujeción excesivas que puedan romper el molde.
- Presión de soplado: utilizar presiones estándar de soplado para moldeo de piezas.
- Temperatura de extrusión y rate: probar las temperaturas de extrusión para el plástico junto con las pruebas de presión. Comenzar por el umbral inferior recomendado por el fabricante del material. Después de cada prueba aumentar la temperatura hasta conformarse con la cavidad del molde. Disminuir el rate de extrusión, hasta el mínimo del fabricante, el molde PolyJet retiene el calor lo que evita la solidificación del material.

2.12 Consideraciones clave en el proceso

Existen consideraciones que hay que tomar en cuenta cuando ocurren obstáculos durante el proceso:

Tabla 2.17 Obstáculos comunes y soluciones en proceso de soplado

Obstáculos		Resolución							
		Maquinado	Presión de cierre	Parámetros de extrusión	Tiempo de ciclo	Presión de soplado	Desmoldeo	Material	Ajuste y acabado
Destello excesivo	Gran cantidad de destello en parte moldeada	●	●						
Pegamento	La pieza se adhiere a la cavidad del molde				●		●		
Conformidad parcial	Espacios entre la cavidad y las superficies de las piezas moldeadas				●	●			
Vida del molde	Pocas piezas moldeadas con éxito				●			●	
Productos cosméticos	Imperfecciones superficiales en piezas moldeadas				●				●

Fuente: (Stratasys, 2014)

2.13 Detalles de resolución

- Maquinado: Fresar la superficie de separación.
- Presión de cierre: incrementar la presión de cierre para minimizar el destello de material.

- Parámetros de extrusión: disminuir la temperatura de Parison para reducir la contracción del material. Disminuir la velocidad de extrusión de Parison para reducir la contracción del material.
- Tiempo de ciclo: extender el tiempo de ciclo de moldeo para permitir que el plástico se solidifique. Agregar un ciclo de permanencia por cada 3-10 ciclos de moldeo.
- Presión de soplado: aumentar la presión de soplado para forzar al material en toda la superficie de la cavidad del molde.
- Desmoldeo: aplicar una liberación del molde cada 3 ciclos.
- Material: utilizar plásticos con punto de fusión bajos.
- Ajuste y acabado: eliminar la interferencia entre superficies de insertos y bases del molde. Lijar la superficie de la cavidad para obtener una superficie lisa y pulida.

2.14 Modelo del molde en 3D

Se diseñó un molde en el programa Autodesk Inventor 2018, donde se realizó el diseño para una botella de 300 ml, donde se tiene dimensiones de 150x40x38 mm.

Se utilizó este tipo de molde para analizar las muestras de ejemplo que tiene Stratasys, donde fue uno de los casos de estudio de la misma.

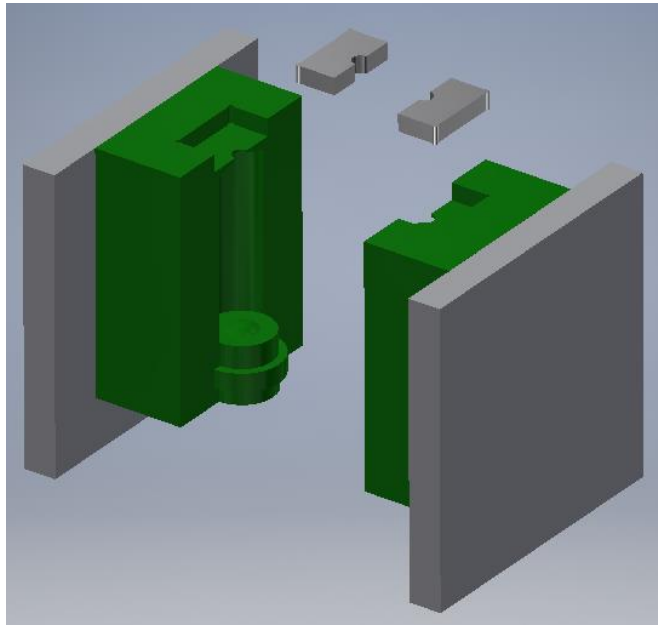


Figura 2.5 Modelado 3D en Inventor Autodesk

Fuente: Elaboración propia

2.15 Análisis por elementos finitos

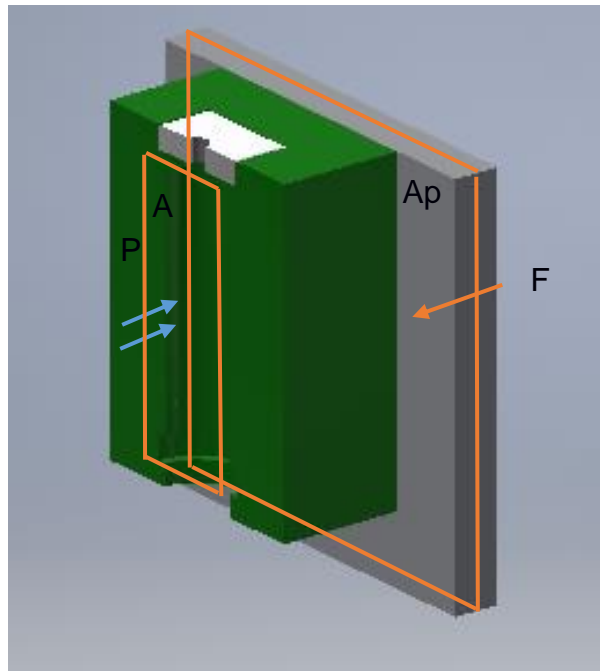


Figura 2.6 Diagrama de cargas aplicadas en el Molde

Fuente: Elaboración propia

2.15.1 Análisis de esfuerzos estáticos

Para realizar el análisis de elementos finitos en el molde, se necesita obtener las cargas implicadas durante el proceso de conformado por soplado, por lo que se analizó las cargas de presión de soplado como 0.5MPa (S. Kalpakjian, 2008).

Las cargas aplicadas al molde es la presión de soplado, y la fuerza de compresión que se aplican en las dos caras de los moldes.

Existe una relación entre la presión de soplado y la fuerza de cierre que es la utilizada en la ecuación 2.1.

$$F = P * A \quad (2.1)$$

F: Fuerza de cierre

P: Presión de Soplado (MPa)

A: Área aplicada en las X piezas sobre el plano de división del molde

Ap: Área aplicada en la cara de la placa de sujeción del molde

Pc: Presión de Cierre (MPa)

$$A = 2 \text{ Cavity} * (48,21 * 122) \text{ mm}^2 * \frac{1\text{m}^2}{10^6\text{mm}^2} = 0,001176\text{m}^2$$

$$F = P * A$$

$$F = 0.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2 * 0.001176 \text{ m}^2$$

$$F = 588 \text{ N}$$

Donde la fuerza de cierre sería de 588 N.

Se calcula la Presión de cierre aplicada a las placas de sujeción, se tomó en cuenta el área de las placas de 225mm de cada lado, éstas serán aplicadas al

molde, y estarán sujetas por pernos, sin embargo, los pernos no generan cargas por lo que no se analizarán los pernos para este caso.

$$P = F/A$$

$$P_c = \frac{588 \text{ N}}{0.225\text{m} * 0.225\text{m}} = \frac{588 \text{ N}}{0,050625\text{m}} = 11614.81\text{Pa}$$

$$P_c = 11.614 \text{ MPa}$$

Al realizar el análisis por elementos finitos, se obtiene que las cargas máximas encontradas fueron de 4.458 MPa, ubicadas en los lados posteriores de ambas partes del molde se une con el molde como se muestra en la figura 2.3. De esta manera obtenemos un factor de seguridad de 12.55 con la ecuación 2.2.

$$FS = \frac{\sigma_u}{\sigma_{von\ mises}} \quad (2.2)$$

$$FS = \frac{55 \text{ MPa}}{4,458 \text{ Mpa}}$$

$$FS = 12,55$$

2.15.2 Parámetros utilizados en la simulación

Para la simulación se realizó en el programa Inventor Autodesk donde se tomaron en cuenta los siguientes parámetros, se realizó un mallado y se colocaron las fuerzas correspondientes al proceso de soplado, donde se obtuvieron las siguientes características de la simulación:

Tabla 2.18 Parámetros utilizados en la simulación

Tipo de estudio	Análisis estático	Presión de cierre	11.614 MPa
		Presión de soplado	0.5 MPa
Propiedades del material		Propiedades de malla	
Tipo de material	ABS Digital	Tipo de malla	Malla solida
Tipo de modelo	Isotrópico linear elástico	Puntos jacobianos	4
Densidad	1,17 g/cm3	Tamaño medio de elemento	0,008 m
Módulo elástico	2600 N/m ²	Total de elementos	42273
Coefficiente de Poisson	0,4	Total de nodos	66278
Resistencia a la tracción	55 MPa		

Fuente: Elaboración propia

Al realizar la simulación observada en la figura 2.7 se obtuvieron los esfuerzos máximos generados en el molde.

