
Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante impresión 3D MSLA y resina vertida

Pablo Andres Figueroa Gámez



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de piezas
fabricadas mediante impresión 3D MSLA y resina vertida**

Trabajo de graduación presentado por Pablo Andres Figueroa Gámez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2025

Vo.Bo.:

(f) 
MSc. Carlos Esquit

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por darme la vida, la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa. Agradezco profundamente a mi familia por su apoyo incondicional, en especial a mis padres, quienes han creído en mí en cada proyecto y han hecho posible que hoy alcance este logro. A mi hermana, por su motivación constante y por impulsarme siempre a avanzar.

Expreso también mi gratitud a mis amigos, compañeros y a todas las personas con quienes compartí durante mis estudios, por sus palabras de ánimo y por contribuir a mi crecimiento personal y profesional.

A la Universidad del Valle de Guatemala, gracias por ser la casa de estudios donde me he formado y por apostar por el talento guatemalteco.

A la Fundación Juan Bautista Gutiérrez, agradezco profundamente por la oportunidad brindada a través de la beca, por creer en mi potencial y por el acompañamiento recibido durante el proceso de coaching. Este logro no habría sido posible sin su apoyo.

Finalmente, agradezco a todos mis catedráticos, quienes no solo resolvieron mis dudas académicas, sino que también ofrecieron consejos valiosos en momentos clave de mi formación.

Prefacio	I
Índice de figuras	V
Índice de cuadros	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	6
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Definición del problema	8
6. Marco teórico	9
6.1. Manufactura con resinas	9
6.2. Tipos de resinas	13
6.3. Manufactura de moldes de silicona ^[12]	14
6.4. Ensayos mecánicos ^[36]	15
6.5. Medidas estadísticas ^[39]	19
7. Marco metodológico	21
7.1. Impresión 3D MSLA	21
7.2. Fabricación de moldes de silicona RTV	23
7.3. Proceso de vertido de resina	24
7.4. Selección y preparación de probetas	24

7.5. Ensayos mecánicos	27
8. Discusión y resultados de ensayos mecánicos	29
8.1. Ensayo de tracción (ISO 527)	30
8.2. Ensayo de flexión (ISO 178)	33
8.3. Ensayo de compresión (ASTM D695)	36
8.4. Ensayo de corte (ASTM D732)	39
8.5. Calidad superficial y estructura interna	41
9. Análisis de resultados	44
10. Análisis cualitativo	46
11. Limitaciones	48
12. Conclusiones	49
13. Recomendaciones	50
14. Referencias	51
15. Anexos	54
16. Glosario	144

Índice de figuras

1.	Fotopolimerización de resina para impresión 3D MSLA	10
2.	Metodología de impresión 3D MSLA - LCD	11
3.	Metodología de colada - vertido de resina	11
4.	Tipos de esfuerzos mecánicos	15
5.	Gráfico esfuerzo-deformación de un polímero	16
6.	Perfiles estándar de impresión Anycubic Photon Mono X 6K	22
7.	Probeta ensayo tensión-tracción	25
8.	Probeta ensayo flexión	26
9.	Probeta ensayo compresión	26
10.	Probeta ensayo corte	26
11.	Configuración de la máquina para el ensayo de tracción	27
12.	Configuración de accesorio para ensayo de corte	27
13.	Configuración de la máquina para el ensayo de flexión	28
14.	Configuración de la máquina para el ensayo de compresión	28
15.	Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de tracción para impresión 3D MSLA	31
16.	Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de tracción para resina vertida	31
17.	Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de flexión para impresión 3D MSLA	34
18.	Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de flexión para resina vertida	34
19.	Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de compresión para impresión 3D MSLA	37
20.	Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de compresión para resina vertida	37
21.	Visualización de estructura y acabado superficial de probetas de tensión por impresión 3D MSLA	41
22.	Visualización de estructura y acabado superficial de probetas de tensión por resina vertida	42
23.	Visualización efecto de la humedad en colada de resina de uretano	43

24.	Resultados promedio de categorías de evaluación en comparación de procesos de manufactura	46
-----	--	----

Índice de cuadros

1.	Propiedades resina Smooth-Cast 305	13
2.	Propiedades resina eSUN Hard Tough	14
3.	Propiedades silicona Mold Max 14NV	15
4.	Parámetros de impresión resina eSUN Hard Tough	22
5.	Resumen de resultados del ensayo de tracción para probetas de impresión 3D MSLA	30
6.	Resumen de resultados del ensayo de tracción para probetas de resina vertida	30
7.	Resumen de resultados del ensayo de flexión para probetas de impresión 3D MSLA	33
8.	Resumen de resultados del ensayo de flexión para probetas de resina vertida .	33
9.	Resumen de resultados del ensayo de compresión para probetas de impresión 3D MSLA	36
10.	Resumen de resultados del ensayo de compresión para probetas de resina vertida	36
11.	Resumen de resultados del ensayo de corte para probetas de impresión 3D MSLA	39
12.	Resumen de resultados del ensayo de corte para probetas de resina vertida . .	39
13.	Resultados promedio del ensayo de tracción para impresión 3D MSLA	54
14.	Resultados promedio del ensayo de flexión para impresión 3D MSLA	55
15.	Resultados promedio del ensayo de compresión para impresión 3D MSLA . . .	56
16.	Resultados promedio del ensayo de tracción para resina vertida	57
17.	Resultados promedio del ensayo de flexión para resina vertida	58
18.	Resultados promedio del ensayo de compresión para resina vertida	59

Este trabajo aborda la falta de metodologías estandarizadas para la fabricación de piezas en resina en la Universidad del Valle de Guatemala. El objetivo principal fue comparar el desempeño mecánico de probetas fabricadas mediante impresión 3D MSLA y colada en moldes de silicona y establecer procesos documentados que sirvan como guía para futuras investigaciones.

Se fabricaron probetas conforme a normas ISO y ASTM para los ensayos de tracción, flexión, compresión y corte. La metodología abarcó la selección de materiales, la manufactura de cada proceso y la ejecución de los ensayos mecánicos. Posteriormente, se realizó la recolección de los datos experimentales, analizados cuantitativamente y complementados con un estudio cualitativo de los procesos de manufactura.

Los resultados cuantitativos muestran que la impresión 3D MSLA obtuvo los mayores valores de resistencia: 48.47 MPa en tracción, 57.04 MPa en flexión, 64.67 MPa en compresión y 13.15 MPa en corte. Por su parte, la resina vertida alcanzó 24.38 MPa en tracción, 28.71 MPa en compresión, 28.29 MPa en flexión y 6.32 MPa en corte. Los coeficientes de variación revelaron que la MSLA presenta mayor variabilidad entre muestras, mientras que la resina vertida mostró mayor reproducibilidad y un comportamiento más dúctil, evidenciado por mayores deformaciones para esfuerzos iguales.

El análisis cualitativo indicó que la tecnología MSLA destaca en precisión geométrica y preparación del proceso, mientras que la resina vertida sobresale en economía, simplicidad y uniformidad del material. Finalmente, se desarrolló una guía de manufactura para resina vertida y se documentaron procedimientos estandarizados para ambos métodos.

Palabras clave: impresión 3D MSLA, colada de resina en moldes, caracterización mecánica de polímeros.

This work addresses the lack of standardized methodologies for resin casting processes at Universidad del Valle de Guatemala. The main objective was to compare the mechanical performance of specimens manufactured using MSLA 3D printing and silicone-mold resin casting, and to establish documented procedures that may serve as a guide for future research.

Standardized specimens were fabricated following ISO and ASTM requirements for tensile, flexural, compressive, and shear tests. The methodology encompassed material selection, the manufacturing procedures for each process, execution of mechanical tests, and experimental data collection. The results were then analyzed quantitatively and complemented with a qualitative assessment of the manufacturing processes.

Quantitative results show that MSLA 3D printing achieved the highest mechanical strengths: 48.47 MPa in tension, 57.04 MPa in flexion, 64.67 MPa in compression, and 13.15 MPa in shear. In contrast, resin casting reached 24.38 MPa in tension, 28.71 MPa in compression, 28.29 MPa in flexion, and 6.32 MPa in shear. Coefficients of variation revealed that MSLA exhibits higher variability among samples, while resin casting demonstrated greater reproducibility and more ductile behavior, evidenced by larger deformations for equivalent stress levels.

The qualitative analysis indicated that MSLA technology excels in geometric precision and process preparation, whereas resin casting stands out for its lower cost, simplicity, and material uniformity. Finally, a manufacturing guide for resin casting was developed, and standardized procedures for both processes were documented.

Keywords: 3D MSLA printing, resin casting in silicone molds, mechanical characterization of polymers.

Las tecnologías de manufactura digital se han consolidado como un pilar fundamental para el desarrollo de prototipos funcionales o productos personalizados. Dentro de estas tecnologías, destacan los métodos basados en resinas o polímeros, las cuales permiten obtener piezas con un alto nivel de detalle, precisión dimensional y buenas propiedades mecánicas. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran la impresión 3D por estereolitografía enmascarada (MSLA) y el vertido de resina.

La impresión 3D MSLA es una tecnología aditiva que construye piezas capa por capa mediante fotopolimerización UV, permitiendo fabricar geometrías complejas con alta precisión y un acabado uniforme. Sin embargo, debido a la naturaleza del curado por capas y a la posibilidad de variaciones en la exposición UV, este proceso puede generar diferencias internas entre muestras, lo que coincide con los resultados experimentales donde se observó mayor variabilidad entre probetas. Además esta tecnología puede presentar ciertas limitaciones, como la tendencia a la fragilidad y la degradación por sobre exposición a la luz ultravioleta.

El vertido de resina es un método de manufactura por moldeo que requiere de moldes, explorando en este caso moldes de silicona y resinas para generar las piezas. Este método permite la replicación de detalles y la posibilidad de reproducir copias de un mismo modelo. Este proceso requiere mayor tiempo de preparación, un mayor control de las proporciones y condiciones en el de mezclado y curado pero ofrece una mayor homogeneidad interna del material.

Por lo tanto, la finalidad de este trabajo es comparar ambas metodologías, evaluando sus diferencias en términos de propiedades mecánicas y procesos de fabricación. Para alcanzar este objetivo, se establecieron procedimientos claros, replicables y debidamente documentados, que puedan ser utilizados como referencia en futuros proyectos dentro de la universidad. El estudio se delimitó al análisis de piezas fabricadas con resina fotopolimérica eSUN Hard Tough para la tecnología MSLA y con resina de poliuretano Smooth-Cast 305 para el proceso de colada.

Los resultados generales mostraron que la impresión 3D MSLA alcanzó mayores valores de resistencia, mientras que la resina vertida presentó mayor reproducibilidad y un comportamiento más dúctil. Se logró desarrollar y documentar una guía metodológica para la fabricación de piezas en resina vertida, así mismo las metodologías de fabricación en impresión 3D MSLA, metodología de fabricación de moldes RTV y metodología de fabricación de vertido de resina. Estos documentos contribuyen a la comprensión de los procesos de manufactura con resinas y brinda a la Universidad del Valle de Guatemala una herramienta para poder replicar los procesos.

Diversos estudios han demostrado que tanto el patrón de relleno como la orientación de impresión influyen significativamente en las propiedades mecánicas del PLA impreso por FDM. Pimentel Pérez [1] mediante ensayos normalizados de tracción (ISO 527), flexión (ISO 178), compresión (ASTM D695) y corte (ASTM D732), determinó que un relleno del 99 % maximiza la resistencia en todos los casos. Los patrones lineal y concéntrico ofrecieron mayor resistencia a tracción (28.91 MPa); el patrón lineal fue superior en compresión (45.65 MPa), el concéntrico en corte (27.58 MPa), y el triangular en flexión (114.40 MPa). Por su parte, López et al. [2] evaluaron la influencia de la orientación de impresión, encontrando que la dirección vertical alcanzó la mayor resistencia a tracción (58.3 MPa), la orientación de canto fue superior en flexión (110.2 MPa) y compresión (53.7 MPa), mientras que la horizontal sobresalió en corte (27.0 MPa). Bayas et al. [3] concluyeron que factores como la densidad y patrón de relleno, la orientación de fabricación, el ángulo de deposición del relleno, la velocidad y temperatura de impresión, inciden directamente en la resistencia a tracción (hasta 60 MPa), flexión (hasta 125 MPa) e impacto (hasta 16.96 kJ m⁻²)

La fabricación de moldes para colada de resina ha sido ampliamente explorada desde diferentes enfoques. Chee et al. [4] compararon tres métodos mediante prototipado rápido con SLA: patrones rápidos (pieza en SLA para fabricar el molde en silicona), herramientas rápidas (molde directo en SLA) y un enfoque híbrido (negativo del molde en SLA y colado en silicona). Se concluyó que los patrones rápidos ofrecen mayor flexibilidad y velocidad de manufactura.

Koob [5] ofreció recomendaciones prácticas para el manejo seguro y eficiente de resinas epóxicas y moldes de silicona. Entre sus sugerencias destacan el uso de balanza analítica para una dosificación precisa, recipientes de vidrio reutilizables para mezclar y asegurar que los moldes estén completamente curados antes de usarlos. También enfatiza la necesidad de trabajar en ambientes ventilados (o su alternativa campanas extractoras o extractores de humo) para evitar la acumulación de vapores tóxicos. Finalmente, recomienda mantener una temperatura controlada y aplicar vacío durante la colada para prevenir burbujas en las piezas. Por su parte, Zalewski [6] detalla el proceso de fabricación de moldes y piezas

en resina, centrándose en el uso de siliconas y poliuretanos. Sugiere revisar la cristalización de los componentes antes del vertido, aplicar desmoldante y respetar tiempos de secado. Advierte que las siliconas de curado por condensación presentan mayor contracción que las de curado por adición. Recomienda verter las resinas manualmente en menos de 8 minutos si son de baja viscosidad, o hasta 15 minutos si superan los 1500 mPa.s. También resalta la importancia del desgasificado al vacío para mejorar la calidad superficial de las piezas.

La colada al vacío se presenta como una alternativa eficaz para obtener piezas con mejor acabado superficial y precisión dimensional en comparación con tecnologías como FDM, uno de los procesos más utilizados para fabricación aditiva. Además de producir piezas con propiedades mecánicas más homogéneas e independientes de la orientación [7][8]. Zmarzy et al. [9] analizaron la transferencia de errores dimensionales desde modelos impresos en 3D hacia piezas fundidas, observando una expansión del 5 % debido a la contracción de la resina vertida. Concluyeron que es fundamental aplicar compensaciones en el diseño y asegurar que el molde maestro esté libre de imperfecciones, ya que estas se replican en las piezas finales por el fenómeno denominado herencia tecnológica.

Wortmann et al. [10] estudiaron cómo la viscosidad de la resina de poliuretano y el tipo de curado de la silicona influyen en la fidelidad dimensional en colada al vacío. Para ello, las siliconas se desgasificaron durante 20 minutos y las resinas por 5 minutos. Determinaron que la calidad superficial depende en gran medida de la viscosidad de la resina, y que las siliconas de curado por adición generan menor contracción que las de curado por condensación. Se reportó una desviación máxima de -0.45 mm entre el modelo maestro y las piezas fundidas en moldes de curado por adición, debido principalmente al aire atrapado.

Ahmad et al. [11] utilizaron el método Taguchi para optimizar el proceso de colada al vacío, concluyendo que la resina a 30°C , molde a 60°C y vacío de 5 minutos reducen la contracción en un 52.4 %. Identificaron que el tiempo de vacío es el factor más influyente en la estabilidad dimensional.

Diversos autores [12][13][14] coincidieron en que los moldes de silicona presentan una vida útil limitada a menos de 50 ciclos de replicación, y que es necesario aumentar el tiempo de desgasificación a medida que se incrementa el número de réplicas. Strube et al. [15] identificaron que el principal factor de deterioro es la acumulación de diisocianato de las resinas de poliuretano. Como medida regenerativa, propusieron aplicar acetona durante una hora cada diez ciclos, lo que extendió la vida útil en un 32 %. Sin embargo, este tratamiento reduce el contenido de aceite de silicona, aditivo que mantiene la elasticidad del material, por lo tanto al complementar con una mezcla que incluía aceite de silicona (proporción 1:4), se logró aumentar la durabilidad del molde hasta en un 59 %.

Thian et al. [16] demostraron la alta precisión del proceso de colada al vacío mediante la fabricación de microengranajes, identificando como factores críticos el tiempo de mezcla, desgasificación, curado y temperatura. Se obtuvieron engranajes de 1 mm de diámetro con dientes de 60 μm de ancho y 38 μm de grosor. Kuo et al. [17] compararon engranajes fundidos en resina de poliuretano y epoxi, concluyendo que el poliuretano ofrece mayor resistencia a la abrasión y vida útil, mientras que los fabricados en epoxi mostraron fracturas prematuras debido a su fragilidad, además de optimizar el diseño de compuertas para la colada, concluyendo que la de un solo punto es el número de compuerta óptimo.

Diversos estudios han abordado factores que influyen en la precisión dimensional y propiedades mecánicas de piezas impresas en resina mediante tecnologías SLA y MSLA. Popescu et al. [18] y Štaffová et al. [19] coincidieron en que el tiempo de curado UV posterior es crítico para la estabilidad dimensional y resistencia mecánica, destacando que entre 30 y 60 segundos se logra mayor precisión (± 0.015 mm), y que tiempos mayores (hasta 60 minutos) permiten alcanzar una mayor densidad de reticulación y mejorar el desempeño mecánico. Asimismo, Nowacki et al. [20] reportaron una mejora del 38 % en resistencia con un curado posterior de al menos 30 minutos y una reducción significativa de la rugosidad superficial con un lavado óptimo de 10 minutos. En cuanto a la orientación de impresión diversos estudios [21][22][19] demostraron que ángulos elevados reducen la resistencia por menor adhesión entre capas, siendo más favorable imprimir en dirección perpendicular al esfuerzo de flexión y paralelo al esfuerzo de tensión. Por otro lado, Orzel et al. [23] compararon propiedades cualitativas en base a 15 criterios de tecnologías FDM y SLA, concluyendo que aunque SLA ofrece mayor resolución (4.69 vs. 4.48 en FDM), resulta más costosa y compleja; FDM, en cambio, es más adecuada para geometrías técnicas con bordes definidos, mientras que SLA sobresale en superficies curvas.

Actualmente, en la Universidad del Valle de Guatemala, no existe un proceso establecido para la fabricación de piezas en resina vertida utilizando moldes de silicona RTV ni de impresión 3D MSLA. Si bien la impresión 3D con tecnología FDM es una alternativa ampliamente utilizada, presenta limitaciones en estabilidad dimensional y resistencia mecánica, lo que genera la necesidad de explorar otros métodos de manufactura.

En el ámbito ingenieril, el desarrollo de aplicaciones miniaturizadas exige el diseño de piezas cada vez más pequeñas, lo que limita el uso de tecnologías como la impresión por deposición FDM, debido a su menor precisión. Aunque el maquinado CNC es una alternativa viable, su implementación para la producción de múltiples piezas puede no ser rentable en términos de costos operativos.

Este estudio tiene como objetivo comparar el desempeño mecánico de piezas fabricadas mediante impresión MSLA y resina vertida en moldes de silicona, estableciendo criterios para determinar qué método es más eficiente según la aplicación requerida. Adicionalmente, los resultados de esta investigación permitirán desarrollar una guía de fabricación de piezas con resina vertida, que podrá ser utilizada por futuros estudiantes para replicar, mejorar o adaptar el proceso.

4.1. Objetivo general

Comparar el desempeño mecánico de piezas fabricadas mediante impresión 3D MSLA y resina vertida en moldes de silicona RTV.

4.2. Objetivos específicos

- Fabricar probetas estandarizadas en impresión MSLA y resina vertida.
- Realizar pruebas mecánicas estandarizadas de tracción, flexión, compresión y corte en las probetas fabricadas.
- Realizar un estudio cuantitativo de acuerdo a los resultados de las probetas.
- Realizar una comparación cualitativa de los procesos de manufactura de resina vertida e impresión 3D MSLA.
- Desarrollar una guía de manufactura para piezas con resina vertida.

Definición del problema

Este trabajo se centra en la comparación de dos métodos de manufactura que utilizan resinas: impresión 3D por tecnología MSLA y manufactura por vertido de resina en moldes de silicona. Cada proceso presenta ventajas y limitaciones propias, derivadas de la forma en que la pieza se construye. La impresión 3D MSLA permite fabricar geometrías complejas con rapidez y alta precisión, pero puede presentar una menor homogeneidad estructural por el proceso de fabricación capa por capa, además la resina puede sufrir degradación por sobre exposición a la luz UV y ser más quebradiza.

Por otro lado, el proceso de resina vertida ofrece piezas con una estructura uniforme y hay una variedad de resinas que pueden ofrecer distintas propiedades mecánicas según la aplicación que se requiera. Aunque puede requerir mayor tiempo de preparación, control en la mezcla y curado, además de herramientas y pasos adicionales como la fabricación de moldes.

El problema radica en que no existe un proceso metodológico documentado que permita a los estudiantes y futuros investigadores de la Universidad del Valle de Guatemala seleccionar, implementar y comparar diferentes resinas para la manufactura con resina vertida y la carencia de una metodología estructurada para fabricar piezas impresas en 3D con tecnología MSLA.

Tampoco hay información suficiente sobre cuál tecnología resulta más adecuada para fabricar piezas funcionales según su aplicación.

Este proyecto se desarrolló con el objetivo de comparar ambos métodos de manufactura bajo un enfoque experimental, estableciendo procesos estandarizados para la fabricación de piezas y su evaluación mecánica aunque los materiales sean distintos y presenten propiedades mecánicas distintas, comparando además los procesos de fabricación.

6.1. Manufactura con resinas

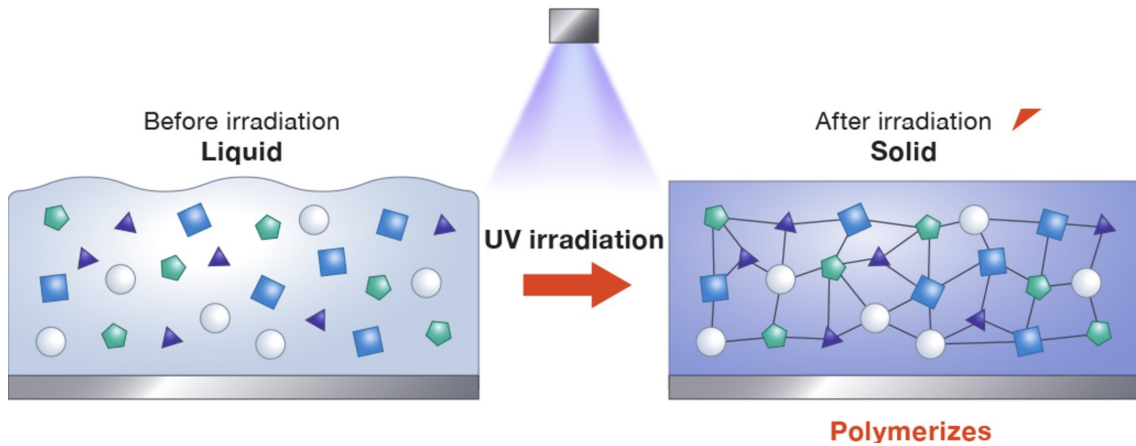
El uso de resina es muy utilizado para prototipado rápido en diferentes procesos de manufactura. En esta investigación se consideran dos enfoques principales: la manufactura aditiva, a través de la fotopolimerización, y la manufactura por moldeo, mediante procesos de catalización. Estas técnicas consisten en la solidificación selectiva de resina monomérica líquida mediante radiación ultravioleta así como en la polimerización exotérmica inducida por la adición de un catalizador, respectivamente [24].

La fotopolimerización es usada en procesos de estereolitografía (SLA), estereolitografía enmascarada (MSLA), procesamiento de luz digital (DLP), PolyJet y otros [24]. Siendo la de interés para este trabajo la estereolitografía enmascarada en impresión 3D.

6.1.1. Impresión 3D con resinas

Las impresoras 3D MSLA utilizan luz para curar materiales termoestables reactivos a la luz. Cuando las resinas se exponen a ciertas longitudes de onda de luz, las cadenas moleculares cortas se unen, polimerizando monómeros y oligómeros en geometrías rígidas o flexibles solidificadas [25]. En la Figura 1 se puede observar el proceso de fotopolimerización causado por la irradiación UV, esto produce que se creen los enlaces entre los monómeros. Mientras más tiempo se cure la resina más enlaces cruzados se formarán por lo tanto la pieza se volverá más rígida [26].

Figura 1. Fotopolimerización de resina para impresión 3D MSLA



Nota. Representación esquemática de lo que sucede a los monómeros de la resina durante el curado UV [26].

Tecnología MSLA - LCD

La tecnología SLA o estereolitografía fue desarrollada por la compañía 3D Systems en 1986, siendo la primera técnica de impresión 3D [24]. Hace uso de un rayo láser ultravioleta y los fotopolímeros líquidos (resinas) al estar expuestos a este rayo, se solidifican. Por lo que la técnica es solidificar sucesivamente capas del fotopolímero para formar la pieza final.

La mayoría de las impresoras MSLA poseen una pantalla LCD la cual se encarga de funcionar como una máscara. La estereolitografía enmascarada se refiere a cualquier proceso de fotopolimerización en el que una fuente de luz está cubierta o enmascarada selectivamente [27]. La pantalla LCD funciona bloqueando o dejando pasar la luz UV proporcionada por un panel LED UV de alto rendimiento, haciendo que solo ciertas zonas se proyecten en el fotopolímero y de esta forma se logre solidificar por regiones completas. Este mecanismo está limitado a la resolución de la LCD pero las impresoras MSLA proporcionan un acabado suavizado y tienen un detalle muy alto, haciendo que las capas sean casi imperceptibles para el ojo humano [28].

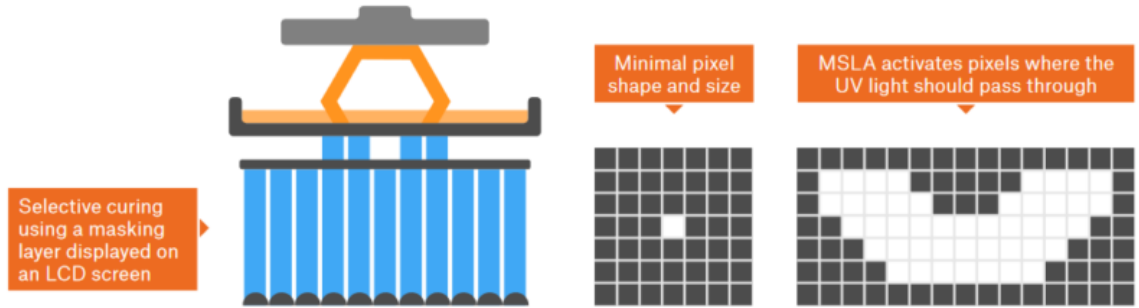
La longitud de onda que permite curar la resina líquida es típicamente de 405 nm.

En la Figura 2 se observa en la primera imagen de la izquierda, la pantalla LCD funcionando como filtro, en la imagen central se observa la resolución mínima dada por el tamaño de los píxeles de la pantalla y en la imagen de la derecha se observa como se forma una figura por medio de activar selectivamente los píxeles de la pantalla.

Ventajas y limitaciones

- **Ventajas:** más accesible que SLA y DLP, mayor velocidad de impresión.
- **Limitaciones:** dependencia de la resolución de la pantalla LCD y posacabado.

Figura 2. Metodología de impresión 3D MSLA - LCD



Nota. Funcionamiento del enmascarado producido por la pantalla LCD, cada cuadrado es un píxel de la pantalla [29].

6.1.2. Moldeo y vertido con resina

La **colada de resina** (*casting resin*) es un método de fabricación por moldeo que consiste en crear un molde para luego verter en él una resina polimérica líquida. Esta resina, al mezclarse con un catalizador, inicia un proceso de reticulación que genera una reacción exotérmica, solidificándose hasta formar una pieza rígida al finalizar el tiempo de curado [30]. Una vez que la pieza ha endurecido, se retira cuidadosamente del molde, el cual puede reutilizarse para producir múltiples réplicas [6].

Figura 3. Metodología de colada - vertido de resina



Nota. Proceso de manufactura por moldeo en resina por metodología de colada por vacío, la ausencia de la etapa de vacío da como resultado la metodología de colada por gravedad [29].

En la Figura 3 se muestra, de forma secuencial, el proceso de colada al vacío. Este inicia con el diseño de la geometría en CAD, seguido de la fabricación, pulido y acabado de la pieza maestra, ya que los detalles superficiales se transferirán directamente al producto final. Posteriormente, se fabrica el molde de silicona y se realiza el vertido de la resina. En la etapa de vacío, se extrae el aire atrapado en la mezcla, lo que mejora la calidad y reduce la presencia de burbujas internas. Si esta última etapa no se realiza, el proceso se denomina colada por gravedad. Finalmente, el procedimiento permite la producción en serie de la geometría deseada.

Ventajas y limitaciones

- **Ventajas:** alta capacidad de reproducción de detalles, versatilidad en materiales y posibilidad de personalización estética.
- **Limitaciones:** desgaste progresivo de los moldes y posacabado.

En la práctica, existen variantes del proceso de colada, como la colada asistida por vacío, colada a presión y colada por gravedad. En este estudio se empleó la **colada por gravedad**, aunque se recomienda explorar en trabajos futuros el uso de vacío o presión, los cuales permiten mejorar la calidad interna de las piezas al disminuir defectos como burbujas y porosidad.

6.1.3. Métodos de colada de resina

Dependiendo del tipo de resina, la complejidad de la pieza y la calidad superficial deseada, existen diferentes metodologías de colada utilizadas en la fabricación de piezas en resina.

Colada por gravedad (*gravity casting*)

La colada por gravedad es el método más simple y tradicional para la fabricación de piezas en resina. Consiste en verter la mezcla de resina directamente en el molde sin aplicar vacío ni presión externa. El llenado se realiza únicamente bajo el efecto de la gravedad, por lo que este método es adecuado para piezas con geometrías simples y resinas formuladas para curar sin asistencia operativa.

Colada al vacío (*vacuum casting*)

La colada al vacío es un proceso ampliamente utilizado a nivel industrial para la fabricación de piezas de poliuretano (PUR) y epóxicas (EP), especialmente cuando se requiere una alta fidelidad en los detalles y una superficie libre de defectos [4]. Este método consiste en colocar el molde dentro de una cámara de vacío durante varias etapas críticas del proceso como la desgasificación del material al mezclarlo, posterior al vertido de la resina en el molde y en algunos casos durante el curado inicial de la pieza. El objetivo es someter a vacío, permitiendo que la resina fluya mejor en cavidades finas del molde, extrayendo el aire que pudo quedarse atrapado, mejorando así la reproducción de detalles y la estructura interna de la pieza [12][31].

Colada por presión (*pressure casting*)

La colada por presión es un método de colada especialmente efectivo para reducir el tamaño de las burbujas internas y mejorar la densidad del material. En este proceso, el molde lleno de resina se coloca dentro de una cámara presurizada [32].

6.2. Tipos de resinas

Existe una amplia variedad de resinas, epóxicos, acrílicas, poliésteres o fotopolímeros. Este estudio se enfoca en los dos tipos de materiales empleados en los procesos evaluados.

6.2.1. Resinas de uretano

Las resinas de uretano son materiales termoestables que se caracterizan por su resistencia al impacto, flexibilidad y buena estabilidad dimensional. Una de sus principales ventajas es su baja contracción durante el curado, lo que permite obtener piezas con mayor precisión dimensional y menos deformaciones. Además, presentan tiempos de curado relativamente cortos y una alta versatilidad para replicar piezas en moldes de silicona [32].

En este trabajo se utilizó la resina **Smooth-Cast 305**, un uretano líquido de colada que cura a temperatura ambiente. Este material está diseñado para producir piezas rígidas y resistentes, con buena capacidad de reproducción de detalles [33].

