



UNIVERSIDAD DE JAÉN
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MOLDE TIPO “RAPID TOOLING” PARA LA INYECCIÓN DE TERMOPLÁSTICOS

Alumno: Jesús Pulido Calvo

Tutor: Prof. D. Francisca María Guerrero
Dpto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Julio, 2023



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería mecánica y minera

Doña FRANCISCA MARÍA GUERRERO VILLAR, tutora del Proyecto Fin de Carrera titulado: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MOLDE TIPO “RAPID TOOLING” PARA LA INYECCIÓN DE TERMOPLÁSTICOS, que presenta JESÚS PULIDO CALVO, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, JULIO de 2023

El alumno:

El tutor:

JESÚS PULIDO CALVO

FRANCISCA MARÍA GUERRERO VILLAR

Resumen

El objetivo de este trabajo es realizar un molde del tipo "Rapid Tooling" o prototipado rápido mediante impresión 3D para la inyección de termoplásticos y analizar la viabilidad de este tipo de moldes de cara a su utilización en el sector industrial. Para ello se ha diseñado un molde de inyección sencillo de acuerdo a las características del centro de termoformado de las instalaciones de la Universidad de Jaén, se ha realizado una búsqueda de materiales para impresión 3D que consigan aguantar y mantener su forma y características bajo las condiciones de temperatura a la que se ha efectuado el proceso de inyección de termoplásticos, se ha simulado el proceso de inyección en softwares especializados en moldes de inyección, y por último se ha probado el molde en el centro de termoformado y se ha comprobado su viabilidad.

Palabras clave: molde, inyección, impresión 3D, rapid tooling.

Abstract

The aim of this work is to make a "Rapid Tooling" type mold or rapid prototyping by 3D printing for the injection of thermoplastics and to analyze the feasibility of this type of mold for its use in the industrial sector. For this purpose, a simple injection mold has been designed according to the characteristics of the thermoforming center of the facilities of the University of Jaén, a search for 3D printing materials that can withstand and maintain their shape and characteristics under the temperature conditions at which the thermoplastic injection process has been carried out, the injection process has been simulated in software specialized in injection molds, and finally the mold has been tested in the thermoforming center and its viability has been verified.

Keywords: mold, injection, 3D printing, rapid tooling.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Moldeado por inyección de plástico	2
1.3.1. Historia y desarrollo	2
1.3.2. Componentes.....	3
1.3.3. Ciclo de inyección y moldeado	5
1.3.4. Materiales	6
1.4. Impresión 3D	6
1.4.1. Historia y desarrollo	7
1.4.2. Tecnologías de fabricación aditiva.....	7
1.5. Moldes de inyección con impresión 3D.....	12
2. DISEÑO DEL MOLDE	15
2.1. Ingeniería inversa en la hélice	15
2.1.1. Escaneado 3D.....	16
2.1.2. Reparación de la hélice.....	19
2.2. Creación del molde.....	33
2.2.1. Diseño de la cavidad.....	34
2.2.2. Diseño y posicionamiento del punto de inyección y ranuras de venteo	43
2.2.3. Diseño de los pernos de sujeción y desmoldeo	48
3. MATERIALES.....	54
4. IMPRESIÓN DEL MOLDE	56
4.1. Proceso de impresión 3D	57
4.2. Proceso de posprocesado	60
4.3. Comprobación dimensional	65
5. PROCESO DE INYECCIÓN DEL MOLDE	66
6. RESULTADOS	69
7. CONCLUSIONES FINALES	72
Bibliografía	74
Anexo I. Especificaciones de los materiales.	75
Anexo II. Especificaciones de los equipos.	78

Índice de Ilustraciones y Figuras

Ilustración 1. Componentes del proceso de moldeo por inyección (tomada de https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/308676-Beneficios-y-problematicas-del-proceso-de-la-inyeccion-de-plastico.html).	3
Ilustración 2. Elementos de un molde de inyección de 2 placas (tomada de Martín Vicente, 1976).	5
Ilustración 3. Proceso de modelado por deposición fundida o FDM (imagen tomada de Jorquera Ortega, 2016).	8
Ilustración 4. Proceso de estereolitografía o SLA (imagen tomada de Jorquera Ortega, 2016)... ..	10
Ilustración 5. Proceso de sinterización selectiva por láser o SLS (imagen tomada de Jorquera Ortega, 2016).	11
Ilustración 6. Tabla comparativa entre la fabricación de moldes por impresión 3D y moldes convencionales (tomada de Formlabs, Agosto 2021).	13
Ilustración 7. Impresiones 3D utilizadas en el proceso de moldeo de inyección (arriba izquierda, tomada de https://www.3dcadportal.com/notas-de-prensa/peel-adopta-la-impresion-3d-para-desarrollar-molde-de-inyeccion y arriba derecha, tomada de https://formlabs.com/es/blog/impresion-3d-para-moldeo-inyeccion/), moldeo por compresión (medio izquierda, tomada de https://formlabs.com/es/blog/moldeo-compresion/), moldeo con silicona (medio derecha, tomada de https://mz3d.net/servicios/fabricacion-por-molde-de-silicona/), moldeo en vacío (abajo derecha, tomada de https://formlabs.com/es/blog/introduccion-moldeo-vacio/) y conformado de chapa metálica (abajo izquierda, tomada de https://3dwork.io/plegadora-con-impresion-3d/).	14
Ilustración 8. Hélice utilizada como modelo para la realización del molde de inyección en la que se puede observar la pérdida de una de sus palas.	15
Ilustración 9. EinScan-SP V2, escáner utilizado para la reparación de la malla (tomada de https://www.einscan.com/einscan-sp-es/)	16
Ilustración 10. Selección de los parámetros y ajustes del escaneo y comienzo del mismo.	17
Ilustración 11. Diferentes haces de luz por cada paso de la plataforma que permiten captar la forma de la hélice.	17
Ilustración 12. Generación (arriba) y optimización (abajo) de la nube de puntos.	18
Ilustración 13. Diferentes posiciones de la hélice para conseguir un escaneado completo.	18
Ilustración 14. Resultado final de escaneo importado en Meshmixer.	19
Ilustración 15. Pala elegida en función del número y tamaño de deformaciones sobre su superficie, mostrando la parte trasera (arriba) y parte delantera (abajo).	20
Ilustración 16. Aplicación de la función de Erase & Fill y resultado.	21
Ilustración 17. Función de suavizado en la pala, Smooth.	22
Ilustración 18. Función Invert utilizada para marcar y seleccionar la superficie que carece de interés de la hélice de forma rápida delimitando previamente la superficie de interés.	23
Ilustración 19. Pala separada de la hélice.	23
Ilustración 20. Requisitos del equipo (izquierda) y eje necesario para cumplir esos requisitos (derecha).	23
Ilustración 21. Malla del eje de la hélice.	24
Ilustración 22. Función de remallado.	24
Ilustración 23. Función Transform del menú Edit situado a la izquierda, no confundir con en que se encuentra dentro del menú de Select.	25
Ilustración 24. Pala situada en el lateral de eje sin unir, siendo dos modelos diferentes. Abajo a la derecha se encuentra el Object Browser que nos indica los modelos independientes con los que se está trabajando dentro del programa.	25
Ilustración 25. Creación de un pivote o punto de apoyo para futuras operaciones.	26
Ilustración 26. Cambio del origen de coordenadas del desplazamiento de la pala desde el origen de la pala al creado en el centro del eje.	27
Ilustración 27. Rotación de 60° de la pala desde el punto central del eje.	27
Ilustración 28. Función de Combine seleccionando previamente las palas duplicadas.	28
Ilustración 29. Función de Boolean Union.	28

Ilustración 30. Error en la operación booleana.	29
Ilustración 31. Al hacer doble clic sobre algún triángulo del contorno (línea azul), se marcarán todos los triángulos que se encuentren a lo largo del mismo.	30
Ilustración 32. Función de Extrude. Esta función crea nuevos bordes y vértices que puede provocar que el error no desaparezca.	30
Ilustración 33. Suavizado de los bordes mediante la función de Brushes en el menú de Sculpt.	31
Ilustración 34. Unión Booleana realizada correctamente.	31
Ilustración 35. Reparación de las pequeñas deformaciones que puedan surgir tras la operación booleana.	32
Ilustración 36. Hélice completamente reparada.	33
Ilustración 37. Molde metálico del centro de termoformado y medidas máximas para el diseño del molde de inyección.	34
Ilustración 38. Molde previamente diseñado en Autodesk Inventor e importado a Meshmixer.	34
Ilustración 39. Colocación de la hélice dentro del molde.	35
Ilustración 40. Plano de corte para la apertura del molde indicado mediante la línea naranja.	35
Ilustración 41. La altura entre pala y pala de hélice no es la misma que, junto a su geometría, genera un plano de corte complejo para el molde	36
Ilustración 42. Plano de corte limitado a un corte recto, mostrado en la ilustración mediante la rejilla de cuadros generada.	36
Ilustración 43. Insertamos un rectángulo como geometría base.	37
Ilustración 44. Plano de corte con la opción de Keep Both.	37
Ilustración 45. Al mantener las dos partes no se separan directamente por lo que con la opción de Separate convierten a ambas partes en independientes.	38
Ilustración 46. Realizando planos de corte e insertando geometrías se va generando del plano de corte del molde entre ambas palas.	38
Ilustración 47. Geometría final.	39
Ilustración 48. Remallado de las geometrías.	39
Ilustración 49. Resultado final de la geometría tras realizar las uniones booleanas.	39
Ilustración 50. Suavizado de las aristas y vértices.	40
Ilustración 51. Geometrías combinadas a las que también se les ha retirado el exceso de material aplicando una diferencia booleana con el diámetro de la hélice.	40
Ilustración 52. Unión booleana de la parte inferior del molde con el desnivel entre pala de la hélice.	41
Ilustración 53. Diferencia booleana entre el molde y la hélice, y resultado final.	41
Ilustración 54. Unión booleana de la geometría del desnivel y la hélice.	42
Ilustración 55. Diferencia booleana y resultado final de la parte superior del molde.	42
Ilustración 56. Generación de 3 canales de distribución debidos a la geometría del eje.	43
Ilustración 57. Diseño y colocación del bebedero y los canales de distribución.	44
Ilustración 58. Resultado final del bebedero y los canales de distribución.	44
Ilustración 59. Simulación del proceso de inyección en la cavidad del molde.	45
Ilustración 60. Simulación de los atrapamientos de aire durante el proceso de inyección.	45
Ilustración 61. Colocación y remallado de la ranura de venteo.	46
Ilustración 62. Convertimos el modelo de la parte superior del molde en referencia para la operación de Align to Target.	46
Ilustración 63. Función Align to Target.	47
Ilustración 64. Resultado final de la función Align to Target (izquierda) y función Extrude para asegurar la operación de diferencia booleana.	47
Ilustración 65. Resultado final de las ranuras de venteo.	48
Ilustración 66. Cierre aplicado normalmente (Izquierda) y cierre aplicado en el molde impreso (Derecha).	48
Ilustración 67. Modelo del tornillo para realizar el agujero en el molde (arriba), colocación de los 3 modelos en el molde (abajo izquierda), y distancia a tener en cuenta con la cavidad del molde para evitar deformaciones (abajo derecha).	49
Ilustración 68. Resultado de la diferencia booleana entre ambas partes del molde y los tornillos.	50
Ilustración 69. Sistema de desmoldeo aplicado normalmente (Izquierda) y sistema de desmoldeo	

aplicado en el molde impreso (Derecha).	50
Ilustración 70. Modelo de tuerca para realizar el agujero del desmolde (arriba), colocación de los 3 modelos en el molde (medio izquierda), distancia a tener en cuenta con la cavidad del molde para evitar deformaciones (medio derecha), y resultado final agujero (abajo izquierda) y resultado final para tuercas (abajo derecha).	51
Ilustración 71. Marca que indica la posición correcta de ambas partes del molde.....	52
Ilustración 72. Resultado final del molde.....	53
Ilustración 73. Impresora Form 3B y resinas de la empresa Formlabs (tomadas del propio catálogo de la empresa en https://formlabs.com/es/).	54
Ilustración 74. Rigid 10k (izquierda), High Temp (derecha) y Grey Pro (abajo).	55
Ilustración 75. Tabla comparativa de las resinas con los principales requisitos y criterios para la impresión 3D de moldes de inyección (tomada de Formlabs, Julio 2022).	56
Ilustración 76. Interfaz del software propio de FormLabs, PreForm.	56
Ilustración 77. Selección de la impresora (1), selección del material (2) y selección de la altura de capa de la impresión (3).	57
Ilustración 78. Alertas de impresión tras importar el modelo en el laminador.	58
Ilustración 79. Opciones de selección previas a la impresión.....	58
Ilustración 80. Resultado final previo a su impresión.	59
Ilustración 81. Finalización de la impresión 3D del molde.	60
Ilustración 82. Proceso de lavado y secado del molde.....	61
Ilustración 83. Proceso de curado con luz ultravioleta. Introducción del molde en el equipo de curado (izquierda), proceso de curado (medio) y resultado final del curado (derecha).	62
Ilustración 84. Centro de termoformado 911.	62
Ilustración 85. Introducción del molde en el horno del centro de termoformado.	63
Ilustración 86. Curva de temperaturas durante el calentamiento del horno.	63
Ilustración 87. Curvas de temperaturas durante el enfriamiento del horno.	64
Ilustración 88. Resultado final del molde tras los procesos de curado y tratamiento térmico.....	64
Ilustración 89. Comprobación de las dimensiones del molde.	65
Ilustración 90. Simulación del peso de la cavidad mediante Moldflow (izquierda) y pesaje de polietileno realmente utilizado para la inyección (derecha).	66
Ilustración 91. Tuerca para desmoldeo (izquierda) y cierre del molde (derecha).....	67
Ilustración 92. Proceso de inyección. Introducción del molde en el módulo de inyección (1), colocación del crisol con el polietileno fundido (2), descenso el émbolo e inyección del molde (3) y retirado del crisol finalizada la inyección (4).	68
Ilustración 93. Molde tras el proceso de inyección y posterior enfriamiento.	69
Ilustración 94. Desmoldeo y rebabas en la hélice inyectada.	69
Ilustración 95. Hélice desmoldada completamente.	70
Ilustración 96. Atrapamiento de aire en la parte superior del eje.	71
Ilustración 97. Atrapamiento de aire en la parte inferior del eje.	71
Ilustración 98. Molde tras el proceso de inyección, no se aprecian deformaciones en su superficie.	72

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

En la industria de la fabricación, los moldes de inyección juegan un papel fundamental en la producción de una amplia variedad de productos ya que permite la reproducción de piezas en masa con alta precisión y calidad con tolerancias estrechas de manera rápida y económica. Estos moldes, también conocidos como moldes convencionales o tradicionales, permiten dar forma a materiales como el plástico mediante el proceso de inyección.

Sin embargo, los moldes de inyección convencionales presentan desafíos significativos. La fabricación tradicional de estos moldes requiere de procesos complejos y costosos, ya que implica el mecanizado de materiales metálicos, como acero o aluminio, para crear las cavidades y canales necesarios para la inyección del material, además de un montaje manual y la realización de ajustes finos. Todo esto requiere de equipo, software y habilidades especializadas y puede llevar semanas o incluso meses, lo que resulta en retrasos en la producción y altos costos de fabricación.

También hay que tener en cuenta que los moldes convencionales están sujetos a desgaste y daños con el uso continuo. Las áreas de contacto y piezas móviles experimentan un desgaste gradual, lo que puede afectar la calidad de las piezas moldeadas y requerir reparaciones o reemplazos frecuentes de los moldes. Además, los moldes de inyección convencionales tienen un diseño estático, es decir, una vez fabricado el molde, cualquier cambio en su diseño supone la creación de un nuevo molde. Todo esto representa una inversión adicional de tiempo y dinero para las empresas y dificulta la adaptabilidad a cambios en la demanda del mercado y limita la creatividad del diseño de productos.

Ante estos desafíos, la industria ha estado buscando constantemente nuevas tecnologías para mejorar la fabricación de moldes. Una de las tecnologías más prometedoras es la impresión 3D, que ha revolucionado muchos sectores de la fabricación. La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, permite la creación de objetos tridimensionales a partir de datos digitales y permite una mayor flexibilidad en el diseño y capacidad de producir moldes complejos de una manera más rápida y económica. Esta combinación de fabricación aditiva combinada con procesos de fabricación tradicionales es conocida con *utillaje rápido* o *rapid tooling*.

Además, la impresión 3D ofrece la posibilidad de utilizar materiales avanzados, como polímeros resistentes al desgaste y metales de alta resistencia, que pueden mejorar la durabilidad y la vida útil de los moldes permitiendo la creación de geometrías más complejas y personalizadas, lo que abre nuevas oportunidades para la innovación en el diseño de productos.

1.2. Objetivos

En este proyecto se analizará la aplicación de la impresión 3D a la fabricación de un molde sencillo de inyección para comprobar su viabilidad en el sector industrial. Para ello se realizará una breve introducción en las tecnologías de inyección de plástico e impresión 3D, así como la comparación

entre ambas tecnologías. A continuación, se realizará el diseño de un molde de inyección a partir de un software de diseño 3D. Posteriormente se realizará una búsqueda de materiales adecuados para la impresión 3D del molde capaces de aguantar las condiciones de inyección del termoplástico, en este caso polietileno. Finalmente se procederá a imprimir el molde y se introducirá en el centro de termoconformado para realizar la inyección del termoplástico. Una vez realizado el proceso de inyección, se analizará el molde para detectar si ha sufrido alguna deformación debido a la temperatura y presión de inyección, así como a la pieza obtenida mediante este método de fabricación para demostrar la utilidad de este tipo de moldes en el sector industrial.

1.3. Moldeado por inyección de plástico

El moldeo por inyección es un proceso de fabricación que ha revolucionado la industria en términos de capacidad y eficiencia permitiendo la producción de piezas de plástico en masa.

Este proceso consiste en calentar un material plástico en forma de gránulos hasta que se vuelva líquido de tal forma que pueda ser inyectado a alta presión dentro de un molde previamente diseñado. El molde consiste en una cavidad formada por una o varias partes, dependiendo de la complejidad de la pieza, que se unen para representar la forma final del objeto que se va a producir. Una vez se ha llenado completamente la cavidad del molde se inicia el enfriamiento el cual permite que el plástico se solidifique y posteriormente se retira obteniendo la pieza moldeada de la forma deseada.

1.3.1. Historia y desarrollo

La inyección de plástico empezó a desarrollarse por la década de 1870 cuando el estadounidense John Wesley Hyatt en su búsqueda para encontrar una alternativa al marfil utilizado en las bolas de billar desarrolló un material a base de celulosa que se podía moldear en diferentes tamaños y formas, llevándolo a desarrollar en 1872 una máquina de moldeo por inyección la cual utilizaba un émbolo para inyectar el material plástico fundido en un molde metálico con forma de bola que después de solidificarse, se extraía del molde.

Tras la Segunda Guerra Mundial, la gran demanda de productos de plástico a bajo coste llevo a que, en 1946, James Watson Hendry creara la primera máquina de inyección de plástico con husillo de forma que el gránulo se introducía en un cilindro con un tornillo sin fin que lo empujaba hacia delante y a medida que el plástico avanzaba, se fundía debido al calor generado por fricción y la compresión ejercida por el tornillo para finalmente inyectarse a altas presiones en el molde a través de una boquilla. Esto permitía un mejor control de la velocidad y calidad del producto terminado que, junto al desarrollo de nuevas resinas plásticas, como el polietileno y el polipropileno, impulsó aún más el crecimiento de la industria del moldeo por inyección.

Más tarde, en las décadas de 1980 y 1990, se desarrollaron nuevos sistemas de control computarizados, lo que permitían un mayor control sobre el proceso de moldeo y la calidad de las piezas mediante el control de parámetros críticos como la temperatura, presión y tiempo, y su ajuste

en tiempo real gracias a sensores. Además, se introdujeron nuevos materiales plásticos que ofrecían propiedades mejoradas, como mayor resistencia mecánica y térmica, y la utilización aleaciones de acero más resistentes, así como materiales cerámicos y compuestos para mejorar la durabilidad y la eficiencia de los moldes.

