

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE DE VIÑA DEL MAR JOSÉ MIGUEL CARRERA

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE
INSERTOS POLIMÉRICOS CON MATERIALES DE INGENIERÍA
PARA PROCESOS DE INYECCIÓN EN BAJA PRODUCCIÓN**

Trabajo de Titulación para optar al título de
Ingeniero en Fabricación y Diseño
Industrial con Licenciatura en Ingeniería en
Fabricación y Diseño Industrial
Alumna: Kamila Andrea López Echeverría
Profesor guía: Mario González Carvallo

Viña del Mar, Chile

2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Diseño, fabricación y validación experimental de insertos poliméricos con materiales de ingeniería para procesos de inyección en baja producción

Nombre del candidato(a): Kamila Andrea López Echeverría

Carrera / Grado: Ingeniería en fabricación y diseño industrial

Campus: José miguel carrera **Departamento:** Diseño y manufactura

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mario González Carvallo, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Mario Gonzalez Carvallo

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 28/10/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a): Fecha: 28/10/2026

Firma

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN TÉCNICO

KEYWORDS: moldeo por inyección, manufactura aditiva, molde híbrido, PLA, ASA, insertos intercambiables.

Este trabajo desarrolla un molde híbrido reutilizable con insertos intercambiables para evaluar componentes fabricados por extrusión de material en una inyectora vertical JIEYANG. El prototipo se compone de un soporte inferior de ácido poliláctico (PLA), un cuerpo superior e insertos de acrilonitrilo estireno acrilato (ASA), y elementos metálicos de apoyo y fijación.

El diseño se organizó mediante el análisis funcional, la metodología de diseño de Michael French, la caracterización de la zona de montaje, el modelado CAD y las comprobaciones de ajuste. Las pruebas de montaje presentaron dificultades de posicionamiento y motivaron la ampliación de perforaciones y la revisión de las aberturas de fijación. Los antecedentes señalaron que el desempeño de los insertos poliméricos para series cortas depende de su geometría, de la temperatura y presión del proceso, y de las condiciones de fabricación de cada inserto.

Se probaron insertos de ASA e insertos de PLA en diferentes cavidades. Las observaciones indican que 10 min de enfriamiento favorecen el desmoldeo y la apariencia de las piezas. También se observó deterioro térmico localizado en la entrada del cuerpo superior de ASA.

Los ensayos permitieron obtener piezas con distintas geometrías mediante el cambio de insertos, manteniendo los cuerpos principales del molde. Esto demuestra que el sistema puede utilizarse para realizar pruebas de inyección a baja escala, aunque todavía requiere mejoras y evaluaciones adicionales. Finalmente, se realizó un análisis de costos que considera la fabricación del molde y el recambio de insertos, expresando los resultados en pesos chilenos y UF.

ÍNDICE GENERAL

Introducción.....	1
Capítulo 1: Descripción del proyecto	2
1.1 MOLDEO POR INYECCIÓN Y EXIGENCIAS DEL MOLDE	3
1.2 MANUFACTURA ADITIVA EN MOLDES DE INYECCIÓN	4
1.2.1 Antecedentes experimentales de insertos impresos.....	5
1.3 MATERIALES DE INGENIERÍA Y FILAMENTOS PARA PROTOTIPADO	7
1.4 CONTEXTO, RECURSOS Y RESTRICCIONES DEL PROYECTO	9
1.5 SOLUCIONES EXISTENTES Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	10
1.6 ALCANCE Y OBJETIVOS	11
1.6.1 Objetivo general	12
1.6.2 Objetivos específicos.....	12
Capítulo 2: Desarrollo de la propuesta	13
2.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO	14
2.2 ANÁLISIS FUNCIONAL	15
2.3 REQUERIMIENTOS Y CRITERIOS DE DISEÑO	16
2.4 DISTRIBUCIÓN DE FUNCIONES ENTRE COMPONENTES.....	17
2.5 DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PROYECTO	18
2.6 CRITERIOS PARA EL DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE	19
Capítulo 3: Ingeniería de detalle y prototipado	21
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA INYECTORA Y ZONA DE MONTAJE	22
3.2 SELECCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS DE FABRICACIÓN	23
3.2.1 Fabricación del conjunto PLA–ASA.....	24
3.3 DIMENSIONAMIENTO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MOLDE.....	25
3.3.1 Restricciones dimensionales.....	26
3.3.2 Fuerza de separación del molde.....	26
3.3.3 Transmisión de cargas en el conjunto.....	27
3.3.4 Verificación de los elementos metálicos de apoyo	28
3.3.5 Estado del dimensionamiento.....	29

3.4 MODELADO CAD Y DISEÑO DEL CONJUNTO	29
3.4.1 Alojamiento de los insertos y superficies de cierre	30
3.4.2 Apoyos y elementos de alineación.....	30
3.4.3 Relaciones de ensamblaje.....	30
3.4.4 Diseño de la cavidad y ajuste de los insertos.....	31
3.5 VERIFICACIONES GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS.....	32
3.5.1 Análisis de desmoldeo	32
3.5.2 Simulación mecánica.....	33
3.6 FABRICACIÓN, PRUEBAS DE MONTAJE E ITERACIONES	33
3.6.1 Plantillas de comprobación del anclaje	33
3.6.2 Montaje del primer prototipo.....	34
3.6.3 Modificación manual de las perforaciones	35
3.6.4 Revisión del diseño de fijación.....	36
3.6.5 Fabricación de la versión actualizada.....	37
Capítulo 4: Costos de la propuesta y evaluación de resultados	39
4.1 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL	40
4.1.1 Propósito y alcance de la evaluación.....	40
4.1.2 Montaje y preparación del conjunto	41
4.1.3 Material y condiciones de inyección	42
4.1.4 Secuencia de ajustes y pruebas adicionales	43
4.1.5 Apariencia y desmoldeo de las piezas	44
4.1.6 Estado del molde y zona de entrada	45
4.1.7 Alcance dimensional y balance de material.....	46
4.1.8 Interpretación de los resultados	47
4.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA	48
4.2.1 Alcance y bases del presupuesto.....	48
4.2.2 Material y tiempo de impresión.....	48
4.2.3 Componentes metálicos y parámetros económicos	49
4.2.4 Desarrollo del costo de fabricación	50
4.2.5 Costo del recambio y del conjunto reutilizable	54

4.2.6 Presupuesto total y alcance de la estimación.....	56
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones	57
5.1 CONCLUSIONES.....	57
5.2 RECOMENDACIONES	58
Referencias	59
Anexos	62
Anexo A Registros de fabricación	62
Anexo B Levantamiento y comprobaciones de montaje.....	63
Anexo C Antecedentes de valorización de componentes metálicos.....	63
Anexo D Bitácora y registro fotográfico del ensayo	64
Anexo E Simulación mecánica preliminar	72
Anexo F Registro fotográfico complementario.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Investigaciones experimentales sobre insertos poliméricos para inyección.....	6
Tabla 1-2.	Filamentos considerados.....	8
Tabla 1-3.	Comparación de alternativas de moldes para baja producción.....	11
Tabla 2-1.	Aplicación de la metodología de diseño de French.	14
Tabla 2-2.	Requerimientos funcionales del sistema de moldeo.....	16
Tabla 2-3.	Funciones asignadas a los componentes del sistema.....	17
Tabla 3-1.	Antecedentes de la inyectora y estado de verificación.	23
Tabla 3-2.	Asignación de materiales y respaldo de fabricación.....	24
Tabla 3-3.	Antecedentes de fabricación y preparación digital del conjunto.	25
Tabla 3-4.	Superficies de ajuste y comprobaciones dimensionales.	32
Tabla 4-1.	Configuraciones del desarrollo y estado de evaluación.....	40
Tabla 4-2.	Condiciones de los ensayos de inyección.....	42
Tabla 4-3.	Secuencia retrospectiva de los seis ajustes iniciales.....	43
Tabla 4-4.	Inspección visual de los componentes.....	45
Tabla 4-5.	Observaciones y explicaciones que deben contrastarse.	47
Tabla 4-6.	Material y tiempo calculados por el laminador.	48
Tabla 4-7.	Presupuesto de componentes metálicos y fijaciones.	49
Tabla 4-8.	Parámetros del presupuesto de fabricación y recambio.....	50
Tabla 4-9.	Presupuesto comparativo de desarrollo y fabricación.	53
Tabla E-1.	Resultados numéricos del caso preliminar de 1,67 N.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Inyectora vertical JIEYANG disponible para el proyecto.	3
Figura 1-2. Comparación conceptual entre un molde convencional y un sistema con insertos intercambiables.	5
Figura 1-3. Zona de montaje y referencias dimensionales de la inyectora.	9
Figura 1-4. Impresora Bambu Lab P1S disponible en el laboratorio DIMA.	10
Figura 2-1. Árbol funcional del sistema de moldeo híbrido.....	15
Figura 2-2. Boceto conceptual de los cuerpos del molde y sus elementos de apoyo.	19
Figura 3-1. Entradas y salidas del sistema de moldeo híbrido.	22
Figura 3-2. Modelo CAD referencial de la inyectora y zona de trabajo.	25
Figura 3-3. Vista general del conjunto de moldeo.....	29
Figura 3-4. Corte de las mitades del molde y alojamiento de los insertos.	30
Figura 3-5. Secciones del conjunto en posiciones cerrada y abierta.	31
Figura 3-6. Cavidad y elementos de alineación del prototipo físico.	32
Figura 3-7. Plantillas de comprobación de los puntos de anclaje.....	34
Figura 3-8. Montaje del prototipo y detalle de las fijaciones superiores.	35
Figura 3-9. Perforaciones ampliadas durante el ajuste del primer prototipo.....	36
Figura 3-10. Propuesta de modificación de una abertura de fijación.	36
Figura 3-11. Componentes de la versión actualizada del prototipo.	38
Figura 4-1. Montaje del conjunto híbrido en la inyectora.	41
Figura 4-2. Alojamiento del inserto y cavidad de ensayo	41
Figura 4-3. Ejemplares obtenidos durante los ensayos.	43
Figura 4-4. Detalle superficial y rebaba en piezas de ensayo.....	44

Figura 4-5. Estado localizado de la entrada superior.....	46
Figura A-1. Estimación del laminador para el cuerpo superior y los insertos de ASA.	62
Figura A-2. Estimación del laminador para el soporte inferior de PLA.....	63
Figura B-1. Vista lateral del prototipo instalado en posición abierta.	63
Figura D-1. Vista complementaria de una versión previa durante el montaje.	64
Figura D-2. Componentes del molde íntegro de PLA antes de la prueba.	65
Figura D-3. Mitad superior de PLA antes de la prueba.	66
Figura D-4. Mitad inferior de PLA con la cavidad de la rueda dentada.....	67
Figura D-5. Molde íntegro de PLA instalado en la inyectora.....	68
Figura D-6. Contacto de la boquilla con la entrada del molde de PLA.....	69
Figura D-7. Acumulación de polímero en la zona de entrada.	70
Figura D-8. Estado de la entrada del molde de PLA después de la prueba.	71
Figura E-1. Tensión de Von Mises del estudio preliminar.....	73
Figura E-2. Desplazamiento total del estudio preliminar.	73
Figura F-1. Vista de la entrada y detalle del apoyo inferior.	74
Figura F-2. Pieza y montaje del inserto durante las pruebas.....	75

INDICE DE FORMULAS

Ecuación 3-1	26
Ecuación 3-2	27
Ecuación 3-3	28
Ecuación 4-1	50
Ecuación 4-2	51
Ecuación 4-3	51
Ecuación 4-4	52
Ecuación 4-5	52
Ecuación 4-6	52
Ecuación 4-7	53
Ecuación 4-8	54
Ecuación 4-9	54
Ecuación 4-10	55
Ecuación 4-11	56

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

PLA — Ácido poliláctico
ASA — Acrilonitrilo estireno acrilato
PP — Polipropileno
FFF — Fabricación por filamento fundido
CAD — Diseño asistido por computador
CLP — Peso chileno
 F_s — Fuerza de separación del molde (N)
 P_c — Presión efectiva media en cavidad (MPa)
 A_p — Área proyectada sometida a presión (mm^2)
 $F_{c,op}$ — Fuerza de cierre de operación (N)
FS — Factor de seguridad (adimensional)
 σ_c — Esfuerzo medio de compresión (MPa)
 F / A — Fuerza sobre el apoyo (N) / área de su sección (mm^2)
 m / t — Masa (kg) / tiempo (h)
 p / r — Precio de material (CLP/kg) / tarifa de trabajo (CLP/h)
C — Costo (CLP)
UF — Unidad de fomento
N / kN — Newton / kilonewton
MPa — Megapascal; equivale a N/mm^2
 mm / mm^2 — Milímetro / milímetro cuadrado
g / kg — Gramo / kilogramo
s / min / h — Segundo / minuto / hora
°C — Grado Celsius

INTRODUCCIÓN

El moldeo por inyección permite fabricar piezas plásticas con buena precisión y repetibilidad. Sin embargo, los moldes metálicos suelen requerir mecanizado especializado, largos plazos de fabricación y una inversión económica importante. Estas exigencias pueden limitar su uso en prototipos y producciones de bajo volumen, donde se necesitan soluciones que permitan fabricar y modificar el diseño con mayor rapidez.

La manufactura aditiva permite fabricar insertos y componentes a partir de modelos digitales. Esto facilita las modificaciones geométricas, aunque los materiales impresos presentan limitaciones térmicas y mecánicas que dependen, entre otros factores, de la temperatura, la orientación de impresión y la unión entre capas. En este trabajo se propone un sistema híbrido que combina cuerpos e insertos poliméricos con componentes metálicos para el apoyo, la fijación y la alineación.

La propuesta combina un soporte inferior de PLA, un cuerpo superior de ASA y componentes metálicos de apoyo y fijación. Los insertos definen la cavidad y se reemplazan dentro de los cuerpos existentes. Se ensayó inicialmente una rueda dentada con insertos de ASA y luego una figura cuadrada con un polígono hexagonal interior mediante insertos de PLA. El documento reúne antecedentes, diseño, fabricación, recursos y resultados observados de ambas configuraciones. La evaluación comprende montaje, apariencia, desmoldeo y estado visible del conjunto del molde; no incluye pruebas funcionales de las piezas.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1. Este capítulo presenta los antecedentes necesarios para comprender el problema de ingeniería, considerando el moldeo por inyección, el uso de manufactura aditiva en moldes e insertos, los materiales disponibles y las restricciones del proyecto. Finalmente, se establece la brecha de investigación, el alcance y los objetivos que servirán de base para el desarrollo conceptual del sistema.

1.1 MOLDEO POR INYECCIÓN Y EXIGENCIAS DEL MOLDE

El moldeo por inyección es un proceso utilizado para fabricar piezas plásticas mediante la introducción de un polímero fundido dentro de una cavidad cerrada. El ciclo considera principalmente las etapas de plastificación, llenado, compactación, enfriamiento, apertura y extracción de la pieza. La calidad y repetibilidad del proceso dependen de la interacción entre la máquina, el material, la geometría de la pieza y el molde, por lo que este último cumple funciones que van más allá de reproducir únicamente la forma final del producto (Kazmer, 2022). La inyectora disponible para el proyecto se muestra en la Figura 1-1.

Figura 1-1. Inyectora vertical JIEYANG disponible para el proyecto.



Fuente: elaboración propia

Durante el llenado y la compactación, el molde debe contener el polímero mientras este se encuentra sometido a presión y temperatura. Posteriormente, debe disipar suficiente calor para permitir el desmoldeo sin producir deformaciones importantes. Esta transferencia térmica adquiere especial relevancia cuando se utilizan materiales poliméricos en el molde, debido a que presentan una conductividad térmica considerablemente menor que los aceros y aleaciones de aluminio empleados convencionalmente. Como consecuencia, puede producirse acumulación de calor entre ciclos, modificando la rigidez del inserto, el tiempo de enfriamiento y la estabilidad dimensional del proceso (Moritz et al., 2022).

La presión generada dentro de la cavidad produce además una fuerza que tiende a separar las dos mitades del molde. Esta fuerza debe ser contrarrestada por el sistema de cierre de la inyectora. Sin embargo, la presión indicada por el controlador no puede utilizarse directamente como una carga uniforme sobre el molde, ya que la fuerza de separación depende de la presión efectiva dentro de la cavidad y del área proyectada de la pieza y del sistema de alimentación.

Además de resistir las cargas, el molde debe mantener una correcta alineación entre sus mitades, permitir la evacuación del aire desplazado durante el llenado y facilitar la extracción de la pieza. Deficiencias en estas funciones pueden generar rebaba, llenado incompleto, daño superficial o esfuerzos excesivos durante el desmoldeo. En componentes fabricados mediante manufactura aditiva, la orientación de impresión, la rugosidad y la unión entre capas también pueden influir en su comportamiento frente a temperatura, presión y ciclos repetidos (Bagalkot et al., 2021; Gohn et al., 2022).

Por lo tanto, el desarrollo de un molde fabricado parcial o mayoritariamente mediante manufactura aditiva debe considerar como requisitos principales la resistencia térmica y mecánica, estabilidad dimensional, correcta alineación, control del llenado y facilidad de desmoldeo. Estas condiciones serán utilizadas posteriormente para definir los requerimientos de diseño del sistema desarrollado en el proyecto.

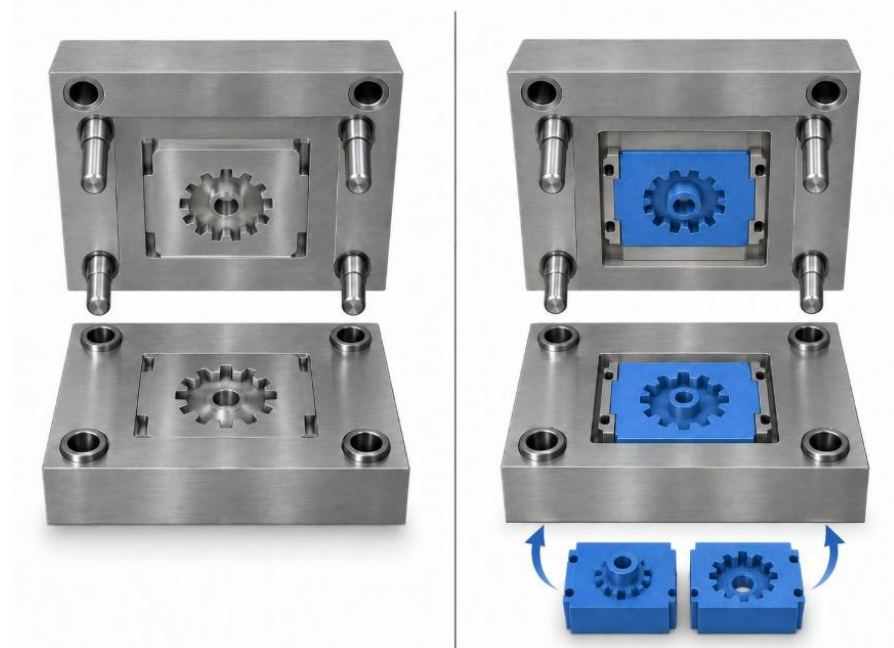
1.2 MANUFACTURA ADITIVA EN MOLDES DE INYECCIÓN

La fabricación de moldes para series cortas puede representar un costo y tiempo elevado cuando se utilizan métodos convencionales. Como alternativa surge el Rapid Tooling (fabricación rápida de moldes e insertos), que busca reducir los tiempos de desarrollo

mediante tecnologías que permitan fabricar y modificar el molde con mayor facilidad (Becerra-Borges et al., 2025; Kazmer, 2022).