Cuadro 1. Propiedades resina Smooth-Cast 305

Propiedad	Valor
Resistencia a la tracción	20.7 MPa (3,000 psi)
Resistencia a la compresión	26.2 MPa (3,800 psi)
Resistencia a la flexión	27.6 MPa (4,000 psi)
Alargamiento a la rotura %	7.5 %
Densidad	1.05 g/cm ³
Proporción de mezcla	100A:90B (peso)
Vida útil de mezcla (<i>Pot life</i>)	7 min
Tiempo de desmoldeo	30 min
Contracción	< 0.0065 %

Nota. Propiedades de Smooth-Cast 305 de Smooth-On extraído de ficha técnica del fabricante que se encuentra en el Anexo: 14. Elaboración propia.

6.2.2. Resinas fotocurables (MSLA)

Las resinas fotopoliméricas utilizadas en impresión 3D mediante tecnología SLA o MSLA son materiales líquidos que se solidifican selectivamente al ser expuestos a irradiación ultravioleta. Este proceso de fotopolimerización permite construir piezas capa por capa con una excelente resolución y precisión geométrica. Una limitación de las resinas fotocurables es su tendencia a degradarse con el tiempo por exposición a la luz UV y humedad, lo que puede alterar sus propiedades mecánicas. Por ello, es fundamental realizar un curado posterior controlado y considerar condiciones de almacenamiento adecuadas.

Para este estudio se empleará la resina **eSUN Hard Tough**, un material formulado para aplicaciones que requieren mayor resistencia mecánica y durabilidad. Esto ya que ofrece una combinación de alta rigidez, resistencia a impactos moderados y menor fragilidad [34].

Cuadro 2. Propiedades resina eSUN Hard Tough

Propiedad	Valor
Resistencia a la tracción	30–60 MPa
Alargamiento a la rotura %	35-52 %
Resistencia a la flexión	30–75 MPa
Densidad	1.08-1.12 g/cm ³
Longitud de onda de curado	405 nm
Dureza (shore D)	75-81
Viscosidad	200-300 mPa*s

Nota. Propiedades de eSUN Hard Tough extraído de ficha técnica del fabricante que se encuentra en el Anexo: 16. Elaboración propia.

6.3. Manufactura de moldes de silicona [12]

6.3.1. Tipos de moldes

Según la geometría de la pieza, la complejidad de desmoldeo y el método de colada empleado, los moldes utilizados pueden clasificarse en distintos tipos:

Moldes abiertos

Son los más simples. No poseen línea de separación ni bebedero independiente, y tanto el llenado como el desmoldeo se realizan a través de la misma abertura. Se utilizan principalmente en piezas planas o de geometría simple.

Moldes semiabiertos

En este tipo de moldes, la cavidad está completamente cerrada dentro de un solo bloque de silicona, pero con una línea de separación discontinua. La extracción de la pieza se realiza estirando la silicona, por lo que es necesario utilizar materiales con alta resistencia al desgarro y buena elasticidad. Este diseño es adecuado para piezas sin grandes socavados.

Moldes con socavados o geometría compleja

Cuando las piezas presentan salientes, huecos o cavidades internas (socavados), es necesario incluir líneas de separación adicionales o núcleos desmontables para facilitar el desmoldeo. La correcta planificación de estas líneas es fundamental para preservar la integridad de la pieza y del molde.

6.3.2. Materiales para moldes de silicona

Si bien existen otros tipos de siliconas utilizadas en la fabricación de moldes como las siliconas de curado por platino (*platinum cure*), conocidas por su mayor estabilidad, durabilidad y resistencia química tienden a ser más costosas. Este trabajo se enfoca exclusivamente en la silicona **Mold Max 14NV**, fabricada por Smooth-On, la cual es una silicona de curado por estaño (*tin-cure*), ampliamente utilizada en procesos de colada debido a su baja viscosidad y su capacidad para reproducir detalles finos sin necesidad de desgasificación en cámara de vacío [35]. La elección se basó en su disponibilidad en el mercado local, facilidad de uso y compatibilidad comprobada con resinas de poliuretano.

Cuadro 3. Propiedades silicona Mold Max 14NV

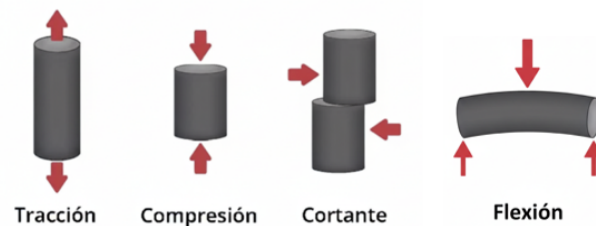
Propiedad	Valor
Dureza (shore A)	14
Mezcla por peso	100A : 10B
Viscosidad de la mezcla	7,500 cps
Vida útil de mezcla (<i>Pot life</i>)	40 min
Tiempo de curado total	4 h
Resistencia a la tracción	3.38 MPa (490 psi)
Resistencia al desgarre	19.3 kN/m (87 pli)
Alargamiento a la rotura	600 %
Contracción	< 0.002 %

Nota. Propiedades de la silicona Mold Max 14NV extraído de ficha técnica del fabricante que se encuentra en el Anexo: 15. Elaboración propia.

6.4. Ensayos mecánicos [36]

Los ensayos mecánicos permiten estudiar el comportamiento de los materiales cuando se someten a diferentes tipos de esfuerzos. Su objetivo principal es analizar la relación entre las fuerzas aplicadas y las deformaciones resultantes, así como determinar los esfuerzos límite que pueden provocar fallas en un material.

Figura 4. Tipos de esfuerzos mecánicos



Nota. Esfuerzos analizados, modo en que las probetas son cargadas y visualización de la deformación que experimenta el material en cada caso [37].

6.4.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta normalizada a una fuerza axial creciente hasta su rotura. Este ensayo permite obtener propiedades fundamentales como el esfuerzo máximo, el módulo elástico (módulo de Young) y la elongación [38].

El esfuerzo se define como la relación entre la fuerza aplicada y el área de la sección transversal de la probeta:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:

- σ es el esfuerzo, expresado en pascales (Pa).
- F es la fuerza axial aplicada, en newtons (N).
- A es el área inicial de la sección transversal, en metros cuadrados (m^2).

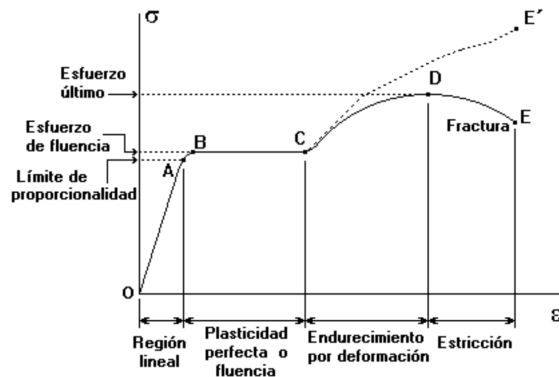
La deformación unitaria (*strain*) se calcula como:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Donde:

- ϵ es la deformación unitaria (adimensional).
- ΔL es el cambio en la longitud de la probeta (mm).
- L_0 es la longitud inicial de la probeta (mm).

Figura 5. Gráfico esfuerzo-deformación de un polímero



Nota. Curva típica esfuerzo-deformación en un ensayo de tracción [38].

Como se puede observar en la Figura 5 se presenta un gráfico típico de esfuerzo-deformación que se construye a partir de los datos obtenidos del ensayo de tracción. En este gráfico se puede identificar distintas zonas:

- **Zona lineal o elástica:** el material se deforma de manera proporcional al esfuerzo aplicado, cumpliendo la ley de Hooke. Al retirar la carga, recupera su forma original.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3)$$

donde E es el módulo de elasticidad o módulo de Young.

- **Zona de fluencia:** una vez superado el límite elástico, el material inicia la deformación plástica. En esta región pueden presentarse el esfuerzo de fluencia y una zona de deformación casi constante.
- **Endurecimiento por deformación:** a medida que la probeta continúa deformándose, se requiere un mayor esfuerzo para seguir extendiendo el material debido al alineamiento de las cadenas poliméricas.
- **Estricción:** después del esfuerzo máximo, el material presenta una reducción localizada en su sección transversal, disminuyendo la resistencia aparente.
- **Zona de fractura:** finalmente, la probeta alcanza su esfuerzo último y ocurre la falla del material.

6.4.2. Ensayo de compresión

El ensayo de compresión se utiliza para determinar la capacidad del material de resistir a fuerzas que tienden a acortarlo. Es especialmente relevante en materiales frágiles como ciertas resinas fotopoliméricas, que presentan buena resistencia a la compresión pero baja ductilidad.

La resistencia a la compresión se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0} \quad (4)$$

Donde:

- σ_c es el esfuerzo de compresión (Pa).
- F es la fuerza aplicada (N).
- A_0 es el área inicial de la sección transversal (m^2).

6.4.3. Ensayo de flexión

El ensayo de flexión evalúa la capacidad de un material para resistir esfuerzos combinados de tensión y compresión, producidos por una carga puntual perpendicular a su eje longitudinal. Se utilizó el método de flexión en tres puntos, en el cual la probeta se apoya en dos extremos y la carga puntual se aplica en el centro de la probeta.

La resistencia a la flexión se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (5)$$

Donde:

- σ_f es el esfuerzo de flexión (Pa).
- F es la fuerza aplicada en el centro (N).
- L es la distancia entre los apoyos (m).
- b es el ancho de la probeta (m).
- d es el espesor de la probeta (m).

6.4.4. Ensayo de corte

El ensayo de corte permite evaluar la resistencia de un material frente a esfuerzos cortantes, los cuales se producen cuando las fuerzas aplicadas tienden a deslizar una sección sobre otra.

En este trabajo, las probetas fueron ensayadas bajo la configuración de **corte doble**, la cual permite aplicar la carga simultáneamente en dos planos paralelos de corte. De esta manera, el esfuerzo cortante efectivo se distribuye sobre dos áreas idénticas, mejorando la precisión del resultado y reduciendo la posibilidad de flexión o torsión en la muestra durante la prueba.

La resistencia al corte se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{F}{2A} \quad (6)$$

Donde:

- τ es el esfuerzo cortante (Pa).
- F es la fuerza aplicada durante el ensayo (N).
- A es el área de la sección transversal de corte (m²).

6.5. Medidas estadísticas [39]

Para analizar el comportamiento mecánico de las probetas y comparar los procesos de manufactura evaluados, fue necesario utilizar medidas estadísticas descriptivas que permitan resumir, interpretar y comparar los datos obtenidos en los ensayos realizados.

6.5.1. Media aritmética

La media aritmética representa el valor promedio de un conjunto de mediciones y permite obtener una estimación central del comportamiento del material. Se define como:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

donde:

- \bar{x} = media aritmética,
- x_i = cada valor individual de la muestra,
- n = número total de datos.

6.5.2. Mediana

La mediana es el valor central de un conjunto de datos ordenados. Esta medida es útil cuando existen valores atípicos o dispersión irregular, ya que no se ve afectada por extremos y refleja mejor la tendencia central en distribuciones asimétricas.

6.5.3. Desviación estándar

La desviación estándar indica el grado de dispersión de los datos respecto a la media y permite evaluar la consistencia entre probetas de un mismo proceso. Se calcula como:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

donde:

- s = desviación estándar,
- x_i = cada valor individual,
- \bar{x} = media aritmética del conjunto,
- n = número total de datos.

6.5.4. Coeficiente de variación

El coeficiente de variación (CV) es una medida adimensional que permite comparar la variabilidad relativa entre diferentes conjuntos de datos, incluso cuando sus magnitudes son distintas. Es especialmente útil para analizar la consistencia de los materiales y se calcula mediante:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \% \quad (9)$$

donde:

- CV = coeficiente de variación,
- s = desviación estándar,
- \bar{x} = media aritmética.

6.5.5. Rango intercuartílico (IQR)

El rango intercuartílico (IQR, por sus siglas en inglés) mide la dispersión de los datos considerando únicamente el 50 % central de la distribución, definido como:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (10)$$

donde:

- IQR = rango intercuartílico,
- Q_1 = primer cuartil (25 %),
- Q_3 = tercer cuartil (75 %).

En este capítulo se describen los procesos experimentales llevados a cabo para la fabricación de las probetas mediante dos métodos de manufactura: la manufactura aditiva por impresión 3D con tecnología MSLA y la manufactura por moldeo mediante vertido de resina. Asimismo, se presenta la metodología desarrollada para la elaboración de los moldes de silicona utilizados en el proceso de colada.

7.1. Impresión 3D MSLA

Para la fabricación de las probetas con tecnología MSLA, se utilizó la impresora Anycubic Photon Mono X 6K y la resina eSUN Hard Tough.

La metodología detallada (paso a paso) se encuentra descrita en la “metodología impresión 3D con tecnología MSLA”, en el Anexo 9 de este trabajo. A continuación se presentan las etapas globales que resumen el procedimiento de impresión 3D MSLA y se indica el rango de pasos que corresponden dentro de la metodología de manufactura presentada.

1. **Preparación y calibración:** se calibra la plataforma de impresión siguiendo el manual de usuario correspondiente, el cual se encuentra en el Anexo 7.
2. **Diseño en computadora (CAD):** se modelaron las probetas de acuerdo a la geometría establecida por cada una de las normas. Posterior a las primeras pruebas se iteró en la geometría hasta alcanzar el diseño final. Pasos (1-2).
3. **Generación del archivo laminado:** en el software Anycubic Photon Workshop se genera el archivo en formato `.pwm`, que se carga en la impresora mediante USB. Pasos (3-4).

4. **Impresión:** configurar los parámetros del Cuadro 4, iniciar la impresión y monitorear periódicamente para evitar fallas de impresión o problemas de adherencia. Pasos (5-19).
5. **Procesado posterior:** las piezas se lavan en alcohol isopropílico y luego se someten a curado posterior UV por al menos 20 minutos en la máquina Anycubic Wash & Cure Plus 3.0 para alcanzar las propiedades mecánicas finales. Pasos (20-30).

Parámetros de impresión para resina eSUN Hard Tough

Para definir los parámetros de impresión dentro del software Anycubic Photon Workshop se tomó como referencia los parámetros estándar establecidos por Anycubic en su página oficial para la impresora Photon Mono X 6K.

Figura 6. Perfiles estándar de impresión Anycubic Photon Mono X 6K

Tipo de Resina	Resina Estándar	Resina Basada en Plantas	DLP Craftsman Resina	Resina Tosca UV	Resina de Agua-Lavado+	Resina Estándar*	Resina Alta Transparente	ABS-Like Resina V2	Resina de Alta Velocidad	Resina Estándar V2	ABS-Like Resina Pro 2	Resina Dura 2.0	Resina Dura Ultra	ABS-Like Resina Pro	ABS-Like Resin+	Resina Basada en Plantas*
Espesor de la Capa	0.05mm	0.05mm	0.05mm	0.05mm	0.05mm	0.05mm	0.05mm	0.05mm	/	0.05mm	0.05mm	0.05mm	0.05mm	0.05mm	0.05mm	0.05mm
Tiempo de Exposición	2s	2.3s	2.5s	2s	2s	2s	4s	2s	/	2s	2s	2s	2s	2s	2s	2s
Tiempo de Apagado	0.5s	0.5s	0.5s	0.5s	0.5s	0.5s	0.5s	0.5s	/	0.5s	0.5s	1s	1s	0.5s	0.5s	0.5s
Tiempo de Exposición Inferior	23s	23s	40s	23s	23s	23s	23s	23s	/	25s	25s	28s	28s	23s	23s	25s
Capa Inferior	6	6	8	6	6	6	6	6	/	6	6	6	6	6	6	6
Z Distancia de elevación	8mm	8mm	8mm	8mm	8mm	8mm	8mm	8mm	/	8mm	8mm	8mm	8mm	8mm	8mm	8mm
Z Velocidad de elevación	2mm/s	2mm/s	2mm/s	2mm/s	2mm/s	8mm	2mm/s	2mm/s	/	2mm/s	2mm/s	2mm/s	2mm/s	2mm/s	2mm/s	2mm/s
Velocidad de retracción Z	3mm/s	3mm/s	3mm/s	3mm/s	3mm/s	2mm	3mm/s	3mm/s	/	3mm/s	3mm/s	3mm/s	3mm/s	3mm/s	2mm/s	3mm/s
Nivel Anti-aliasing	1	1	1	1	1	1	1	1	/	1	1	1	1	1	1	1

Nota. Cuadro obtenido de la página oficial de Anycubic, se muestran parámetros estándar base para impresión de distintos tipos de resinas que se encuentran en el mercado [40].

Cuadro 4. Parámetros de impresión resina eSUN Hard Tough

Parámetro	Valor
Espesor de capa	0.050 mm
Tiempo normal de exposición	2 s
Tiempo de apagado	0.5 s
Tiempo de exposición inicial	30 s
Número de capas iniciales	6
Distancia de elevación Z	8 mm
Velocidad de elevación Z	2 mm/s
Velocidad de retracción Z	3 mm/s
Nivel <i>anti-aliasing</i>	1

Nota. Parámetros de impresión definidos experimentalmente para la impresión con resina eSUN Hard Tough en Anycubic Photon Mono X 6K. Elaboración propia.

En la Figura 6 se presentan los parámetros estándar recomendados por el laboratorio de Anycubic para distintos tipos de resinas utilizadas en la impresora Anycubic Photon Mono X 6K. Para el objetivo de este estudio, se tomó como referencia los parámetros de la columna: resina dura 2.0 y resina dura ultra. A partir de estos valores iniciales, se realizaron pruebas de impresión y se ajustaron algunos parámetros de forma iterativa hasta obtener el perfil óptimo de impresión, mostrado en el Cuadro 4. Este perfil permitió llevar a cabo todas las impresiones de manera correcta y con resultados satisfactorios.

Cabe destacar que el único parámetro que difiere con respecto a la referencia de Anycubic es el tiempo de exposición inferior, el cual determina el tiempo de curado o exposición UV de las primeras capas. Estas capas iniciales son críticas, ya que deben adherirse firmemente a la plataforma de impresión para evitar fallas por desprendimiento durante el proceso.

7.2. Fabricación de moldes de silicona RTV

Se utilizó la silicona **Mold Max 14 NV** de Smooth-On por su adecuada viscosidad y facilidad de aplicación sin requerir desgasificación. La metodología detallada se encuentra descrita en la “metodología realización de moldes de silicona RTV”, en el Anexo 10 de este trabajo. A continuación se presentan las etapas globales que resumen el procedimiento para la realización de los moldes de silicona.

Etapas del proceso

1. **Diseño y fabricación de las cajas contenedoras:** se diseñaron las cajas en software CAD considerando las dimensiones de las probetas y un espesor mínimo de pared de 13 mm para garantizar rigidez. Los archivos de corte fueron generados y posteriormente fabricados mediante corte láser. Pasos (1–4).
2. **Preparación del área de trabajo y materiales:** se acondicionó el espacio de trabajo, se verificó la limpieza de las cajas contenedoras y se prepararon los materiales, equipo de protección personal y herramientas necesarias. Pasos (5–7).
3. **Cálculo y preparación de la mezcla de silicona:** se calculó la cantidad de material requerida utilizando la calculadora del fabricante disponible en [Smooth-On](#). Posteriormente, se pesaron los componentes A y B de la silicona Mold Max 14 NV siguiendo la proporción **100A:10B**, mezclándolos manualmente por 2 minutos con movimientos suaves para minimizar la incorporación de aire. Pasos (8–10).
4. **Vertido de la mezcla:** la mezcla se vertió lentamente en el punto más bajo de la caja contenedora, permitiendo que la silicona fluyera alrededor de la pieza maestra hasta cubrirla completamente. Pasos (11–14).
5. **Curado y desmoldeo:** el molde se dejó curar a temperatura ambiente durante 4 horas. Posteriormente, se retiraron las paredes acrílicas y se desmoldeó cuidadosamente la pieza maestra, verificando la integridad y calidad del molde obtenido. Pasos (15–18).

7.3. Proceso de vertido de resina

Este proceso se realizó con el objetivo de obtener piezas isotrópicas. El procedimiento detallado se encuentra descrito en la “metodología realización de vertido de resina”, en el Anexo 11 de este trabajo. A continuación se presentan las etapas globales que resumen el procedimiento para la realización del vertido de resina.

Etapas del proceso

1. **Preparación del molde y del área de trabajo:** se seleccionó el molde de silicona previamente fabricado y se preparó el área de trabajo, verificando que la temperatura se mantuviera entre 20 °C y 25 °C y que la humedad fuera controlada para evitar defectos de curado. Se colocaron tapetes de silicona para evitar derrames, se preparó la balanza, los recipientes de mezcla y las herramientas necesarias. Pasos (1–2).
2. **Medidas de seguridad:** antes de manipular los materiales, se colocó el equipo de protección personal (EPP) requerido, incluyendo guantes de nitrilo, mascarilla y gafas de seguridad. Paso (3).
3. **Preparación y mezclado de la resina:** se agitaron los componentes A y B de la resina Smooth-Cast 305 y se midieron con precisión siguiendo la proporción de mezcla establecida (1A:1B en volumen o 100A:90B en peso). La mezcla se realizó manualmente durante 1 minuto en un recipiente de 64 oz, raspando las paredes para asegurar la homogeneidad. En caso de requerirse mejor calidad superficial, se puede aplicar una etapa opcional de desgasificación en cámara de vacío. Pasos (6–9).
4. **Vertido de la resina:** se vertió lentamente la mezcla en el punto más bajo del molde, permitiendo que la resina fluyera sin formar burbujas de aire. Si se dispone de cámara de vacío, el molde puede someterse nuevamente a desgasificación posterior al vertido para eliminar burbujas internas (opcional). Pasos (10–11).
5. **Curado:** la resina se dejó curar a temperatura ambiente durante 30 minutos, asegurando que el molde se enfriara completamente antes del desmoldeo debido a la reacción exotérmica generada por la catalización. Pasos (12–14).
6. **Desmoldeo, inspección y verificación:** se realizó el desmoldeo de la pieza con cuidado para evitar dañar el molde, se limpiaron rebabas y se efectuó una inspección visual para detectar posibles defectos como burbujas o deformaciones. Finalmente, se verificaron las dimensiones y tolerancias de las probetas fabricadas. Pasos (15–17).

7.4. Selección y preparación de probetas

En esta sección se describen las dimensiones y geometrías de las probetas empleadas en los ensayos mecánicos realizados en este estudio. Las dimensiones se definieron tomando como referencia los estándares internacionales ISO 527, ISO 178, ASTM D695 y ASTM D732, correspondientes a los ensayos de tracción, flexión, compresión y corte, respectivamente.

Como primer paso, se seleccionaron las normas aplicables a cada tipo de ensayo. Sin embargo, debido a la naturaleza frágil del material evaluado y a la alta capacidad de la máquina universal de ensayos disponible en la universidad, fue necesario realizar varias iteraciones de diseño con el fin de evitar fallas prematuras y garantizar resultados representativos.

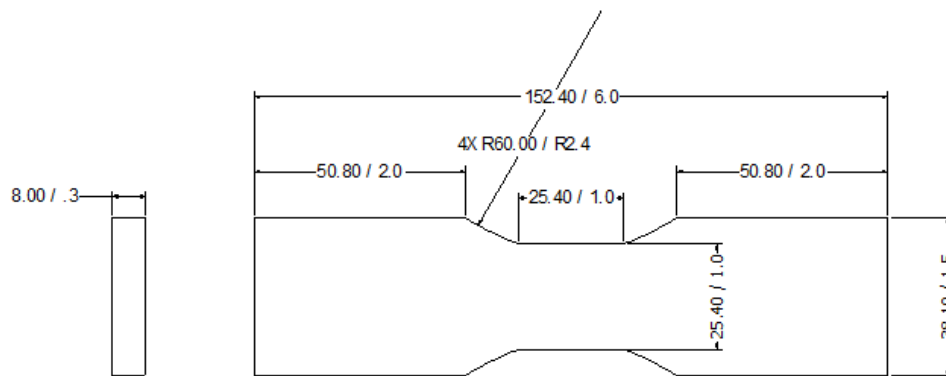
Para los ensayos de tracción y compresión se utilizó la máquina universal de ensayos Versa Tester de la marca Soiltest, con una capacidad máxima de 60,000 lb. Inicialmente se emplearon las geometrías establecidas por las normas, pero se efectuaron tres iteraciones adicionales incrementando progresivamente el área transversal en la zona de aplicación del esfuerzo. Este proceso permitió obtener un diseño final que cumplió con el requerimiento establecido por los encargados del laboratorio de ensayos mecánicos del departamento de ingeniería civil, quienes solicitaron que las probetas soportaran cargas superiores a 1,000 lb en una máquina con capacidad de 60,000 lb. Esta modificación buscó reducir el margen de error asociado a la medición de fuerzas y asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Para el ensayo de flexión se utilizó una máquina de compresión adaptada de la marca Soiltest U-600, equipada con una base de madera que funcionó como sistema de dos apoyos para la realización del ensayo en tres puntos. Este equipo tiene una capacidad de aplicación de carga de hasta 1,000 lb.

Finalmente, para el ensayo de corte se empleó una prensa mecánica Soiltest CN-472Y P/CBR, con capacidad de hasta 6,000 lb de carga. En este equipo se utilizó un accesorio de cizallamiento en dos puntos.

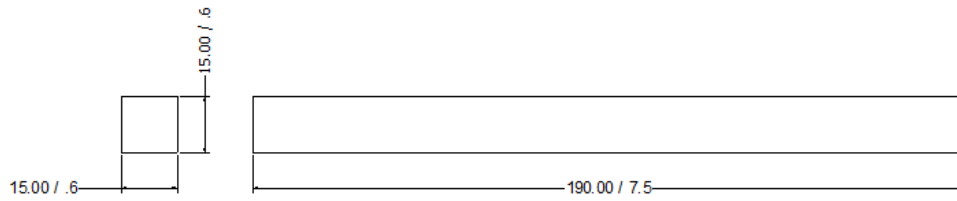
A continuación, se presentan las geometrías finales de las probetas utilizadas en cada ensayo, junto con sus dimensiones principales en dimensionales (milímetros / pulgadas).

Figura 7. Probeta ensayo tensión-tracción



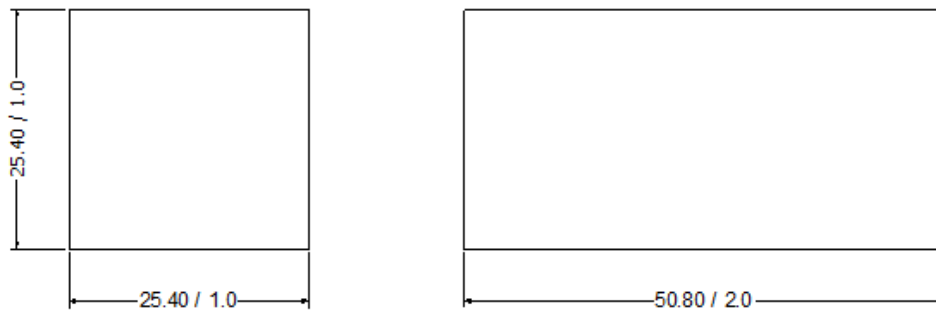
Nota. Dimensiones finales de la probeta para ensayo de tracción (ISO 527 adaptada). Elaboración propia.

Figura 8. Probeta ensayo flexión



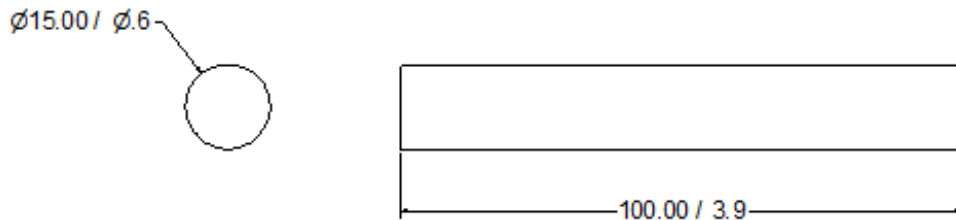
Nota. Dimensiones finales de la probeta para ensayo de flexión (ISO 178 adaptada). Elaboración propia.

Figura 9. Probeta ensayo compresión



Nota. Dimensiones finales de la probeta para ensayo de compresión (ASTM D695 original). Elaboración propia.

Figura 10. Probeta ensayo corte

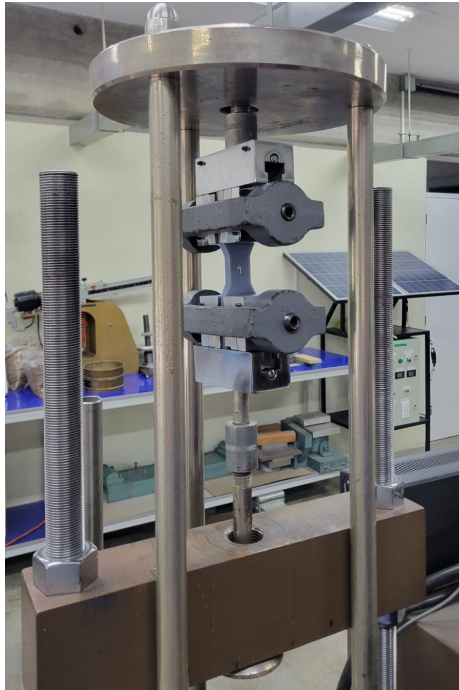


Nota. Dimensiones finales de la probeta para ensayo de corte (ASTM D732 adaptada). Elaboración propia.

7.5. Ensayos mecánicos

En esta sección se describe la configuración empleada en cada máquina de ensayos para la realización de las pruebas mecánicas de tracción, flexión, compresión y corte. A continuación, se muestran las configuraciones de montaje utilizadas en cada uno de los ensayos:

Figura 11. Configuración de la máquina para el ensayo de tracción



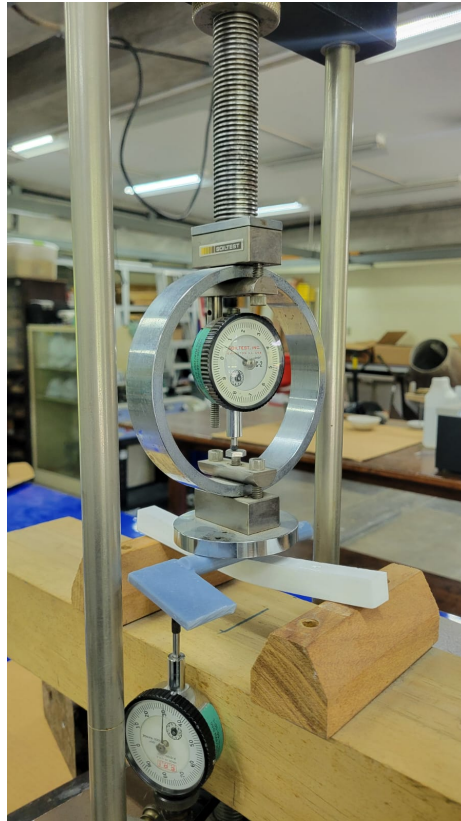
Nota. Configuración del montaje de la máquina universal de ensayos Soiltest Versa Tester para el ensayo de tracción. Elaboración propia.

Figura 12. Configuración de accesorio para ensayo de corte



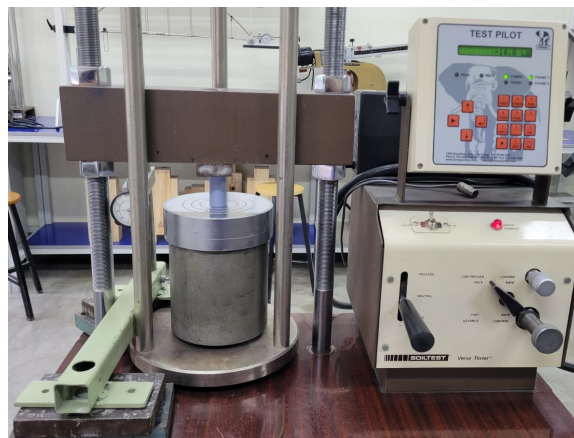
Nota. Detalle del accesorio de doble cizallamiento utilizado en el ensayo de corte. Elaboración propia.

Figura 13. Configuración de la máquina para el ensayo de flexión



Nota. Configuración del montaje de la máquina de compresión Soiltest U-600 para el ensayo de flexión en tres puntos. Elaboración propia.