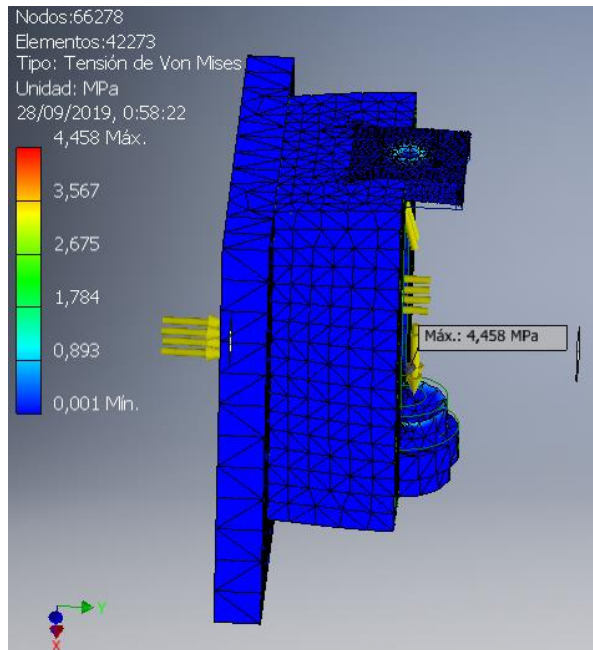


Figura 2.7 Esfuerzo de Von Mises en el Molde

Fuente: Elaboración propia

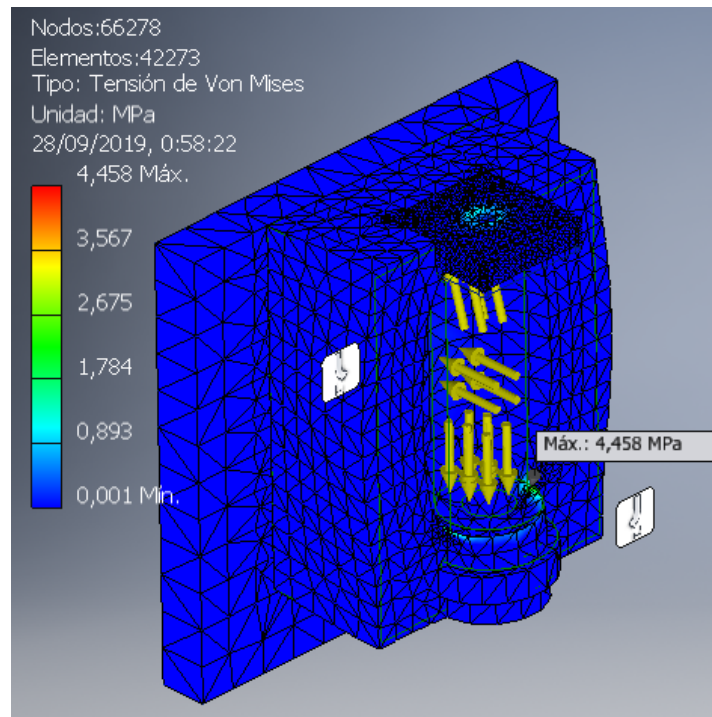


Figura 2.8 Análisis de elementos finitos en el Molde

Fuente: Elaboración propia

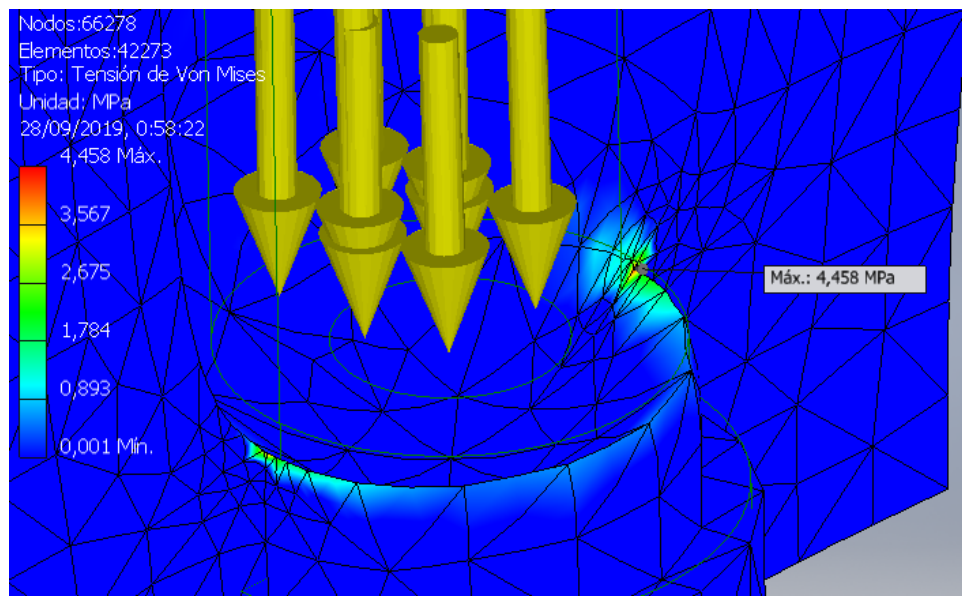


Figura 2.9 Esfuerzo Máximos de Von Mises en el Molde

Fuente: Elaboración propia

2.16 Análisis de fatiga del molde

En los polímeros la falla por fatiga se da de dos formas (X. Wang, 2017):

- Insuficiencia térmica debido al reblandecimiento y fusión de la calefacción de histéresis.
- Un fallo mecánico por iniciación y propagación de la grieta.

El objetivo de este análisis es estimar el ciclo de vida del molde, diseñado bajo las características ya mencionadas en el capítulo 2, por lo cual se investigó en la literatura actual los tipos de ensayos para esta aplicación, bajo las tensiones aplicadas, el entorno, la geometría y el acabo superficial del molde, para obtener una curva S-N (esfuerzo vs vida del material) y poder verificar la viabilidad técnica y económica del molde diseñado.

Se encontró que las propiedades mecánicas estáticas de los componentes fabricados bajo MA están bien documentadas, pero las propiedades mecánicas dinámicas aún no se encuentran totalmente establecidas, dado por el hecho de que todavía no existe un método estándar de ensayo para la caracterización mecánica de los polímeros producidos bajo MA (M. Forster, 2015). No obstante, la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales, y la Organización Internacional de estandarización (ASTM e ISO, respectivamente, por sus siglas en inglés) tienen desarrollados normas para los ensayos mecánicos de probetas. A continuación, se enlista los más representativos:

- ASTM D3479: Fatiga de tensión para materiales compuestos de matriz de polímero
- ASTM D6115: Propagación de la grieta en la región interlaminar de un compuesta de fibra
- ASTM D7774: Fatiga uniaxial en tensión o compresión
- ASTM D7791: Fatiga por flexión en los plásticos
- ASTM E739: Análisis estadístico de la fatiga
- ISO 527-2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión

En la literatura consultada (Dizon, Espera, Chen, & Advincula, 2017) utilizaron la ISO 527-2 para realizar los ensayos como un método aproximado. Sin embargo, indica en su investigación que existen métodos empíricos para analizar el ciclo de vida en un polímero. También muestra que, al disminuir el valor de la tensión durante el ensayo, se puede establecer la resistencia a la fatiga S_y , en la curva S-N. También mencionan que en los ensayos de las probetas impresas en 3D, el comportamiento por fatiga es muy difícil de predecir debido a diversas variables que influyen en la microestructura de la parte a ensayar. Las más importantes son:

- Propiedades anisotrópicas del material, y
- Esfuerzos residuales que resultan de la deposición de capa.