La fabricación por filamento fundido (FFF, del inglés fused filament fabrication) es una técnica de extrusión de material en la que un filamento termoplástico se deposita capa por capa. Permite fabricar insertos y modificar su cavidad conservando otros componentes del molde. Esta posibilidad resulta de interés para prototipos y series cortas, donde el costo de fabricar nuevamente todo el molde puede limitar las iteraciones de diseño (Pelín et al., 2024). La Figura 1-2 compara un molde convencional con un sistema de insertos intercambiables.

Figura 1-2. Comparación conceptual entre un molde convencional y un sistema con insertos intercambiables.



Fuente: elaboración propia con apoyo de inteligencia artificial (IA)

1.2.1 Antecedentes experimentales de insertos impresos

Siemiński y Szulc (2018) fabricaron insertos de PLA por FFF para inyectar polipropileno. El artículo describe una primera serie de 36 piezas y una segunda de 60, con cambios en el apoyo metálico y en el enfriamiento. Los autores utilizaron escaneo tridimensional para comparar piezas. Estas cantidades corresponden a las series descritas y no a una vida útil aplicable a cualquier inserto de PLA.

Gohn et al. (2022) evaluaron iteraciones de insertos fabricados por extrusión de material. El diseño optimizado, con relleno del 100 % y una zona elevada de cierre, alcanzó 15 ciclos antes de presentar deformación permanente y rebaba. El estudio relaciona el desempeño con la geometría de cierre y las condiciones de fabricación, además del material.

Moritz et al. (2022) estudiaron insertos de resina fabricados por estereolitografía para inyectar polipropileno. Identificaron diferencias de duración relacionadas con las propiedades de las resinas y su capacidad de disipar calor. Aunque la tecnología difiere de FFF, este antecedente permite justificar el registro de las condiciones térmicas y los tiempos entre ciclos.

Battegazzore et al. (2026) combinaron caracterización de materiales y simulación con ensayos de inyección de polietileno de baja densidad (LDPE) y polipropileno (PP). Las combinaciones seleccionadas completaron diez ciclos de ensayo. Ese resultado representa el intervalo estudiado y no demuestra una vida útil máxima ni valida un filamento genérico para otro montaje. La Tabla 1-1 sintetiza las configuraciones y los aportes de las investigaciones revisadas.

Tabla 1-1. Investigaciones experimentales sobre insertos poliméricos para inyección.

Investigación	Configuración estudiada	Aporte y límite para este proyecto
Siemiński y Szulc (2018)	Insertos FFF de PLA; inyección del PP.	Comparación dimensional y efecto del apoyo/enfriamiento; no predice la duración del ASA.
Gohn et al. (2022)	Insertos por extrusión de material; 15 ciclos en el diseño optimizado.	Relaciona geometría de cierre, relleno y rebaba; otra pieza y otro material.
Moritz et al. (2022)	Insertos de resina por estereolitografía; inyección del PP.	Muestra la importancia de disipar calor; tecnología de impresión distinta de FFF.
Mohd Salleh et al. (2024)	Insertos FFF con relleno de 50 %, 75 % y 100 %.	Relaciona el relleno con el daño y la vida observada; no se extrapolan cifras.
Battegazzore et al. (2026)	Filamentos MEX, simulación y ensayos con LDPE y PP.	Integra presión, temperatura y ensayos; no incluye esta geometría PLA–ASA.

Fuente: elaboración propia a partir de los estudios citados en la primera columna

En el estudio de Mohd Salleh et al. (2024), el mayor relleno se asoció con una mejor respuesta de los insertos de PLA, aunque se observó daño durante las pruebas. Este antecedente se utiliza de forma cualitativa: las inconsistencias entre algunos recuentos del

artículo impiden adoptar sus cifras como referencia directa de duración. En el presente trabajo se considera la configuración de fabricación, sin atribuirle el desempeño de otra investigación.

En conjunto, estos antecedentes muestran que la manufactura aditiva presenta potencial para fabricar moldes e insertos destinados a baja producción. Sin embargo, su comportamiento depende del material, la geometría y las condiciones reales del proceso, por lo que su desempeño debe ser evaluado experimentalmente para cada aplicación.

Bartlett (2017) estudió la supervivencia de moldes poliméricos y las propiedades de piezas moldeadas frente a herramientas metálicas; su tesis muestra por qué la duración del inserto y la calidad de la pieza deben evaluarse por separado. Gohn et al. (2022) también trataron los insertos impresos como herramientas de prototipado y observaron diferencias en propiedades de piezas obtenidas respecto de moldes de acero. Ambos antecedentes orientan las variables del ensayo, sin proporcionar una predicción directa para la geometría de este proyecto.

1.3 MATERIALES DE INGENIERÍA Y FILAMENTOS PARA PROTOTIPADO

La extrusión de material permite fabricar componentes con distintos filamentos termoplásticos. Para comparar alternativas es necesario distinguir el nombre de la familia, el grado comercial y la configuración de impresión. ISO/ASTM 52900:2021 define la terminología del proceso e ISO/ASTM 52903-1:2020 trata la especificación del material de aporte (International Organization for Standardization [ISO] & ASTM International, 2020, 2021).

El PLA y el ASA cumplen funciones distintas en el prototipo: el primero forma el soporte inferior y el segundo, el cuerpo superior y las superficies del primer par de insertos; el recambio posterior utilizó PLA. En probetas de ASA impresas, la orientación, el ángulo de relleno y los vacíos modificaron la resistencia y la deformación (Sanford et al., 2022). Esos datos no equivalen a propiedades de los insertos de esta tesis; tampoco una ficha genérica acredita el grado de filamento usado. Los filamentos considerados y su uso en el prototipo se resumen en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Filamentos considerados.

Filamento y significado	Temperatura de boquilla en FFF (°C)	Aspecto relevante
PLA (ácido poliláctico)	190–230	La rigidez cambia con la temperatura y la fabricación
PETG (tereftalato de polietileno modificado con glicol; referencia HF)	230–260	Comportamiento dependiente del grado y proceso
ABS (acrilonitrilo butadieno estireno)	240–280	Posible alabeo y dependencia de la orientación
ASA (acrilonitrilo estireno acrilato)	240–280	Orientación y vacíos afectan la resistencia impresa
PA (poliamida)	≈285	La absorción de humedad requiere control
PC (policarbonato)	260–290	Condiciones de impresión exigentes
PA-CF / PA-GF (poliamida con fibra de carbono / vidrio; referencia PA6)	CF: 260–300; GF: 260–290	Propiedades ligadas al grado y orientación

Fuente: elaboración propia a partir de Bambu Lab (s. f.-d) y Prusa Research (s. f.).

La asignación de materiales corresponde al soporte inferior de PLA, al cuerpo superior de ASA y a los insertos intercambiables de ASA y PLA. La configuración sitúa los insertos en contacto con la cavidad y mantiene los cuerpos principales durante el recambio.

Los valores de la Tabla 1-2 corresponden a la temperatura de boquilla durante la impresión FFF. Se utilizan como referencias de fabricación, no como temperaturas de servicio del molde ni de inyección del PP. Los rangos de Bambu Lab corresponden a sus grados comerciales; para PA sin refuerzo se presenta el valor orientativo de Prusa Research.

La orientación y la unión entre capas también influyen en la respuesta del componente impreso (Sanford et al., 2022; Vázquez Martínez et al., 2022).

1.4 CONTEXTO, RECURSOS Y RESTRICCIONES DEL PROYECTO

El proyecto utiliza una inyectora vertical JIEYANG disponible en el laboratorio. Su disposición condiciona el montaje del molde, el espacio disponible, la posición de la boquilla y el cierre. El controlador PORCHESON TB108 V2.0 gestiona apertura, cierre, inyección, temperatura y expulsión; su manual describe el sistema de control (PORCHESON Technology Co., Ltd., 2008). La zona de montaje y sus referencias dimensionales se muestran en la Figura 1-3.

Figura 1-3. Zona de montaje y referencias dimensionales de la inyectora.



Fuente: elaboración propia

El laboratorio DIMA dispone de impresoras Bambu Lab P1P, P1S y A1. La documentación de fabricación identifica A1 para el soporte de PLA y P1S para el trabajo de ASA. El proyecto digital conserva un perfil de ASA para P1S con boquilla de 0,4 mm (Bambu Lab, 2023). La Figura 1-4 muestra la impresora Bambu Lab P1S disponible en el laboratorio.

Figura 1-4. Impresora Bambu Lab P1S disponible en el laboratorio DIMA.



Fuente: elaboración propia

Los componentes y el conjunto se modelaron en Autodesk Fusion 360 para organizar el montaje, revisar interferencias y elaborar la documentación de fabricación. El Capítulo 3 presenta la geometría, las pruebas de montaje y los criterios de cálculo. El Capítulo 4 reúne los resultados de inyección y desmoldeo.

1.5 SOLUCIONES EXISTENTES Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Para aplicaciones de baja producción existen distintas alternativas para fabricar moldes e insertos. Los moldes metálicos convencionales ofrecen alta rigidez, estabilidad dimensional y duración, pero requieren mayor tiempo y costo de fabricación. Como alternativa, los insertos metálicos intercambiables permiten modificar la cavidad sin reemplazar todo el molde, aunque continúan dependiendo de procesos de mecanizado.

La manufactura aditiva permite reducir los tiempos de fabricación y facilita realizar modificaciones de geometría. Sin embargo, los moldes o insertos fabricados completamente mediante impresión 3D presentan limitaciones relacionadas con resistencia térmica, rigidez, desgaste y acumulación de calor. Estas condiciones han impulsado el desarrollo de soluciones híbridas, donde materiales poliméricos y metálicos cumplen funciones diferentes dentro de

un mismo sistema (Becerra-Borges et al., 2025; Pelin et al., 2024). La Tabla 1-3 compara las principales alternativas para moldes de baja producción.

Tabla 1-3. Comparación de alternativas de moldes para baja producción.

Solución	Principal ventaja	Principal limitación
Molde metálico convencional	Alta resistencia y vida útil	Mayor costo y tiempo de fabricación
Inserto metálico intercambiable	Permite modificar la cavidad	Requiere mecanizado
Molde o inserto impreso	Fabricación rápida y fácil modificación	Menor resistencia térmica y mecánica
Sistema híbrido polímero-metal	Distribuye funciones según cada material	Requiere controlar uniones, cargas y tolerancias

Fuente: elaboración propia a partir de Becerra-Borges et al. (2025), Gohn et al. (2022) y Pelin et al. (2024)

A partir de estas alternativas surge la oportunidad de estudiar una solución híbrida que aproveche la rapidez y flexibilidad de la manufactura aditiva, incorporando elementos metálicos únicamente donde sean necesarios para cumplir funciones estructurales, de fijación o alineación.

La literatura demuestra que los insertos fabricados mediante manufactura aditiva pueden utilizarse durante una cantidad limitada de ciclos, pero su comportamiento depende del material, la geometría, la máquina y las condiciones de inyección. Por esta razón, todavía existe incertidumbre respecto del desempeño de una solución híbrida fabricada principalmente mediante impresión 3D y utilizada en la inyectora disponible para el proyecto.

1.6 ALCANCE Y OBJETIVOS

El proyecto comprende la caracterización de la zona de montaje, el desarrollo conceptual, la selección de materiales, el modelado, la fabricación y la evaluación de un prototipo con insertos intercambiables. La evaluación experimental incluye las comprobaciones de montaje y los ensayos de inyección de PP.

La evaluación se centró en la apariencia de las piezas, el desmoldeo, el estado visible del molde y el recambio de insertos. El comportamiento térmico se examinó a través de los daños localizados observados durante las pruebas.

El estudio se limita a un prototipo para ensayos de baja producción. Se obtuvieron piezas con insertos de ASA y PLA. Las conclusiones corresponden a las geometrías y condiciones ensayadas y no constituyen una validación de precisión dimensional, resistencia de las piezas o vida útil del molde.

El prototipo utiliza PLA en el soporte inferior, ASA en el cuerpo superior y elementos metálicos de apoyo y fijación. Se ensayaron insertos de ASA para una rueda dentada y, posteriormente, insertos de PLA para una figura cuadrada con un polígono hexagonal interior. PET-CF y PA-CF corresponden a alternativas estudiadas durante la etapa conceptual.

1.6.1 Objetivo general

- Determinar la factibilidad técnica del uso de insertos poliméricos en moldeo por inyección para baja producción.

1.6.2 Objetivos específicos

- Analizar los requerimientos de diseño y operación de los insertos y su estructura de soporte.
- Desarrollar una propuesta técnica de sistema de moldeo con insertos poliméricos intercambiables.
- Fabricar e implementar el prototipo en la inyectora disponible, verificando su montaje y alineación.
- Evaluar el comportamiento de los insertos mediante cambios dimensionales, daños, condiciones de desmoldeo y ciclos realizados.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA PROPUESTA

2. Este capítulo presenta la metodología utilizada para organizar el desarrollo del proyecto y transformar los antecedentes recopilados en una solución conceptual. Se definen las funciones principales del sistema, los requerimientos de diseño y la función que cumplirá cada componente antes de avanzar hacia la ingeniería de detalle.

2.1 **METODOLOGÍA DE DISEÑO**

Para estructurar el desarrollo del proyecto se utiliza la metodología propuesta por Michael French, la cual permite avanzar desde el análisis del problema hasta la definición y desarrollo de una solución de diseño. Su aplicación permite establecer las funciones y requerimientos del sistema antes de definir su configuración definitiva (French, 1999).

En el presente proyecto, la metodología se utiliza para organizar el análisis del sistema de moldeo, definir sus requerimientos y generar alternativas que permitan combinar componentes fabricados mediante manufactura aditiva con elementos metálicos localizados. La aplicación de las etapas de diseño de French se resume en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Aplicación de la metodología de diseño de French.

Etapas	Aplicación en el proyecto
Análisis del problema	Se identifica la necesidad de evaluar insertos poliméricos bajo condiciones reales de inyección.
Definición funcional	Se distinguen las funciones de la estructura de soporte y del inserto polimérico.
Requerimientos	Se establecen las condiciones de diseño que debe cumplir cada componente.
Generación de alternativas	Se proponen distintas configuraciones para implementar el inserto dentro del sistema de moldeo.
Evaluación conceptual	Las alternativas se revisan cualitativamente según los requerimientos y recursos disponibles.
Selección y desarrollo	Se selecciona la alternativa de cartucho intercambiable y se desarrolla mediante CAD, selección de materiales y fabricación.
Validación	El sistema fabricado se somete a ciclos de inyección para evaluar el comportamiento del inserto.

Fuente: elaboración propia a partir de French (1999)

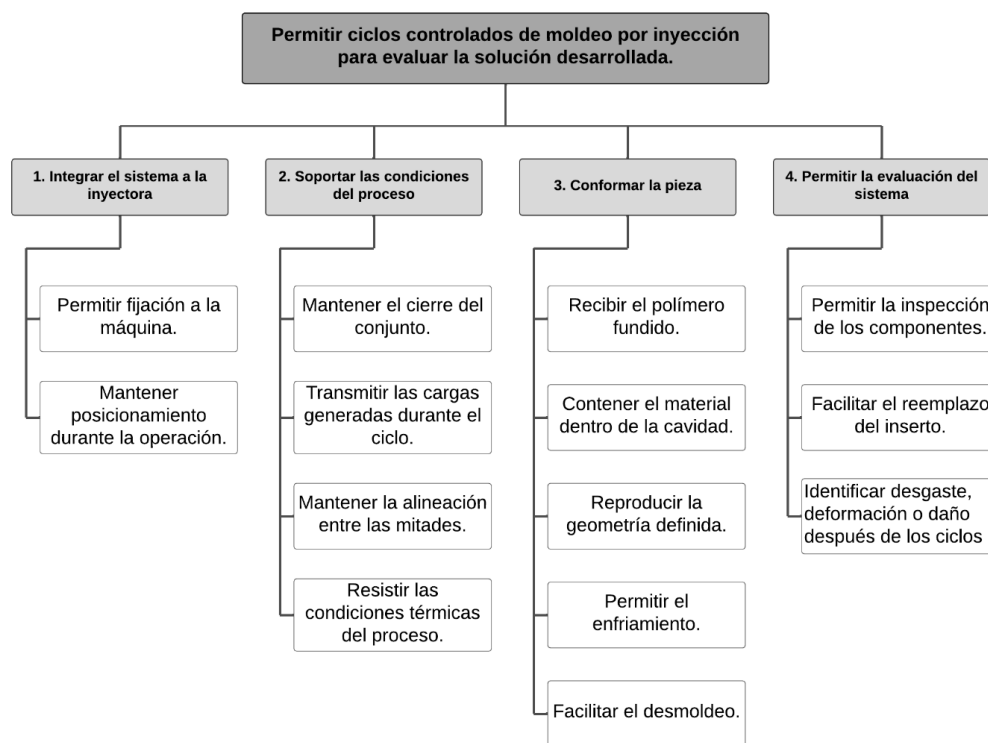
Una vez definida la solución conceptual, el desarrollo continúa con la ingeniería de detalle, la fabricación y la evaluación experimental. El estado de cada actividad se informa en los capítulos siguientes.

2.2 ANÁLISIS FUNCIONAL

El análisis funcional permite identificar las acciones que debe cumplir el sistema de moldeo antes de definir completamente su configuración física. Para el presente proyecto, la función principal consiste en permitir la realización controlada de ciclos de moldeo por inyección para evaluar el comportamiento de la solución desarrollada en condiciones reales de operación.

A partir de esta función principal se identifican funciones secundarias relacionadas con el montaje en la inyectora, contención del polímero, transmisión de cargas, alineación, conformación de la pieza, enfriamiento y desmoldeo. También se consideran funciones asociadas a la evaluación del prototipo, como la inspección de los componentes y el reemplazo del inserto. El árbol de funciones del sistema se presenta en la Figura 2-1.

Figura 2-1. Árbol funcional del sistema de moldeo híbrido.



Fuente: elaboración propia

A partir del análisis funcional se establecen las funciones que el sistema deberá cumplir durante su operación, sin definir todavía la configuración física de cada componente. Estas funciones servirán como base para transformar las necesidades identificadas en requerimientos y criterios de diseño verificables, los cuales se desarrollan en el apartado siguiente.

2.3 REQUERIMIENTOS Y CRITERIOS DE DISEÑO

A partir del análisis funcional se establecen los requerimientos que deberá cumplir el sistema para operar en la inyectora y permitir su posterior evaluación experimental. Estos requerimientos consideran las condiciones mecánicas, térmicas, dimensionales y de fabricación asociadas al proceso de moldeo por inyección.

Los requerimientos se establecieron como criterios funcionales de montaje, cierre, resistencia térmica, desmoldeo e intercambiabilidad. Las comprobaciones geométricas se relacionan con el CAD y las pruebas físicas; las condiciones de inyección se presentan en el Capítulo 4. La Tabla 2-2 relaciona cada requerimiento con su criterio de diseño.

Tabla 2-2. Requerimientos funcionales del sistema de moldeo.

Requerimiento	Criterio de diseño
Montaje	Permitir la fijación y posicionamiento correcto en la inyectora.
Resistencia mecánica	Soportar las cargas generadas durante el cierre y la inyección sin pérdida de funcionalidad.
Resistencia térmica	Mantener estabilidad suficiente frente a las temperaturas presentes durante los ciclos.
Alineación	Mantener la posición relativa entre las dos mitades del sistema.
Contención	Evitar aperturas o fugas de material durante el llenado de la cavidad.
Desmoldeo	Permitir la extracción de la pieza sin producir daños significativos.
Fabricación	Ser compatible con los equipos y procesos disponibles para el proyecto.
Intercambiabilidad	Permitir el montaje y reemplazo del inserto sin fabricar nuevamente todo el conjunto.
Inspección	Facilitar la revisión del inserto y de los componentes después de los ciclos.
Seguridad	Permitir su operación bajo las condiciones y procedimientos de seguridad del laboratorio.