Figura 14. Configuración de la máquina para el ensayo de compresión



Nota. Configuración de la máquina universal de ensayos Soiltest Versa Tester para el ensayo de compresión. Elaboración propia.

Discusión y resultados de ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos fueron realizados en el laboratorio de materiales 1, ubicado en la Universidad del Valle de Guatemala. Para este estudio se realizaron un total de siete ensayos para cada una de las pruebas estandarizadas: tracción (ISO 527), compresión (ASTM D695) corte (ASTM D732) y flexión (ISO 178). Aunque las normas establecen un mínimo de cinco ensayos por prueba, se decidió realizar dos ensayos adicionales como medida de seguridad, para asegurar que al menos cinco resultados válidos estuvieran disponibles en caso de que alguna muestra presentara defectos de fabricación, errores de medición o tuviera algún comportamiento atípico. No se presentó ningún caso por lo tanto la muestra fue de 7 ensayos por prueba.

Durante los ensayos se registraron las magnitudes de fuerza aplicada y alargamiento, exceptuando el ensayo de corte. Estos datos permitieron calcular los valores de esfuerzo correspondientes, así como generar las curvas esfuerzo-deformación para cada material.

Dado que los materiales y los métodos de fabricación analizados presentan naturalezas distintas, se realizó un análisis estadístico de la variabilidad dentro de cada grupo de resultados. La desviación estándar permite estimar cuánto se desvían los valores individuales respecto al promedio, aunque puede verse afectada por la presencia de valores atípicos. Por ello, este indicador se complementa con el rango intercuartílico (IQR), que representa la dispersión del 50 % central de los datos, proporcionando una medida más robusta frente a valores extremos. Finalmente, se incluye el coeficiente de variación, el cual relaciona la desviación estándar con la media, permitiendo evaluar la consistencia relativa de los resultados; valores inferiores al 10 % se consideran indicativos de una baja variabilidad y de un proceso experimental confiable y repetible.

El procedimiento detallado de como se desarrolló la metodología experimental para la realización de los diferentes tipos de ensayos se encuentra descrito en la "metodología realización de ensayos estandarizados", en el Anexo 12 de este trabajo.

8.1. Ensayo de tracción (ISO 527)

El ensayo de tracción se realizó conforme a la norma ISO 527 utilizando la máquina de ensayos universal Versa Tester con capacidad de 60,000 lbs. Cada muestra se colocó en las mordazas como se puede observar en la Figura 11 y se aplicó una carga axial creciente hasta la rotura de la probeta.

Cuadro 5. Resumen de resultados del ensayo de tracción para probetas de impresión 3D MSLA

Medida estadística	Fuerza última (N)	Esfuerzo último (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
Promedio (Media)	9499.975	48.469	0.227	212.723
Mediana	9618.800	49.076	0.230	206.330
Desviación estándar	779.873	3.979	0.017	20.858
Coefficiente de variación (%)	8.209	8.209	7.503	9.805
IQR	1245.440	6.354	0.028	31.160

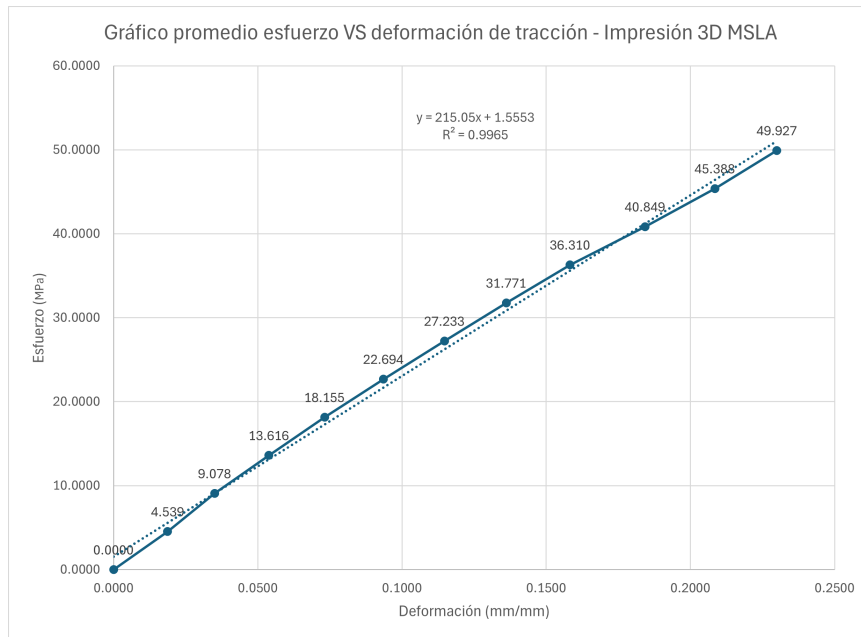
Nota. Resumen estadístico de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción para las probetas fabricadas con resina MSLA. Elaboración propia.

Cuadro 6. Resumen de resultados del ensayo de tracción para probetas de resina vertida

Medida estadística	Fuerza última (N)	Esfuerzo último (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
Promedio (Media)	4777.787	24.376	0.199	105.514
Mediana	4817.184	24.577	0.185	124.990
Desviación estándar	339.927	1.734	0.035	39.616
Coefficiente de variación (%)	7.115	7.115	17.866	37.546
IQR	193.488	0.987	0.026	47.275

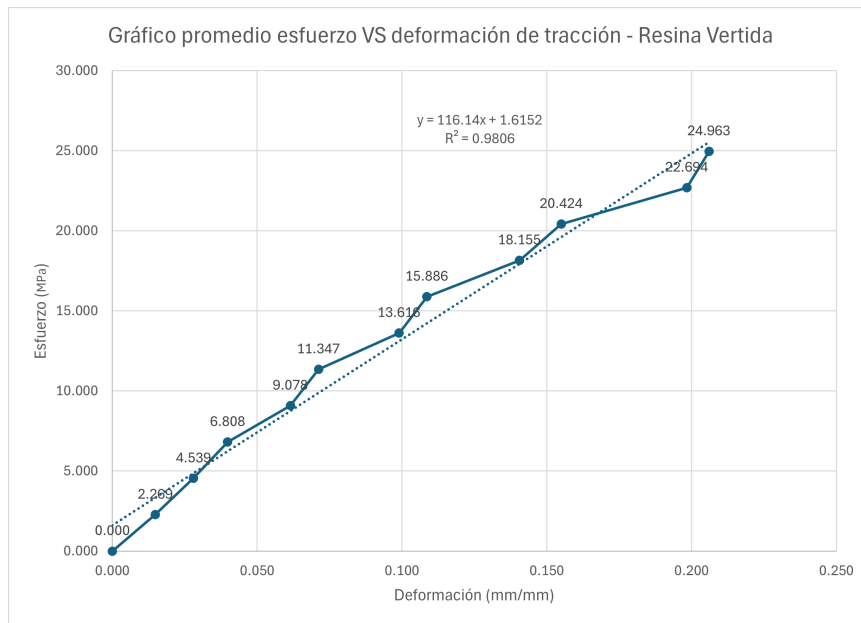
Nota. Resumen estadístico de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción para las probetas de resina vertida. Elaboración propia.

Figura 15. Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de tracción para impresión 3D MSLA



Nota. En este gráfico se puede observar el comportamiento casi lineal de esfuerzo deformación del material en promedio. Elaboración propia.

Figura 16. Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de tracción para resina vertida



Nota. Se observa la variabilidad en el proceso de colada, coincidente con el coeficiente de variación del módulo de elasticidad. Elaboración propia.

En la Figura 15 se puede observar la gráfica promedio de esfuerzo vs deformación de los 7 ensayos a tracción realizados para las probetas impresas en 3D MSLA. En el Cuadro 13 que se encuentra en el Anexo 1 se puede observar cada uno de los valores promedio de fuerza, alargamiento, deformación y esfuerzo, resultado de las mediciones muestreadas cada 200 lbs. de cada probeta de impresión 3D MSLA. Por otro lado en la Figura 16 y el Cuadro 16 que se encuentra en el Anexo 4, se muestra el gráfico esfuerzo vs deformación para los ensayos de tracción de resina vertida y los valores promedio de los ensayos respectivamente.

Los resultados del ensayo de tracción muestran una diferencia significativa entre las probetas fabricadas mediante impresión 3D MSLA y las obtenidas por resina vertida. Tal como se observa en los Cuadros 5 y 6, las probetas MSLA presentaron un esfuerzo último promedio de 48.47 MPa, mientras que las de resina vertida alcanzaron únicamente 24.38 MPa, lo que representa aproximadamente un incremento del 99 % en la resistencia a tracción para el material impreso. Esta diferencia era esperable considerando las propiedades reportadas en las fichas técnicas.

El módulo de elasticidad promedio también refleja este comportamiento, con valores de 212.72 MPa para las probetas MSLA frente a 105.51 MPa para las de resina vertida. Esto evidencia que las piezas impresas presentan una mayor rigidez y menor capacidad de deformación elástica, lo cual se asocia al proceso de fotopolimerización capa por capa característico de la tecnología MSLA que genera una estructura más densa y menos propensa a deformación plástica.

Por otro lado, la deformación unitaria promedio fue ligeramente superior en las probetas MSLA (0.227 mm/mm) en comparación con las de resina vertida (0.199 mm/mm). Sin embargo, al analizar la dispersión de los datos, se observa que la desviación estándar de la deformación en las probetas MSLA (0.017 mm/mm) en comparación a las de resina vertida (0.035 mm/mm) refleja que las probetas de resina vertida tuvieron un 105 % más de variabilidad respecto al promedio en el comportamiento mecánico y el coeficiente de variación de la deformación en las probetas vertidas (17.87 %) es 139 % mayor que en las probetas MSLA (7.50 %). Esto indica mayor variabilidad en la consistencia de las propiedades mecánicas de la resina vertida, debido a factores como la presencia de burbujas ya que este ensayo si se ve afectado críticamente por desperfectos en su composición ya que provocaría la falla en la irregularidad.

En cuanto a la variabilidad de la resistencia de los materiales, la fuerza última y el esfuerzo último están estrechamente relacionados, en las probetas de resina vertida se presentó un coeficiente de variación de 7.1 %, ligeramente inferior al 8.2 % obtenido para las probetas MSLA. Resaltando la menor variabilidad en las propiedades mecánicas del material. No obstante, la mayor diferencia se observó en el módulo de elasticidad, donde las probetas MSLA mostraron una variabilidad del 9.8 %, mientras que las de resina vertida alcanzaron hasta un 37 %. Esta variabilidad es de una magnitud calculada por lo que no está estrechamente relacionada con las propiedades del material pero da un indicativo de la variación que dio el resultado en las diferentes muestras ensayadas.

Finalmente, el comportamiento casi lineal observado en las Figuras 15 y 16 que corresponden a las curvas esfuerzo–deformación de ambos grupos, indica que los materiales se comportan de manera predominantemente frágil, sin una fase de deformación plástica apreciable antes de la rotura.

8.2. Ensayo de flexión (ISO 178)

El ensayo de flexión en tres puntos se realizó de acuerdo con la norma ISO 178, con el objetivo de evaluar la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad en flexión del material. Los especímenes se apoyaron sobre dos puntos de soporte y se aplicó una carga central hasta alcanzar la falla o la deformación máxima permitida.

Cuadro 7. Resumen de resultados del ensayo de flexión para probetas de impresión 3D MSLA

Medida estadística	Fuerza última (N)	Esfuerzo último (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
Promedio (Media)	950.601	57.036	0.051	64.847
Mediana	951.872	57.112	0.054	71.117
Desviación estándar	117.057	7.023	0.023	30.542
Coefficiente de variación (%)	12.314	12.314	46.346	47.098
IQR	195.712	11.743	0.016	22.722

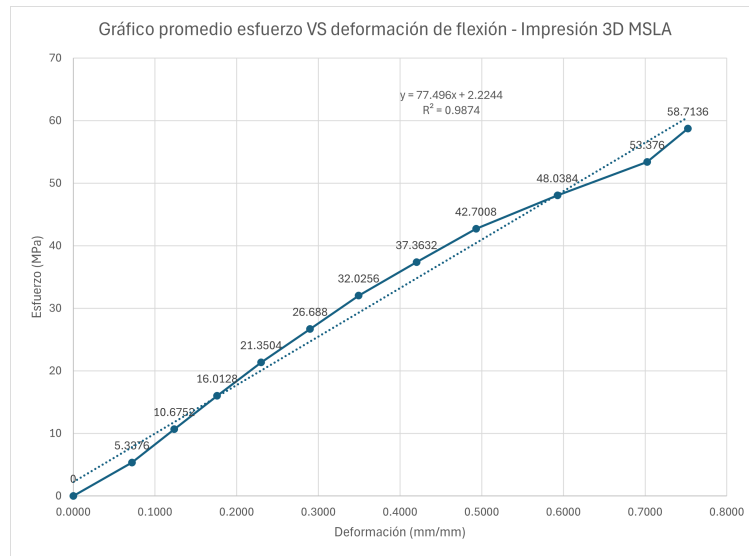
Nota. Resumen estadístico de los resultados obtenidos en el ensayo de flexión para las probetas fabricadas con resina MSLA. Elaboración propia.

Cuadro 8. Resumen de resultados del ensayo de flexión para probetas de resina vertida

Medida estadística	Fuerza última (N)	Esfuerzo último (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
Promedio (Media)	471.488	28.289	0.039	40.963
Mediana	471.488	28.289	0.036	44.922
Desviación estándar	45.069	2.704	0.011	7.644
Coefficiente de variación (%)	9.559	9.559	28.504	18.661
IQR	80.064	4.804	0.010	12.866

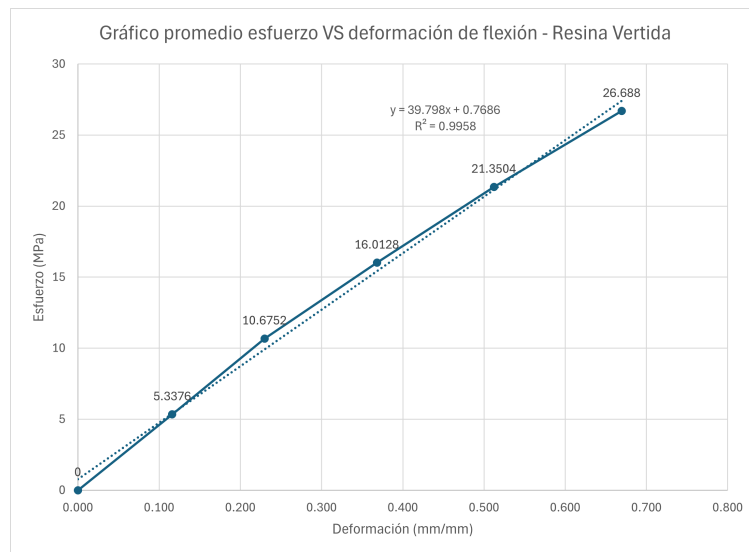
Nota. Resumen estadístico de los resultados obtenidos en el ensayo de flexión para las probetas de resina vertida. Elaboración propia.

Figura 17. Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de flexión para impresión 3D MSLA



Nota. Gráfico de esfuerzo-deformación, el 98.74 % de los datos se ven representados por la línea de regresión lineal. Elaboración propia.

Figura 18. Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de flexión para resina vertida



Nota. Gráfico de esfuerzo-deformación, el 99.58 % de los datos se ven representados por la línea de regresión lineal. Elaboración propia.

En la Figura 17 se puede observar la gráfica promedio de esfuerzo vs deformación de los 7 ensayos a flexión realizados para las probetas impresas en 3D MSLA. En el Cuadro 14 que se encuentra en el Anexo 2 se puede observar cada uno de los valores promedio de fuerza,

alargamiento, deformación y esfuerzo, resultado de las mediciones muestreadas cada 20 lbs. de cada probeta de impresión 3D MSLA. Por otro lado en la Figura 18 y el Cuadro 17 en el Anexo 5, se muestra el gráfico esfuerzo vs deformación para los ensayos de flexión de resina vertida y los valores promedio de los ensayos respectivamente.

Los resultados obtenidos en el ensayo de flexión confirman una tendencia similar a la observada en los ensayos de tracción: las probetas fabricadas mediante impresión 3D MSLA exhibieron una resistencia significativamente superior a las elaboradas por colada de resina vertida. Como se observa en el Cuadro 7, el esfuerzo último promedio alcanzado por las probetas MSLA fue de 57.04 MPa, frente a 28.29 MPa para las de resina vertida que se puede observar en el Cuadro 8, lo que representa aproximadamente un aumento del 101 % en la resistencia a flexión del material impreso. Esta diferencia concuerda con las propiedades mecánicas esperadas según las fichas técnicas.

En cuanto al módulo de elasticidad en flexión, el promedio fue de 64.85 MPa para las probetas MSLA y 40.96 MPa para las de resina vertida, reflejando un aumento de 58.3 % respecto a las de resina vertida, esto quiere decir una mayor rigidez y menor capacidad de deformación en las piezas obtenidas por impresión 3D. Se refuerza este resultado por las curvas esfuerzo–deformación (Figura 17 y Figura 18), donde las probetas MSLA muestran una pendiente inicial más pronunciada, típica de materiales con menor flexibilidad y alto módulo elástico.

El análisis estadístico evidencia también diferencias en la variabilidad de los resultados. Las probetas de resina vertida presentan menores desviaciones estándar en esfuerzo y módulo (2.70 MPa y 7.64 MPa, respectivamente) en comparación a los de MSLA (7.02 MPa y 30.542 MPa, respectivamente). Además muestra coeficientes de variación por debajo del 18.7 % para el módulo de elasticidad en contraste a 47.1 % de la impresión 3D MSLA. Por otro lado, las probetas MSLA muestran coeficientes de variación más altos, especialmente en la deformación unitaria (46.35 % frente a 28.50 % en resina vertida), evidenciando mayor dispersión relativa en la capacidad de deformación, probablemente debido a la orientación de las capas y la precisión del sistema de medición. En el caso del esfuerzo último, las probetas MSLA tuvieron un coeficiente de variación de 12.3 %, mientras que las de resina vertida alcanzaron 9.6 %, lo cual indica una buena repetibilidad del proceso de colada una vez controladas las variables de curado.

En comparación con los ensayos de tracción, donde la MSLA mostró menor dispersión, este análisis indica que la deformación en flexión es menos sensible a factores de fabricación como lo son las burbujas internas en las probetas por colada, mientras que la resistencia máxima sigue siendo relativamente consistente en ambos métodos. Esto evidencia que, aunque la impresión 3D proporciona mayor resistencia promedio, la capacidad de deformación en flexión es más variable que en tracción, posiblemente debido al efecto del curado posterior UV. Finalmente, las curvas esfuerzo–deformación de ambos materiales que se pueden observar en las Figuras 18 y 17, muestran una respuesta típicamente frágil, sin presencia de un punto claro de fluencia.

8.3. Ensayo de compresión (ASTM D695)

El ensayo de compresión se realizó siguiendo la norma ASTM D695, la cual establece los procedimientos para determinar las propiedades de materiales plásticos bajo cargas de compresión uniaxial. Las probetas se colocaron entre las placas paralelas de la máquina de ensayos universal Versa Tester de la marca Soiltest, con una capacidad de 60,000 lb, aplicando la carga de forma controlada hasta alcanzar la falla del material.

Cuadro 9. Resumen de resultados del ensayo de compresión para probetas de impresión 3D MSLA

Medida estadística	Fuerza última (N)	Esfuerzo último (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
Promedio (Media)	41733.042	64.686	0.123	658.033
Mediana	41984.672	65.076	0.113	663.200
Desviación estándar	1879.398	2.913	0.047	221.665
Coefficiente de variación (%)	4.503	4.503	38.185	33.686
IQR	2401.920	3.723	0.022	128.650

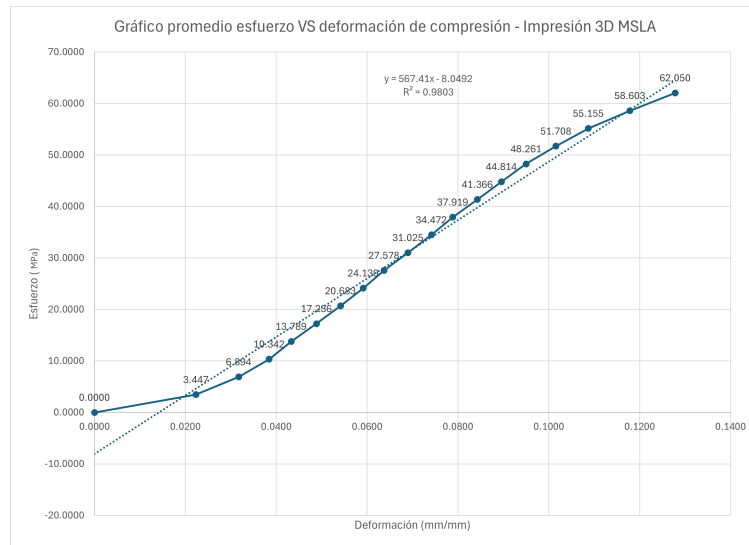
Nota. Resumen estadístico de los resultados obtenidos en el ensayo de compresión para las probetas fabricadas con resina MSLA. Elaboración propia.

Cuadro 10. Resumen de resultados del ensayo de compresión para probetas de resina vertida

Medida estadística	Fuerza última (N)	Esfuerzo último (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
Promedio (Media)	18523.696	28.712	0.137	222.449
Mediana	18401.376	28.522	0.145	198.180
Desviación estándar	520.582	0.807	0.030	74.353
Coefficiente de variación (%)	2.810	2.810	21.766	33.425
IQR	782.848	1.213	0.023	21.510

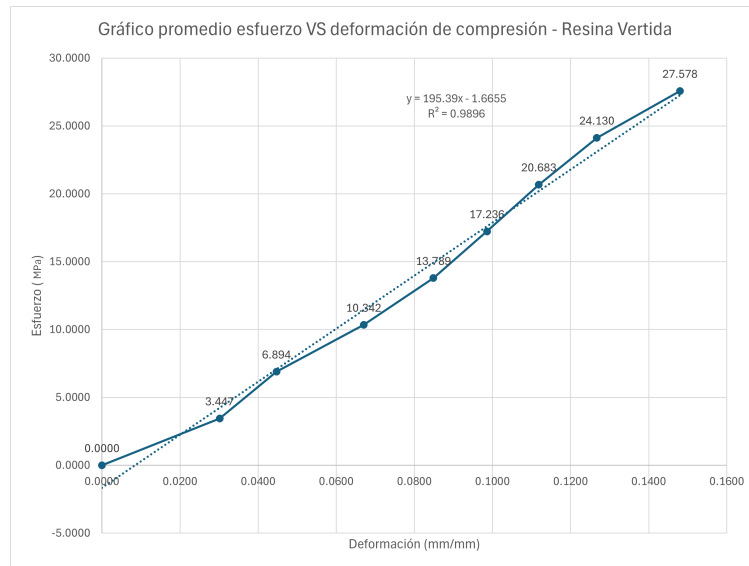
Nota. Resumen estadístico de los resultados obtenidos en el ensayo de compresión para las probetas de resina vertida. Elaboración propia.

Figura 19. Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de compresión para impresión 3D MSLA



Nota. Comportamiento típico del material sometido a compresión hasta la máxima carga soportada. Elaboración propia.

Figura 20. Curva esfuerzo–deformación promedio para el ensayo de compresión para resina vertida



Nota. Comportamiento típico del material sometido a compresión hasta la máxima carga soportada. Elaboración propia.

En la Figura 19 se puede observar la gráfica promedio de esfuerzo vs deformación de los 7 ensayos a compresión realizados para las probetas impresas en 3D MSLA. En el Cuadro 15 que se encuentra en el Anexo 3 se puede observar cada uno de los valores promedio de fuerza,

alargamiento, deformación y esfuerzo, resultado de las mediciones muestreadas cada 500 lbs. de cada probeta de impresión 3D MSLA. Por otro lado en la Figura 20 y el Cuadro 18 en el Anexo 6, se muestra el gráfico esfuerzo vs deformación para los ensayos de compresión de resina vertida y los valores promedio de los ensayos respectivamente.

Los valores obtenidos, resumidos en el Cuadro 9 y el Cuadro 10, muestran diferencias significativas entre ambos métodos de fabricación. El análisis estadístico evidencia diferencias claras en la variabilidad de los resultados. Las probetas impresas mediante tecnología MSLA presentan un esfuerzo último promedio de 64.69 MPa y un coeficiente de variación de 4.50 %, mientras que las de resina vertida alcanzaron 28.71 MPa con un coeficiente de variación de 2.81 % (Cuadro 9 y Cuadro 10). Esto indica que, aunque la resistencia máxima promedio es mucho mayor en las probetas MSLA, la dispersión relativa en este parámetro es ligeramente superior comparada con el proceso de colada.

En cuanto a la deformación unitaria, las probetas de resina vertida presentan un valor promedio mayor (0.137 mm/mm frente a 0.123 mm/mm de MSLA), pero muestran un coeficiente de variación menor (21.77 % versus 38.18 % en MSLA), evidenciando que la capacidad de deformación es más inconsistente en el material impreso, probablemente debido a posibles variaciones en el curado posterior. Este comportamiento se refleja también en el IQR de la deformación, que alcanza 0.022 mm/mm en MSLA frente a 0.023 mm/mm en resina vertida, confirmando que aunque los rangos intercuartílicos son similares, la dispersión relativa respecto a la media es mayor en las piezas impresas.

El módulo de elasticidad sigue una tendencia similar, las piezas MSLA presentan un promedio de 658.03 MPa con coeficiente de variación de 33.69 %, mientras que las de resina vertida muestran un promedio de 222.45 MPa y un coeficiente de variación de 33.43 %. Esto evidencia que, a pesar de la mayor rigidez de las piezas impresas, la variabilidad es mayor que las de resina vertida.

En conjunto, estos resultados muestran que la impresión 3D MSLA proporciona piezas con mayor capacidad de carga y rigidez promedio lo cual era esperado por las propiedades mecánicas que establece la ficha técnica del material, pero con una mayor dispersión relativa en deformación y módulo, mientras que el proceso de colada genera piezas con menor variabilidad aunque con menor resistencia global. Esto concuerda con lo observado en los ensayos de tracción y flexión, reforzando la idea de que la influencia del curado posterior en impresión 3D MSLA es un factor crítico para la resistencia mecánica del material.

En la Figura 19 y la Figura 20 se presentan las curvas esfuerzo–deformación promedio correspondientes a los ensayos de compresión realizados sobre las probetas fabricadas mediante impresión 3D MSLA y resina vertida, respectivamente. Ambas curvas evidencian un comportamiento típico de materiales poliméricos sometidos a cargas compresivas, con una zona inicial de respuesta lineal elástica seguida de una etapa de deformación no lineal antes del colapso.

8.4. Ensayo de corte (ASTM D732)

El ensayo de corte se realizó siguiendo la norma ASTM D732, con el objetivo de evaluar la resistencia al corte del material. Debido a limitaciones del montaje, no fue posible medir la deflexión o alargamiento de las probetas durante la aplicación de la carga; por lo tanto, se reporta únicamente la fuerza máxima de corte y el esfuerzo cortante máximo promedio.

Cuadro 11. Resumen de resultados del ensayo de corte para probetas de impresión 3D MSLA

Medida estadística	Fuerza última (N)	Esfuerzo último (MPa)
Promedio (Media)	9295.812	13.151
Mediana	9254.064	13.092
Desviación estándar	325.630	0.461
Coefficiente de variación (%)	3.503	3.503
IQR	616.938	0.873

Nota. Resumen estadístico de los resultados obtenidos en el ensayo de corte para las probetas fabricadas con resina MSLA. Elaboración propia.

Cuadro 12. Resumen de resultados del ensayo de corte para probetas de resina vertida

Medida estadística	Fuerza última (N)	Esfuerzo último (MPa)
Promedio (Media)	4466.999	6.320
Mediana	4480.915	6.339
Desviación estándar	276.067	0.391
Coefficiente de variación (%)	6.180	6.180
IQR	292.234	0.413

Nota. Resumen estadístico de los resultados obtenidos en el ensayo de corte para las probetas de resina vertida. Elaboración propia.

En el Cuadro 11 y el Cuadro 12 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de corte. Los resultados muestran una diferencia notable entre ambos métodos de fabricación. Las probetas de MSLA alcanzaron una fuerza máxima promedio de 9295.81 N y un esfuerzo cortante máximo de 13.15 MPa, mientras que las probetas de resina vertida registraron valores considerablemente menores, con una fuerza promedio de 4466.99 N y un esfuerzo cortante promedio de 6.32 MPa. Esto implica que el material impreso soportó aproximadamente 108 % más de esfuerzo cortante antes de la falla en comparación con la resina colada.

Para este tipo de esfuerzo mecánico no se tenía una referencia teórica, por lo que únicamente se puede tomar como referencia el comportamiento general que presentó el material el cual el dato teórico es casi el doble de resistencia que el de resina vertida y presenta mismo comportamiento que los otros tipos de esfuerzos aplicados.

La baja dispersión observada en ambos conjuntos de datos, evidenciada por los coeficientes de variación inferiores al 7%, sugiere una buena consistencia experimental y control adecuado de las condiciones de ensayo. No obstante, se aprecia una diferencia en la magnitud de la variabilidad: las probetas MSLA mostraron una desviación estándar de 0.46 MPa y coeficiente de variación de 3.50 %, mientras que las de resina vertida presentaron una desviación estándar ligeramente menor de 0.39 MPa, pero un coeficiente de variación mayor de 6.18 %, lo cual indica que, relativamente a su media, el proceso de colada presentó una dispersión proporcionalmente más alta.

Aunque las diferencias absolutas son pequeñas, estos resultados sugieren que el proceso de vertido tiende a ser menos reproducible que la impresión MSLA, posiblemente debido a factores difíciles de controlar como la presencia de microburbujas. Además, el material de resina vertida exhibe un comportamiento más dúctil, lo que produce una mayor deformación antes de la falla; en cambio, las piezas MSLA, de naturaleza más frágil, alcanzan la ruptura con menor deformación. Esta diferencia en la respuesta mecánica podría también contribuir a la mayor variabilidad relativa observada en las probetas coladas.

El análisis del rango intercuartílico (IQR) refuerza esta tendencia. Las probetas impresas mostraron un IQR de 0.87 MPa frente a 0.41 MPa en las de resina vertida. Si bien el valor absoluto del IQR es mayor en las probetas MSLA, su interpretación debe hacerse en el contexto del esfuerzo promedio. En términos relativos, el IQR de las muestras MSLA representa apenas un 6.6 % de la media, mientras que el de las probetas de resina vertida equivale a cerca del 6.5 %, evidenciando niveles de dispersión similares dentro del rango central de los datos. Esto indica que, a pesar de las diferencias en magnitud de resistencia, ambos procesos producen resultados internamente consistentes y sin valores atípicos extremos.

Es importante aclarar que las ecuaciones mostradas en las Figuras 15, 16, 17, 18, 19 y 20 corresponden a la recta ajustada sobre la curva esfuerzo–deformación promedio de cada grupo de probetas y cada ensayo. En este caso, la pendiente de dicha recta describe un módulo de elasticidad promedio gráfico, obtenido a partir del promedio de las mediciones de esfuerzo y deformación de todos los ensayos.

Este valor no coincide con el módulo de elasticidad reportado en los Cuadros 5, 6, 7, 8, 9 y 10 ya que estos últimos no se calculan a partir de la curva promedio, sino de la siguiente manera:

- Se obtiene el módulo de elasticidad de cada probeta individual, a partir de la pendiente de su curva esfuerzo–deformación.
- Se promedian los módulos individuales para obtener el valor estadístico del grupo.

