



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**COMPARACIÓN DEL USO DE LA MANUFACTURA ADITIVA EN  
LA FABRICACIÓN DE MOLDES PARA INYECCIÓN DE  
SILICONA: TECNOLOGÍA FDM VS TECNOLOGÍA DE RESINA**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTORAS:**

PAULLÁN RODRÍGUEZ NAYELLI VANESSA

ROMERO BRAVO VERÓNICA ALEXANDRA

**DIRECTOR:** ING. DARIO FERNANDO GUAMAN LOZADA

Riobamba – Ecuador

2024

**© 2024, Nayelli Vanessa Paullán Rodríguez & Verónica Alexandra Romero Bravo**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Nayelli Vanessa Paullán Rodríguez y Verónica Alexandra Romero Bravo, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

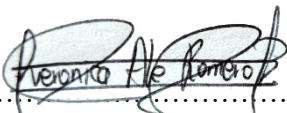
Como autoras asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 23 de abril de 2024



.....

**Nayelli Vanessa Paullán Rodríguez**  
**065023705-0**



.....

**Verónica Alexandra Romero Bravo**  
**060519448-9**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **COMPARACIÓN DEL USO DE LA MANUFACTURA ADITIVA EN LA FABRICACIÓN DE MOLDES PARA INYECCIÓN DE SILICONA: TECNOLOGÍA FDM VS TECNOLOGÍA DE RESINA**, realizado por las señoritas: **PAULLÁN RODRÍGUEZ NAYELLI VANESSA** y **ROMERO BRAVO VERÓNICA ALEXANDRA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

**FIRMA**

**FECHA**

Ing. Carlos Ramiro Cepeda Godoy  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



2024-04-23

Ing. Darío Fernando Guamán Lozada  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACION CURRICULAR**



2024-04-23

Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes  
**ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACION CURRICULAR**



2024-04-23

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Margarita y Wilson, por ser el pilar fundamental en mi vida, por su paciencia, amor y apoyo incondicional. A mis hermanas, Nicole y Alisson, por ser mi compañía y alegría en momentos de dificultad. A mi familia y amigos por estar presentes en mi vida y confiar en mí.

Nayelli

Dedico este trabajo a las personas más importantes de mi vida, mis padres, Jorge Romero y Yolanda Bravo, por ser mi mayor fuente de inspiración, por su sacrificio y enseñanzas en cada paso que he dado en mi vida. A mi hermano, Dennys, por ser mi guía, mi apoyo y compañero de aventuras. A mi abuelita, Mercedes, por su amor y sabiduría que han dejado una huella imborrable en mi corazón. A mi familia y amigos por creer en mí.

Verónica

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, por darme sabiduría y guiarme durante mi vida universitaria. Agradezco a mis padres, hermanas y tíos por siempre estar a mi lado brindándome su apoyo en cada paso que doy. A mi director, Darío, y asesor, Paúl, por su invaluable guía y por compartir sus conocimientos para el desarrollo de la investigación. A Danny, por su motivación y apoyo en la búsqueda de información y de equipos para el desarrollo del presente. A Jonathan, por su paciencia y tiempo dedicado para el uso del rugosímetro. A todos los profesores y compañeros que fueron parte fundamental y me ayudaron en la culminación de esta etapa de mi vida.

Nayelli

En primer lugar, agradezco a Dios por darme fortaleza y haberme dado la oportunidad de coincidir con personas que hicieron de esta etapa un recuerdo maravilloso. Agradezco a mis padres, hermano, abuelita y tíos por inculcarme valores y brindarme consejos de vida que han hecho de mí la persona que soy. A mi amiga y compañera de tesis, Nayelli, por confiar en mí y culminar esta etapa juntas, a Jonathan por su ayuda en el manejo de un equipo. A mi director, Darío, y asesor, Paúl, por ser guías durante esta investigación. A mi enamorado, Carlos, por brindarme su apoyo cuando más lo necesité. A los docentes, por sus enseñanzas, y a los amigos que conocí, por los recuerdos que dejan en mí, especialmente a Wendy y Ximena por su amistad incondicional.

Verónica

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiv
RESUMEN .....	xv
SUMMARY/ ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

1.	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1.	Planteamiento del problema .....	2
1.2.	Limitaciones y delimitaciones.....	3
1.2.1.	<i>Limitaciones</i> .....	3
1.2.2.	<i>Delimitaciones</i> .....	3
1.3.	OBJETIVOS .....	4
1.3.1.	<i>Objetivo General</i> .....	4
1.3.2.	<i>Objetivos Específicos</i> .....	4
1.4.	Justificación.....	4
1.5.	Hipótesis .....	5

### CAPÍTULO II

2.	MARCO TEÓRICO.....	6
2.1.	Antecedentes de investigación .....	6
2.2.	Referencias Teóricas.....	7
2.2.1.	<i>Impresión 3D</i> .....	8
2.2.2.	<i>Comparación entre FDM vs SLA</i> .....	8

2.2.3.	<i>Polímeros</i> .....	9
2.2.4.	<i>¿Cómo se los produce?</i> .....	9
2.2.5.	<i>Clasificación de los polímeros</i> .....	9
2.2.5.1.	<i>Según su origen</i> .....	9
2.2.5.2.	<i>Según la estructura de la cadena</i> .....	10
2.2.6.	<i>Materiales Utilizados en FDM</i> .....	10
2.2.6.1.	<i>PLA</i> .....	11
2.2.6.2.	<i>PETG</i> .....	12
2.2.7.	<i>Materiales utilizados en SLA</i> .....	13
2.2.7.1.	<i>Resina estándar de Anycubic</i> .....	14
2.2.8.	<i>Consideraciones para el diseño de moldes</i> .....	16
2.2.9.	<i>Criterios de clasificación de moldes</i> .....	17
2.2.10.	<i>Ciclo de moldeo por inyección</i> .....	18
2.2.11.	<i>Material para inyectar en los moldes</i> .....	18
2.2.12.	<i>Ventajas de moldes impresos en 3D con respecto a moldes metálicos</i> .....	19

### CAPITULO III

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	21
3.1.	<b>Enfoque de la Investigación</b> .....	21
3.1.1.	<i>Enfoque cuantitativo</i> .....	21
3.1.2.	<i>Enfoque cualitativo</i> .....	21
3.2.	<b>Alcance de la Investigación</b> .....	21
3.3.	<b>Diseño de Investigación</b> .....	21
3.3.1.	<i>Variable dependiente</i> .....	24
3.3.2.	<i>Variables independientes</i> .....	24
3.4.	<b>Tipo de Estudio</b> .....	25
3.5.	<b>Métodos, técnicas e instrumentos de investigación</b> .....	25



<b>3.5.1.</b>	<b><i>Métodos</i></b> .....	<b>25</b>
3.5.1.1.	<i>Método Experimental</i> .....	25
3.5.1.2.	<i>Análisis de Tiempo y Costo</i> .....	25
3.5.1.3.	<i>Análisis Termogravimétrico (TGA)</i> .....	25
3.5.1.4.	<i>Análisis Microscópico de Superficie</i> .....	26
<b>3.5.2.</b>	<b><i>Técnicas</i></b> .....	<b>26</b>
3.5.2.1.	<i>Análisis Termogravimétrico</i> .....	26
3.5.2.2.	<i>Diseño e impresión de moldes</i> .....	26
3.5.2.3.	<i>Evaluación de los moldes antes y durante de las inyecciones</i> .....	27
<b>3.5.3.</b>	<b><i>Ensayos</i></b> .....	<b>28</b>
3.5.3.1.	<i>Ensayo termogravimétrico</i> .....	28
<b>3.6.</b>	<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b> .....	<b>29</b>
3.6.1.	<i>Hipótesis de rugosidad de los moldes</i> .....	29
3.6.2.	<i>Hipótesis de profundidad de la letra</i> .....	29

#### **CAPITULO IV**

<b>4.</b>	<b>MARCO DE ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1.</b>	<b>Procesamiento, análisis e interpretación de resultados</b> .....	<b>30</b>
4.1.1.	<i>Resultados de la caracterización de los materiales de impresión 3D (PLA, PETg y Resina Estándar)</i> .....	30
4.1.1.1.	<i>Resultados del diseño y obtención de los moldes</i> .....	30
4.1.1.2.	<i>Resultados de análisis microscópico de la superficie de los moldes</i> .....	32
4.1.1.3.	<i>Resultados de análisis termogravimétrico (TGA) para los diferentes materiales de impresión 3D de los moldes</i> .....	34
4.1.2.	<i>Resultados de las piezas inyectadas con silicón</i> .....	40
4.1.3.	<i>Resultados de la profundidad de la letra y de la rugosidad en los moldes</i> .....	42
4.1.3.1.	<i>Resultados de las rugosidades tomadas después las inyecciones</i> .....	44

4.1.3.2.	<i>Análisis estadístico de la rugosidad</i> .....	44
4.1.3.3.	<i>Resultados de la profundidad de la letra</i> .....	45
4.1.3.4.	<i>Análisis estadístico de la profundidad de la letra</i> .....	46
<b>4.1.4.</b>	<b><i>Resultados de viabilidad económica y de tiempo</i></b> .....	<b>46</b>
4.1.4.1.	<i>Resultados de los costos y tiempo de impresión de los moldes</i> .....	47
4.1.4.2.	<i>Resultados de tiempo y costos de moldes de acero</i> .....	47
<b>4.2.</b>	<b>Comprobación de la hipótesis</b> .....	<b>50</b>
4.2.1.	<i>Rugosidad</i> .....	50
4.2.2.	<i>Profundidad de la letra</i> .....	50
<b>4.3.</b>	<b>Discusión</b> .....	<b>51</b>

## **CAPITULO V**

<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>53</b>
<b>5.1.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>53</b>
<b>5.2.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>55</b>

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1.</b> Autores usados en la investigación.....	6
<b>Tabla 2-2.</b> Procesos de producción aditiva.....	8
<b>Tabla 2-3.</b> Materiales utilizados para diferentes tecnologías de manufactura aditiva.....	11
<b>Tabla 2-4.</b> Propiedades del PETg.....	12
<b>Tabla 2-5.</b> Materiales populares de impresión 3D SLA o tecnología de resina.....	13
<b>Tabla 2-6:</b> Especificaciones resina básica de Anycubic.....	15
<b>Tabla 2-7:</b> Criterios de clasificación de moldes.....	17
<b>Tabla 2-8:</b> Parámetros técnicos de la silicona RTV m20.....	19
<b>Tabla 3-1:</b> Tabla para el diseño experimental.....	22
<b>Tabla 3-2:</b> Metodología para la obtención de moldes.....	26
<b>Tabla 3-3:</b> Metodología de evaluación de los moldes.....	27
<b>Tabla 4-1:</b> Análisis microscópico de la superficie de los moldes.....	32
<b>Tabla 4-2:</b> Tabla de resultados generales de profundidad de la letra y la rugosidad.....	43
<b>Tabla 4-3:</b> Datos de mediciones de rugosidad.....	44
<b>Tabla 4-4:</b> Análisis ANOVA de datos de Rugosidad.....	44
<b>Tabla 4-5:</b> Datos de mediciones de profundidad de la letra.....	45
<b>Tabla 4-6:</b> Análisis ANOVA de datos de la profundidad de la letra.....	46

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b> Filamento de PLA.....	12
<b>Ilustración 2-3:</b> Filamento PETg .....	13
<b>Ilustración 2-4:</b> Resina estándar Anycubic.....	16
<b>Ilustración 2-5:</b> Silicona RTV m20 .....	18
<b>Ilustración 3-1:</b> Gráfica de ejemplo del TGA.....	28
<b>Ilustración 4-1:</b> Molde diseñado cerrado.....	30
<b>Ilustración 4-2:</b> Vista superior e inferior del cuerpo del molde.....	30
<b>Ilustración 4-3:</b> Vista superior e inferior de la tapa del molde .....	31
<b>Ilustración 4-4:</b> Moldes impresos en FDM (PETG), FDM (PLA) Y SLA (Resina estándar) ...	31
<b>Ilustración 4-5:</b> Resultado de TGA para PLA .....	34
<b>Ilustración 4-6:</b> Resultado de DTG para PLA.....	35
<b>Ilustración 4-7:</b> Resultado de TGA para PETg.....	36
<b>Ilustración 4-8:</b> Resultado de DTG para PETg.....	37
<b>Ilustración 4-9:</b> Resultado de TGA para Resina Estándar .....	38
<b>Ilustración 4-10:</b> Resultado de DTG para Resina Estándar .....	39
<b>Ilustración 4-11:</b> Resultado de los llaveros en la primera inyección.....	40
<b>Ilustración 4-12:</b> Resultado de los llaveros en la quinceava inyección.....	41
<b>Ilustración 4-13:</b> Resultado de los llaveros en la treintava inyección. ....	42
<b>Ilustración 4-14:</b> Gráfico de Tukey Rugosidades Vs Tecnologías de impresión .....	45
<b>Ilustración 4-15:</b> Gráfico de Tukey Profundidad de la letra Vs Tecnologías de impresión .....	46
<b>Ilustración 4-16:</b> Resultados del costo y tiempo de fabricación de los moldes .....	47
<b>Ilustración 4-17:</b> Comparación de costos y tiempos de fabricación de moldes de acero .....	48

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 3-1:</b> Porcentaje de pérdida de cada etapa del TGA .....	26
--	----

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** PROCESO DE INYECCION DE SILICONA EN LOS MOLDES

**ANEXO B:** MEDICION DE LA PROFUNDIDAD DE LA LETRA Y LA RUGOSIDAD

**ANEXO C:** ANALISIS MISCROSCOPICO

**ANEXO D:** RESULTADO DE LAS PIEZAS INYECTADAS CON SILICON

## RESUMEN

La fabricación de moldes para inyección de silicona tradicionalmente se realiza en materiales metálicos o aleaciones, los cuales permiten obtener moldes de alta calidad, pero resultan costosos, su tiempo de fabricación es largo y dificulta la obtención de figuras con muchos detalles, por lo que la impresión 3D es una alternativa. El objetivo de la investigación fue comparar la tecnología FDM usando como materiales el PLA y PETg, y la tecnología SLA con resina estándar, para evaluar su calidad y rentabilidad en la inyección de silicona. La metodología implementada tuvo un enfoque cualitativo y cuantitativo, en donde se realizó un análisis microscópico de la superficie de los moldes para conocer cual tiene menos irregularidades; un análisis termogravimétrico para identificar el material del molde que presenta mayor resistencia a la temperatura; un diseño ANOVA factorial, en la variación de la rugosidad y la profundidad de las letras de cada molde después de la primera, quinceava y treintava inyección; se comparó la viabilidad económica y de tiempos de fabricación respecto a cada uno de los moldes impresos en 3D y respecto a los moldes metálicos tradicionales. Se identificó que el molde de la tecnología SLA presenta menos irregularidades en su superficie; el material que resiste mayor temperatura es el PETg; con el análisis ANOVA se observó que la tecnología de impresión 3D si influye en la rugosidad de los moldes, mientras que en la profundidad de la letra no; en el tiempo y costos de fabricación de los moldes, resulta más rentable realizar moldes impresos en 3D, siendo el más económico el molde de PLA y el más rápido el molde de resina estándar. En ese contexto, se concluye que la tecnología FDM con material PETg, es el molde con mejor calidad y rentabilidad para la inyección de silicón.

**Palabras clave:** <TECNOLOGIA FDM>, <TECNOLOGIA SLA>, <ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)>, <TEREFTALATO DE POLIETILENO GLICOLIZADO (PETg)>, <RESINA>, <RUGOSIDA>.

0476-DBRA-UPT-2024



## **SUMMARY/ ABSTRACT**

The manufacture of molds for silicone injection is traditionally done in metallic materials or alloys, which allow obtaining high quality molds, but they are expensive, their manufacturing time is long and it is difficult to obtain figures with many details, so 3D printing is an alternative. The objective of the research was to compare FDM technology using PLA and PETg as materials, and SLA technology with standard resin, to evaluate their quality and cost-effectiveness in silicone injection. The methodology implemented had a qualitative and quantitative approach, where a microscopic analysis of the surface of the molds was performed to know which one has less irregularities; a thermogravimetric analysis to identify the mold material that presents greater resistance to temperature; a factorial ANOVA design, in the variation of the roughness and depth of the letters of each mold after the first, fifteenth and thirtieth injection; the economic feasibility and manufacturing times were compared with respect to each of the 3D printed molds and with respect to the traditional metal molds. It was identified that the SLA technology mold has less irregularities on its surface; the material that resists higher temperature is PETg; with the ANOVA analysis it was observed that the 3D printing technology does influence the roughness of the molds, while the depth of the letter does not; in the time and manufacturing costs of the molds, it is more profitable to make 3D printed molds, being the most economical the PLA mold and the fastest the standard resin mold. In this context, it is concluded that FDM technology with PETg material, is the mold with the best quality and cost-effectiveness for silicone injection.