- Orientación del entramado: en la figura 3.1 se puede observar el efecto de fabricación paralelo al eje x y al eje y en una probeta.
- Orientación de la probeta: en una investigación realizada por los autores (Gay, Blanco, Pelayo, Noriega, & Fernández, 2015), se indica que este factor tiene un ligero efecto, y que la velocidad de impresión no afecta las características de resistencia de los componentes impresos.
 - i. Brecha de aire entre filamentos: en la misma investigación anterior se concluye que el espacio entre las partes a lo largo del eje x-y (calidad de la superficie) no influye significativamente en las propiedades mecánicas, pero sí tiene un mayor efecto sobre el módulo de esfuerzo.
 - ii. Espesor de la capa
 - iii. Diámetro del filamento
 - iv. Presencia de aditivos
 - v. Físico - química de fusión del polímero

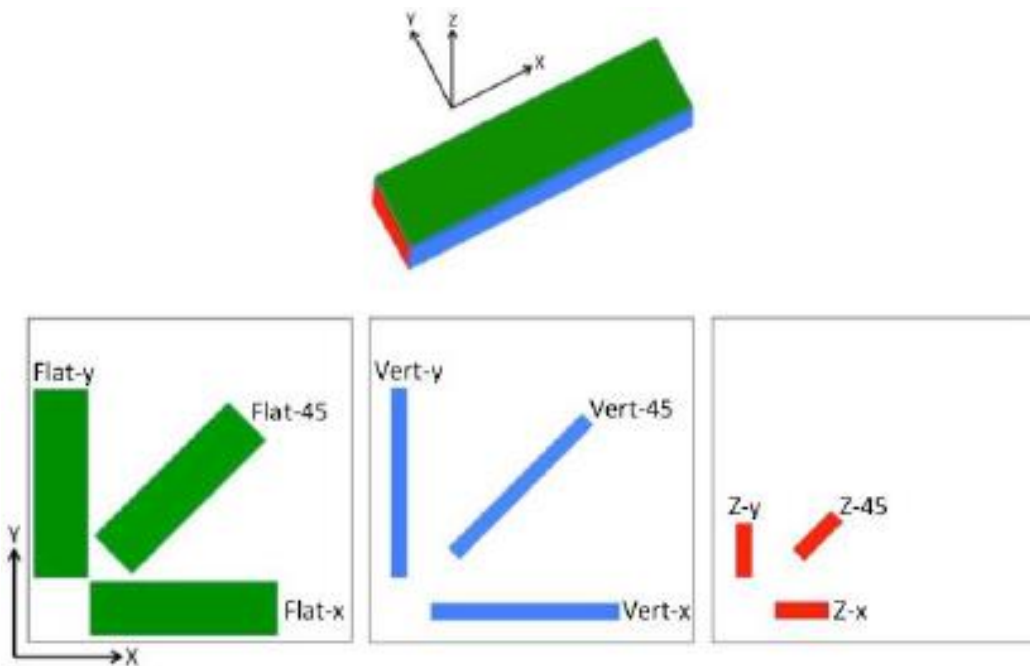


Figura 2.10 Geometría que muestra orientaciones en los diferentes ejes

Fuente: (Dizon at all, 2017)

La anisotropía mecánica representa el mayor problema de piezas fabricadas por MA. Pero para PolyJet, (Kazmer, D., 2017) encontró que la anisotropía es baja, alrededor del 2%, debido a que el volumen de la pieza es más denso, y también porque este método (junto con el SLA) tiene una energía de curado más baja haciendo más uniforme la impresión final.

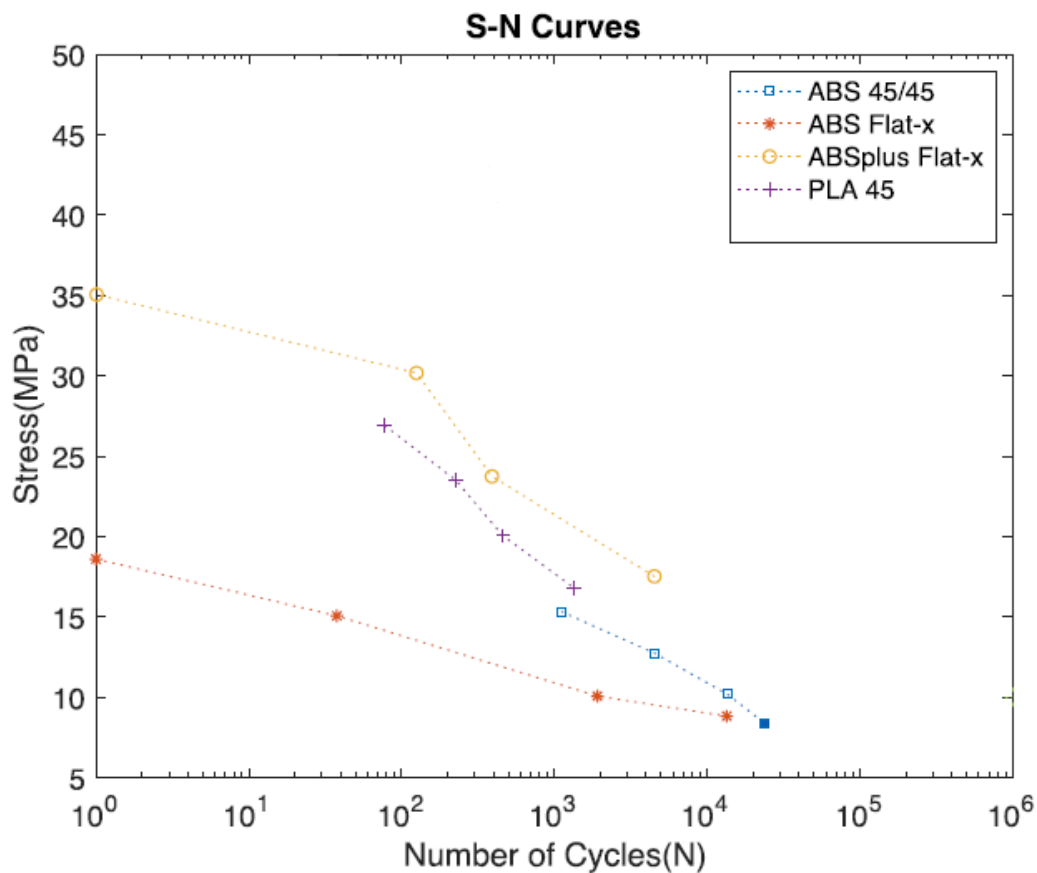


Figura 2.11 Las curvas SN durante la carga uniaxial a tensión.

Fuente: (Willimas, 2016)

La figura 2.6 muestra que el cuadrado azul es la mejor orientación de la trama en 45 ° / 45 ° para las probetas de ABS. Las líneas en forma de estrella y círculo amarillo rojo son la mejor impresión de orientación, para ABS y ABS plus, respectivamente. Las líneas en forma de cruz púrpura y de diamantes verdes representan la mejor orientación de la trama a 45 ° para muestras de PLA. Los puntos de colores sólidos representan los datos iniciales y finales.

2.16.1 Máquina de ensayo de fatiga

La máquina se selecciona de acuerdo con el método de tensión aplicada, la cual puede ser para carga axial en flexión repetida; en flexión en rotación; para fatiga en torsión; fatiga por flexión y torsión combinadas; y fatiga biaxial y triaxial. En este caso, la carga aplicada se asume como una carga

biaxial en flexión repetida, dada la naturaleza del funcionamiento durante el proceso de soplado, en donde la carga hidroneumática es aplicada tanto en el eje x y en el eje y durante ciclos alternativos dentro del molde.

La máquina seleccionada es según la recomendación de (Lee, An, & Chua, 2017). Esta elección también puede realizarse dependiendo de factores como: la fuerza de frecuencia, sistemas de control, costo de la máquina y costo de horas hombre.

La máquina apropiada para nuestro caso sería una máquina para ciclos de esfuerzo axial (Tensión y compresión).

La estructura de la máquina para el ensayo sería la especificada:

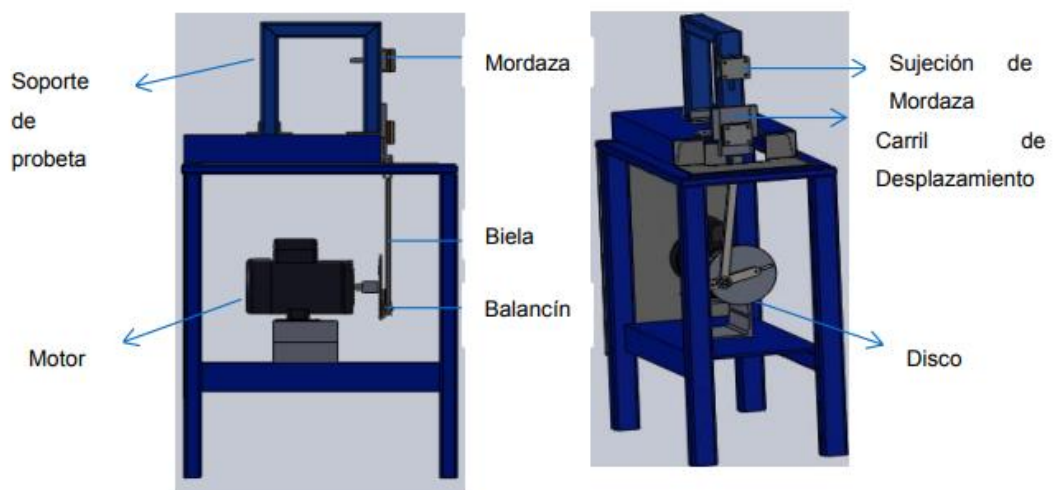
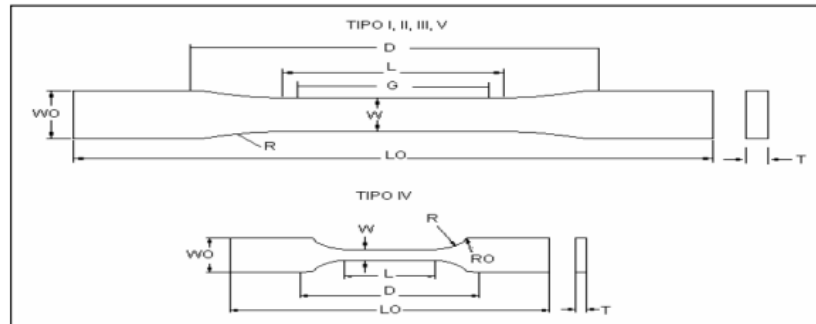