En los últimos años, se han realizado avances en la optimización del proceso, como el diseño asistido por ordenador (CAD), la fabricación asistida por ordenador (CAM) o la simulación de flujos por ordenador (CFD), que permiten una mayor precisión en el proceso de inyección y en la creación de moldes reduciendo el tiempo y los costos de producción. Además de implementar técnicas de reciclaje y la utilización de materiales biodegradables para conseguir una mayor sostenibilidad y la eficiencia energética.

1.3.2. Componentes

El proceso de moldeo por inyección consta de 3 partes principales: la unidad de inyección, la unidad de cierre y el molde.

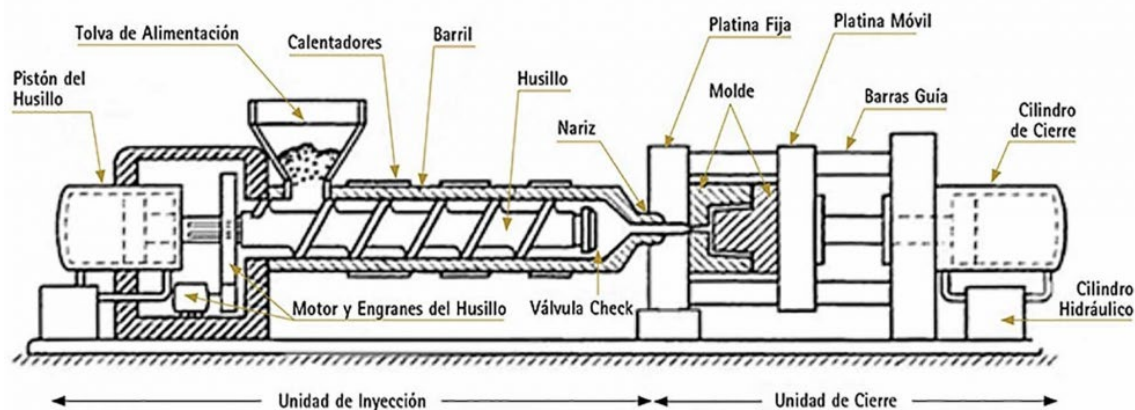


Ilustración 1. Componentes del proceso de moldeo por inyección (tomada de <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/308676-Beneficios-y-problematicas-del-proceso-de-la-inyeccion-de-plastico.html>).

Unidad de Inyección

Su función principal es la de fundir, mezclar e inyectar el polímero en el molde, y consta de las siguientes partes:

- **Tornillo de plastificación:** husillo helicoidal cuya función es fundir y mezclar el material plástico, que se encuentra en forma granular o en gránulos, y luego transportarlo hacia el molde.
- **Cilindro de plastificación:** aloja el tornillo y está equipado con sistemas de calentamiento para derretir el plástico mediante resistencias eléctricas o calentadores de inducción.
- **Conducto de inyección o boquilla:** canal o pasaje por el que fluye el plástico fundido desde la unidad de inyección hacia el molde. Puede tener una configuración de una sola

entrada o múltiples entradas, dependiendo del diseño y las necesidades de la pieza a fabricar.

- **Válvula de retención:** situada en la salida del conducto de inyección, cerca de la entrada del molde. Su función es cerrar el flujo de plástico cuando se ha alcanzado la cantidad deseada en el molde, detener el flujo de plástico y evitar el exceso de llenado del molde.
- **Tolva de alimentación:** tolva situada junto al cilindro de plastificación en la cual se vierten los gránulos de material plástico
- **Pistón del husillo:** empuja el material fundido hacia adelante a medida que el tornillo gira y lo mezcla. El embolo ejerce presión sobre el material y permite que fluya a través del conducto de inyección y se introduzca en el molde.
- **Motor y engranajes:** proporcionan la potencia necesaria para mover y girar el tornillo de plastificación. Puede ser hidráulico, eléctrico o servo motor.

Unidad de Cierre

- **Placas de cierre:** placas principales de la unidad de cierre que sostienen el molde durante el proceso de inyección. Formadas por una placa fija y otra móvil que se cierra para mantener una presión constante sobre el molde evitando fugas de material y mantener la estabilidad del proceso.
- **Mecanismo de cierre:** serie de barras, husillos o actuadores hidráulicos que generan la fuerza necesaria para cerrar y mantener unidas las placas de sujeción. Puede ser accionado hidráulicamente, neumáticamente o eléctricamente.
- **Barra o columna guía:** elementos que ayudan a mantener la alineación y la estabilidad del molde durante el cierre y el proceso de inyección permitiendo un movimiento lineal suave y evitando que el molde se desvíe o se mueva lateralmente durante la aplicación de fuerza.
- **Placas de empuje o expulsores:** situadas en la parte trasera del molde y diseñadas para expulsar la pieza moldeada del molde una vez que el proceso de inyección ha finalizado. Pueden ser accionadas hidráulicamente, neumáticamente o eléctricamente.

Molde

El molde está formado por dos partes principales: la cavidad y el núcleo.

- **Núcleo:** forma las principales superficies internas de la pieza. En él se encuentran los canales por donde el plástico fundido viaja hasta la cavidad, el sistema de enfriamiento por donde circula el refrigerante para enfriar la pieza y eliminar el calor del material fundido permitiendo que no sufra deformaciones, y por los pernos expulsores, encargados de sacar la pieza moldeada de la cavidad.
- **Cavidad:** donde el plástico fundido es inyectado y se deposita para finalmente para crear la pieza.

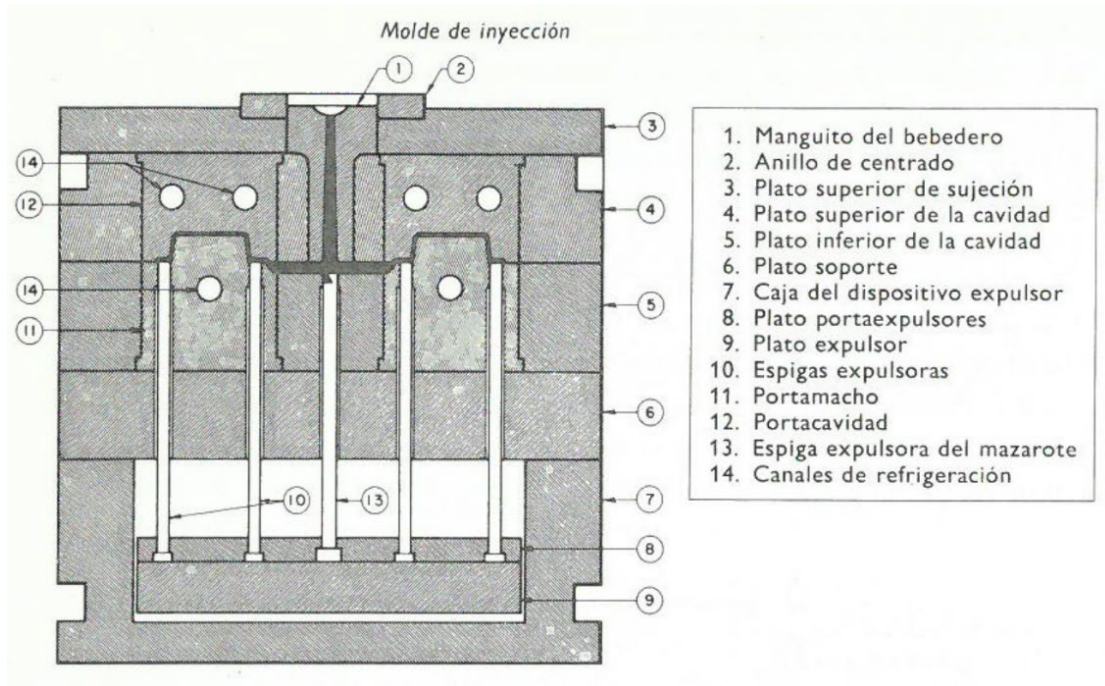


Ilustración 2. Elementos de un molde de inyección de 2 placas (tomada de Martin Vicente, 1976).

1.3.3. Ciclo de inyección y moldeo

La secuencia de operaciones del ciclo de inyección y moldeo para producir piezas moldeadas:

1. Los gránulos de plástico caen desde la tolva hacia el barril de la máquina de inyección.
2. El tornillo de plastificación comienza a girar y se desplaza hacia adelante para llevar los gránulos hacia el cilindro de plastificación.
3. A medida que los gránulos se desplazan hacia adelante, se someten a fricción y presión, lo que genera calor y los funde gradualmente.
4. El plástico fundido se mezcla homogéneamente a medida que el tornillo gira y se desplaza hacia adelante.
5. Cuando el plástico está completamente fundido y homogéneo, la válvula de retención se abre y el tornillo se desplaza hacia adelante para inyectar el plástico fundido en el molde.
6. El plástico fundido se inyecta a alta presión a través de una boquilla conectada al cilindro de plastificación de la máquina de inyección.
7. La presión de inyección se mantiene durante un tiempo específico para asegurar que el plástico llene por completo la cavidad del molde y se forme la pieza deseada.
8. Después de la inyección, la válvula de retención se cierra y se inicia la rotación del tornillo volviendo hacia atrás para acumular de nuevo material fundido.
9. Mientras tanto, el plástico dentro del molde comienza a enfriarse y solidificarse. El tiempo de enfriamiento puede variar según el tipo y espesor del producto, así como el diseño del molde. Un enfriamiento adecuado es esencial para asegurar que el producto tenga las propiedades deseadas y se mantenga su forma.

10. Una vez que el plástico se ha enfriado y solidificado, el molde se abre para liberar el producto moldeado separando las dos mitades del molde, ya sea manualmente o mediante un mecanismo de apertura automatizado, y los eyectores o mecanismos de expulsión ayudan a expulsar el producto del molde.
11. El molde se cierra de nuevo y vuelve a empezar el ciclo.

1.3.4. Materiales

Los materiales más utilizados en la industria del moldeo por inyección son los siguientes:

- **Polietileno de alta densidad (PEAD):** es un termoplástico con alta resistencia a la tracción y a los impactos, compuesto principalmente por polímeros de etileno. Es flexible, resistente a los productos químicos y al agua. Se utiliza en la fabricación de recipientes para productos químicos, envases industriales, tuberías, juguetes y artículos deportivos.
- **Polietileno de baja densidad (PEBD):** es un termoplástico flexible, con buena resistencia química y a la humedad, compuesto principalmente por polímeros de etileno de baja densidad. Es fácil de procesar y reciclar. Se utiliza en la fabricación de bolsas de plástico y envoltorios, así como en láminas de plástico, revestimientos y selladores.
- **Polipropileno (PP):** es un termoplástico que se caracteriza por ser resistente, rígido y con buena resistencia química, compuesto principalmente por polímeros de propileno. Es liviano y presenta una alta resistencia al impacto. Se utiliza ampliamente en la fabricación de productos médicos, componentes automotrices, envases, juguetes, electrodomésticos y muebles.
- **Policarbonato (PC):** es un termoplástico transparente y resistente a los impactos, compuesto principalmente por carbonato de bisfenol-A. Es liviano, con alta resistencia térmica y excelente claridad óptica. Se utiliza en la fabricación de lentes de seguridad, equipos médicos, piezas electrónicas, carcasas de dispositivos electrónicos, componentes automotrices y productos de iluminación.
- **Poliamida (PA o nylon):** es un termoplástico con alta resistencia mecánica, resistencia al desgaste y buena estabilidad dimensional, compuesto por unidades repetitivas de monómeros de amida. Es rígido, resistente a la abrasión y presenta baja fricción. Se utiliza en la fabricación de piezas de automóviles, componentes eléctricos y electrónicos, artículos deportivos, utensilios de cocina, equipos médicos y textiles técnicos.

1.4. Impresión 3D

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, es una tecnología revolucionaria que permite la creación de objetos tridimensionales por aportación de material a partir de modelos digitales. La impresión 3D construye los objetos capa por capa, añadiendo material de manera secuencial hasta obtener la forma deseada, al contrario de los métodos de fabricación tradicionales que suelen ser sustractivos, es decir, van retirando material como es el caso del mecanizado.

Este tipo de tecnología está cogiendo cada vez más fuerza y relevancia en diversos sectores como son la ingeniería, la medicina, la moda, la arquitectura y muchas más, debido a la gran versatilidad y flexibilidad que ofrece para la innovación y la producción personalizada.

1.4.1. Historia y desarrollo

El concepto de impresión 3D nace en 1984 de la mano de Charles W. Hull quién ideó y patentó un novedoso sistema de fabricación el cual utilizaba una luz ultravioleta para endurecer una resina protectora de recubrimiento de tableros para fabricación de mesas. Así surgió el primer sistema de estereolitografía (SLA) con el cual fundó su propia empresa, 3D System.

Para completar su tecnología, crearon su propio formato y extensión para archivos informático, conocido como STL. El formato STL se puede definir como la mínima expresión de formas tridimensionales con la información referente a la forma y tamaño de un objeto.

Poco tiempo después, en 1989, Scott Crump patentó una nueva tecnología de fabricación aditiva conocida como FDM (*Fused deposition modeling*), que consistía en extruir un fino cordón de material plástico derretido y cuya idea surgió a partir del funcionamiento de la pistola de silicona. Debido a la relativa sencillez del proceso y el bajo coste de las materias primas llevó a que este tipo de tecnología de fabricación aditiva se convirtiera en la más extensa del mundo, por encima de la tecnología SLA de Hull.

Durante los siguientes años se han ido perfeccionando y surgiendo nuevas tecnologías de fabricación aditiva como son el caso de la de sinterización selectiva por láser (SLS) y la de depósito de material ligado (LMD), basadas en la utilización de un láser para fundir partículas de polvo y construir sucesivamente la geometría del objeto.

A partir de los años 2000, la impresión 3D se consolidó en la fabricación industrial, principalmente para la creación de prototipos y piezas personalizadas, llevando este tipo de tecnología a desarrollarse aún más con nuevos modelos de impresoras 3D y materiales.

Gracias a estos avances, la tecnología de impresión 3D se ha vuelto mucho más accesible y obtenido bastante relevancia en diversos campos como son la medicina con la fabricación de prótesis personalizadas, modelos anatómicos, tejidos biológicos y órganos artificiales, o en la industria aeroespacial y automotriz con la fabricación de componentes ligeros y complejos, reduciendo considerablemente los tiempos y coste de producción, así como el rendimiento de los productos.

1.4.2. Tecnologías de fabricación aditiva

Como hemos mencionado antes existen diferentes tipos de tecnología de fabricación aditivo o de impresión 3D, las principales son FDM (*Fused deposition modeling* o modelado por deposición fundida), SLA (estereolitografía) y la SLS (*Selective laser sintering* o sinterización selectiva por láser).

Modelado por deposición fundida (FDM)

El modelado por deposición fundida o FDM (*Fused Deposition Modeling*) es una de las tecnologías de impresión 3D más utilizadas actualmente debido a su asequibilidad y disponibilidad, además de su gran variedad de materiales, sus costos relativamente bajos y su capacidad para imprimir objetos grandes.

El proceso comienza con un modelo digital tridimensional (archivo CAD) que se divide en capas horizontales muy delgadas y se convierten en instrucciones para la impresora. El material se alimenta en forma de filamento que se calienta hasta su punto de fusión dentro del extrusor de la impresora y se deposita de manera controlada sobre la plataforma de impresión capa por capa. A medida que el material fundido entra en contacto con el aire este se enfría, se solidifica y se adhiere a la capa inferior. Este proceso se repite hasta que se completa el objeto.

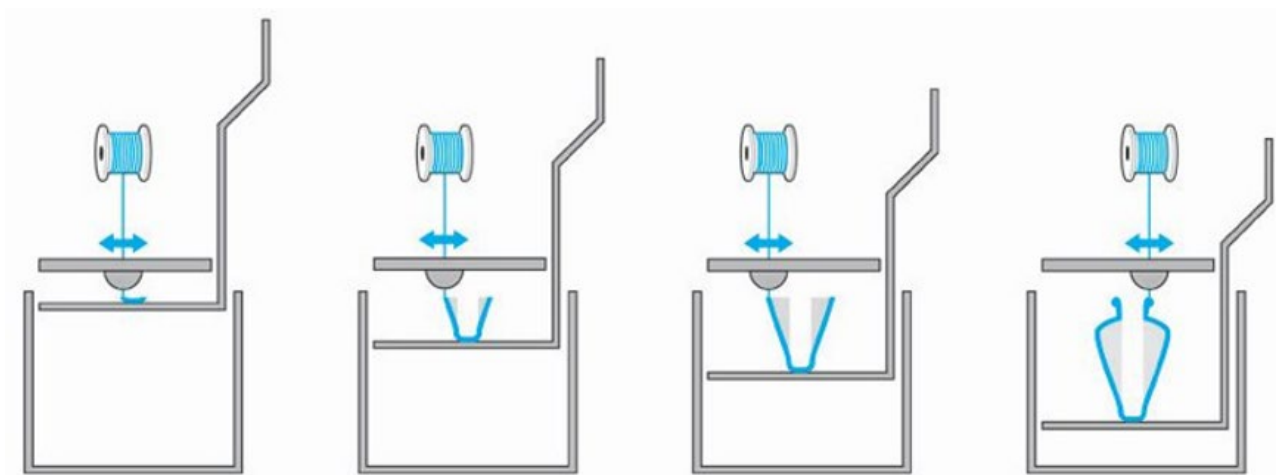


Ilustración 3. Proceso de modelado por deposición fundida o FDM (imagen tomada de Jorquera Ortega, 2016).

Esta tecnología es compatible con una variedad de materiales termoplásticos. Entre los más utilizados en FDM podemos destacar:

- **PLA (ácido poliláctico):** Es fácil de imprimir, biodegradable y generalmente ofrece buena calidad de impresión. Es uno de los materiales más populares para impresión 3D FDM siendo ideal para aplicaciones no funcionales, como prototipos y objetos decorativos. Actualmente, existen muchos híbridos y variedades de PLA como son el PLA reforzado con fibra de carbono que proporcionan una mayor rigidez, resistencia y estabilidad dimensional, el PLA conductivo que contiene partículas conductoras (como grafito o carbono) que le confieren propiedades eléctricas, PLA luminiscente capaz de brillar en la oscuridad o PLA flexible, combinación de PLA con polímeros flexibles.
- **ABS (acrilonitrilo butadieno estireno):** Es un material resistente, duradero y se puede postprocesar mediante lijado y pulido. Otro de los materiales más utilizados en la impresión 3D FDM, sin embargo, comparado al PLA su utilización es más compleja debido a la naturaleza del propio material que necesita una mayor temperatura de impresión lo que

dificulta su adhesión a la plataforma de impresión y favorece la contracción y deformación térmica durante su enfriamiento (*warping*). Se utiliza comúnmente en aplicaciones que requieren resistencia mecánica, como piezas de maquinaria y carcasas de electrónica.

- **PETG (tereftalato de polietileno glicol modificado):** Es un material que combina las características del PLA y el ABS. El PETG es resistente, duradero, flexible y presenta una buena resistencia a los impactos. También es resistente al agua y a los productos químicos. Se utiliza en aplicaciones que requieren resistencia mecánica y transparencia.
- **Nylon:** El nylon es un material resistente y flexible que se utiliza en aplicaciones que requieren alta resistencia y durabilidad, como engranajes, rodamientos y piezas funcionales sometidas a estrés. También se utiliza en la fabricación de productos finales, como prototipos funcionales y componentes de maquinaria.
- **TPU (poliuretano termoplástico):** Es un material flexible y elástico que se utiliza en la impresión de objetos que requieren propiedades de amortiguación y flexibilidad, como fundas de teléfonos, juntas y sellos.

Además de estos materiales más comúnmente utilizados en la impresión 3D FDM también existen materiales más especializados como pueden ser:

- **PVA (alcohol polivinílico):** es un material utilizado como material de soporte en combinación con otros materiales debido a su solubilidad en agua lo que permite una mejor eliminación de los soportes después de la impresión.
- **PC (policarbonato):** es un material resistente y duradero que se utiliza en aplicaciones que requieren alta resistencia a impactos y propiedades térmicas superiores. Es muy utilizado en la fabricación de componentes industriales.
- **ASA (acrilonitrilo estireno acrilato):** es un material similar al ABS en términos de resistencia y durabilidad. Sin embargo, el ASA tiene una mejor resistencia a los rayos UV y a la intemperie, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en exteriores.

Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía (SLA) es un proceso de impresión 3D que utiliza un láser para solidificar resinas líquidas y construir objetos en capas sucesivas. Fue la primera tecnología de impresión 3D desarrollada y se considera una de las más precisas y detalladas disponibles en la actualidad por su capacidad para crear piezas con detalles minuciosos y superficies suaves, lo que la hace muy utilizada para la fabricación de prototipos. Sin embargo, los equipos de impresión SLA pueden ser más costosos que otros sistemas de impresión 3D, y la resina fotosensible utilizada puede ser más cara en comparación con otros materiales, esto hace que su utilización no esté tan extendida como la impresión 3D FDM.

Como toda tecnología de impresión 3D, partimos de la creación de un modelo digital en 3D del objeto que se desea imprimir el cual se divide en capas muy finas, en este caso de entre

0,05 y 0,15 milímetros de espesor. A continuación, en un tanque de resina líquida fotosensible se coloca una plataforma sumergida. Un láser de alta precisión controlado por el software de la impresora 3D se enfoca en la superficie de la resina y traza los contornos de cada capa en el modelo, solidificando la resina donde el láser golpea. Una vez que se completa una capa, la plataforma se mueve en el tanque, permitiendo que una nueva capa de resina líquida fluya sobre la capa recién solidificada. El proceso se repite capa por capa hasta que se completa todo el objeto.

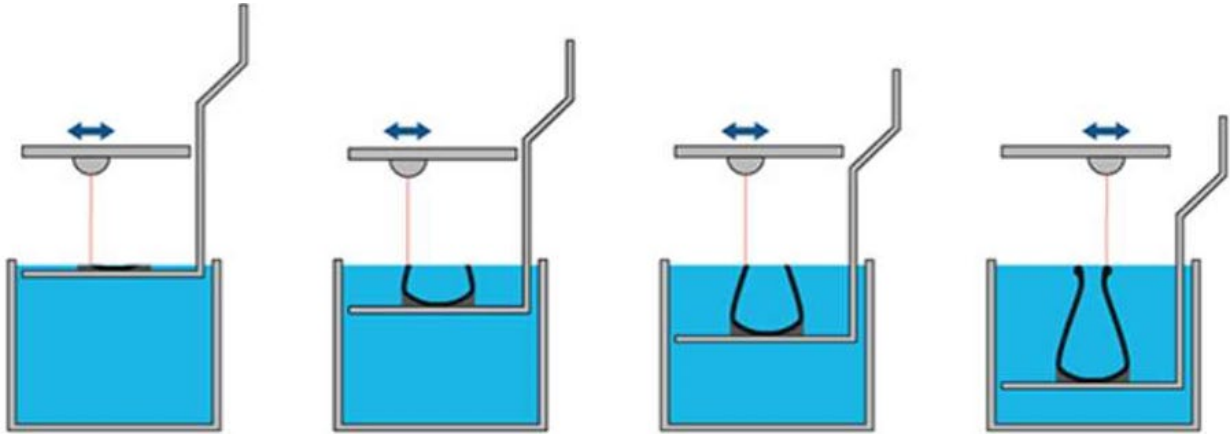


Ilustración 4. Proceso de estereolitografía o SLA (imagen tomada de Jorquera Ortega, 2016)

Existen diferentes tipos de resinas que se utilizan en la impresión SLA, cada una con propiedades y características específicas. También es importante tener en cuenta que la disponibilidad y características de las resinas puede variar según el fabricante y las especificaciones del equipo, debido a que cada fabricante puede ofrecer una selección diferente de resinas con propiedades y características únicas.

A continuación, se mencionan algunos de los materiales más comunes utilizados en SLA:

- **Resinas estándar:** Son las resinas más utilizadas en la impresión SLA. Estas resinas ofrecen una buena combinación de propiedades mecánicas, detalle de impresión y facilidad de uso y disponibles en una amplia gama de colores siendo adecuadas para una variedad de aplicaciones, como prototipado, modelos arquitectónicos y accesorios.
- **Resinas transparentes:** Estas resinas están diseñadas para producir piezas transparentes o translúcidas. Son ideales para aplicaciones donde se requiere claridad óptica, como prototipos de productos transparentes, lentes, envases y modelos médicos.
- **Resinas flexibles:** Las resinas flexibles son elásticas y pueden doblarse o estirarse sin romperse. Son utilizadas para imprimir objetos que requieren propiedades de flexibilidad, como juntas, sellos, piezas de caucho y prototipos de dispositivos médicos.
- **Resinas de alto rendimiento:** Estas resinas están diseñadas para ofrecer propiedades mecánicas superiores, como alta resistencia a la tracción, rigidez o resistencia a altas temperaturas. Son adecuadas para aplicaciones que requieren componentes duraderos y resistentes, como piezas de ingeniería, herramientas y componentes funcionales.

- **Resinas biocompatibles:** Las resinas biocompatibles están formuladas para ser seguras para su uso en aplicaciones médicas y dentales. Se utilizan para la fabricación de guías quirúrgicas, modelos dentales, implantes y otros dispositivos médicos personalizados.

Sinterización selectiva por láser (SLS)

La tecnología 3D de sinterización selectiva por láser o SLS (*Selective laser sintering*) es un proceso de fabricación aditiva que utiliza un láser de alta potencia para fusionar polvos de material y construir objetos tridimensionales capa por capa. Las piezas impresas con tecnología SLS suelen tener una alta resistencia y durabilidad, lo que las hace adecuadas para aplicaciones funcionales y de ingeniería.

Esta tecnología ofrece una mayor libertad de diseño y fabricación capaz de producir detalles finos y superficies suaves en los objetos impresos, aunque no al nivel de la tecnología de impresión 3D SLA, debido a que, diferencia de otras tecnologías de impresión 3D, como la SLA o la FDM, el SLS no requiere el uso de soportes adicionales durante la impresión, debido a que los propios polvos de material actúan como soporte durante el proceso.

Sin embargo, los equipos de impresión SLS suelen ser más caros y requieren un ambiente controlado para manejar el polvo de material. Además, el acabado superficial de las piezas impresas con SLS puede llegar a ser rugoso, lo que puede requerir procesos de acabado adicionales para obtener un aspecto final suave y pulido.

Del mismo modo que tecnologías descritas, comienza con un modelo digital en 3D del objeto que se desea imprimir dividido en capas. Una capa de polvo de material, generalmente polímeros termoplásticos, se extiende uniformemente sobre la plataforma de construcción. A continuación, láser de alta potencia se dirige hacia las áreas específicas de la capa que corresponden a los contornos del objeto, calentando y fusionando selectivamente los polvos de material. Una vez que se completa una capa, la plataforma de construcción se mueve hacia abajo y se agrega una nueva capa de polvo. El láser se enfoca nuevamente en las áreas necesarias para fundir la siguiente capa, y el proceso se repite hasta que se construye el objeto completo. Después de la impresión, el objeto se enfría y se retira del polvo no fundido, eliminando los excedentes de material.

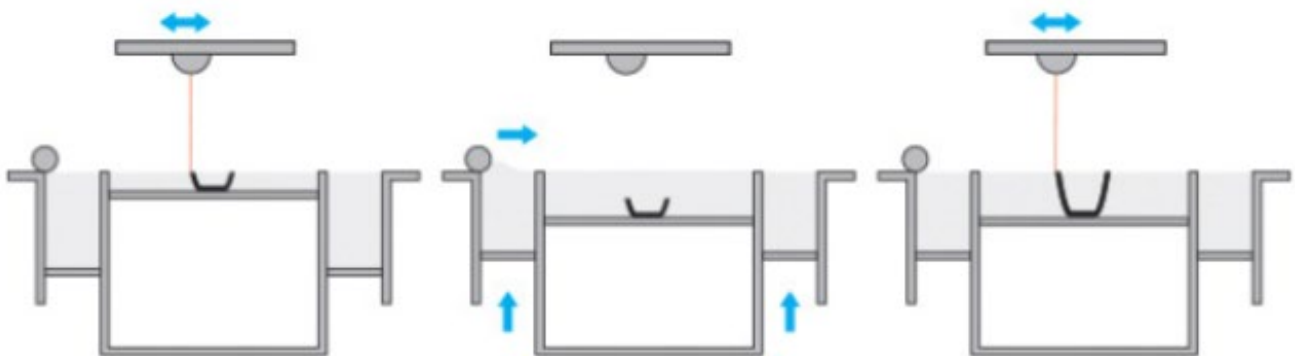


Ilustración 5. Proceso de sinterización selectiva por láser o SLS (imagen tomada de Jorquera Ortega, 2016).

El SLS es compatible con una amplia variedad de materiales, como polímeros termoplásticos, poliamidas, elastómeros y metales en polvo, lo permite la fabricación de piezas con diferentes propiedades físicas, como flexibilidad, resistencia al calor o conductividad. Entre los materiales más utilizados en este tipo de tecnología podemos encontrar:

- **Nylon:** La poliamida es uno de los materiales más utilizados en la tecnología SLS. Es conocida por su alta resistencia, durabilidad y buena estabilidad dimensional. Se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, como piezas funcionales, prototipos y componentes industriales.
- **Polipropileno (PP):** El polipropileno es otro material común en la impresión SLS. Es conocido por su baja densidad, resistencia química y flexibilidad. Se utiliza en aplicaciones que requieren materiales livianos y resistentes, como envases, componentes automotrices y dispositivos médicos.
- **Poliuretano (PU):** El poliuretano es un material elástico y flexible utilizado en la impresión SLS. Se utiliza en aplicaciones que requieren propiedades de flexibilidad y amortiguación, como juntas, sellos y prototipos de calzado.
- **Policarbonato (PC):** El policarbonato es un material resistente y transparente que se utiliza en la impresión SLS. Es conocido por su alta resistencia al impacto y su capacidad para soportar altas temperaturas. Se utiliza en aplicaciones que requieren materiales robustos, como prototipos de ingeniería, componentes automotrices y gafas de seguridad.
- **Aleaciones de metales:** Además de los polímeros, la tecnología SLS también se utiliza para imprimir con polvos de metales. Estos polvos metálicos, como el aluminio, acero inoxidable, titanio y cobalto-cromo, se fusionan mediante el láser para crear piezas metálicas con propiedades físicas y mecánicas específicas. Estas piezas metálicas impresas en 3D encuentran aplicaciones en industrias como la aeroespacial, médica y automotriz.

1.5. Moldes de inyección con impresión 3D

Como ya se ha explicado anteriormente, el moldeo por inyección es uno de los principales procesos de fabricación de plástico actuales gracias a la capacidad de producción en masa de piezas idénticas con una gran precisión y calidad de manera económica. Sin embargo, esa capacidad de producción en ciclos cortos somete a condiciones extremas a los moldes lo que provoca que se fabriquen tradicionalmente en materiales metálicos, los cuales necesitan equipos, softwares y mano de obra especializada. Todo esto deriva en un gran costo para la producción del molde, ya que la fabricación del mismo puede tardar entre uno y dos meses además de costar de 2000 a 100000 dólares, dependiendo de su geometría.

Este elevado costo puede ser asequible para grandes series de piezas, sin embargo, si la cantidad de piezas que se requieren producir es pequeña, este coste puede hacer que el moldeo por inyección a esta escala pueda ser inalcanzable. En estos casos, la impresión 3D puede ser una gran solución.

Actualmente, la impresión 3D ofrece mucho más que prototipos o representaciones físicas de

modelos CAD. Esta revolucionaria tecnología tiene la capacidad de potenciar y completar las tecnologías de fabricación convencionales creando posibilidades de diseño e innovación para la creación de mejores productos finales.

Esta combinación es lo que se conoce como rapid tooling o utillaje rápido, el cual consiste en combinar procesos de fabricación tradicionales, como la inyección o el conformado, con tecnologías de fabricación aditiva como la impresión 3D.

La impresión 3D permite la fabricación de moldes de inyección de manera rápida y económica, ahorrando en equipos y operadores especializados, así como en tiempos de CNC, y beneficiando a los fabricantes por su flexibilidad y velocidad llegando a entregar una cantidad de unidades en cuestión de días. Además, permite a los ingenieros y diseñadores ser más innovadores y lograr geometrías mucho más complejas que tradicionalmente serían más difíciles o imposibles de realizar.

PROCESO	EQUIPO	PLAZO DE PRODUCCIÓN	COSTES DE MATERIAL (P. EJ. MOLDE DE 300 ML/CM ³)
Creación del molde y fabricación de la pieza (sin externalizar)	Form 3 y máquina de moldeo	5–24 horas (tiempo de impresión del molde)	Aproximadamente 45 € en High Temp Resin
Molde SLA externalizado	máquina de moldeo	3–5 días	Aproximadamente 600 € por la impresión en una empresa de servicios con impresora SLA industrial
Molde de metal externalizado	máquina de moldeo	1–2 semanas	Aproximadamente 5500 € por el mecanizado de aluminio en una empresa de servicios
Molde externalizado Creación y producción	ninguno – completamente externalizado	1–3 semanas	Entre 3400 € y 12 800 € en función del volumen y los materiales

Ilustración 6. Tabla comparativa entre la fabricación de moldes por impresión 3D y moldes convencionales (tomada de Formlabs, Agosto 2021).

Sin embargo, existen limitaciones de lo que puede ofrecer un molde impreso en 3D a que ofrece un molde fabricado de manera convencional. No podemos esperar el mismo rendimiento que uno metálico. Las dimensiones críticas son más complicadas de obtener, los tiempos de enfriamiento son más largos debido a la naturaleza del plástico el cual tiene una transferencia térmica más lenta y los moldes pueden llegar a romperse fácilmente bajo la presión y el calor. Por tanto, los moldes impresos en 3D son más económicos para producción de piezas en cantidades limitadas.

Dentro de las diferentes tecnologías de impresión anteriormente descritas, y según el documento Formlab Agosto 2021, la impresión 3D de estereolitografía o SLA puede ofrecer la mejor opción en cuanto al diseño de moldes se refiere. Sus principales ventajas frente al resto de tecnologías de impresión 3D son sus acabados superficiales lisos y de alta precisión que trasladará el molde a la pieza final y facilitar el desmoldeo. Además, en las impresiones 3D por SLA, estas se unen

químicamente lo que hace que sean completamente densas e isotrópicas, produciendo moldes con una calidad que no es posible con el modelado por deposición fundida (FDM).

A parte de moldes para inyección, la impresión 3D también puede ser usada en procesos de molde en vacío, moldeo con silicona, sobremolde, moldeo por compresión o incluso en procesos de conformado de chapa.



Ilustración 7. Impresiones 3D utilizadas en el proceso de moldeo de inyección (*arriba izquierda*, tomada de <https://www.3dcadportal.com/notas-de-prensa/peel-adopta-la-impresion-3d-para-desarrollar-molde-de-inyeccion> y *arriba derecha*, tomada de <https://formlabs.com/es/blog/impresion-3d-para-moldeo-inyeccion/>), moldeo por compresión (*medio izquierda*, tomada de <https://formlabs.com/es/blog/moldeo-compresion/>), moldeo con silicona (*medio derecha*, tomada de <https://mz3d.net/servicios/fabricacion-por-molde-de-silicona/>), moldeo en vacío (*abajo derecha*, tomada de <https://formlabs.com/es/blog/introduccion-moldeo-vacio/>) y conformado de chapa metálica (*abajo izquierda*, tomada de <https://3dwork.io/plegadora-con-impresion-3d/>).

2. DISEÑO DEL MOLDE

El objeto empleado como modelo para la realización del molde de inyección es una hélice de 6 palas utilizada en una de las prácticas de la asignatura de Máquina e instalaciones de fluidos que, debido a los esfuerzos a los que está sometida durante la realización las mismas, terminó parcialmente destruida perdiendo una de sus palas como se puede ver en la siguiente imagen.

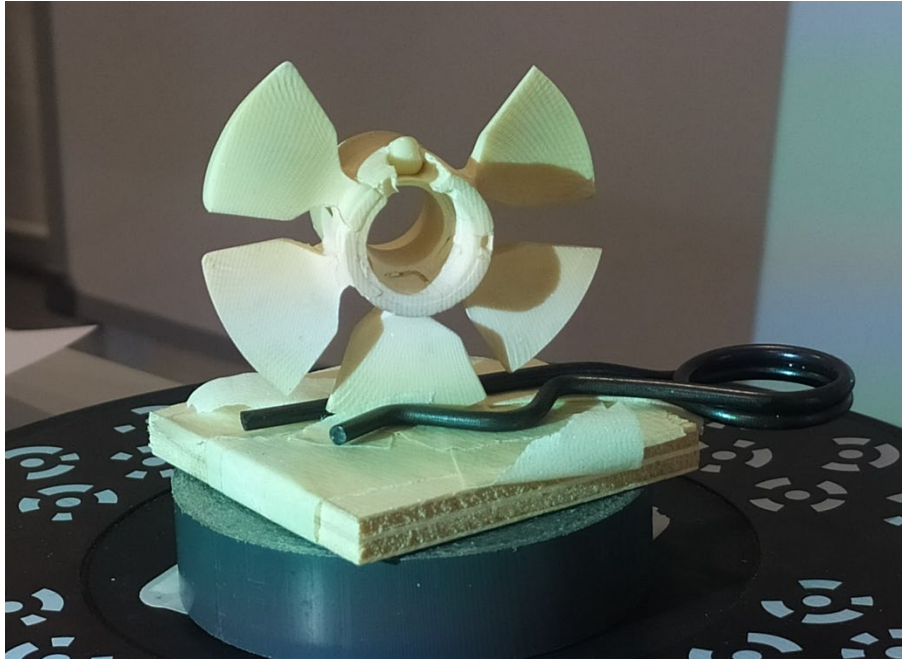


Ilustración 8. Hélice utilizada como modelo para la realización del molde de inyección en la que se puede observar la pérdida de una de sus palas.

Este objeto ha sido elegido debido a la complejidad de su geometría, sobre todo con la curvatura de las palas, y la posibilidad de evaluar cómo se comportará un molde impreso en 3D con una cavidad de diferentes espesores a lo largo su geometría en lugar de una cavidad de espesor constante.

La pérdida de una de las palas de la hélice también permitirá la realización de ingeniería inversa de la hélice dañada para poder recrear y reemplazar la pala perdida de manera precisa y efectiva antes de realizar el molde de inyección.

2.1. Ingeniería inversa en la hélice

La ingeniería inversa es un proceso mediante el cual se estudia y analiza detalladamente un objeto, dispositivo o sistema existente con el objetivo de comprender su funcionamiento, diseño y fabricación. Para ello, se descompone y examina el objeto en cuestión para obtener información sobre sus componentes, estructura, procesos internos y lógica de funcionamiento.

El proceso de ingeniería inversa implica la utilización de herramientas y técnicas especializadas, como el análisis de código fuente, la descompilación de software, la reconstrucción de modelos

tridimensionales, la inspección y el análisis de componentes, así como pruebas y experimentación para comprender la funcionalidad y el comportamiento del objeto estudiado. La ingeniería inversa puede tener diferentes propósitos, como obtener conocimientos técnicos sobre un producto existente, mejorar o modificar un diseño existente, solucionar problemas de compatibilidad o interoperabilidad en otros.

Para este trabajo se utilizará un escáner 3D que permitirá la representación tridimensional de la hélice dañada que posteriormente se exportará a un programa especializado en el procesamiento y edición de archivos STL y de mallas tridimensionales.

2.1.1. Escaneado 3D

Un **escáner 3D** es un dispositivo que sirve para analizar un objeto reuniendo datos de su forma e incluso su color a partir de un haz de luz y calculando la distancia desde el punto emisor hasta un punto de un objeto situado al alcance de su trayectoria. La información obtenida se puede usar para construir modelos digitales tridimensionales que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones.

Para la realización del escaneado 3D de la hélice se utilizará el escáner de escritorio **EinScan-SP V2** de escaneo fijo con plataforma giratoria de SHINING 3D (más información sobre el escáner consultar *Anexo I. Especificaciones de los equipos*).



Ilustración 9. EinScan-SP V2, escáner utilizado para la reparación de la malla (tomada de <https://www.einscan.com/einscan-sp-es/>)

Para realizar el escaneo se utilizará el software EXScan S_v3.1.2.0 específico para este tipo de escáner. Una vez se ha realizado la configuración y calibración del escáner siguiendo las instrucciones proporcionadas por el propio fabricante, se pasará al escaneado de la hélice.