**Key words:** <FDM TECHNOLOGY>, <SLA TECHNOLOGY>, <POLYLACTIC ACID (PLA)>, <GLYCOLIZED POLYETHYLENE TERPHTHALATE (PETg)>, <RESIN>, <RUGOSIDE>



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.  
1103696132



## **INTRODUCCIÓN**

En los últimos años ha estado en auge la impresión 3D, la cual presenta varias tecnologías de impresión como lo son la tecnología FDM y la tecnología de resina, la principal diferencia se basa en la forma de impresión, en la tecnología FDM el polímero usado es fundido y depositado capa por capa para formar la pieza deseada; mientras que la tecnología de resina o SLA usa un láser para curar la resina fotopolimérica capa por capa, esta resina es líquida y al usar luz UV se solidifica.

Dentro de la industria generalmente se han usado moldes de metal para crear piezas a inyección, estos moldes resultan costosos debido a que sus tiempos de fabricación son largos y pese a esto no se logran detalles precisos en piezas irregulares y con relieves. Como alternativa se propone a la impresión 3D en la fabricación de moldes, gracias a softwares de diseño 3D se pueden crear infinidad de modelos, con bastante precisión a los detalles. Las tecnologías de impresión más económicas y disponibles en el mercado son la FDM y la SLA o de resina. Para imprimir en estas tecnologías tenemos varias opciones de materiales poliméricos. En base a los costos y características que ofrecen se ha optado para la tecnología FDM imprimir en PLA y PETg, mientras que para la tecnología SLA se ha decidido por una resina estándar.

El propósito de este estudio es comparar exhaustivamente ambas tecnologías de impresión tanto la FDM (Fused Deposition Modeling) y la SLA (Stereolithography) y sus respectivos materiales, con el fin de evaluar su viabilidad en la industria. Se analizarán los costos de impresión, la calidad de los moldes, la precisión de los detalles y el desgaste a través de la inyección de silicona, con el objetivo final de producir llaveros representativos de la carrera de Ingeniería Química, este trabajo busca proporcionar información crucial para la integración efectiva de la impresión 3D en los procesos industriales de fabricación de moldes y piezas inyectadas como alternativa de los moldes metálicos en la fabricación de lotes pequeños a medianos de piezas de silicona.

# CAPÍTULO I

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

La fabricación de moldes para la inyección de silicona es un proceso crucial en la producción de piezas de alta precisión y complejidad. En la actualidad, existen diferentes materiales y tecnologías para la construcción de moldes, y la impresión 3D se ha posicionado como una alternativa a los métodos tradicionales. Dentro de las tecnologías de impresión 3D, destacan FDM y Resina, que ofrecen diferentes ventajas y desventajas en términos de calidad de los moldes, eficiencia en el proceso de fabricación y costos asociados.

En el proceso tradicional de fabricación de moldes, se utilizan materiales metálicos o aleaciones, como aceros endurecidos, aluminio y aleaciones de berilio-cobre. Estos materiales permiten obtener moldes de alta calidad, pero resultan más costosos y requieren tiempos de fabricación más largos. Además, manipular estos materiales puede resultar complicado, lo que dificulta la obtención de figuras irregulares y con detalles pequeños, por otro lado, la impresión 3D de moldes ofrece una alternativa más eficiente en términos de tiempo y costos. Las impresoras de filamento y de resina son dos opciones para la fabricación de moldes con impresión 3D. Sin embargo, se ha observado que los moldes fabricados con impresoras de filamento pueden presentar irregularidades y desigualdades, mientras que los moldes fabricados con impresoras de resina son más homogéneos y parejos, en este contexto, surge la necesidad de investigar cuál de las tecnologías de impresión 3D, FDM o Resina, es más adecuada para la fabricación de moldes para la inyección de silicona, considerando la calidad de los moldes obtenidos, la eficiencia en el proceso de fabricación y los costos asociados.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo comparar el uso de la tecnología de impresión 3D en la fabricación de moldes para inyección de silicona, específicamente la tecnología FDM y la tecnología de Resina, evaluando su precisión, calidad, tiempo y costos. Además, se llevará a cabo la producción de piezas mediante inyección de plástico con ambos tipos de moldes para evaluar la calidad del producto obtenido. Con esta investigación, se busca proporcionar información valiosa para la industria de la producción de piezas de plástico, en cuanto a la elección de la tecnología más adecuada para la fabricación de moldes de inyección y la producción de piezas de alta calidad.

## **1.2. Limitaciones y delimitaciones**

### **1.2.1. Limitaciones**

- La facultad no cuenta con laboratorios que nos proporcionen los equipos necesarios para llevar a cabo la investigación (impresoras 3D).
- El material para la impresión y la inyección no es fácil de conseguir en la ciudad de Riobamba.
- El costo de impresión en la tecnología FDM resulta más costoso debido al tiempo de impresión empleado en obtener las piezas.

### **1.2.2. Delimitaciones**

- El estudio se basa en la comparación de la tecnología FDM y tecnología de resina, enfocándose en la precisión de los detalles de las piezas inyectadas, desgaste de los moldes después de la inyección y costos.
- El producto que se elaborará será un llavero de silicona RTV m20 con la temática del sello de la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Los materiales para utilizar serán, la tecnología FDM usará PLA y PETg, para la tecnología de resina los materiales a utilizar son unas resinas estándar, de la marca Anycubic.
- Se realizarán 30 llaveros por molde dentro de los cuales se evaluará el desgaste de los mismos moldes estableciendo las mediciones de rugosidad y profundidad de detalles en las inyecciones 1, 15 y 30 respectivamente.
- Los análisis por realizar son: Mediciones del desgaste (mediciones de rugosidad) y de la profundidad de los detalles (profundidad de una letra) con el calibrador pie de rey, comparación superficial de cada molde con respecto a una prueba de microscopio de barrido y comparación de costos y tiempo respecto a las dos tecnologías de impresión 3D.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### ***1.3.1. Objetivo General***

- Comparar el uso de la tecnología FDM y la tecnología de resina en la fabricación de moldes para inyección de silicona y evaluar su impacto en la calidad y rentabilidad de la producción de piezas de plástico.

#### ***1.3.2. Objetivos Específicos***

- Analizar las características y propiedades de los moldes fabricados mediante tecnología FDM y tecnología de resina.
- Evaluar la calidad de los productos obtenidos mediante la inyección de silicona en los moldes fabricados con ambas tecnologías.
- Comparar los costos y tiempos de fabricación de los moldes para inyección de silicona mediante tecnología FDM y tecnología de resina y determinar cuál de estas tecnologías es más rentable para la producción en masa de piezas de plástico.
- Determinar la varianza de la rugosidad de cada uno de los moldes en función del desgaste que tienen en los mismos después de hacer las inyecciones con silicona RTV m20.

### **1.4. Justificación**

En la actualidad, la fabricación de productos de plástico es una industria cada vez más importante en diversos sectores, por lo que se han desarrollado diversas formas y técnicas para su fabricación, entre las cuales destaca la inyección de plástico. La obtención de moldes para inyección es un proceso fundamental para garantizar la calidad del producto final, lo cual implica una complejidad geométrica, dimensiones específicas y un tiempo de fabricación relativamente largo.

Por esta razón, la tecnología de impresión 3D se ha vuelto una opción interesante para la fabricación de moldes de inyección, en particular las impresoras 3D de resina y de filamento. El uso de estas tecnologías podría disminuir los costos y tiempos de fabricación, ya que se acelera el proceso de prototipado y producción de piezas, permitiendo una mayor personalización y visualización de detalles en los moldes, sin embargo, aún existen dudas acerca de la calidad y precisión que se pueden obtener al utilizar estas tecnologías para la fabricación de moldes de

inyección, y es importante realizar una comparación entre ellas para determinar cuál es la más adecuada para la producción de piezas de alta calidad.

### **1.5. Hipótesis**

¿Qué tecnología de impresión 3D es más viable teniendo en cuenta su resistencia al desgaste, detalles del molde, tiempo y costo de producción?

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de investigación

La impresión 3D ha cambiado la industria de la fabricación desde finales de la década de 1980, pero no fue hasta el 2009 que las impresoras 3D estuvieron disponibles para el público. Por lo general, estas impresoras son del tipo modelado por deposición fundida (FDM) que utilizan una extrusora que funde un filamento de plástico o cualquier otro polímero para construir piezas. En 2011, las impresoras 3D del tipo SLA, estuvieron disponibles para el público, estas utilizan una resina curable UV (ultravioleta) y una fuente de luz UV para fabricar objetos sólidos. (Finnes 2015, pág. 11)

Según (High Definition 3D Printing- Comparing SLA and FDM Printing Technologies, 2015) “Las impresoras 3D FDM y SLA funcionan con los mismos principios de creación de objetos mediante la adición de capas de material, también conocida como fabricación aditiva. Una impresora SLA puede producir productos con una resolución mucho mayor que una impresora FDM, pero lo hace a expensas de la velocidad. Además, el proceso de usar una impresora SLA es más complicado que una impresora FDM porque puede ser difícil trabajar con la resina y, en general, los tiempos de instalación y limpieza son más largos. Hay muchas aplicaciones compatibles con ambos tipos de impresoras. En muchas aplicaciones generales de impresión 3D, una impresora FDM es apropiada. La configuración y la limpieza son sencillas y el proceso de impresión será rápido. Sin embargo, cuando se necesitan detalles adicionales, las impresoras FDM”.

**Tabla 2-1.** Autores usados en la investigación

Autor (es)	Año	Título	Tipo	Ubicación
Tyler Finnes	2015	High Definition 3D Printing- Comparing SLA and FDM Printing Technologies	Artículo de revista	<a href="http://sdstate.edu">High Definition 3D Printing Comparing SLA and FDM Printing Technologies (sdstate.edu)</a>
Conor Whlean Dr. Con Sheahan	2019	Using Additive Manufacturing to Produce Injection Moulds Suitable for Short Series Production	Artículo	<a href="https://www.sciencedirect.com">Using Additive Manufacturing to Produce Injection Moulds Suitable for Short Series Production - ScienceDirect</a>

Aleska Milovanovic Milos Milosevic Goran Mladenovic Blaz Likozar Katarina Colic Nenad Mitrovic	2018	Experimental Dimensional Accuracy Analysis of Reformer Prototype Model Produced by FDM and SLA 3D Printing Technology	Artículo	<a href="#">Experimental Dimensional Accuracy Analysis of Reformer Prototype Model Produced by FDM and SLA 3D Printing Technology   SpringerLink</a>
J. Minguella Canela S. Morales Planas J.R. Gomá Ayats M.A. de los Santos Lopez	2019	Study and comparison of the different costs schema associated to geomemtry, material and processing between 3D printing, injection molding and machining manufacturing technologies.	Artículo	<a href="#">Study and comparison of the different costs' schema associated to geometry, material and processing between 3D printing, injection molding and machining manufacturing technologies - ScienceDirect</a>
S.L. Rodriguez Reyna Cristan Mata J.H. Diaz Aguilera H.r. Acevedo Parra Fiedencio Tapia	2022	Mechanical properties optimización for PLA, ABS and Nylon+ CF manufactured by 3D FDM printing	Artículo	<a href="#">Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon + CF manufactured by 3D FDM printing - ScienceDirect</a>
C, Lucía	2017	FDM o SLA: ¿Qué tecnología de impresión 3D elegir?	Sitio web	<a href="#">FDM o SLA: ¿Qué tecnología de impresión 3D elegir? - 3Dnatives</a>
Tractus 3D	S.f	FDM vs SLA 3D printing	Sitio web	<a href="#">FDM vs SLA 3D printing - What are the advantages and disadvantages (tractus3d.com)</a>
Tellier, Charles	S.f	FDM vs. SLA: Conocimiento de estas tecnologías de impresión 3D	Sitio web	<a href="#">FDM vs. SLA: Conocimiento de estas tecnologías de impresión 3D - 3D Tech Valley (ES)</a>
Olivero, David	2021	FDM vs SLA: ¿Cuál es la tecnología de impresión 3D que mejor me conviene?	Sitio web	<a href="#">FDM vs SLA: ¿Cuál es la tecnología de impresión 3D que mejor me conviene? - Blog - Intelligy 2022</a>

Realizado por: Paullán, N., Romero, V., 2024

## 2.2. Referencias Teóricas

### 2.2.1. Impresión 3D

Es un proceso que permite producir objetos tridimensionales sólidos, esto a partir de un modelo digital, a partir de una PC. (Galbati 2019, pág 2)

### 2.2.2. Comparación entre FDM vs SLA

Gracias a la tecnología que poseemos en la actualidad existen varias tecnologías que se diferencian en la manera en que van construyendo las piezas, así como los materiales que pueden usarse en cada una como se muestra en la tabla 2-2: (Galbati 2019 pág 7)

**Tabla 2-2.** Procesos de producción aditiva

Tipo	Tecnología	Siglas	Material
Extrusión	Modelado por deposición fundida	FDM	Termoplásticos, ABS, PLA, metales, comestibles
Granular	Sinterizado láser directo de metal	LMD	Aleaciones metálicas
Granular	Fusión por haz de electrones	EBM	Aleaciones de titanio
Granular	Sinterización selectiva por calor	SHS	Termoplásticos en polvo
Granular	Sinterización selectiva por láser	SLS	Termoplásticos, metales en polvo, polvos cerámicos
Granular	Inyección de tinta y lecho en polvo	-	Yeso
Laminado	Fabricación de objeto laminado	LOM	Papel, lámina metálica, película de plástico
Fotopolimerizado	Estereolitografía	SLA	Fotopolímero
Fotopolimerizado	Procesamiento digital de la luz	DLP	Resina líquida

Fuente: (Galbati, 2019), pág 7

Realizado por: Paullán, N., Romero, V., 2024

La diferencia es clara entre estas dos tecnologías:

- **FDM:** En este método se funde el material termoplástico, con el fin de producir las capas que van apiladas una encima de la otra, la boquilla que expende el material se mueve en



los tres ejes del plano x, y, z, esto con el fin de obtener una pieza tridimensional. (Galbati 2019, pág 5)

- **SLA:** En este método se cura el material líquido usando diferentes tecnologías, se usa para poder obtener una pieza sólida a partir de una resina fotosensible, ya que se la expone a luz ultravioleta que va dirigido desde un láser. (Galbati 2019, pág 5)

### **2.2.3. Polímeros**

Se denominan de esta manera a las moléculas de gran tamaño, que están compuestas por cadenas largas de monómeros, estos unidos por enlaces covalentes, estos monómeros están constituidos principalmente por átomos de carbono, puede poseer grupos laterales o radicales; Estas moléculas orgánicas constituyen también materiales plásticos que usamos día a día y también los tejidos vivos como piel, tela de araña, etc. (Cianciosi 2014, pág, 3)

### **2.2.4. ¿Cómo se los produce?**

Los polímeros sintéticos se producen por medio de la polimerización, en este proceso se da la reacción de miles de monómeros que pasan a formar parte de una larga cadena macromolecular. (González, Mancini 2003, págs 153 a 155)

Existen dos tipos conocidos de polimerización: de adición o crecimiento de cadena y de condensación o crecimiento por pasos.