Fuente: elaboración propia a partir del análisis funcional y de las condiciones del proyecto

2.4 DISTRIBUCIÓN DE FUNCIONES ENTRE COMPONENTES

Los requerimientos de la Tabla 2-2 se relacionan con la propuesta modular: los cuerpos posicionan los insertos, los pernos y arandelas permiten la fijación directa a los platos de la inyectora y los alineadores guían el cierre. Los apoyos metálicos se incorporaron para contribuir a la transmisión de cargas. Su participación real depende de contactos, cotas y rigideces que no se han cuantificado.

El sistema dispone de un soporte inferior de PLA y un cuerpo superior de ASA. Ambos alojan los insertos intercambiables que definen la cavidad. La primera configuración utilizó insertos de ASA y la segunda, insertos de PLA.

Los ocho apoyos de acero cromado y las fijaciones cumplen funciones de apoyo y sujeción. Se utilizaron ocho pernos y ocho arandelas, sin placas metálicas adicionales de fijación ni de respaldo. Los platos pertenecen a la inyectora. Las funciones de los componentes se presentan en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Funciones asignadas a los componentes del sistema.

Componente	Función principal
Cuerpo superior de ASA	Alojar el inserto superior y conformar la mitad superior del sistema.
Soporte inferior de PLA	Alojar el inserto inferior y posicionar la mitad inferior del sistema.
Insertos intercambiables de ASA y PLA	ASA: rueda dentada; PLA: cuadrado con polígono hexagonal interior. Permiten el recambio conservando los cuerpos.
Ocho apoyos de acero cromado Ø8 × 58 mm	Cuatro por mitad. Contribuyen al apoyo según el contacto efectivo; reparto de carga no medido.
Elementos de alineación	Mantener la posición relativa de las mitades durante apertura y cierre.
Ocho pernos y ocho arandelas	Fijar directamente los cuerpos a los platos de la inyectora, sin placas adicionales.

Fuente: elaboración propia

2.5 DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PROYECTO

La propuesta adopta una configuración modular para reemplazar la cavidad sin fabricar nuevamente los cuerpos principales. Los insertos concentran la geometría de la pieza, mientras que la estructura incorpora las funciones de alojamiento, fijación y apoyo. Esta distribución facilita modificar y evaluar componentes durante las iteraciones del prototipo.

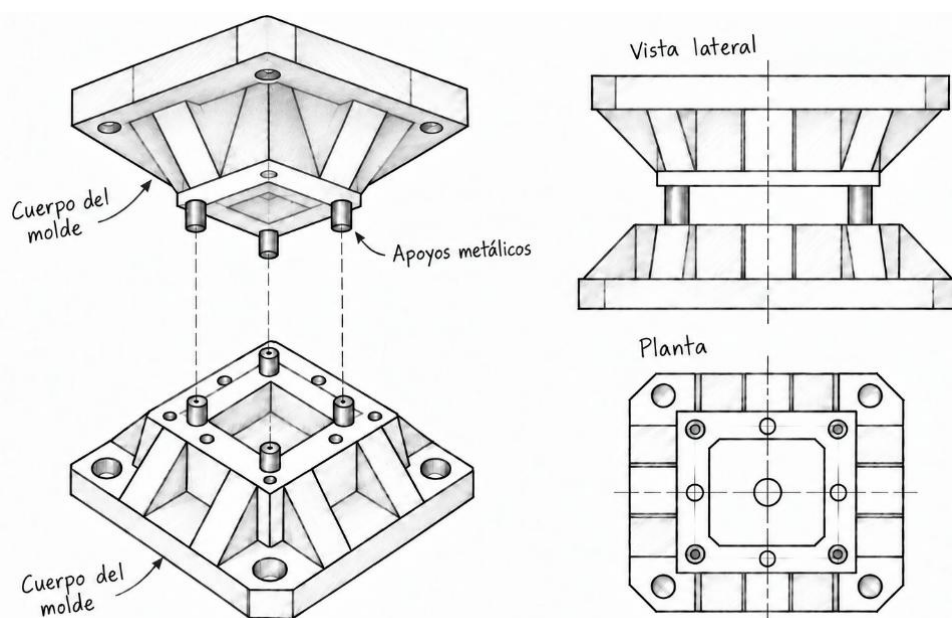
La selección del sistema híbrido responde a tres criterios: recambiar la cavidad, aprovechar las impresoras disponibles y conservar los cuerpos principales. Frente al molde metálico convencional, permite desarrollar el prototipo con los recursos del laboratorio; frente al inserto metálico, reduce la dependencia del mecanizado de la cavidad; frente al molde íntegramente impreso, incorpora apoyos y fijaciones metálicas. La Tabla 1-3 sustenta esta comparación cualitativa. Se acepta como contrapartida la necesidad de verificar las interfaces y el deterioro térmico; la selección es pertinente para este proyecto, sin demostrar superioridad general.

La configuración fabricada comprende una mitad superior de ASA y una mitad inferior de PLA. Cada cuerpo aloja una mitad del inserto intercambiable y se fija directamente al plato correspondiente de la inyectora mediante pernos y arandelas. En total se utilizaron ocho pernos y ocho arandelas; no se fabricaron ni instalaron placas metálicas adicionales.

El diseño ubica apoyos metálicos alrededor del alojamiento central y alineadores en las mitades del molde. Esta geometría busca controlar la posición y la deformación del cierre; las fotografías solo acreditan que se montaron y ajustaron componentes. No proporcionan una medición de fuerza en cada apoyo ni de alineación del conjunto final.

La relación entre decisión y comprobación es la siguiente: el alojamiento intercambiable se revisa por ajuste y extracción; la cavidad de rueda dentada, por llenado de dientes y perforación central; la unión PLA–ASA–metal, por asiento, deformación y daño. Las cotas y tolerancias aplicables deben vincularse con la revisión CAD y con medidas del prototipo, como se desarrolla en el Capítulo 3. La disposición conceptual de los cuerpos y sus apoyos se muestra en la Figura 2-2.

Figura 2-2. Boceto conceptual de los cuerpos del molde y sus elementos de apoyo.



Fuente: elaboración propia

2.6 CRITERIOS PARA EL DESARROLLO DE LA INGENIERÍA DE DETALLE

La ingeniería de detalle se desarrolló a partir del levantamiento de la zona de trabajo y de las pruebas de montaje. Se consideraron el espacio disponible, las fijaciones, la posición de la boquilla y la apertura necesaria para retirar la pieza. Las capacidades nominales de la inyectora se utilizaron como antecedentes referenciales, mientras que la compatibilidad del conjunto se examinó mediante su instalación física.

La documentación del controlador PORCHESON TB108 V2.0 se utilizó como referencia del sistema de control y se distinguió de las características mecánicas de la inyectora (PORCHESON Technology Co., Ltd., 2008).

El desarrollo definió los cuerpos, las aberturas de fijación, los apoyos metálicos, los alineadores y el alojamiento de los insertos. El ajuste del anclaje se resolvió durante el prototipado. Para la comprobación estructural se estableció el cálculo a partir de la presión

efectiva en la cavidad y del área proyectada, sin utilizar la fuerza nominal de cierre como una carga uniforme sobre todos los componentes (Autodesk, 2019).

El modelo CAD organizó el conjunto y sus posiciones de apertura y cierre. Las ecuaciones estructurales establecen el método de comprobación; el estudio numérico del Anexo E se interpreta dentro de sus condiciones de carga y material.

CAPÍTULO 3: INGENIERÍA DE DETALLE Y PROTOTIPADO

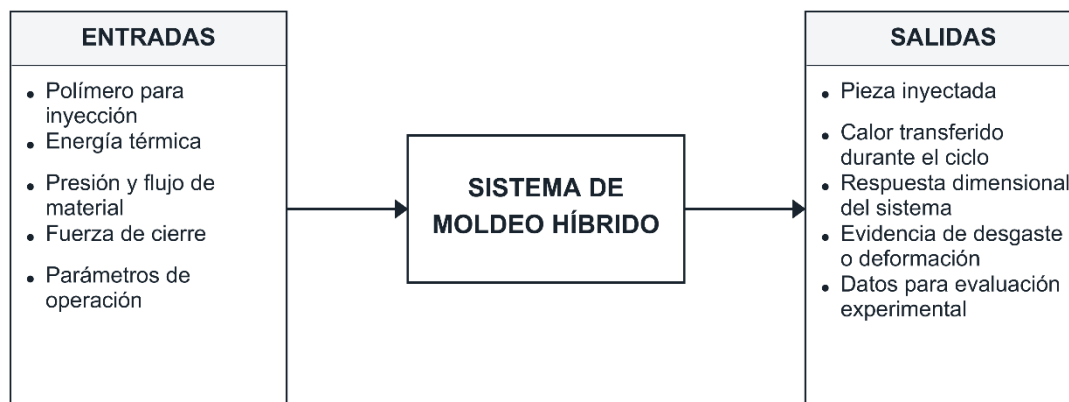
3. Este capítulo reúne la caracterización de la zona de montaje, el diseño del sistema, la asignación real de materiales y la fabricación del prototipo. Las fotografías existentes respaldan las iteraciones de anclaje y montaje; la identificación del material de cada pieza de la versión final se consigna por separado para no atribuir a las imágenes información que no muestran.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA INYECTORA Y ZONA DE MONTAJE

La caracterización consideró las entradas y salidas del proceso y las condiciones físicas de montaje de la inyectora. Estos antecedentes permitieron organizar la geometría del conjunto y establecer los criterios de dimensionamiento y comprobación.

La interacción general del sistema se representa mediante una caja negra, donde se identifican las variables que ingresan al proceso y los resultados que deberán obtenerse o evaluarse durante su funcionamiento. Las entradas y salidas se muestran en la Figura 3-1.

Figura 3-1. Entradas y salidas del sistema de moldeo híbrido.



Fuente: elaboración propia

El equipo utilizado corresponde a una inyectora vertical JIEYANG. La referencia JY-160S2 y sus capacidades nominales se presentan como antecedentes documentales; la evaluación experimental se limita al montaje y a las condiciones registradas durante las pruebas.

Se realizó un levantamiento de la zona de montaje para ubicar los puntos de fijación y definir las restricciones geométricas del conjunto. La información se contrastó mediante plantillas y pruebas de montaje.

El equipo utiliza un controlador PORCHESON TB108 V2.0 para gestionar cierre, apertura, inyección y temperatura. La Tabla 3-1 reúne los antecedentes nominales de referencia; estos no equivalen a mediciones del equipo ni se emplean para acreditar su capacidad resistente.

Tabla 3-1. Antecedentes de la inyectora y estado de verificación.

Parámetro	Antecedente nominal de referencia
Modelo	JIEYANG; referencia preliminar JY-160S2
Dimensiones del plato superior	450 × 280 mm
Dimensiones del plato inferior	450 × 280 mm
Apertura útil disponible	Carrera de apertura: 190 mm; luz máxima: hasta 290 mm
Distancia entre columnas	265 mm nominal
Fuerza de cierre	147 kN (15 tf); referencia nominal, no utilizada como carga real del ensayo
Capacidad de inyección	55,7 cm ³ con husillo Ø26 mm; 64,6 cm ³ con Ø28 mm

Fuente: elaboración propia

La comprobación física del anclaje permitió revisar la correspondencia del modelo con la máquina. Los resultados del montaje se documentan en el apartado 3.6.

3.2 SELECCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS DE FABRICACIÓN

La elección de materiales consideró las exigencias de la cavidad, las cargas de cierre, las posibilidades de impresión del laboratorio y la disponibilidad efectiva de filamento. La versión construida usa PLA en el soporte inferior y ASA en el cuerpo superior y los primeros insertos; el recambio posterior se fabricó en PLA.

PA-CF y PET-CF se consideraron como alternativas durante el desarrollo conceptual. La fabricación y los ensayos de este trabajo se realizaron con PLA y ASA.

La documentación de fabricación identifica una Bambu Lab A1 para PLA y una P1S para ASA. El recinto cerrado de la P1S resulta pertinente para la impresión de ASA (Bambu Lab, s. f.-c).

La Tabla 3-2 resume los materiales y equipos asociados a los componentes fabricados.

Tabla 3-2. Asignación de materiales y respaldo de fabricación.

Elemento	Materiales y equipos
Soporte inferior	PLA
Cuerpo superior	ASA
Inserto superior	ASA
Inserto inferior	ASA
Alineadores	PLA
Impresora y boquilla	Bambu Lab P1S y A1
Insertos del recambio posterior	PLA; cuadrado con polígono hexagonal interior

Fuente: elaboración propia

La configuración final combina PLA, ASA y elementos metálicos. Su desempeño se examinó mediante el montaje, la inyección, el desmoldeo y la inspección visual del conjunto.

3.2.1 Fabricación del conjunto PLA–ASA

El soporte inferior se imprimió en PLA y el cuerpo superior y los primeros insertos, en ASA. Los elementos metálicos cumplen funciones de apoyo y fijación.

El archivo de laminado conserva la configuración digital del trabajo de ASA. Las capturas del laminador aportan las previsiones de masa y tiempo por trabajo; estos valores se utilizan en el análisis de recursos.

Existen antecedentes de inyección con insertos de PLA y otros termoplásticos impresos, pero la duración observada depende del material, la geometría, el respaldo metálico y el ciclo (Siemiński & Szulc, 2018; Gohn et al., 2022). La literatura sobre ASA impreso permite anticipar sensibilidad a la orientación y a la porosidad; no aporta una vida útil

aplicable a estos insertos (Sanford et al., 2022). La Tabla 3-3 presenta los antecedentes de preparación digital y fabricación disponibles.

Tabla 3-3. Antecedentes de fabricación y preparación digital del conjunto.

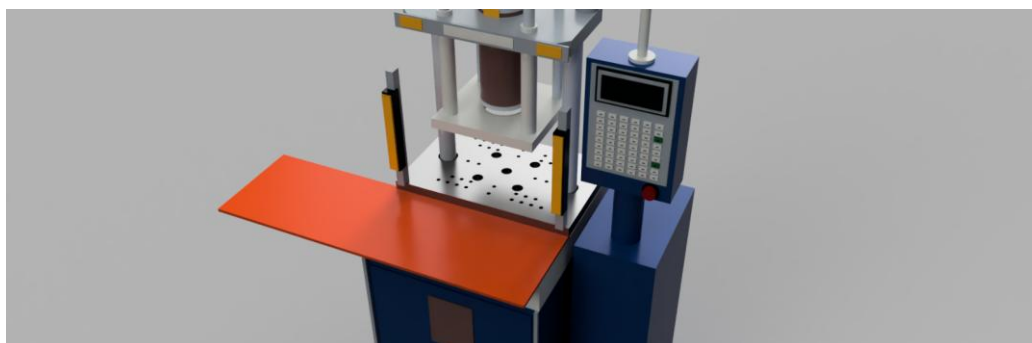
Variable	Soporte inferior	Cuerpo superior e insertos
Material	PLA	ASA
Equipo identificado	Bambu Lab A1	Bambu Lab P1S
Tiempo del laminador	11 h 12 min	9 h 46 min
Masa del laminador	386,29 g	298,62 g
Documentación	Captura de laminado (Anexo A)	Captura y perfil digital (Anexo A)

Fuente: elaboración propia, a partir de las capturas del laminador del 9 de octubre de 2026

3.3 DIMENSIONAMIENTO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MOLDE

El dimensionamiento del molde se establece a partir de dos condiciones principales: el espacio disponible en la inyectora y las cargas generadas durante el proceso de inyección. Estos antecedentes permiten definir las dimensiones generales del conjunto, comprobar su compatibilidad con la máquina y establecer los criterios básicos para el dimensionamiento de los elementos metálicos de apoyo y las fijaciones. El modelo CAD referencial de la inyectora y su zona de trabajo se muestra en la Figura 3-2.

Figura 3-2. Modelo CAD referencial de la inyectora y zona de trabajo.



Fuente: modelo CAD referencial utilizado en el proyecto.

3.3.1 Restricciones dimensionales

El dimensionamiento utilizó el levantamiento de la zona de trabajo y las comprobaciones físicas de montaje. Los valores nominales de la Tabla 3-1 se conservaron como antecedentes referenciales. La instalación permitió comprobar la compatibilidad inicial del conjunto con el espacio disponible.

El ancho del conjunto, su altura cerrada y la apertura necesaria para retirar la pieza se relacionaron con el espacio entre columnas y el recorrido disponible. La evaluación de compatibilidad se realizó mediante el montaje del prototipo.

La posición de la boquilla y los puntos de fijación de los platos determinaron la ubicación de la entrada y del anclaje. Las dificultades de posicionamiento se resolvieron ampliando las aberturas para permitir el desplazamiento antes del apriete, como se describe en el apartado 3.6.

3.3.2 Fuerza de separación del molde

Durante la inyección, la presión ejercida por el polímero sobre la cavidad genera una fuerza que tiende a separar ambas mitades del molde. Determinar esta fuerza es necesario para conocer la principal sollicitación que deberá resistir el conjunto, comprobar que la capacidad de cierre de la inyectora sea suficiente y establecer las cargas utilizadas posteriormente en el dimensionamiento de los componentes estructurales (Kazmer, 2022).

A partir del levantamiento de información del diseño CAD se identificaron la cavidad, la alimentación y las superficies relevantes para determinar el área proyectada. Al considerar una presión representativa en la cavidad, la fuerza de separación se expresa mediante la Ecuación 3-1.

Ecuación 3-1

$$F_s = P_c \cdot A_p$$

Donde:

F_s es la fuerza de separación (N), P_c es la presión efectiva media en la cavidad (MPa) y A_p es el área proyectada sometida a presión (mm²). Como 1 MPa = 1 N/mm², el producto entrega una fuerza en N. Para la rueda dentada, A_p debe obtenerse de la proyección del CAD,

considerando la cavidad y la alimentación; la perforación central solo se descuenta si el núcleo impide que el fundido ejerza presión sobre esa superficie.

La fuerza de separación se formula en función del área proyectada de la cavidad y de su presión efectiva. La evaluación no incluyó una medición de presión en la cavidad; por ello, no se asigna un valor numérico a la fuerza. La indicación del controlador no se equipara directamente a P_c (Autodesk, 2019).

Una vez conocida la fuerza de separación, se debe comprobar que la fuerza de cierre de operación sea suficiente para mantener ambas mitades unidas. Esta condición se expresa mediante la Ecuación 3-2

Ecuación 3-2

$$F_{c,op} \geq F_s \cdot FS$$

Donde: $F_{c,op}$ es la fuerza de cierre aplicada durante la operación (N), F_s es la fuerza de separación (N) y FS es el factor de seguridad, adimensional, que debe justificarse para el caso.

La desigualdad comprueba el cierre frente a la apertura; no verifica por sí misma que el PLA, el ASA, los apoyos y las fijaciones resistan las cargas. La referencia nominal de 147 kN de la Tabla 3-1 no se utiliza como fuerza real del ensayo.

3.3.3 Transmisión de cargas en el conjunto

La configuración fabricada incorpora cuerpos poliméricos, insertos intercambiables y ocho apoyos de eje de acero cromado, cuatro por mitad, de Ø8 mm y 58 mm de longitud individual. Los cuerpos se fijan directamente a los platos de la inyectora con ocho pernos y ocho arandelas, sin placas metálicas adicionales.

La trayectoria de cargas relaciona los platos de la inyectora, las superficies de contacto, los cuerpos poliméricos, los insertos y los apoyos metálicos. La participación de cada componente depende del contacto efectivo, la precarga, las cotas y la rigidez. No se

midió ese reparto; por ello no se supone que toda la fuerza se transmite exclusivamente por los apoyos ni que estos descargan por completo los cuerpos impresos.