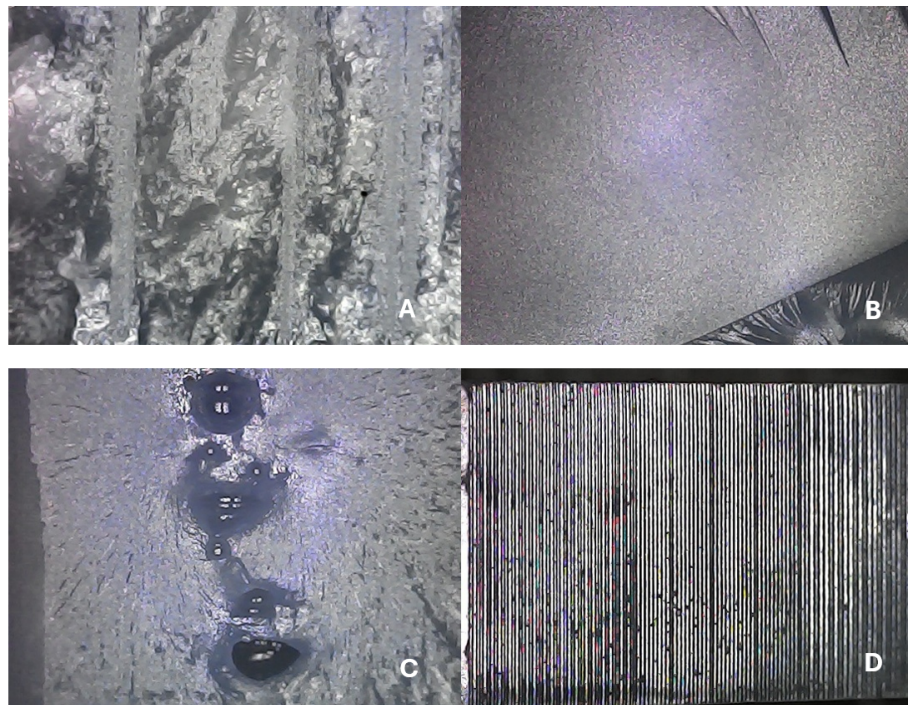
8.5. Calidad superficial y estructura interna

Con el objetivo de complementar la evaluación mecánica, se realizó un análisis de calidad superficial y estructura interna de las probetas obtenidas mediante impresión 3D MSLA y colada de resina. Este análisis se efectuó utilizando un microscopio digital con las siguientes especificaciones técnicas:

Especificaciones técnicas del microscopio

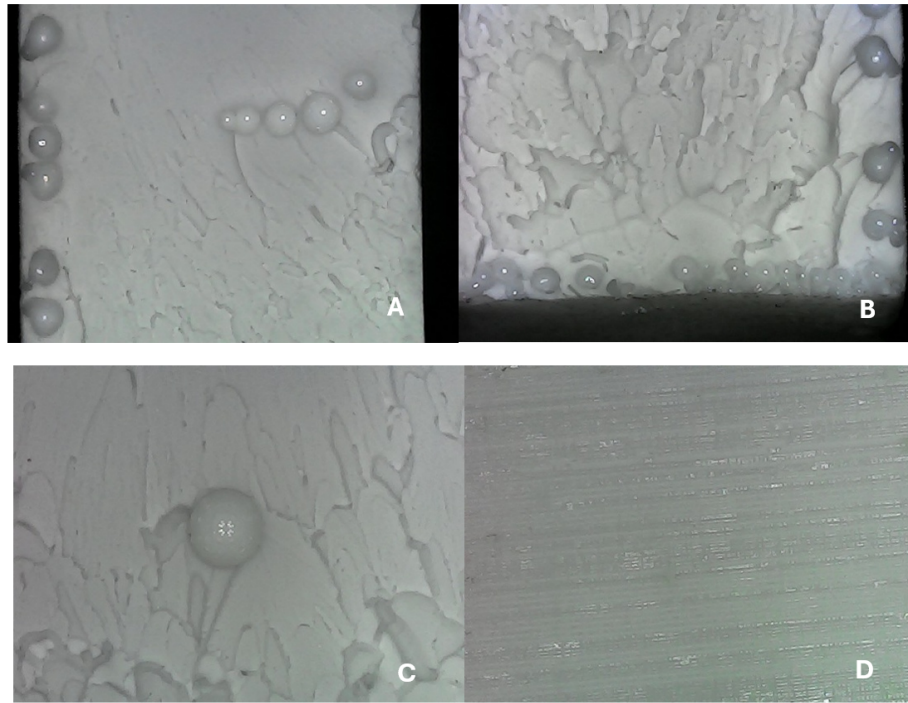
- Sensor de imagen: CMOS HD de 0.3M (Digital 2M)
- Controlador: DSP de alta velocidad
- Lente: lente de microscopio con enfoque manual de 0–200 mm
- Resolución de captura de imágenes: hasta 1600×1200 píxeles (2 MP)
- Relación de ampliación: hasta 1000× (manual)

Figura 21. Visualización de estructura y acabado superficial de probetas de tensión por impresión 3D MSLA



Nota. A y B: sección transversal de probetas de tracción con estructura interna homogénea; C: probeta No. 6 con burbujas internas aisladas; D: visualización de composición de capas. Elaboración propia.

Figura 22. Visualización de estructura y acabado superficial de probetas de tensión por resina vertida



Nota. A: defectos de burbujas visibles; B: burbujas en las orillas; C: burbujas internas distribuidas aleatoriamente; D: reproducción de las capas del modelo maestro MSLA (“herencia tecnológica”). Elaboración propia.

Las imágenes obtenidas mediante este equipo permitieron visualizar de forma detallada la textura superficial, la uniformidad del curado y la presencia de posibles defectos internos generados durante los procesos de fabricación.

Para este análisis se utilizaron las probetas ensayadas a tracción, ya que en ellas es posible observar la sección crítica o zona de falla, lo que proporciona información relevante sobre la estructura interna del material en el punto de ruptura.

En las probetas fabricadas por impresión 3D MSLA, la superficie mostró una textura homogénea y una unión uniforme entre capas, evidenciando un buen control del proceso de curado y de la orientación de impresión. La Figura 21 presenta distintas vistas microscópicas de las muestras ensayadas: las secciones transversales correspondientes a las probetas de tracción muestran una estructura interna continua y sin defectos visibles (imágenes A y B), salvo en un único caso (probeta No. 6) donde se identificaron pequeños huecos internos. Dichas cavidades podrían deberse a atrapamiento de aire o curado incompleto local, aunque su ocurrencia fue aislada. En la imagen D se aprecia la disposición diagonal de las capas, característica del proceso MSLA, la cual no afectó la homogeneidad general del material.

Por su parte, las probetas obtenidas por colada de resina Smooth-Cast 305 presentaron una superficie menos uniforme, con burbujas visibles tanto en el interior como en las orillas

de las piezas, tal como se muestra en la Figura 22. Estas burbujas no siguieron un patrón definido y se distribuyeron de manera aleatoria, afectando la homogeneidad del material. Se atribuye su formación al atrapamiento de aire durante la mezcla o el vertido, agravado por la ausencia de desgasificación al vacío. En la imagen D puede observarse, además, la “herencia tecnológica” del proceso, evidenciada en la reproducción de las líneas de capa del modelo maestro impreso en MSLA sobre la superficie de la pieza colada.

Las piezas MSLA presentan una microestructura compacta, densa y libre de porosidad apreciable, las piezas de resina vertida muestran una distribución heterogénea con vacíos internos, lo cual explica los menores valores de resistencia y la mayor dispersión obtenida en los ensayos de tensión.

Influencia de humedad en piezas de resina vertida

Figura 23. Visualización efecto de la humedad en colada de resina de uretano



Nota. Acabado superficial con burbujas y no homogéneo causado por la humedad del ambiente. Elaboración propia.

Adicionalmente, se evidenció la influencia de las condiciones ambientales durante el proceso de colada en la calidad final de las piezas. En una de las probetas fabricadas bajo condiciones de alta humedad relativa (79 %) y temperatura ambiente de 23.6 °C, se observó un acabado superficial con burbujas visibles y textura no homogénea, como se muestra en la Figura 23. Este efecto se atribuye a la reacción de los isocianatos presentes en la resina de uretano con la humedad del ambiente, generando dióxido de carbono durante el curado. Las burbujas de gas formadas quedan atrapadas en el material, disminuyendo su densidad local y favoreciendo la formación de vacíos internos. Si bien las imperfecciones superficiales no modificaron significativamente la resistencia global de las probetas, las cavidades internas de mayor tamaño reducen la sección transversal efectiva que soporta la carga, aumentando el esfuerzo local y propiciando una falla prematura. Este comportamiento resalta la importancia de controlar la humedad ambiental o emplear sistemas de desgasificación para asegurar una colada libre de defectos y con propiedades mecánicas óptimas.

Análisis de resultados

La elección de los materiales utilizados en esta investigación se basó tanto en su disponibilidad en el mercado guatemalteco como en su representatividad dentro de su categoría. Para el proceso de impresión 3D se seleccionó la resina eSUN Hard Tough, ya que dentro de las opciones comerciales compatibles con impresoras MSLA, esta presenta las mejores propiedades mecánicas reportadas por el fabricante, con un equilibrio entre rigidez y tenacidad superior al de resinas estándar.

Durante las primeras pruebas experimentales, se empleó una resina estándar marca Elegoo, con la cual se observó un comportamiento quebradizo y una falla frágil inmediata ante esfuerzos moderados. Este tipo de respuesta hubiera sesgado los resultados comparativos, impidiendo un análisis representativo de las capacidades reales del proceso MSLA. Por esta razón, se optó por la resina Tough, cuyo comportamiento más dúctil y resistente al impacto permitió obtener resultados reproducibles y adecuados para la comparación con la resina colada.

En cuanto a la colada de resina, se seleccionó la Smooth-Cast 305, un uretano de baja viscosidad y curado rápido, ampliamente utilizado para réplicas y piezas de modelado. Aunque existen poliuretanos con propiedades mecánicas superiores en el mercado, los disponibles requerían procesos de curado por capas o sistemas de vacío y calor para el curado, lo cual hubiera implicado cambiar completamente la metodología de manufactura. Por ello, se eligió Smooth-Cast 305 como una opción representativa del proceso de colada por gravedad a temperatura ambiente, fácilmente reproducible y con buenas características de estabilidad dimensional.

Para interpretar los resultados obtenidos en los distintos ensayos mecánicos, se establecieron ciertos supuestos y consideraciones relacionados con la naturaleza de los materiales y los procesos de manufactura empleados. En primer lugar, se asumió que las probetas fabricadas mediante impresión 3D MSLA y las obtenidas por colada de resina eran isotrópicas.

Además las diferencias en sus propiedades se debían únicamente al proceso de fabricación y no a variaciones en el diseño o en la orientación de impresión por lo tanto la orientación de impresión y ángulo fueron seleccionados de acuerdo a poder completar satisfactoriamente la impresión. Se justificó la presencia de micro defectos internos en las piezas de resina vertida, principalmente por la selección de una resina que no necesitaba de un proceso de desgasificación y la carencia de una cámara de vacío.

Adicionalmente, se asumió que los valores reportados en las fichas técnicas de los fabricantes representan condiciones óptimas, por lo que es esperable que los resultados experimentales difieran parcialmente debido a factores como la calidad del curado, el tamaño de las probetas o las condiciones ambientales durante la preparación y el ensayo.

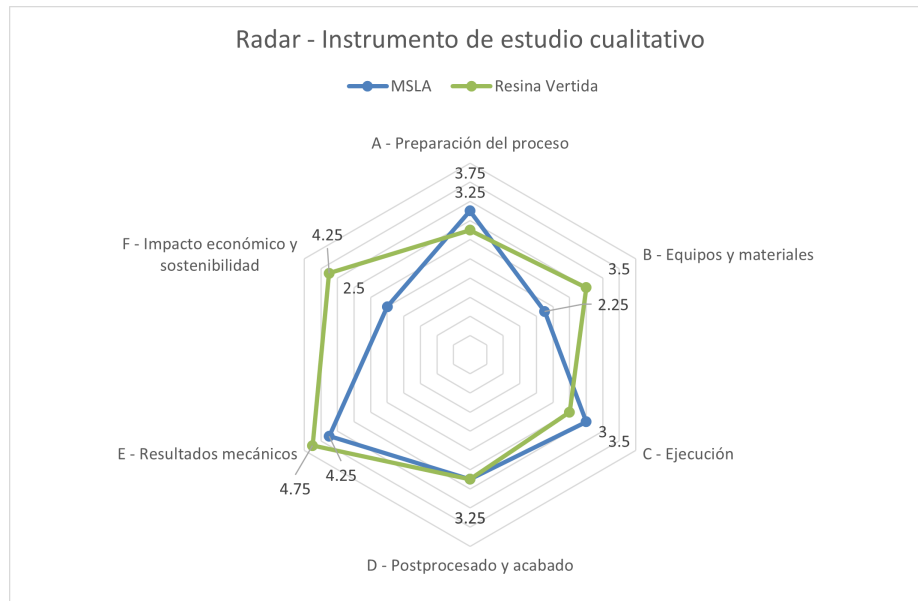
En el Cuadro 2, la resina eSUN Hard Tough, empleada en la impresión 3D MSLA, presenta una resistencia a la tracción entre 30 y 60 MPa y una resistencia a la flexión entre 30 y 75 MPa, según el fabricante. Los resultados promedio experimentales obtenidos en los ensayos de tracción fueron 48.47 MPa y flexión 57.04 MPa, estos valores se encuentran dentro del rango establecido por el fabricante, lo cual es coherente considerando la influencia del proceso de curado posterior y las condiciones del ensayo. Este comportamiento indica que la calidad de impresión y curado fue adecuada, aunque ligeramente por debajo del desempeño máximo esperado en condiciones optimas. Por otro lado, la resina Smooth-Cast 305, utilizada en las piezas de resina vertida, presenta una resistencia a la tracción de 20.7 MPa, a la compresión de 26.2 MPa y a la flexión de 27.6 MPa de acuerdo a la ficha técnica (Cuadro 1). Los resultados promedio experimentales obtenidos fueron 24.38 MPa para tracción, 28.71 MPa para compresión y 28.29 MPa para flexión, significativamente mayor en todos los casos, aún considerando la presencia de burbujas o vacíos internos por atrapamiento de aire.

El análisis de los resultados experimentales mostró que las piezas fabricadas mediante impresión 3D MSLA alcanzaron valores más altos de resistencia a la tracción, flexión y compresión en comparación con las piezas obtenidas por colada, comportamiento esperado por los datos de sus ficha técnicas pero las piezas fabricadas por colada tuvieron un comportamiento mayor en resistencia en comparación a la ficha técnica dada por el proveedor. En contraste a las piezas fabricadas por impresión MSLA que presentaron un comportamiento inferior al máximo reportado por el proveedor. Se debe considerar que en la impresión 3D MSLA, el curado posterior es el factor principal para alcanzar la resistencia máxima, pudiendo ser esta una variable que no permitió alcanzar la resistencia máxima del material. En comparación a la resina vertida la cual siempre alcanza su resistencia máxima.

Por otro lado, el proceso por colada de resina Smooth-Cast 305 es significativamente más rápido, económico y versátil ya que permite obtener varias réplicas idénticas a partir de un mismo molde y no requiere equipo especializado más allá de los materiales de moldeo y mezclado, lo cual lo hace adecuado para producción artesanal, prototipos estéticos o moldes funcionales de bajo esfuerzo.

El estudio cuantitativo se complementó con un instrumento de evaluación tipo Likert, diseñado para comparar de forma cualitativa los métodos de manufactura de impresión 3D MSLA y resina vertida.

Figura 24. Resultados promedio de categorías de evaluación en comparación de procesos de manufactura



Nota. Se observa un gráfico tipo radar el cual compara ambos procesos de manufactura impresión 3D MSLA y resina vertida, mostrando los valores promedio de las categorías. Elaboración propia.

El cuestionario, presentado en el Anexo 13, se estructuró en seis categorías de análisis: (A) preparación del proceso, (B) equipos y materiales, (C) ejecución, (D) procesado posterior y acabado, (E) resultados mecánicos y (F) impacto económico y sostenibilidad.

Los resultados generales muestran que el proceso de resina vertida obtuvo un promedio de 3.67, mientras que la impresión 3D MSLA alcanzó 3.25, evidenciando un desempeño ligeramente superior del método de resina vertida.

La resina vertida destacó en las categorías B (equipos y materiales), E (resultados mecánicos) y F (impacto económico y sostenibilidad), con promedios de 3.5, 4.75 y 4.25, respectivamente. Estos resultados reflejan su facilidad de implementación, así como su capacidad para producir piezas homogéneas, con baja anisotropía y mínimo desperdicio de material. En contraste, la impresión 3D MSLA sobresalió en la categoría A (preparación del proceso), con un promedio de 3.75, lo que evidencia su rapidez y sencillez en la configuración inicial, y en la categoría C (ejecución), con 3.5, destacando la repetibilidad del proceso y la posibilidad de intervención durante la fabricación.

En términos globales, el método de resina vertida se clasifica dentro del umbral de interpretación “bueno”, mientras que la impresión 3D MSLA se ubica como “aceptable/neutral”, según los criterios de evaluación definidos en las categorías del instrumento.

De acuerdo con los resultados y observaciones del proceso, se recomienda el uso de cada metodología según el tipo de aplicación:

Impresión 3D MSLA: ideal para piezas pequeñas o medianas que requieran precisión, alta rigidez y resistencia mecánica, como componentes funcionales, prototipos estructurales o ensambles mecánicos. Su uso se justifica cuando la prioridad es el desempeño mecánico o la fidelidad geométrica, incluso si los tiempos de impresión y curado son más prolongados.

Colada de resina: más viable cuando se busca producir varias piezas de forma rápida y económica, especialmente en geometrías simples o con fines visuales. Es apropiada para modelos, maquetas, moldes secundarios, o piezas que no estarán sometidas a cargas significativas. Además, este método permite fabricar piezas sin las limitaciones de volumen que impone la impresión 3D, siendo útil para elementos de mayor tamaño.

Durante el desarrollo del proyecto se identificaron diversas limitaciones que incluyeron en el alcance experimental y en la precisión de los resultados obtenidos.

- Inicialmente, se había planificado utilizar una resina de poliuretano con propiedades mecánicas similares a las de la resina empleada en la impresión 3D MSLA. Sin embargo, este material requería un curado por capas debido a su restricción de espesor máximo, ya que superar dicho límite podía provocar la inhibición del curado. Por lo tanto, no resultó compatible con la metodología de colada por gravedad de una sola etapa. En consecuencia, se seleccionó una resina alternativa disponible comercialmente, sin limitaciones de espesor, que permitió realizar el análisis comparativo de manera más práctica y controlada pero presentaba propiedades mecánicas inferiores a las que inicialmente se habían considerado.
- La máquina de ensayos universales disponible en la Universidad del Valle de Guatemala tiene una capacidad máxima de 60 000 lb, diseñada para materiales de alta resistencia. Esto hizo necesario modificar la geometría de las probetas establecida en las normas ISO y ASTM, con el fin de obtener resultados dentro de un rango medible y confiable.
- La ausencia de una cámara de vacío o de presión limitó la posibilidad de eliminar burbujas de aire durante el vertido de resina. Este factor pudo haber afectado la homogeneidad interna de las probetas de resina vertida y, por consiguiente, sus resultados mecánicos.
- El registro de datos durante los ensayos se realizó manualmente, siguiendo las indicaciones del encargado del laboratorio. La deformación fue medida por equipos de medición de deformación (deformímetros) analógicos y anotada de forma visual, sin el uso de un sistema digital de adquisición de datos o graficación automática, lo que introduce un grado de incertidumbre en las mediciones obtenidas.

1. Se fabricaron probetas estandarizadas en impresión 3D MSLA y resina vertida, cumpliendo con los requerimientos para la realización de los ensayos.
2. Se realizaron ensayos estandarizadas de tracción, flexión, compresión y corte, obteniendo datos sobre las propiedades mecánicas de cada material.
3. El análisis estadístico evidenció la variabilidad entre los procesos, determinando que la impresión 3D MSLA ofrece mayor resistencia y variabilidad, mientras que la resina vertida presenta un comportamiento dúctil y mayor reproducibilidad por consistencia de los datos.
4. El análisis cualitativo demostró que la tecnología MSLA destaca en precisión y facilidad, mientras que la resina vertida en economía, practicidad y uniformidad del material.
5. Se establecieron procesos documentados junto a la elaboración de la guía de manufactura para resina vertida que facilitan la repetición de los experimentos.
6. El módulo de Young en promedio para las probetas de impresión MSLA y resina vertida fue de 64.85 MPa y 40.96 MPa respectivamente.
7. El comportamiento mecánico de ambos materiales fue predominantemente frágil, sin una fase plástica marcada en las curvas esfuerzo–deformación de tracción y flexión.
8. La impresión 3D MSLA presentó mayores propiedades mecánicas en todos los ensayos realizados, alcanzando valores promedio de esfuerzo último en tracción (48.47 MPa), flexión (57.04 MPa), compresión (64.69 MPa) y corte (13.15 MPa), en comparación a las probetas de resina vertida que obtuvieron valores promedio en tracción (24.38 MPa), en flexión (28.29 MPa), en compresión (28.71 MPa) y en corte (6.32 MPa).

A partir de los resultados y la experimentación, se plantean las siguientes recomendaciones para futuros trabajos en la misma línea de investigación.

1. Implementar procesos de desgasificación y colada a presión durante el vertido de resina, con el fin de reducir la formación de burbujas internas y mejorar la homogeneidad de las piezas coladas. Esto permitirá optimizar las propiedades mecánicas y la calidad superficial.
2. Ampliar la investigación a otros tipos de resinas, incluyendo materiales con diferentes características mecánicas, térmicas y químicas.
3. Evaluar el comportamiento mecánico bajo cargas dinámicas o condiciones específicas, como fatiga, impacto y resistencia a la temperatura, para simular escenarios más cercanos a aplicaciones reales.

-
- [1] X. P. Perez, «Análisis de resistencia mecánica y térmica para piezas fabricadas en PLA con impresión 3D,» 2019.
 - [2] A. L. CAMACHO, D. C. ÁLVAREZ y M. L. R. García, «CHARACTERIZATION OF POLYLACTIC ACID (PLA) MECHANICAL PROPERTIES IN 3D PRINTING: INSIGHTS FROM ADVANCED ANALYSIS TECHNIQUES AND PRINTING ORIENTATIONS,» *DYNA*, vol. 99, págs. 622-628, 6 nov. de 2024, ISSN: 19891490. DOI: 10.52152/D11278. dirección: <http://www.revistadyna.com/Articulos/Ficha.aspx?IdMenu=a5c9d895-28e0-4f92-b0c2-c0f86f2a940b&Cod=11278&Idioma=es-ES>.
 - [3] E. Bayas, P. Kumar y M. Harne, «Section A-Research paper Impact of Process Parameters on Mechanical Properties of FDM 3D-Printed Parts: A Comprehensive Review 708 Eur,» *inf. téc.*, págs. 708-725.
 - [4] C. C. Kai, C. T. Howe y E. K. Hoes, «Advanced manufacturing Technology Integrating Rapid Prototyping and Tooling with for Connectors Vacuum Casting,» *inf. téc.*, 1998, págs. 617-623.
 - [5] S. P. Koob, V. Greene, D. Harvey y P. Griffin, «Article: Tips and tricks with epoxy and other casting and molding materials,» AIC (American Institute for Conservation of Historic y Artistic Works), *inf. téc.*, 2004, págs. 158-172. dirección: www.conservation-us.org.
 - [6] M. Zalewski, «Hobby CNC machining and resin casting,» págs. 1-119, 2015. dirección: <https://1camtuf.coredump.cx/gcnc/full/>.
 - [7] A. P. V. Puerta, D. M. Sanchez, M. Batista y J. Salguero, «Criteria selection for a comparative study of functional performance of Fused Deposition Modelling and Vacuum Casting processes,» *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, págs. 721-727, oct. de 2018, ISSN: 15266125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.033.
 - [8] A. Pavlovic, M. Slijivic, M. Krajsnik, J. Ilic y J. Anic, «Polymers in additive manufacturing: The case of a water pump impeller,» *FME Transactions*, vol. 45, págs. 354-359, 3 2017, ISSN: 14512092. DOI: 10.5937/fmet1703354P.

- [9] P. Zmarzły, D. Gogolewski y T. Kozior, «Design guidelines for plastic casting using 3D printing,» *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 15, 2020, ISSN: 15589250. DOI: 10.1177/1558925020916037.
- [10] M. Wortmann, N. Frese, J. Brikmann, A. Ehrmann, E. Moritzer y B. Hüsgen, «Silicone Mold Accuracy in Polyurethane Vacuum Casting,» *Macromolecular Symposia*, vol. 395, 1 feb. de 2021, ISSN: 15213900. DOI: 10.1002/masy.202000242.
- [11] M. N. Ahmad et al., «Optimization of vacuum casting process parameters using Taguchi method,» *inf. téc.*, 2018, págs. 146-147. dirección: <https://www.researchgate.net/publication/325310075>.
- [12] M. Wortmann y N. Frese, *Industrial-scale vacuum casting with silicone molds: A review*, jun. de 2022. DOI: 10.1002/appl.202100012.
- [13] C. C. Kuo y M. X. Wu, «Evaluation of service life of silicone rubber molds using vacuum casting,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, págs. 3775-3781, 9-12 jun. de 2017, ISSN: 14333015. DOI: 10.1007/s00170-016-9755-1.
- [14] A. M. Ramos, C. Relvas y J. A. Simões, «Vacuum casting with room temperature vulcanising rubber and aluminium moulds for rapid manufacturing of quality parts: A comparative study,» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 9, págs. 111-115, 2 2003, ISSN: 13552546. DOI: 10.1108/13552540310467121.
- [15] O. I. Strube, J. Brikmann y B. Hüsgen, «Enhancement of the Long Life Cycle of Silicone Molds for Vacuum Casting Processes,» *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, vol. 53, págs. 1327-1332, 13 2014, ISSN: 15256111. DOI: 10.1080/03602559.2014.886123.
- [16] S. C. Thian et al., «The manufacture of micromould and microparts by vacuum casting,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 38, págs. 944-948, 9-10 sep. de 2008, ISSN: 02683768. DOI: 10.1007/s00170-007-1151-4.
- [17] C. C. Kuo, D. Y. Li, Z. C. Lin y Z. F. Kang, «Characterizations of polymer gears fabricated by differential pressure vacuum casting and fused deposition modeling,» *Polymers*, vol. 13, 23 dic. de 2021, ISSN: 20734360. DOI: 10.3390/polym13234126.
- [18] V.-S. Popescu, «IMPACT OF UV POST PROCESSING ON SIMPLE 3D PRINTED PARTS USING MASKED STEREOLITHOGRAPHY,» *inf. téc.*, 2024, pág. 18.
- [19] M. Štaffová, F. Ondreáš, J. Svatík, M. Zbončák, J. Jančář y P. Lepcio, «3D printing and post-curing optimization of photopolymerized structures: Basic concepts and effective tools for improved thermomechanical properties,» *Polymer Testing*, vol. 108, abr. de 2022, ISSN: 01429418. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2022.107499.
- [20] B. Nowacki, P. Kowol, M. Kozioł, P. Olesik, J. Wiczorek y K. Waclawiak, «Effect of post-process curing and washing time on mechanical properties of mslaprintouts,» *Materials*, vol. 14, 17 sep. de 2021, ISSN: 19961944. DOI: 10.3390/ma14174856.
- [21] L. V. Araújo et al., «Analysis of Mechanical Properties and Printing Orientation Influence of Composite Resin for 3D Printing Compared to Conventional Resin,» *Materials*, vol. 17, pág. 5626, 22 nov. de 2024, ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/ma17225626. dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1996/17/22/5626>.

- [22] Y. Li y Z. Teng, «Effect of printing orientation on mechanical properties of SLA 3D-printed photopolymer,» *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 47, págs. 1531-1545, 5 mayo de 2024, ISSN: 14602695. DOI: 10.1111/ffe.14265.
- [23] B. Orzeł y K. Stecula, «Comparison of 3D Printout Quality from FDM and MSLA Technology in Unit Production,» *Symmetry*, vol. 14, 5 mayo de 2022, ISSN: 20738994. DOI: 10.3390/sym14050910.
- [24] M. Berchon e Y. B. Luyt, «LA IMPRESIÓN 3D,» inf. téc., 2014.
- [25] «Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing Formlabs,» Formlabs, inf. téc.
- [26] Liqcreate, *¿Aumentar la dureza de la resina de impresión 3D mediante un postcurado UV corto?* Accedido: 27 de septiembre de 2025, 2025. dirección: <https://www.liqcreate.com/es/art%C3%ADculos-de-apoyo/resina-resistente-de-curado-uv-corto/>.
- [27] Formlabs. «Resin 3D Printer Comparison: SLA vs DLP.» Accedido: 26 de septiembre de 2025. dirección: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>.
- [28] P. Josef, «BASICS OF 3D PRINTING,» inf. téc.
- [29] Prusa Research a.s., *Types of printers and their differences*, Accedido: 27 de septiembre de 2025, 2025. dirección: https://help.prusa3d.com/article/types-of-printers-and-their-differences_112464.
- [30] S. G. Diez, «METODOLOGÍA DE LA COLADA DIRECTA APLICADA A LA ESCULTURA,» inf. téc., 2006, págs. 270-276.
- [31] D. Du, J. An, A. Dong y B. Sun, *A review of the progress and challenges of counter-gravity casting*, mayo de 2025. DOI: 10.1016/j.jmst.2024.07.037.
- [32] OpenAI, *ChatGPT (versión GPT-5.1)*, <https://chat.openai.com/>, Modelo de lenguaje generativo, 2025.
- [33] Resitec Guatemala, *Smooth-Cast™ 305*, Accedido: 11 de octubre de 2025, 2025. dirección: <https://www.resitecgt.com/products/smooth-on-smooth-cast-305>.
- [34] eSUN, *H200 Hard-Tough Resin*, Accedido: 11 de octubre de 2025, 2025. dirección: <https://www.esun3d.com/hard-tough-resin-product/>.
- [35] Resitec Guatemala, *Mold Max™ 14NV*, Accedido: 11 de octubre de 2025, 2025. dirección: <https://www.resitecgt.com/products/smooth-on-mold-max-14nv>.
- [36] J. M. Gere, *Mecánica de materiales*, 7.^a ed. Cengage Learning, 2009, pág. 1029, ISBN: 9789708300407.
- [37] IngMecaFenix, *Qué tipos de esfuerzos físicos se producen en los materiales*, Accedido: 11 de octubre de 2025, 2022. dirección: <https://www.ingmecafenix.com/ingenieria-general/tipos-de-esfuerzos-fisicos/>.
- [38] M. Jose, A. Monterrosa y C. Uribe, «ENSAYO DE TRACCIÓN DE PROBETAS METÁLICAS,» inf. téc., 2019. dirección: <https://www.researchgate.net/publication/331310495>.
- [39] C. Salazar, «FUNDAMENTOS BÁSICOS DE ESTADÍSTICA,» inf. téc., 2018.
- [40] Anycubic Store, *Resin Settings for Anycubic Photon Series 3D Printer*, Accedido: 12 de octubre de 2025, 2021. dirección: <https://store.anycubic.com/blogs/news/resin-settings-for-anycubic-3d-printers>.

Anexo 1: Promedio de las muestras de tracción para impresión 3D MSLA

Cuadro 13. Resultados promedio del ensayo de tracción para impresión 3D MSLA

Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
889.6	0.475	0.019	4.539
1779.2	0.889	0.035	9.078
2668.8	1.368	0.054	13.616
3558.4	1.858	0.073	18.155
4448.0	2.377	0.094	22.694
5337.6	2.914	0.115	27.233
6227.2	3.458	0.136	31.771
7116.8	4.020	0.158	36.310
8006.4	4.681	0.184	40.849
8896.0	5.296	0.209	45.388
9785.6	5.842	0.230	49.927

Nota. Promedio de los datos obtenidos en el ensayo para las 7 probetas de tracción de impresión 3D MSLA. Elaboración propia.

Anexo 2: Promedio de las muestras de flexión para impresión 3D MSLA

Cuadro 14. Resultados promedio del ensayo de flexión para impresión 3D MSLA

Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
89.0	1.075	0.072	5.338
177.9	1.854	0.124	10.675
266.9	2.642	0.176	16.013
355.8	3.450	0.230	21.350
444.8	4.348	0.290	26.688
533.8	5.241	0.349	32.026
622.7	6.303	0.420	37.363
711.7	7.396	0.493	42.701
800.6	8.890	0.593	48.038
889.6	10.536	0.702	53.376
978.6	11.286	0.752	58.714
1067.5	10.973	0.732	64.051

Nota. Promedio de las mediciones obtenidas en los ensayos para las 7 probetas de flexión para impresión 3D MSLA. Elaboración propia.