- La polimerización por crecimiento de cadena se caracteriza porque los intermediarios del proceso (radicales libres, iones o complejos metálicos) son transitorios y no pueden aislarse.(Fombuena, Fenollar, Montañés 2016, pág 8)
- La polimerización por pasos se produce por reacciones entre moléculas que tienen grupos funcionales. A los compuestos intermediarios de peso molécula bajo se les llama oligómeros, y se pueden aislar. Se le puede describir como una reacción química sencilla que se efectúa repetidamente.(Fombuena, Fenollar, Montañés 2016, pág 8)

### **2.2.5. Clasificación de los polímeros**

#### **2.2.5.1. Según su origen**

Naturales: Son sustancias producidas por organismos vivos, por ejemplo, los polisacáridos, caucho natural y proteínas como la tela de arañas.(Cianciosi 2014, pág 3)

Sintéticos: Son macromoléculas formados por monómeros a partir de la polimerización, pueden ser termoplásticos y termo rígidos.(Cianciosi 2014, pág 4)

#### *2.2.5.2. Según la estructura de la cadena*

- Lineal: Se repite siempre el mismo tipo de unión
- Ramificado: Con cadenas laterales unidas a la principal
- Entrecruzado: Si se forman enlaces entre cadenas vacías
- Homopolímero: Son aquellos polímeros en los que todos los monómeros que los constituyen son iguales.
- Copolímero: Están formados por dos o más monómeros diferentes.(Cianciosi 2014, págs 3 a 11)

#### *2.2.6. Materiales Utilizados en FDM*

Existen varios materiales que se pueden utilizar para trabajos de impresión, es importante conocer las características de estos, es importante mencionar que algunas impresoras pueden imprimir más de un material, en la siguiente tabla se detallarán algunos de estos materiales, así como las siglas por las cuales se identifican, temperatura de fusión, así como propiedades como biodegradabilidad y reciclabilidad, finalmente aspectos interesantes de cada uno de ellos. (Galbati 2019, pág, 3)

**Tabla 2-3.** Materiales utilizados para diferentes tecnologías de manufactura aditiva

Material	Siglas	Temperatura de Fusión	Biodegradable	Reciclable	Aspectos Interesantes
Acrilonitrilo butadieno estireno	ABS	215-250 °C	NO	SI	Económico
Ácido poliláctico	PLA	160-230 °C	SI	SI	Proviene del maíz y la papa
Alcohol polivinílico	PVA	180-200 °C	SI	SI	Soluble en agua
Policarbonato	PC	280-305 °C	NO	SI	-
Ácido poliláctico flexible	Soft PLA	200-220 °C	SI	SI	-
Polietileno de alta densidad	HDPE	225-230 °C	NO	SI	Económico. Resiste variedad de solventes
Nailon	-	240-250 °C	NO	SI	Tendencia a encogerse

**Fuente:** (Galbati, 2019, pág 3)

**Realizado por:** Paullán, N., Romero, V., 2024

### 2.2.6.1. PLA

El ácido poliláctico (PLA), es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, éste biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango inusual de propiedades, como se especifica en la tabla número tres las propiedades como la temperatura de fusión, la biodegradabilidad y la reciclabilidad. (Arribas 2015, pág, 31)

El amplio rango de aplicaciones que tiene el PLA se debe a la gran variedad de propiedades físicas, químicas y mecánicas que presenta el ácido láctico y su polímero.(Arribas 2015, pág 33)

El PLA es un polímero que se puede procesar mediante:

- Moldeo por inyección
- Extrusión de láminas
- Moldeo por soplado de extrusión

- Termoconformado
- Moldeo por soplado y estirado
- Moldeo por soplado y estirado por inyección
- Hilado de fibra (Arribas 2015, pág 35)



**Ilustración 2-1:** Filamento de PLA

Fuente: (Arribas 2015, pág 37)

#### 2.2.6.2. PETG

El PETG es producto de la glicolización del PET. Este proceso consiste en agregar ciclohexano dimetanol y reemplazar al etilenglicol, consiguiendo una cadena de átomos más larga. Con esto se consigue retardar la cristalización cuando las piezas fabricadas en PETG son sometidas a esfuerzo. Además, PET adicionado con glicol aumenta la flexibilidad del polímero y reduce su capacidad higroscópica con respecto al PET. (Velasco, Quevedo, Bonilla 2022, pág 171)

**Tabla 2-4.** Propiedades del PETg

<b>Propiedades mecánicas del PETg</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Valor numérico</b>	<b>Unidades</b>
Tensión de rotura	49	MPa
Temperatura de distorsión	65	°C, 0.45 MPa
Densidad	1,23	g/cm <sup>3</sup>
Alargamiento por rotura	228	%
Resistencia de impacto	8	KJ/m <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad	2027	MPa

Fuente: (COLOR PLUS 2020, pág 1)

Realizado por: Paullán, N., Romero, V., 2024



**Ilustración 2-2:** Filamento PETg

Fuente: (COLOR PLUS 2020, pág1

### 2.2.7. Materiales utilizados en SLA

Materiales populares de impresión 3D SLA o tecnología de resina.

**Tabla 2-5.** Materiales populares de impresión 3D SLA o tecnología de resina

<b>Material</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicaciones</b>
Resinas estándar o básica	Alta resolución Acabado de la superficie liso y mate	Modelos conceptuales Prototipos estéticos
Clear resin	El único material completamente transparente para la impresión 3D en plástico Pulido hasta casi una transparencia óptica total	Piezas que requieren transparencia óptica Milifluídica
Draft resin	Uno de los materiales más rápidos para la impresión 3D 4 veces más rápida que las resinas estándar, 10 veces más rápida que el FDM	Prototipos iniciales Iteraciones rápidas
Resinas Tough y Durable	Materiales resistentes, funcionales y dinámicos Capaces de soportar sin romperse impactos y esfuerzos de compresión, estiramiento y flexión Varios materiales con propiedades similares a las del ABS o el polietileno	Carcasas y bastidores Dispositivos de sujeción y de fijación Conectores Prototipos de desgaste
Resinas Rigid	Materiales reforzados, resistentes y rígidos que resisten la flexión Gran resistencia térmica y química Ofrecen una gran estabilidad dimensional bajo carga	Dispositivos de sujeción y fijación y utillaje Turbinas y palas de ventilador Componentes para la circulación de fluidos y del aire Carcasas eléctricas y bastidores de automóviles

High Temp Resin	Alta resistencia a la temperatura Alta precisión	Flujo de aire caliente, gas y fluidos Soportes, carcasas y fijaciones resistentes al calor Moldes e insertos
Resinas Flexible y Elastic	Flexibilidad de la goma, TPU o silicona Puede aguantar esfuerzos de flexión y compresión Resiste sin desgarros durante varios ciclos	Creación de prototipos de bienes de consumo Componentes compatibles para robótica Dispositivos médicos y modelos anatómicos Modelos y atrezzo para efectos especiales
Resinas médicas y odontológicas	Una amplia gama de resinas biocompatible para producir aparatos médicos y dentales	Aparatos médicos y dentales, incluidas guías quirúrgicas, prótesis dentales y prótesis de otros tipos
Resinas para joyería	Materiales para la fundición a la cera perdida y el moldeo de caucho vulcanizado Fácil de fundir, con detalles complejos y fuerte mantenimiento de la forma	Piezas de prueba Moldes maestros para moldes reutilizables Joyería personalizada
Ceramic Resin	Acabado de la superficie similar a la piedra Se puede cocer en un horno para crear una pieza completamente cerámica	Investigación en ingeniería Obras de arte y de diseño

Fuente: (Formlabs 2024, pág 3)

Realizado por: Paullán, N., Romero, V., 2024

### 2.2.7.1. Resina estándar de Anycubic

Esta Resina UV de color estándar ofrece un rendimiento equilibrado en términos de impresión de la velocidad de éxito, pegatinas con cama de impresión, detalles del modelo, precisión de impresión, dureza, resistencia, olor, fluidez y facilidad en la limpieza puede satisfacer los requisitos de los usuarios con respecto al rendimiento material de la resina general, ya que ofrece un rendimiento equilibrado en términos de rigidez, dureza, resiliencia y detalles. La precisión de moldeo está dentro de 0,2 mm. Basado en la uniformidad de energía del equipo, la precisión de moldeo se puede controlar dentro de 0,1 mm, con el fin de ofrecer buenos detalles y detalles característicos. (ANYCUBIC 2023, pág 1)

#### a) Solidificación de alta velocidad.

Esta resina garantiza la resistencia de las piezas moldeadas, al mismo tiempo que no posee una contracción excesiva, mejorando también la velocidad de impresión. Además, acorta el tiempo de curado y mejora la eficiencia de impresión de las máquinas LCD tanto como sea posible.

Por otro lado, la Resina Basic de Anycubic brinda una fuerte adherencia al modelo y fácil desprendimiento después de la formación. Por lo tanto, no solo brinda una alta tasa de éxito de impresión y precisión, sino que también minimiza la fuerza de liberación y la adhesión de la resina. Por otro lado, el modelo unido a la plataforma de formación puede palparse fácilmente, además la baja viscosidad facilita la limpieza de la máquina y el modelo.

**b) El material es rígido y resistente.**

Si el material es demasiado fuerte en el modelo puede conducir fácilmente a la fragmentación del modelo, pero si el material es demasiado flexible será propenso a los detalles de la deformación por tracción o fractura de la impresión, lo que afectará la precisión y la estética del moldeado.

**c) El rendimiento del modelo es estable:**

La resina es estable en diferentes condiciones climáticas y también es fácil de almacenar, superando las deficiencias de otras resinas fácilmente, el ablandamiento por humedad y la corrosión ambiental. (ANYCUBIC 2022, pág 1)

**Tabla 2-6:** Especificaciones resina básica de Anycubic

<b>Especificaciones</b>	
Densidad:	1.05- 1.25 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidad:	150-200 cP
Dureza Superficial:	84 HS
Resistencia A La Tracción:	36-45 MPa
Alargamiento De Rotura:	11-20%
Contracción (ANYCUBIC 2023)	3.72-4.24%

Fuente: (ANYCUBIC 2022, pág 2)

Realizado por: Paullán, N., Romero, V., 2024



### **Ilustración 2-3:** Resina estándar Anycubic

**Fuente:** (ANYCUBIC 2023, pág 1)

#### **2.2.8. Consideraciones para el diseño de moldes**

El diseño del molde se lo realiza en algún programa de diseño, como fusión 360, para dicho fin se deben tener en consideración algunos puntos importantes para el correcto diseño y posterior obtención de piezas. (Kazmer 2007, pág 40)

- **Ángulos de inclinación:** Los ángulos de inclinación, también conocidos como "draft angles", son esenciales para permitir un desmolde suave de la pieza. Se recomienda un ángulo de inclinación mínimo de 1-2 grados para superficies verticales. Estos ángulos aseguran que la pieza pueda liberarse del molde sin quedar atrapada o dañada durante el proceso de extracción.(Kazmer 2007, pág 41)
- **Tipo de sistema de canales:** El sistema de canales, también llamado sistema de alimentación se refiere a la red de canales que lleva el material fundido desde el punto de inyección hasta las cavidades del molde. Los sistemas de canales pueden ser de tipo caliente o frío, y pueden variar en diseño según las necesidades específicas del proceso de inyección y las características de las piezas a fabricar.(Kazmer 2007, pág 41)
- **Punto de inyección:** El punto de inyección es el lugar por donde se introduce el material fundido en el molde durante el proceso de inyección. La ubicación del punto de inyección puede afectar la calidad de la pieza final, ya que influye en la distribución del material, las tensiones internas y la apariencia superficial de la pieza.(Kazmer 2007, pág 41)
- **Número de cavidades:** El número de cavidades se refiere a la cantidad de espacios en el molde donde se forma la pieza. El diseño del molde puede tener una sola cavidad o múltiples cavidades, lo que afecta la capacidad de producción y la eficiencia del proceso de fabricación.(Kazmer 2007, pág 41)
- **Tipo de sistema de expulsión:** El sistema de expulsión se utiliza para liberar las piezas moldeadas del molde una vez que el ciclo de inyección ha finalizado. Los sistemas de expulsión pueden incluir pasadores de expulsión, resortes, sistemas de aire comprimido o



cualquier otro mecanismo diseñado para expulsar las piezas de manera segura y eficiente. (Kazmer 2007, pág 41)

### 2.2.9. Criterios de clasificación de moldes

**Tabla 2-7:** Criterios de clasificación de moldes

<b>Clasificación</b>	<b>Criterio de clasificación</b>
Molde estándar	Diseño más sencillo; con una línea de partición; dirección de apertura única, desmolde o expulsión por gravedad, con pernos expulsores o manguitos
Moldes de accionamiento lateral	Una línea de partición; movimiento de apertura en dirección longitudinal y transversal actuada por pernos leva.
Molde de placa de desmontaje	Similar a 1 pero con placa de desmontaje
Molde diseñado para cortar la pieza	Similar a 1 pero la separación de los canales y de la pieza se realiza con una placa de corte de moviendo transversal
Molde de cavidad dividida	Una línea de partición; moviendo de apertura longitudinal y transversal; las dos partes de la cavidad se mueven en planos inclinados y resisten fuerzas laterales
Molde de destornillado	Movimiento rotaciones automático para desmoldeo
Molde diseñado para rasgar la pieza	Dos líneas de partición para desmoldar los canales y la pieza a vez que han sido separados; Movimiento de apertura en una dirección en dos fases
Molde de placas múltiples	Placas de cavidades apiladas con varias líneas de partición
Molde de canales aislados	Dos líneas de partición, sistema de canales no convencional con secciones transversales grandes que permiten la formación de un corazón fundido, aislado por una capa de material sólido
Molde de canales calientes	Los canales permanecen calientes por un sistema eléctrico

**Fuente:** (Kazmer 2007)

**Realizado por:** Paullán, N., Romero, V., 2024

En este contexto el tipo de molde que se abre solo a la mitad es el "Molde de cavidad dividida". En este tipo de molde, la cavidad del molde se divide en dos mitades, lo que permite que el molde se abra y se cierre horizontalmente, esta configuración es común en la fabricación de piezas que tienen simetría bilateral, ya que permite un desmolde más fácil y evita dañar la pieza durante la extracción de la pieza, en este caso esta es la usada.

### 2.2.10. Ciclo de moldeo por inyección

- I. **Inyección:** En esta primera fase el material es inyectado en estado líquido dentro del molde cerrado, el cual es comprimido por la unidad de cierre, esto permite que el material no se salga por las ranuras y tome la forma del molde, esta fase la cumple el tornillo recíproco. (Coronado 2019, pág. 307)
- II. **Presión mantenida:** La presión que tiene el plástico fundido se mantiene con el fin de no tener contracciones en la pieza en el enfriamiento. (Coronado 2019, pág. 308)
- III. **Expulsión:** Esta fase es la última y es cuando el material de inyección ya está completamente solidificado, el molde debe estar cerrado hasta que la pieza cuente con la temperatura adecuada y finalmente sea expulsada. (Coronado 2019, pág. 308)

### 2.2.11. Material para inyectar en los moldes

#### Silicona RTV m20

La silicona RTV (Room Temperature Vulcanizing) M20 es un tipo específico de caucho de silicona que se caracteriza por su capacidad para curar a temperatura ambiente sin necesidad de aplicar calor adicional, es un caucho de silicona de dos componentes (masa y catalizador). Al mezclarlos, retícula y se obtiene un producto final flexible, elástico y de excelentes propiedades mecánicas. (García Díez 2006, pág. 129)



**Ilustración 2-4:** Silicona RTV m20

**Fuente:** (ISERIQ 2023, pág. 1)

Características:

- Reproduce hasta el mínimo detalle de la pieza.
- Está diseñado para reproducción en masa.

- Permite trabajar diversos materiales, entre ellos están yeso, cemento, resina, parafina, entre otros.
- No es un producto inflamable, tampoco representa un riesgo al contacto con la piel.
- Flexibilidad y elasticidad: Al igual que otros tipos de caucho de silicona, la silicona RTV M20 es altamente flexible y elástica. Esto le permite adaptarse a diferentes formas y soportar deformaciones sin perder sus propiedades físicas.
- Resistencia a la intemperie: La silicona RTV M20 exhibe una excelente resistencia a la intemperie, la radiación ultravioleta y otros factores ambientales. Esto la hace adecuada para aplicaciones en exteriores y en entornos donde se requiere resistencia a la degradación por exposición a la intemperie.
- Buenas propiedades de aislamiento eléctrico: La silicona RTV M20 tiene buenas propiedades dieléctricas, lo que la hace adecuada para aplicaciones en las que se requiere aislamiento eléctrico, como encapsulación de componentes electrónicos y fabricación de juntas y sellos en equipos eléctricos.
- Compatibilidad con alimentos y medicamentos: Al igual que otras siliconas de grado alimenticio, la silicona RTV M20 es no tóxica y resistente a la contaminación, lo que la hace apta para su uso en aplicaciones que requieren contacto con alimentos, productos farmacéuticos y productos médicos. (García Díez 2006, pág 130)

### Principales parámetros técnicos de la silicona RTV m20

**Tabla 2-8:** Parámetros técnicos de la silicona RTV m20

Parámetro	Valor
Aspecto	Blanco
Viscosidad (CPS)	16000-19000
Dureza	20±2
Tiempo de operación (min)	90-120
Tiempo de curado (h)	4-6
Resistencia al desgarro (N/mm)	26
Resistencia a la tracción (Mpa)	3.6
Rotura por alargamiento (%)	500
Concentración (%)	0.3

**Fuente:** (ISERIQ 2023, pág 2)

**Realizado por:** Paullán, N., Romero, V., 2024

#### 2.2.12. Ventajas de moldes impresos en 3D con respecto a moldes metálicos

- **Flexibilidad de diseño:** Con la impresión 3D, se puede crear una amplia gama de diseños y geometrías complejas que pueden ser difíciles o imposibles de lograr con los métodos tradicionales de fabricación, como la fresadora de metal. (Formlabs 2020, pág 3)
- **Tiempo de fabricación reducido:** La fabricación de moldes mediante impresión 3D suele ser más rápida que la fabricación de moldes de metal mediante fresado CNC, esto se debe a que la impresión 3D no requiere herramientas adicionales ni tiempo de preparación, lo que puede acelerar el proceso de producción.(Formlabs 2020, pág 21)
- **Costo reducido:** La impresión 3D puede ser más rentable que la fabricación de moldes de metal, especialmente para prototipos y tiradas cortas, los costos de fabricación de moldes de metal pueden ser significativamente más altos debido al costo de los materiales y al tiempo de mecanizado requerido.(Formlabs 2020, pág 5)
- **Personalización e iteración rápida:** La impresión 3D permite realizar cambios en el diseño de manera rápida y económica, lo que facilita la iteración y la personalización del molde según sea necesario. (Formlabs 2020, pág 6)
- **Integración de canales de enfriamiento:** Los moldes impresos en 3D pueden incluir canales de enfriamiento internos complejos y personalizados para mejorar la eficiencia del proceso de inyección de silicona, algo que puede ser difícil de lograr con los moldes de metal tradicionales. (Formlabs 2020, pág 7)

## CAPITULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Enfoque de la Investigación

##### 3.1.1. *Enfoque cuantitativo*

Se compara entre los valores de rugosidad que se obtengan en cada uno de los moldes obtenidos tanto en la tecnología FDM como en la SL, por otro lado, la comparación del tiempo que demoró en obtener cada uno de los moldes en las diferentes tecnologías.