La hélice se colocará en el centro de la plataforma de escaneo y a continuación en el software ajustaremos el brillo para que solamente escanee la hélice y ajustaremos los pasos de la plataforma. Cuanto mayor sea el número de pasos mayor será la calidad del escaneado. Con los parámetros de escaneo seleccionados, le daremos a comenzar el escaneo.

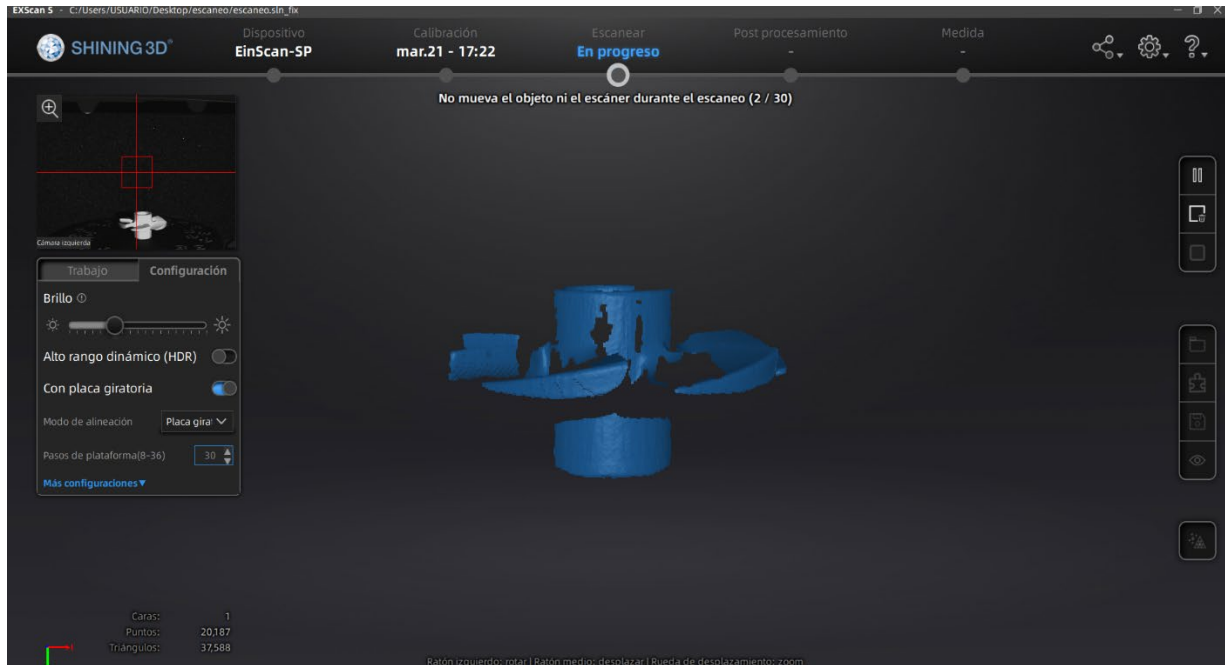


Ilustración 10. Selección de los parámetros y ajustes del escaneo y comienzo del mismo.

Como hemos mencionado anteriormente, el escaneo se produce a través de haces de luz que dependiendo de la distancia a la que se proyecten sobre el objeto podrán determinar la forma y geometría del mismo. Además, para cada uno de los pasos de la plataforma que hemos indicado antes de escanear, el escáner realizará diferentes patrones de luz antes de cambiar de paso obteniendo la información suficiente para ir generando una nube de puntos que irá actualizando con los siguientes movimientos de la plataforma.

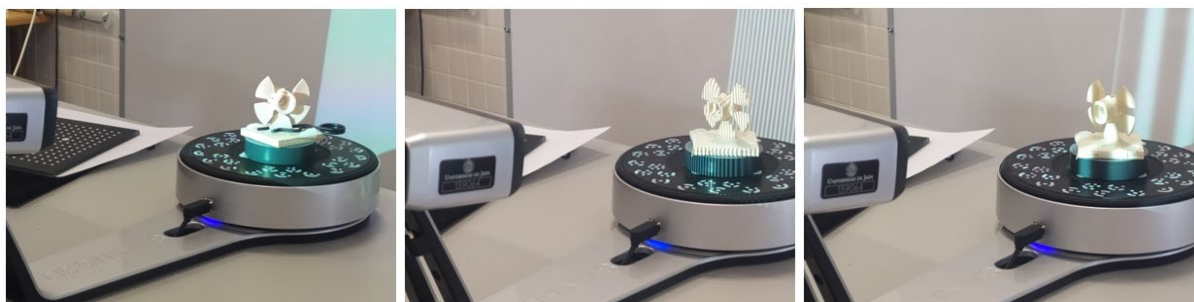


Ilustración 11. Diferentes haces de luz por cada paso de la plataforma que permiten captar la forma de la hélice.

Una vez a completada una vuelta entera de la plataforma, el programa generará una nube de puntos que representan la hélice. Sin embargo, esa nube de puntos en un principio podría parecer que no ha logrado generar de forma correcta la geometría de la hélice. Para conseguir que esa nube de puntos genera la geometría de la hélice debemos usar la función del programa de optimización (parte derecha de la interfaz).

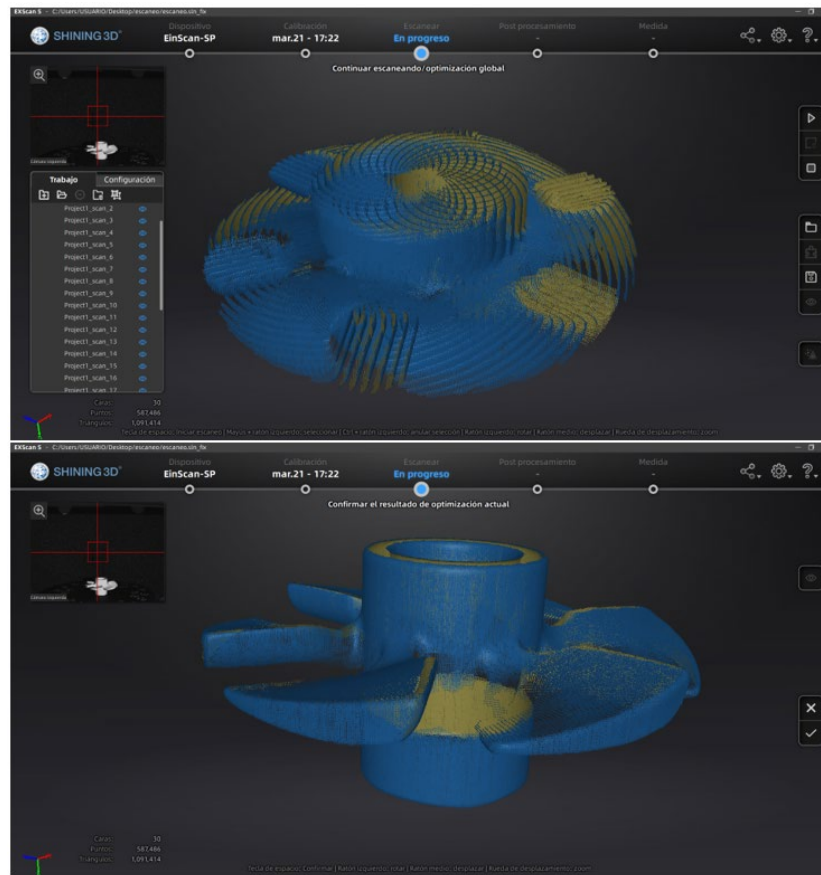


Ilustración 12. Generación (*arriba*) y optimización (*abajo*) de la nube de puntos.

Como se puede observar en la geometría generada del escaneo, parte de la hélice no ha podido obtenerse. Esto es debido a que al tener una compleja geometría se generan zonas de sombras a las que los haces de luz no pueden llegar y hacen que estas partes no se generen. Para solucionar esto, debemos colocar la hélice en diferentes posiciones de tal forma que se realice un segundo escaneo de las zonas en las que no llegó el haz de luz, complementando al primero y generando aquellas regiones que falte de la hélice.

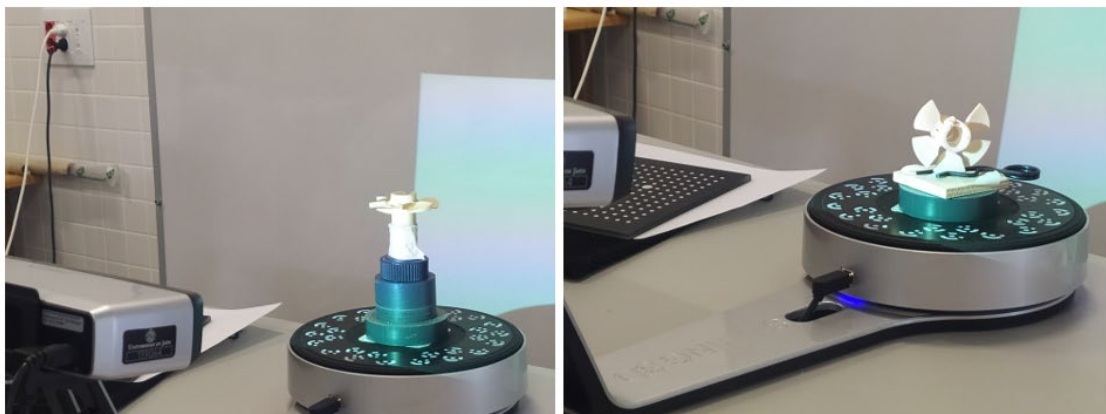


Ilustración 13. Diferentes posiciones de la hélice para conseguir un escaneado completo.

Podemos realizar tantos escaneos y cambiar la posición de la hélice como veces seas necesarias hasta obtener la forma completa. Una vez terminado el escaneo de la hélice en todas las posiciones pasaremos a generar la malla y a continuación lo exportaremos en formato .stl para posteriormente trabajar en la reparación de la hélice.

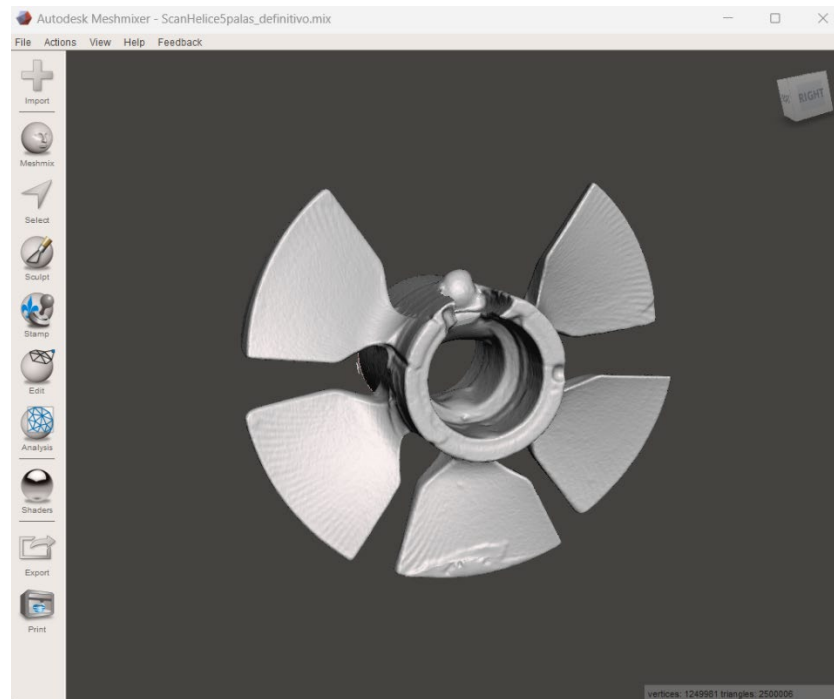


Ilustración 14. Resultado final de escaneo importado en Meshmixer.

2.1.2. Reparación de la hélice

Una vez realizado el escaneo completo de la hélice, se ha pasado a la reparación de las misma mediante el software **Meshmixer** de Autodesk. Este software presenta varias características interesantes que permiten la optimización y procesamiento de las mallas de triángulos, así como funciones de modificación y edición de la misma como son esculpir secciones, llenado y reparación de agujeros o combinación mallas de modelos diferentes. También incluye funciones más específicas destinadas para la impresión 3D con las cuales se puede analizar el modelo en busca de posibles problemas de impresión.

Se ha importado la hélice escaneada en formato .stl al software Meshmixer y examinado cada una de las palas hasta encontrar la que menos defectos e imperfecciones tenga siendo la pala a la que se realice la reparación y el alisado.

Los criterios seguidos para la elección de la pala han sido los siguientes:

- Que no tenga grandes deformaciones en la superficie de la pala, solo pequeñas deformaciones o huecos.
- Que el número de pequeñas deformaciones en la pala sea menor respecto a las demás palas.
- Que puedan ser solucionados de forma sencilla y sin utilizar muchas operaciones de relleno o alisado.

Siguiendo este criterio podemos llegar a la conclusión de que el pala con menos imperfecciones de la hélice puede ser el que se muestra en la *Ilustración 15*.

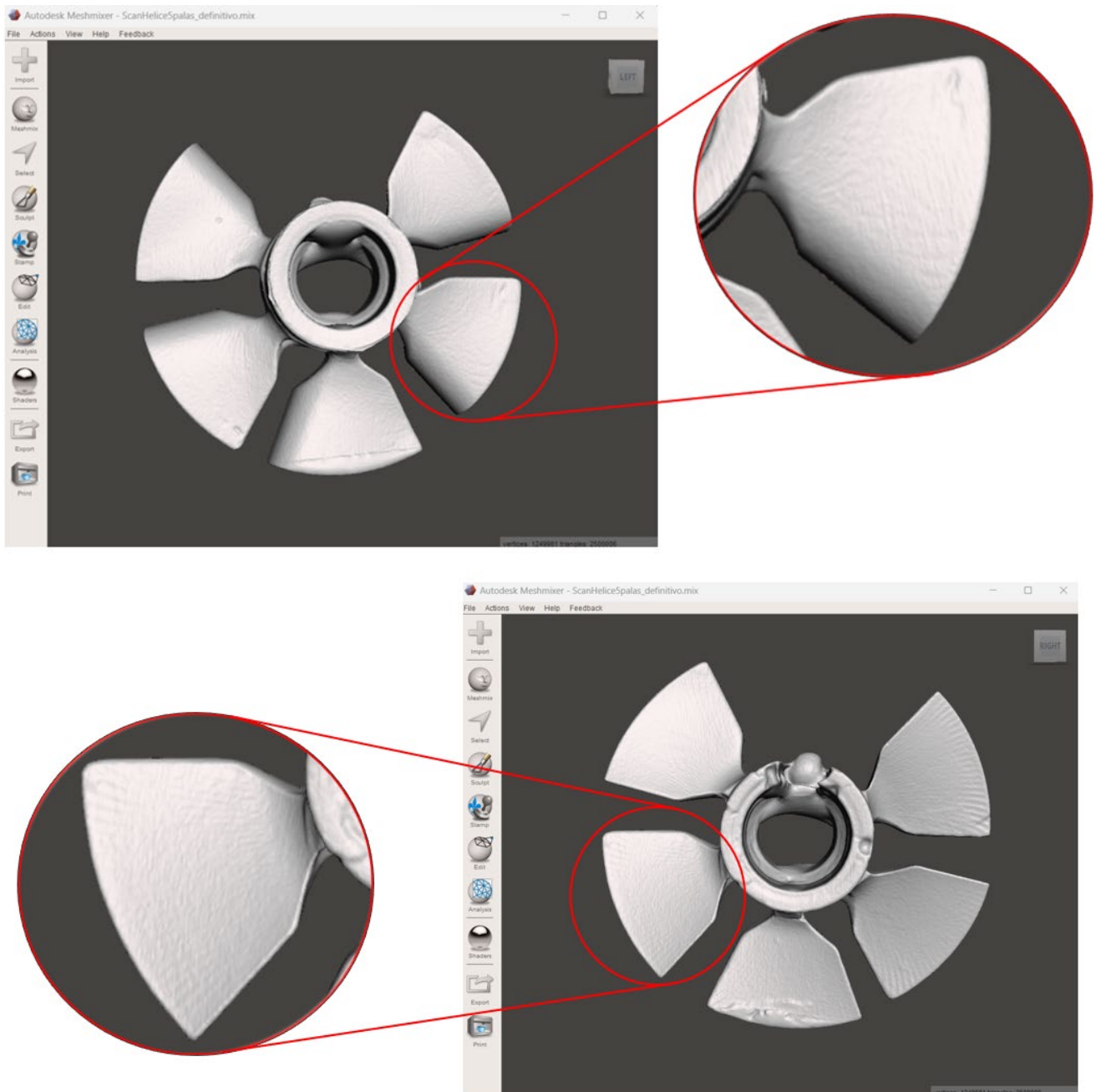


Ilustración 15. Pala elegida en función del número y tamaño de deformaciones sobre su superficie, mostrando la parte trasera (*arriba*) y parte delantera (*abajo*).

La pala elegida presenta un menor número de pequeñas deformaciones respecto al resto de palas y ninguna deformación grande. Además, las pequeñas deformaciones existentes no tienen mucha profundidad y pueden ser reparadas con relativa facilidad empleando funciones sencillas de rellenado y alisado.

Para reparar la pala se ha usado la función de *Select* y marcado la zona en la que se encuentra la deformación. Una vez marcada, dentro del menú de *Select* nos iremos a la opción de *Edit* seguida de *Erase & Fill*, como podemos ver en la *Ilustración 16*. Esta función se encarga de borrar la zona seleccionada en naranja e inmediatamente la sustituye por una superficie suave de tal forma que la deformación desaparece.