Anexo 3: Promedio de las muestras de compresión para impresión 3D MSLA

Cuadro 15. Resultados promedio del ensayo de compresión para impresión 3D MSLA

Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
2224.0	0.566	0.022	3.447
4448.0	0.806	0.032	6.894
6672.0	0.976	0.038	10.342
8896.0	1.099	0.043	13.789
11120.0	1.241	0.049	17.236
13344.0	1.375	0.054	20.683
15568.0	1.502	0.059	24.130
17792.0	1.618	0.064	27.578
20016.0	1.753	0.069	31.025
22240.0	1.883	0.074	34.472
24464.0	2.003	0.079	37.919
26688.0	2.141	0.084	41.366
28912.0	2.275	0.090	44.814
31136.0	2.413	0.095	48.261
33360.0	2.580	0.102	51.708
35584.0	2.761	0.109	55.155
37808.0	2.994	0.118	58.603
40032.0	3.247	0.128	62.050
42256.0	3.217	0.127	65.497

Nota. Promedio de las mediciones obtenidas en los ensayos para las 7 probetas de compresión para impresión 3D MSLA. Elaboración propia.

Anexo 4: Promedio de las muestras de tracción para resina vertida

Cuadro 16. Resultados promedio del ensayo de tracción para resina vertida

Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)
0.0	0.000	0.000	0.000
444.8	0.376	0.015	2.269
889.6	0.711	0.028	4.539
1334.4	1.011	0.040	6.808
1779.2	1.560	0.061	9.078
2224.0	1.808	0.071	11.347
2668.8	2.515	0.099	13.616
3113.6	2.758	0.109	15.886
3558.4	3.571	0.141	18.155
4003.2	3.937	0.155	20.424
4448.0	5.038	0.198	22.694
4892.8	5.232	0.206	24.963

Nota. Promedio de los datos obtenidos en el ensayo para las 7 probetas de tracción para resina vertida. Elaboración propia.

Anexo 5: Promedio de las muestras de flexión para resina vertida

Cuadro 17. Resultados promedio del ensayo de flexión para resina vertida

Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)
0.0	0.000	0.000	0.000
89.0	1.742	0.116	5.338
177.9	3.447	0.230	10.675
266.9	5.523	0.368	16.013
355.8	7.684	0.512	21.350
444.8	10.043	0.670	26.688

Nota. Promedio de los datos obtenidos en el ensayo para las 7 probetas de flexión de resina vertida. Elaboración propia.

Anexo 6: Promedio de las muestras de compresión para resina vertida

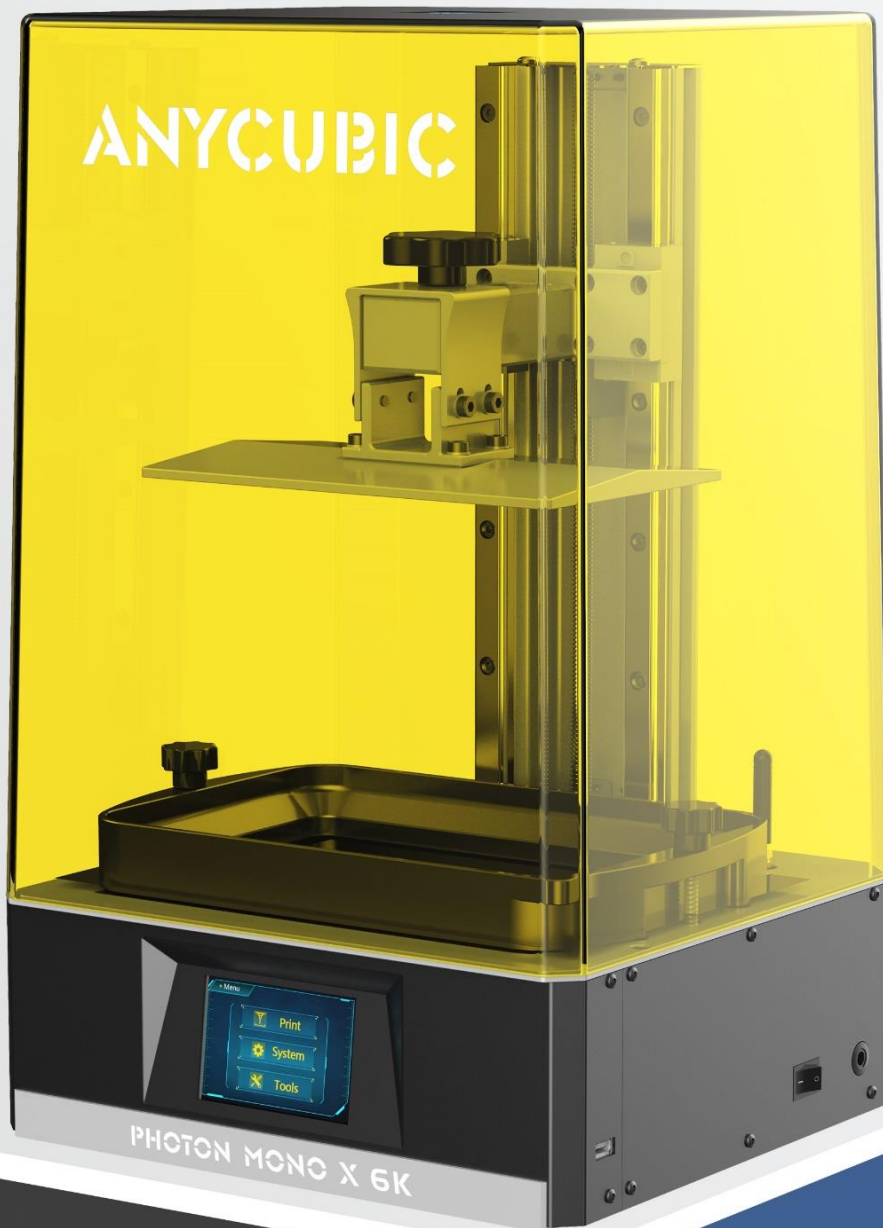
Cuadro 18. Resultados promedio del ensayo de compresión para resina vertida

Fuerza (N)	Alargamiento (mm)	Deformación (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)
0.0	0.000	0.000	0.000
2224.0	0.766	0.030	3.447
4448.0	1.136	0.045	6.894
6672.0	1.702	0.067	10.342
8896.0	2.155	0.085	13.789
11120.0	2.504	0.099	17.236
13344.0	2.841	0.112	20.683
15568.0	3.219	0.127	24.130
17792.0	3.759	0.148	27.578

Nota. Promedio de los datos obtenidos en el ensayo para las 7 probetas de compresión para resina vertida. Elaboración propia.

Anexo 7: Manual de usuario Photon Mono X 6K

En este anexo se incluye el manual de usuario completo de la impresora Photon Mono X 6K de la marca Anycubic en formato PDF ya que el proceso importante es la calibración y preparación previa a la impresión de una máquina MSLA.



 **User Manual**

PHOTON MONO X 6K

Dear customer,

Thank you for choosing **ANYCUBIC** products.

Maybe you are familiar with 3D printing technology or have purchased **ANYCUBIC** printers before, we still highly recommend that you read this manual carefully. The installation techniques and precautions in this manual can help you avoid any unnecessary damage or frustration.

Please visit <https://www.anycubic.com/pages/contact-us> to contact us if you have any question. You can also gain more information such as software, videos, models from the website.



ANYCUBIC support center

Team **ANYCUBIC**

Copyrighted by "Shenzhen Anycubic Technology Co., Ltd ", all rights reserved.

Safety Instructions

Always follow the safety instructions during assembly and usage, to avoid unnecessary damage to the 3D printer or individual injury



Please contact our customer service first if you have any issue after receiving the products.



Be cautious when using the scraper. Never direct the scraper towards your hands.



In case of emergency, please immediately cut off the power of **ANYCUBIC** 3D printer and contact the technical support.



ANYCUBIC 3D printer includes moving parts that can cause injury.



It is recommended to use protection glasses when sanding the printed models to avoid eye contact with small particles.



Keep the **ANYCUBIC** 3D printer and its accessories out of the reach of children.



Vapors or fumes may be irritating at operating temperature. Always use the **ANYCUBIC** 3D printer in an open and well ventilated area.



ANYCUBIC 3D printer must not be exposed to water or rain.



Operate **ANYCUBIC** 3D printer with a temperature of 8°C-40°C and a humidity of 20%-50%. For optimal performance, do not exceed this range. Also, avoid direct sunlight exposure.



Do not disassemble **ANYCUBIC** 3D printer, please contact technical support if you have any question.

Contents

1. Technical Specification	5
2. Packing List	7
3. Product Overview	8
4. Menu Directory	9
5. Assembly and Leveling Instructions	12
6. First Print Instructions	16
7. Slicing Software Overview	19
8. FAQ and Machine Maintenance	20

Technical Specification

Printing

System	ANYCUBIC Photon Mono X 6K
Operation	3.5-inch Color TFT Screen
Software	ANYCUBIC Photon workshop
Connectivity	USB memory stick

Specifications

Technique	LCD Shadow Masking
Light source	UV-LED (wavelength 405nm)
XY Resolution	34.4 μ m 5760*3600 (6K)
Z axis Accuracy	0.01mm
Suggested Layer Thickness	0.01 ~ 0.15mm
Suggested Print Speed	MAX 60mm/h
Rated power	120W

Physical Dimensions

Dimension	270mm (L) *290mm (W) 475*mm (H)
Build volume	197mm (L) *122mm (W) *245mm (H)
Materials	405nm UV-resin
Net weight	~10.75 kg

Technical Specification

Recommended Printing Parameters


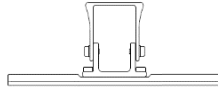
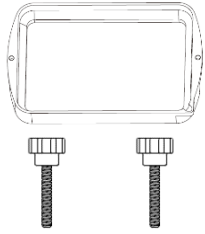


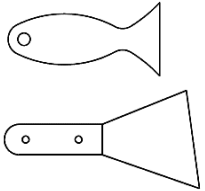
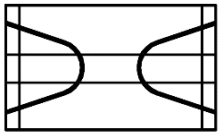

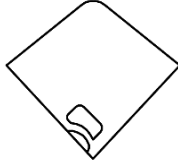




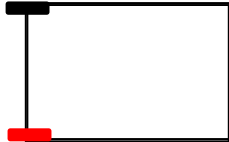
Layer Thickness	0.05 mm
Normal Exposure Time	2 s
UV power	100% (for the transparent color resin, it is 100%; for others, such as grey, black, white and skin color resin, it is 80%)
Off Time	0.5 s
Bottom Exposure Time	23 s
Bottom Layers	4
Z Lift Distance	8 mm
Z Lift Speed	2 mm/s
Z Retract Speed	3 mm/s
Anti-alias	1

Note:

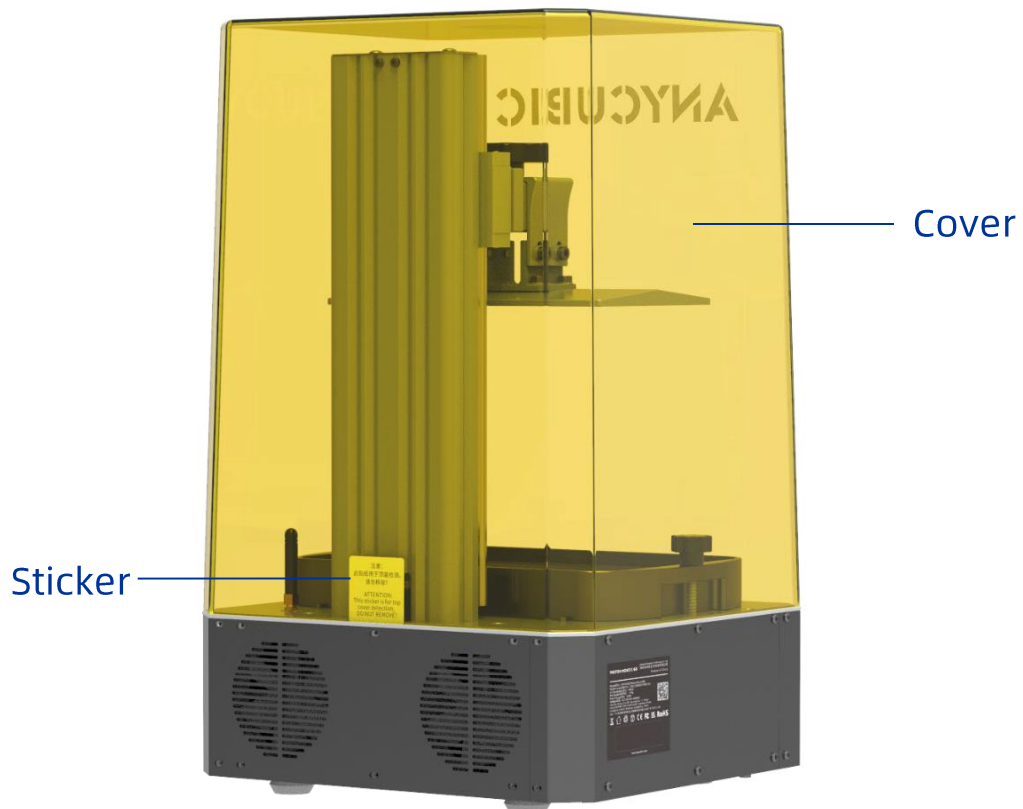
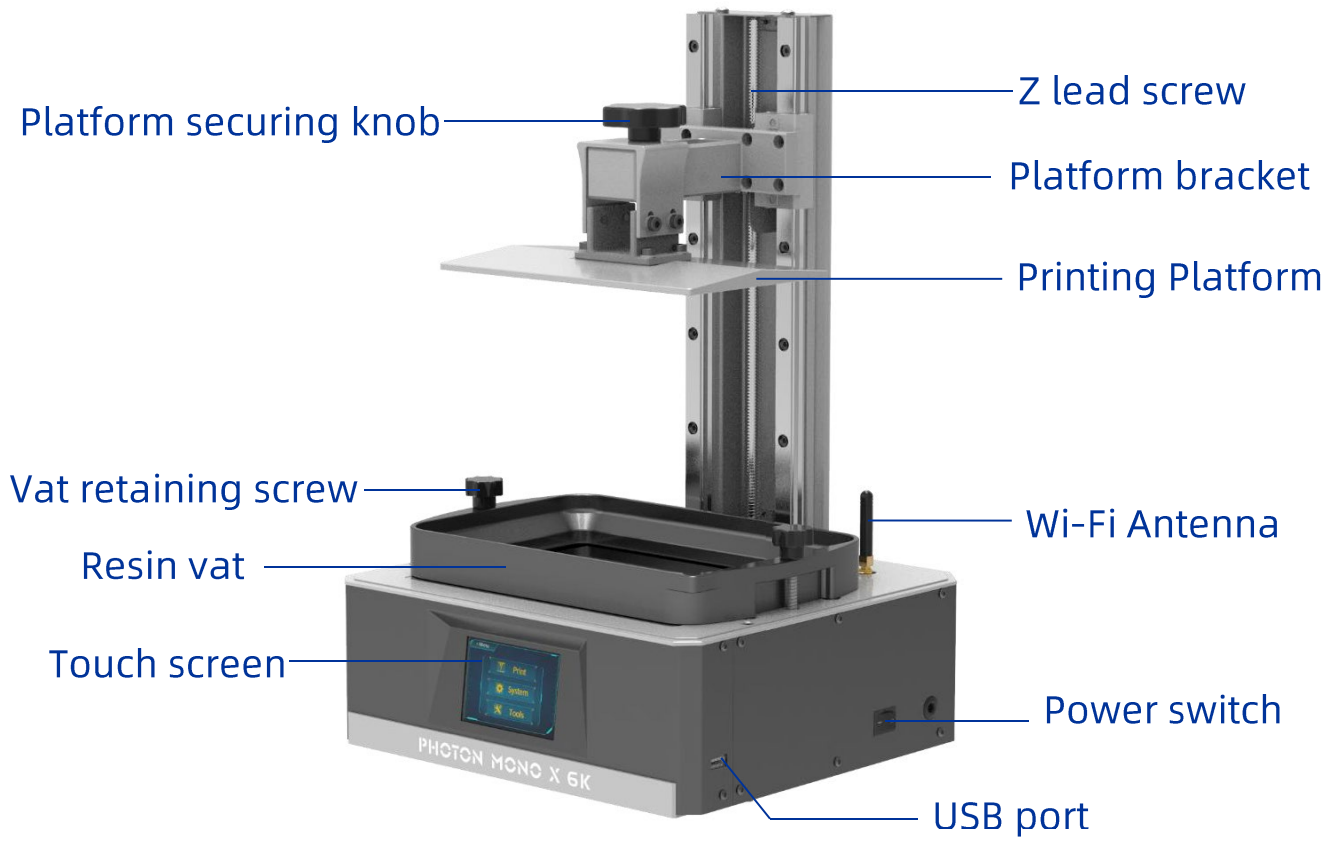
- 1.The recommended printing parameters above is for reference only, which is more suitable for Anycubic resin.
2. The UV power of the machine is high. If there are solid residue in the resin vat or on the printing platform frequently, please decrease the UV power and increase the normal exposure time.



Packing List

		
	Print platform 1PC	Resin vat 1PC
		
	USB memory 1PC	Scrapers 2PCS
Photon Mono X 6K		
Mask 1PC	Gloves 3Pairs	
		
Power adaptor 1PC	WIFI Antenna 1PC	Leveling paper 1PC
		
Tool kit	Screen protector kit	

Product Overview



Menu Directory

Home menu



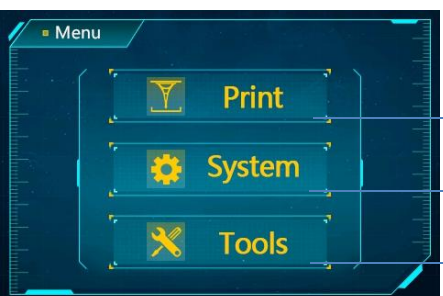
Print

System

Tools



Home menu



Enter the Print Menu

Enter the System Menu

Enter the Tools Menu

Menu Directory

Print

File List:



Page up

Page down

Return to the Home Menu

Click Files



Delete the current file

Click to start printing

Return to the Print Menu

System

Language: Change language(English/Chinese)

Service:



Official website

Return to the System Menu

Information:

Product system

System version

Product ID

IP Address



Return to the System Menu

Menu Directory

Tools

Move Z:




The screenshot shows the 'Move Z' menu with the following options:

- 0.1mm
- 1mm
- 10mm
- Up arrow icon
- Down arrow icon
- Home icon
- Stop icon (circle with slash)
- Z = 0
- Return icon (curved arrow)

Annotations:

- Move the Z axis downwards (points to 0.1mm, 1mm, 10mm)
- Move Z by 0.1mm/1mm/10mm (points to 0.1mm, 1mm, 10mm)
- Move the Z axis upwards (points to Up arrow icon)
- Return to Zero (points to Home icon)
- Stop moving the Z axis (points to Stop icon)
- Return to the Tools Menu (points to Return icon)
- Reset the zero point (points to Z = 0)

Detection:



The screenshot shows the 'Detection' menu with the following options:

- Please set the exposure time of the test image.
- S
- Next
- Up arrow icon
- Down arrow icon
- Return icon (curved arrow)

Annotations:

- Click to set the test time (points to S)
- Test LED and LCD for the preset time (points to Next)
- Increase the test time (points to Up arrow icon)
- Reduce the test time (points to Down arrow icon)
- Return to the Tools Menu (points to Return icon)

Exposure:



The screenshot shows the 'Exposure' menu with the following options:

- Please set the exposure time.
- S
- Next
- Image selection icons (two different image frames)
- Return icon (curved arrow)

Annotations:

- Click to set the exposure time (points to S)
- Expose for the preset time (points to Next)
- Select one of the images to expose (points to the image selection icons)

Lock icon: Enable/disable the door detection function

Horn icon: Turn on/off the screen sound

Gear icon: Enter to set the UV power

Assembly and Leveling Instructions

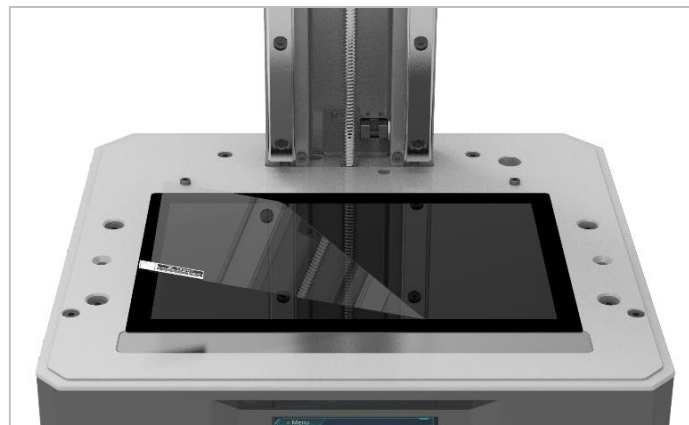
1. Unpack the machine and take out the accessories. Then plug in the power cord and turn on the printer.



2. Raise Z axis to a certain height that the curing screen will not be scratched when the printing platform is installed.

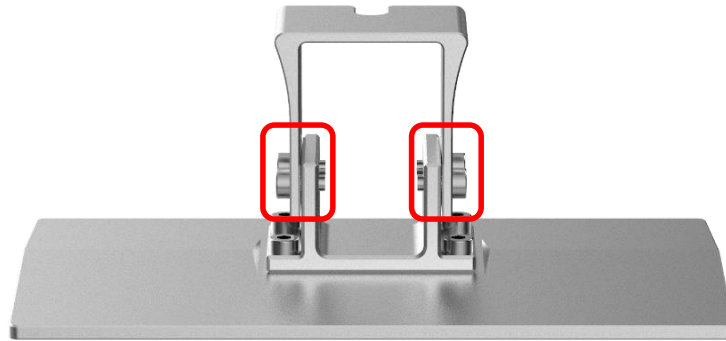


3. Tear off the protective film before leveling and printing.

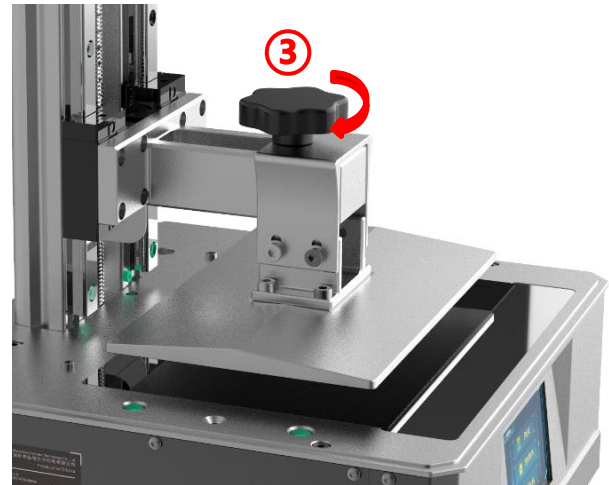
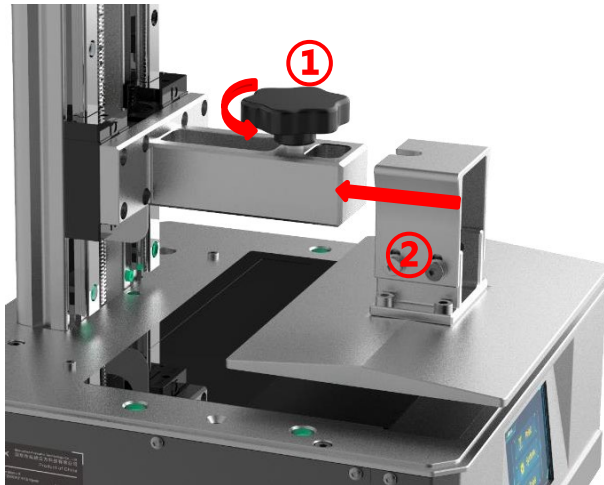



Assembly and Leveling Instructions

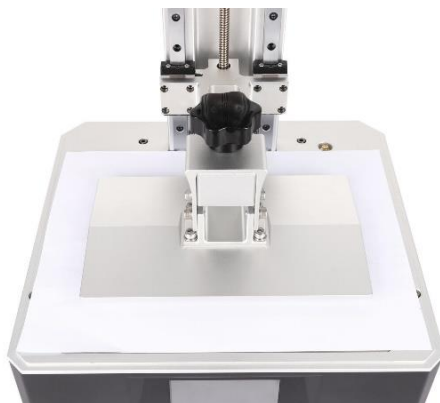
4. Peel off the packing film on the printing platform, then loosen the four screws.



5. Install the printing platform.



6. Place a leveling paper on the curing screen. Then click “” on touch screen. Wait for the Z axis to descend and stop automatically.

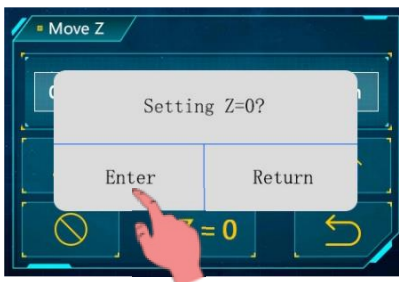


Assembly and Leveling Instructions

7. Use your fingers to press the platform gently, to let it fit evenly on the curing screen. Then tighten the four screws on the platform.



8. Click "Z=0" to save the zero position, and then click "Enter" on the pop-up window. Till now, the leveling process is finished. Click "Enter" again and take out the leveling paper.

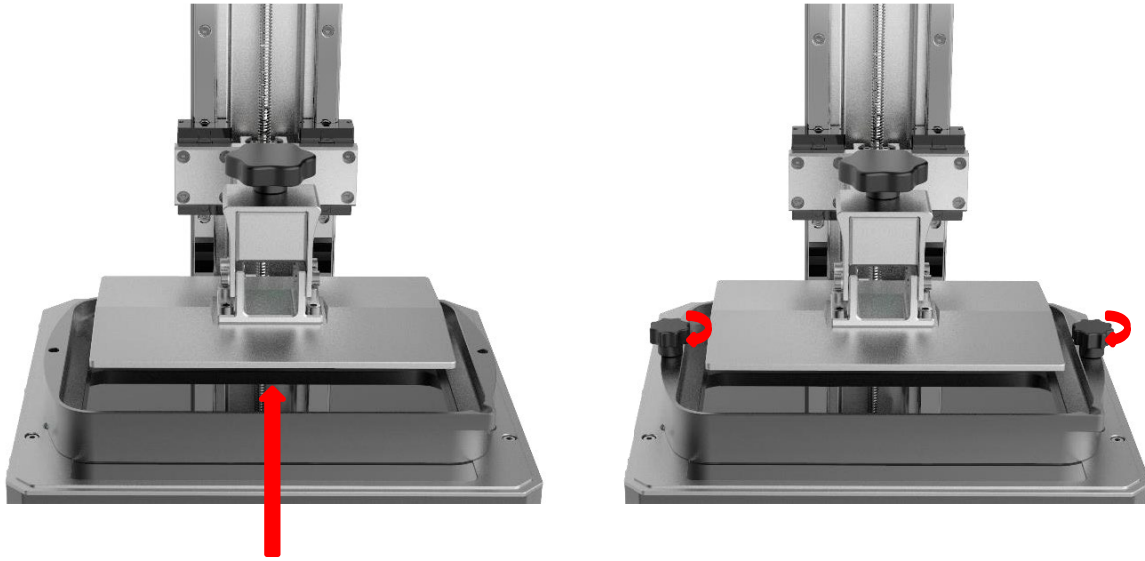


9. Testing UV light: Click "Tools" → "Detection", set the test time and then click "Next". The curing screen should display a complete image as shown below. Otherwise, the UV light may have sort of malfunction, please contact tech support.

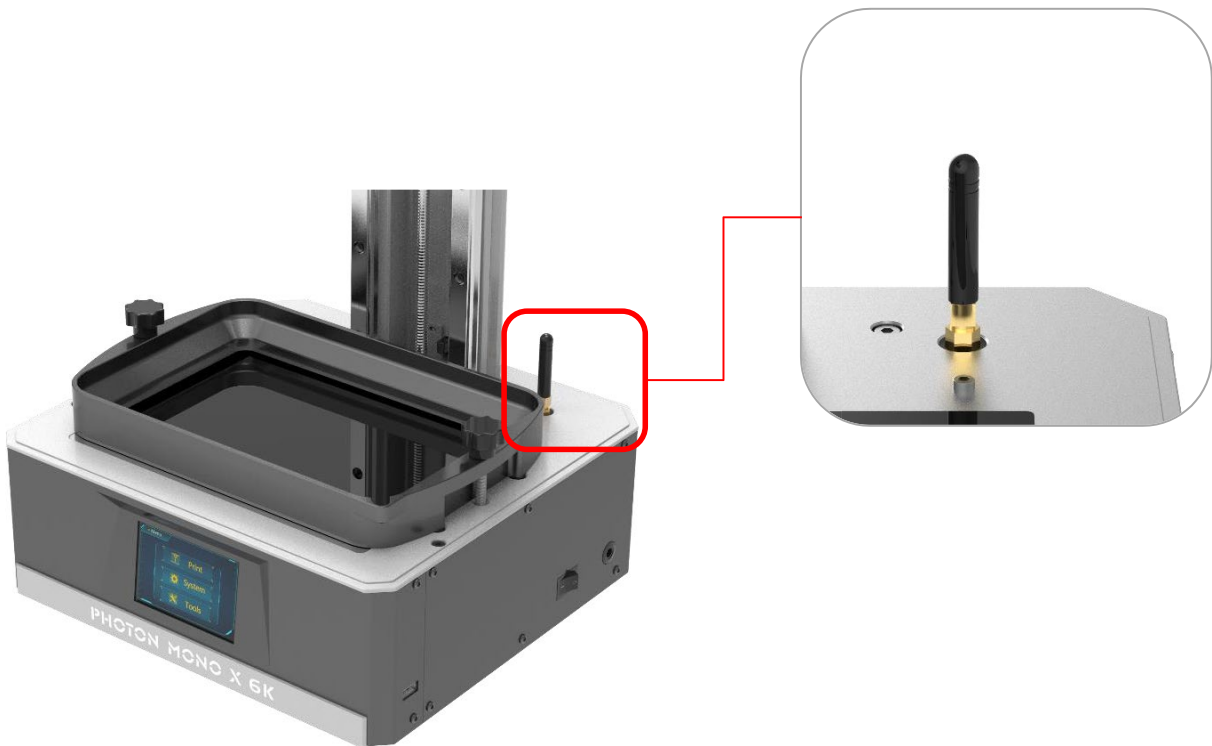


Assembly and Leveling Instructions

10. Install the resin vat.



11. Install the Wi-Fi antenna.

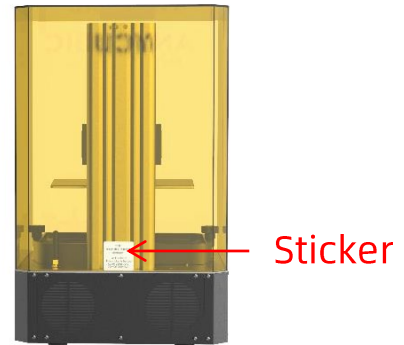
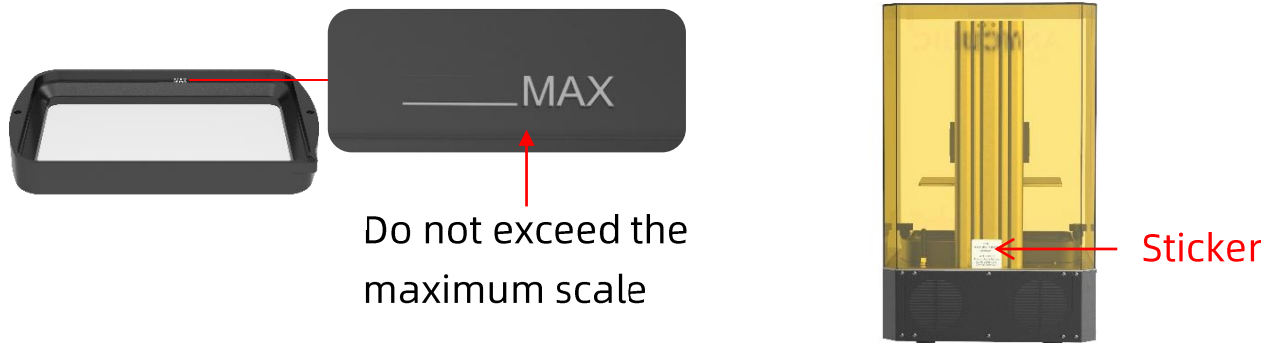


First Print Instructions

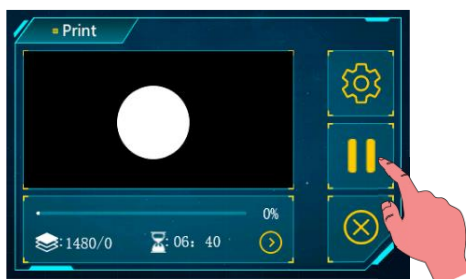
1. Print

Insert the USB memory (the test file "TEST.pwmb" has been saved in it) into the USB port. **Then wear masks and gloves (to avoid direct skin contact with resin)**, and slowly pour resin into the vat. The resin cannot exceed the vat's maximum scale.