##### 3.1.2. *Enfoque cualitativo*

Se compara el acabado en una escala cualitativa de la manera más objetiva, mediante un análisis microscópico para visualizar los detalles superficiales. Además, luego de las inyecciones 1,15 y 30 se evaluará de manera visual la calidad de los moldes y de las piezas inyectadas. El uso de los moldes se dará con la inyección de silicona RTV m20.

#### 3.2. Alcance de la Investigación

Lo que abarca nuestra investigación es la evaluación y comparación de dos tecnologías de manufactura aditiva, siendo la tecnología FDM y la tecnología SLA. Todo esto en cuanto al desgaste que presenten los dos materiales al momento de ponerlos en uso, con la evaluación de sus características podremos diferenciar sus ventajas y desventajas, así como la aplicación de cada una de las tecnologías de manufactura aditiva.

#### 3.3. Diseño de Investigación

El diseño propuesto para este tema de investigación se basa en el “Estudio Comparativo”, ya que este tipo de investigación se centra en analizar ciertas variables que ayuden a identificar diferencias entre los factores.

Dentro de una investigación se examinarán las características, rendimiento y resultados de las tecnologías FDM y de resina, al momento de realizar la inyección de silicona. En base a esto se podrán establecer conclusiones basadas en las diferencias y similitudes observadas en cada una de las tecnologías.

El diseño de investigación que se está utilizando es un diseño factorial completo.

- **Factores:** Se tienen dos factores:
  - F1: El número de inyección (primera, quinceava, treintava repetición).
  - F2: La tecnología de impresión (FDM con PLA, FDM con PETg, SLA con resina estándar).
  
- **Niveles:** Cada factor tiene múltiples niveles: tres niveles para la tecnología de impresión y tres niveles para el número de inyección.
  
- **Combinaciones:** En un diseño factorial completo, se estudian todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores, esto significa que cada nivel de la tecnología de impresión se combina con cada nivel del número de inyección, lo que resulta en un total de 9 combinaciones (3 tecnologías de impresión por 3 números de inyección).
  
- **Replicación:** Se lleva a cabo múltiples réplicas de cada combinación (30 inyecciones por cada molde, para un total de 90 inyecciones en total).

Se utiliza un diseño factorial completo para investigar los efectos de dos factores (tecnología de impresión y número de inyección) en la rugosidad de los moldes de la pieza. Este diseño nos permite estudiar no solo los efectos individuales de cada factor, sino también sus interacciones.

**Tabla 3-1:** Tabla para el diseño experimental

Numero de inyección (F1)	Tecnología de impresión (F2)	Combinaciones		Molde	
		F1	F2	Profundidad de la letra (mm)	Rugosidad (µm)
A	FDM 1 (1)	A	1	A1	A1
	FDM 2 (2)	A	2	A2	A2
	SLA (3)	A	3	A3	A3
B	FDM 1 (1)	B	1	B1	B1
	FDM 2 (2)	B	2	B2	B2
	SLA (3)	B	3	B3	B3
C	FDM 1 (1)	C	1	C1	C1
	FDM 2 (2)	C	2	C2	C2
	SLA (3)	C	3	C3	C3

Realizado por: Romero, V., 2024

**Donde:**

**F1:** Número de inyección

- A: Primera inyección
- B: Quinceava inyección
- C: Treintava inyección

**F2:** Tecnología de impresión

- 1: FDM 1 (FDM en material PLA)
- 2: FDM 2 (FDM en material PETg)
- 3: SLA (SLA en resina estándar)

Teniendo en cuenta el diseño experimental descrito en la Tabla 3-1, se procedió a buscar un material para la inyección, según bibliografía se tuvo en cuenta un material que cure y su acabado sea flexible esto con el fin de que al momento de desmoldar no se haga complicado ya que los moldes son rígidos, por ello se eligió la silicona RTV m20.

Esta silicona tiene dos componentes, el componente A y el componente (catalizador), según la tabla 2-8 esta tiene un tiempo de curado que varía de 4 a 6 horas, luego de buscar en bibliografía acerca de esta silicona se estableció que la silicona cura en menor tiempo si se la somete a un ambiente cálido, por ello se trabajó en una estufa a 35°C y se aceleró el tiempo de curado a 2 horas.

La silicona RTV m20 se trabaja al 0.3%, y según el volumen que se requiere en los tres moldes aproximadamente es de 30, por ello se trabajó con 30 g del componente A y 1 g del componente B o catalizador.

### *3.3.1. Variable dependiente*

- **Rugosidad:** Variable que determina la textura de una superficie, de manera que evalúa las pequeñas desviaciones o irregulares de dicha superficie.
- **Profundidad de la letra:** Es una medida para determinar qué tan hondo se encuentra el diseño interno del llavero, en este caso de las letras, mediante el cual observaremos el desgaste respecto a cada inyección de resina.

### *3.3.2. Variables independientes*

- **Tecnología FDM con material de impresión PLA:** La tecnología de impresión 3D FDM es aquella que se realiza por deposición fundida, en donde el material PLA es extruido capa por capa para crear el objeto tridimensional. El material PLA, ácido polilactico, es un tipo de polímero biodegradable, que se produce a partir de almidón de maíz, caña de azúcar, etc.
- **Tecnología FDM con material de impresión PETg:** En la tecnología FDM también se puede imprimir con material PETg, polietileno tereftalato glicol, es un polímero termoplástico que se deriva del polietileno tereftalato (PET), la adición del glicol mejora ciertas propiedades del material como su resistencia y tenacidad.
- **Tecnología SLA con material de impresión resina estándar:** la tecnología SLA es aquella que usa resinas líquidas fotosensibles y luz ultravioleta para crear objetos



tridimensionales. La resina estándar es un material compuesto de monómeros y polímeros fotopolimerizables, estos se combinan para formar una resina líquida que se solidifica cuando se expone a luz ultravioleta.

### **3.4. Tipo de Estudio**

Se realiza un estudio de campo, ya que implica la recopilación de datos directamente de la impresión de los moldes y posteriormente la inyección, a partir de las tecnologías FDM y SLA, ya que se realizarán pruebas para evaluar la precisión, desgaste, tiempo y costos de los moldes obtenidos. A partir de los diferentes materiales de impresión 3D, PLA, PETg y resina estándar, se procede con su respectivo análisis para caracterizarlos y definir las condiciones de temperatura que soportan para elegir el material adecuado para la inyección.

### **3.5. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación**

#### **3.5.1. Métodos**

##### **3.5.1.1. Método Experimental**

Se empleó un método experimental para comparar el rendimiento de dos tecnologías de fabricación de moldes para inyección de silicona: FDM y tecnología de resina. Este método implicó la fabricación de moldes utilizando ambas tecnologías y la inyección de silicona RTV m20 en los mismos, seguido de la medición y análisis de la calidad de las piezas resultantes.

##### **3.5.1.2. Análisis de Tiempo y Costo**

Se realizó un análisis detallado del tiempo y los costos asociados con cada tecnología de fabricación de moldes. Esto incluyó la recopilación de datos sobre el tiempo requerido para fabricar cada molde y los costos directos e indirectos asociados con cada etapa del proceso.

##### **3.5.1.3. Análisis Termogravimétrico (TGA)**

Se llevó a cabo un análisis termogravimétrico (TGA) de los materiales utilizados en la fabricación de los moldes: PLA, PETG y resina curada en tecnología SLA. Este análisis proporcionó información sobre la estabilidad térmica y las propiedades de descomposición de los materiales, lo que contribuyó a la comprensión de su comportamiento durante el proceso de fabricación.

#### 3.5.1.4. *Análisis Microscópico de Superficie*

Se realizó un análisis microscópico de la superficie de los moldes fabricados utilizando un microscopio óptico. Este análisis permitió una evaluación detallada de la rugosidad y la morfología de la superficie de los moldes, lo que proporcionó información adicional sobre su calidad y características físicas.

### 3.5.2. *Técnicas*

#### 3.5.2.1. *Análisis Termogravimétrico*

Mediante las curvas del TGA podemos determinar que tipos de compuestos se descomponen a medida que aumenta la temperatura, para conocer la pérdida porcentual de cada etapa de descomposición lo hacemos con la siguiente ecuación:

$$\Delta m_A = \frac{m_i - m_f}{m_t} * 100$$

**Ecuación 3-1:** Porcentaje de pérdida de cada etapa del TGA

**Donde:**

$m_i$ = masa inicial de la sección

$m_f$ = masa final de la sección

$m_t$ = masa total del análisis

#### 3.5.2.2. *Diseño e impresión de moldes*

**Tabla 3-2:** Metodología para la obtención de moldes

<b>PROCESO DE OBTENCIÓN DE LOS MOLDES POR FDM Y SLA</b>
---

<b>Objetivo:</b> Diseñar e imprimir el molde en las 2 tecnologías FDM (PLA, Petg) y SLA (Resina estándar)		
<b>MATERIALES:</b>	<b>EQUIPOS:</b>	<b>REACTIVOS:</b>
PLA	Computadora	
PETg	Impresora FDM	
Resina Estándar	Impresora SLA	
<b>PROCEDIMIENTO</b>		
Definir la pieza que se desea realizar, el tamaño, características geométricas de la pieza que requiere un molde para su correcto funcionamiento.		
Seleccionar el software que más se adecue a las necesidades del diseño que es Fusion 360		
Para el diseño del molde tomar en cuenta que la misma pieza se la obtendrá en las dos tecnologías FDM y SLA.		
En la fase de impresión se debe tomar en cuenta tiempo empleado y los costos asociados en la obtención de cada molde en las diferentes tecnologías		
<b>Realizado por:</b> Romero, V., 2024		

### 3.5.2.3. Evaluación de los moldes antes y durante de las inyecciones

**Tabla 3-3:** Metodología de evaluación de los moldes

<b>Obtención de datos de rugosidad y profundidad de la letra</b>		
<b>Objetivo:</b> Obtener datos de rugosidad y profundidad de la letra de los moldes para su posterior análisis estadístico		
<b>MATERIALES:</b>	<b>EQUIPOS:</b>	<b>REACTIVOS:</b>
Silicona RTV m20	Rugosímetro SRG-4600	
Aceite de silicona (Desmoldante)	Calibrador digital Caliper	
Moldes	Estufa de laboratorio	
Tornillos	Balanza analítica	
Crisol de porcelana		
Jeringa de 60 ml		
<b>PROCEDIMIENTO</b>		
Con ayuda de la balanza analítica pesar 30 gr del componente A de la silicona RTV m20 con 1 gr del componente B		
Unificar la muestra con movimientos envolventes durante 1 minuto		
Colocar una capa fina de aceite de silicona ya que funciona como desmoldante		
Cerrar los tres moldes y colocar los tornillos dejando la cavidad hacia la parte superior para realizar las inyecciones		
Con la jeringa de 60 ml tomar la mezcla e inyectar en cada molde hasta que se vea que está lleno		

Golpear cada molde sobre una superficie plana para desairar la mezcla ya que al momento de hacer los movimientos envolventes se generan burbujas
Colocar los moldes en la estufa que debe tener de 35°C a 40°C esto con el fin de acelerar el curado, dejar en la estufa por 2 horas aproximadamente
Transcurridas las dos horas sacar de la estufa, retirar los tornillos y retirar la pieza suavemente. Este proceso de inyección se repitió 30 veces por cada molde
Para tomar las medidas de rugosidad y de profundidad de la letra se tomó en cuenta la inyección 1, 15 y 30 respectivamente
La profundidad de la letra se lo tomó con el calibrador digital Caliper del lugar específico del sello del molde
Finalmente, la rugosidad se la tomó usando el rugosímetro SRG-4600
Los datos de estas mediciones se ven reflejados en la tabla 4-1

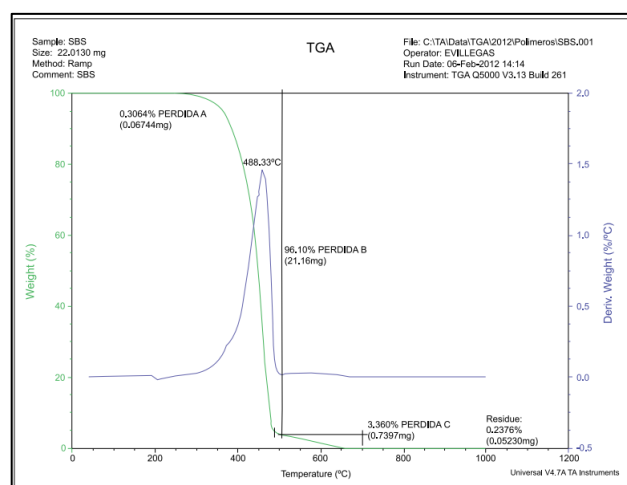
Realizado por: Romero, V., 2024

### 3.5.3. Ensayos

#### 3.5.3.1. Ensayo termogravimétrico

Es una técnica usada para la caracterización de materiales, en este caso ayudará para conocer ciertos aspectos que se desconocen de los materiales en los que se imprimieron los moldes, este tipo de información como la descomposición térmica es un parámetro muy importante en este tipo de estudios, ya que se debe conocer la temperatura a la cual los materiales usados comienzan a descomponerse térmicamente, esto nos ayudará a conocer que tipos de materiales se podrían inyectar.

“La termogravimetría se basa en los cambios de masa como resultado de una variación de temperatura o por someter un material a una temperatura establecida durante un periodo definido”(Rodríguez, Villegas 2012, pág 25)



**Ilustración 3-1:** Gráfica de ejemplo del TGA

**Fuente:** (Rodríguez, Villegas 2012, pág 31)

### 3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En nuestro análisis, realizaremos un ANOVA de dos factores para investigar el impacto de las tecnologías de impresión y el número de inyección en la rugosidad de los moldes de llavero. Las variables independientes incluyen las tecnologías de impresión utilizadas para crear los moldes (FDM con PLA, FDM con PETg y SLA con resina estándar), así como el número de inyección en el que se medirá la rugosidad (primera, quinceava y treintava repetición). Cada factor se combinará en todas las posibles combinaciones, lo que resultará en un total de 90 inyecciones, con 30 inyecciones realizadas para cada molde. Además de medir la rugosidad de los moldes y las piezas inyectadas, también registraremos la profundidad de la letra en cada toma de datos. Estos múltiples conjuntos de datos nos permitirán realizar un análisis ANOVA completo para evaluar la influencia de los factores mencionados en la calidad de los moldes y la pieza inyectada.

#### 3.6.1. *Hipótesis de rugosidad de los moldes*

**Hipótesis nula (H0):** No hay diferencias significativas en la rugosidad del molde entre las diferentes tecnologías de impresión.

**Hipótesis alternativa (H1):** Existen diferencias significativas en la rugosidad del molde entre las diferentes tecnologías de impresión.

#### 3.6.2. *Hipótesis de profundidad de la letra*

**Hipótesis nula (H0):** No hay diferencias significativas en la profundidad de la letra entre las diferentes tecnologías de impresión.

**Hipótesis alternativa (H1):** Existen diferencias significativas en la profundidad de la letra entre las diferentes tecnologías de impresión.

## CAPITULO IV

### 4. MARCO DE ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

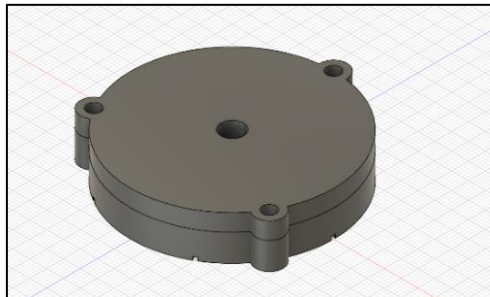
Se realiza un análisis de los resultados obtenidos y se formula conclusiones en base los mismos, además se analiza el comportamiento de los moldes en función del número de inyecciones realizadas, para así definir que tecnología y material de impresión resulta mejor en cuanto a calidad y desgaste de los moldes.