Figura 2.12 Estructura de la máquina para ensayos de fatiga

Fuente: (Guamanquispe Toasa, 2013)

2.16.2 Estandarización de la probeta

La probeta se diseña en función para que la empuñadura transfiera la carga de la máquina de ensayo para la sección de prueba. La transición entre la mordaza y esta sección deberá estar diseñada con grandes radios para evitar los concentradores de esfuerzo. La norma para fabricación de la probeta es la ASTM D638 (Standard test method for tensile properties of plastic).



Dimensiones	≤ 7(0.28)		7 a 14 (0.28-0.55)	≤ 4(0.16)		Tolerancias
	Tipo I	Tipo II	Incl. Tipo III	Tipo IV	Tipo V	
w-Ancho de la sección						
Estrecha	13(0.50)	6(0.25)	19(0.75)	6(0.25)	3.18(0.125)	±0.8(±0.02)
L- Longitud de sección estrecha	57(2.25)	57(2.25)	57(2.25)	3(1.30)	9.53(0.375)	±0.7(±0.02)
W ₀ - Ancho ,mm ²	19(0.75)	29(1.13)	29(1.13)	19(0.75)	9.53(0.375)	±0.6(±0.25)
L ₀ - Largo, mm ²	165(6.5)	246(9.7)	246(9.7)	115(4.5)	63.5(2.5)	No máx.
G- Longitud	50(2.00)	50(2.00)	50(2.00)	XXX	7.62(0.300)	±0.26(±0.020)
G- Longitud	XXX	XXX	XXX	25(1.00)	XXX	±0.13(±0.006)
D- Distancia entre mordazas	115(4.5)	135(5.3)	115(4.5)	65(2.5)	25.4(1.00)	±5(=0.2)
R- Radio de filete	76(3.00)	76(3.00)	76(3.00)	14(0.56)	12.7(0.5)	±1(=0.04)
R ₀ - Radio exterior(Tipo IV)	XXX	XXX	XXX	25(1.00)	XXX	

Figura 2.13 Clases de probetas para ensayos de fatiga en polímeros

Fuente: (Guamanquispe Toasa, 2013)

Las dimensiones de las probetas para el ensayo de fatiga serían las siguientes:

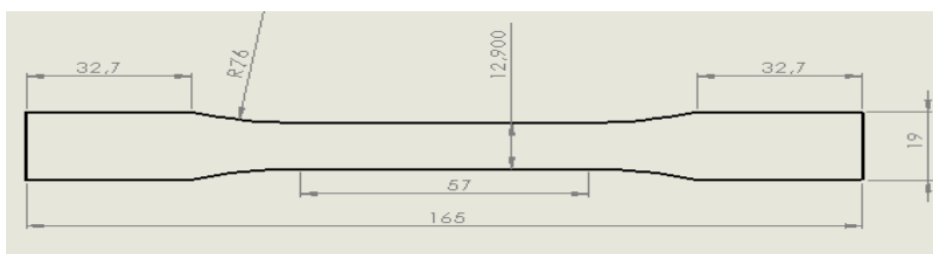


Figura 2.14 Dimensiones de probetas para ensayos de fatiga en polímeros

Fuente: (Guamanquispe Toasa, 2013)

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados de diseño

Durante el análisis de esfuerzos estáticos en el molde se obtuvo como resultado un esfuerzo máximo de 4,46 MPa y un factor de seguridad de 12,6.

Al analizar la fatiga en el material ABS digital plus se utilizó la figura 3.1 con la curva S-N obtenida de los ensayos de fatiga realizados en los diferentes materiales y se realizó una interpolación para obtener su resistencia a la fatiga a en 4.46 MPa resultando que el material ABS fallaría por fatiga en aproximadamente 200.000 ciclos.

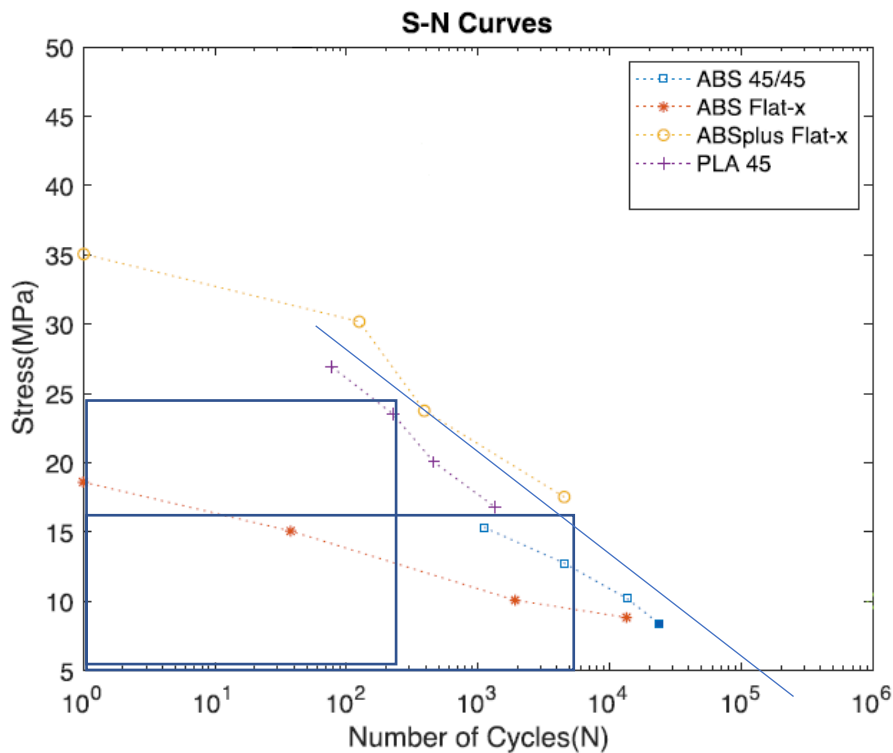


Figura 3.1 Estimación del número de ciclos bajo la resistencia de 4.46 MPa a tensión

3.2 Análisis de costos

3.2.1 Caso de estudio 1

Para analizar la factibilidad del costo de la fabricación del molde hecho por manufactura aditiva, se toma como referencia el caso de pruebas de la empresa StratasyS con un cliente utilizando la tecnología PolyJet en China, la cual colaboró con las pruebas de las capacidades de los moldes de soplado con el material ABS digital. Las cuales utilizan comúnmente las preformas PET de una botella típica. Se realizó un molde de 3 partes con ABS digital, que fue ensamblado a una base de aluminio, y luego montada en una máquina semiautomática de soplado. El molde fue utilizado para crear 300 piezas con la misma apariencia, el cual fue retirado sin presentar ningún tipo de degradación. La empresa estimó que este proceso pudo alcanzar un 87% de reducción de tiempo de producción y un 93% de ahorro en costo al comparar con los moldes tradicionales.

Tabla 3.1 Comparativo de un molde de aluminio y un molde PolyJet

Comparación de molde PolyJet con métodos tradicionales de la empresa X		
Método	Tiempo de producción	Costo
Molde Aluminio	15 días	\$ 4.630
Molde PolyJet	1 día	\$ 580
Ahorro	14 días (93%)	\$ 4.050 (87%)

Fuente: (StratasyS, Ink, 2018)

Tabla 3.2 Detalles para la fabricación de molde PolyJet

Muestra y detalles de proceso	
Parte	200cc Contenedor de bebida suave
Sistema	Connex500
Software Rev.	Objet Studio 9.2.8.0
Material	Digital ABS (RGD5160-DM)
Modo impresión	DM
Impresión final	Pulido
Tiempo de impresión (HH:MM)	10:00
Cantidad de material aplicado	RGD515:690g (24.3 oz) RGD531:570g (20.1 oz)

Fuente: (StratasyS, Ink, 2018)



Figura 3.2 Soplado de plástico con molde impreso en PolyJet

Fuente: (Stratasys, Ink, 2018)

3.2.2 Caso de estudio 2

También se han realizado pruebas con moldes de inyección, donde se ha tenido muy buenos resultados.