Los cuerpos impresos cumplen principalmente funciones de alojamiento, posicionamiento y soporte del inserto, aunque también participan en la respuesta estructural debido al contacto existente entre los diferentes componentes.

El contacto, la rigidez y las tolerancias determinan el reparto de carga entre los componentes. La disposición de los apoyos alrededor de la cavidad busca distribuir el contacto del conjunto; su contribución individual no se cuantificó en este trabajo.

3.3.4 Verificación de los elementos metálicos de apoyo

La comprobación de los elementos metálicos se plantea frente a esfuerzos de compresión, a partir de su sección transversal y de la carga que recibe cada apoyo.

El esfuerzo medio de compresión del apoyo se obtiene mediante la Ecuación 3-3:

Ecuación 3-3

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

Donde: σ_c es el esfuerzo medio de compresión (MPa), F es la fuerza que recibe el apoyo analizado (N) y A es su sección transversal efectiva (mm^2). No se puede calcular F dividiendo automáticamente la carga total entre el número de apoyos: el reparto depende del contacto, la rigidez y las tolerancias. La comparación con un esfuerzo admisible requiere identificar el metal y el criterio de diseño.

Para un apoyo circular macizo de diámetro nominal 8 mm, $A = \pi d^2/4 = \pi \times 8^2/4 = 50,27 \text{ mm}^2$. Así, $\sigma_c = F/50,27$ en MPa si F se expresa en N. La evaluación no incluyó la medición de carga por apoyo ni la caracterización mecánica del acero, por lo que esta relación se conserva como método de cálculo y no como resultado de resistencia.

Los ocho apoyos se distribuyen en cuatro por mitad, con longitud individual de 58 mm. La verificación debe considerar compresión, contacto en los extremos y estabilidad según la longitud libre y las restricciones efectivas. Sin propiedades del acero y condiciones de apoyo verificadas no se descarta el pandeo ni se acredita la resistencia.

El material procede de una barra comercial de eje de acero cromado $\text{Ø}8 \times 550 \text{ mm}$, SKU PU00412. La longitud teórica utilizada es $8 \times 58 = 464 \text{ mm}$ y el sobrante teórico es 550

– 464 = 86 mm, antes de descontar pérdidas de corte. El cálculo de longitud considera la dimensión nominal de los apoyos y no incluye la pérdida de material del corte.

Las superficies de asiento de los apoyos y las arandelas distribuyen el contacto sobre los componentes impresos. Su evaluación en este trabajo se limitó al montaje y a la inspección visual de marcas, deformaciones y daños.

3.3.5 Estado del dimensionamiento

Las pruebas de montaje respaldan la compatibilidad geométrica inicial del prototipo. Las Ecuaciones 3-1 a 3-3 definen el procedimiento de comprobación estructural. La evaluación realizada no determina la capacidad resistente bajo una presión de cavidad medida.

3.4 MODELADO CAD Y DISEÑO DEL CONJUNTO

El modelo CAD organiza dos mitades montadas sobre el eje de cierre de la inyectora. La mitad inferior se materializó con un soporte de PLA; la mitad superior y las dos piezas del inserto se fabricaron en ASA. La configuración final utiliza ocho apoyos de acero cromado y fijación directa con ocho pernos y ocho arandelas. Las vistas CAD son antecedentes de diseño y no acreditan por sí solas todas las modificaciones del montaje. La geometría y los materiales empleados en cualquier cálculo deben corresponder a esta revisión física. La disposición general del conjunto se muestra en la Figura 3-3.

Figura 3-3. Vista general del conjunto de moldeo.



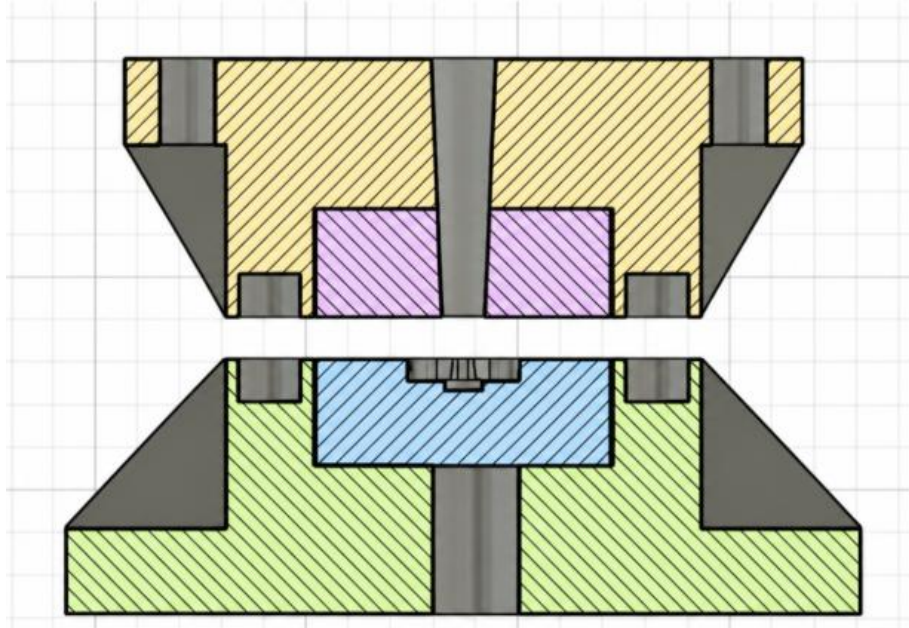
Fuente: elaboración propia

Las dos mitades del inserto definen, al cerrar, la cavidad de la pieza tipo engranaje. Esta organización permite sustituir el inserto y conservar los cuerpos principales.

3.4.1 Alojamiento de los insertos y superficies de cierre

Cada inserto se aloja respecto del eje de inyección y del plano de partición. La cara de cierre se extendió para disponer de una superficie continua de contacto. El diseño considera el asiento de ambas mitades, la continuidad de la cavidad y el acceso para el recambio. La Figura 3-4 muestra el corte de ambas mitades y el alojamiento de los insertos.

Figura 3-4. Corte de las mitades del molde y alojamiento de los insertos.



Fuente: elaboración propia

3.4.2 Apoyos y elementos de alineación

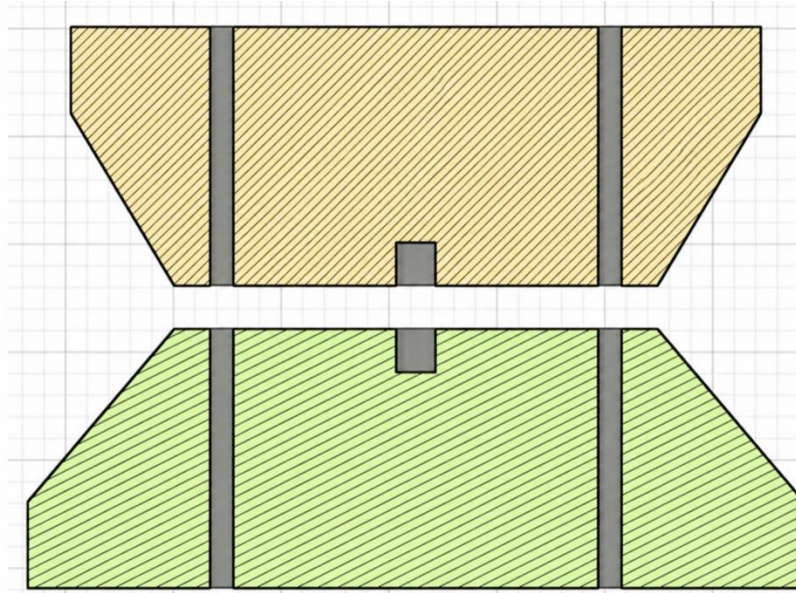
Se distribuyen cuatro apoyos de eje de acero cromado por mitad, ocho en total, de $\varnothing 8 \times 58$ mm. Su contribución a la transmisión de carga depende del contacto efectivo; no se asigna una fuerza igual a cada apoyo. Los cuerpos se fijan directamente a los platos mediante ocho pernos y ocho arandelas. Los alineadores identificados como PLA en el registro de fabricación guían el cierre y deben permitir el montaje sin bloquearlo.

3.4.3 Relaciones de ensamblaje

Cada inserto se fija respecto de su cuerpo, mientras que las dos mitades del molde se relacionan mediante el movimiento de apertura y cierre de la inyectora. Los alineadores y sus

alojamientos guían la coincidencia de las mitades. Las posiciones cerrada y abierta del modelo se muestran en la Figura 3-5.

Figura 3-5. Secciones del conjunto en posiciones cerrada y abierta.



Fuente: elaboración propia

Estas relaciones de ensamblaje describen la posición y el movimiento del conjunto. El estudio de esfuerzos se presenta por separado en el Anexo E.

3.4.4 Diseño de la cavidad y ajuste de los insertos

El modelo registra alojamientos nominales de 70×70 mm y 30 mm de profundidad por mitad. El ajuste de los insertos se comprobó mediante su montaje, extracción y recambio. No se cuantificó la holgura dimensional del conjunto físico.

El sistema de alimentación se relaciona con el plano de partición, el núcleo central y los conductos laterales. La Figura 3-6 muestra la cavidad y los elementos de alineación del prototipo.

Figura 3-6. Cavidad y elementos de alineación del prototipo físico.



Fuente: elaboración propia

Las superficies de ajuste y las comprobaciones dimensionales previstas se resumen en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Superficies de ajuste y comprobaciones dimensionales.

Interfaz	Función	Comprobación prevista
Inserto–alojamiento	Posicionar y permitir el recambio.	Dimensiones reales, apoyo y posibilidad de extracción.
Caras de cierre	Conservar la continuidad de la cavidad.	Contacto, separación y rebaba posterior.
Alineador–alojamiento	Guiar la coincidencia de las mitades.	Entrada libre, juego y ausencia de bloqueo.
Perno–apertura de ajuste	Permitir el posicionamiento previo al apriete.	Recorrido, apoyo de arandelas e interferencias.

Fuente: elaboración propia

3.5 VERIFICACIONES GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS

3.5.1 Análisis de desmoldeo

El análisis de desmoldeo considera la dirección de extracción, las paredes de la cavidad, el núcleo central y las posibles contrasalidas. El ángulo de desmoldeo introduce una inclinación en las paredes paralelas a la extracción, lo que reduce el contacto y el rozamiento al retirar la pieza. Para el rediseño se propone un ángulo de 5° como aproximación inicial;

este valor no corresponde a una medición del inserto ensayado y debe ajustarse a la geometría y al acabado superficial (Kazmer, 2022).

3.5.2 Simulación mecánica

El Anexo E presenta un estudio estático preliminar realizado en Autodesk Fusion con una fuerza de 1,67 N. Sus mapas describen el comportamiento del modelo configurado. La carga y los materiales del archivo no representan las condiciones reales de inyección del conjunto PLA–ASA; por ello, el estudio se utiliza como antecedente del procedimiento de análisis y no como validación resistente.

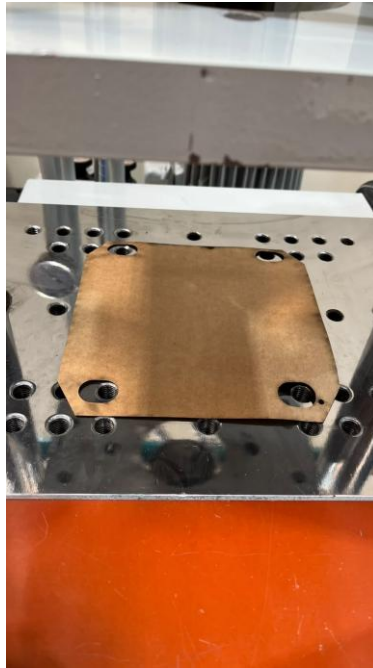
3.6 FABRICACIÓN, PRUEBAS DE MONTAJE E ITERACIONES

El prototipado permitió contrastar el diseño con las condiciones de la inyectora. La secuencia incluyó pruebas de anclaje, montaje del conjunto, identificación de dificultades de alineación y modificación de las fijaciones. Estas actividades se documentan como parte del desarrollo, antes de la evaluación de inyección del conjunto final PLA–ASA.

3.6.1 Plantillas de comprobación del anclaje

Se utilizaron plantillas para revisar la correspondencia entre las posiciones modeladas y los puntos de fijación disponibles. La Figura 3-7 muestra una plantilla presentada sobre el plato antes de fijar el molde. La fotografía documenta la disposición utilizada en la comprobación de anclaje.

Figura 3-7. Plantillas de comprobación de los puntos de anclaje.



Fuente: elaboración propia

3.6.2 Montaje del primer prototipo

Se realizó un montaje inicial de las mitades impresas para comprobar su fijación y correspondencia dentro de la inyectora. Al utilizar las perforaciones de anclaje, la posición obtenida no permitió alinear directamente ambas mitades. Esta observación identifica una dificultad de posicionamiento del montaje y no demuestra, por sí sola, una desalineación mecánica de los platos. La Figura 3-8 documenta las mitades instaladas y las fijaciones superiores; el Anexo B incorpora una vista complementaria del conjunto abierto.

Figura 3-8. Montaje del prototipo y detalle de las fijaciones superiores.



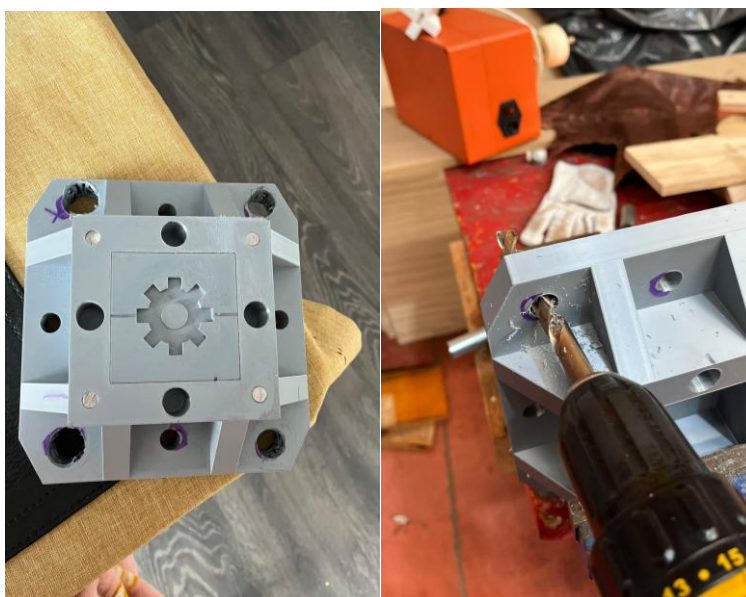
Fuente: elaboración propia

Como parte del desarrollo previo a la configuración PLA–ASA, se preparó y probó una versión del molde fabricada íntegramente en PLA. Las fotografías anteriores a esa prueba muestran los componentes separados, la cavidad de la rueda dentada, el montaje en la inyectora y el contacto de la boquilla con la entrada. En la prueba, se observó reblandecimiento y fusión localizada de la entrada de la mitad superior de PLA en la zona de contacto con la boquilla. El ingreso de PP hacia la cavidad quedó obstaculizado y no se obtuvo una pieza completa (Figuras D-6 a D-8).

3.6.3 Modificación manual de las perforaciones

Para completar el montaje fue necesario ampliar algunas perforaciones con una broca. Las aberturas ampliadas permitieron desplazar las mitades hasta hacer coincidir sus cavidades antes del apriete. Las arandelas distribuyeron el apoyo de las cabezas de los pernos sobre las aberturas, permitiendo fijar la posición ajustada. Esta intervención resolvió la dificultad de posicionamiento observada, aunque no proporciona una medición de paralelismo entre los platos. Las perforaciones intervenidas se muestran en la Figura 3-9.

Figura 3-9. Perforaciones ampliadas durante el ajuste del primer prototipo.

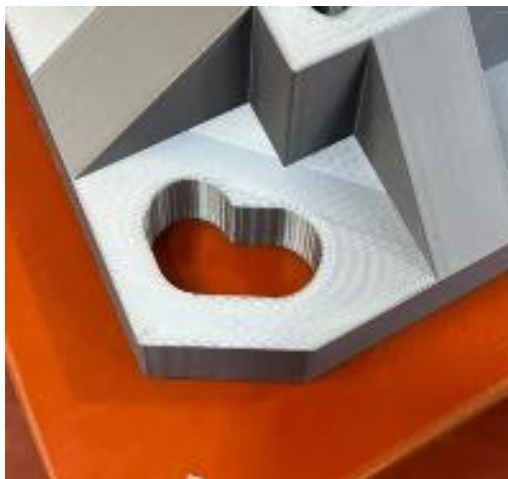


Fuente: elaboración propia

3.6.4 Revisión del diseño de fijación

La ampliación manual permitió posicionar las mitades, pero dejó el ajuste dependiente de la intervención sobre cada pieza. Por ello se propone una abertura regulable con asiento para la arandela, que permita desplazar el perno antes del apriete sin interferir con las nervaduras. Su comprobación debe verificar recorrido suficiente, apoyo de la arandela y conservación de la posición después de aperturas y cierres. La Figura 3-10 muestra esta modificación derivada del problema de montaje observado.

Figura 3-10. Propuesta de modificación de una abertura de fijación.



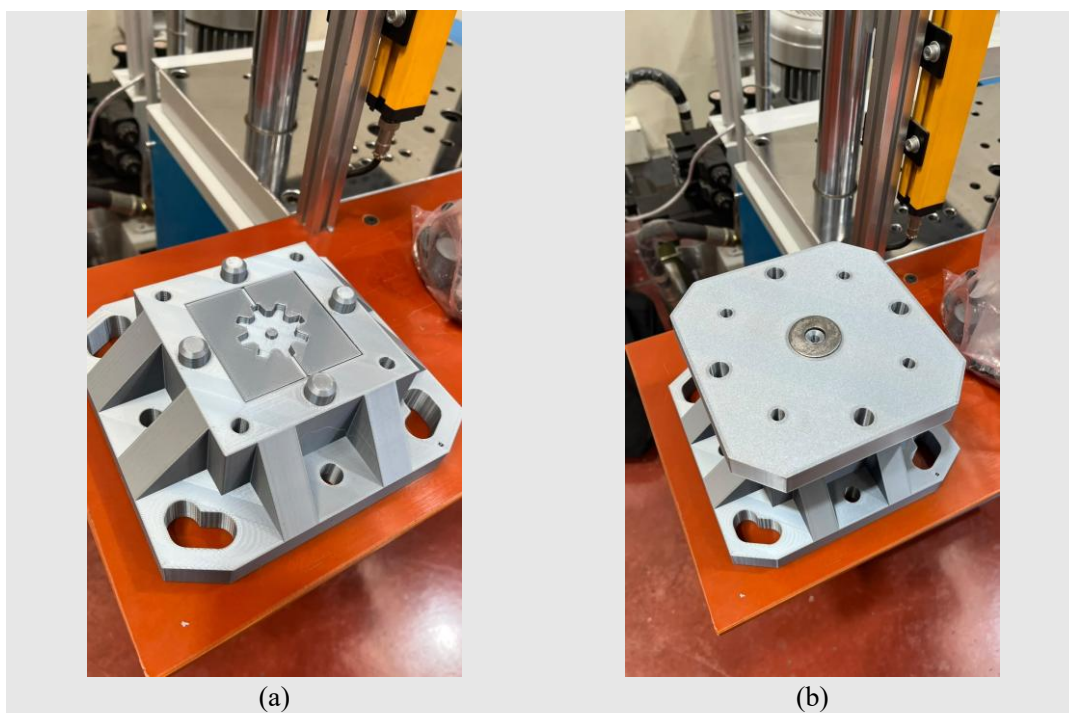
Fuente: elaboración propia

3.6.5 Fabricación de la versión actualizada

El conjunto consta de un soporte inferior de PLA, un cuerpo superior de ASA e insertos intercambiables. La primera configuración del conjunto híbrido empleó insertos de ASA; posteriormente se sustituyeron por insertos de PLA, conservando los cuerpos principales, como se describe en la sección 4.1.4. La fijación final se realizó directamente a los platos de la máquina con ocho pernos y ocho arandelas, junto con ocho apoyos de acero cromado $\varnothing 8 \times 58$ mm, cuatro por mitad.