#### 4.1. Procesamiento, análisis e interpretación de resultados

##### 4.1.1. Resultados de la caracterización de los materiales de impresión 3D (PLA, PETg y Resina Estándar)

###### 4.1.1.1. Resultados del diseño y obtención de los moldes

###### a) Resultados del diseño



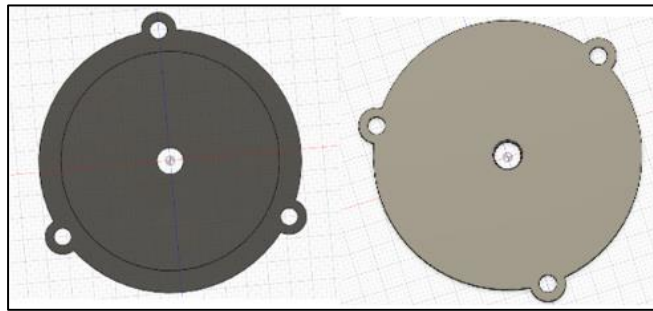
**Ilustración 4-1:** Molde diseñado cerrado

Realizado por: Romero, V., 2024



**Ilustración 4-2:** Vista superior e inferior del cuerpo del molde

Realizado por: Romero, V., 2024



**Ilustración 4-3:** Vista superior e inferior de la tapa del molde

**Realizado por:** Romero, V., 2024

Para diseñar el molde con un radio interno de 2.5 cm y una profundidad de 0.5 cm, se empleó el software Fusion 360. Se creó un modelo tridimensional del molde siguiendo los siguientes pasos: se abrió el software y se creó un nuevo diseño. Se dibujó un círculo con un radio de 2.5 cm para representar el radio interno del molde y luego se extruyó hacia arriba con una distancia de 0.5 cm para denotar la profundidad. Se añadieron detalles adicionales al diseño, como los canales de entrada y salida para el material de moldeo. Este diseño se basó en un molde circular, similar a un llavero, y se integró el sello de la carrera de Ingeniería Química de la ESPOCH importando el diseño del sello directamente al modelo en Fusion 360.

b) Resultado impresión de moldes



**Ilustración 4-4:** Moldes impresos en FDM (PETG), FDM (PLA) Y SLA (Resina estándar)

**Realizado por:** Romero, V., 2024

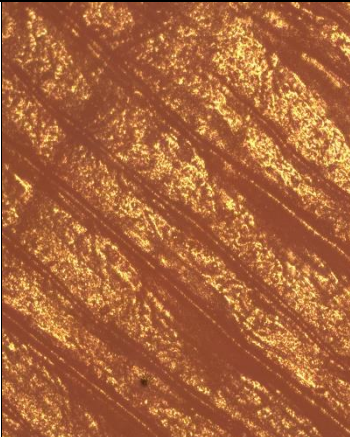
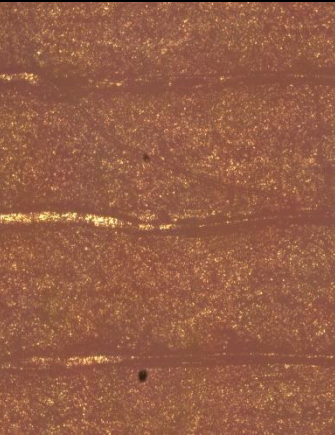
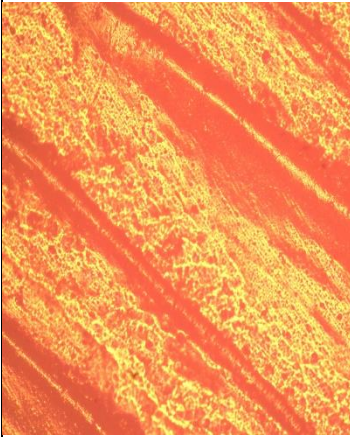
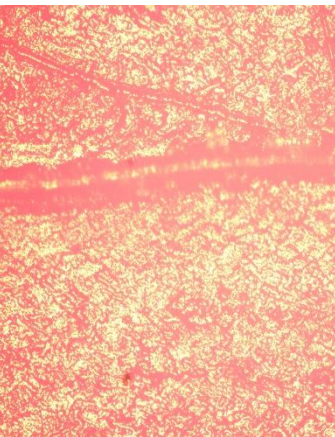
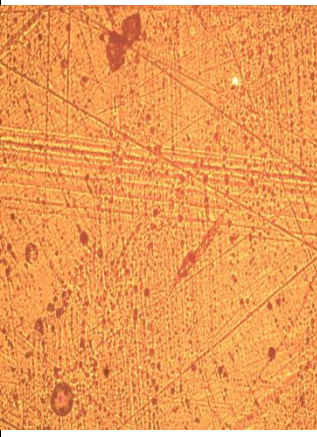
Se realizaron las modificaciones necesarias para optimizar el diseño del molde y asegurar su funcionalidad y eficiencia en el proceso de fabricación. Una vez completado el diseño en Fusion 360, se procedió a la fabricación del molde utilizando las especificaciones del diseño como guía y se imprimieron tres moldes, el molde de color negro es impreso en tecnología FDM en material

PETg, el molde rosado fue impreso en tecnología FDM material PLA, y finalmente el molde gris fue impreso en tecnología SLA usando resina estándar como material de impresión.

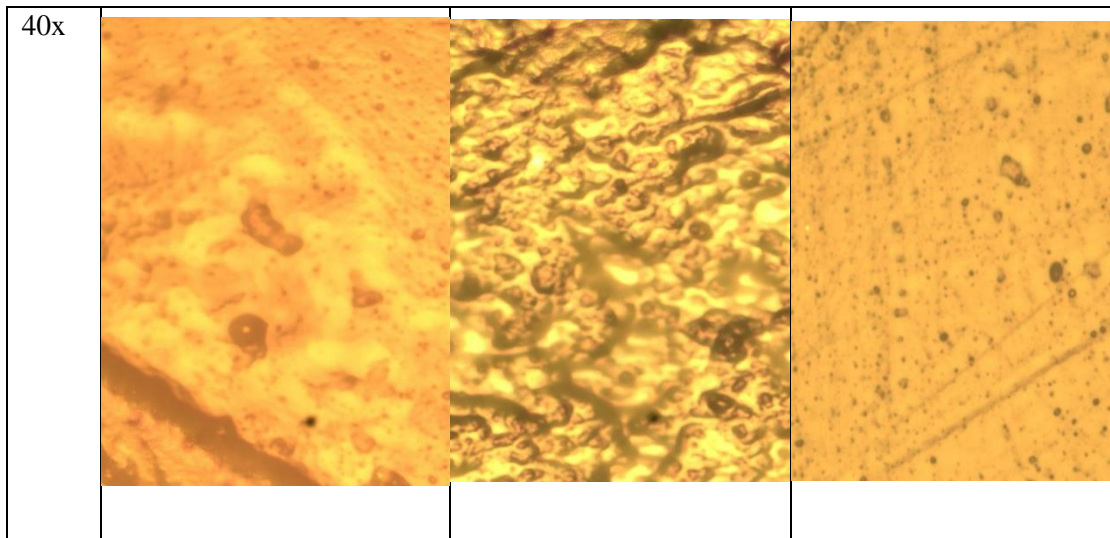
4.1.1.2. Resultados de análisis microscópico de la superficie de los moldes

Para observar cómo se realizó el siguiente análisis revisar el anexo C de esta investigación.

**Tabla 4-1:** Análisis microscópico de la superficie de los moldes

Resolución	Molde de PLA (FDM)	Molde de PETg (FDM)	Molde de resina estándar (SLA)
4x			
10x			



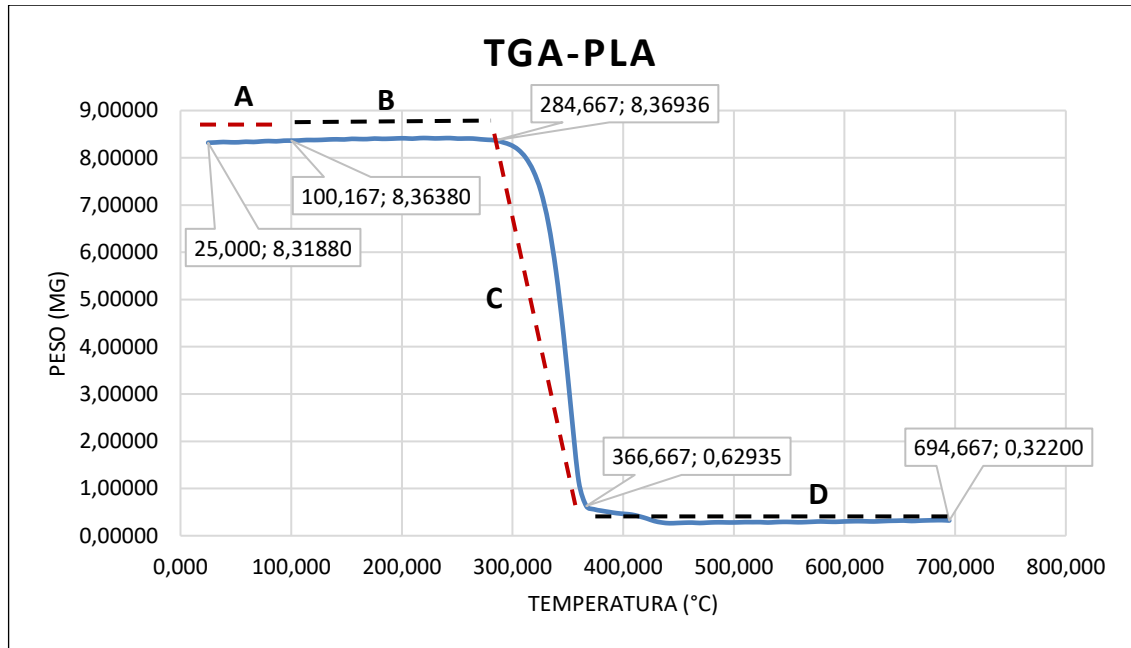


**Realizado por:** Paullán, N., 2024

A partir de los resultados microscópicos podemos visualizar la textura de cada uno de los materiales usados en la impresión 3D de los moldes para inyección, lo que se desea es identificar visualmente el molde que presente menor rugosidad y su superficie sea más lisa para obtener un buen acabado del molde. Comparando los tres moldes en cada una de sus resoluciones, se puede determinar que los moldes hechos en tecnología FDM presentan más irregularidades debido a los filamentos propios de este tipo de impresión, además entre materiales PLA y PETg el que tiene menor rugosidad es el PLA. En la tecnología de impresión SLA con resina estándar se observa que su superficie presenta pequeños rayones o irregularidades y una superficie más lisa y uniforme, lo que hace que sea la mejor opción visualmente para obtener los llaveros de mejor calidad.

4.1.1.3. Resultados de análisis termogravimétrico (TGA) para los diferentes materiales de impresión 3D de los moldes

a) Resultado del TGA para PLA



**Ilustración 4-5:** Resultado de TGA para PLA

Realizado por: Paullán, N., 2024

La primera etapa se detecta entre los 25 °C y los 100.167 °C, la cual se relaciona con la humedad presente en la muestra, existe un pequeño incremento del peso debido al ruido del análisis. La pérdida porcentual de masa se estima aplicando la ecuación 3-1:

$$m_i = 8.3188 \text{ mg}$$

$$m_f = 8.6380 \text{ mg}$$

$$m_t = 8.3188 \text{ mg}$$

$$\Delta m_A = 0.54\%$$

La segunda etapa con temperaturas de 100.167°C y 284.667°C corresponde a la descomposición de compuestos volátiles. La pérdida porcentual de masa se estima aplicando la ecuación 3-1:

$$m_i = 8.6380 \text{ mg}$$

$$m_f = 8.36936 \text{ mg}$$

$$m_t = 8.3188 \text{ mg}$$

$$\Delta m_B = 0.06\%$$

La tercera perdida corresponde a la descomposición de compuestos de carbono y a la despolimerización, en este caso del ácido poli láctico, los cuales se visualizan desde una temperatura de 284.667°C hasta los 366.667°C. La pérdida porcentual de masa se estima aplicando la ecuación 3-1:

$$m_i = 8.36936 \text{ mg}$$

$$m_f = 0.62935 \text{ mg}$$

$$m_t = 8.3188 \text{ mg}$$

$$\Delta m_C = 93.04\%$$

La cuarta y última etapa de descomposición corresponde a las cenizas o residuos del proceso, la cual se da a temperaturas de 366.667°C y 694.667°C. La pérdida porcentual de masa se estima aplicando la ecuación 3-1:

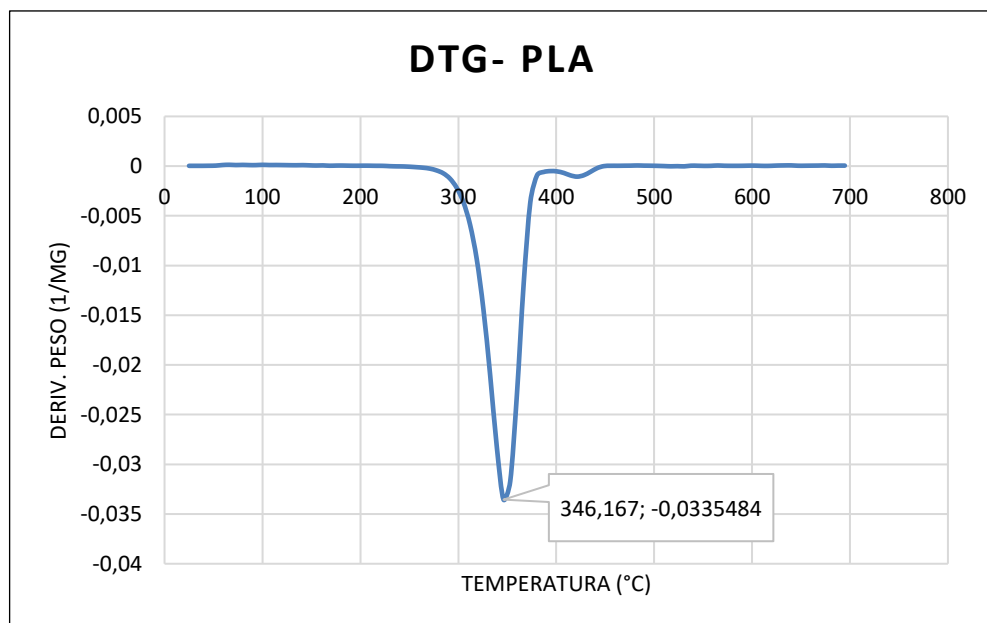
$$m_i = 0.62935 \text{ mg}$$

$$m_f = 0.3220 \text{ mg}$$

$$m_t = 8.3188 \text{ mg}$$

$$\Delta m_D = 3.69\%$$

#### b) Resultado del DTG para PLA

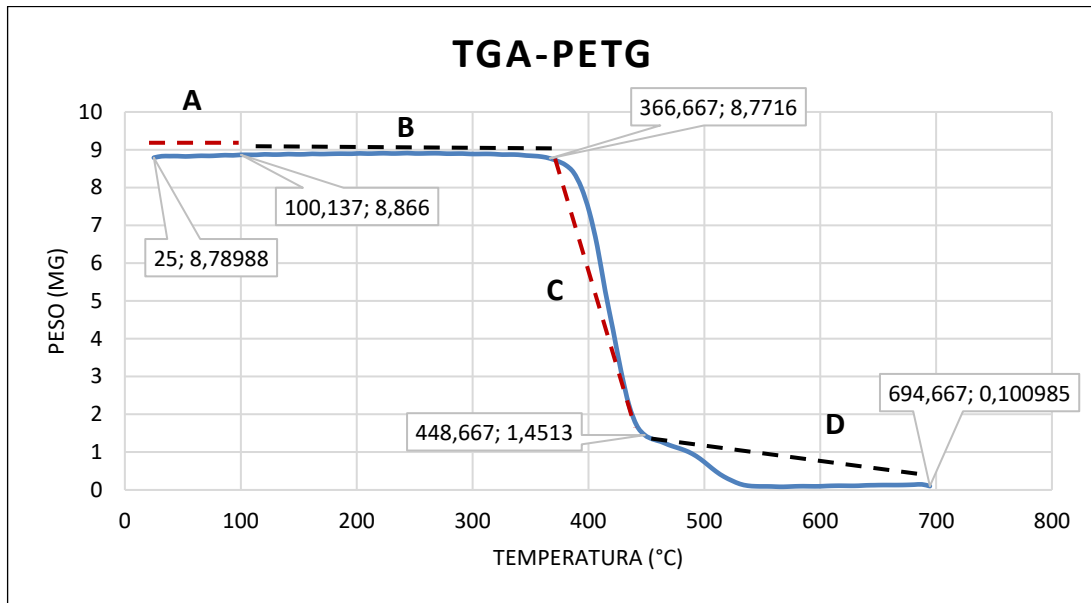


**Ilustración 4-6:** Resultado de DTG para PLA

Realizado por: Paullán, N., 2024

La temperatura a la que se degrada más rápido el polímero PLA corresponde a 346.167 °C.

c) Resultado del TGA para PETg



**Ilustración 4-7:** Resultado de TGA para PETg

Realizado por: Paullán, N., 2024

La primera etapa se detecta entre los 25 °C y los 100.137 °C, la cual se relaciona con la humedad presente en la muestra, existe un pequeño incremento del peso debido al ruido del análisis. La pérdida porcentual de masa se estima aplicando la ecuación 3-1:

$$m_i = 8.78988 \text{ mg}$$

$$m_f = 8.866 \text{ mg}$$

$$m_t = 8.78988 \text{ mg}$$

$$\Delta m_A = 0.87\%$$

La segunda etapa, con temperaturas de 100.137°C y 366.667 °C, corresponde a la descomposición de compuestos volátiles. La pérdida porcentual de masa se estima aplicando la ecuación 3-1:

$$m_i = 8.866 \text{ mg}$$

$$m_f = 8.7716 \text{ mg}$$

$$m_t = 8.78988 \text{ mg}$$

$$\Delta m_B = 1.07\%$$

La tercera etapa corresponde a la descomposición de compuestos de carbono y a la despolimerización, en este caso del ácido tereftálico y etilenglicol., los cuales se visualizan desde una temperatura de 366.667 °C hasta los 448.667°C. La pérdida porcentual de masa se estima aplicando la ecuación 3-1:

$m_i = 8.7716 \text{ mg}$

$m_f = 1.4513 \text{ mg}$

$m_t = 8.78988 \text{ mg}$

$$\Delta m_C = 83.28 \%$$

LA cuarta y última etapa de descomposición corresponde a las cenizas o residuos del proceso, la cual se da a temperaturas de  $448.667^\circ\text{C}$  y  $694.667^\circ\text{C}$ . La pérdida porcentual de masa se estima aplicando la ecuación 3-1:

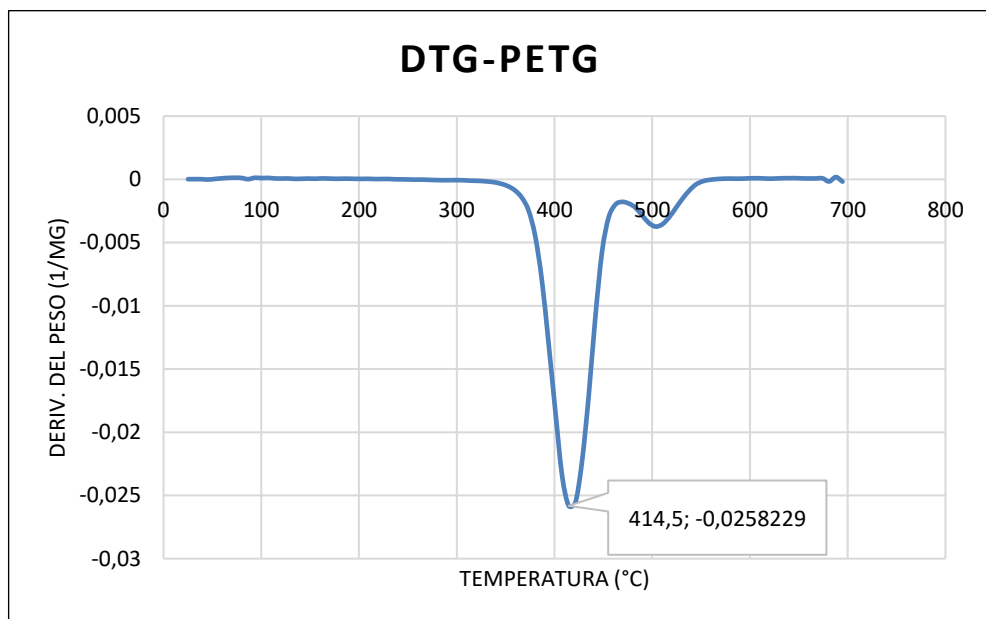
$m_i = 1.4513 \text{ mg}$

$m_f = 0.100985 \text{ mg}$

$m_t = 8.78988 \text{ mg}$

$$\Delta m_D = 15.36\%$$

d) Resultado del DTG para PETg

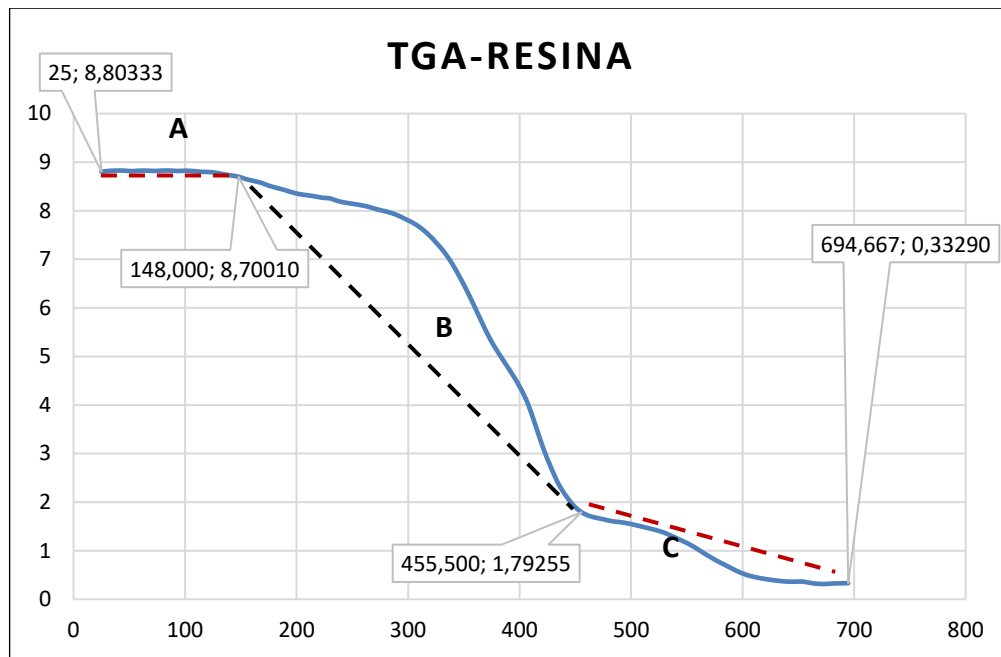


**Ilustración 4-8:** Resultado de DTG para PETg

Realizado por: Paullán, N., 2024

La temperatura a la que se degrada a mayor velocidad el polímero PETg corresponde a  $414.5^\circ\text{C}$ .

e) Resultado del TGA para Resina



**Ilustración 4-9:** Resultado de TGA para Resina Estándar

Realizado por: Paullán, N., 2024

La primera pérdida se detecta entre los 25 °C y los 148 °C, la cual se relaciona con la pérdida de humedad. La pérdida porcentual de masa se estima aplicando la ecuación 3-1:

$$m_i = 8.80333 \text{ mg}$$

$$m_f = 8.70010 \text{ mg}$$

$$m_t = 8.80333 \text{ mg}$$

$$\Delta m_A = 1.17 \%$$

La segunda pérdida es la más considerable dentro del análisis, con temperaturas de 148°C y 455.500 °C, la cual corresponde a la descomposición de compuestos de carbono y a la despolimerización. La pérdida porcentual de masa se estima aplicando la ecuación 3-1:

$$m_i = 8.70010 \text{ mg}$$

$$m_f = 1.79255 \text{ mg}$$

$$m_t = 8.80333 \text{ mg}$$

$$\Delta m_B = 78.47\%$$

La tercera etapa corresponde a las cenizas, las cuales se visualizan desde una temperatura de 455.500 °C hasta los 694.667°C. La pérdida porcentual de masa se estima aplicando la ecuación 3-1:

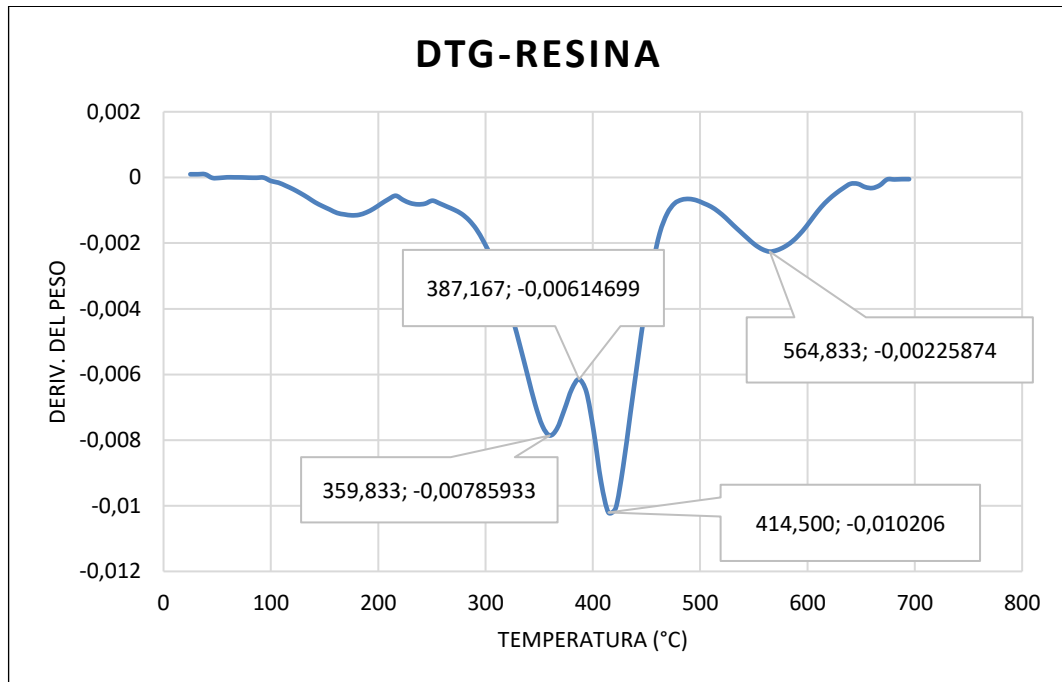
$$m_i = 1.79255 \text{ mg}$$

$$m_f = 0.33290 \text{ mg}$$

$m_i = 8.80333 \text{ mg}$

$$\Delta m_c = 16.58 \%$$

f) Resultado del DTG para Resina



**Ilustración 4-10:** Resultado de DTG para Resina Estándar

Realizado por: Paullán, N., 2024

La degradación de la resina es una degradación multietapa ya que ocurre a diferentes temperaturas. La temperatura más significativa en la primera etapa de degradación es a 359.833 °C. La siguiente etapa conlleva una temperatura más alta de 414.5°C en donde encontramos la velocidad más rápida de degradación del polímero base y la última etapa de degradación corresponde a una temperatura de 564.833 °C. También se observa un pico hacia adentro a una temperatura de 387.167 °C, esto se debe a una reducción en la velocidad de degradación, ya que en la primera etapa se degradan los compuestos de menor peso molecular y después mediante reacciones químicas se forman compuestos que ayudaran a degradar al polímero base de la resina.

Análisis:

Con el análisis termogravimétrico podemos identificar el material de impresión 3D que presenta mayor resistencia a la temperatura, comparando las curvas DTG de cada material podemos conocer la temperatura a la cual se degrada dicho polímero, entonces tenemos para el PLA 346.167 °C, para el PETg 414.5 °C y para la resina estándar la primera etapa de degradación se da a 359.833 °C. Obtenido que el polímero que soportaría una temperatura más alto de entre los

tres es el PETg, esto lo debemos tener en cuenta en caso de someter el molde a un ambiente que provoque un aumento de temperatura o en su defecto inyectarle un material caliente.

#### 4.1.2. Resultados de las piezas inyectadas con silicón

Las piezas que resultan de los moldes para inyección son unos llaveros para la carrera de Ingeniería Química, se puede observar a mayor detalle las 90 piezas en el anexo D.



**Ilustración 4-11:** Resultado de los llaveros en la primera inyección.

Realizado por: Paullán, N., 2024

#### Análisis:

Se compara la calidad de los detalles que tienen los llaveros de cada material de impresión de los moldes, observando que los detalles más prolijos y menos irregularidades corresponden al llavero obtenido del molde de resina estándar de la tecnología de impresión SLA, ya que presenta una superficie lisa y sus letras y figuras se completan de manera correcta; seguido por el llavero del molde de PETg de la tecnología de impresión FDM, este no presenta una superficie lisa ya que se reflejan las capas de impresión, pero la calidad de los detalles de las letras y figuras son buenas; finalmente, el material PLA de la tecnología de impresión FDM presente sobre su superficie las marcas del molde y sus letras y figuras no están completadas de manera correcta según su diseño.





**Ilustración 4-12:** Resultado de los llaveros en la quinceava inyección.

**Realizado por:** Paullán, N., 2024

**Análisis:**

Se compara la calidad de la superficie y de las letras y formas del diseño del llavero en la quinceava inyección, obteniendo que el mejor llavero es el del molde de PLA de la tecnología de impresión FDM, aún se observa sobre su superficie las rugosidades del molde, sin embargo sus letras y detalles están muy bien formados; seguido del llavero del molde de PETg de la tecnología de impresión FDM, su superficie se mantiene igual que en la primera inyección, pero la calidad de las letras ya no es buena, ya que en letras como la “G” y “Q” se observa silicona que tapa sus aberturas lo que no da un buen aspecto visual, además las líneas del resto de letras no son rectas y presentan pequeños surcos; y el llavero con menor calidad es el del molde de resina estándar de la tecnología de impresión SLA, ya que la mayoría de letras y figuras se encuentran desgastadas en los bordes y con varios surcos, a pesar que su superficie sigue siendo la más lisa de las tres, visualmente no es estético.



**Ilustración 4-13:** Resultado de los llaveros en la treintava inyección.

**Realizado por:** Paullán, N., 2024

Análisis:

En la treintava inyección se observa que el mejor llavero es el del molde de PETg de la tecnología de impresión FDM, puesto que sus letras y figuras todavía mantienen la estructura principal del diseño; seguido del llavero de PLA de la tecnología de impresión FDM, el cual presenta varios surcos e irregularidades en sus letras, y la letra “G” específicamente va tomando forma de una letra “O”; mientras que el llavero del molde de resina estándar de la tecnología de impresión SLA presente totalmente un desgaste, ya que al momento de desmoldar la silicona se quedaba pegada al molde, lo cual dejaba trozos de silicona de las letras y figuras en el molde.

#### ***4.1.3. Resultados de la profundidad de la letra y de la rugosidad en los moldes***

La tabla de resultados evidencia mediciones que se pueden observar en el anexo B donde se mide tanto rugosidad como profundidad de la letra y finalmente de la tabla 3-2 tenemos:

**Tabla 4-2:** Tabla de resultados generales de profundidad de la letra y la rugosidad

Numero de inyección (F1)	Tecnología de impresión (F2)	Combinaciones		Molde	
		F1	F2	Profundidad de la letra (mm)	Rugosidad (µm)
A	FDM 1 (1)	A	1	0.889	3.063
	FDM 2 (2)	A	2	0.8382	3.99
	SLA (3)	A	3	0.8636	0.192
B	FDM 1 (1)	B	1	0.87	2.789
	FDM 2 (2)	B	2	0.82	2.628
	SLA (3)	B	3	0.84	0.261
C	FDM 1 (1)	C	1	0.84	1.905
	FDM 2 (2)	C	2	0.81	1.61
	SLA (3)	C	3	0.83	0.327

Realizado por: Romero, V., 2024

**Donde:**

**F1:** Número de inyección

- A: Primera inyección
- B: Quinceava inyección
- C: Treintava inyección

**F2:** Tecnología de impresión

- 1: FDM 1 (FDM en material PLA)
- 2: FDM 2 (FDM en material PETg)
- 3: SLA (SLA en resina estándar)

Basándonos en los datos recopilados de las rugosidades del molde y la profundidad de la letra especificada, llevaremos a cabo un análisis de varianza (ANOVA) de un factor tanto para la rugosidad como para la profundidad de la letra.

4.1.3.1. Resultados de las rugosidades tomadas después las inyecciones

**Tabla 4-3:** Datos de mediciones de rugosidad

Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )			
Numero de inyección (F1)	Tecnología de impresión (F2)		
	FDM 1 (1)	FDM 2 (2)	SLA (3)
A	3.063	3.990	0.192
B	2.789	2.628	0.261
C	1.905	1.610	0.327

Realizado por: Romero, V., 2024

**Donde:**

**F1:** Número de inyección

- A: Primera inyección
- B: Quinceava inyección
- C: Treintava inyección

**F2:** Tecnología de impresión

- 1: FDM 1 (FDM en material PLA)
- 2: FDM 2 (FDM en material PETg)
- 3: SLA (SLA en resina estándar)

4.1.3.2. Análisis estadístico de la rugosidad

Este análisis nos permitirá comparar las medias entre nuestros grupos definidos por el factor de tecnologías de impresión. El objetivo es comprobar o refutar las hipótesis planteadas en este trabajo de investigación, determinando si existe una diferencia significativa en las características evaluadas entre las tecnologías de impresión utilizadas en la fabricación de los moldes.

**Tabla 4-4:** Análisis ANOVA de datos de Rugosidad

Fuente	Grados de libertad	SC Ajustado	MC Ajustado	Valor F	Valor P
TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN	2	11,597	5,7985	9,68	0,013
Error	6	3,594	0,5989		
Total	8	15,191			

Fuente: Minitab Statistical Software

Realizado por: Romero, V., 2024

El análisis de varianza (ANOVA) de un factor para las tecnologías de impresión en relación con la rugosidad de las piezas muestra un valor p asociado al factor de 0.013, lo que indica que hay diferencias significativas en la rugosidad entre al menos dos de las tecnologías de impresión evaluadas.

Como el valor p (0.013) es menor que el nivel de significancia típico de 0.05, podemos rechazar la hipótesis nula y concluir que al menos una de las tecnologías de impresión tiene un efecto significativo en la rugosidad de las piezas inyectadas.