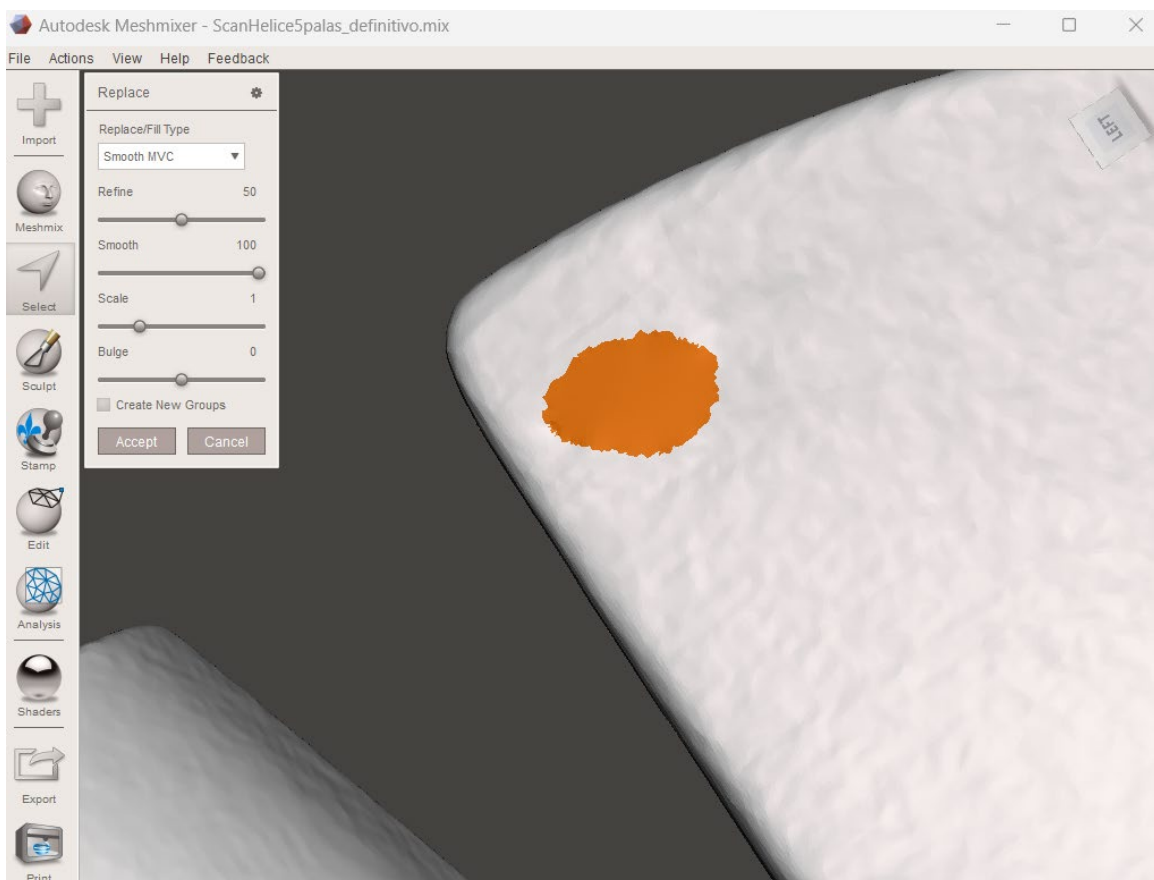
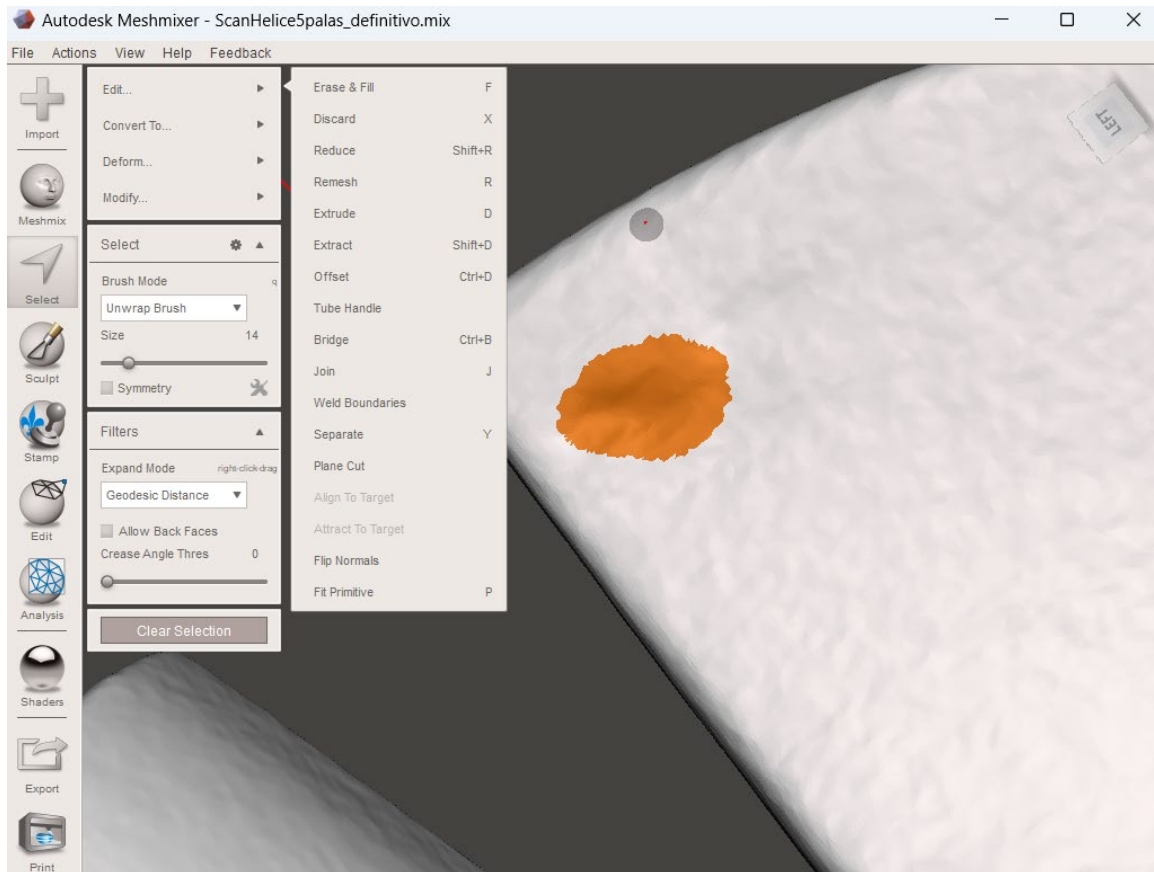


Ilustración 16. Aplicación de la función de *Erase & Fill* y resultado.

Se ha repetido la misma operación para cada una de las imperfecciones y deformaciones que tenga la pala.

A continuación, de vuelta al menú de *Select*, se selecciona la pala entera. Con la pala entera en naranja se ha utilizado la opción de *Deform* y después a la opción de *Smooth* (Ilustración 17). Esta función se encarga de alisar y suavizar las caras de la pala entera eliminando cualquier borde desigual y evitando vértices demasiado lisos, al mismo tiempo que realizará un remallado.

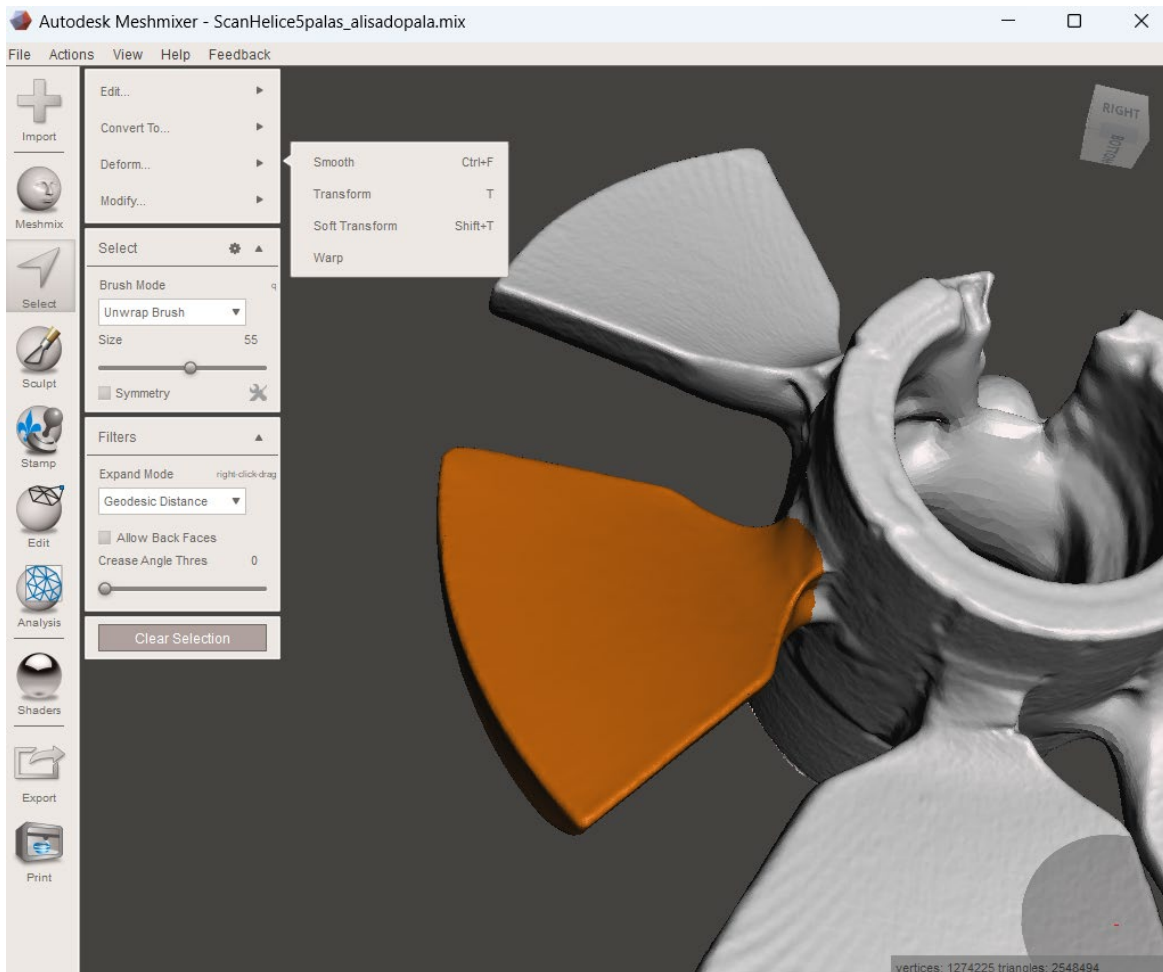


Ilustración 17. Función de suavizado en la pala, *Smooth*.

Con la pala de la hélice reparada y alisada, se ha pasado a separarla del resto de la hélice. Para realizar dicha acción, dentro del menú de *Select*, se marca en naranja toda la pala y parte del eje para poder insertarla luego en el nuevo eje que importaremos desde un programa de diseño. Con la pala marcada, mediante la opción de *Modify*, se selecciona la función *Invert*, encargada de cambiar el área seleccionada al resto de la hélice (Ilustración 18). A continuación suprimiremos la parte marcada de naranja de tal forma que la pala reparada quedará suelta (Ilustración 19).

Para el eje de la hélice utilizaremos un programa de diseño externo, en esta ocasión *Autodesk Inventor*, para reproducirlo y se importará a Meshmixer para procesarlo y poder unirlo con la hélice reparada.

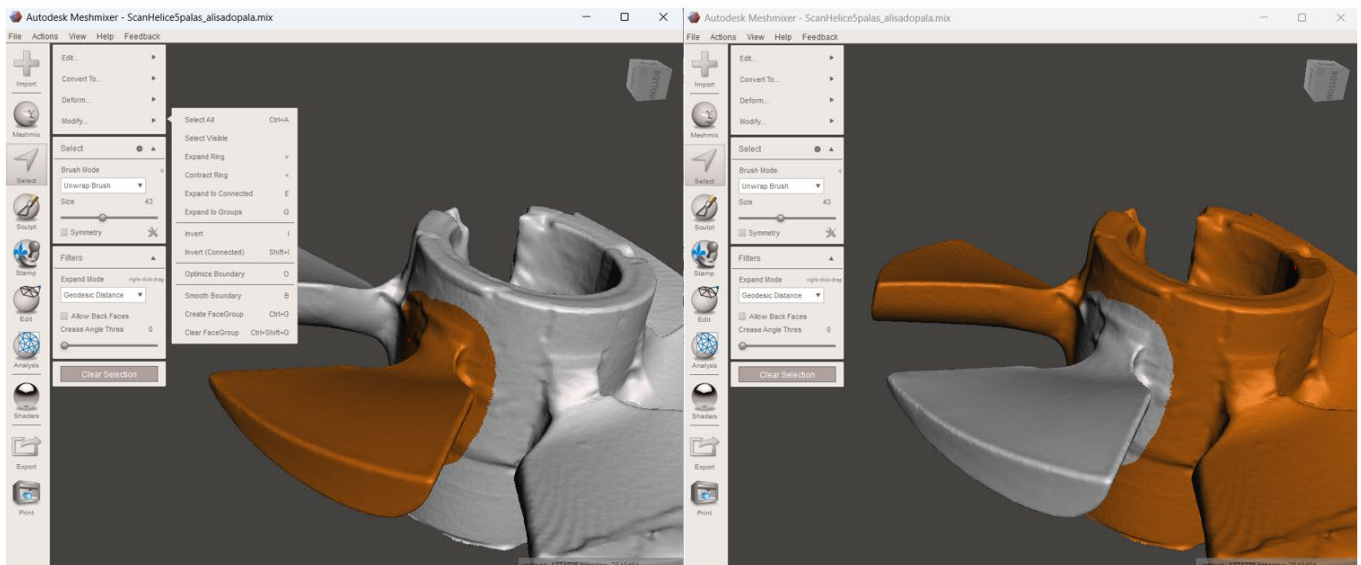


Ilustración 18. Función *Invert* utilizada para marcar y seleccionar la superficie que carece de interés de la hélice de forma rápida delimitando previamente la superficie de interés.

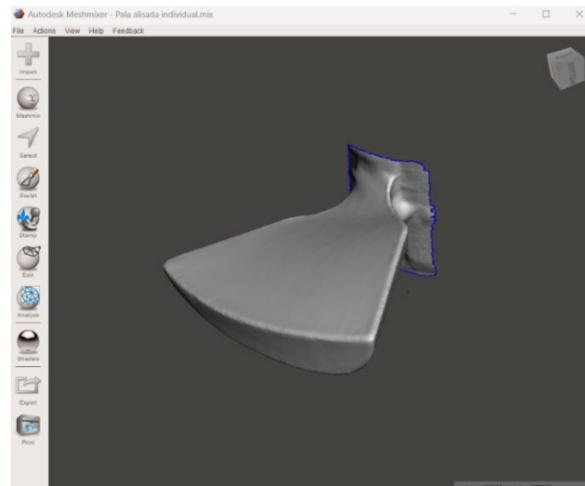


Ilustración 19. Pala separada de la hélice.

Para el diseño del eje de la hélice nos basaremos en las medidas requeridas por el equipo en el que se instalará la hélice.

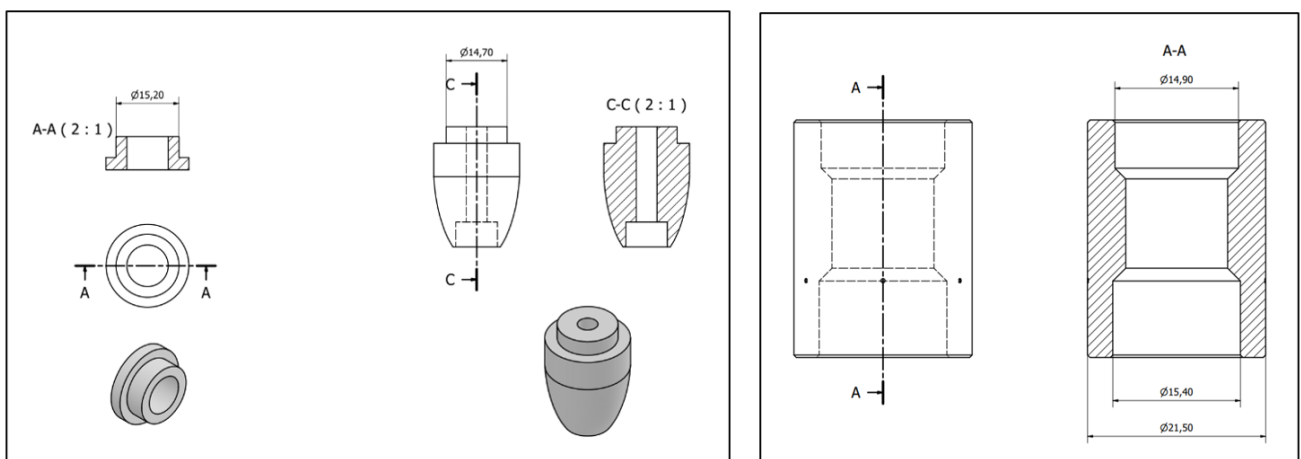


Ilustración 20. Requisitos del equipo (izquierda) y eje necesario para cumplir esos requisitos (derecha).

Una vez diseñado el eje, lo importaremos a Meshmixer. Para poder unir la malla del eje y de la hélice primero debemos de igualar el tamaño de los triángulos de ambas mallas, ya que, si una malla es bastante más grande que otra, en la unión entre ambas pueden surgir problemas de contornos abiertos o directamente que nos modifique una parte del modelo, deformándolo.

Para visualizar la malla en Meshmixer se utiliza la tecla W de nuestro ordenador y seguidamente se muestra la malla del modelo con el que se está trabajando.

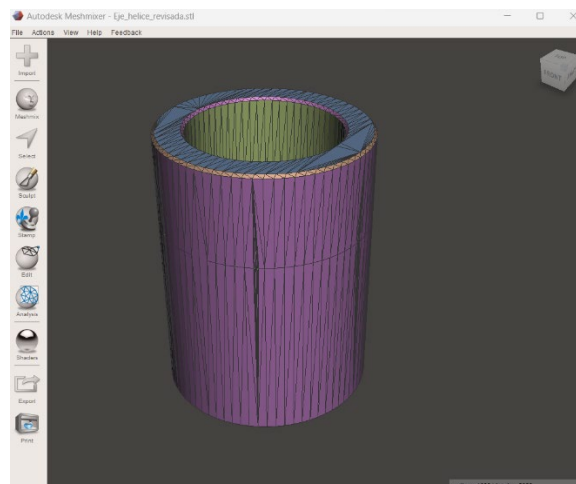


Ilustración 21. Malla del eje de la hélice.

Con la malla visible, el siguiente paso es remallar el eje ya que, como se puede ver en la *Ilustración 21*, los triángulos de la malla son demasiado grandes para realizar cualquier operación sin conseguir una deformación del modelo. Por tanto, se debe de aumentar el número de triángulos. Para ello seguiremos la misma metodología usada hasta ahora. Con el menú de *Select* abierto seleccionaremos todo el eje y seguido, dentro del menú de *Edit*, en la opción de *Remesh* o pulsando la tecla R, se activa el remallado del área seleccionada. Dentro de la pestaña de remallado se amplía la densidad, lo cual aumenta el número de triángulos. La operación se tendrá que repetir las veces necesarias hasta lograr el número necesario, ya que es posible que realizando el remallado una única vez no se obtenga el resultado deseado.

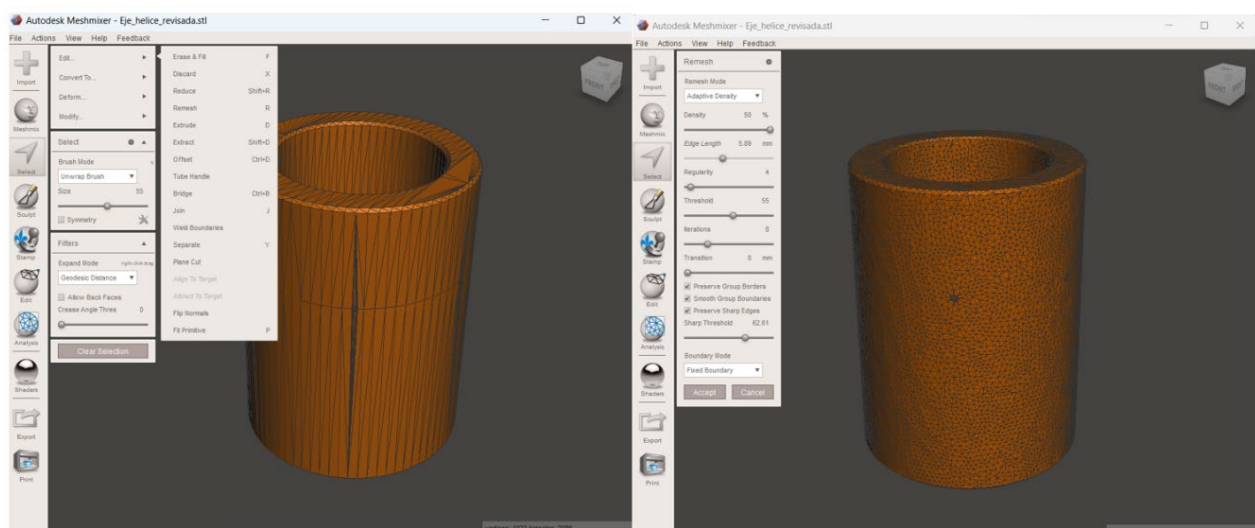


Ilustración 22. Función de remallado.

Una vez remallado el eje, importamos la pala de la hélice y la situamos en la lateral utilizando la función de *Transform*, que se encuentra en el menú principal de *Edit* y con las flechas se va desplazando hasta situarlo en el lateral (no confundir con *Edit* del menú de *Select*, observar *Ilustración 23*).

Cuando la pala esté situada en el lateral del eje (*Ilustración 15*), antes de unir ambas mallas se deben duplicar las palas de tal modo que quede el eje y 6 palas en sus laterales, siendo cada modelo todavía independiente unas de otras, como se puede ver en el *Object Browser*, pestaña en la parte inferior derecha de la interfaz. Para ello antes de duplicar la pala debemos de establecer un punto central desde el cual, después de duplicar las palas, podamos rotarlas 60° de forma exacta.