La preparación previa a la inyección incluyó la comprobación del encaje, la revisión de los conductos y la aplicación de desmoldante. El montaje y el cierre permitieron realizar las pruebas descritas en el Capítulo 4. Los componentes de una iteración de la versión actualizada se muestran en la Figura 3-11.

Figura 3-11. Componentes de la versión actualizada del prototipo.



Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO 4: COSTOS DE LA PROPUESTA Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

4. Este capítulo integra la evaluación experimental del conjunto y su análisis económico. Primero se presentan el montaje, las pruebas de inyección de PP, el desmoldeo y el recambio de insertos. Luego se desarrolla un presupuesto de fabricación que distingue el conjunto reutilizable del costo de cada recambio.

4.1 EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

La evaluación comprende el montaje, la inyección de PP, el desmoldeo y el recambio de insertos. Se presentan primero los seis ajustes iniciales y las pruebas adicionales; luego se analizan la apariencia de las piezas, el estado del molde y el alcance de los resultados.

4.1.1 Propósito y alcance de la evaluación

La evaluación examinó llenado, extracción, cierre, estado visible e intercambiabilidad. Se emplean recuentos de pruebas y piezas, tiempos de enfriamiento y cuerpos conservados. La Tabla 4-1 presenta las métricas por configuración; su alcance no incluye precisión dimensional ni operación continua.

Tabla 4-1. Configuraciones del desarrollo y estado de evaluación.

Configuración	Materiales y cavidad	Registro numérico y alcance
Prototipo previo	Molde íntegro de PLA; rueda dentada	Piezas completas obtenidas: 0 en la prueba descrita. Daño en la entrada.
Conjunto híbrido ensayado	Soporte inferior de PLA; cuerpo superior e insertos de ASA; rueda dentada	Ajustes: 6; piezas adicionales: 15. Enfriamiento: ≈ 2 a 10 min; un tiempo sin registro.
Configuración posterior ensayada	Mismos cuerpos; insertos de PLA, cuadrado con polígono hexagonal interior	Pruebas: aproximadamente 6; enfriamiento: 10 min. Recambio ASA–PLA: 1, con obtención de piezas.

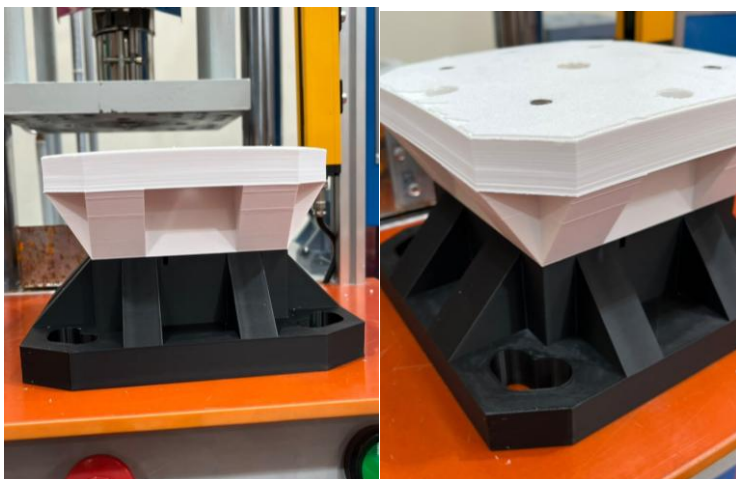
Fuente: elaboración propia

La modularidad se cuantifica con 2 cavidades, 1 recambio de ASA a PLA y 2 de 2 cuerpos conservados: $\text{reutilización} = (2/2) \times 100 = 100 \%$. El indicador describe el recambio de la sección 4.1.4, sin acreditar vida útil. No se calcula una tasa de piezas aceptadas por falta de criterios dimensionales; material y geometría cambiaron conjuntamente.

4.1.2 Montaje y preparación del conjunto

Antes del calentamiento se realizó una comprobación de montaje y encaje. Se prepararon los soportes, se revisaron los conductos y las dos salidas laterales de ventilación y se aplicó desmoldante a los insertos antes del cierre. El conjunto pudo montarse y cerrarse para efectuar la inyección. Esta observación acredita compatibilidad funcional inicial; no equivale a una medición de alineación, paralelismo o fuerza de cierre. El montaje del conjunto híbrido se muestra en la Figura 4-1.

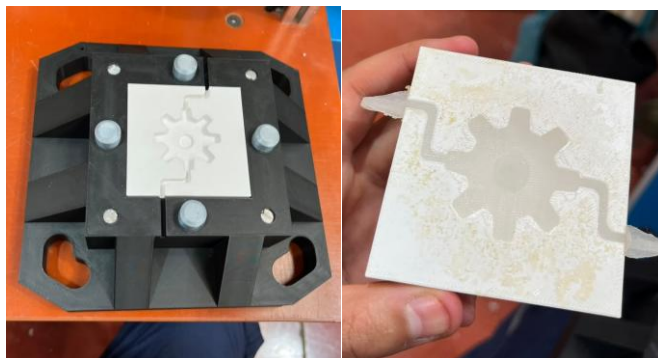
Figura 4-1. Montaje del conjunto híbrido en la inyectora.



Fuente: elaboración propia

El alojamiento del inserto y la cavidad de ensayo se muestran en la Figura 4-2.

Figura 4-2. Alojamiento del inserto y cavidad de ensayo



Fuente: elaboración propia

4.1.3 Material y condiciones de inyección

La Tabla 4-2 reúne las condiciones registradas y el alcance de los ensayos de inyección.

Tabla 4-2. Condiciones de los ensayos de inyección.

Variable	Registro disponible	Alcance
Polímero inyectado	Polipropileno (PP), en pellets	Polímero utilizado en la serie de ensayos de inyección.
Conjunto	PLA inferior; ASA superior; insertos ASA y luego PLA	Los cuerpos se conservaron al cambiar material y figura del inserto.
Temperatura seleccionada	180 °C	Consigna del equipo; no equivale a temperatura medida en la cavidad.
Tiempo de carga	Aproximadamente 1,6 s	Tiempo informado; no determina por sí solo la masa dosificada.
Tiempo de inyección	Aproximadamente 1,3 s	Tiempo de la etapa de ASA; sin registro individual por ciclo.
Enfriamiento	Ajuste inicial: 2–10 min; un tiempo sin registro	Ensayos posteriores: 10 min antes de abrir, también con PLA.
Cantidad de ensayos	6 ajustes + 15 piezas adicionales de ASA + aproximadamente 6 pruebas de PLA	Recuento separado por etapa.
Presión y velocidad	Sin registro	No se infieren a partir de tiempos o apariencia.
Temperatura de pieza e insertos	Sin medición registrada	La consigna del equipo no representa estas temperaturas.
Masa y dimensiones	Carga completa de PP: aproximadamente 34–35 g.	Pesaje de carga completa, no de pieza ni de disparo.

Fuente: elaboración propia

La temperatura de 180 °C corresponde a la consigna del equipo. Los tiempos de carga e inyección registrados para la etapa de ASA son aproximadamente 1,6 s y 1,3 s. En las pruebas posteriores con insertos de PLA se utilizaron 10 min de enfriamiento.

4.1.4 Secuencia de ajustes y pruebas adicionales

La secuencia inicial comprendió seis intentos. Se emplearon tiempos de enfriamiento de aproximadamente 2, 4 y 6 min y, posteriormente, 8 y 10 min. El registro no identifica el tiempo del segundo intento. La Tabla 4-3 relaciona la secuencia con las observaciones de extracción.

Tabla 4-3. Secuencia retrospectiva de los seis ajustes iniciales.

Intento	Enfriamiento	Resultado observado
1	Aprox. 2 min	La parte superior se adhirió durante la apertura y perdió forma; la inferior se describió mejor conservada.
2	No registrado	Mejoría cualitativa respecto del intento anterior.
3	Aprox. 4 min	Continuó la mejoría cualitativa respecto de los primeros intentos.
4	Aprox. 6 min	Mejoría progresiva de la apariencia y la extracción.
5	8 min	Extracción y conservación de forma favorables.
6	10 min	Extracción favorable y pieza con forma conservada.

Fuente: elaboración propia

La conservación de la forma y la extracción mejoraron durante los ajustes iniciales. A continuación se describen las quince piezas adicionales con ASA y las aproximadamente seis pruebas con PLA. La Figura 4-3 muestra ejemplares obtenidos durante los ensayos.

Figura 4-3. Ejemplares obtenidos durante los ensayos.



Fuente: elaboración propia

Se reconoce el contorno de la rueda y material en las prolongaciones laterales. Estas vistas no permiten certificar espesor, diámetro, perforación central o tolerancias.

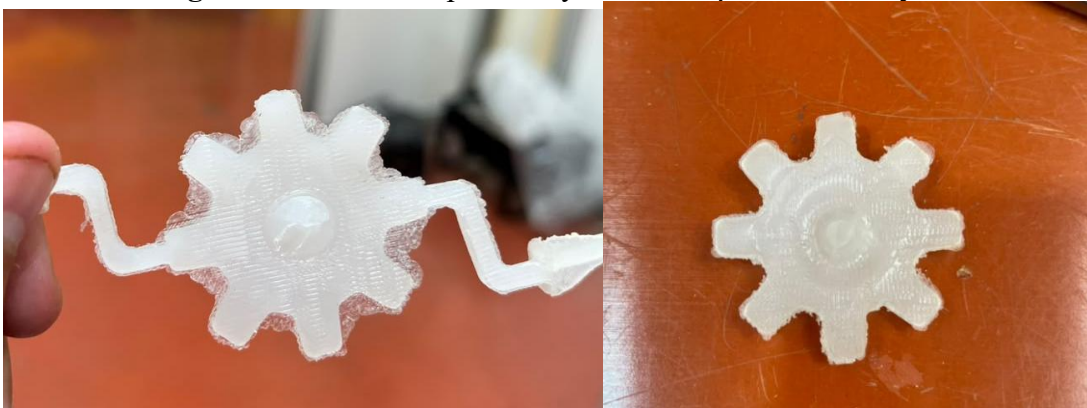
Después de los seis intentos iniciales se obtuvieron quince piezas adicionales del engranaje con insertos de ASA. El enfriamiento de 10 min favoreció el desmoldeo y la extracción del material de los canales. Luego se sustituyeron los insertos por otros de PLA, con una figura cuadrada y un polígono hexagonal interior, conservando el cuerpo superior de ASA y el soporte inferior de PLA. Se realizaron aproximadamente seis pruebas con 10 min de enfriamiento y se obtuvieron piezas con esta configuración.

El recambio respalda la modularidad, no la superioridad de ASA o PLA: cambiaron material y cavidad a la vez. Para compararlos se requiere igual geometría y condiciones. Las fotografías corresponden a la rueda dentada; la segunda configuración se documenta de forma descriptiva.

4.1.5 Apariencia y desmoldeo de las piezas

Las imágenes del engranaje muestran reproducción del contorno, material en las prolongaciones laterales, marcas superficiales y rebaba en algunas piezas. La conservación de forma mejoró al prolongar la espera. En las pruebas posteriores, los 10 min también facilitaron retirar el material restante de los canales. La adherencia y la deformación del primer intento no permiten distinguir por sí solas un llenado incompleto de una pérdida de forma al extraer. El espesor de rebaba y el acabado no se cuantificaron. La Figura 4-4 presenta detalles de las superficies y de la rebaba observada.

Figura 4-4. Detalle superficial y rebaba en piezas de ensayo.



Fuente: elaboración propia

4.1.6 Estado del molde y zona de entrada

La inspección visual del molde y sus componentes se resume en la Tabla 4-4.

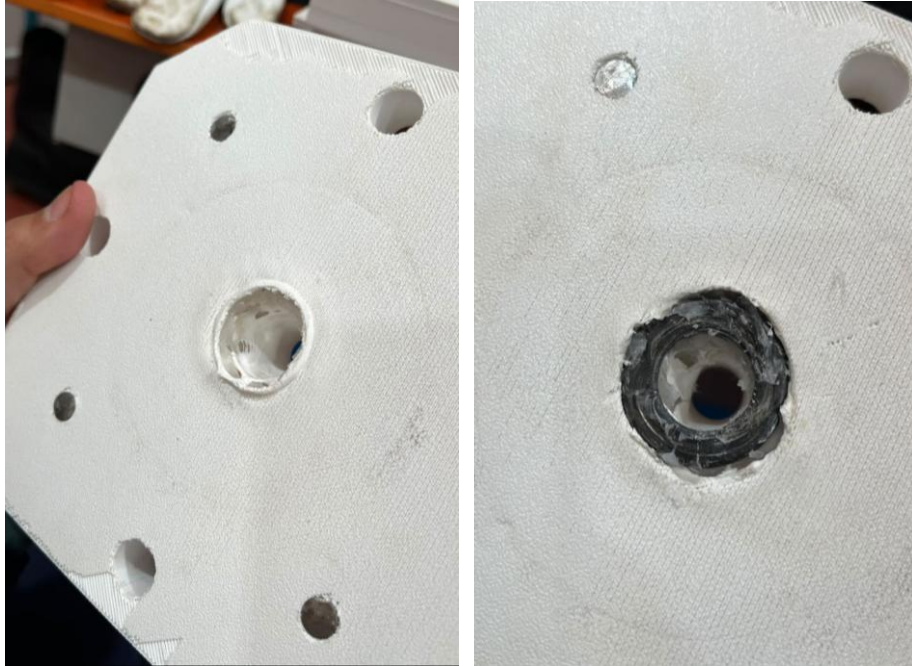
Tabla 4-4. Inspección visual de los componentes.

Componente	Observación disponible	Interpretación y límite
Soporte inferior de PLA	Sin daño visible en la zona inferior inspeccionada.	No demuestra ausencia de deformación dimensional ni aislamiento térmico.
Cuerpo superior de ASA	Reblandecimiento y fusión localizada en la entrada durante las pruebas.	Daño localizado observado visualmente.
Insertos superior e inferior de ASA	Sin daño visible después de los ensayos.	Inspección visual de las superficies.
Elemento añadido a la entrada	Denominado «bolilla»; no evitó que la punta siguiera deteriorándose.	Geometría, material y ciclo de incorporación no identificados con precisión; eficacia insuficiente según observación.
Ventilaciones laterales	Se observaron conductos laterales con material conformado.	Las fotos muestran material en conductos laterales; no permiten certificar el venteo ni vincularlo a un ciclo.
Insertos posteriores de PLA	Permitieron aproximadamente seis pruebas con piezas satisfactorias a 10 min.	No se cuenta con mediciones de desgaste o variación dimensional.

Fuente: elaboración propia

El deterioro localizado de la entrada superior se muestra en la Figura 4-5.

Figura 4-5. Estado localizado de la entrada superior.



Fuente: elaboración propia

4.1.7 Alcance dimensional y balance de material

La carga completa de PP pesada con balanza fue de aproximadamente 34–35 g. Este valor corresponde a la carga preparada y no a la masa neta de una pieza o de un disparo. La evaluación dimensional requiere identificar las cotas funcionales y su método de medición; ISO 20457:2026 proporciona un marco para establecer tolerancias de piezas plásticas (ISO, 2026).

Para el balance de material se distinguen pieza, canales, rebaba y purgas. La evaluación desarrollada se concentra en la reproducción visual de la geometría y el desmoldeo; no incluye un balance de masa por ciclo ni una medición de contracción.

4.1.8 Interpretación de los resultados

En los seis ajustes iniciales, el enfriamiento pasó de aproximadamente 2 a 10 min: incremento ≈ 8 min. La Tabla 4-3 registra extracción favorable a 8 y 10 min; ambos tiempos son referencias observadas, sin demostrar un óptimo ni una mejora porcentual de calidad. El segundo ajuste no tiene tiempo registrado y los ensayos no constituyen repeticiones equivalentes. El aumento de 8 min cuantifica el cambio de operación, mientras el desmoldeo se evaluó cualitativamente. No se asigna una tasa de éxito. La mayor rigidez al extraer es una explicación posible. Moritz et al. (2022) respaldan la importancia de disipar calor en resinas procesadas por estereolitografía; sus propiedades y duración no se transfieren al ASA y PLA fabricados por FFF.

La Tabla 4-5 vincula las observaciones con indicadores y resultados numéricos disponibles. «No medido» identifica la ausencia de datos y no equivale a un valor cero.

Tabla 4-5. Observaciones y explicaciones que deben contrastarse.

Observación	Indicador y resultado registrado	Interpretación y comprobación
Adherencia y pérdida de forma	Enfriamiento del intento 1: ≈ 2 min.	Describe la condición del defecto; faltan temperatura y deformación al abrir.
Extracción favorable	Intentos 5 y 6: 8 y 10 min; diferencia: 2 min.	No establece un tiempo óptimo. Repetir con igual cavidad y criterio de aceptación.
Rebaba visible	Espesor de rebaba (mm): no medido.	Posible separación, ajuste, presión o deformación. Medir espesor y comprobar cierre.
Daño en la entrada	Cambio dimensional (mm) y temperatura local ($^{\circ}\text{C}$): no medidos.	Posible efecto del calor y la carga local. Evaluar casquillo y apoyo con mediciones por serie.
Recambio funcional	1 recambio; 2 cavidades; 2 de 2 cuerpos conservados (100 %).	Cuantifica reutilización de cuerpos. No expresa porcentaje de piezas aceptadas.

Fuente: elaboración propia

Las 15 piezas adicionales con ASA, las aproximadamente 6 pruebas con PLA y el recambio con 2 cuerpos conservados cuantifican la obtención de piezas y la reutilización. No determinan conformidad dimensional ni vida útil máxima. Se prioriza la entrada por su deterioro en PLA y ASA; después, el cierre y la rebaba y, finalmente, el enfriamiento. Así se relacionan los resultados con las mejoras propuestas. El cálculo preliminar de 1,67 N del Anexo E no acredita la resistencia del conjunto.

4.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA

La intercambiabilidad observada permite separar los cuerpos y apoyos que se conservan de los insertos que se reemplazan. Se comparan dos escenarios para el conjunto con su primer par de ASA: acceso gratuito a las impresoras del laboratorio DIMA y acceso pagado con una tarifa de referencia. Los importes son estimaciones presupuestarias, no gastos acreditados mediante comprobantes.

4.2.1 Alcance y bases del presupuesto

Las masas y tiempos de impresión provienen del laminador. Los precios de los productos corresponden a los valores registrados para el proyecto: barra de acero cromado, 5.990 CLP; ocho pernos de 900 CLP cada uno; y ocho arandelas de 200 CLP cada una. Para completar la estimación se adopta 1 h de corte y preparación de los apoyos, 20 h de diseño y adaptación CAD y 2 h de preparación y montaje, a 6.000 CLP/h. Estas horas son supuestos presupuestarios y no tiempos medidos.

El escenario A considera acceso gratuito a las impresoras A1 y P1S. El escenario B incorpora una tarifa supuesta de 1.000 CLP/h por uso de equipo, que agrupa electricidad, mantenimiento y depreciación. Ambos mantienen los mismos materiales y horas de trabajo. El presupuesto se limita al desarrollo y fabricación del conjunto y no incluye ensayos de inyección, transporte ni reparaciones posteriores. Los precios se utilizan tal como fueron registrados, sin añadir recargos tributarios.