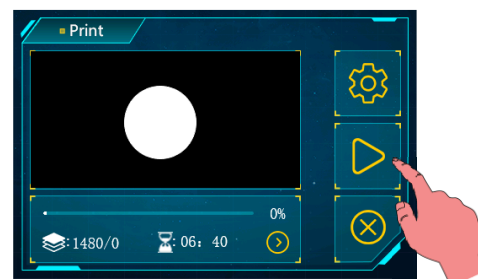
After that, put on the cover. The sticker side should face backward. Take off the gloves, select the "TEST.pwmb" test file and start printing. (The printing time on the screen is for reference only, we make no guarantee that it is the actual printing time.)



If you think the resin is insufficient to finish an ongoing print (or you want to change the resin), you can click "Pause", the platform will rise, and you can slowly add (or change) the resin. After that, click "Start" to resume.



click to pause



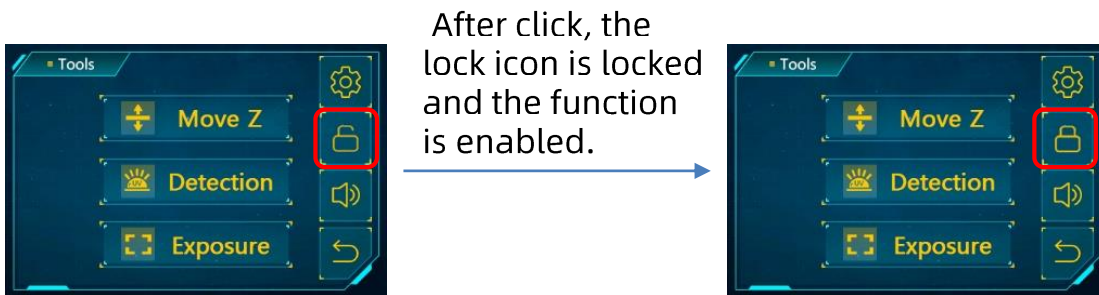
click to start

First Print Instructions

2. Door detection function

Door detection function is disabled by default. If this function is enabled, the printer can detect whether the cover is on or not. Printing will pause when the cover is removed, and will continue when the cover is put back.

Click the lock icon on “Tools” interface to enable/disable this function.




3. Set UV power

There are two ways to set UV power.

Before printing, click “Tools” → “”. Then click “UV power” in the Set up interface to set UV power.



Besides, in the process of printing, you can click “” in Print interface, and page down to find “UV power”. Then click it to set the UV power.

First Print Instructions



4. Handling models and residues

After printing, unscrew and remove the platform when resin stop dropping from the platform. The model can be removed by scraper. The removed model should be washed with ethanol 95vol% concentration. The printed model may need post curing to achieve better hardness by direct **sunlight** or UV-curing box.



【IMPORTANT】 Inevitably, in case of incomplete curing or failed prints, there might be some cured resin left in the vat. It is suggested to filter the resin by a funnel and then store the liquid in a sealed container. The residues left on the platform or in the vat can be wiped off with paper towel.

Before each prints, please ensure there is no solid residues in the vat or on the platform, otherwise the FEP film may be crushed and broken during printing.

Slicing Software Overview

3D printer reads sliced file and prints models. It is necessary to convert 3D files (stl./obj.) into sliced files for machine to recognize. Software that realize the process is called slicing software, for example, Photon Workshop.

Photon Workshop can be used to export sliced file. You should select **Photon Mono X 6K** as machine type first, then manipulate the model and set the parameters. Lastly, export the sliced file (.pwmb).

The instruction of Photon Workshop has been saved in the USB memory, it is recommended that read it carefully if it is the first time for you to use Photon Workshop.

FAQ and Machine Maintenance

1. FAQ

(1) Model do not stick to platform

- Bottom exposure time is insufficient, increase the exposure time.
- Contact area between the model and platform is small, please add raft.
- Bad leveling.

(2) Layer separation or splitting

- The machine is not stable during printing.
- FEP film in the vat is not tight enough or it need a change for new one.
- The printing platform or resin vat is not tightened.
- The lift speed is too fast.
- The printing object is hollowed without punching.

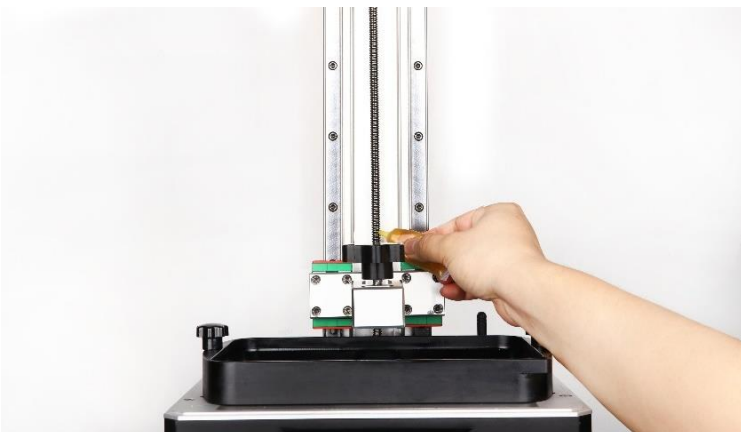
(3) Layer shift

- Add supports.
- Reduce the lift speed.

(4) Floccules left in resin vat

- The exposure time is too long. Reduce the normal exposure time and bottom exposure time.

2. Machine maintenance

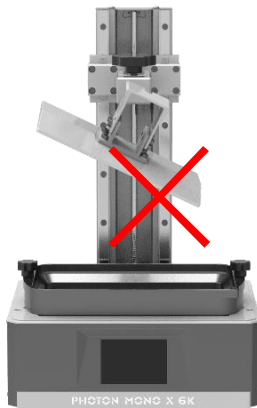


(1) If Z axis make noisy sound, please apply lubricant to Z lead screw.

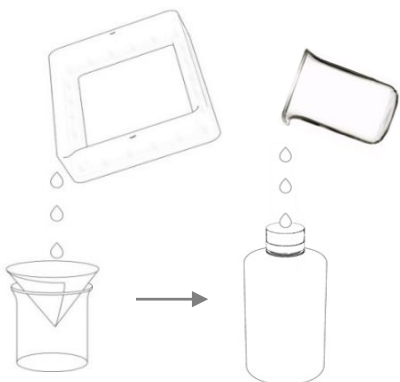
FAQ and Machine Maintenance



(2) Clean off the residues cured on FEP film when the printing fail: Set full-screen exposure for 20s and then remove the cured resin sheet to protect the film. Do not use sharp objects to scrape off the residues on FEP film.



(3) Be careful when remove the platform, do not let it fall to damage the machine.



(4) Do not left resin in resin vat for over two days when it is unused. Please filter and store the resin properly.

FAQ and Machine Maintenance

- (5) After printing, please clean up the platform (**wipe with paper towels or wash with alcohol**), and ensure no residue left (**filter the residue with funnel**).
- (6) If the body of printer is stained with resin, use alcohol to clean.
- (7) Please clean the resin vat first before you change resin.

Thank you for purchasing **ANYCUBIC** products! Under normal usage and service, the products have a warranty period up to one year. Please visit **ANYCUBIC** support center(support.anycubic.com/en) to report any issue with **ANYCUBIC** products. Our professional after-sale service team would respond within 24 hours and solve the issues.

Anexo 8: Guía de manufactura de vertido de resina

Este anexo consiste en la guía de manufactura para vertido de resina, resultado del trabajo de graduación.



Guía de manufactura con resina vertida

Redactado por: Pablo Andres Figueroa Gámez

Fecha de revisión: 24 de octubre de 2025

Versión: 1.0

Índice

1. Introducción	2
2. Fundamentos de las resinas	3
2.1 Resina de poliuretano	4
2.2 Resina epóxica	4
2.3 Parámetros importantes en la selección de resinas	5
3. Pieza a fabricar	7
3.1 Consideraciones geométricas	8
3.2 Funcionalidad y requisitos mecánicos	8
4. Diseño y fabricación del molde	9
4.1 Tipos de moldes	9
4.2 Diseño del molde	12
4.3 Fabricación del molde	13
4.4 Consideraciones adicionales	16
5. Preparación para la colada	18
6. Proceso de colada	20
6.1 Mezclado de la resina	20
6.2 Técnicas para evitar burbujas	21
6.3 Vertido de la resina	21
6.4 Curado	21
6.5 Desmoldeo y cuidados posteriores	21
6.6 Control dimensional y acabado final	22
7. Conclusiones y recomendaciones finales	22
7.1 Errores frecuentes y cómo evitarlos	22
7.2 Buenas prácticas de manufactura	23
7.3 Recomendaciones prácticas	23

1. Introducción

La fabricación de piezas mediante resina vertida se ha consolidado como una técnica versátil y accesible tanto en entornos académicos como profesionales. Su capacidad para reproducir geometrías complejas, junto con el bajo costo relativo del proceso y la ausencia de maquinaria especializada, la convierten en una alternativa viable frente a métodos convencionales como el mecanizado o la impresión 3D.

La presente guía tiene como propósito brindar una descripción práctica y estructurada del proceso de manufactura de piezas utilizando resina vertida, con un enfoque particular en el uso de la resina de uretano Smooth-Cast 305 de la marca Smooth-On. Este material fue seleccionado y evaluado durante el desarrollo del proyecto de graduación titulado “Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de piezas fabricadas mediante impresión 3D MSLA y resina vertida”, elaborado por Pablo Andres Figueroa Gámez.

Es importante mencionar que, dentro de esta guía, toda referencia al trabajo de graduación corresponde específicamente al proyecto antes mencionado, del cual este documento constituye un componente complementario enfocado en el aspecto práctico de manufactura.

El documento está dirigido principalmente a estudiantes de ingeniería, especialmente aquellos interesados en explorar procesos de manufactura alternativos aplicables al desarrollo de prototipos o piezas funcionales. Por ello, se asume que los lectores poseen conocimientos básicos en modelado 3D, materiales y fundamentos de manufactura.

La guía presenta recomendaciones basadas en experiencias reales obtenidas durante la experimentación, así como advertencias sobre errores comunes y buenas prácticas para optimizar los resultados. Además, se prioriza el uso de materiales, herramientas y equipos disponibles en la Universidad del Valle de Guatemala y en el contexto local, con el fin de facilitar la replicabilidad del procedimiento por parte de futuros estudiantes o investigadores.

2. Fundamentos de las resinas

La selección adecuada de la resina es uno de los factores más determinantes en el éxito del proceso de vertido, también conocido como fundición o colada. Existen distintos tipos de resinas con propiedades físicas, químicas y mecánicas variables, las cuales influyen directamente en la resistencia, durabilidad, acabado superficial y funcionalidad de la pieza final. Por lo tanto, comprender las características de cada tipo de resina permite tomar decisiones informadas en función de las necesidades del proyecto y las condiciones de trabajo.

En esta sección se presentan los dos tipos de resinas más comúnmente utilizados en procesos de colada manual: poliuretano y epóxica. Cada una posee ventajas y limitaciones que deben ser consideradas según el uso final de la pieza, el tipo de molde y material de este, el tiempo de trabajo disponible y el entorno en el que se realizará la manufactura.

2.1 Resina de poliuretano

Las resinas de poliuretano son ampliamente utilizadas por su rápido tiempo de curado, buena resistencia mecánica y facilidad de pigmentación. Su baja viscosidad permite un llenado eficiente de moldes complejos. Sin embargo, son sensibles a la humedad ambiental, lo que puede generar burbujas si no se toman precauciones adecuadas.

Ventajas

- Curado rápido (desde minutos hasta pocas horas).
- Buena resistencia a impacto y desgaste.
- Flexible con menor riesgo de fractura.
- Acepta aditivos como pigmentos, cargas y retardantes.

Desventajas

- Menor estabilidad térmica (comparada con epóxicas).
- Requiere control de humedad.
- Vida útil corta una vez mezclada.

2.2 Resina epóxica

Las resinas epóxicas son conocidas por su alta resistencia química y mecánica, así como por su excelente adherencia a diversos materiales. Aunque su curado es más lento, ofrecen un mejor acabado superficial y una menor contracción.

Ventajas

- Alta resistencia estructural y térmica.
- Acabado transparente y excelente adherencia.
- Buen acabado superficial, ideal para piezas decorativas o funcionales.

Desventajas

- Curado más lento (varias horas a días).
- Más costosa que la de poliuretano.
- Puede ser quebradiza en ciertas formulaciones.

¿Cuál es la mejor opción?

- Si buscas resistencia química, adherencia y acabados brillantes, la resina epoxi es la mejor alternativa.
- Si buscas resistencia a impactos, flexibilidad y rapidez de curado, la resina de poliuretano es mejor.

2.3 Parámetros importantes en la selección de resinas

Al seleccionar una resina para procesos de colada, es fundamental analizar sus propiedades técnicas, ya que estas determinan la facilidad de trabajo, la calidad del producto final y su desempeño mecánico. Los parámetros más relevantes incluyen:

- (1) **Viscosidad:** indica qué tan fluida es la resina antes del curado. Una viscosidad baja facilita el llenado de moldes con geometrías complejas y reduce la formación de burbujas.
- (2) **Proporción de mezcla (resina : catalizador):** afecta directamente la reacción de curado. Una relación incorrecta puede provocar piezas frágiles o pegajosas.
- (3) **Tiempo de trabajo (*pot life*):** periodo durante el cual la mezcla permanece fluida y manipulable. Es importante para planificar el vertido y el manejo del material.
- (4) **Tiempo de curado:** determina cuándo la pieza puede ser desmoldada o utilizada. Varía según la formulación y la temperatura ambiente.

- (5) **Dureza (shore A o D):** describe la rigidez del material una vez curado. Las resinas más duras (shore D) se usan para piezas estructurales, mientras que las más blandas (shore A) son flexibles y por lo general se presencia en moldes.
- (6) **Resistencia mecánica:** propiedades como resistencia a la tracción, flexión o impacto, esenciales para aplicaciones funcionales bajo esfuerzos.
- (7) **Contracción volumétrica:** la reducción dimensional durante el curado. Un valor bajo garantiza mayor precisión en el moldeo. Estas propiedades son críticas que considerar para fabricación de piezas funcionales en mecanismos.
- (8) **Temperatura de servicio:** indica el rango térmico en el cual la pieza mantiene sus propiedades sin deformarse.

Para el desarrollo experimental del trabajo de graduación se seleccionó la resina de poliuretano Smooth-Cast305, de la marca Smooth-On vendida por el distribuidor oficial Resitek, debido a su disponibilidad en el mercado local, su facilidad de uso, al no requerir procesos de vacío y sus adecuadas propiedades mecánicas para el prototipado funcional.

Propiedad	Valor
Resistencia a la tracción	20.7 MPa
Resistencia a la compresión	26.2 MPa
Alargamiento a la rotura	7.5 %
Densidad	1.05 g/cm ³
Proporción de mezcla	100A : 90B
Vida útil de mezcla (<i>Pot life</i>)	7 min
Tiempo de desmoldeo	30 min
Contracción	< 0.0065 %
Limitante de espesor	No

En una etapa inicial se consideró emplear una resina de uretano con propiedades mecánicas teóricas similares a las de la resina utilizada en la impresión 3D; sin embargo, una de las principales limitaciones de las formulaciones de resina de uretano más parecidas, es la existencia de un espesor máximo de curado. Cuando se excede este límite, puede producirse una inhibición parcial de la reacción, provocando que el material no cure correctamente en su totalidad. Limitante que afectaría el objetivo del estudio.

Por esta razón, uno de los criterios determinantes para la selección de la Smooth-Cast 305 fue su capacidad de curar sin restricciones de espesor, lo que permite fabricar piezas de mayor volumen en una sola colada. En contraste, las resinas que presentan

esta limitación requieren ser vertidas por capas sucesivas, lo cual no se alinea con la metodología experimental de colada continua establecida para este proyecto.

Algunos parámetros establecidos experimentalmente son:

Propiedad	Valor
Tiempo de mezclado	1 min
Temperatura de curado	20-25 °C
Porcentaje de humedad	50 – 55 %

La temperatura y la humedad ambiental son factores determinantes durante el proceso de curado de las resinas de uretano, ya que este tipo de material es altamente sensible a la humedad.

Cuando la humedad relativa del ambiente es elevada, puede producirse una reacción no deseada entre los componentes de la resina y el vapor de agua presente en el aire, generando la formación de burbujas o espuma dentro del material. Esto afecta directamente la apariencia superficial y las propiedades mecánicas de la pieza final.

Para minimizar este efecto, es recomendable realizar la colada en un ambiente controlado, donde la temperatura y la humedad se mantengan dentro de rangos estables. En el desarrollo del trabajo de graduación, el vertido de resina se efectuó en un espacio con aire acondicionado, idealmente equipado con función de deshumidificación, lo cual permitió reducir la humedad ambiental y obtener piezas con un acabado superficial más uniforme y libre de defectos.

3. Pieza a fabricar

En el proceso de vertido de resina existen dos posibles enfoques u objetivos principales según el propósito del trabajo. Por un lado, la técnica puede emplearse para replicar una pieza existente, la cual se utiliza directamente como pieza maestra para la fabricación del molde. Por otro lado, puede emplearse desde la fabricación de una pieza completamente nueva, diseñada específicamente para el proceso de moldeo.

El diseño de la pieza es un paso crítico en cualquier proceso de manufactura, y en el caso de vertido de resina, ciertas consideraciones específicas deben tomarse en cuenta desde el inicio. A diferencia de otros métodos como la impresión 3D o el mecanizado, el proceso de colada involucra la creación de un molde, lo que introduce nuevas restricciones geométricas y de proceso que deben reflejarse en el CAD.

3.1 Consideraciones geométricas

A la hora de diseñar piezas para ser fabricadas mediante colada de resina, se deben seguir ciertas recomendaciones geométricas clave:

- **Evitar ángulos negativos (*undercuts*):** estos impiden extraer la pieza del molde sin dañar el molde o la pieza. Si se necesitan estos ángulos, el molde debe ser de varias partes para facilitar la extracción de esta o en su alternativa utilizar moldes flexibles o colapsables.
- **Incluir ángulos de desmoldeo:** se recomienda un ángulo mínimo de 1–3 grados en paredes verticales para facilitar el desmoldeo. Si es un molde flexible como lo es la silicona, esta recomendación puede ser ignorada ya que el material permite la extracción de la pieza al deformarse.
- **Redondear esquinas internas:** mejora el flujo de la resina en la cavidad del molde y reduce concentraciones de tensión. Esta recomendación es si lo permite el diseño.

3.2 Funcionalidad y requisitos mecánicos

Antes de iniciar el diseño de una pieza que será fabricada mediante colada de resina, es fundamental definir claramente su propósito. La función del componente determinará los requisitos mecánicos, el tipo de resina más adecuado, el diseño del molde y los procesos posteriores de acabado.

- **¿La pieza será funcional o estructural?**
Si la pieza cumple un propósito mecánico o de ensamblaje dentro de un sistema, es necesario priorizar la resistencia mecánica, así como la precisión dimensional. En estos casos, se recomienda utilizar resinas rígidas de poliuretano con baja contracción y buena estabilidad térmica.
- **¿La pieza será decorativa o estética?**
En aplicaciones donde el enfoque principal debe ser el acabado superficial y la apariencia visual se pueden utilizar resinas pigmentadas o transparentes como son las epóxicas. En este tipo de piezas se prioriza la fluidez de la mezcla y la temperatura de vertido ya que influyen directamente en la textura final. Además, los procesos posteriores de lijado, pulido o pintura adquieren relevancia para lograr el aspecto deseado.

4. Diseño y fabricación del molde

El molde es el componente que define la geometría final de la pieza y permite la formación de su volumen interno a partir de un material líquido. En el proceso de colada con resina, el diseño y la fabricación del molde son tan importantes como el diseño de la pieza misma. Un molde mal diseñado puede ocasionar burbujas, deformaciones, rebabas, o incluso impedir el desmoldeo. Esta sección presenta los principios fundamentales para diseñar moldes funcionales y fabricar prototipos confiables utilizando métodos accesibles como la impresión 3D o la colada de silicona.

4.1 Tipos de moldes

Existen diversos tipos de moldes empleados en el proceso de vertido de resina, cuya selección depende directamente de la complejidad geométrica de la pieza, el tipo de material a utilizar y el objetivo del proceso. A continuación, se describen los tipos de moldes más comunes que pueden fabricarse para la colada de resina.

(1) Moldes rígidos de una sola pieza - (abiertos)

Estos moldes se fabrican generalmente por impresión 3D o mecanizado CNC, y se emplean para piezas con geometrías simples y sin ángulos negativos. La cavidad del molde corresponde directamente al negativo de la pieza a reproducir.

- **Fabricación:** se crea la cavidad directamente en el material rígido.
- **Ventajas**
 - Rápidos de fabricar.
 - Económicos si la geometría lo permite.
 - Buena repetibilidad para prototipos simples.
- **Desventajas**
 - Dificultad para desmoldar si hay relieves o retracciones.
 - No aptos para geometrías complejas o con bajo ángulo de extracción.

(2) Moldes rígidos de dos mitades - (cerrados)

Son moldes divididos en dos partes (o más) que encapsulan la geometría de la pieza. Permiten fabricar objetos con mayor complejidad y son ideales para piezas con volúmenes cerrados o formas más complejas.

- **Fabricación:** modelado CAD dividido en dos mitades, manufacturadas mediante impresión 3D o mecanizado CNC, con sistemas de alineación, canal de colada y respiraderos.
- **Ventajas**
 - Permiten reproducir geometrías más detalladas.
 - Reutilizables y resistentes.
 - Posibilidad de insertar respiraderos para evitar burbujas.
- **Desventajas**
 - Requieren una alineación precisa entre mitades.
 - Mayor tiempo de diseño y fabricación.
 - Necesitan sellado y desmoldante si se usan resinas reactivas.

(3) Moldes flexibles de silicona - (abiertos y cerrados)

Estos moldes se elaboran vertiendo silicona RTV (vulcanizable a temperatura ambiente) sobre una pieza maestra o un molde positivo. Una vez curada, la silicona reproduce con alta fidelidad todos los detalles del modelo original, obteniéndose un molde flexible y fácil de manipular.

- **Fabricación:** colada de silicona en una caja de contención sobre una pieza maestra o molde positivo previamente fabricado.
- **Ventajas**
 - Excelente reproducción de detalles.
 - Fácil desmoldeo, incluso para piezas con geometría complicada.
 - Alta compatibilidad con resinas epóxicas y de poliuretano.
- **Desventajas**
 - Requiere una pieza maestra o molde positivo.
 - Durabilidad limitada (número de coladas según resina y cuidado).

(4) Moldes híbridos (rígido + flexible)

Estos moldes combinan una estructura externa rígida (como acrílico, plástico o aluminio) con un revestimiento interno flexible de silicona. Se utilizan para obtener estabilidad dimensional y mantener la facilidad de desmoldeo.

- **Ventajas**

- Permiten modularidad y reutilización parcial del molde.
- Ofrecen buena estabilidad estructural y precisión.

- **Desventajas**

- Diseño y fabricación más complejos.
- Requieren una correcta integración entre materiales diferentes.

Clasificación según el método de colada

Además de su composición, los moldes también pueden clasificarse de acuerdo con su configuración y el método de colada utilizado:

- **Moldes abiertos:** son los más sencillos y se utilizan principalmente para piezas planas o de baja altura. La resina se vierte directamente sobre la cavidad expuesta del molde, y el desmoldeo se realiza por la misma abertura una vez que el material ha curado.
- **Moldes cerrados:** la cavidad se encuentra completamente encerrada entre dos o más mitades, lo que permite reproducir piezas tridimensionales completas. La resina se introduce a través de un canal de colada y el aire es evacuado mediante respiraderos o asistencia por vacío.

Para el desarrollo del trabajo de graduación se optó por utilizar moldes flexibles de silicona con un marco rígido de acrílico. Esta configuración fue seleccionada debido a que el objetivo principal del estudio se centró en validar las propiedades mecánicas del material y comparar distintos métodos de manufactura, más que en evaluar la precisión dimensional de las piezas. Por esta razón, la estabilidad dimensional del molde no se consideró como una variable crítica para la fabricación de las probetas.

Dependiendo del objetivo se debe considerar la selección del tipo de molde ya que tanto la silicona como la resina a verter en la silicona tiene contracciones que se deben contemplar desde el diseño CAD.

4.2 Diseño del molde

El diseño digital del molde es una etapa fundamental, ya que permite visualizar, ajustar y validar todos los aspectos del proceso antes de su fabricación física. A partir del modelo 3D de la pieza, se generan las cavidades y detalles necesarios para que el molde garantice un llenado adecuado, una extracción sencilla y una buena calidad superficial.

Diseño general del molde (aplicable para manufactura CNC)

(1) Importar el modelo 3D de la pieza

Utiliza software CAD paramétrico como Fusion 360, SolidWorks o Autodesk Inventor para importar o modelar la pieza base. Este modelo será la referencia para crear la cavidad del molde.

(2) Definir los límites del molde

Crea una caja o volumen envolvente que rodee completamente la pieza, dejando un espesor mínimo de 5 a 10 mm entre la superficie de la pieza y las paredes del molde. Esto garantiza estabilidad estructural y evita fugas.

(3) Generar la cavidad negativa

Aplica una operación de “*boolean difference*” (resta booleana) para sustraer el volumen de la pieza del sólido base. Este paso crea la cavidad donde se verterá la resina.

(4) Dividir el molde (si aplica)

Si la geometría de la pieza lo requiere, corta el molde en dos mitades utilizando un plano de partición que minimice marcas visibles y facilite el desmoldeo.

(5) Agregar características funcionales

- a. **Canal de colada:** diseña un canal cónico o cilíndrico por donde ingresará la resina.
- b. **Respiraderos:** incorpora canales finos en los puntos altos del molde para permitir la salida de aire.
- c. **Pines de alineación:** añade guías o salientes que aseguren el correcto ensamble de las mitades.
- d. **Bordes y base de soporte:** diseña una base plana para estabilidad y manipulación sencilla.

(6) Verificar tolerancias y ángulos de desmoldeo

Aplica ángulos de desmoldeo entre 1 y 3 grados en las paredes verticales para facilitar la extracción de la pieza. Comprueba además que no existan zonas con socavados que impidan liberar la pieza del molde.

(7) Exportar el modelo

Dependiendo del método de fabricación, el molde se puede exportar en formato **.STL**, **.STEP** o **.IGES**, según sea necesario.

4.3 Fabricación del molde

Fabricación de molde mediante CNC

El método CNC permite obtener moldes precisos, repetibles y con excelente acabado superficial, ideales piezas con alta exigencia dimensional. A continuación, se presenta el proceso general que se lleva a cabo para la manufactura de un molde.

Proceso general

1. **Selección del material**

Comúnmente se utilizan bloques de MDF, acrílico o aluminio, según el presupuesto y la precisión requerida. (En cualquier caso, se tiene que aplicar un sellador y desmoldante para evitar que la resina vertida se adhiera al material).

2. **Definición de trayectorias (CAM)**

En el software CAM se definen las estrategias de mecanizado:

- a. Desbaste 3D para retirar el material principal.
- b. Acabado para terminar las dimensiones finales de la pieza.

3. **Configuración de parámetros**

Establece la velocidad de avance, profundidad de corte y velocidad del husillo de acuerdo con el material seleccionado.

4. **Simulación del mecanizado**

Simula el recorrido de la herramienta para verificar que no haya colisiones ni errores de trayectorias.

5. **Mecanizado y acabado**

Una vez ejecutado el mecanizado, se limpian rebabas y se valida que no haya alguna imperfección en la cavidad.

Ventajas: alta precisión, buena repetibilidad, posibilidad de moldes complejos.

Desventajas: requiere equipo especializado, mayor tiempo de preparación.

A continuación, se desglosa la maquinaria y herramienta necesario para ese proceso:

Maquinaria principal

- Fresadora CNC de 3 ejes.
- Computadora con software CAD/CAM.

Herramientas de corte

- Fresas planas: para operaciones de desbaste y superficies planas.
- Fresas de punta esférica (*ball nose*): para zonas curvas y acabado final.
- Fresas cónicas o de detalle: para canales de colada y respiraderos.

Instrumentos de sujeción y alineación

- Mordazas o prensas mecánicas.
- Tornillos y sistemas de fijación de pieza.

Instrumentos de medición y control

- Calibrador vernier o micrómetro digital.
- Nivel de burbuja o indicador de planicidad.
- Regla metálica y escuadra de precisión.

Herramientas de limpieza y acabado

- Lijas finas.
- Brochas o aire comprimido para retirar residuos.

Materiales típicos del molde

- MDF, acrílico, aluminio o polímeros mecanizables.

Fabricación de molde manual o casero

Este enfoque es ideal para prototipos rápidos, probetas o piezas experimentales, donde la precisión extrema no es prioritaria.

Proceso general

1. Impresión del modelo maestro

La pieza maestra puede imprimirse en 3D y luego usarse para generar la cavidad del molde o directamente una pieza maestra que ya se tenga.

2. Construcción del marco o caja

Se puede utilizar acrílico, MDF para formar una caja que contendrá la silicona o el material de moldeo.

3. Posicionamiento de la pieza maestra

Coloca la pieza sobre una base con pegamento para fijarla y luego sellar el fondo para evitar filtraciones.

4. Aplicar desmoldante

Agregar una capa delgada de desmoldante sobre la caja contenedora y la pieza maestra para evitar que se adhiera a la silicona en el momento del desmoldeo.

5. Vertido de la silicona

Prepara y vierte cuidadosamente la silicona RTV sobre la pieza, asegurándote de evitar incorporar burbujas (puede hacerse en desgasificación si se dispone del equipo).

6. Corte y alineación

Una vez curada la silicona, desmoldear en caso de ser abierto o cortar el molde si se requiere separarlo en dos partes.

7. Aplicación de desmoldante

Antes de su uso repetido, aplica una capa delgada de agente desmoldante para prolongar la vida útil del molde. (En el caso con la resina Smooth Cast 305 se obtuvo mejor resultado de acabado superficial al no agregar desmoldante, por lo tanto, se recomienda iniciar con una prueba y evaluar si es el mismo caso.)

Ventajas: bajo costo, materiales accesibles, no requiere maquinaria avanzada.

Desventajas: menor repetibilidad por degradación del molde.

Equipo y herramienta necesario para este proceso de manufactura:

Herramientas básicas

- Cúter o bisturí de precisión.
- Taladro manual (Para facilitar la mezcla de los compuestos de la resina).
- Paletas de mezcla / agitador para taladro (si es un volumen mayor).
- Brochas pequeñas para aplicar desmoldante.

Equipos auxiliares (opcional)

- Cámara de vacío y bomba de vacío (para eliminar burbujas si se dispone).
- Deshumidificador para controlar la humedad durante el curado.

Materiales de soporte

- Planchas de acrílico, MDF para el marco del molde.
- Cinta adhesiva resistente.