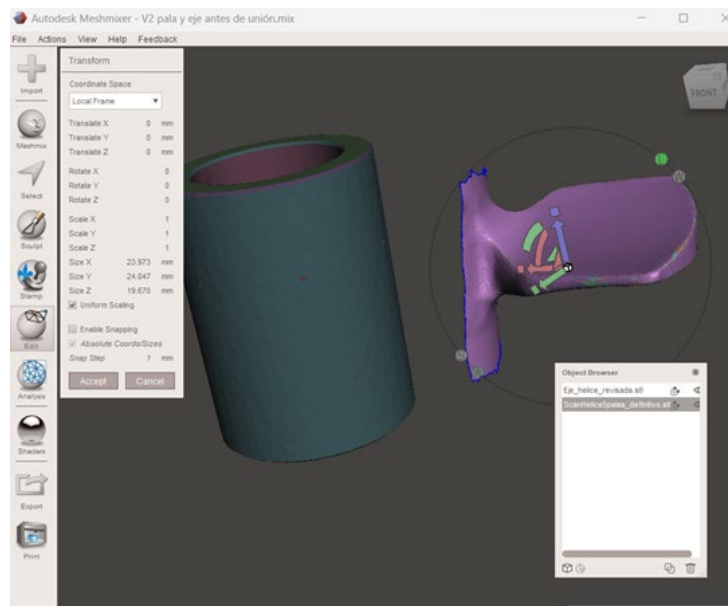


Ilustración 23 Función *Transform* del menú *Edit* situado a la izquierda, no confundir con en que se encuentra dentro del menú de *Select*.

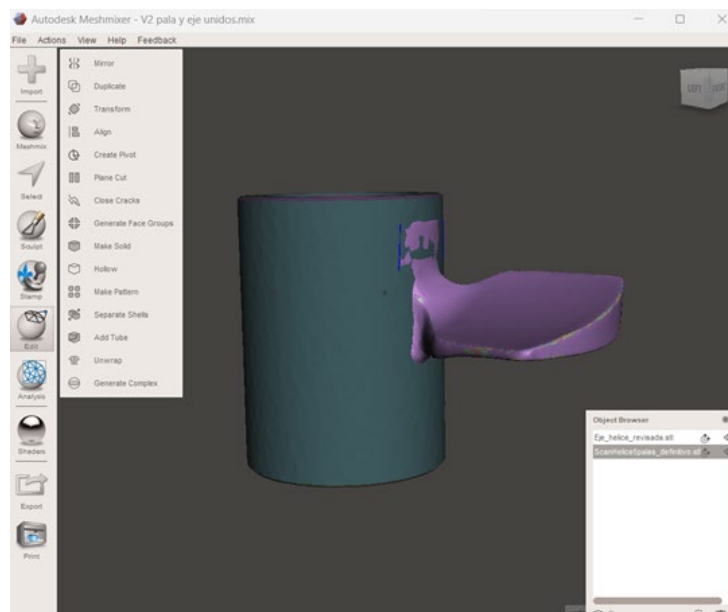


Ilustración 24. Pala situada en el lateral de eje sin unir, siendo dos modelos diferentes. Abajo a la derecha se encuentra el *Object Browser* que nos indica los modelos independientes con los que se está trabajando dentro del programa.

De los dos objetos que tenemos ahora mismo en el Meshmixer, se selecciona el eje y a continuación nos dirigimos al menú de *Edit* mencionado anteriormente y seleccionamos la opción de *Create Pivot*. El programa nos abrirá una pestaña y donde nos indica *Placement Mode* debemos marcar la opción de *Local Frame* para que a la hora de colocar el pivote nos lo coloque en el centro del modelo. Por último, pinchamos dos veces sobre el eje y aceptamos en *Done* (Ilustración 25).

Para duplicar la pala, pinchando en ella, volvemos al menú de *Edit* y seleccionamos la opción *Duplicate* y aceptamos. A continuación, seleccionamos *Transform* y esta vez primero seleccionamos el pivote creado anteriormente. Esto desplazará el eje de coordenadas del desplazamiento desde el centro de la pala al punto central de referencia del eje (Ilustración 26). Luego, dentro de la pestaña de *Transform* vamos a *Rotate Y* e introducimos 60 (Ilustración 27), que será el ángulo de desplazamiento de la pala duplicada y aceptamos. Vamos repitiendo el proceso de duplicado y rotación a partir de esta última pala hasta completar las palas de la hélice.

Cada pala es un modelo independiente de los demás por lo que para poder trabajar con todas las palas duplicadas a la misma vez de forma más sencilla utilizaremos la función de *Combine*. Esta función junta modelos independientes que tengamos en Meshmixer en un único modelo, aunque no los une definitivamente, pudiendo separarlos en cualquier momento utilizando la opción de *Separate*. Por lo tanto, en la pestaña de *Object Browser* seleccionamos todas las palas y pinchamos en *Combine* (Ilustración 28).

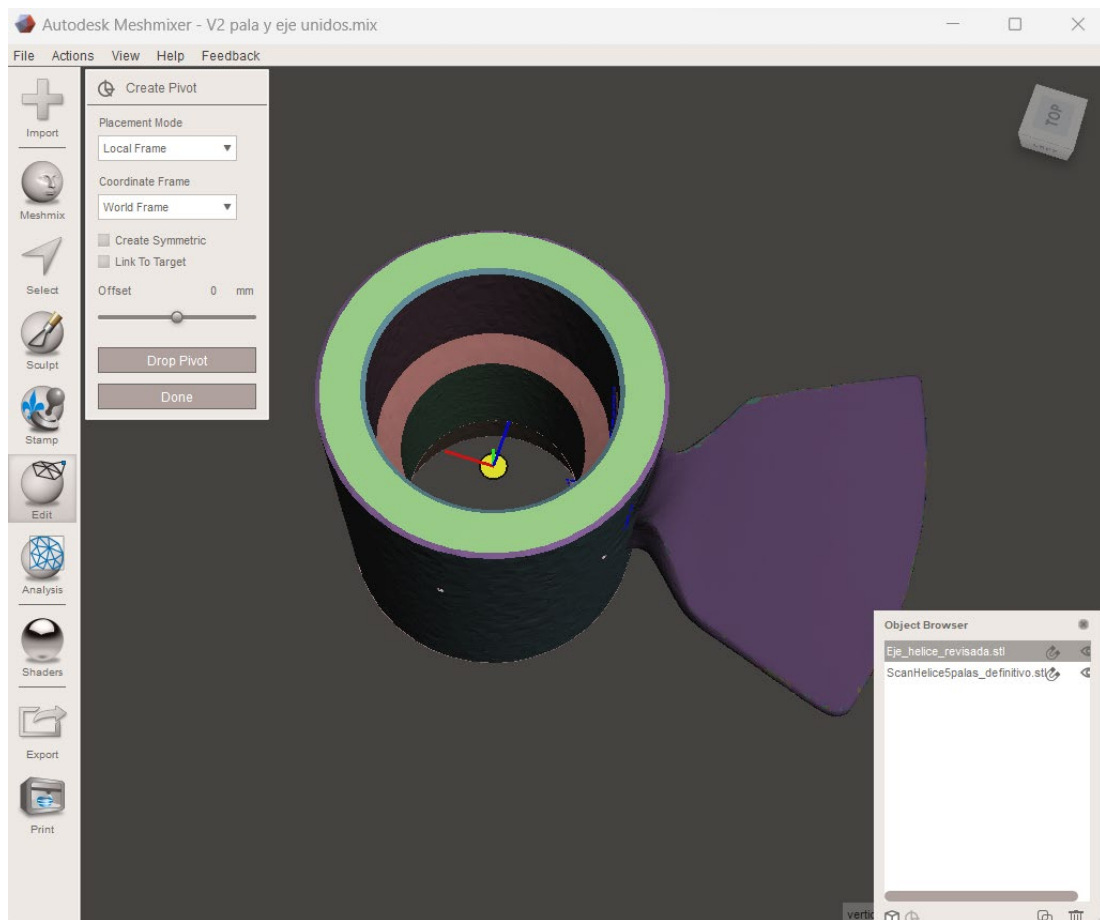


Ilustración 25. Creación de un pivote o punto de apoyo para futuras operaciones.

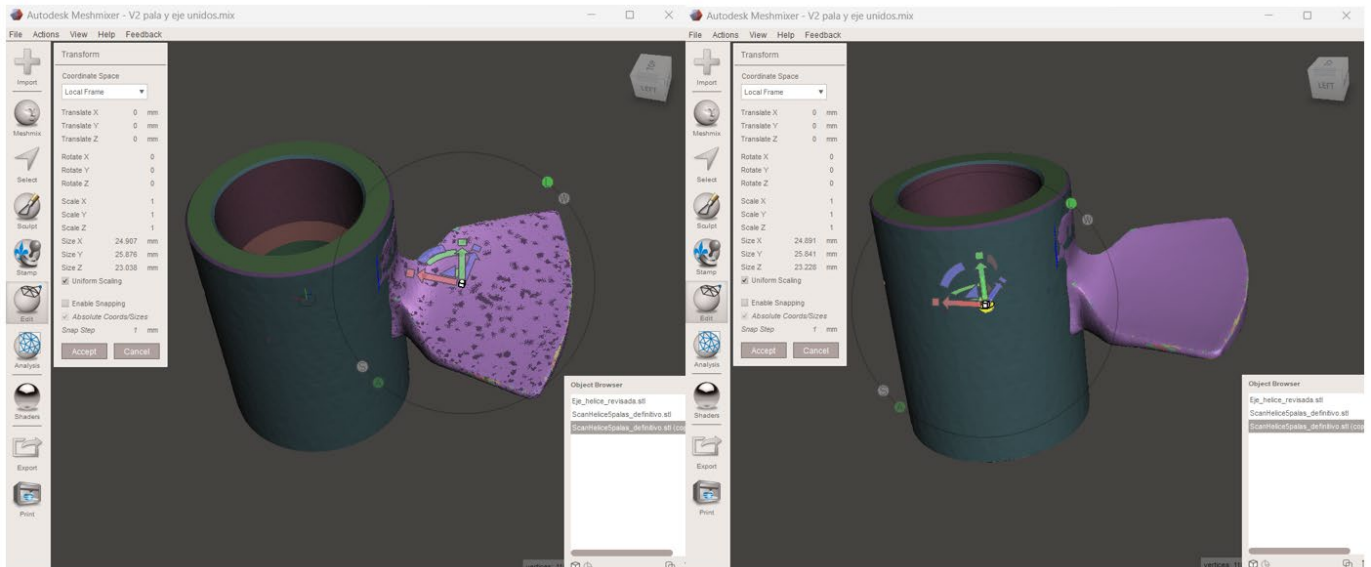


Ilustración 26. Cambio del origen de coordenadas del desplazamiento de la pala desde el origen de la pala al creado en el centro del eje.

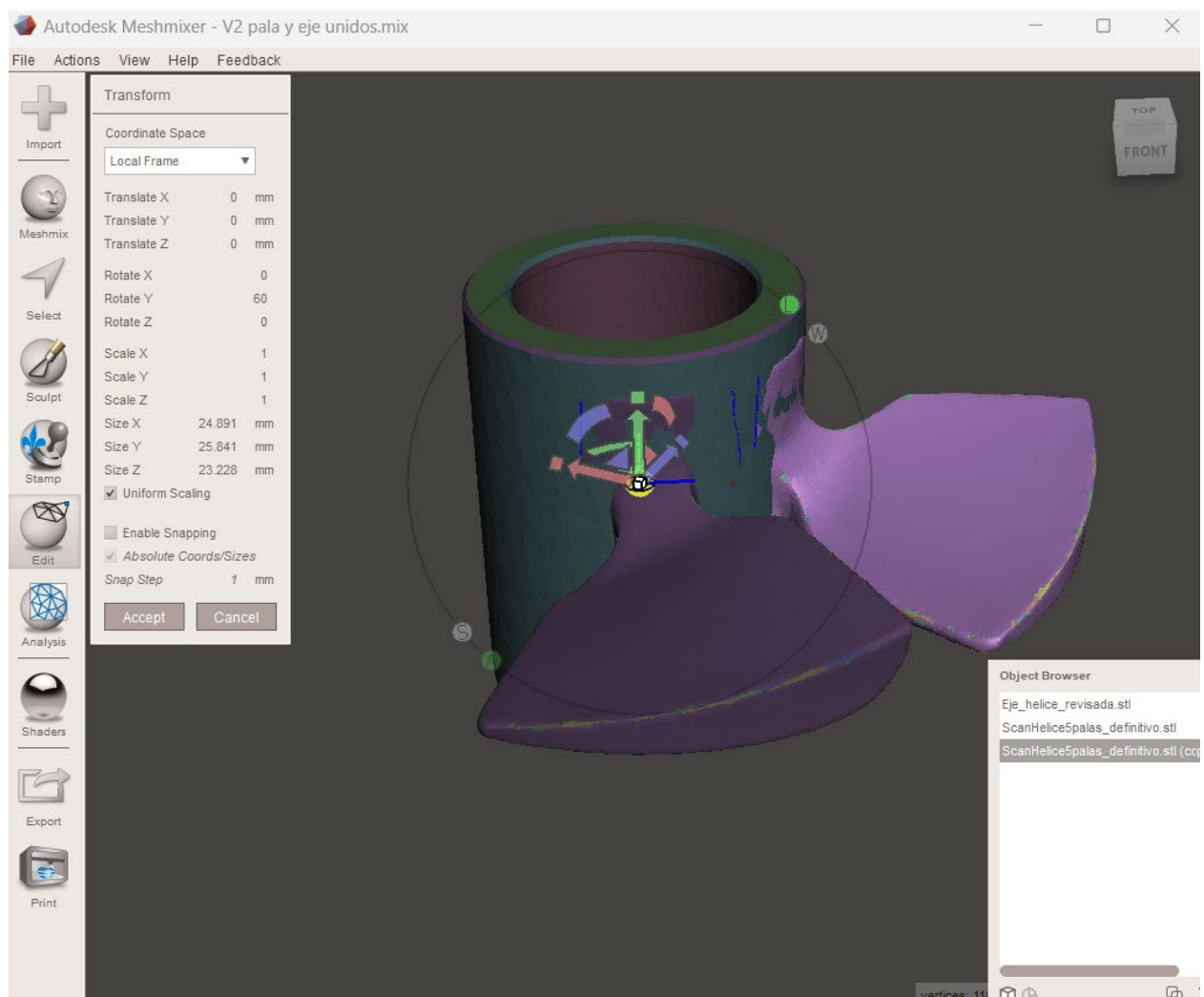


Ilustración 27. Rotación de 60° de la pala desde el punto central del eje.

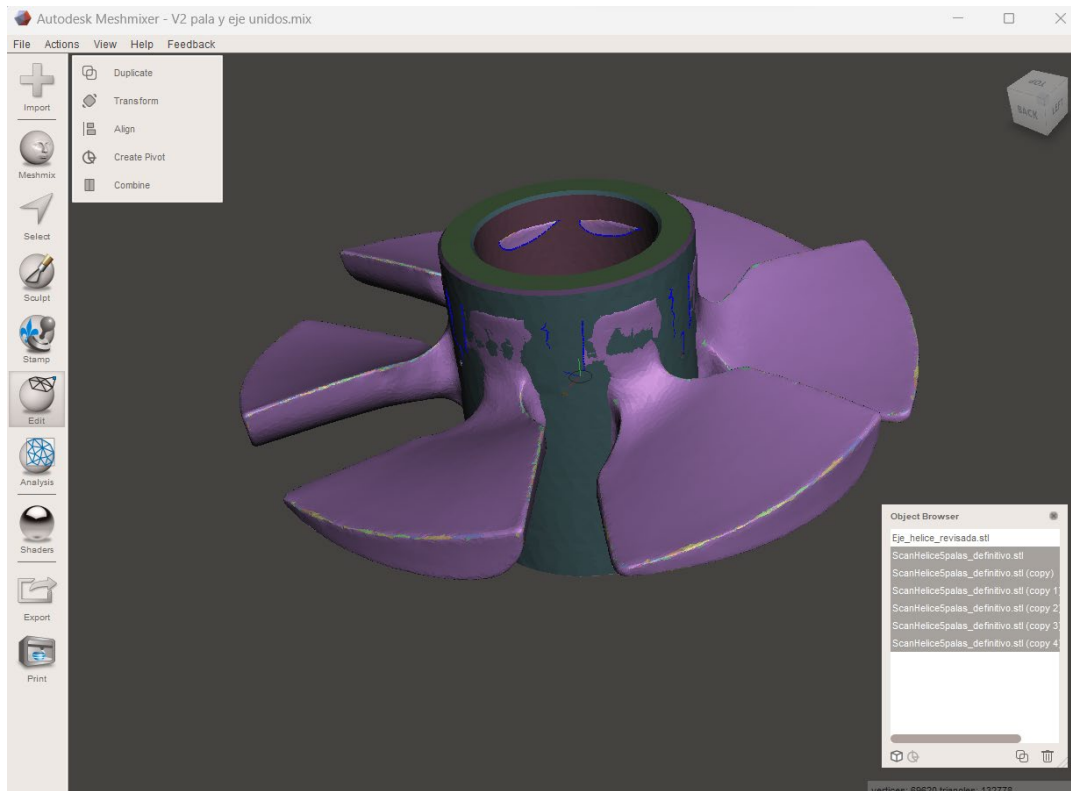


Ilustración 28. Función de *Combine* seleccionando previamente las palas duplicadas.

La función de *Combine* no permite unir de forma definitiva las mallas del eje y de las palas. Para lograr esto recurriremos a la opción de *Boolean Union*, con la cual se realiza la unión booleana de ambos modelos en uno solo con una única malla. Para poder realizar la función de *Boolean Union* se seleccionan previamente ambos modelos independientes (*Ilustración 29*).

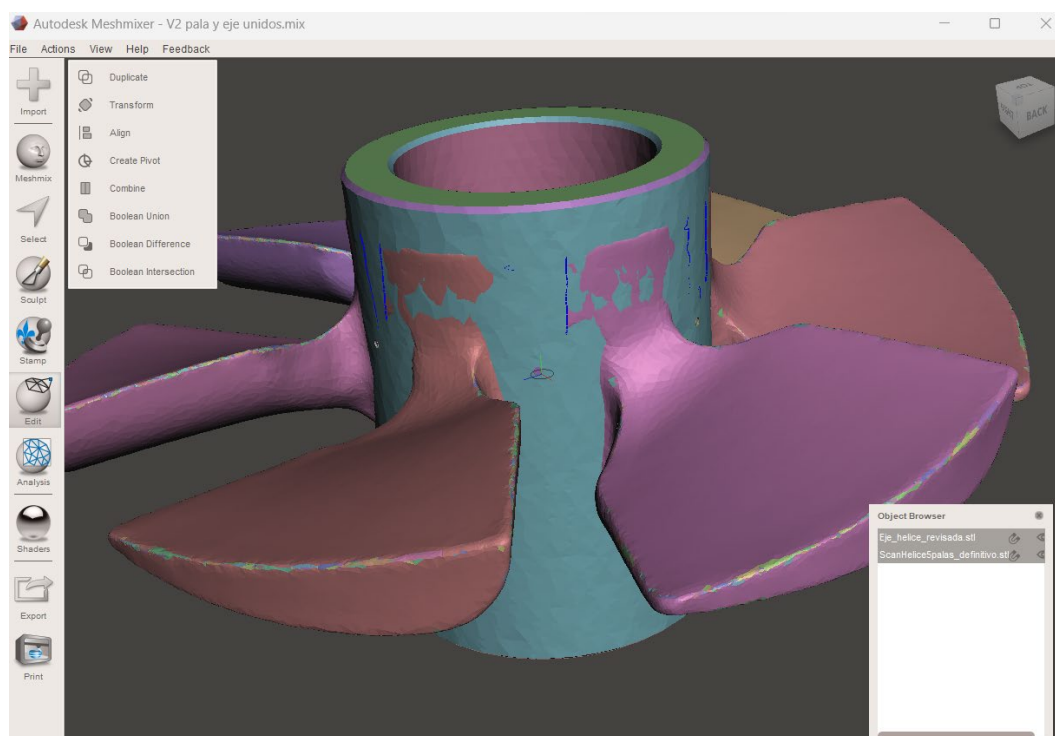


Ilustración 29. Función de *Boolean Union*.

Puede ser que ocurra que al utilizar *Boolean Union* y el programa cargue y procese la operación, el modelo se deforme y marque en color rojo. Esto quiere decir que las mallas, debido a los contornos o la alineación de ambos modelos, no pueden unirse correctamente y producen un error.