#### 4.1.3.3. Resultados de la profundidad de la letra

**Tabla 4-5:** Datos de mediciones de profundidad de la letra

<b>Profundidad de la letra (mm)</b>			
<b>Numero de inyección (F1)</b>	<b>Tecnología de impresión (F2)</b>		
	<b>FDM 1 (1)</b>	<b>FDM 2 (2)</b>	<b>SLA (3)</b>
A	0.889	0.8382	0.8636
B	0.87	0.82	0.84
C	0.84	0.81	0.83

Realizado por: Romero, V., 2024

**Donde:**

**F1:** Número de inyección

- A: Primera inyección
- B: Quinceava inyección
- C: Treintava inyección

**F2:** Tecnología de impresión

- 1: FDM 1 (FDM en material PLA)
- 2: FDM 2 (FDM en material PETg)
- 3: SLA (SLA en resina estándar)

#### 4.1.3.4. Análisis estadístico de la profundidad de la letra

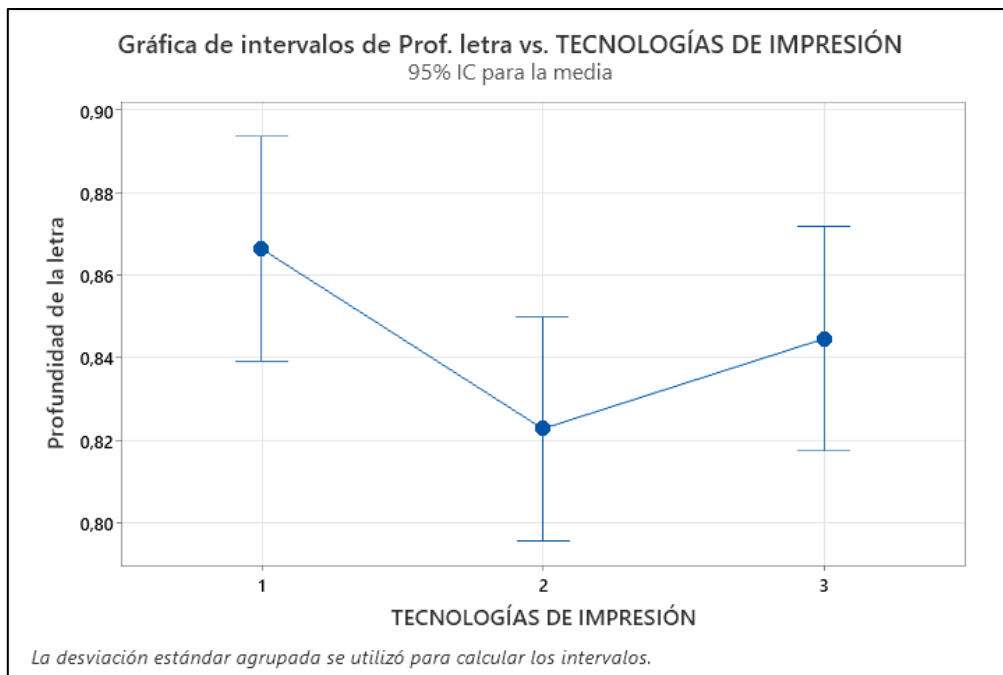
**Tabla 4-6:** Análisis ANOVA de datos de la profundidad de la letra

Fuente	Grados de libertad	SC Ajustado	MC Ajustado	Valor F	Valor p
TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN	2	0,002851	0,001426	3,84	0,084
Error	6	0,002225	0,000371		
Total	8	0,005076			

Fuente: Minitab Statistical Software

Realizado por: Romero, V., 2024

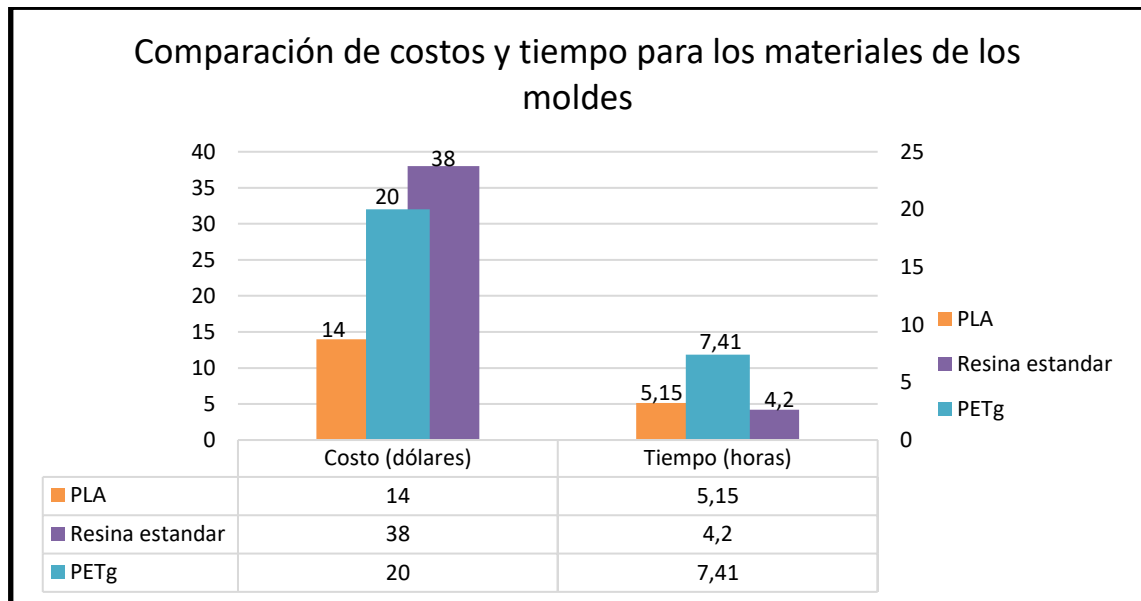
El análisis de varianza (ANOVA) revela que no se encontraron diferencias significativas en la profundidad de la letra entre las diferentes tecnologías de impresión utilizadas en la fabricación de los moldes. Esto se basa en un valor p asociado al factor de 0.084, que supera el umbral de significancia comúnmente utilizado de 0.05.



**Ilustración 4-15:** Gráfico de Tukey Profundidad de la letra Vs Tecnologías de impresión

#### 4.1.4. Resultados de viabilidad económica y de tiempo

#### 4.1.4.1. Resultados de los costos y tiempo de impresión de los moldes



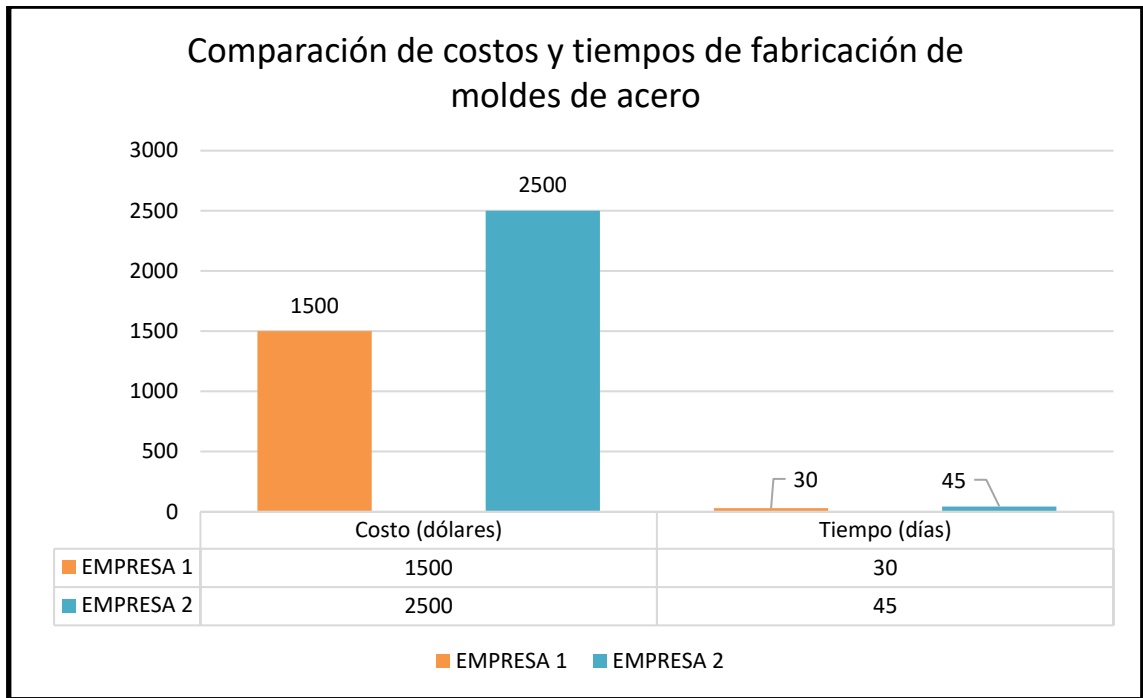
**Ilustración 4-16:** Resultados del costo y tiempo de fabricación de los moldes

Realizado por: Paullán, N., 2024

Se observa que respecto al costo de impresión de los moldes el más económico es el material PLA en tecnología de impresión FDM con \$14, seguido por el PETg en tecnología de impresión FDM con \$6 más, es decir \$20, y finalmente el molde de resina en tecnología SLA con aproximadamente el doble del costo de los anteriores, siendo \$38.

Respecto al tiempo que toma imprimir el molde, tenemos que la más se demora es el PETg con 7.41 horas, seguido del PLA con 5.15 horas y el más rápido sería la resina con 4.2 horas. Cabe recalcar que el tiempo desde que se envió a imprimir los moldes hasta que nos entregaron cada uno de ellos, no supero las 36 horas o un día y medio.

#### 4.1.4.2. Resultados de tiempo y costos de moldes de acero



**Ilustración 4-17:** Comparación de costos y tiempos de fabricación de moldes de acero

Realizado por: Paullán, N., 2024

Dos empresas ecuatorianas que se especializan en la fabricación de moldes de metal e inyección de plástico nos proporcionaron información acerca de los costos de fabricación y el tiempo de entrega de los moldes. Para ambas empresas se solicitó un molde hecho de acero con las especificaciones y dimensiones de nuestro diseño. Obteniendo:

- La empresa número uno nos indicó que el costo para un molde de acero con las especificaciones mencionadas está alrededor de \$1500, con un tiempo de entrega de 30 días laborables, ya que se le da un tratamiento térmico y superficial antes de iniciar con la inyección, además, cuenta con una garantía del molde entre un millón y cinco millones de inyecciones.
- La empresa número dos nos mencionó que el molde hecho en acero oscila los \$2500 y el tiempo de entrega del molde es de 45 días laborables, ya que se le aplica un tratamiento térmico a la superficie del molde para poder iniciar con la inyección, además cuenta con una garantía del molde de 40 años.



#### Análisis de viabilidad económica:

Respecto a los costos entre los moldes de impresión 3D y los moldes de acero existe una diferencia de más del 3000%, lo cual representa una inversión bastante alta para realizar un solo tipo de piezas, en este caso llaveros. El tiempo de entrega también es considerable entre ambos ya que se pasa de una entrega en menos de 36 horas a una entrega de 45 días por molde. La garantía de los moldes de acero es alta, lo cual presenta ventajas y desventajas, ya que enfocándonos en los llaveros específicamente, el fabricante no va a producir 40 años el mismo modelo, pues como se conoce la globalización hace que continuamente se innoven diseños y tecnologías, por otro lado, el fabricante tendrá la garantía que el molde resistirá la producción en masa que tenga planificada. Sin embargo, los moldes de impresión 3D pueden sustituir a los moldes de acero para inyecciones en gran magnitud, porque lo que se paga por un molde de acero puede avanzar para hacer más de 2000 moldes impresos en 3D, lo cual nos ahorraría tiempo y dinero.

## 4.2. Comprobación de la hipótesis

### 4.2.1. Rugosidad

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) que se encuentran en la tabla 4-3 se utilizaron para evaluar la influencia de las tecnologías de impresión en la rugosidad de los moldes de piezas. Se planteó la siguiente hipótesis nula:

**Hipótesis nula (H0):** No hay diferencias significativas en la rugosidad entre las diferentes tecnologías de impresión.

Resultado: Con un valor P de 0,013, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa. Por lo tanto, se encontraron diferencias significativas en la rugosidad entre las diferentes tecnologías de impresión utilizadas en la fabricación de los moldes.

Estos resultados indican que la tecnología de impresión tuvo un efecto significativo en la rugosidad de los moldes de piezas.

### 4.2.2. Profundidad de la letra

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) que se encuentran en la tabla 4-5 se utilizaron para evaluar la influencia de las tecnologías de impresión en la rugosidad de los moldes de piezas. Se planteó la siguiente hipótesis nula:

**Hipótesis nula (H0):** No hay diferencias significativas en la profundidad de la letra entre las diferentes tecnologías de impresión.

Resultado: Con un valor p de 0,084, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, no se encontraron diferencias significativas en la profundidad de la letra entre las diferentes tecnologías de impresión utilizadas en la fabricación de los moldes.

Estos resultados sugieren que la tecnología de impresión no tuvo un efecto significativo en la profundidad de la letra de los moldes de piezas, según el análisis realizado.

### 4.3. Discusión

Los resultados obtenidos respecto al análisis microscópico de la superficie de los moldes nos ayudan a identificar de manera visual el molde que presenta menor rugosidad e irregularidades, lo cual es afectado de manera significativa en la calidad de la pieza inyectada. Obteniendo que el molde con menos defectos pertenece a la tecnología de impresión SLA con material de resina estándar, lo cual se confirma por (ÖZDİLLİ 2021).

Respecto al análisis termogravimétrico, se compararon las temperaturas de degradación de los tres materiales de los moldes (PLA, PETg y resina estándar) y se pudo observar que el material que resiste mayor temperatura antes de su degradación térmica es el PETg, lo cual concuerda con (Trapero 2019)

En cuanto a los resultados del análisis de la rugosidad reveló que las tecnologías de impresión influyen significativamente en la rugosidad de los moldes de las piezas, una conclusión que coincide con el estudio de (ÖZDİLLİ 2021) que evaluó la calidad superficial en diferentes métodos de fabricación, incluyendo SLA y FDM. Aunque el enfoque de ese estudio era diferente al de este trabajo, ya que se centraba en la calidad superficial de las piezas finales y no en la rugosidad de los moldes, sus datos corroboran nuestras observaciones y proporcionan un respaldo adicional a nuestros resultados. Ambos estudios coinciden en que la tecnología SLA produce superficies más lisas y menos rugosas en comparación con la FDM, lo que se refleja en los valores de rugosidad obtenidos en la tabla 4-3 ya que siempre el valor de rugosidad del molde impreso en SLA es menor en comparación a los dos impresos en FDM. Es importante destacar que, aunque la rugosidad es un aspecto crucial, otros factores como el costo, la velocidad de producción y la complejidad geométrica también influyen en la elección de la tecnología de impresión más adecuada.

Los resultados a lo que se ha llegado con el desgaste de los moldes realizado con la Silicona RTV m20 muestran pérdidas en el material de los tres moldes respectivamente, cada uno con sus valores indicados en la tabla 4-4: Datos de mediciones de profundidad de la letra, según el análisis ANOVA realizado a este conjunto de datos se determinó en la tabla 4-5 que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, lo que sugiere que las tecnologías de impresión no tienen un efecto significativo en la profundidad de la letra de los moldes es decir al desgaste del material, esto sugiere que las dos tecnologías de impresión utilizadas en este estudio, no tienen un efecto significativo en el desgaste del material de los moldes. Estos hallazgos coinciden con las conclusiones de (Dizon et al. 2020) el mismo que investigó la calidad de las piezas moldeadas por inyección en moldes fabricados con FDM y SLA. En dicho estudio, también se encontró que

las tecnologías de impresión no influían significativamente en la profundidad de la letra de los moldes ya que la precisión dimensional de las piezas inyectadas fue buena considerando que la variación promedio desde la primera pieza inyectada y desde el tamaño del molde fue inferior al 5%. Sin embargo, es importante señalar que el trabajo con el que deseamos comparar también incluye una tercera tecnología de impresión llamada PolyJet, la cual no está presente en nuestra investigación. Sería relevante investigar más sobre esta tecnología para comprender cómo podría influir en la profundidad de la letra de los moldes en comparación con las tecnologías FDM y SLA.