Instrumentos de medición

- Balanza digital de precisión (± 0.1 g).
- Vasos graduados para dosificar componentes.
- Cronómetro o temporizador para controlar los tiempos de curado.

Materiales del molde

- Silicona RTV, resina epóxica, poliuretano o látex, según el caso.
- Agente desmoldante (SupraleasePTR).

Equipo complementario

- Guantes de nitrilo y gafas de seguridad.
- Mascarilla o respirador para vapores orgánicos.
- Termohigrómetro para registrar temperatura y humedad ambiental.

4.4 Consideraciones adicionales

Además del diseño geométrico del molde, existen factores complementarios que influyen directamente en la calidad final de la pieza y en la vida útil del molde. Estas consideraciones, aunque a menudo se subestiman, son esenciales para obtener resultados consistentes y evitar defectos durante el proceso de colada.

(1) Uso de desmoldantes

El agente desmoldante es una sustancia que se aplica sobre la superficie interna del molde para evitar la adherencia de la resina durante el proceso de curado. Su correcta aplicación permite extraer las piezas fácilmente, reducir daños por fricción y prolongar la vida útil del molde.

Recomendaciones

- Aplicar una capa delgada y uniforme, evitando excesos que puedan alterar la textura superficial de la pieza.
- Reaplicar el desmoldante antes de cada colada.
- Probar compatibilidad con la resina, ya que algunos desmoldantes pueden inhibir el curado.

(2) Temperatura y humedad ambiental

Las condiciones ambientales influyen directamente en el proceso de curado de la resina. En el caso de las resinas de poliuretano, la humedad relativa elevada puede generar burbujas y afectar el acabado superficial debido a la reacción con la humedad del aire.

Recomendaciones

- Trabajar en un ambiente controlado entre 20–25 °C y con humedad relativa menor al 50 %.
- Si el ambiente es muy húmedo, realizar la colada en una habitación con aire acondicionado o deshumidificador.
- Evitar corrientes de aire o exposición directa al sol durante el curado.

(3) Prevención de burbujas

Las burbujas son uno de los defectos más comunes al trabajar con resinas. Pueden minimizarse mediante las siguientes prácticas:

- Verter la resina lentamente y desde una altura baja para evitar atrapar aire.
- Utilizar una cámara de vacío para desgasificar la mezcla (si se dispone del equipo).
- Aplicar ligeras vibraciones o golpeteos suaves al molde después del vertido para liberar aire atrapado.

(4) Reutilización y mantenimiento del molde

Los moldes de silicona pueden reutilizarse múltiples veces si se les da un mantenimiento adecuado:

- Limpiar los residuos de resina después de cada uso.
- Guardar los moldes en un lugar fresco, seco y sin exposición directa al sol.
- Evitar doblarlos o comprimirlos para conservar su forma.

5. Preparación para la colada

Antes de iniciar el proceso de colada de resina, es fundamental realizar una preparación cuidadosa del entorno de trabajo, los materiales y las herramientas.

5.1 Espacio de trabajo adecuado

Un entorno limpio, seco y bien ventilado es indispensable para trabajar con resinas. Se recomienda:

- Utilizar una superficie nivelada y protegida ante derrames preferiblemente cubierta con una base de silicona, acetato o plástico desechable para facilitar la limpieza.
- Mantener la zona libre de polvo y partículas, ya que pueden contaminar la mezcla o adherirse a la superficie de la pieza.

- Asegurar buena ventilación cruzada o uso de extractores, especialmente al trabajar con resinas que liberan vapores.
- Evitar lugares con humedad elevada, ya que algunas resinas, como las de poliuretano, reaccionan con el agua generando burbujas o espuma.

5.2 Herramientas y materiales necesarios

Antes de mezclar cualquier componente, se debe preparar y verificar todo el equipo necesario.

- Balanza gramera o digital de precisión (± 0.1 g).
- Recipientes medidores de 32 oz y 64 oz, limpios y secos.
- Espátulas o paletas para mezclar.
- Cronómetro o temporizador.
- Termómetro e higrómetro digital (para registrar temperatura y humedad).
- Cámara de vacío (opcional, para eliminar burbujas).
- Guantes de nitrilo.
- Gafas de seguridad.
- Mascarilla con filtro de vapores orgánicos.
- Delantal o bata de laboratorio.
- Papel absorbente o paños limpios.
- Moldes de silicona RTV previamente fabricados.
- Desmoldante *Supralease PTR™* o equivalente.

5.3 Verificación del molde

Antes de iniciar la mezcla de la resina, se debe realizar una inspección completa del molde, ya que cualquier imperfección puede replicarse en la pieza final.

- Verificar que el molde esté limpio, seco y libre de residuos de resina o polvo.
- Comprobar que las mitades estén alineadas correctamente (en caso de moldes de dos partes).
- Aplicar desmoldante en una capa fina y uniforme si el molde lo requiere.
- Si el molde fue impreso en 3D, sellar uniones o porosidad.
- Confirmar que el molde esté nivelado sobre la superficie de trabajo para evitar espesores irregulares.

5.4 Condiciones ambientales

La temperatura y la humedad tienen un papel determinante en el comportamiento y curado de la resina.

- Temperatura ambiente ideal: 20–25 °C.
- Humedad relativa máxima: 60 %, preferiblemente menor.
- Evitar trabajar en áreas con corrientes de aire o exposición directa al sol.

5.5 Seguridad personal

El trabajo con resinas implica el manejo de compuestos químicos reactivos. Por ello, se deben aplicar las normas básicas de seguridad industrial y de laboratorio:

- Usar siempre guantes de nitrilo, gafas de seguridad y mascarilla.
- Evitar el contacto directo de la resina o catalizador con la piel.
- No comer, beber o manipular objetos personales en el área de trabajo.
- Mantener los productos etiquetados y almacenados correctamente, lejos de fuentes de calor o llamas.

Advertencia: algunas resinas generan calor durante el curado (reacción exotérmica). Evitar tocar o colocarlas sobre superficies inflamables.

6. Proceso de colada

El proceso de colada de resina consiste en mezclar los componentes químicos (resina base y catalizador o endurecedor) y verter la mezcla en el molde para que cure y adquiera la forma deseada.

A continuación, se describen los pasos detallados utilizados en el proceso experimental con *Smooth Cast 305*.

6.1 Mezclado de la resina

1. Agitar previamente ambos componentes (A y B) para homogeneizar posibles sedimentos.
2. Calcular la cantidad de material requerido haciendo uso de la calculadora de material que ofrece el proveedor para estimación.

3. Pesar o medir con precisión la cantidad requerida según la proporción indicada por el fabricante (100A : 90B en peso o 1A : 1B en volumen) haciendo uso de la báscula.
4. Verter ambos componentes en un recipiente mayor y mezclar manualmente o con agitador durante 1 minuto hasta lograr una mezcla homogénea.
5. Evitar movimientos bruscos o girar en exceso, ya que esto puede introducir burbujas de aire.

6.2 Técnicas para evitar burbujas

- Desgasificación en cámara de vacío (opcional): permite eliminar las burbujas formadas durante la mezcla.
- Si no se dispone del equipo, se presentan las siguientes recomendaciones.
 - Verter la resina lentamente desde una altura baja y constante.
 - Aplicar ligeras vibraciones o golpecitos sobre el molde para liberar burbujas ascendentes.
 - Utilizar una mesa vibratoria que lo que haga es realizar vibraciones constantes al molde para facilitar que salgan las burbujas ascendentes.

6.3 Vertido de la resina

6. Iniciar el vertido en la zona más baja del molde y permitir que la resina fluya por gravedad hasta llenar toda la cavidad.
7. Evitar el vertido rápido o directo sobre superficies amplias.

6.4 Curado

- Tiempo de curado: 30 minutos a temperatura ambiente.
- Temperatura óptima: 23 – 25 °C.
- Opción de curado posterior: 4 – 6 horas en horno a 65 °C.
- Durante el curado, el molde puede calentarse levemente por reacción exotérmica; no tocar hasta que esté completamente frío.

6.5 Desmoldeo y cuidados posteriores

8. Esperar al menos 30 minutos o hasta que la pieza esté completamente sólida y fría.
9. Desmoldar cuidadosamente, evitando torsiones bruscas o esfuerzos que puedan dañar la silicona.

10. Inspeccionar visualmente la pieza para detectar burbujas, rebabas o deformaciones.
11. Retirar rebabas con cúter o lija fina.
12. En caso necesario, si la capa expuesta a la superficie crea espuma o burbujas, realizar un lijado o pulido superficial con lijas finas.
13. Limpiar el molde antes de reutilizarlo, y guardarlo en un lugar seco, protegido del polvo y la luz solar directa.

6.6 Control dimensional y acabado final

14. Verificar las dimensiones de la pieza con calibrador (vernier).
15. Evaluar tolerancias respecto al diseño CAD original.

7. Conclusiones y recomendaciones finales

El proceso de colada de resina utilizando moldes de silicona se consolida como una técnica de manufactura versátil, accesible y eficiente para la reproducción de piezas con buena precisión dimensional y excelente calidad superficial. Su aplicación resulta especialmente útil en la fabricación de réplicas de piezas con alto nivel de detalle o geometrías orgánicas complejas, las cuales serían difíciles de modelar digitalmente sin el uso de un escáner 3D.

No obstante, la calidad final de las piezas obtenidas depende significativamente del control de las condiciones ambientales (temperatura y humedad), la adecuada preparación del molde y la precisión durante la dosificación de la mezcla y vertido de la resina. Estos factores influyen directamente en la aparición de defectos comunes, como burbujas internas, curado incompleto o variaciones en el acabado superficial.

Se comprobó experimentalmente que tanto la silicona Mold Max 14NV como la resina Smooth-Cast 305 presentan una buena compatibilidad interfacial, permitiendo realizar coladas sucesivas o agregar material adicional en una segunda etapa sin que se presenten fenómenos de inhibición del curado. En términos macroscópicos, las piezas obtenidas bajo estas condiciones mantuvieron una apariencia homogénea y una adecuada adherencia entre capas, lo que evidencia la viabilidad del proceso para reparaciones o ampliaciones parciales de coladas previas.

7.1 Errores frecuentes y cómo evitarlos

Error observado	Causa probable	Solución recomendada
Aparición de burbujas en la pieza	Mezclado brusco o vertido rápido; humedad en el ambiente	Mezclar suavemente, verter desde altura baja y en ambiente seco (<60 % HR). Utilizar cámara de vacío si es posible.
Curado incompleto o zonas pegajosas	Proporciones incorrectas o temperatura baja	Verificar la relación A:B antes de mezclar. Mantener la temperatura ambiente entre 20 – 25 °C.
Superficies con textura irregular	Molde sucio, exceso de desmoldante o con residuos	Limpiar y secar bien el molde antes de usar. Aplicar desmoldante uniformemente, pero en poca cantidad.
Dificultad para desmoldar	Falta de desmoldante o ángulos de salida inadecuados	Aplicar desmoldante y diseñar el molde con tolerancias y ángulos adecuados.

7.2 Buenas prácticas de manufactura

- Antes de iniciar la mezcla de la resina, es fundamental planificar el procedimiento completo.
- Se recomienda realizar pruebas de pequeña escala para observar el comportamiento del material bajo las condiciones ambientales existentes (temperatura y humedad). Estas pruebas permiten ajustar el método de mezcla, vertido y curado antes de ejecutar una colada definitiva.
- Las herramientas y recipientes utilizados deben encontrarse completamente limpios y secos, preferiblemente fabricados en silicona o plásticos no reactivos.
- El manejo de resinas implica la exposición a compuestos químicos que pueden irritar la piel y emitir vapores potencialmente nocivos. Es indispensable utilizar guantes de nitrilo, gafas de seguridad y mascarilla con filtro orgánico.
- Llevar un registro sistemático de las condiciones ambientales, tiempos de mezcla, proporciones de resina y observaciones de curado facilita la trazabilidad del proceso y permite establecer mejoras continuas en futuras coladas.

7.3 Recomendaciones prácticas

- **Planifica puntos de vertido y ventilación**
Durante el diseño del molde, se deben definir adecuadamente los canales de colada y los respiraderos. Una distribución incorrecta puede generar vacíos o burbujas internas debido al atrapamiento de aire.
- **Diseña con tolerancias adecuadas**
Se recomienda considerar tolerancias adicionales por la contracción cuando la pieza deba ensamblarse con otros componentes o formar parte de un sistema mecánico. Estas tolerancias deben ajustarse en función del tipo de resina y del tamaño del modelo.
- **Utiliza software paramétrico**
El uso de software CAD paramétrico, como Autodesk Inventor, Fusion 360 o SolidWorks, permite realizar modificaciones rápidas en dimensiones, ángulos o tolerancias, facilitando el ajuste del diseño tras las pruebas iniciales.
- **Utiliza las calculadoras de estimación del proveedor**
Tener una idea de cuanto material se necesita para hacer la colada o realizar los moldes es importante ya que esto evita grandes pérdidas de material y al mismo tiempo que la pieza se fabrique en una sola colada.

Anexo 9: Metodología de impresión 3D MSLA

En este anexo se incluye la metodología detallada del procedimiento que se llevó a cabo para la realización experimental de las probetas con tecnología MSLA.



Metodología impresión 3D con tecnología MSLA

Redactado por: Pablo Andres Figueroa Gámez

Fecha de revisión: 29 de septiembre de 2025

Versión: 1.0

Objetivo: fabricar probetas y piezas mediante impresión 3D en resina utilizando tecnología MSLA.

Materiales y equipos necesarios

- Software de diseño CAD: Inventor.
- Impresora MSLA: Anycubic Photon Mono X 6K.
- Resina para impresión 3D MSLA: Esun Hard Tough.
- Software laminador: Anycubic Photon WorkShop.
- Lavadora y curadora UV: Anycubic Wash & Cure Plus 3.0.
- Filtros: Anycubic AirPure.
- Guantes, gafas de seguridad y mascarilla (PPE).
- Termómetro e higrómetro digital YXB635.
- Mat de silicona.
- Toallas húmedas / papel para limpieza.
- Espátula.
- Alcohol isopropílico al 98 %.
- Pinza.
- Aire comprimido.

Pasos

1. Realizar/importar en CAD la pieza a fabricar utilizando el software Inventor.
2. Exportar los archivos CAD en formato STL
 - a. Seleccionar la opción **archivo** en las pestañas de herramientas de inventor.
 - b. Seleccionar posteriormente la opción **exportar**.
 - c. Seleccionar la opción **formato CAD**.
 - d. Seleccionar la ubicación donde se quiere almacenar el archivo.
 - e. Escoger el nombre del archivo y en guardar como/tipo: seleccionar la opción **(* .stl)**
 - f. Presionar **guardar**.
3. Preparación del archivo de impresión en Anycubic Photon WorkShop.
 - a. Importar el archivo STL generado anteriormente.
 - i. Seleccionar la opción **importar modelo**.
 - ii. Buscar la ubicación donde se almacenó el archivo STL generado e importarlo.
 - b. Configurar la orientación de la pieza correctamente.
 - i. Seleccionar la opción de **rotación**.
 - ii. Configurar la orientación correcta de acuerdo con la geometría (Se debe considerar que mientras más área de impresión mayor es la fuerza necesaria para despegar la pieza del VAT, por lo que se debe iterar o imprimir según algún criterio como sentido de capas, calidad superficial, menor tiempo de impresión entre otros).
 - c. Configurar la ubicación dentro del espacio de la plataforma de impresión.
 - i. Seleccionar la opción de **mover**.
 - ii. Desplazar con el cursor la ubicación deseada para la impresión de la pieza. Si hay más de una pieza al mismo tiempo, idealmente distribuir de forma simétrica para que el esfuerzo causado por el efecto ventosa sea uniforme en toda la plataforma de impresión.
 - d. Generación de soportes automática.
 - i. Seleccionar la opción deseada **"support script"** que establece parámetros preconfigurados para la generación automática de soportes.
 1. **Ligero**: para piezas pequeñas y detalladas.
 2. **Medio**: balance entre fuerza y facilidad de remoción.
 3. **Pesado**: para piezas grandes o que necesitan mucho soporte estructural.
 - ii. Seleccionar el ángulo de soporte.
 - iii. Seleccionar la distancia de los soportes del modelo a la plataforma de impresión **"anchor distance"** o utilizar la que viene predeterminada.

- e. Configuración de parámetros de impresión.
 - i. Altura de capa: 0.05mm
 - ii. Tiempo de exposición: 2 seg. (Si la temperatura es inferior a 20 °C se recomienda aumentar en un 30 %)
 - iii. Velocidad de elevación: 2 mm/s o 120 mm/m (Si la temperatura es inferior a 20 °C se recomienda reducir en un 30 %)
 - iv. Tiempo de apagado: 0.5 seg
 - v. Tiempo de exposición inferior: 30 seg
 - vi. Número de capas inferiores: 6 capas
4. Generación de los archivos G-code y guardarlos en USB.
 - a. Seleccionar la opción "*slice*"
 - b. Seleccionar la opción "*save Slice File*" para guardar el archivo para la máquina.
 - c. Escoger la ubicación donde se quiere guardar el archivo (USB).
5. Conectar la USB.
6. Preparación de área de trabajo.
 - a. Colocar base de silicona para evitar cualquier derrame de resina sobre otra superficie.
 - b. Verificar ventilación del espacio.
 - c. Tener a la mano implementos de limpieza.
 - i. Alcohol.
 - ii. Toallas húmedas.
 - iii. Papel.
 - iv. Espátula.
7. Medidas de seguridad.
 - a. Colocarse guantes de nitrilo.
 - b. Colocarse mascarilla.
 - c. Utilizar gafas de seguridad.
8. Verificar que el tanque de resina esté bien colocado y los tornillos bien ajustados.
9. Verificación que la plataforma este limpia.
10. Verificación que el tornillo de la plataforma este bien ajustado.
11. Configurar la plataforma en (*home*).
 - a. Ingresar desde el menú a herramientas (*tools*) en la impresora.
 - b. Seleccionar la opción (*move Z*) para mover el eje z / plataforma de impresión.
 - c. Seleccionar el botón que tiene un símbolo de una casa "*home*". Esto hará que la impresora regrese al cero o posición de inicio.
12. Agitar por al menos 3 minutos el bote de resina.
13. Llenar el tanque de resina y verificar el nivel máximo de este mismo.
14. Colocar los filtros Anycubic AirPure dentro de la impresora, en los extremos libres y encenderlos.

15. Colocar la tapa protectora de la impresora en su lugar, esto para dar inicio a la impresión.
16. Iniciar el proceso de impresión.
 - a. Ingresar al menú **“print”** de impresión.
 - b. Escoger el archivo que se quiere imprimir.
 - c. Seleccionar el botón que tiene un símbolo triangular, el cual representa la función de inicio (*start* o *play*).
17. Monitorear el curado por capas, escuchar si se está realizando el efecto ventoso, en caso no se puede apreciar este efecto. Se puede hacer una pausa en la impresión para poder observar si el progreso de la impresión está correcto.
18. Verificar visual y constantemente para validar el correcto funcionamiento de la máquina y la impresión.
19. Finalizada la impresión, elevar la plataforma de impresión a un nivel donde se pueda poner la plataforma de forma inclinada para que gotee la resina sin solidificarse, esto desde la configuración de la máquina.
20. Abrir la tapa de protección de la impresora.
21. Aflojar el tornillo de la plataforma.
22. Retirar la plataforma, girándola para que termine de escurrir la resina líquida en el soporte inclinado.
23. Retirar la plataforma de impresión.
24. Colocar la plataforma de impresión en la lavadora, el alcohol isopropílico debe cubrir toda la superficie de la pieza impresa.
25. Activar la lavadora por al menos 15 minutos (tiempo establecido experimentalmente) o el tiempo que recomiende el fabricante de la resina.
26. Dejar secar la pieza o utilizar aire comprimido para acelerar este proceso.
27. Retirar la pieza de la plataforma haciendo uso de la espátula.
28. Eliminación de soportes con una pinza.
29. Colocar la pieza de forma equilibrada en la plataforma giratoria de la máquina curadora.
29. Curado posterior en maquina UV durante al menos 20 minutos o hasta el tiempo que indica la hoja de datos de la resina.
30. Verificar dimensiones de las probetas, desviaciones permitidas que se tolerarán para las pruebas mecánicas, de lo contrario se debe volver a realizar el proceso.

Anexo 10: Metodología fabricación de moldes de silicona

Este anexo detalla el procedimiento de fabricación de moldes de silicona para la colada de resina.



Metodología realización de moldes de silicona RTV

Redactado por: Pablo Andres Figueroa Gámez

Fecha de revisión: 29 de septiembre de 2025

Versión: 1.0

Objetivo: fabricar moldes negativos de silicona RTV a partir de piezas maestro realizadas en MSLA para poder replicar en resina vertida.

Materiales y equipos necesarios

- Balanza gramera.
- Piezas prefabricadas en MSLA.
- Recipiente para mezclar de 32 oz. y 64 oz.
- Silicona de platino Mold Max 14NV (componente A + B).
- Cronómetro o temporizador.
- Guantes de nitrilo.
- Gafas de seguridad.
- Mascarilla.
- Mat de silicona.
- Paño o toallas húmedas.
- Desmoldante SupraleasePTR™
- Termómetro e higrómetro digital YXB635.
- Brocha**
- Aire comprimido**

** Opcional en este procedimiento.

Pasos

1. Se debe tener las probetas realizadas en impresión 3D válidas para este proceso (se utilizarán las que son huecas para reducir material).
2. Preparar el contenedor (caja contenedora) que da las dimensiones del molde.
 - a. Diseñar en CAD las cajas contenedoras.
 - b. Generar los archivos de corte en www.makercase.com o hacer el plano respectivo para cortar en laser las piezas.
 - c. Llenar el formulario de corte laser del MakerLab.
 - d. Armar las cajas contenedoras
 - e. Fijar cada una de las partes con cinta adhesiva ya que la sujeción se realizará de forma temporal.
 - f. Verificar que no se tenga fugas, esto principalmente en moldes grandes, en este caso en los de 6 cavidades.
3. Preparación de la pieza maestro.
 - a. Limpiar bien la pieza, con paño húmedo y aire comprimido.
 - b. Agitar al menos 3 minutos el desmoldante.
 - c. Aplicar desmoldeante a una distancia de 30 cm de la superficie del modelo. Aplicar en baja cantidad o repartir de forma homogénea con una brocha.
 - d. Dejar secar por al menos 5 minutos. Se puede acelerar el tiempo de secado utilizando aire comprimido.
4. Pegar la pieza maestra en el fondo del contenedor (la o las piezas impresas en MSLA)
5. Preparación del área de trabajo.
 - a. Verificar que haya ventilación en el área de trabajo.
 - b. Verificar que la temperatura se encuentre en el rango adecuado (20 – 25 °C), si la temperatura es inferior no realizar el proceso de vertido de resina ya que puede afectar el curado.
 - c. Colocar Mat de silicona para evitar derrames en el área de trabajo.
 - d. Tener a la mano equipo de limpieza.
 - i. Toallas húmedas.
 - ii. Alcohol isopropílico.
 - iii. Papel.
6. Medidas de seguridad.
 - a. Colocarse guantes de nitrilo.
 - b. Colocarse mascarilla.
 - c. Utilizar gafas de seguridad.
 - d. Utilizar mangas largas.
7. Preparación de utensilios.
 - a. Alistar balanza.

- b. Alistar recipientes para verter los componentes y pesarlos.
 - c. Tener a la mano los mezcladores,
8. Medición y mezcla de los componentes A y B según proporción (100A : 10B)
 9. Mezcla manual o mecánica durante 2 minutos de los componentes A y B unidos, con el fin de obtener una mezcla homogénea en el menor tiempo posible. Raspar el fondo del contenedor varias veces.
 10. Desgasificación en cámara de vacío si aplica. (No considerado).
 11. Vertido de la silicona sobre la pieza realizada en MSLA en el contenedor. Realizarlo de forma controlada para evitar incorporar exceso de aire.
 12. Verificar que la silicona vertida alcance el punto más alto en el contenedor el cual ya asegurará que la silicona se encuentre por lo menos 1.3 cm por encima de la pieza maestro.
 13. Dejar curar el molde a temperatura ambiente (23 – 25 °C), durante 4 horas.
 14. Opcional: durante 4 horas se puede meter en horno a (65 °C) para eliminar cualquier resto de humedad y alcohol subproducto de la reacción química.
 15. Retirar las paredes de acrílico del contenedor.
 16. Desmolde del molde negativo de silicona, realizarlo con precaución para evitar cualquier desgarro del molde.
 17. Limpieza con toalla húmeda para retirar exceso de desmoldante si se optó por usarlo y verificación de defectos.
 18. Medición de las cavidades para ver si cumple con el rango de desviaciones permisibles. Haciendo uso de un vernier.

Anexo 11: Metodología vertido de resina

Este anexo describe el procedimiento completo de vertido de resina, incluyendo preparación, mezclado, desgasificación y curado de las probetas.



Metodología realización de vertido de resina

Redactado por: Pablo Andres Figueroa Gámez

Fecha de revisión: 29 de septiembre de 2025

Versión: 1.0

Objetivo: fabricar probetas y piezas funcionales mediante colado de resina en moldes de silicona.

Materiales y equipos necesarios

- Balanza gramera.
- Moldes prefabricados en silicona RTV.
- Recipiente para mezclar de 32 oz y 64 oz.
- Resina de uretano: Smooth Cast 305 (componente A + B).
- Cronómetro o temporizador.
- Termómetro e higrómetro digital YXB635.
- Guantes.
- Mat de silicona.
- Gafas de seguridad.
- Mascarilla (PPE).
- Desmoldante SupraleasePTR™.

Pasos

1. Selección del molde de silicona previamente fabricado.
2. Preparación del área de trabajo.
 - a. Colocar Mat de silicona para evitar derrames.
 - b. Alistar balanza.
 - c. Verificar ventilación en el lugar.
 - d. Verificar la temperatura dentro del rango adecuado (20 °C – 25 °C), si la temperatura es inferior no realizar el proceso de vertido de resina ya que puede afectar el curado.
 - e. Verificar la humedad, mientras más humedad en el ambiente puede afectar el curado de la resina. Se recomienda experimentalmente que se realice el vertido de resina dentro de un cuarto con aire acondicionado y mejor si tiene secador, esto reduce la humedad en el ambiente.
3. Medidas de seguridad.
 - a. Colocarse guantes de nitrilo.
 - b. Colocarse mascarilla.
 - c. Utilizar gafas de seguridad.
4. Agitar por 3 minutos el desmoldante.
5. Aplicar desmoldante en el molde para prolongar la vida útil del molde y dejar secar por 5 min, el proceso se puede acelerar haciendo uso de aire comprimido. (Este paso experimentalmente se omitió para obtener mejor acabado superficial en la pieza final, es necesario aplicar si se requiere hacer más de 20 réplicas con el molde para prolongar el tiempo de vida).
6. Agitar bien los componentes de la resina.
7. Medición precisa de los componentes A y B de la resina en los botes de 32 oz medidores (relación de mezcla de 1A : 1B en volumen o 100A : 90B en peso).
8. Mezcla manual o con agitador durante 1 minuto en el bote de 64 oz, el objetivo es conseguir una mezcla homogénea.
9. Desgasificación en cámara de vacío para eliminar las burbujas producidas por la mezcla. Opcional si se quiere obtener las mejores condiciones (No considerado).
10. Vertido lento de la resina en la zona más baja del molde hasta alcanzar el nivel deseado.
11. Desgasificación en cámara de vacío para eliminar las burbujas en el molde. Opcional si se quiere obtener las mejores condiciones (No considerado).
12. Tiempo de curado a temperatura ambiente 30 minutos.
13. Esperar a que se enfríe completamente el molde ya que se calienta por la catalización química.
14. Opcional: durante 4 a 6 horas se puede meter en horno a (65 °C).
15. Desmolde cuidadoso de la pieza.
16. Inspección visual y limpieza de rebabas.
17. Verificación de medidas dimensionales y tolerancias aceptadas.

Anexo 12: Procedimientos de ensayos mecánicos

Este anexo incluye todos los procedimientos de ensayos mecánicos realizados en las probetas: compresión, flexión, tracción y corte.



Metodología realización de ensayos estandarizados

Redactado por: Pablo Andres Figueroa Gámez

Fecha de revisión: 29 de septiembre de 2025

Versión: 1.0

Para la realización de las probetas se plantea utilizar estándares normativos que permitan estandarizar las mediciones de resistencia mecánica de los distintos materiales a comparar.

- Pruebas de tensión: ISO 527
- Pruebas de flexión: ISO 178
- Pruebas de compresión: ASTM D695
- Pruebas de corte: ASTM D732

La elección de estas normas se fundamenta en su uso previo en un estudio realizado en la Universidad del Valle de Guatemala, titulado “Análisis de resistencia mecánica y térmica para piezas fabricadas en PLA con impresión 3D” por Xavier Pimentel Pérez. Dicho estudio tuvo como objetivo evaluar las propiedades mecánicas y térmicas de piezas fabricadas con tecnología FDM utilizando PLA, empleando estas mismas pruebas normalizadas. Al adoptar los mismos estándares, se busca establecer condiciones comparables que permitan analizar un proceso alternativo de manufactura, facilitando así futuras investigaciones y brindando a otros estudiantes una base metodológica sólida para comparar distintos materiales y tecnologías de fabricación.

Es importante mencionar que, en algunos de estos ensayos (tracción, flexión y compresión), los materiales anisotrópicos —aquellos cuyas propiedades varían según la dirección del esfuerzo aplicado— deben evaluarse en distintas orientaciones para obtener una caracterización completa. Sin embargo, diversos autores y fabricantes, como la empresa Formlabs, han demostrado a través de estudios experimentales que las piezas fabricadas con resina mediante tecnología MSLA presentan propiedades mecánicas muy similares en distintas direcciones. Esto permite considerarlas, en términos prácticos, como materiales isotrópicos.

Ensayo de tracción/tensión – ISO 527

1. Seleccionar al menos 5 probetas por tipo de manufactura (MSLA y resina vertida), obteniendo un total de 10 probetas.
2. Medir las dimensiones de cada probeta y verificar que cumplan con las desviaciones permitidas por la norma.
3. Colocar la estructura que permite realizar el ensayo de tracción en la máquina universal.
4. Fijar la probeta en la mordaza superior de la estructura.
5. Colocar la probeta en la mordaza inferior, ajustando el tornillo de sujeción sin aplicar carga.
6. Configurar la fuerza de la máquina universal en cero en la posición determinada.
7. Instalar la base del deformímetro y colocar el deformímetro sobre la probeta.
8. Calibrar el deformímetro para que inicie en cero.
9. Ajustar la velocidad de aplicación de carga.
10. Aplicar la carga de manera controlada hasta la rotura de la probeta.
11. Registrar la fuerza máxima y la deformación alcanzada.
12. Detener la máquina al romperse la probeta.
13. Retirar la probeta y preparar la máquina para el siguiente ensayo si es necesario.

Ensayo de flexión – ISO 178

1. Seleccionar al menos 5 probetas por tipo de manufactura (MSLA y resina vertida), obteniendo un total de 10 probetas.
2. Medir las dimensiones de cada probeta y verificar que cumplan con las desviaciones permitidas por la norma.
3. Colocar el deformímetro en su base y ajustarlo correctamente para medir la deformación durante el ensayo.
4. Colocar la probeta en el centro del dispositivo de flexión de 3 puntos.
5. Configurar la fuerza de la máquina universal en cero en la posición determinada.
6. Calibrar el deformímetro para que apenas toque la probeta.
7. Ajustar la velocidad de aplicación de carga.
8. Aplicar la carga de manera controlada hasta alcanzar la deformación máxima o la ruptura de la probeta.
9. Registrar la deformación máxima la cual estará correlacionada con la fuerza aplicada mediante la constante de calibración del deformímetro.
10. Detener la máquina al alcanzar la deformación máxima o al romperse la probeta.
11. Retirar la probeta y preparar la máquina para el siguiente ensayo si es necesario.