En Alemania, una empresa de componentes electrónicos desarrolló moldes de inyección para sus carcasas de electrónicos en la cual la geometría de la pieza era compleja por lo tanto necesitaba probar cada pieza, y para esto requería de fabricar moldes metálicos; sin embargo, la compañía estaba interesada en explorar alternativas que permitan acelerar este proceso, por consiguiente, utilizaron como solución la impresora 3D con tecnología PolyJet y así probar los moldes que fabricaban.

Tabla 3.3 Comparativo de un molde de acero y un molde PolyJet

Comparación de molde PolyJet con métodos tradicionales de empresa y		
Método	Tiempo de producción	Costo
Molde Acero	56 días	\$ 52.725
Molde Polyjet	2 días	\$ 1.318
Ahorro	54 días (96%)	\$ 51.407 (98%)

Fuente: (Stratasys, Ink, 2018) (Stratasys, Ink, 2018)

3.2.3 Evaluación de costos del proyecto

Se investigó en Ecuador un representante de Stratasys, la empresa CompuCAD, quien nos pudo facilitar datos de precios tanto de las impresoras como de los materiales implicados.

Para nuestro caso se utilizará los siguientes requerimientos para la fabricación del molde:

Tabla 3.4 Costo de la tecnología PolyJet

Requerimientos Tecnología PolyJet		Costo
Sistema	Objet 260 Connex3 printer	\$ 99.900,00
Software Rev.	Objet Studio 9.2.8.0	Incluido
Cantidad de material aplicado	PACK RGD515plus:3.6Kg	\$1252,00
	PACK RGD531: 3.6Kg	\$1350,00
TOTAL INVERSIÓN		\$ 102.502,00

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de rentabilidad del molde impreso en 3D, se propone un precio de \$780 por molde, por lo cual se espera realizar 3 unidades por semana y anualmente se estima ingresos de \$ 9360.

Tabla 3.5 Ingresos

	Unidad	Mensual
PVP Molde	\$780	\$9.360

Fuente: Elaboración propia

El valor de producción del molde se lo obtiene multiplicando el peso de la pieza a producir para el valor por gramo del ABS digital, obteniendo un valor de producción de \$ 298,36 para un molde de 825,6g.

Tabla 3.6 Valor de producción

Valor de Producción por Molde	\$ 298,36
--------------------------------------	------------------

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del costo de producción mensual observado en la tabla 3.7 se tomó en cuenta la energía consumida por la máquina, el sueldo de 2 socios que estarán a cargo de la producción de la máquina, también se tomó en cuenta el valor de producción del molde el cual es el costo de producción por molde multiplicado por el número de moldes al mes, la depreciación de la máquina a 10 años, donde se obtuvo un costo total de \$ 8.612,85, utilidad bruta \$387,15 y una utilidad neta de \$ 290,36 mensual.

Tabla 3.7 Costos de producción

Descripción	Mensual	Anual
Energía	\$ 200,00	\$ 2.400,00
Remuneración Socio 1	\$ 2.000,00	\$ 24.000,00
Remuneración Socio 2	\$ 2.000,00	\$ 24.000,00
Producción	\$ 3.580,35	\$ 42.964,22
Depreciación	\$ 832,50	\$ 9.990,00
Total Costos	\$ 8.612,85	\$103.354,22
Utilidad antes de Impuestos	\$ 747,15	\$ 8.965,78
Impuesto a la renta (25%)	\$ 186,79	\$ 2.241,44
Utilidad Neta	\$ 560,36	\$ 6.724,33

Fuente: Elaboración propia

Para la obtención de la masa de la pieza total se obtiene del programa Autodesk Inventor, donde obtenemos un valor de 825,6g entre las 2 piezas del molde impreso.

Tabla 3.8 Masa de la pieza del molde

	MASA (g)
Pieza molde hembra	369,6
Pieza molde macho	456
Total pieza	825,6

Fuente: Elaboración propia

El costo de la materia prima sería el material consumido por la máquina equivalente al peso de la pieza producida, donde el ABS digital se obtiene de la

combinación de 2 materiales que son el RGD 515 plus, y el RGD 531, los cuales vienen en paquetes de 3,6 Kg. Para obtener el valor por gramo se suma el valor total de los materiales, y se divide para el peso total de los paquetes, obteniendo un valor de \$ 0,36 por gramo de material.

Tabla 3.9 Costo de materia prima ABS Digital

ABS DIGITAL	Costo (\$)	MASA (g)
Material Pack RGD 515 PLUS	\$ 1.252,00	3600
Material Pack RGD 531	\$ 1.350,00	3600
Total Material	\$ 2.602,00	7200
Valor por gramo	\$ 0,36	

Fuente: Elaboración propia

Se estima una producción mínima de 3 moldes por semana, dado el caso de que se aproxima un tiempo de fabricación de 2 días por molde, por lo que se obtiene una producción mensual de 12 moldes, y una producción anual de 144 moldes.

Tabla 3.10 Cantidad de producción semanal, mensual y anual por molde

Frecuencia	Número	Ingreso
1 semana	3	\$2.340
1 mes	12	\$9.360
1 año	144	\$112.320

Fuente: Elaboración propia

La fabricación de un molde de aluminio puede costar entre \$ 10.000- \$ 20.000, y el tiempo de fabricación puede tardar entre 15-21 días, en cambio el molde hecho por manufactura aditiva puede tardar de 1-2 días, teniendo un ahorro de tiempo de hasta un 93%, y su costo no excede los \$ 800.

En comparación con un molde de aluminio con las mismas características geométricas diseñado para este proyecto se estima un costo de aproximadamente \$ 15.000, ver nota ¹ obteniendo un ahorro del 94.67% en la producción del molde impreso en 3D.

¹ Dato obtenido por el departamento técnico de Fadesa.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, en esta sección se presentan los hallazgos obtenidos durante el análisis de la propuesta de implementar moldes fabricados por manufactura aditiva.

4.1 Conclusiones

- Se analizó las principales tecnologías de MA que se tiene en el mercado, considerando la calidad superficial de las piezas impresas, y se determinó que la tecnología PolyJet puede ser utilizada para la fabricación de moldes de soplado.
- El material que proporciona la resolución y el acabado final deseado para las partes internas del molde, es un ABS digital, que es un termoplástico compuesto por una mezcla de 2 materiales, desarrollados por la empresa Stratasys Inc., y llamados como RGD 531 y RGD 515.
- Se verificó cómo afectan las cargas en el proceso de soplado al material ABS digital (utilizado en el molde para la fabricación de botellas de plástico de 300 ml) mediante el método de elementos finitos utilizando el programa Inventor Autodesk 2018, donde se obtuvo una resistencia a la tensión de 55 MPa, una resistencia máxima de 4,46 MPa, y un factor de seguridad de 12,6 con cargas estáticas.
- Se estimó que la vida del molde es de aproximadamente 200.000 ciclos, de acuerdo a las gráficas de las investigaciones consultadas, utilizando como dato la resistencia a la tensión de 4,46 MPa que puede soportar el molde una vez puesto en operación, con lo cual puede generar ahorros en

tiempos de producción y en costos de fabricación, aunque las empresas destinan este tipo de moldes para prototipado principalmente.

- Los moldes fabricados por MA al tener un costo bajo comparado con los moldes de aluminio o acero, sin embargo, pueden ser utilizados por clientes cuya cantidad de producción sea baja. Las empresas cuya demanda de producto es elevada y sobrepasa las 200.000 piezas por lote, tendrían la posibilidad de adquirir la tecnología para el prototipado de moldes y de esta manera tener un ahorro significativo en el tiempo de diseño del molde y la fabricación del mismo.

4.2 Recomendaciones

- Desarrollar estándares de ensayo específicos para el material de aporte por MA para establecer una base que verifique que los productos finales sean más reproducibles, confiables y seguros.
- Experimentar un conjunto de muestras o probetas fabricadas con diferentes parámetros de procesamiento para cada material de MA. Esto es para desarrollar una técnica de diseño experimental que permita estimar el ciclo de vida del material empleado.
- Analizar las demás tecnologías de MA revisadas en este proyecto, para la fabricación de moldes para otro tipo de productos, ya que la selección del tipo de MA depende del uso de la pieza a realizar, y de la durabilidad de la pieza, que está relacionado con ahorro de tiempo y recursos en prototipos o bajas producciones de piezas.
- Desarrollar un sistema o procedimiento de reciclaje para cuando el molde alcance su vida útil, ya que el plástico empleado para su fabricación puede ser usado como materia prima para diversas aplicaciones, e inclusive para retornar como filamento para una máquina de manufactura aditiva.