4.2.2 Material y tiempo de impresión

La Tabla 4-6 presenta las entradas registradas por el laminador. La masa total es de 684,91 g y el tiempo es de 20 h 58 min; la masa de ASA incluye 15,34 g de soportes, que también consumen material.

Tabla 4-6. Material y tiempo calculados por el laminador.

Trabajo	Material	Masa del laminador (g)	Tiempo del laminador	Cantidad
Soporte inferior	PLA	386,29	11 h 12 min	1 trabajo
Cuerpo superior e insertos	ASA	298,62	9 h 46 min	1 trabajo
Total de los dos trabajos	PLA + ASA	684,91	20 h 58 min	2 trabajos

Fuente: elaboración propia, a partir de las capturas del laminador del 9 de octubre de 2026.

Para calcular el costo de impresión se convierten los minutos a horas: 11 h 12 min = $11 + 12/60 = 11,2$ h; 9 h 46 min = $9 + 46/60 = 9,7667$ h. La suma es 20,9667 h; los cálculos se realizan con el valor no redondeado de $20 + 58/60$ h.

4.2.3 Componentes metálicos y parámetros económicos

La Tabla 4-7 reúne los componentes metálicos y las fijaciones: ocho apoyos de acero cromado $\varnothing 8 \times 58$ mm obtenidos de una barra $\varnothing 8 \times 550$ mm, ocho pernos y ocho arandelas. El costo de los productos es 14.790 CLP. Se agrega una estimación de 6.000 CLP para el corte y preparación de los apoyos, incluida en el presupuesto de la Tabla 4-9.

Tabla 4-7. Presupuesto de componentes metálicos y fijaciones.

Elemento	Cantidad	Valor unitario (CLP)	Subtotal / criterio
Eje de acero cromado $\varnothing 8 \times 550$ mm; SKU PU00412	1 barra	5.990,00	5.990,00; adquisición completa
Pernos de anclaje	8 unidades	900,00	7.200,00
Arandelas	8 unidades	200,00	1.600,00
Subtotal de productos	8 apoyos de 58 mm, 8 pernos y 8 arandelas	—	14.790,00; corte valorizado por separado

Fuente: elaboración propia a partir de los precios reales registrados para los productos del proyecto.

Tabla 4-8. Parámetros del presupuesto de fabricación y recambio.

Parámetro	Valor	Procedencia o criterio
PLA / ASA	9.690 / 17.990 CLP/kg	Referencias comerciales existentes; consumo estimado
Valor de 1 UF	41.178,64 CLP	SII, 18 de octubre de 2026; valor de referencia
Uso de impresoras A	0 CLP/h	Acceso gratuito para la estudiante
Uso de impresoras B	1.000 CLP/h	Supuesto; no es tarifa oficial de DIMA
Preparación y montaje inicial	2 h × 6.000 CLP/h	Estimación de trabajo para preparación y montaje
Diseño e ingeniería	20 h × 6.000 CLP/h	Supuesto de diseño y adaptación CAD del conjunto inicial
Corte y mecanizado del eje	1 h × 6.000 CLP/h	Supuesto de corte y preparación de los ocho apoyos
Masa por par de recambio	0,060 kg	Supuesto no medido; incluye soportes
Impresión del recambio	2 h	Supuesto no medido
Preparación del recambio	0,5 h × 6.000 CLP/h	Estimación de preparación de un par de insertos
Reserva	10 % del subtotal valorizado	Criterio presupuestario, no gasto real

Fuente: elaboración propia; precios de TodoToner (s. f.-a, s. f.-b), UF del SII (2026) y supuestos presupuestarios indicados.

4.2.4 Desarrollo del costo de fabricación

El material se valoriza por la masa consumida, sin cargar el precio de bobinas completas. El costo del soporte de PLA se obtiene mediante la Ecuación 4-1.

Ecuación 4-1

$$C_{PLA} = m_{PLA} \times p_{PLA}$$

Donde:

C es el costo en CLP, m es la masa en kg y p es el precio en CLP/kg; el subíndice identifica el material. Estas unidades también se utilizan en la Ecuación 4-2.

$$C_{PLA} = 0,38629 \times 9.690 = 3.743,15 \text{ CLP}$$

El cuerpo superior y los insertos de ASA se valoran conjuntamente, porque el registro del laminador agrupa ambos elementos. La Ecuación 4-2 entrega su costo de material.

Ecuación 4-2

$$C_{ASA} = m_{ASA} \times p_{ASA}$$

$$C_{ASA} = 0,29862 \times 17.990 = 5.372,17 \text{ CLP}$$

El subtotal de filamento, calculado sin redondeos intermedios, es $3.743,1501 + 5.372,1748 = 9.115,3249$ CLP, presentado como 9.115,32 CLP. La Ecuación 4-3 incorpora la barra, las fijaciones y el costo estimado de corte y preparación de los apoyos.

Ecuación 4-3

$$C_{metal} = 5.990 + 8 \times p_{perno} + 8 \times p_{parandela} + C_{corte}$$

Donde:

$p_{perno} = 900$ CLP/unidad y $p_{parandela} = 200$ CLP/unidad son los precios reales registrados. $C_{corte} = 6.000$ CLP corresponde a la estimación de 1 h de corte y preparación a 6.000 CLP/h.

$$C_{barra} = 1 \times 5.990 = 5.990,00 \text{ CLP}$$

$$C_{metal} = 14.790 + 6.000 = 20.790,00 \text{ CLP}$$

La Ecuación 4-4 calcula el uso de impresoras. En A, ambas tarifas son 0 CLP/h. En B, la A1 representa $11,2 \times 1.000 = 11.200$ CLP y la P1S, $(9 + 46/60) \times 1.000 = 9.766,67$ CLP. El total es 20.966,67 CLP; la tarifa es un supuesto y no incluye filamento.

$$C_{imp} = t_{imp} \times r_{imp}$$

Donde:

t_{imp} es el tiempo del laminador en h y r_{imp} es 0 CLP/h para A o 1.000 CLP/h para B. Los tiempos no se redondean antes de calcular el costo.

$$C_{imp,A} = 0; C_{imp,B} = (20 + 58/60) \times 1.000 = 20.966,67 \text{ CLP}$$

La Ecuación 4-5 calcula la preparación y el montaje mediante el supuesto de 2 h a 6.000 CLP/h. Comprende limpieza, retiro de soportes, preparación de las piezas impresas y armado. El corte de los apoyos metálicos se valoriza por separado.

$$C_{mont} = t_{mont} \times r_{mont}$$

Donde: t_{mont} es el tiempo de preparación y montaje en h y r_{mont} , su tarifa en CLP/h.

Diseño e ingeniería se estiman por separado: $C_{diseño} = h_{diseño} \times r_{diseño} = 20 \text{ h} \times 6.000 \text{ CLP/h} = 120.000 \text{ CLP}$. Esta partida representa el trabajo inicial de diseño y adaptación CAD; no se vuelve a cargar al fabricar un conjunto idéntico.

$$C_{mont} = 2 \times 6.000 = 12.000,00 \text{ CLP}$$

La Ecuación 4-6 suma filamentos, componentes metálicos y fijaciones, corte, uso de impresoras, preparación, montaje y diseño. Los escenarios utilizan los mismos recursos y difieren únicamente en la tarifa de impresión.

$$C_{val} = C_{PLA} + C_{ASA} + C_{metal} + C_{imp} + C_{mont} + C_{diseño}$$

$$C_{val,A} = 161.905,32 \text{ CLP}$$

$$C_{val,B} = C_{val,A} + C_{imp,B} = 182.871,99 \text{ CLP}$$

Los subtotales incluyen el desarrollo del conjunto, los cuerpos y el primer par de insertos de ASA. La Ecuación 4-7 convierte los costos a UF con el valor de referencia del 18 de octubre de 2026.

$$C_{UF} = C_{CLP} / 41.178,64$$

Donde: C_{UF} es el costo en UF y C_{CLP} es el mismo costo en pesos chilenos. El divisor tiene unidades de CLP/UF.

$$C_{val,A} = 3,9318 \text{ UF}; C_{val,B} = 4,4409 \text{ UF}$$

La Tabla 4-9 compara ambos escenarios con una reserva del 10 %. Los cálculos conservan los decimales internos y presentan los resultados finales con dos decimales en CLP y cuatro en UF. Las horas de trabajo y el costo de uso de equipos se mantienen identificados como estimaciones.

Tabla 4-9. Presupuesto comparativo de desarrollo y fabricación.

Partida	Escenario A: gratuito	Escenario B: pagado
Filamento PLA (CLP)	3.743,15	3.743,15
Filamento ASA (CLP)	5.372,17	5.372,17
Barra de acero cromado (CLP)	5.990,00	5.990,00
Pernos (8 unidades)	7.200,00	7.200,00
Arandelas (8 unidades)	1.600,00	1.600,00
Uso de impresoras (CLP)	0,00	20.966,67
Preparación y montaje (CLP)	12.000,00	12.000,00
Corte y preparación del eje	6.000,00	6.000,00
Diseño e ingeniería	120.000,00	120.000,00
Total directo valorizado (CLP)	161.905,32	182.871,99
Reserva del 10 % (CLP)	16.190,53	18.287,20
Total con reserva (CLP)	178.095,86	201.159,19
Total con reserva (UF)	4,3250	4,8850

Fuente: elaboración propia, con registros del laminador, precios comerciales y supuestos de las Tablas 4-7 y 4-8.

4.2.5 Costo del recambio y del conjunto reutilizable

El recambio se modela como un par de insertos de 60 g, 2 h de impresión y 0,5 h de preparación a 6.000 CLP/h. Son supuestos económicos no verificados como consumos reales individuales. Se mantienen iguales para ASA y PLA. La Ecuación 4-8 separa material, utilización de impresora y preparación; las tarifas de equipo son 0 CLP/h en A y 1.000 CLP/h en B.

Ecuación 4-8

$$C_{rec} = m_{rec} \times p + t_{rec} \times r_{imp} + t_{prep} \times r_{mont}$$

Donde:

m_{rec} es la masa del par en kg, p es el precio en CLP/kg, t_{rec} es el tiempo de impresión en h y t_{prep} es el tiempo de preparación en h; $r_{mont} = 6.000$ CLP/h. Se estima un costo de material de 1.079,40 CLP para ASA y 581,40 CLP para PLA, más 3.000 CLP de preparación por par. La impresión cuesta 0 CLP en A y 2.000 CLP en B. El recambio considera la fabricación de un par a partir de una geometría disponible; no incluye el diseño de una cavidad nueva.

$$\begin{aligned} C_{rec,ASA,A} &= 1.079,40 + 0 + 3.000 = 4.079,40 \text{ CLP} \\ C_{rec,ASA,B} &= 1.079,40 + 2.000 + 3.000 = 6.079,40 \text{ CLP} \\ C_{rec,PLA,A} &= 581,40 + 0 + 3.000 = 3.581,40 \text{ CLP} \\ C_{rec,PLA,B} &= 581,40 + 2.000 + 3.000 = 5.581,40 \text{ CLP} \end{aligned}$$

Para estimar el costo asignado al conjunto reutilizable se resta del costo inicial el primer par de ASA, valorizado con los mismos supuestos del recambio: 60 g, 2 h de impresión y 0,5 h de preparación. La Ecuación 4-9 incluye en el saldo los cuerpos, apoyos, fijaciones y el desarrollo inicial. La distribución de masa y tiempo entre componentes es una estimación económica.

Ecuación 4-9

$$C_{base} = C_{val} - C_{rec,ASA}$$

Donde:

C_{base} es el costo estimado asignado al conjunto reutilizable y al desarrollo inicial; C_{val} es el costo inicial total; y C_{rec,ASA} es el costo del primer par de insertos en el mismo escenario de acceso a impresora.

$$\begin{aligned} C_{base,A} &= 157.825,92 \text{ CLP}; C_{base,B} = 176.792,59 \text{ CLP} \\ C_{base,A} &= 3,8327 \text{ UF}; C_{base,B} = 4,2933 \text{ UF} \end{aligned}$$

El conjunto inicial más un recambio de PLA, antes de la reserva, alcanza 165.486,72 CLP en A y 188.453,39 CLP en B. El recambio permite conservar los cuerpos y apoyos existentes. Esta estimación supone una geometría disponible y no incluye reparaciones ni el diseño de una cavidad nueva.

La Ecuación 4-10 compara el recambio de ASA con la fabricación de otro conjunto idéntico, descontando el diseño inicial, que ya está disponible. La reducción corresponde a los costos estimados de fabricación y no a un ahorro medido por ciclo.

Ecuación 4-10

$$R = (1 - C_{rec,ASA} / (C_{val} - C_{diseño})) \times 100$$

Donde:

R es la reducción porcentual; C_{rec,ASA} es el costo del recambio; C_{val} es el costo inicial total; y C_{diseño} es el costo del diseño inicial. La diferencia C_{val} – C_{diseño} representa la fabricación de otro conjunto idéntico, sin repetir el desarrollo CAD.

$$R_A = 90,27 \% ; R_B = 90,33 \%$$

La ventaja económica depende de conservar la base operativa: el recambio más las reparaciones debe costar menos que fabricar otro conjunto idéntico, sin repetir el diseño. El deterioro de la entrada puede reducir esa ventaja. Por ello, la reducción estimada no demuestra ahorro efectivo durante una vida útil determinada.

4.2.6 Presupuesto total y alcance de la estimación

Se mantiene una reserva del 10 % sobre el subtotal valorizado mediante la Ecuación 4-11. No es un gasto ocurrido ni una estimación de reparación. La diferencia directa entre escenarios es solo el uso de impresoras; al incluir reserva, se suma además el 10 % correspondiente a esa diferencia.

Ecuación 4-11

$$C_{pres} = C_{val} \times (1 + k)$$

Donde:

C_{pres} es el presupuesto total con reserva y $k = 0,10$. El total integra los precios reales de los productos y las estimaciones de impresión, corte, diseño, preparación y montaje de las Tablas 4-7 y 4-8.

$$\begin{aligned} C_{pres,A} &= 178.095,86 \text{ CLP}; C_{pres,B} = 201.159,19 \text{ CLP} \\ C_{pres,A} &= 4,3250 \text{ UF}; C_{pres,B} = 4,8850 \text{ UF} \end{aligned}$$

El presupuesto de desarrollo y fabricación, incluida una reserva del 10 %, es 178.095,86 CLP (4,3250 UF) con acceso gratuito a impresoras y 201.159,19 CLP (4,8850 UF) con una tarifa de 1.000 CLP/h. Los totales incluyen los pernos y arandelas a sus precios reales y las horas estimadas de corte, diseño y montaje. La diferencia entre escenarios es 20.966,67 CLP antes de la reserva y 23.063,33 CLP al incorporarla.

El presupuesto aporta un método aplicable a otros prototipos: separar desarrollo inicial, conjunto reutilizable y recambios, actualizando masas, tiempos y tarifas para cada caso. Su utilidad depende de incluir las reparaciones necesarias para conservar la base. Las horas son estimaciones, no gastos registrados. No se calcula costo por pieza aceptada porque faltan criterios de conformidad dimensional y consumos de inyección; una comparación productiva requeriría además contabilizar rechazos y duración de los insertos.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se diseñó, fabricó y montó un conjunto híbrido con soporte inferior de PLA, cuerpo superior de ASA y alojamiento de insertos reemplazables. Las comprobaciones de anclaje resolvieron dificultades de posicionamiento y permitieron efectuar los ensayos. Posteriormente se reemplazaron los insertos de ASA por otros de PLA y otra cavidad, obteniendo piezas con ambas configuraciones sin rehacer los cuerpos principales. Este resultado respalda la intercambiabilidad funcional observada.

Respecto del primer objetivo específico, se identificaron requerimientos de montaje, cierre, transferencia de carga, desmoldeo e intercambiabilidad (Tablas 2-2 y 3-1).

Respecto del segundo objetivo, se desarrolló una propuesta modular mediante el análisis funcional de French y el modelado CAD. Los cuerpos alojan insertos reemplazables y se fijan directamente a los platos; el recambio con obtención de piezas de dos geometrías aporta la evidencia funcional principal.

Respecto del tercer objetivo, se fabricó e instaló el prototipo de PLA y ASA con ocho apoyos de acero cromado, ocho pernos y ocho arandelas. Las plantillas y ampliaciones de perforaciones documentan la resolución de dificultades de montaje; no sustituyen mediciones de alineación y paralelismo.

Respecto del cuarto objetivo, el cumplimiento es parcial: se registraron ensayos, condiciones de desmoldeo y daños visibles, pero no se midieron cambios dimensionales. Los seis ajustes, quince piezas adicionales con ASA y aproximadamente seis pruebas con PLA no establecen vida útil máxima ni repetibilidad industrial.

La prueba del molde íntegro de PLA no produjo una pieza completa debido al deterioro de la entrada en contacto con la boquilla. El cambio a ASA permitió continuar los ensayos, aunque persistió daño localizado en esa zona. El elemento añadido a la entrada no evitó el deterioro. Los insertos de ASA conservaron su apariencia y los de PLA permitieron obtener piezas; estas observaciones corresponden a una inspección visual, sin cuantificación dimensional.

La evidencia respalda la factibilidad inicial de fabricación, montaje, inyección y recambio; el daño de la entrada limita la operación repetida y no se determinaron vida útil ni precisión dimensional. El aporte transferible es la separación entre cuerpos reutilizables y cavidades reemplazables, demostrada con dos geometrías. Su aplicación a otros prototipos requiere verificar montaje, área proyectada, condiciones térmicas y aceptación de la pieza; los 10 min de enfriamiento no constituyen una regla general. El presupuesto con reserva del 10 % es 178.095,86 CLP (4,3250 UF) con impresión gratuita y 201.159,19 CLP (4,8850 UF) con impresión pagada, incluidas las horas estimadas.

5.2 RECOMENDACIONES

Priorizar el rediseño de la entrada. Sustituir solo el polímero resultó insuficiente, pues el ASA también presentó daño. Se propone evaluar un casquillo metálico reemplazable con asiento y apoyo definidos para evitar el contacto directo de la boquilla con el ASA. El casquillo también transmite calor, por lo que su eficacia debe comprobarse registrando temperatura local, dimensiones de la entrada y continuidad del llenado en ciclos repetidos. La ausencia de deterioro progresivo será un criterio de evaluación, no un resultado ya demostrado.

Mantener inicialmente los 10 min de enfriamiento como referencia y estudiar su reducción después de evaluar la entrada. Comparar tiempos con igual cavidad y condiciones de operación, registrando temperatura al abrir, deformación y dificultad de extracción. Identificar cada ciclo y aplicar criterios de aceptación constantes para distinguir una mejora del desmoldeo de una variación entre pruebas.

Comparar ASA y PLA con la misma cavidad y condiciones de impresión e inyección documentadas. Medir piezas e insertos antes y después de cada serie, definir tolerancias y emplear cargas y propiedades representativas en la simulación. Para trasladar la propuesta a otra máquina o pieza, repetir la comprobación de montaje y cierre antes de ensayar. Actualizar el presupuesto separando base, recambio, reparación y diseño de nuevas cavidades.