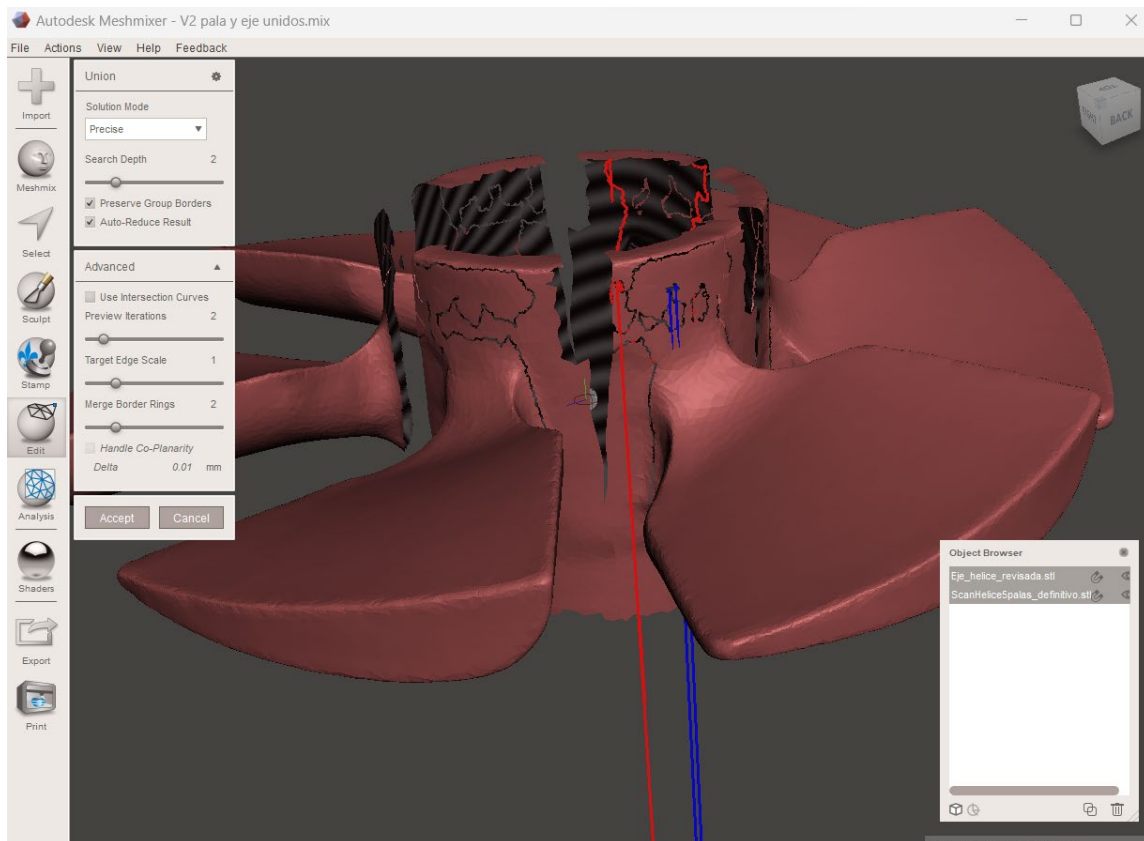


Ilustración 30. Error en la operación booleana.

Para solucionar el error, una de las opciones que se pueden utilizar es realizar una extrusión negativa en los bordes de las palas de tal forma que los contornos, marcados en azul, queden dentro de la pared del eje y a la hora de realizar la unión booleana el error anterior desaparecerá.

Nos dirigimos al menú de *Select* y marcamos los bordes de cada pala con doble clic sobre los triángulos de la malla situados en el contorno azul. Esto producirá que se marque todo el contorno (*Ilustración 31*). Una vez marcado y dentro de la opción de *Edit* y se selecciona *Extrude*. Dentro del menú de *Extrude* se realiza un offset negativo (*Ilustración 32*).

Sin embargo, solo con esto no desaparece el error, ya que al realizar la extrusión los contornos se han colocado en el interior de la pared del eje, pero se han creado unos nuevos vértices que puede seguir generando el mismo problema. Para ello, en las opciones de la izquierda del programa seleccionamos el menú de *Sculpt* a continuación desplegamos la pestaña de la función de *Brushes* y marcamos la opción de *RobustSmooth* (*Ilustración 33*). Con esta función se suavizan los nuevos bordes y vértices que surgen después de la extrusión y así se consigue eliminar el error de la unión booleana.

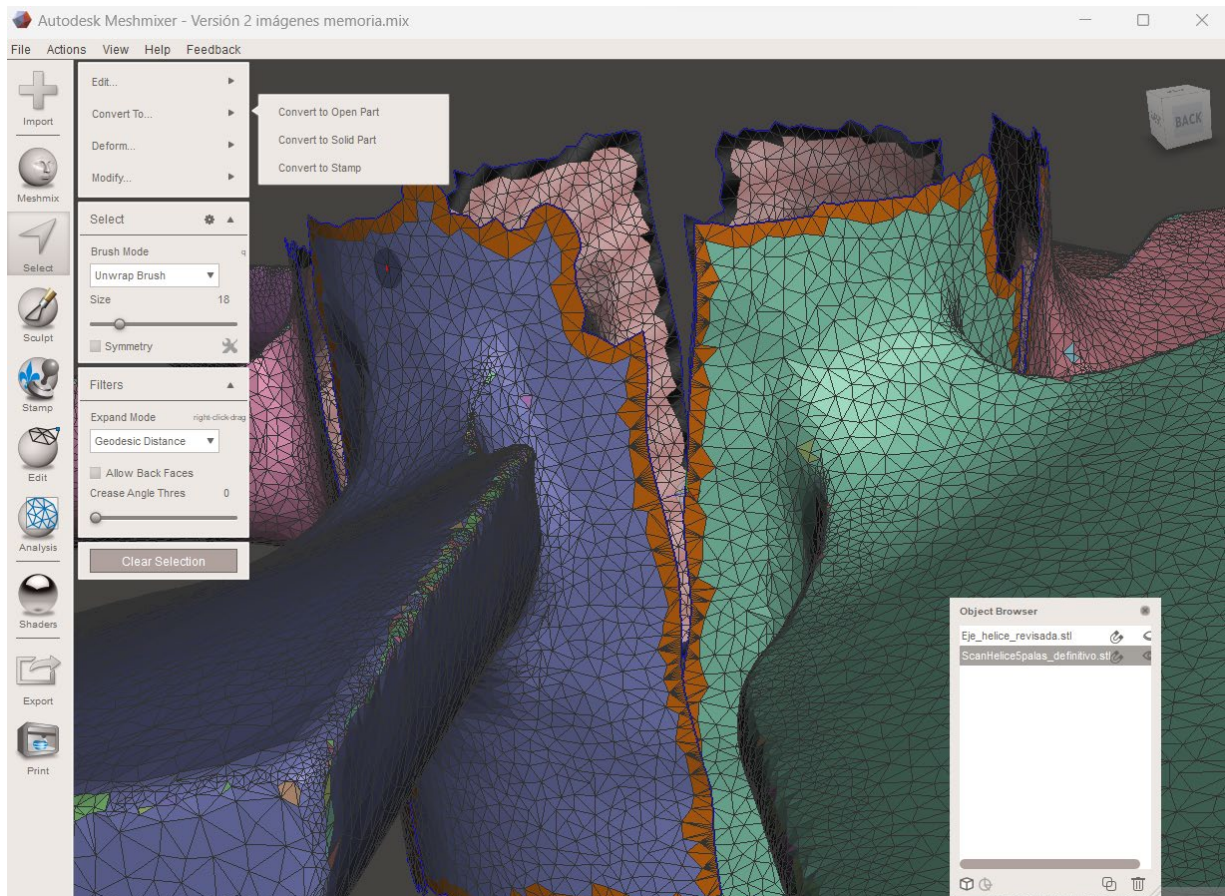


Ilustración 31. Al hacer doble clic sobre algún triángulo del contorno (línea azul), se marcarán todos los triángulos que se encuentren a lo largo del mismo.

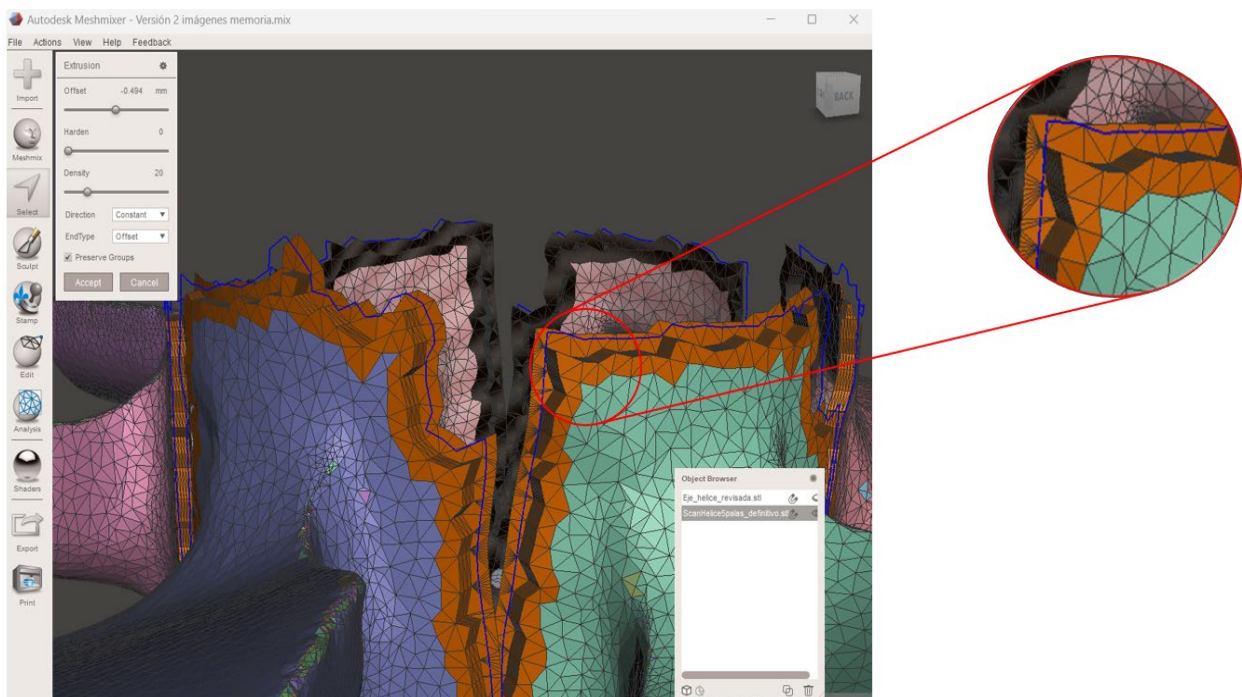


Ilustración 32. Función de *Extrude*. Esta función crea nuevos bordes y vértices que puede provocar que el error no desaparezca.

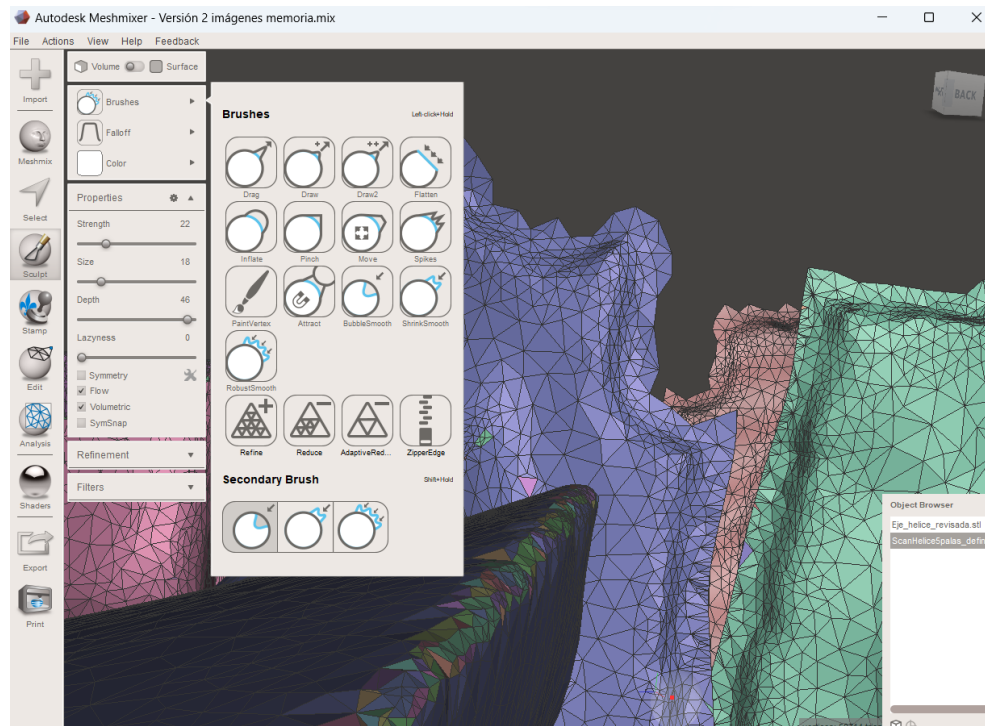


Ilustración 33. Suavizado de los bordes mediante la función de *Brushes* en el menú de *Sculpt*.

Una vez todos los contornos de las palas han sido suavizados vuelve a realizar la unión booleana entre las mallas del eje y la palas. En esta ocasión se observa que desaparece el error y en su lugar el eje y las palas se muestran de colores diferentes. Esto indica que la operación se ha realizado correctamente.

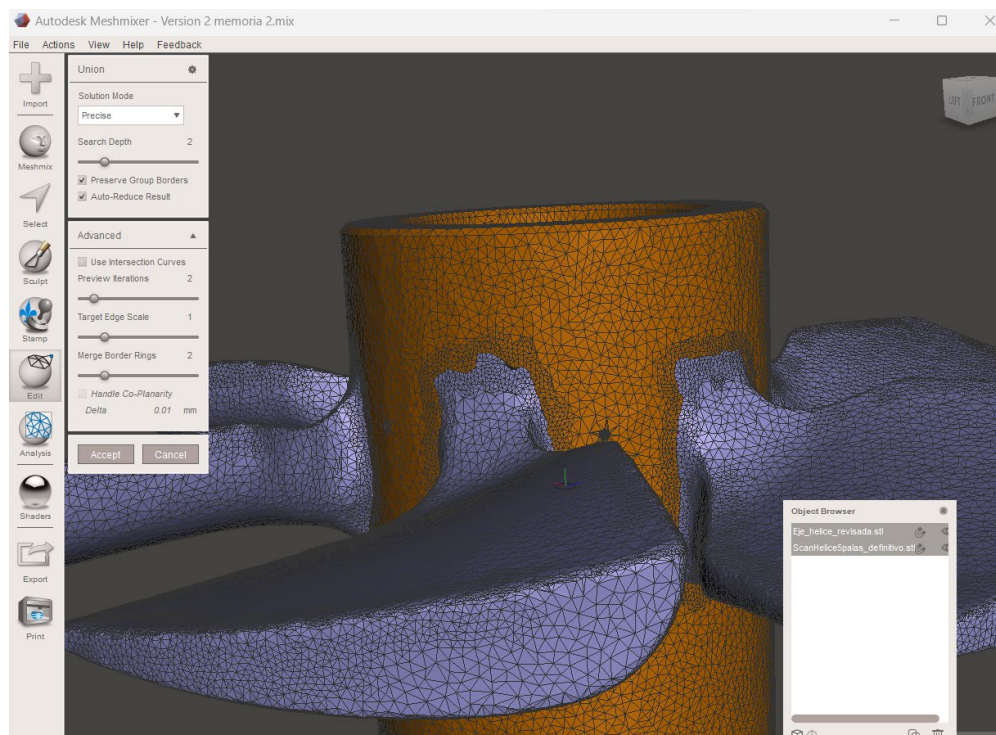


Ilustración 34. Unión Booleana realizada correctamente.

Aunque la operación booleana se realice correctamente, hay que revisar las zonas de unión entre ambas mallas ya que puede ocurrir que la unión haya sido un éxito, pero se queden pequeñas deformaciones en determinados puntos que hay que reparar. Realizando la misma metodología para el alisado y suavizado que se usó para reparar la pala inicial, se revisa cada una de las pequeñas deformaciones que puedan surgir.

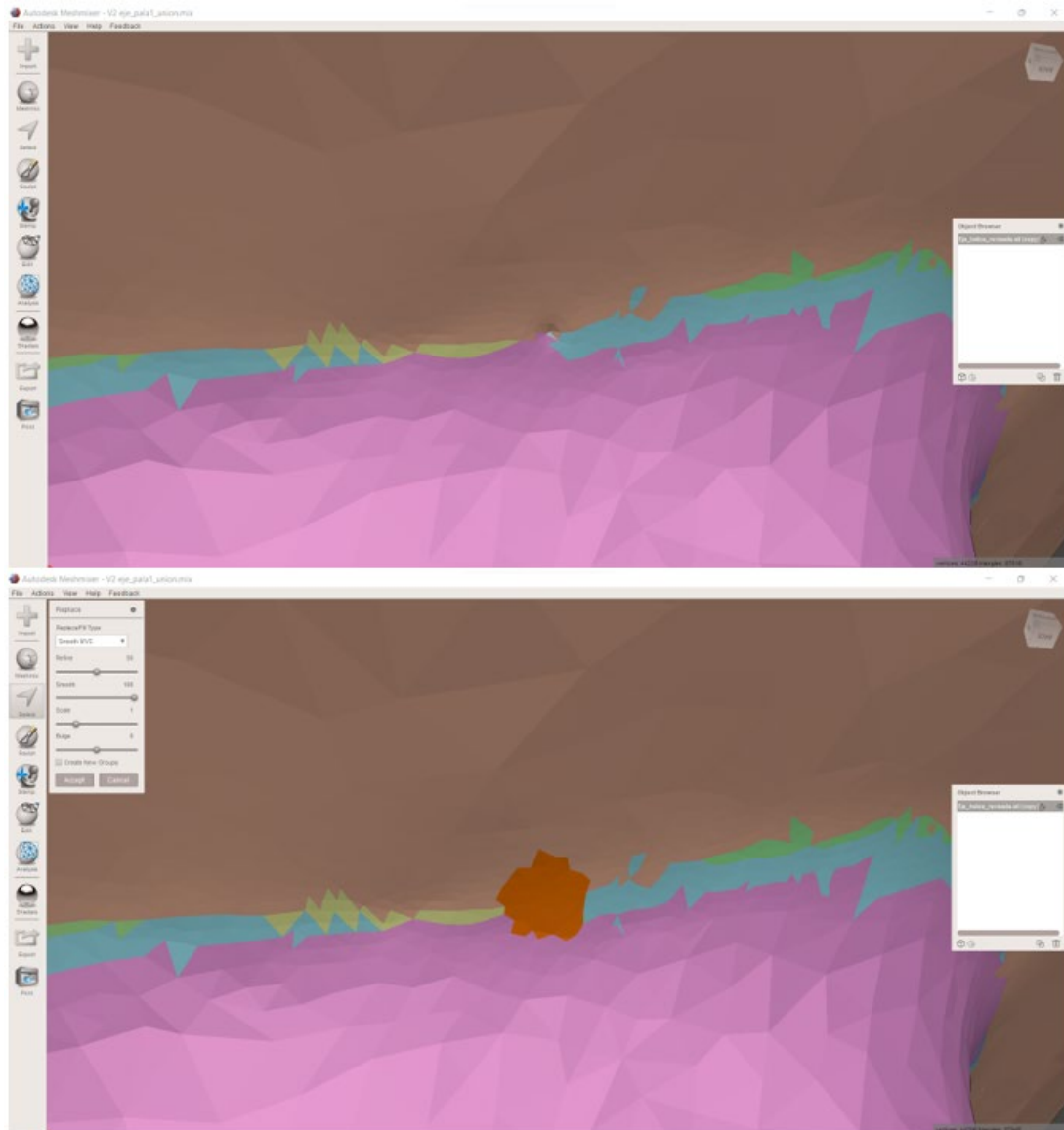


Ilustración 35. Reparación de las pequeñas deformaciones que puedan surgir tras la operación booleana.

Una vez revisadas todas las uniones en la malla del eje y las palas realizamos un suavizado general de la hélice, como se hizo para la pala individual, con la función de *Smooth*.

Con esto, la reparación de la hélice estará completamente terminada y se podrá usar como modelo para la realización del molde de inyección.