BIBLIOGRAFÍA

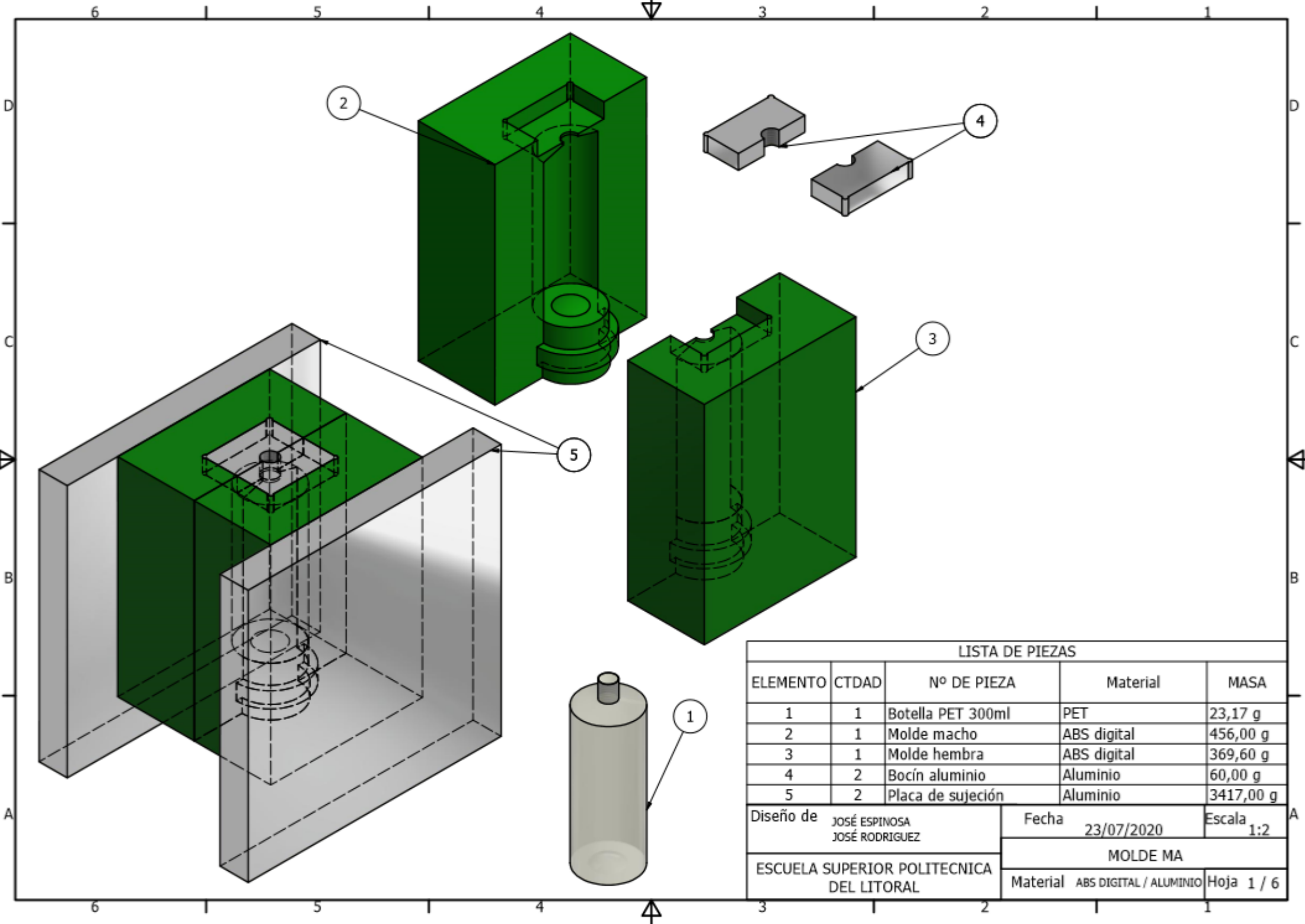
- Amazing AM, LLC.* (2019, 06 22). Obtenido de AMazing:
<http://www.additivemanufacturing.com/basics/>
- 3D Additive Fabrication, I. (2019). <http://www.3daddfab.com/technology/>. Obtenido de
<http://www.3daddfab.com/technology/>: <http://www.3daddfab.com/technology/>
- 3dprintcdmx. (2018, Agosto 24). *3DprintCDMX*. Obtenido de 3DprintCDMX web site:
<https://www.3dprintcdmx.com/>
- Acevedo, F. (2016). Estudio sobre la aplicaci´on de las tecnologías de fabricaci3n aditiva al sector aeronáutico y espacial. *Universidad de Sevilla*, 367.
- Cazon, A., Morer, P., & Matey, L. (2014). *PolyJet technology for product prototyping: tensile strength and surface roughness properties*. Proc. Inst. Mech. Eng. B J.Eng. 228.
- Contreras, L. (2018, Abril 16). *3D Natives*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com>:
<https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-o-mecanizado-cnc-160420182/>
- Dizon, J. R., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2017). Mechanical characterization of 3D- printed polymers. *ELSEVIER*, 44-67.
- Formlabs. (2019). <https://formlabs.com/3d-printers/form-3l/>. Obtenido de
<https://formlabs.com/3d-printers/form-3l/>: <https://formlabs.com/3d-printers/form-3l/>
- Gay, P., Blanco, D., Pelayo, F., Noriega, A., & Fernández, P. (2015). Analysis of Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat PolyJet Manufactured Parts. *ELSEVIER*, 70-77.
- Guamanquispe Toasa, J. P. (2013, julio). Estudio del Comportamiento a Fatiga Mecánica de Polímeros. Ambato, Ecuador.
- Ingenio Triana. (2018, Octubre). *Ingenio Triana*. Obtenido de <http://ingenio-triana.blogspot.com/2018/10/impresora-3d-dlp.html>:
<http://ingenio-triana.blogspot.com/2018/10/impresora-3d-dlp.html>
- International, A. (2019, Junio 23). <http://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>. Obtenido de Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies: <http://www.astm.org>

- Kazmer, D. (2017). *Three-Dimensional Printing of Plastics, Applied Plastics Engineering Handbook - Processing, Materials, and Applications* (2nd ed.). Plastics Design Library.
- Lee, J., An, J., & Chua, C. (2017). *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*. Appl. Mater. Today 7.
- Loughborough, U. (2019). <https://www.lboro.ac.uk>. Obtenido de <https://www.lboro.ac.uk>: <https://www.lboro.ac.uk>
- M. Forster, A. (2015). *Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability*. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Maxtech. (22 de Jun de 2017). <http://www.plasticmoldingchina.com/>. Obtenido de <http://www.plasticmoldingchina.com/>: <http://es.plasticmoldingchina.com/products.html>
- Mueller, J., Kim, S., Shea, K., & Daraio, C. (2015). Tensile properties of inkjet 3d printed parts: critical parameters and their efficient analysis. *Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information*. Boston: Engineering Conference IDECTC/CIE .
- Osorio, D. (12 de Abril de 2012). <http://davidosoriofabrica.blogspot.com/>. Obtenido de <http://davidosoriofabrica.blogspot.com/>: <http://davidosoriofabrica.blogspot.com/>
- S. Kalpakjian, S. S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Ciudad de México: Prentice Hall.
- Singer, L. S. (Octubre, 2011). Direct Digital Manufacturing: The Industrial Game-Changer You've Never Heard Of. *Brookings*, 1.
- Stratasys. (2014). *Technical Application guide: Polyjet blow molding*.
- Stratasys, Ink. (2018). <https://www.stratasys.com>. Obtenido de <https://www.stratasys.com>: <https://www.stratasys.com/materials/search/digital-abs-plus>
- Willimas, L. (2016). *Additive Manufacturing or 3D Scanning and Printing, Manufacturing Engineering Handbook* (Segunda ed.). Boston: McGraw-Hill Education.
- X. Wang, M. J. (2017). *3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective*. Comput.-Aided Des. Compos. Part B110.
- Xataka. (2015, Mayo 14). <https://www.3dmarket.mx>. Obtenido de <https://www.3dmarket.mx>: <https://www.3dmarket.mx>