REFERENCIAS

- Autodesk. (s. f.-a). *Analysis tools*. Fusion Help.
<https://help.autodesk.com/cloudhelp/ENU/Fusion-Model/files/SLD-INSPECT-TOOLS.htm>
- Autodesk. (s. f.-b). *Static stress study*. Fusion Help.
<https://help.autodesk.com/cloudhelp/ENU/Fusion-Simulate/files/SIM-STATIC-STRESS-ANALYSIS.htm>
- Autodesk. (2019). *Modeling for accurate clamp force prediction*. Moldflow Insight Help.
<https://help.autodesk.com/cloudhelp/2019/ENU/MoldflowInsight-Modelprep/files/GUID-5C97629F-C5C5-4A6D-BD2A-55FE6A4A5EE2.htm>
- Bagalkot, A., Pons, D., Clucas, D., & Symons, D. (2019). A methodology for setting the injection moulding process parameters for polymer rapid tooling inserts. *Rapid Prototyping Journal*, 25(9), 1493–1505. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2017-0217>
- Bagalkot, A., Pons, D., Symons, D., & Clucas, D. (2021). Analysis of raised feature failures on 3D printed injection moulds. *Polymers*, 13(10), 1541.
<https://doi.org/10.3390/polym13101541>
- Bambu Lab. (s. f.-a). *Bambu ASA technical data sheet*.
https://store.bbldcn.eu/s8/default/cad72d633f104a1aa80dc6c5937cb642/Bambu_AS_A_Technical_Data_Sheet.pdf
- Bambu Lab. (s. f.-b). *Bambu PLA Basic technical data sheet*.
https://store.bbldcn.eu/s8/default/073e722a4aa44f7cbfdc419d597475cc/Bambu_PLA_Basic_Technical_Data_Sheet.pdf
- Bambu Lab. (s. f.-c). *P1S technical specifications*.
<https://ca.store.bambulab.com/products/p1s>
- Bambu Lab. (s. f.-d). *Bambu filament guide*. <https://bambulab.com/it/filament-guide>
- Bambu Lab. (2023). *P1S quick start guide*.
<https://cdn1.bambulab.com/documentation/quick-start-59b0cefdc0fc4/P1S/English%20version-Quick%20Start%20Guide%20for%20P1S.pdf>

- Bartlett, L. P. (2017). *A preliminary study of using plastic molds in injection molding [Tesis de maestría, The Ohio State University]*. OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center.
http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1509440406290043
- Battegazzore, D., Anghilieri, A., Nava, G., & Frache, A. (2026). Validation of filament materials for injection moulding 3D-printed inserts using temperature and cavity pressure simulations. *Materials*, 19(2), 369. <https://doi.org/10.3390/ma19020369>
- Becerra-Borges, Y. E., Cazón-Martín, A., Rodríguez-Ferradas, M. I., Morer-Camo, P., Etxaniz-Sein, U., Manchado, J. C., & Candal, M. V. (2025). Transforming plastic injection molding with additive manufacturing: A novel systematic review of innovative approaches to insert production. *Rapid Prototyping Journal*, 31(11), 200–217. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2024-0444>
- French, M. J. (1999). *Conceptual design for engineers (3rd ed.)*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3627-9>
- Gohn, A. M., Brown, D., Mendis, G., Forster, S., Rudd, N., & Giles, M. (2022). Mold inserts for injection molding prototype applications fabricated via material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 51, 102595.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102595>
- International Organization for Standardization. (2026). Plastics moulded parts—Tolerances and acceptance conditions (ISO 20457:2026). <https://www.iso.org/standard/20457>
- International Organization for Standardization & ASTM International. (2020). *Additive manufacturing—Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials—Part 1: Feedstock materials (ISO/ASTM 52903-1:2020)*.
<https://www.iso.org/standard/67290.html>
- International Organization for Standardization & ASTM International. (2021). *Additive manufacturing—General principles—Fundamentals and vocabulary (ISO/ASTM 52900:2021)*. <https://www.iso.org/standard/74514.html>
- Kazmer, D. O. (2022). *Injection mold design engineering (3rd ed.)*. Hanser Publications.
- Mohd Salleh, N. S., Rosli, A., & Ahmad, M. S. (2024). 3D printed mold insert infill analysis for injection molding application. *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, 8(1), 8–17. <https://doi.org/10.15282/sqjism171>

- Moritz, V. F., Bezerra, G. S. N., Hopkins Jnr, M., Fuenmayor, E., Günbay, S., Hayes, C., Lyons, J. G., & Devine, D. M. (2022). Heat dissipation plays critical role for longevity of polymer-based 3D-printed inserts for plastics injection moulding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(5), 117. <https://doi.org/10.3390/jmmp6050117>
- Pelin, G., Sönmez, M., & Pelin, C.-E. (2024). The use of additive manufacturing techniques in the development of polymeric molds: A review. *Polymers*, 16(8), 1055. <https://doi.org/10.3390/polym16081055>
- PORCHESON Technology Co., Ltd. (2008). *User's manual for TB108 V2.0: Injection molding machine control system [Manual técnico]*.
- Prusa Research. (s. f.). *Polyamide (Nylon)*. Prusa Knowledge Base. https://help.prusa3d.com/article/polyamide-nylon_167188
- Sanford, L. T., Jaafar, I. H., Seibi, A., & Gohn, A. M. (2022). The effect of infill angle, build orientation, and void fraction on the tensile strength and fracture of 3D printed ASA via fused filament fabrication. *Manufacturing Letters*, 33(Suppl.), 569–573. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.07.070>
- Siemiński, P., & Szulc, B. (2018). Analysis of FDM/FFF additive manufacturing production mold inserts of injection molds. *Mechanik*, 91(1), 53–55. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.1.11>
- Servicio de Impuestos Internos. (2026). UF 2026. Valor del 18 de octubre de 2026. https://www.sii.cl/valores_y_fechas/uf/uf2026.htm
- TodoToner. (s. f.-a). Filamento PLA blanco 1 kg. Recuperado el 18 de octubre de 2026, de <https://www.todotoner.cl/filamentos/todo-pla/pla/todotonercl>
- TodoToner. (s. f.-b). Filamento ASA blanco 1 kg. Recuperado el 18 de octubre de 2026, de <https://www.todotoner.cl/filamentos/todo-asa/asa>
- Vázquez Martínez, J. M., Piñero Vega, D., Salguero, J., & Batista, M. (2022). Evaluation of the printing strategies design on the mechanical and tribological response of acrylonitrile styrene acrylate (ASA) additive manufacturing parts. *Rapid Prototyping Journal*, 28(3), 479–489. <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2021-0108>

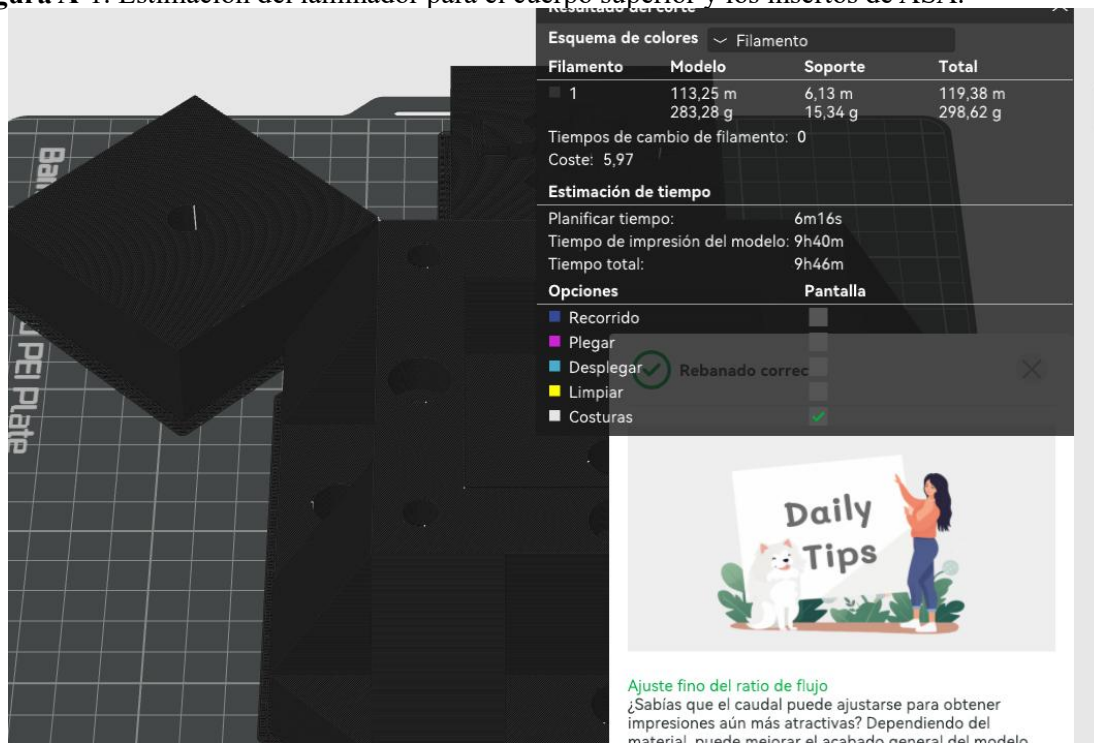
ANEXOS

HIPERVINCULO A LA NUBE: [Anexos tesis](#)

Anexo A Registros de fabricación

La Figura A-1 presenta el cálculo del laminador para el cuerpo superior y los insertos de ASA.

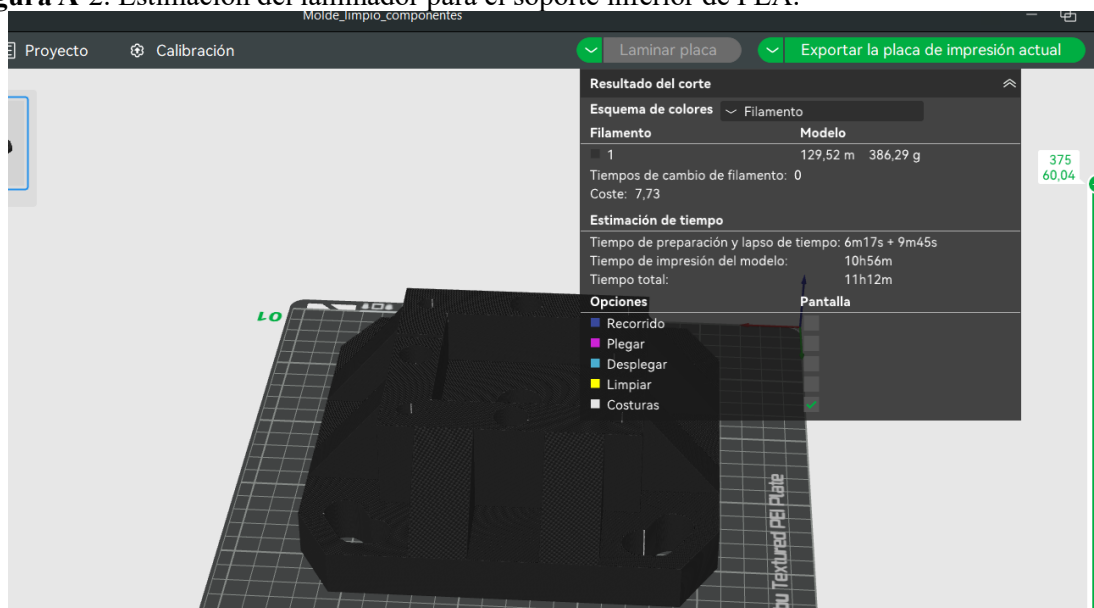
Figura A-1. Estimación del laminador para el cuerpo superior y los insertos de ASA.



Fuente: elaboración propia, a partir de las capturas del laminador del 9 de octubre de 2026

La Figura A-2 presenta el cálculo del laminador para el soporte inferior de PLA.

Figura A-2. Estimación del laminador para el soporte inferior de PLA.



Fuente: elaboración propia, a partir de las capturas del laminador del 9 de octubre de 2026

Anexo B Levantamiento y comprobaciones de montaje

La Figura B-1 documenta el prototipo instalado en posición abierta.

Figura B-1. Vista lateral del prototipo instalado en posición abierta.



Fuente: elaboración propia

Anexo C Antecedentes de valorización de componentes metálicos

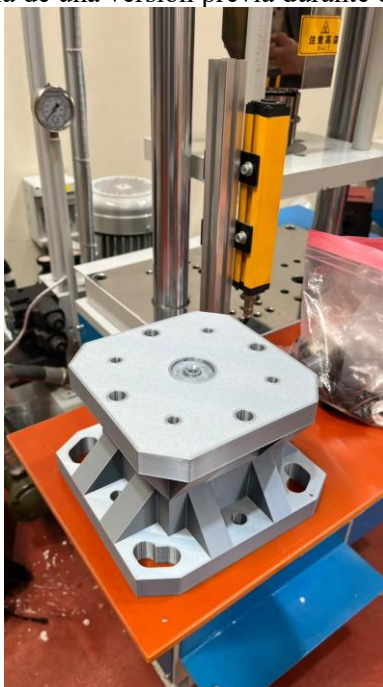
La Tabla 4-7 identifica una barra de acero cromado $\varnothing 8 \times 550$ mm, SKU PU00412, valorizada en 5.990 CLP, ocho pernos de 900 CLP y ocho arandelas de 200 CLP. El costo

de los productos es 14.790 CLP. De la barra se obtienen ocho apoyos de 58 mm: 464 mm de longitud nominal utilizada y 86 mm de sobrante teórico antes de descontar las pérdidas de corte. El presupuesto incorpora por separado 6.000 CLP estimados para corte y preparación de los apoyos.

Anexo D Bitácora y registro fotográfico del ensayo

La Figura D-1 muestra una versión previa durante su montaje.

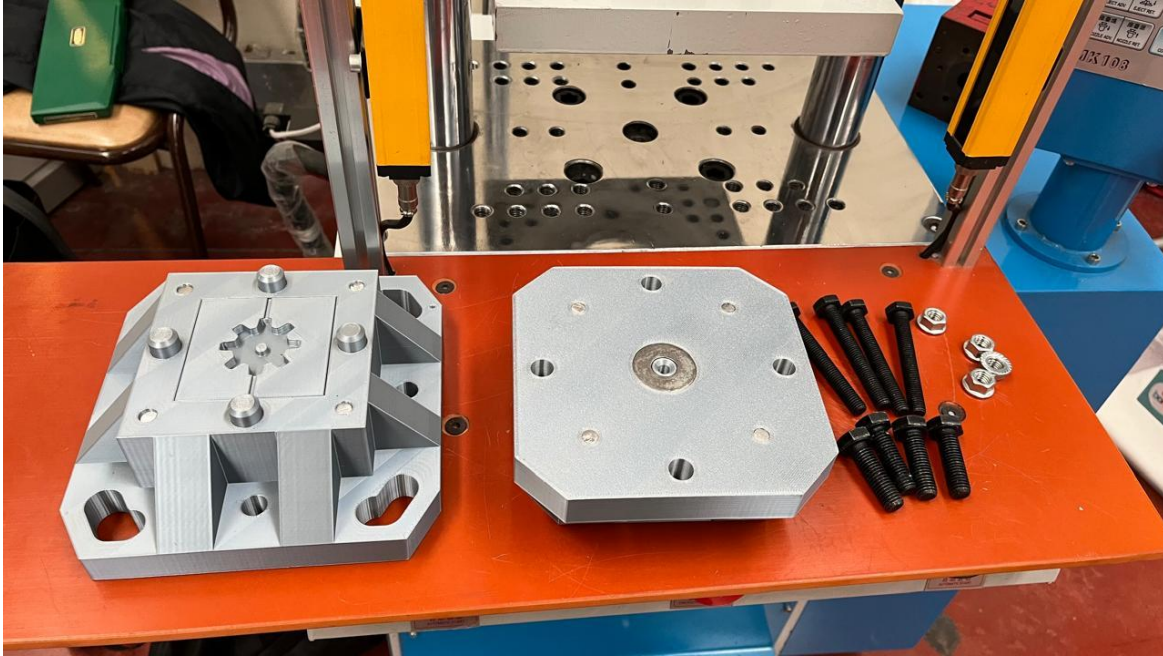
Figura D-1. Vista complementaria de una versión previa durante el montaje.



Fuente: elaboración propia

Los componentes del molde íntegro de PLA antes de la prueba se muestran en la Figura D-2.

Figura D-2. Componentes del molde íntegro de PLA antes de la prueba.

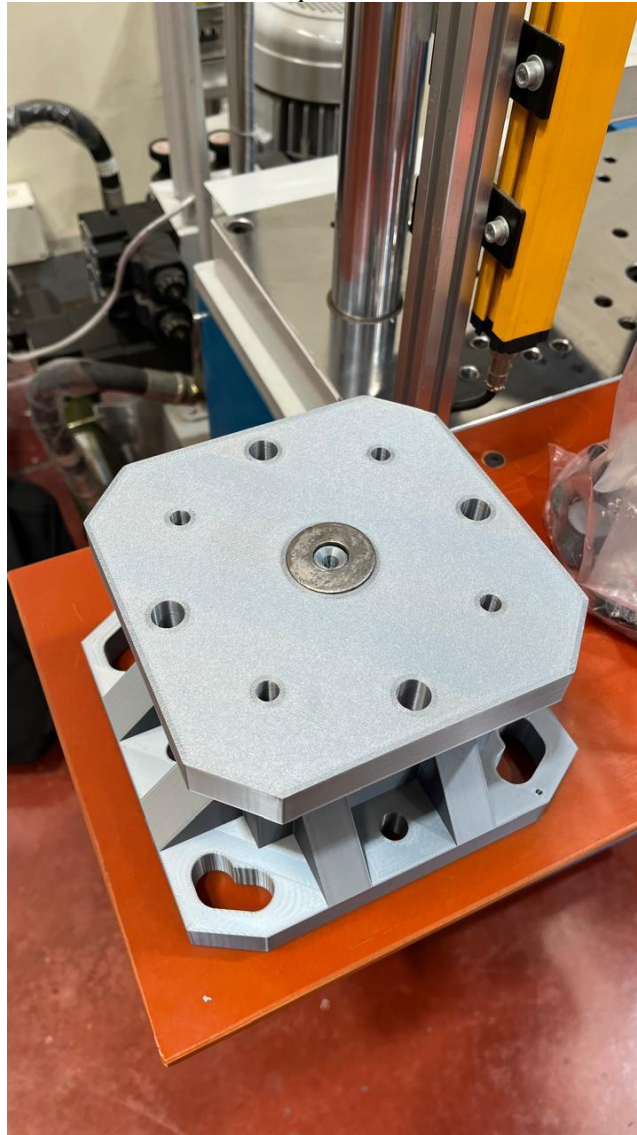


Fuente: elaboración propia

Nota: Se observan las mitades del molde y sus fijaciones antes del primer intento de inyección.

La Figura D-3 muestra la mitad superior de PLA antes de la prueba.

Figura D-3. Mitad superior de PLA antes de la prueba.

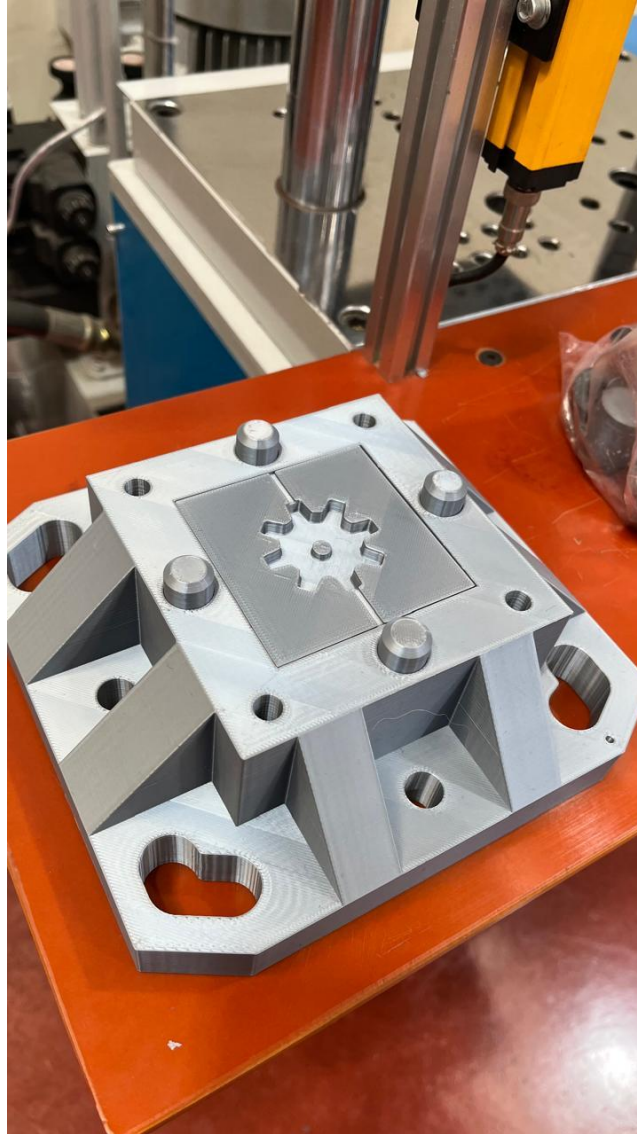


Fuente: elaboración propia

Nota: Vista de la cara superior y de la zona de entrada antes del intento.