El análisis de viabilidad económica y de tiempo de fabricación de los moldes, entre moldes impresos en 3D y moldes fabricados de acero nos arrojó que es más rentable realizar moldes impresos en 3D, lo cual se consiente por (Boronat 2020) el cual menciona que es posible la fabricación de moldes de impresión 3D para inyección, en donde como ventajas se identifican el ahorro en costos de materiales, reducción de peso, optimización estructural, reducción de los tiempos de fabricación de los moldes y eliminación de inversiones en moldes metálicos para tiradas cortas.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- Se comparó el uso de las tecnologías FDM y SLA en la fabricación de moldes para inyección de silicona, como se menciona en el apartado de la discusión, se confirmó que la tecnología de resina, produce moldes con menor rugosidad superficial, lo que se esperaba que impacte positivamente en la calidad de las piezas inyectadas, sin embargo de acuerdo al anexo D “Resultado de las piezas inyectadas con silicón” el mejor acabado de las piezas inyectadas fueron las que se obtuvieron con los moldes en tecnología FDM, en material PETg.
- Se analizaron las características y propiedades de los moldes fabricados mediante las tecnologías FDM y SLA, las cuales como se menciona en la discusión del análisis microscópico se observó que los moldes impresos usando la tecnología SLA con resina estándar presentó menor rugosidad e irregularidades, por otra parte según el análisis TGA realizado a cada material en el que se imprimieron los moldes concluye que el material con mayor temperatura de degradación entre los tres usados es el PETg con un valor de 414.5 °C, esta información es importante para tener en cuenta por los límites de temperatura del material a inyectar en los moldes.
- Se evaluó la calidad de los productos obtenidos mediante la inyección de silicona en los moldes fabricados con ambas tecnologías, basándose en el anexo D se puede evidenciar que después de 30 inyecciones en cada molde las piezas que conservan hasta la inyección número 30 la mayor calidad de detalle son las obtenidas a través de la tecnología FDM específicamente en material PETg.
- Se compararon los costos y los tiempos de fabricación de los moldes para inyección de silicona utilizando tecnología FDM y tecnología de resina Vs moldes metálicos. La discusión respalda estos hallazgos al destacar que los moldes impresos en 3D son más rentables debido a la reducción de costos, tiempos de fabricación y finalmente ahorro en costos de materiales.

- Se determinó la variabilidad de la rugosidad en función del desgaste de los mismos después de realizar las inyecciones con silicona, la discusión resalta que la tecnología influyó significativamente en la rugosidad de cada molde expuesto a las inyecciones ya que sus valores son diferenciados, sin embargo también se concluye que en cuanto a la pérdida de material en el molde no influyó significativamente la tecnología usada ya que los tres moldes perdieron valores similares en cuanto a profundidad de la letra que fue otro parámetro medido en esta investigación.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Se sugiere que futuras investigaciones repliquen este estudio utilizando diferentes configuraciones de impresión, materiales y parámetros de inyección, además trabajar con número de inyección más amplios ya que en este estudio se realizaron 30 inyecciones por molde. Esto ayudaría a validar los hallazgos y fortalecer la confiabilidad de los resultados.
- Considerar la optimización del proceso de fabricación de moldes utilizando tecnología SLA, para mejorar la calidad superficial de las piezas inyectadas y reducir los tiempos de producción ya que en este estudio se determinó que en cuanto a rugosidad esta tecnología tuvo los mejores acabados.
- Antes de realizar la inyección de silicona en los moldes, es esencial verificar la compatibilidad entre los materiales del molde y de la pieza para evitar posibles pérdidas y defectos. Esta precaución garantiza un proceso de fabricación más eficiente y sin contratiempos, reduciendo costos y tiempos de producción, por ello es importante establecer protocolos de control de calidad para verificar lo mencionado asegurando así la integridad del producto final.
- Tener en cuenta que en este estudio la inyección fue manual, sería conveniente que se use una máquina de moldeo por inyección que es la apropiada para el uso de moldes de este tipo, además, se puede usar la información del análisis termogravimétrico que se realizó en esta tesis para establecer el punto máximo de temperatura con el que se puede trabajar en cada molde ya que dicha máquina funde el material plástico para inyectarlo a presión al molde.
- Explorar nuevas aplicaciones y mercados para piezas inyectadas de plástico fabricadas con moldes impresos en 3D es importante aprovechar, especialmente en sectores como la electrónica, la medicina y la aeronáutica, donde la demanda de piezas con alto detalle y precisión es alta, el uso de moldes impresos en 3D puede ofrecer una solución rentable y eficiente, además, la flexibilidad y la capacidad de producción rápida de los moldes impresos en 3D los hacen ideales para la producción de piezas pequeñas o medianas que requieren mucho detalle.

- Mejorar la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, diseñadores y fabricantes es fundamental para aprovechar plenamente las tecnologías de impresión 3D en la fabricación de moldes y piezas inyectadas, este enfoque integrado permite una innovación más ágil y eficiente, así como una mejor adaptación a las necesidades cambiantes del mercado, mantenerse al día con los avances tecnológicos en fabricación aditiva e inyección de plástico es crucial para garantizar la competitividad y el éxito a largo plazo en la industria.



## BIBLIOGRAFIA

1. **ANYCUBIC**, 2022. User Guide for Standard Resin+. [en línea]. 2022. Recuperado a partir de :  
[https://cdn.shopify.com/s/files/1/0245/5519/2380/files/Anycubic\\_Standard\\_Resin\\_User\\_Manual\\_V1.0-EN\\_1\\_df2a47fb-f6aa-477c-8c56-faaa2b1293ef.pdf?v=1663574587](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0245/5519/2380/files/Anycubic_Standard_Resin_User_Manual_V1.0-EN_1_df2a47fb-f6aa-477c-8c56-faaa2b1293ef.pdf?v=1663574587) [accedido 27 febrero 2024].
2. **ANYCUBIC**, 2023. Colored UV Resin - Get 3 for the price of 2. [en línea]. 2023. Recuperado a partir de : <https://store.anycubic.com/collections/uv-resin/products/colored-uv-resin> [accedido 20 noviembre 2023].
3. **ARRIBAS, Pablo**, 2015. PROCEDIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE PLÁSTICO FABRICADAS MEDIANTE LA IMPRESIÓN 3D. *ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR UNIVERSIDAD DE BURGOS* [en línea]. 2015. Recuperado a partir de :  
[https://riubu.ubu.es/bitstream/handle/10259/4311/Arribas\\_Subi%F1as.pdf;jsessionid=D6906B9F2A99245E2D888844E473E91B?sequence=1](https://riubu.ubu.es/bitstream/handle/10259/4311/Arribas_Subi%F1as.pdf;jsessionid=D6906B9F2A99245E2D888844E473E91B?sequence=1) [accedido 19 noviembre 2023].
4. **BORONAT, Judith**, 2020. *ESTUDIO COMPARATIVO MOLDE PROTOTIPO DE TERMOCONFORMADO MEDIANTE TECNICAS DE F.A (AM)* [en línea]. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado a partir de :  
[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/159757/Boronat%20-%20ESTUDIO%20COMPARATIVO%20MOLDE%20PROTOTIPO%20DE%20TERMOCONFORMADO%20MEDIANTE%20TECNICAS%20DE%20F.A%20\(AM\).pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/159757/Boronat%20-%20ESTUDIO%20COMPARATIVO%20MOLDE%20PROTOTIPO%20DE%20TERMOCONFORMADO%20MEDIANTE%20TECNICAS%20DE%20F.A%20(AM).pdf?sequence=1) [accedido 27 febrero 2024].
5. **CIANCIOSI, Pablo**, 2014. Polímeros. *Universidad Tecnológica Nacional 1 – F.R.L.P. – QUÍMICA APLICADA – INGENIERÍA MECÁNICA* [en línea]. 2014. Recuperado a partir de : <https://www.frlp.utn.edu.ar/materias/qaplicada/polimeros.pdf> [accedido 19 noviembre 2023].
6. **COLOR PLUS**, 2020. PETG. *Colorplus3d* [en línea]. 2020. Recuperado a partir de : <https://www.colorplus3d.com/wp-content/uploads/2020/11/PETG.pdf> [accedido 19 noviembre 2023].
7. **CORONADO, John**, 2019. FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DEL DISEÑO DE MOLDES DE INYECCIÓN, CON ÉNFASIS EN LOS SISTEMAS DE EXPULSIÓN Y DESMOLDEO DE ARTÍCULOS PLÁSTICOS. *Universidad de Antioquia* [en línea]. Medellín, 2019. Recuperado a partir de :  
[https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/14854/1/CoronadoJohn\\_2019\\_MoldeArticulosPlasticos.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/14854/1/CoronadoJohn_2019_MoldeArticulosPlasticos.pdf) [accedido 1 marzo 2024].
8. **DIZON, John Ryan C. et al.**, 2020. 3D printed injection molds using various 3D printing technologies. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2020.

9. **FINNES, Tyler**, 2015. High Definition 3D Printing-Comparing SLA and FDM Printing Technologies. *The Journal of Undergraduate Research* [en línea]. 2015. Recuperado a partir de : <https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=jur> [accedido 19 noviembre 2023].
10. **FOMBUENA, Vicent, FENOLLAR, Octavio y MONTAÑÉS, Néstor**, 2016. Caracterización de materiales poliméricos. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA (ed.) [en línea]. 2016. Recuperado a partir de : <https://elibro.net/es/ereader/epoch/57426> [accedido 19 noviembre 2023].
11. **FORMLABS**, 2020. Moldeo por inyección rápido de bajo volumen con moldes impresos en 3D. *LIBRO BLANCO* [en línea]. diciembre 2020. Recuperado a partir de : [https://solidperfil3d.com/wp-content/uploads/2021/06/Formlabs\\_injection-molding-whitepaper\\_spa\\_2.pdf](https://solidperfil3d.com/wp-content/uploads/2021/06/Formlabs_injection-molding-whitepaper_spa_2.pdf) [accedido 5 marzo 2024].
12. **GALBATI, Ariel**, 2019. Galbiati\_impresion\_3d\_tecnologia\_y\_polimeros. [en línea]. abril 2019. Recuperado a partir de : [https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/aa12\\_galbiati\\_impresion\\_3d\\_tecnologia\\_y\\_polimeros.pdf](https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/aa12_galbiati_impresion_3d_tecnologia_y_polimeros.pdf) [accedido 19 noviembre 2023].
13. **GARCIA, Sergio**, 2006. LA TECNOLOGÍA DE LOS ELASTÓMERAS RTV (VULCANIZACIÓN A TEMPERATURA AMBIENTE) Y SU APLICACIÓN EN LA ESCULTURA. *Revista Iberoamericana de Polímeros García* [en línea]. 2006. Recuperado a partir de : <https://reviberpol.files.wordpress.com/2019/08/2006-garcia.pdf> [accedido 21 febrero 2024].
14. **GONZÁLEZ, Wenceslao y MANCINI, Héctor**, 2003. Ciencia de los materiales. EDITORIAL ARIEL (ed.) [en línea]. 1. Barcelona, 2003. Recuperado a partir de : <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/48321> [accedido 24 febrero 2024].
15. **ISERIQ**, 2023. Caucho de Silicona RTV m20. [en línea]. Cuenca, 2023. Recuperado a partir de : <https://www.iseriq.com/p/caucho-de-silicona-rtv-m20/> [accedido 24 febrero 2024].
16. **KAZMER, David O.**, 2007. Injection mold design engineering. *Injection Mold Design Engineering*. Hanser, 2007.
17. **ÖZDİLLİ, Özgür**, 2021. Comparison of the Surface Quality of the Products Manufactured by the Plastic Injection Molding and SLA and FDM Method. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*. Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi, 18 junio 2021.
18. **RODRÍGUEZ, Ellen y VILLEGAS, Ernesto**, 2012. Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico. [en línea]. 2012. Recuperado a partir de : <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/732/13470-24413-1-PB.pdf?sequence=1> [accedido 9 enero 2024].

19. **TRAPERO, Diego**, 2019. Todo sobre el PETG en impresión 3D. [en línea]. 2019. Recuperado a partir de : <https://bitfab.io/es/blog/petg-impresion-3d/> [accedido 27 febrero 2024].
  
20. **VELASCO, Marco A, QUEVEDO, Yeison N y BONILLA, Camilo A**, 2022. Determinación de propiedades mecánicas a tensión y compresión de PETG procesado mediante fabricación por filamento fundido. [en línea]. Bogotá, 21 junio 2022. Recuperado a partir de : [https://somim.org.mx/memorias/memorias2022/articulos/A2\\_179.pdf](https://somim.org.mx/memorias/memorias2022/articulos/A2_179.pdf) [accedido 19 noviembre 2023].



## ANEXOS

### ANEXO A: PROCESO DE INYECCION DE SILICONA EN LOS MOLDES



**Fotografía N°1.** Materiales e instrumentos usados en el proceso de inyección de silicón.



**Fotografía N°2.** Pulido y retirado de excesos en los moldes.



**Fotografía N°3.** Material de inyección (Silicona RTV y catalizador).



**Fotografía N°4.** Pesado de la silicona RTV y el catalizador.



**Fotografía N°5.** Untamiento de aceite de silicona (desmoldante) sobre los moldes.



**Fotografía N°6.** Inyección de silicón.



**Fotografía N°7.** Secado de las piezas en la estufa a 40°C.



**ANEXO B: MEDICION DE LA PROFUNDIDAD DE LA LETRA Y LA RUGOSIDAD**



**Fotografía N°8.** Medición de la profundidad de las letras del molde.



**Fotografía N°9.** Medición de la rugosidad del molde de PLA después de la primera inyección.



**Fotografía N°10.** Medición de la rugosidad del molde de PETg después de la primera inyección.



**Fotografía N°11.** Medición de la rugosidad del molde de resina después de la primera inyección.



**Fotografía N°12.** Medición de la rugosidad del molde de PLA después de la quinceava inyección.



**Fotografía N°13.** Medición de la rugosidad del molde de PETg después de la quinceava inyección.



**Fotografía N°14.** Medición de la rugosidad del molde de resina después de la quinceava inyección.



**Fotografía N°15.** Medición de la rugosidad del molde de PLA después de la treintava inyección.



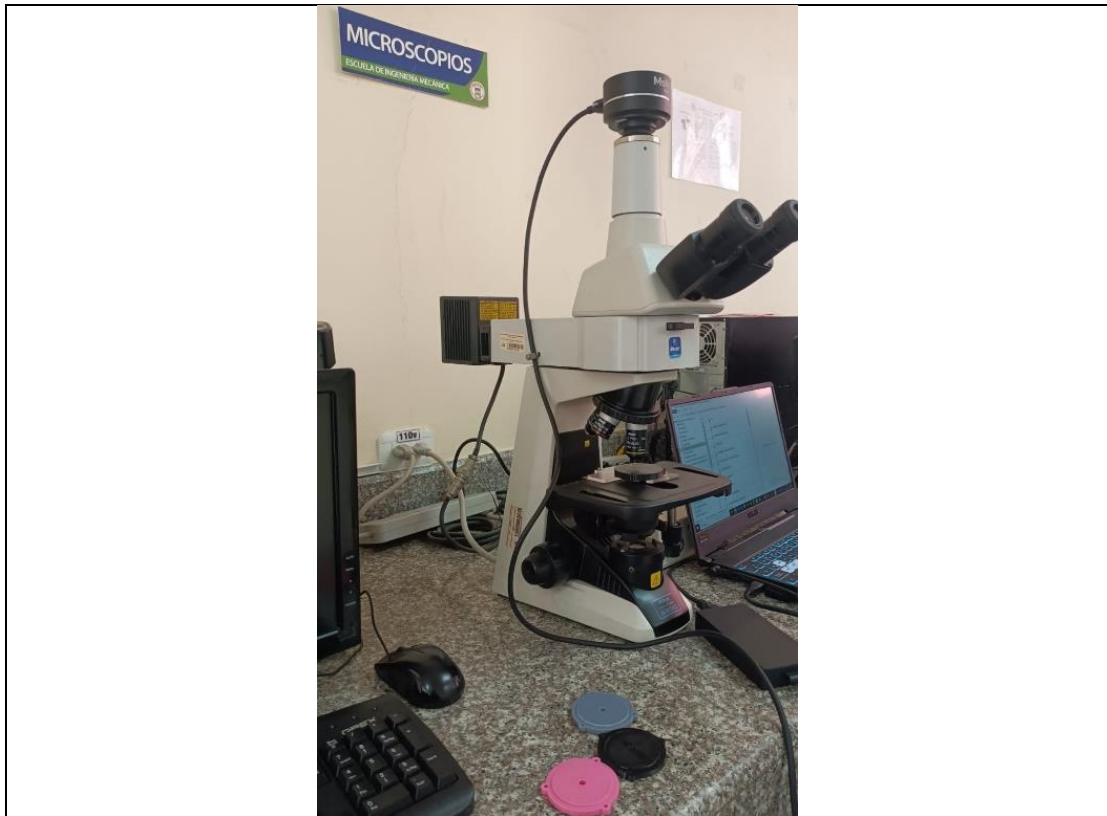
**Fotografía N°16.** Medición de la rugosidad del molde de PETg después de la treintava inyección.



**Fotografía N°17.** Medición de la rugosidad del molde de resina después de la treintava inyección.



## ANEXO C: ANALISIS MISCROSCOPICO



**Fotografía N°18.** Análisis microscópico de la superficie de los moldes

**ANEXO D: RESULTADO DE LAS PIEZAS INYECTADAS CON SILICON**



**Fotografía N°19.** Piezas desde la inyección 1 a la 8 (PLA, PETg y resina estándar)



Fotografía N°20. Piezas desde la inyección 9 a la 16 (PLA, PETg y resina estándar)



Fotografía N°21. Piezas desde la inyección 17 a la 24 (PLA, PETg y resina estándar)





Fotografía N°21. Piezas desde la inyección 25 a la 30 (PLA, PETg y resina estándar)