Ensayo de compresión – ASTM D695

1. Preparación de al menos 5 probetas por tipo de manufactura (MSLA y resina vertida), obteniendo un total de 10 probetas.
2. Medición dimensional de cada probeta y verificación de desviaciones permitidas.
3. Colocación de la probeta de forma vertical en máquina de ensayo universal procurando que quede centrada en la base donde se realizan los ensayos.
4. Calibrar la máquina universal para que el puente de carga este apenas tocando la probeta.
5. Configurar la fuerza en 0 de la máquina universal en la posición determinada en el paso anterior.
6. Colocar la base del deformímetro.
7. Colocar el deformímetro en su base.
8. Pegar el deformímetro al puente de carga de la compresora, esto con el fin de medir la deformación de compresión.
9. Girar el dial que posee el deformímetro, colocando el 0 con la posición de la aguja.
10. Estimar cual será la resistencia última del material, para esto se puede validar con la hoja de datos del material o con una prueba previa, con el fin de incrementar la fuerza en una secuencia determinada para obtener varias mediciones y poder graficar los resultados.
11. Iniciar la compresión aplicando la fuerza en la máquina universal a la velocidad establecida.
12. Grabar la deformación mientras alguien dicta la fuerza que se va aplicando.
13. Capturar los resultados de la grabación
14. Al fallar la probeta, detener el movimiento de la máquina universal.
15. Retroceder con la máquina universal si es necesario para retirar la probeta ensayada o únicamente quitar los restos.

Ensayo de corte – ASTM D732

1. Seleccionar al menos 5 probetas por tipo de manufactura (MSLA y resina vertida), obteniendo un total de 10 probetas.
2. Medir las dimensiones de cada probeta y verificar que cumplan con las desviaciones permitidas por la norma.
3. Colocar la probeta dentro de las placas de metal que permiten realizar el corte puro.
4. Asegurar las placas con prensas o sargentos para evitar que se muevan durante el ensayo.
5. Ajustar la altura de la máquina universal según la norma.
6. Colocar las placas con la probeta insertada en la base de la máquina, verificando que esté centrada.
7. Configurar la fuerza aplicada de la máquina universal en cero antes de iniciar el ensayo.
8. Aplicar la fuerza de corte de manera controlada mediante la máquina universal.
9. Registrar el esfuerzo máximo alcanzado durante el ensayo.
10. Detener la máquina al alcanzar el esfuerzo máximo o al completarse el corte.
11. Retirar la probeta y preparar la máquina para el siguiente ensayo si es necesario.

Anexo 13: Estudio cualitativo Procesos de manufactura

Este anexo consiste en un instrumento de evaluación tipo Likert para comparar cualitativamente los procesos de manufactura de Impresión 3D MSLA vs Resina vertida.



Instrumento de evaluación tipo Likert para comparar cualitativamente impresión 3D MSLA vs. resina vertida

Redactado por: Pablo Andres Figueroa Gámez

Fecha de revisión: 28 de octubre de 2025

Versión: 1.0

Objetivo: comparar cualitativamente Impresión 3D MSLA vs resina vertida sobre dimensiones del proceso, producto y factibilidad de replicación.

Escala (1–5)

- 1 = Totalmente en desacuerdo / Muy deficiente
- 2 = En desacuerdo / Deficiente
- 3 = Neutral / Aceptable
- 4 = De acuerdo / Bueno
- 5 = Totalmente de acuerdo / Excelente

Categorías

- **Categoría A — preparación del proceso (A1–A4)**
 - A1. La preparación del área y de los insumos es sencilla y rápida.
 - A2. El número de pasos previos (limpieza de máquinas, calibración, etc.) es bajo.
 - A3. El proceso es altamente sensible a condiciones ambientales (temperatura/humedad).
(*)
 - A4. Es fácil obtener todos los consumibles y materiales necesarios localmente.
- **Categoría B — equipos y materiales requeridos (B1–B4)**
 - B1. El equipo requerido es de bajo costo relativo.
 - B2. El nivel de especialización técnica del equipo es bajo (fácil de operar).
 - B3. El manejo y la seguridad de los materiales es sencillo (baja toxicidad / fácil EPP).
 - B4. El mantenimiento y preparación del equipo es poco demandante (tiempo).
- **Categoría C — ejecución de la manufactura (C1–C4)**
 - C1. El proceso es reproducible (resultados similares en repeticiones).
 - C2. El tiempo de fabricación por pieza es corto.
 - C3. Durante la ejecución es fácil controlar parámetros críticos (temperatura, mezcla, exposición).
 - C4. El proceso requiere intervención manual fina constante (mucho ajuste) (*).
- **Categoría D — procesado posterior y acabado (D1–D4)**
 - D1. La cantidad de tiempo de intervención en el procesado posterior (lavado, curado, desbarbado) es baja.
 - D2. Es fácil obtener un acabado superficial uniforme sin mucho retoque.
 - D3. El método genera pocos defectos visibles (burbujas, líneas de capa, rebabas).
 - D4. El esfuerzo de acabado aumenta considerablemente el tiempo total de producción
(*).
- **Categoría E — resultados mecánicos y dimensionales (E1–E4)**
 - E1. Las piezas muestran buena homogeneidad (baja anisotropía).
 - E2. Las tolerancias dimensionales replican con fidelidad el maestro/diseño.
 - E3. Las propiedades mecánicas (resistencia) son consistentes entre réplicas.

E4. Las piezas presentan inestabilidad con el tiempo (degradación, fraguado, fragilidad) (*).

- **Categoría F — impacto económico y sostenibilidad (F1–F4)**

F1. El desperdicio de material por pieza es bajo (p. ej. soportes, sobrantes).

F2. El costo por pieza (consumibles + energía + tiempo) es competitivo.

F3. El proceso genera pocos residuos peligrosos o de difícil disposición.

F4. El proceso admite fácil escalado para pequeñas series sin incremento de desperdicio.

(*) son preguntas formuladas en sentido negativo o inverso, el valor se invierte al momento del análisis para mantener la coherencia en la interpretación.

Umbrales de interpretación

1.00 – 1.79 : Muy deficiente

1.80 – 2.59 : Deficiente

2.60 – 3.39 : Aceptable / Neutral

3.40 – 4.19 : Bueno

4.20 – 5.00 : Excelente

Resultados

Pregunta	MSLA (1-5)	Resina vertida (1-5)
A1. La preparación del área y de los insumos es sencilla y rápida.	5	4
A2. El número de pasos previos (limpieza, calibración...) es bajo.	2	4
A3. El proceso es altamente sensible a condiciones ambientales (temperatura/humedad). (*)	4	1
A4. Es fácil obtener los consumibles localmente.	4	4
Promedio categoría A	3.75	3.25
B1. El equipo requerido es de bajo costo relativo.	1	3
B2. El nivel de especialización técnica del equipo es bajo.	1	5
B3. El manejo y seguridad de los materiales es sencillo.	4	3
B4. El mantenimiento y preparación del equipo es poco demandante.	3	3
Promedio categoría B	2.25	3.5
C1. El proceso es reproducible (resultados similares).	5	4
C2. El tiempo de fabricación por pieza es corto.	3	4
C3. Es fácil controlar parámetros críticos durante ejecución.	1	1
C4. El proceso requiere intervención manual fina constante. (*)	5	3
Promedio categoría C	3.5	3
D1. La cantidad de tiempo de procesado posterior es baja.	1	3
D2. Es fácil obtener un acabado superficial uniforme.	5	3
D3. El método genera pocos defectos visibles.	5	3
D4. El esfuerzo de acabado incrementa mucho el tiempo total. (*)	2	4
Promedio categoría D	3.25	3.25
E1. Las piezas muestran buena homogeneidad (baja anisotropía).	5	5
E2. Las tolerancias dimensionan con fidelidad el diseño.	5	4
E3. Las propiedades mecánicas son consistentes entre réplicas.	4	5
E4. Las piezas presentan inestabilidad con el tiempo. (*)	3	5
Promedio categoría E	4.25	4.75
F1. El desperdicio de material por pieza es bajo.	2	5
F2. El costo por pieza (consumibles + energía + tiempo) es competitivo.	3	4
F3. El proceso genera pocos residuos peligrosos.	4	3
F4. El proceso se escala sin aumentar desperdicio.	1	5
Promedio categoría F	2.5	4.25
Promedio general	3.25	3.67

Anexo 14: Ficha técnica resina Smooth Cast 305

Este anexo consiste en la ficha técnica de la resina Smooth Cast 305 del fabricante Smooth-ON utilizada para el proceso de colada.

Serie Smooth-Cast® 300

Plásticos Líquidos Blanco Brillante de Viscosidad Ultra Baja



www.smooth-on.com

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

La serie **Smooth-Cast® 300** de plásticos líquidos consiste en resinas de moldeo de viscosidad ultra baja que arrojan vaciados blanco brillante y prácticamente sin burbujas. No es necesaria la desgasificación al vacío. Brindan una práctica proporción de mezcla 1A:1B en volumen o 100A:90B en peso. Las diferencias entre ellas son el tiempo de empleo útil y el tiempo de desmolde.

Estas resinas aceptan cargas sin problemas (como URE-FIL® 3 de Smooth-On) y pueden colorearse con los tonos SO-Strong® o Ignite® (la serie Smooth-Cast® 325 acepta pigmentos mejor que la serie Smooth Cast® 300). Los vaciados totalmente endurecidos son fuertes, durables y aptos para trabajarse y pintarse. Resisten a la humedad y a solventes suaves. Los usos de los plásticos líquidos de la serie **Smooth-Cast® 300** incluyen reproducir esculturas pequeñas y medianas, realizar prototipos, objetos para efectos especiales y alhajas decorativas.

Aquellos interesados en fabricar piezas de rotomoldeo deberán consultar el boletín técnico de Smooth-Cast® 65D.

RESUMEN TÉCNICO

	Tiempo de Empleo Útil a 73°F / 23°C (ASTM D-2471)	Tiempo de Endurecimiento ** @ 73°F / 23°C	Resistencia a la Tracción (ASTM D-638)	Módulo de Tracción (ASTM D-638)	Alargamiento a la Rotura % (ASTM D-638)	Resistencia a la Flexión (ASTM D-790)	Módulo de Flexión (ASTM D-790)	Resistencia de Compresión (ASTM D-695)	Módulo de Compresión (ASTM D-695)	Contracción in./in. (ASTM D-2566)
Smooth-Cast® 300Q	30 Seg.	4 - 5 Min.	3,000 psi	139,500 psi	5%	4,510 psi	128,000 psi	4,000 psi	45,800 psi	0.01
Smooth-Cast® 300	3 Min.	10 Min.	3,000 psi	139,500 psi	5%	4,510 psi	128,000 psi	4,000 psi	45,800 psi	0.01
Smooth-Cast® 305	7 Min.	30 Min.	3,000 psi	134,000 psi	7.50%	4,000 psi	118,000 psi	3,800 psi	44,900 psi	0.0065
Smooth-Cast® 310	15-20 Min.	3 - 4 Horas	3,000 psi	134,000 psi	7.50%	4,000 psi	118,000 psi	3,800 psi	44,900 psi	0.0065

Proporción de Mezcla: 1A:1B en volumen o 100A:90B en peso

Viscosidad Mixta: cps; 80 (ASTM D-2393)

Densidad Relativa: g/cc; 1.05 (ASTM D-1475)

Volumen Específico pulg cu/libra; 26.4 (ASTM D-1475)

*Todos los valores medidos a los 7 días a 73°F/23°C

Color; Blanco

Dureza Shore D; 70 (ASTM D-2240)

Temperatura de Deflexión por calor; 120°F/50°C
(ASTM D-648)

** Dependiendo en Masa

RECOMENDACIONES PARA PROCESAMIENTO

PREPARACIÓN... Seguridad - Los materiales deben conservarse y utilizarse en un ambiente cálido (73°F/23°C). Estos productos tienen un período de conservación limitado y deben utilizarse lo antes posible. Todos los uretanos líquidos son **sensibles a la humedad y absorben la humedad atmosférica**. Las herramientas y los recipientes de mezcla deben ser de metal, vidrio o plástico y estar limpios. La mezcla debe hacerse en un lugar bien ventilado. Utilizar gafas de seguridad, mangas largas y guantes de goma para minimizar el riesgo de contaminación. **Dado que no hay dos aplicaciones idénticas, en caso de duda se recomienda realizar una pequeña prueba de aplicación para determinar si el rendimiento de este material es el apropiado.**

Aplicación del desmoldante - El desmoldante es necesario para facilitar el desmolde en la mayoría de las superficies. Utilice un desmoldante específico para fabricar moldes (Universal® Mold Release o Ease Release® 200 de Mann, que puede solicitar a Smooth-On o a su distribuidor de Smooth-On). Debe aplicarse una capa abundante de desmoldante sobre todas las superficies que entrarán en contacto con el plástico.

~IMPORTANTE: Para garantizar una cobertura total, aplique el desmoldante con un pincel suave sobre todas las superficies. Luego rocíe una capa ligera y deje secar el desmoldante durante 30 minutos. Los moldes de caucho de silicona de Smooth-On normalmente no requieren desmoldante salvo que se vacíe silicona en el molde. La aplicación del desmoldante prolonga la duración del molde.

IMPORTANTE: El período de conservación del producto disminuye una vez abierto. El producto restante debe utilizarse lo antes posible. Si tras la aplicación se vuelven a tapar de inmediato ambos recipientes, se prolonga la duración del producto sin utilizar. **XTEND-IT® Dry Gas Blanket** (comercializado por Smooth-On) prolonga considerablemente el período de conservación de los productos de uretano líquido.

Su Seguridad Primero!

Antes de utilizar este o cualquier producto de Smooth-On, lea la ficha de datos de seguridad (FDS) correspondiente, que puede obtener a pedido. Todos los productos de Smooth-On resultan seguros si se leen y siguen detenidamente las instrucciones.

Mantener fuera del alcance de los niños.

Smooth-Cast® 300 PARTE A:

ADVERTENCIA: IRRITA LOS OJOS, LA PIEL Y LAS MUCOSAS. Contiene isocianato de metilendifenilo. Evitar el contacto con los ojos, las mucosas o la piel. No ingerir. No inhalar las emanaciones. Usar solo con ventilación suficiente. Usar guantes resistentes a sustancias químicas y protección ocular al utilizar este producto.

Primeros auxilios: En caso de contacto con los ojos, enjuagarlos bien con agua durante 15 minutos y buscar atención médica urgente. Si hay contacto con la piel, lavar a fondo con agua y jabón. Si persiste la irritación, buscar atención médica. En caso de ingestión, no inducir al vómito. Beber uno o dos vasos de agua y buscar atención médica urgente. Si se inhalan vapores o cuesta respirar, trasladar a la persona adonde respire aire fresco. Si persisten los síntomas, buscar atención médica.

Smooth-Cast® 300 PARTE B:

PRECAUCIÓN: En caso de contacto con los ojos, enjuagar con agua durante 15 minutos. Si persiste la irritación, buscar atención médica. Si hay contacto con la piel, lavar con agua y jabón.

PRECAUCIÓN: CALIENTE! Al combinarse, las partes A y B generan temperaturas superiores a los 212 °F (100 °C) que pueden causar quemaduras en la piel. Deje enfriar el plástico endurecido antes de manipularlo

IMPORTANTE - La información de este boletín se considera exacta. Sin embargo, no hay garantía expresa ni implícita respecto de la exactitud de los datos, los resultados que se obtienen de su uso ni de que dicho uso no viole ninguna patente. El usuario debe determinar el grado en que el producto resulta adecuado para la aplicación prevista y asume todo riesgo y responsabilidad en este sentido.

MEDIR Y MEZCLAR...

Los uretanos líquidos son **sensibles a la humedad** y absorben la humedad atmosférica. Las herramientas y los recipientes de mezcla deben ser de metal, vidrio o plástico y estar limpios. Los materiales deben conservarse y utilizarse en un ambiente cálido (73 °F/23 °C).

Revuelva o agite bien las dos partes, A y B, antes de aplicarlas. Tras aplicar cantidades iguales de las partes A y B en el recipiente de mezcla (100A:90B en peso), mézclelas bien. Revuelva asegurándose de raspar los costados y el fondo del recipiente de mezcla varias veces. Evite que salpique material de baja viscosidad fuera del recipiente.

VERTIDO, ENDURECIMIENTO Y RENDIMIENTO...

Vertido - Vierta la mezcla en un único sitio en la parte inferior del campo de contención y deje que busque su nivel. Ello ayudará a minimizar el aire atrapado.

Para Resultados Óptimos - Los mejores resultados se obtienen mediante la técnica del moldeo a presión. Tras verter el compuesto mezclado, todo el conjunto (molde, barrera de contención, etc.) se coloca en una cámara de presión y se somete a una presión de aire de 60 psi (4,2 kg/cm²) durante todo el tiempo de endurecimiento del material.

Endurecimiento - Advertencia: Las emanaciones, que pueden ser visibles a medida que el producto se gelifica y se endurece, se disipan con ventilación suficiente. Utilice este producto únicamente con ventilación del tamaño del ambiente y evite inhalar las emanaciones. Los vaciados están demasiado calientes inmediatamente después de endurecerse y pueden quemar la piel. Deje enfriar a temperatura ambiente antes de la manipulación. Smooth-Cast® 300 se endurece en 7-10 minutos (Smooth-Cast® 305 en 30-40 minutos y Smooth-Cast® 310 en 2-4 horas) según la masa y la configuración del molde.

Post Curado - Los vaciados alcanzan más rápido el "endurecimiento total" y logran óptimas propiedades físicas gracias al endurecimiento extra. Deje que el material se endurezca a temperatura ambiente durante el tiempo de endurecimiento recomendado seguido de 4-6 horas a 150 °F/65 °C. Deje que el vaciado llegue a la temperatura ambiente antes de manipularlo.

Rendimiento - Los vaciados endurecidos son rígidos y durables. Resisten a la humedad, el calor moderado, los solventes, los ácidos diluidos, y pueden fresarse, pintarse con antioxidante/pintura o unirse a otras superficies (es necesario eliminar todo desmoldante). Si se fresa o labra el material endurecido, es necesario utilizar máscara antipolvo u otro aparato para prevenir la inhalación de partículas residuales. Los vaciados pueden colocarse al aire libre tras pintarse con antioxidante o pintura. Los vaciados sin pintar se vuelven amarillos con el tiempo, más rápido aún si se exponen a la luz ultravioleta.

Dado que no hay dos aplicaciones idénticas, en caso de duda se recomienda realizar una pequeña prueba de aplicación para determinar si el rendimiento de este material es el apropiado.



Llámenos a cualquier hora si tiene preguntas sobre su aplicación.

Número Gratuito: (800) 381-1733 Fax: (610) 252-6200

El nuevo sitio www.smooth-on.com abunda en información sobre fabricación de moldes, vaciado y más.

Anexo 15: Ficha técnica silicona Mold Max 14NV

Este anexo consiste en la ficha técnica de la silicona de estaño Mold Max 14NV del fabricante Smooth-ON utilizada para fabricar los moldes de silicona.

Mold Max™ 14NV and 29NV

Low Viscosity Tin Cure Silicone Rubber Compounds



www.smooth-on.com

PRODUCT OVERVIEW

Mold Max™ 14NV and 29NV are tin-catalyzed silicone rubbers that offer low viscosity, fast cure and long library life. **Mold Max™ 14NV and 29NV do not require vacuum degassing.** Mix ratio is 100A:10B by weight. Pot life is 40 minutes. Cure time of 14NV is 4 hours at room temperature, cure time of 29NV is 6 hours at room temperature.

Mold Max™ 14NV and 29NV will reproduce the finest detail and are suitable for a variety of industrial and art related applications including making molds for reproducing prototypes, furniture, sculpture and architectural elements. Cure time can be reduced with Accel-T™ cure accelerator. **Mold Max™ 14NV and 29NV** can be used to cast a variety of materials including wax, gypsum, low melt alloys/metals and urethane, epoxy or polyester resins. Important; Do not cast concrete into rubber molds made with this product. Concrete will not cure properly and inhibition will result.

Important: you must weigh Part A & B components using a **gram scale** to be successful with **Mold Max™ 14NV and 29NV.**

TECHNICAL OVERVIEW

	A:B Mix Ratio (parts by weight)	Mixed Viscosity (ASTM D-23932)	Specific Gravity (g/cc) (ASTM D-1475)	Specific Volume (cu. in./lb.)	Color	Shore A Hardness (ASTM D-2240)	Tensile Strength (psi) (ASTM D-412)	100% Modulus (psi) (ASTM D-412)	Elongation at Break % (ASTM D-412)	Die B Tear Strength (pli) ASTM D-624)	Shrinkage (in./in.) (ASTM D-2566)
Mold Max™ 14NV	100A:10B	7,500 cps	1.12	24.7	White	14A	490 psi	35 psi	600%	87 pli	.002 in./in.
Mold Max™ 29NV	100A:10B	10,000 cps	1.17	23.7	Yellow	29A	417 psi	54 psi	361%	96 pli	.002 in./in.

* All values measured after 7 days at 73°F/23°C

Pot Life (ASTM D-2471): 40 minutes

Cure Times: 14NV: 4 hours **29NV:** 6 hours

Volume Resistance (ohm) (ASTM D257-14): 8.29E+11

Volume Resistivity (ohm) (ASTM D257-14): 5.83E+13

Useful Temperature Range: -65°F to 400°F (-53°C to 205°C)

Dielectric Constant @ 100Hz (ASTM D150-18): 3.29

Dissipation Factor @100Hz (ASTM D150-18): 0.005

Dielectric Strength (V/mil) (ASTM D149-20): 330

PROCESSING RECOMMENDATIONS

PREPARATION...

Safety - Use in a properly ventilated area ("room size" ventilation). Wear safety glasses, long sleeves and rubber gloves to minimize contamination risk. Wear vinyl gloves only. Latex gloves will inhibit the cure of the rubber. **Store and use material at room temperature (73°F/23°C).** Storing material at warmer temperatures will also reduce the usable shelf life of unused material. These products have a limited shelf life and should be used as soon as possible. Mixing containers should have straight sides and a flat bottom. Mixing sticks should be flat and stiff with defined edges for scraping the sides and bottom of your mixing container.

Applying a Sealer / Release Agent - Mold Max™ rubber may be inhibited by sulfur based clays resulting in tackiness at the pattern interface or a total lack of cure throughout the mold. If compatibility between the rubber and the surface is a concern, a small-scale test is recommended. Apply a small amount of rubber onto a non-critical area of the pattern. Inhibition has occurred if the rubber is gummy or uncured after the recommended cure time has passed. To prevent inhibition, a "barrier coat" of clear acrylic lacquer sprayed directly onto the pattern is usually effective. Allow to thoroughly dry.

Although not usually necessary, a release agent will make demolding easier when pouring into or over most surfaces. **Ease Release™ 200** is a proven release agent for making molds with silicone rubber and for releasing new silicone from cured silicone. Mann Ease Release™ products are available from Smooth-On or your Smooth-On distributor. **Because no two applications are quite the same, a small test application to determine suitability for your project is recommended if performance of this material is in question.**

Safety First!

The Material Safety Data Sheet (MSDS) for this or any Smooth-On product should be read prior to use and is available upon request from Smooth-On. All Smooth-On products are safe to use if directions are read and followed carefully.

Keep Out of Reach of Children

Be careful. Use only with adequate ventilation. Contact with skin and eyes may cause irritation. Flush eyes with water for 15 minutes and seek immediate medical attention. Remove from skin with waterless hand cleaner followed by soap and water.

Important: The information contained in this bulletin is considered accurate. However, no warranty is expressed or implied regarding the accuracy of the data, the results to be obtained from the use thereof, or that any such use will not infringe upon a patent. User shall determine the suitability of the product for the intended application and assume all risk and liability whatsoever in connection therewith.

MEASURING & MIXING...

Stir Part A and shake Part B thoroughly before dispensing. Using a gram scale, dispense required amounts of parts A and B into a mixing container and mix for 3 minutes. Scrape the sides and bottom of the container several times.

POURING, CURING & PERFORMANCE ...

Pouring - For best results, pour your mixture in a single spot at the lowest point of the containment field. Let the rubber seek its level up and over the model. A uniform flow will help minimize entrapped air. The liquid rubber should level off at least ½" (1.3 cm) over the highest point of the model surface.

Curing / Post Curing - Allow the mold to cure fully at room temperature (73°F/23°C) before demolding. Post curing the mold an additional 4 hours at 150°F (65°C) will eliminate any residual moisture and alcohol that is a by-product of the condensation reaction that can inhibit the cure of some resins and rubbers. Allow mold to cool to room temperature before using. Do not cure rubber where temperature is less than 65°F/18°C.

Accelerating Mold Max™ 14NV and 29NV - Accel-T™ tin cure silicone rubber accelerator will accelerate the cure time of Mold Max™ 14NV and 29NV. Note: working time is reduced in proportion to the amount of Accel-T™ added.

Thinning Mold Max™ 14NV and 29NV - Silicone Thinner™ is a non-reactive silicone fluid that will lower the mixed viscosity of tin cure (condensation) or platinum cure (addition) silicone rubber products. **Silicone Thinner™ offers the following advantages:** [1] A lower mixed viscosity (A+B) means that the rubber will de-air faster when vacuuming; [2] Mixed rubber (A+B) will flow better over intricate model detail; [3] Silicone Thinner™ will lower the ultimate shore hardness (durometer) of cured silicone rubber; [4] Pot life (working time) is increased in proportion to the amount of Silicone Thinner™ used. It is not recommended to exceed 10% by weight of total system (A+B).

A disadvantage is that ultimate tear and tensile are reduced in proportion to the amount of Silicone Thinner™ added, however knotty tear properties of the Mold Max™ Series rubbers are unaffected. **It is not recommended to exceed 10% by weight of total system (A+B).** See the Silicone Thinner™ technical bulletin (available from Smooth-On or your Smooth-On distributor) for full details.

Making Brush-On Rubber Molds - Due to low viscosity, Mold Max™ 14NV and 29NV are not recommended for making brush-on rubber molds. If you want to make a brush-on rubber mold, Mold Max™ Stroke™ was developed especially for this purpose.

Mold Performance & Storage - The physical life of the mold depends on how you use it (materials cast, frequency, etc.). Casting abrasive materials can quickly erode mold detail, while casting non-abrasive materials (wax) will not affect mold detail. Before storing, the mold should be cleaned with a soap solution and wiped fully dry. Two part (or more) molds should be assembled. Molds should be stored on a level surface in a cool, dry environment.



Call Us Anytime With Questions About Your Application.

Toll-free: (800) 381-1733 Fax: (610) 252-6200

www.smooth-on.com is loaded with information about mold making, casting and more.

Anexo 16: Ficha técnica resina eSUN Hard Tough

Este anexo consiste en la ficha técnica de la resina Hard Tough para impresión 3D MSLA del fabricante eSUN utilizada para fabricar las probetas en la impresora Anycubic Photon Mono X 6K.

Hard-Tough Resin

Technical Data Sheet

Tough; Higher toughness and impact resistance than normal ABS like resin Can print rugged and durable parts Excellent mechanical properties. Printed object can be drilled, which is very suitable for mechanical prototypes.

Material Status	Mass Production
Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> • High toughness • High impact resistance • Strong and durable
Applications	<ul style="list-style-type: none"> • Automobile • Mechanical
Appearance	<ul style="list-style-type: none"> • Multiple Colors
Form	<ul style="list-style-type: none"> • Resins
Processing method	<ul style="list-style-type: none"> • (surface exposure molding) LCD

	Testing method	Typical value
Physical Properties		
Density	GB/T 4472	1.08-1.12 g/cm ³
Viscosity	GB/T 22235	200-300 mPa·s
Hardness	ASTM D2240	75-81 Shore D
Mechanical Properties		
Tensile Strength	ASTM D638	30-60 MPa
Elongation at Break	ASTM D638	35-52 %
Flexural Strength	ASTM D790	30-75 MPa
IZOD Impact Strength	ASTM D638	40-110 J/m
Thermal Properties		
Heat distortion Temperature	GB/T 1634	N/A °C

Wuhan University Building A403-I,A901,No.6 Yuexing 2 Road,Nanshan District,Shenzhen,Guangdong

China

Tel +86 755 86581960

fax +86 755 26031982

Email: bright@brightcn.net

www.esun3d.net

Recommended printing parameters

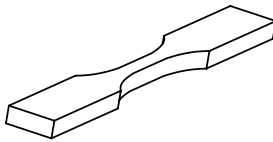
Settings	Machine Type		
	Low Light Intensity	Medium Light Intensity	High Light Intensity (Monochrome LCDScreen)
Representative Machine	AnyCubic Photon	eSUN LCD 3.0 Nova Bene 4 Creality LD-002R	Anycubic MONO X ELEGOO Saturn Phrozen Sonic Mini
Exposure Time/s	8-10	5-6	Not recommended
Bottom Layer Count		3-5	
Bottom Exposure Time	40-60	30-40	Not recommended
Lifting Distance/mm	5.5&6-inch screen: 5-6or Higher		8.9&13.3-inch screen: 8-12or Higher
Lift Speed/mm•min-1	90-150	90-120	Not recommended
Retract Speed/mm•min-1		150-200	

1. The above parameters are for reference only. The performance of the cured material will be affected by factors such as equipment, environment, parameter settings, post-processing methods, detection methods, etc., which will cause big differences. Please contact us if necessary;2. Shake the resin well before use; please recycle the resin in time after printing; avoid prolonged soaking of the molded parts in the cleaning agent;3. It is not recommended to add other ingredients or mix them to the resin to avoid molding failure or other problems;4. The resin should be stored in a cool, dark place, and sealed with an opaque container;5. The photopolymer resin is made of chemicals, which has a certain odor and skin irritation. Pay attention to protection during transportation and use. If the resin accidentally touches your skin or eyes, please rinse with plenty of water, and the skin can be cleaned with detergent, decontamination powder, etc.; if the allergic reaction is severe or even enters the mouth or nasal cavity, please seek medical attention immediately;6. The model should be printed at a room temperature of 25-35 degrees. IF it is winter, it is recommended to turn on the air conditioner for printing.

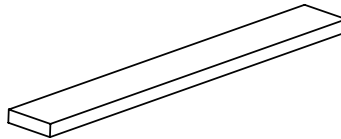
Matters needing attention

1.Shake well before printing2.Hard tough resin need to be fully cured to achieve the best mechanical strength, it is recommended to cure for 25-30 minutes, the surface cure until it is not sticky hand .

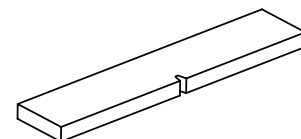
Mechanical Properties



Tensile testing specimen ASTM D638



Flexural testing specimen ASTM D790



IZOD Impact Strength ASTM D638

The physical properties, mechanical properties, and thermal properties of the resin are obtained based on the printing spline test.

Notice

All information supplied by or on behalf of eSUN in relation to this product, whether in the nature of data, recommendations or otherwise, is supported by research and, in good faith, believed reliable, but the product is sold "as is" . eSUN assumes no liability and makes no representations or warranties, express or implied, of merchantability, fitness for a particular purpose, or of any other nature with respect to information or the product to which information refers and nothing herein waives any of the seller's conditions of sale.

Wuhan University Building A403-I,A901,No.6 Yuexing 2 Road,Nanshan District,Shenzhen,Guangdong

China

Tel +86 755 86581960

fax +86 755 26031982

Email: bright@brightcn.net

www.esun3d.net

CAD Computer-Aided Design, en español: "diseño asistido por ordenador".

catalización Producir una catálisis en una reacción química.

diisocianato Compuesto químico sintético con dos grupos isocianato que se utiliza principalmente para fabricar productos de poliuretano, como espumas, revestimientos y adhesivos.

exotérmica proceso exotérmico es aquel que libera energía hacia su entorno, principalmente en forma de calor.

fotopolimerización Proceso donde un fotopolímero se cura mediante una fuente de luz.

fotopolímero Sustancias sintéticas cuyas propiedades físicas se modifican al entrar en contacto con la luz UV.

MSLA Masked Stereolithography Apparatus, en español: "aparato de estereolitografía enmascarada".

probetas muestras estandarizadas de un material o componente con forma específica que se someten a pruebas destructivas para evaluar su resistencia y comportamiento mecánico.

reticulación Formación de enlaces covalentes que mantienen juntas porciones de varias cadenas poliméricas.

socavados Referente a una ranura o muesca creada.