La cavidad de la rueda dentada en la mitad inferior de PLA se muestra en la Figura D-4.

Figura D-4. Mitad inferior de PLA con la cavidad de la rueda dentada.

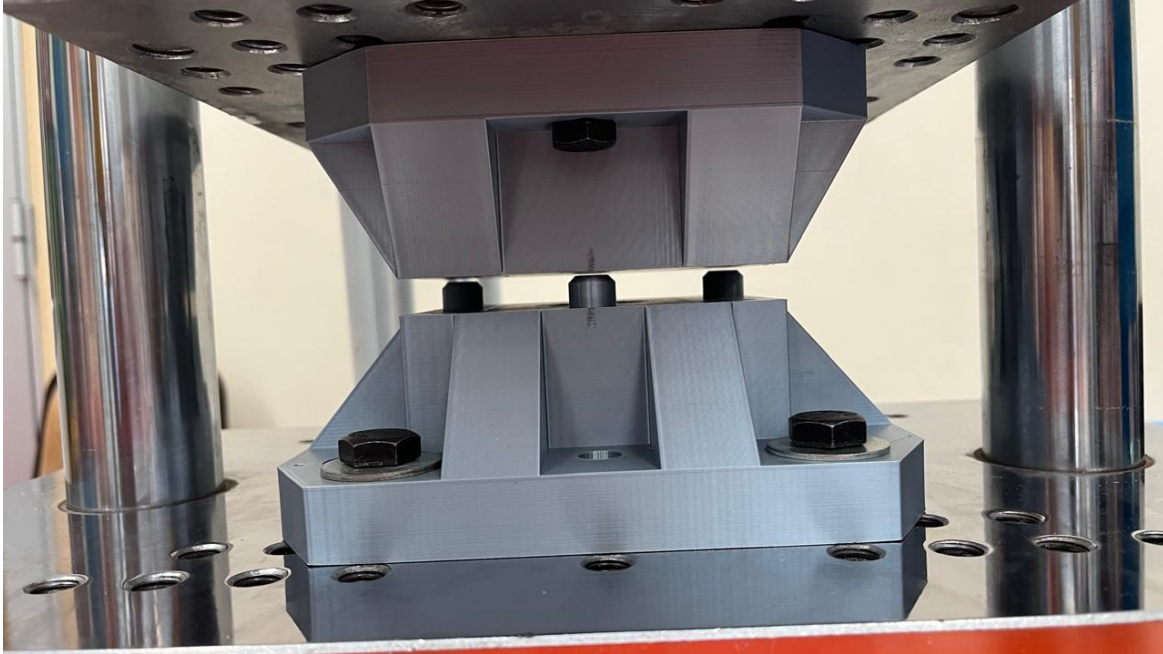


Fuente: elaboración propia

Nota: Vista de la cavidad y del núcleo central antes del intento.

La Figura D-5 documenta el molde íntegro de PLA instalado en la inyectora.

Figura D-5. Molde íntegro de PLA instalado en la inyectora.



Fuente: elaboración propia

Nota: Las mitades se muestran en posición abierta antes del intento.

El contacto de la boquilla con la entrada del molde se muestra en la Figura D-6.

Figura D-6. Contacto de la boquilla con la entrada del molde de PLA.

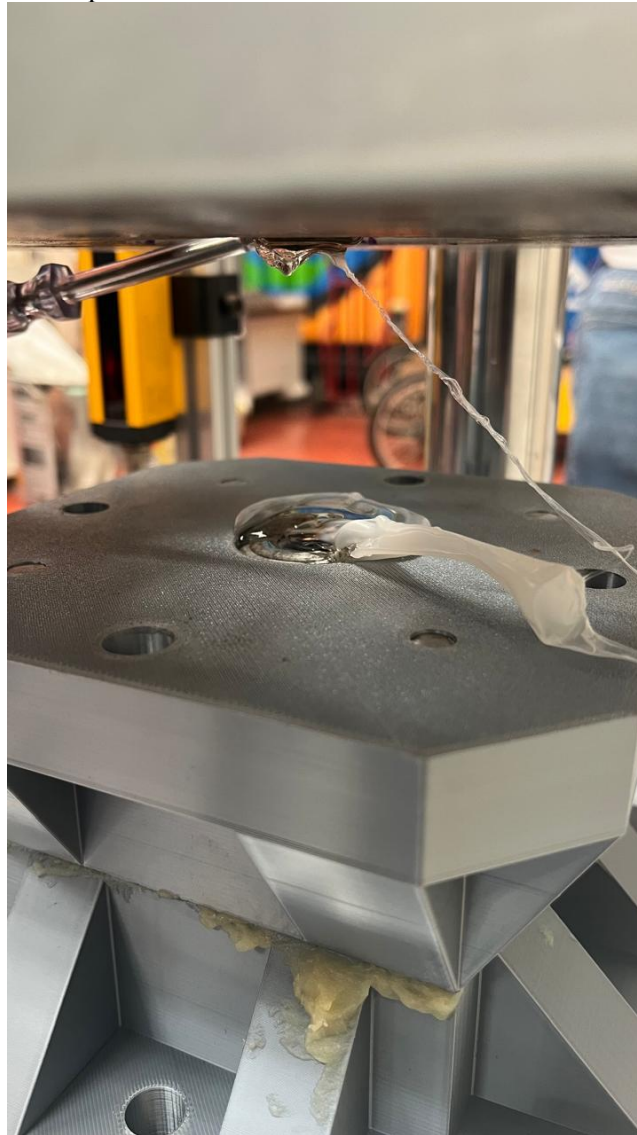


Fuente: elaboración propia

Nota: Vista de la zona de alimentación durante la preparación de la prueba.

La acumulación de polímero en la entrada se observa en la Figura D-7.

Figura D-7. Acumulación de polímero en la zona de entrada.

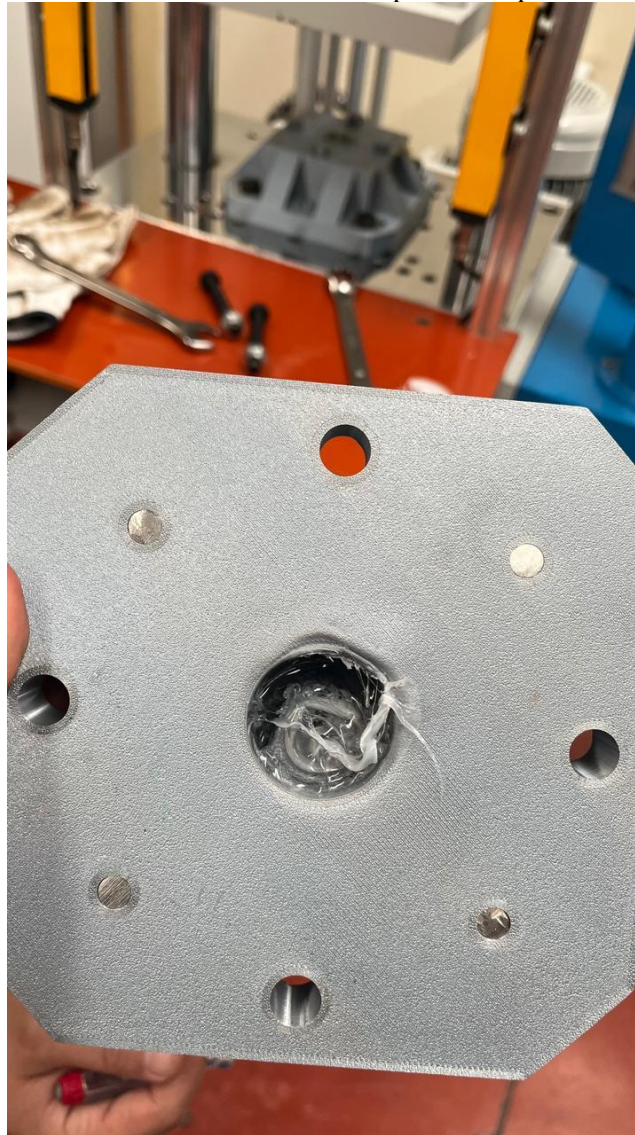


Fuente: elaboración propia

Nota: Estado visible de la zona de entrada después del intento; la imagen no cuantifica la temperatura ni la presión.

El estado de la entrada después de la prueba se muestra en la Figura D-8.

Figura D-8. Estado de la entrada del molde de PLA después de la prueba.



Fuente: elaboración propia

Nota: Detalle del material adherido y del daño localizado después del intento.

Anexo E Simulación mecánica preliminar

La Tabla E-1 reúne los resultados numéricos del caso preliminar con una carga de 1,67 N.

Tabla E-1. Resultados numéricos del caso preliminar de 1,67 N.

Resultado	Valor calculado	Interpretación limitada al caso configurado
Tensión de Von Mises	0,005 MPa	Esfuerzo equivalente máximo calculado.
Desplazamiento total	$3,663 \times 10^{-6}$ mm	Desplazamiento máximo calculado para el caso preliminar configurado; no representa una deformación medida.
Presión de contacto	0,002 MPa	Presión entre componentes modelados; no equivale a la presión del polímero en la cavidad.
Fuerza de contacto	0,026 N	Máximo local mostrado; no es la fuerza total de cierre.
Factor de seguridad	Mínimo $\approx 43\ 898$	No se adopta como comprobación de seguridad con esta carga y estos materiales.

Fuente: informe automático de Autodesk Fusion

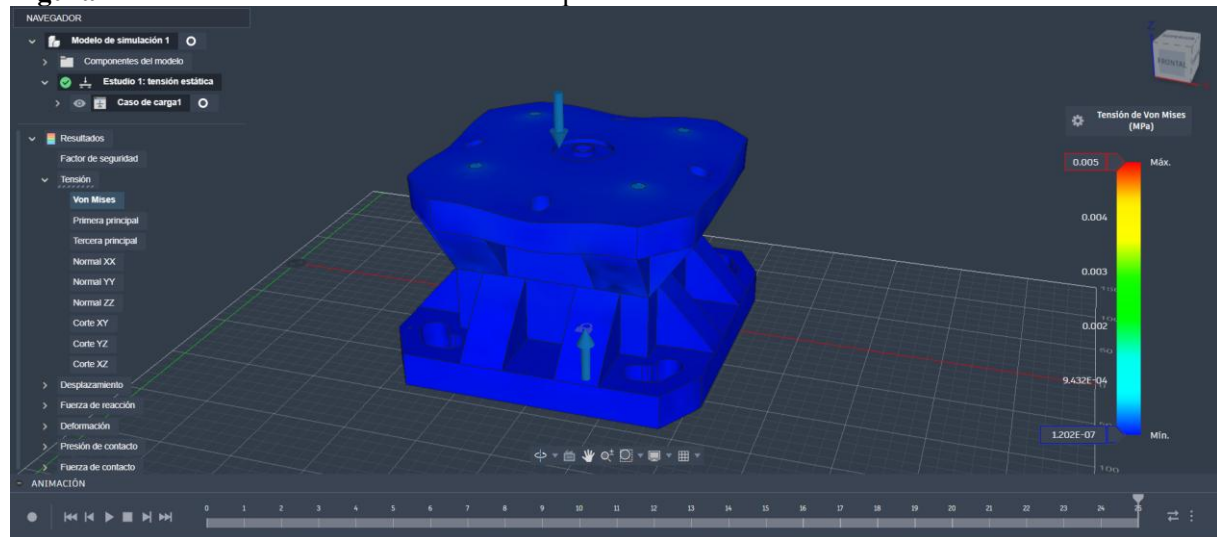
Nota: El máximo de cada mapa corresponde a la configuración simulada; no equivale a una medición del conjunto físico.

Un análisis representativo requeriría: (a) geometría y revisión CAD coincidentes con el conjunto ensayado; (b) propiedades de PLA y ASA del grado y orientación pertinentes, incluida su variación con temperatura; (c) presión de cavidad y cierre sustentados en datos del proceso; (d) contactos, posibles holguras y apoyos de metal modelados según el montaje; y (e) sensibilidad de malla y contraste de deformaciones con mediciones. ABS y LCP son materiales provisionales del archivo original, no sustitutos de los componentes fabricados.

Las Figuras E-1 y E-2 muestran mapas del caso configurado en Fusion. Los colores y la deformación visual amplificada deben interpretarse con las escalas numéricas y las condiciones de borde del archivo. La fuerza aplicada de 1,67 N no se ha relacionado con

presión de cavidad, fuerza de cierre de operación ni contacto real; por tanto, los máximos bajos no validan el molde construido.

Figura E-1. Tensión de Von Mises del estudio preliminar.

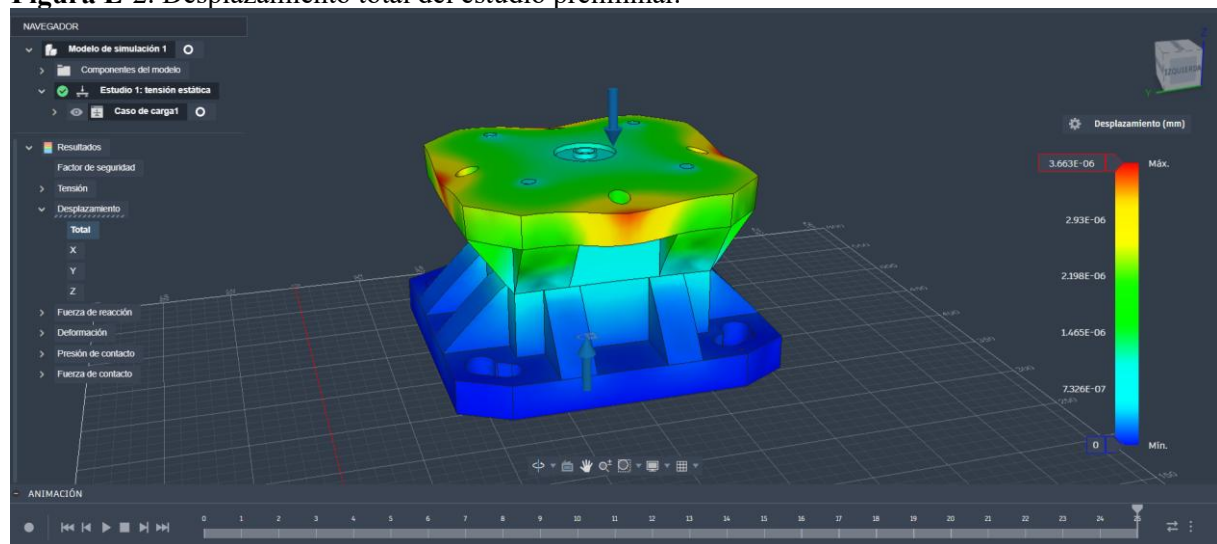


Fuente: captura de Autodesk Fusion

Nota: La escala de la figura está expresada en MPa y su máximo es 0,005 MPa.

La Figura E-2 muestra el desplazamiento total calculado para el mismo caso preliminar.

Figura E-2. Desplazamiento total del estudio preliminar.



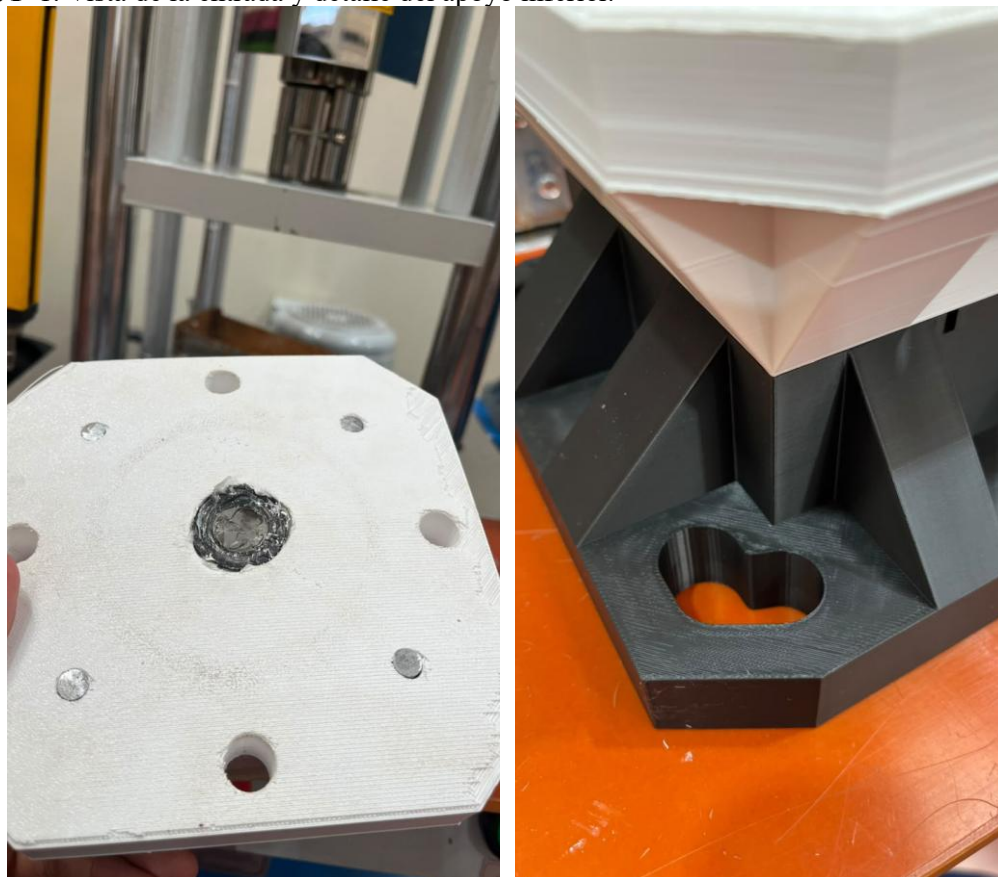
Fuente: captura de Autodesk Fusion

Nota: La escala de la figura está expresada en milímetros y su máximo es $3,663 \times 10^{-6}$ mm.

Anexo F Registro fotográfico complementario

Las fotografías complementan las Figuras 4-1 a 4-5 y documentan la configuración de engranaje. Se presentan como evidencia visual del montaje, de la entrada y de las piezas obtenidas. La Figura F-1 muestra la entrada y el apoyo inferior.

Figura F-1. Vista de la entrada y detalle del apoyo inferior.



Fuente: elaboración propia

Nota: Vistas complementarias de las zonas inspeccionadas. No incorporan una escala de medición.

La pieza y el inserto durante las pruebas se muestran en la Figura F-2.

Figura F-2. Pieza y montaje del inserto durante las pruebas.



Fuente: elaboración propia

Note observan material conformado, conductos laterales y el inserto alojado. La fotografía se utiliza como evidencia cualitativa del montaje.