Stratasys, Ink. (2014). *Technical Application guide: Polyjet blow molding*

APÉNDICES

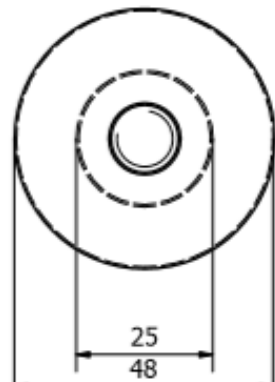
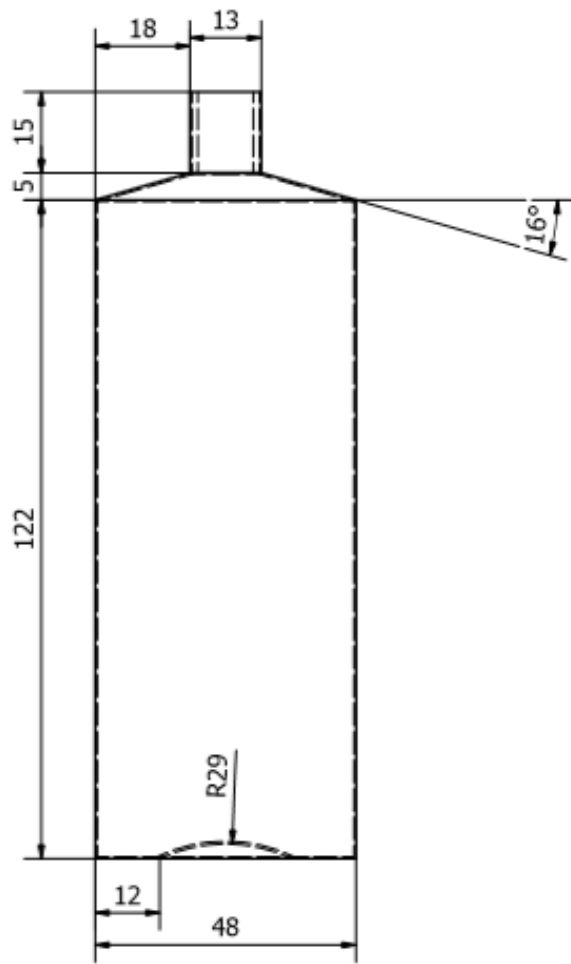
APÉNDICE A
Planos esquemáticos



LISTA DE PIEZAS

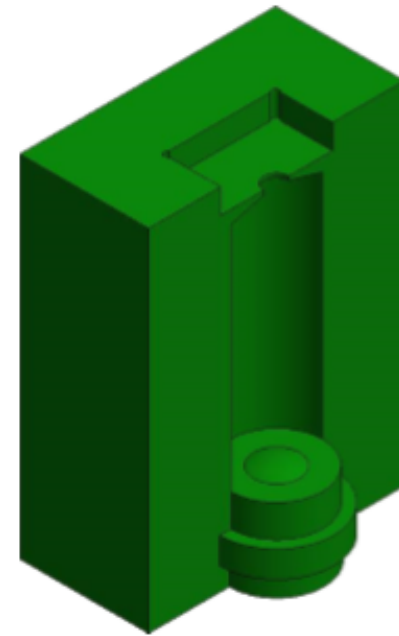
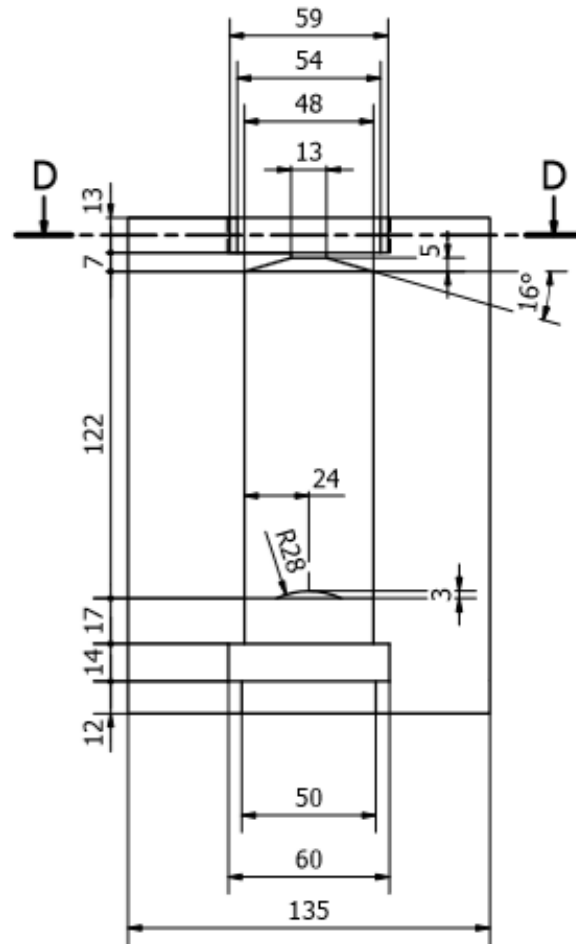
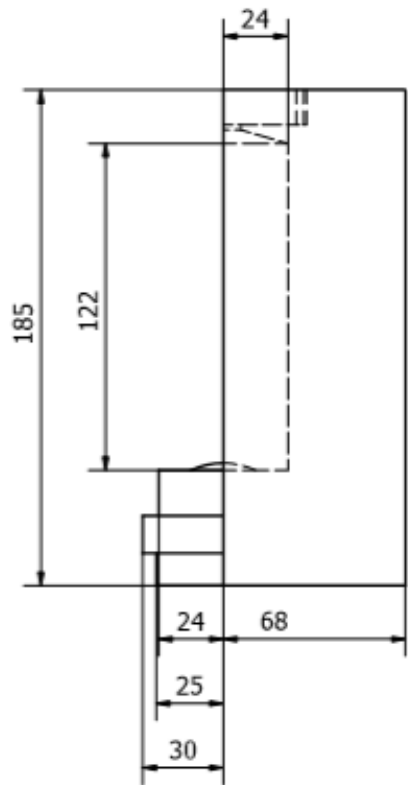
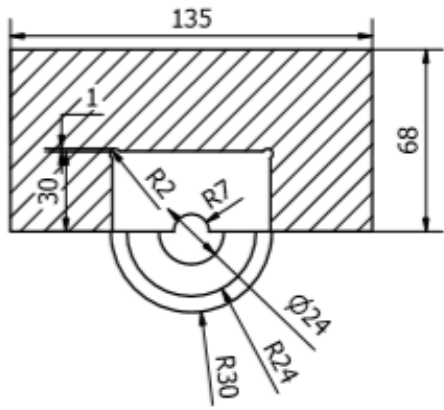
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	Material	MASA
1	1	Botella PET 300ml	PET	23,17 g
2	1	Molde macho	ABS digital	456,00 g
3	1	Molde hembra	ABS digital	369,60 g
4	2	Bocín aluminio	Aluminio	60,00 g
5	2	Placa de sujeción	Aluminio	3417,00 g

Diseño de JOSÉ ESPINOSA JOSÉ RODRIGUEZ	Fecha	23/07/2020	Escala	1:2
	MOLDE MA			
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL	Material	ABS DIGITAL / ALUMINIO	Hoja 1 / 6	



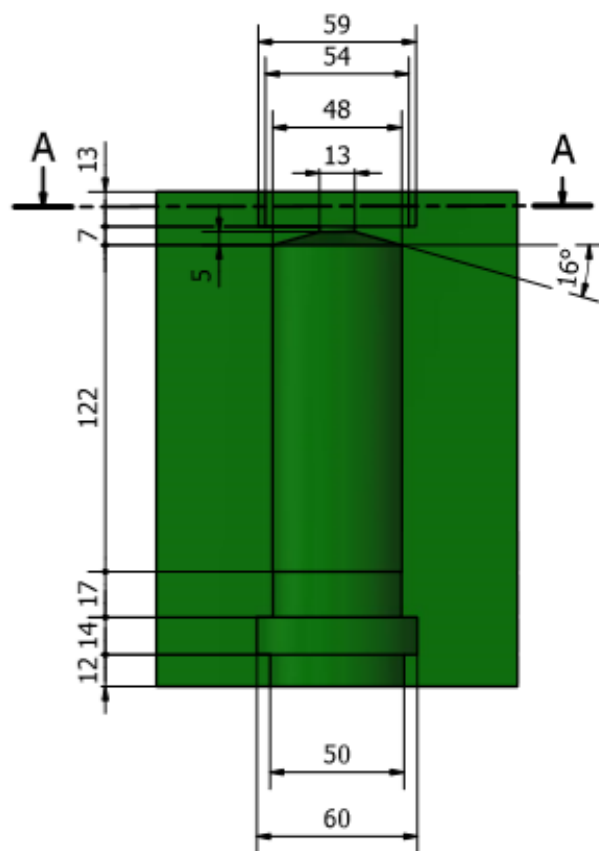
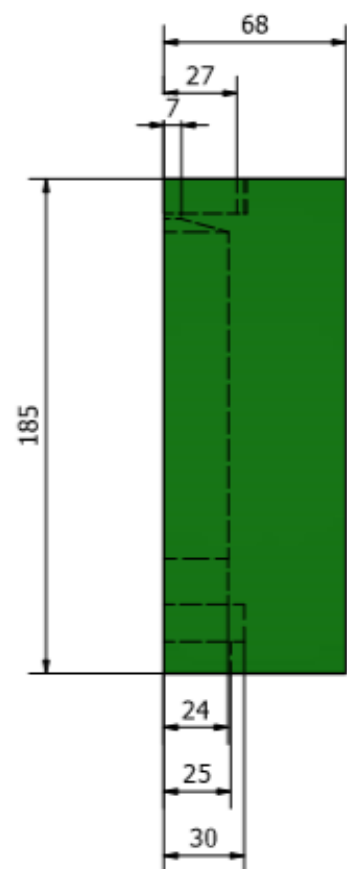
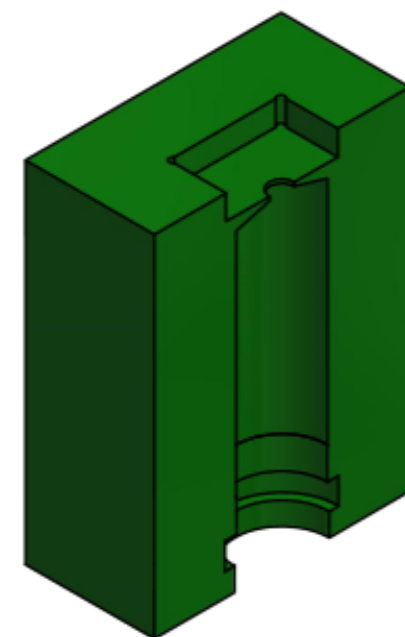
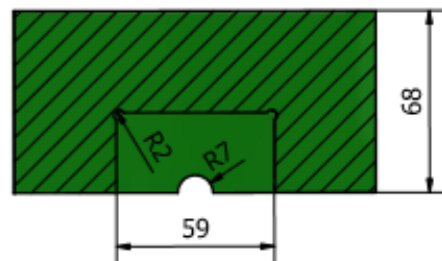
Diseño de	JOSÉ ESPINOSA JOSÉ RODRIGUEZ	Fecha	23/07/2020
	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL	Botella PET 300 ml	
		Material :	PET
			Hoja 2 / 6

D-D (1:2)

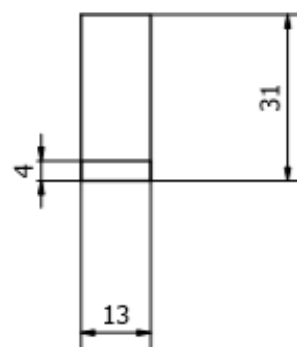
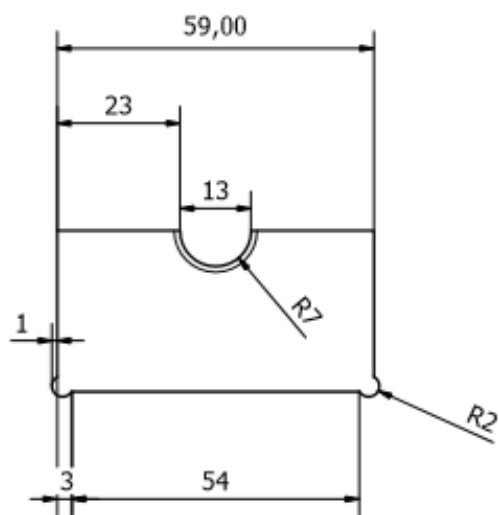
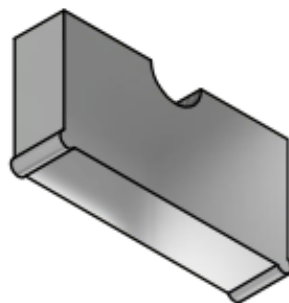


Diseño de JOSÉ ESPINOSA JOSÉ RODRIGUEZ	Fecha 23/07/2020	Escala 1:2
	Material : ABS DIGITAL	
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL		Molde macho Hoja 3 / 6

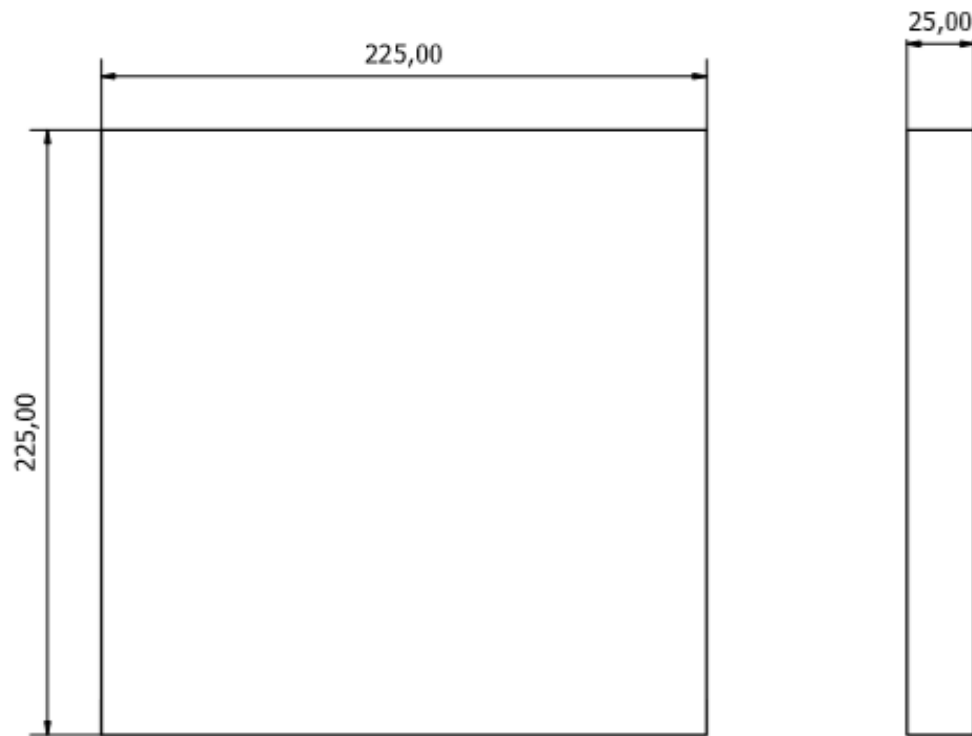
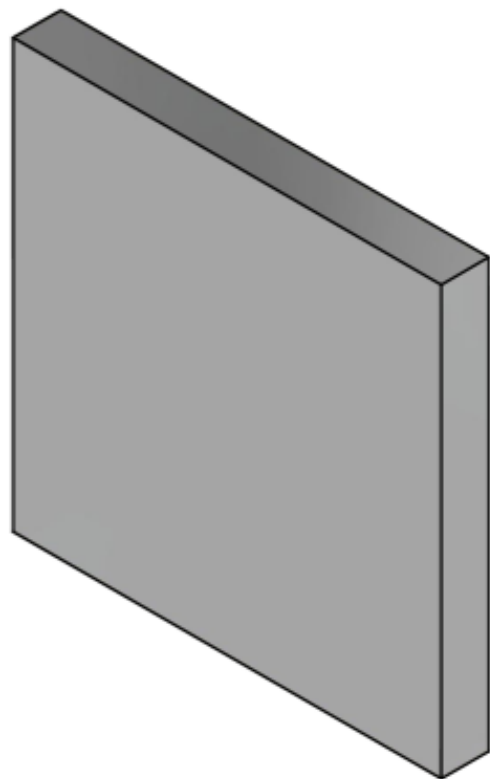
A-A (1 : 2)



Diseño de	JOSÉ ESPINOSA JOSÉ RODRIGUEZ	Fecha	23/07/2020	Escala	1:2
	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL	Material : ABS DIGITAL		Hoja 4 / 6	
			Molde hembra		



Diseño de JOSÉ ESPINOSA JOSÉ RODRIGUEZ	Fecha 23/07/2020	Escala 1:2
	Bocín aluminio	
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL	Material : ALUMINIO	Hoja 5 / 6



Diseño de JOSÉ ESPINOSA JOSÉ RODRIGUEZ	Fecha 23/07/2020	Escala 1:2
	Placa de sujeción	
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL	Material : ABS DIGITAL	Hoja 6 / 6