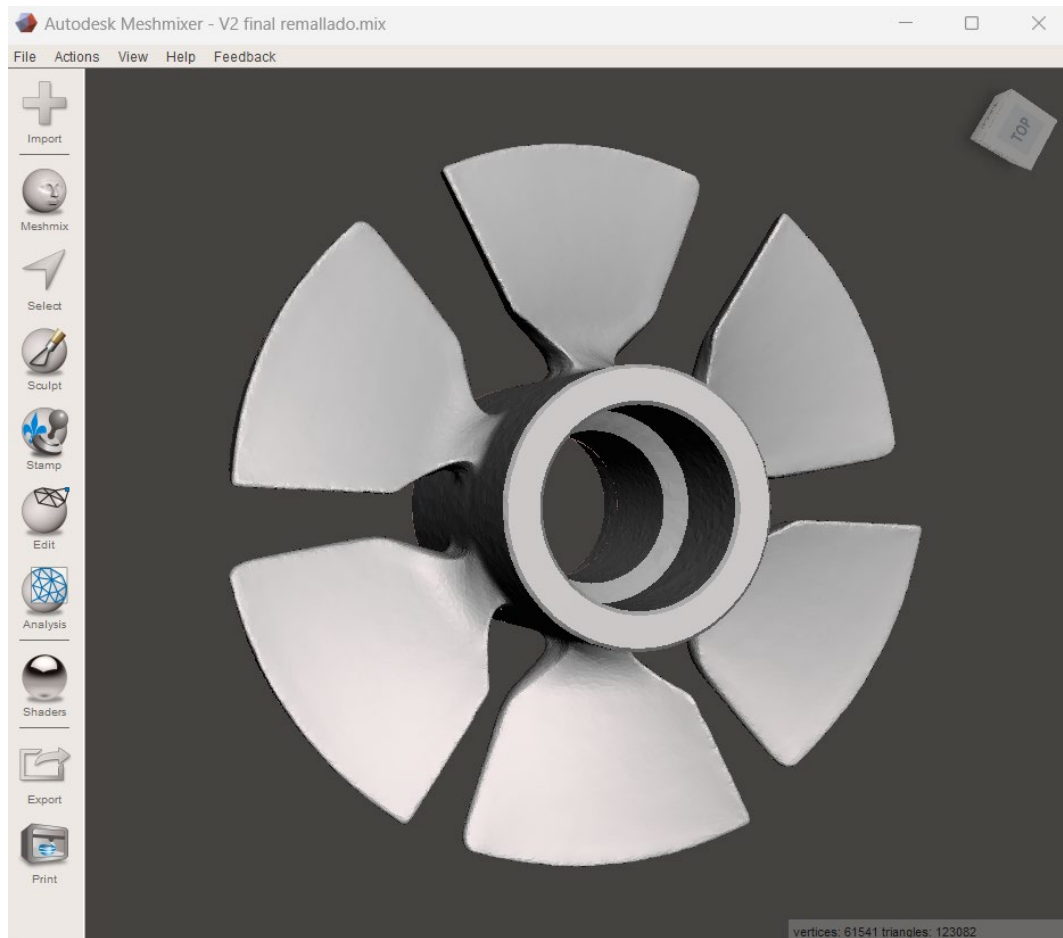


Ilustración 36. Hélice completamente reparada.

2.2. Creación del molde

Para el diseño del molde impreso en 3D se siguen las reglas para la creación de moldes, a las que hay que añadir una comprobación de las desviaciones dimensionales que puedan surgir debido al proceso de impresión. Entre las operaciones a tener en cuenta para diseñar el molde estarán ampliar el punto de inyección para reducir la presión en la cavidad, incluir ventilaciones de 0,05 mm de profundidad, intentar que uno de los laterales lleve el diseño mientras el otro sea lo más plano posible, evitar secciones transversales estrechas o incorporar un ángulo de salida de 5° o 10° grados para facilitar su desmoldeo. Sin embargo, alguna de estas operaciones puede no ser posible debido a la compleja geometría de la hélice.

En este proceso se seguirá utilizando **Meshmixer** como principal programa de diseño con ciertas operaciones realizadas con ayuda de otros programas externos como Autodesk Inventor o la utilización de simulaciones mediante el programa de Autodesk Moldflow para optimizar la posición del modelo o el punto de inyección, así como comprobar atrapamientos de aire, un correcto flujo durante la inyección o la temperatura a lo largo del molde entre otros.

Se toma como guía las medidas máximas para moldes indicadas en el *manual de uso y mantenimiento del equipo de termoformado*, además de los moldes propios del centro de termoformado.

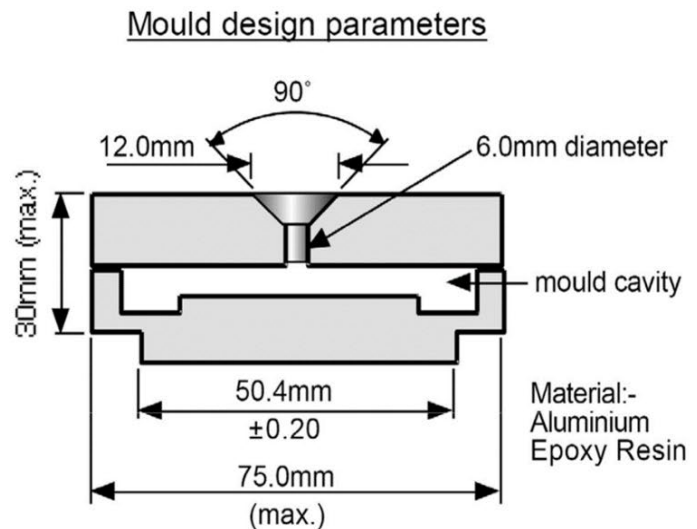
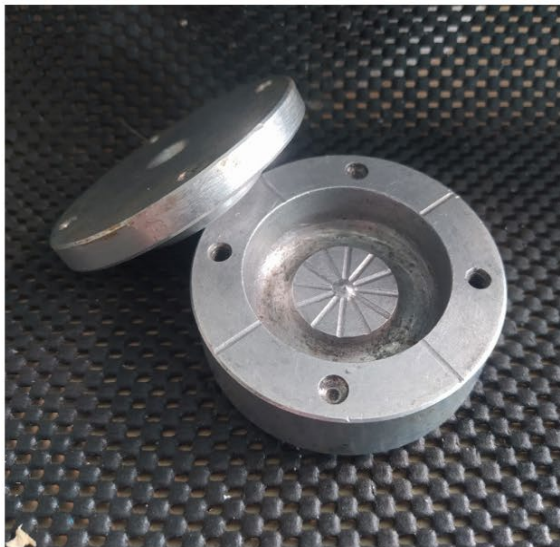


Ilustración 37. Molde metálico del centro de termoformado y medidas máximas para el diseño del molde de inyección.

Diseñaremos la geometría exterior del molde en el programa de diseño Autodesk Inventor y a continuación se importa a Meshmixer para poder usarla como base del molde.

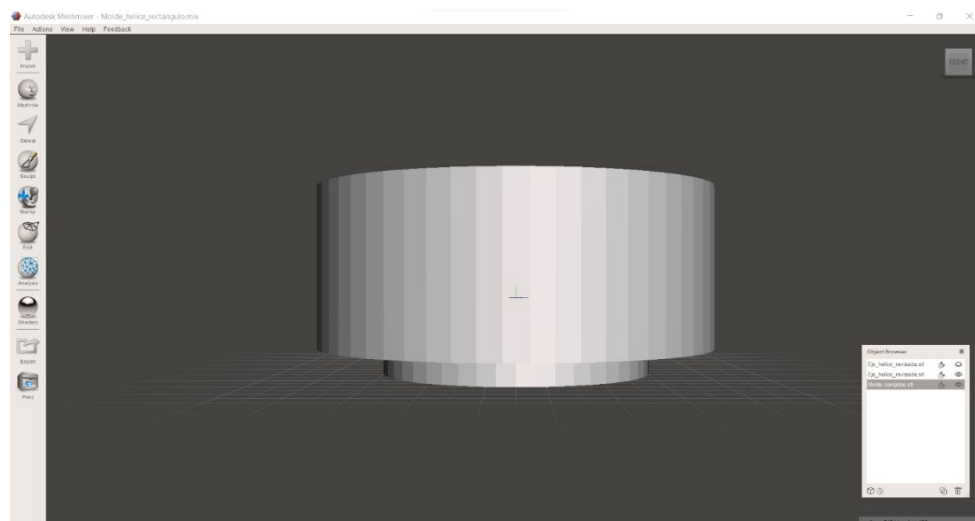


Ilustración 38. Molde previamente diseñado en Autodesk Inventor e importado a Meshmixer.

2.2.1. Diseño de la cavidad

Para poder situar el plano de partición del molde insertamos también la hélice y la colocamos en el centro (*Ilustración 39*). Observando la posición de las palas de la hélice determinamos la mejor zona para colocar el plano de partición y seguidamente se emplea la función de *Plane Cut* que se encuentra en el menú de *Edit*, manteniendo ambas partes seleccionando la opción de *Keep Both*. Esta opción permite mantener ambas partes después de realizar un corte en el modelo. Con el corte realizado, se separan ambas partes en modelos independientes utilizando la función de *Separate*.

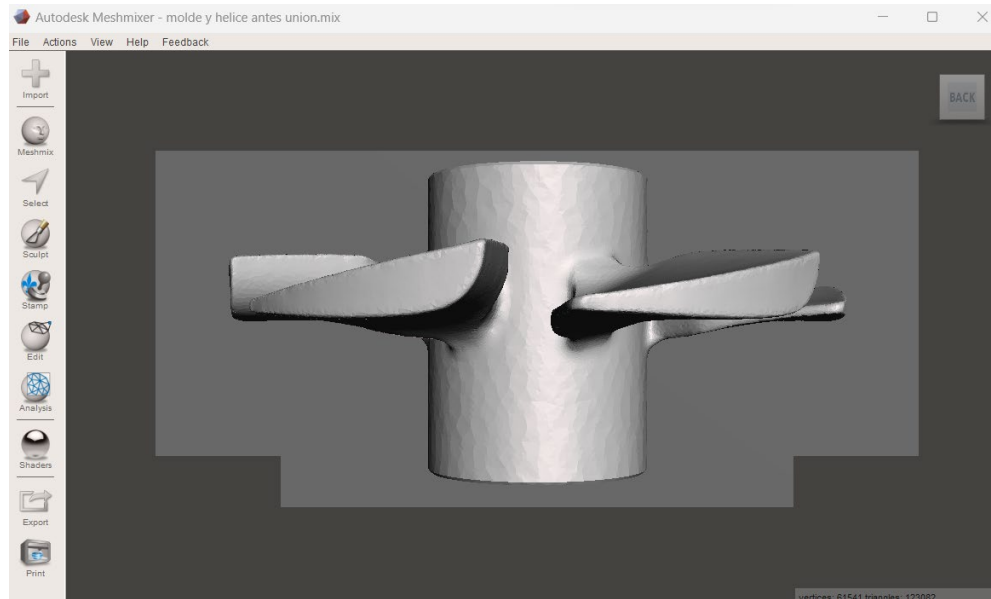


Ilustración 39. Colocación de la hélice dentro del molde.

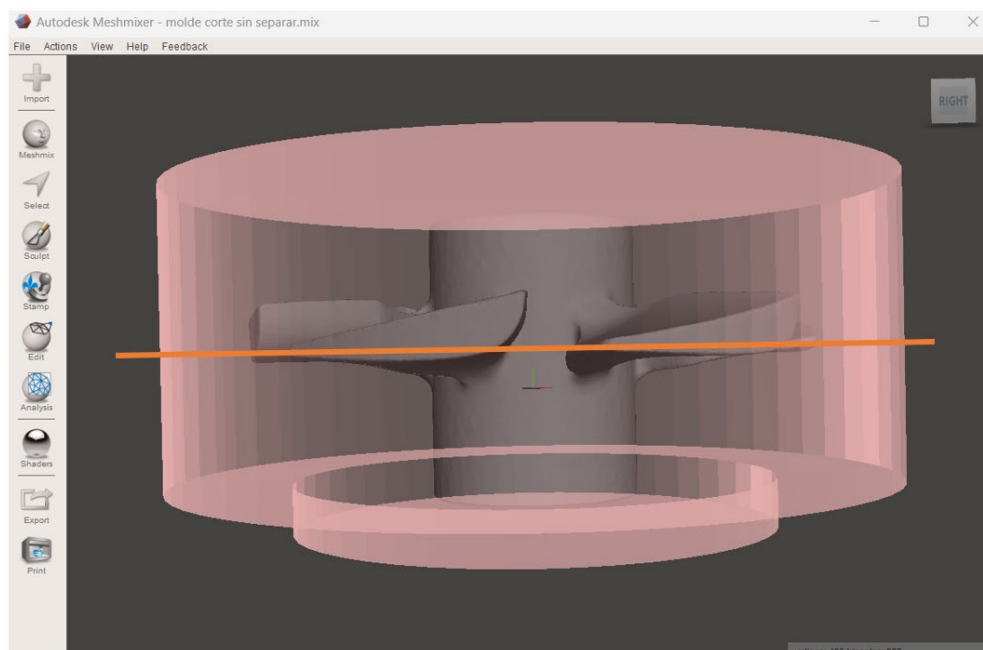


Ilustración 40. Plano de corte para la apertura del molde indicado mediante la línea naranja.

Una vez realizado el corte, se procede a realizar la cavidad en ambas partes del molde. Sin embargo, al no ser la hélice un objeto de espesor constante y geometría más compleja, el plano de partición de la cavidad del molde también será complejo, no como en el molde del centro de termoformado en la *Ilustración 37*.

Hay que tener en cuenta la separación entre las palas de la hélice y la altura de donde empieza una pala y donde termina la otra (*Ilustración 41*), y realizar un plano de corte que se adapte a esas geometrías.

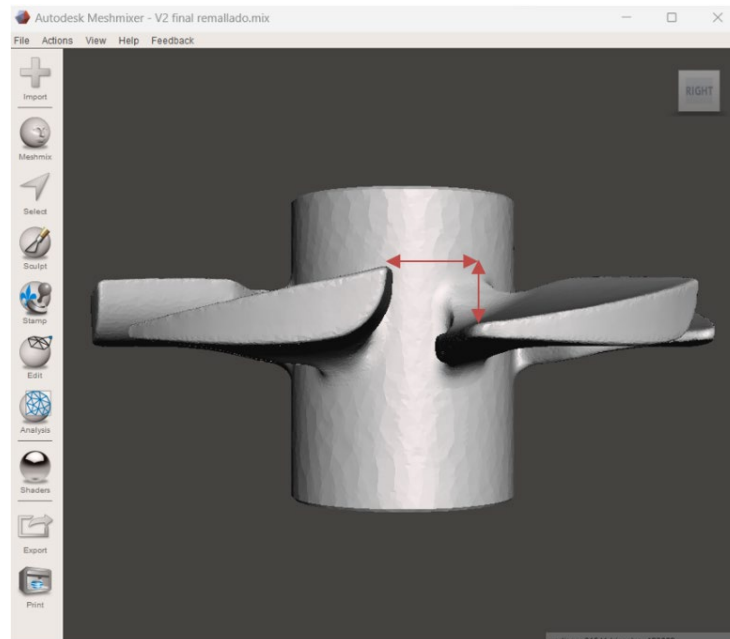


Ilustración 41. La altura entre pala y pala de hélice no es la misma que, junto a su geometría, genera un plano de corte complejo para el molde

Al realizar este tipo de plano de corte en el desnivel entre ambas palas, Meshmixer puede estar limitado para esta función directamente. Esto se debe a que, si utilizamos la función de *Plane Cut*, este nos generará un corte general para todo el objeto, no como ocurre en otros programas de diseño en los que mediante un boceto puedes trazar la zona por la que quieres que se corte del objeto. Solo permite desplazar y girar el plano en las tres direcciones de coordenadas y elegir cuál de las dos partes quieres mantener para poder seguir trabajando sobre ella. También incluye la opción de que al realizar la operación de corte podamos mantener ambas partes, pero de igual forma serían cortes rectos y planos generando únicamente objetos independientes que irán aumentando en número conforme más cortes se realicen.

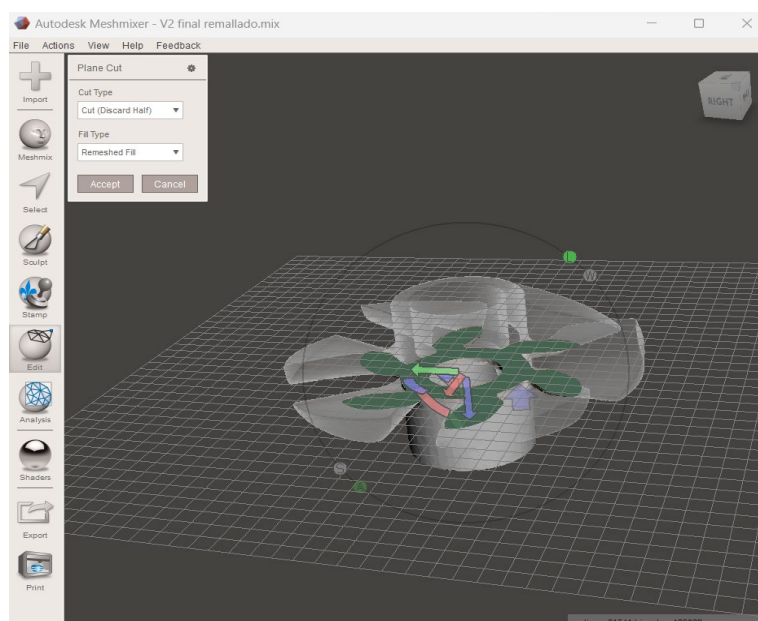


Ilustración 42. Plano de corte limitado a un corte recto, mostrado en la ilustración mediante la rejilla de cuadros generada.

Para solucionar esta limitación a la hora de diseñar el molde, una de las opciones a las que se puede recurrir es a generar de forma manual a partir de geometrías sencillas el desnivel entre palas tomando de referencia el propio modelo de la hélice.

El proceso de generación de la geometría necesaria será en el siguiente:

- Se inserta un rectángulo del menú de primitivas de Meshmixer y se sitúa junto a la hélice entre ambas palas.

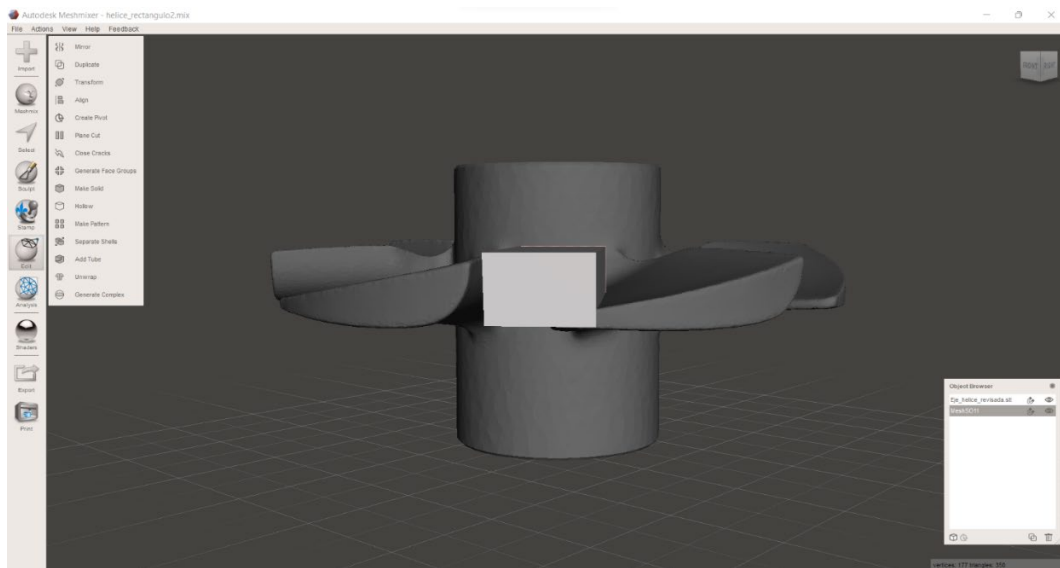


Ilustración 43. Insertamos un rectángulo como geometría base.

- Sobre el rectángulo se realiza un plano de corte, marcando previamente la opción de *Keep Both* para mantener ambas partes, y a continuación se utiliza la función de *Separate* ya que, aunque el corte está hecho, no nos ha separado de primeras ambas partes.

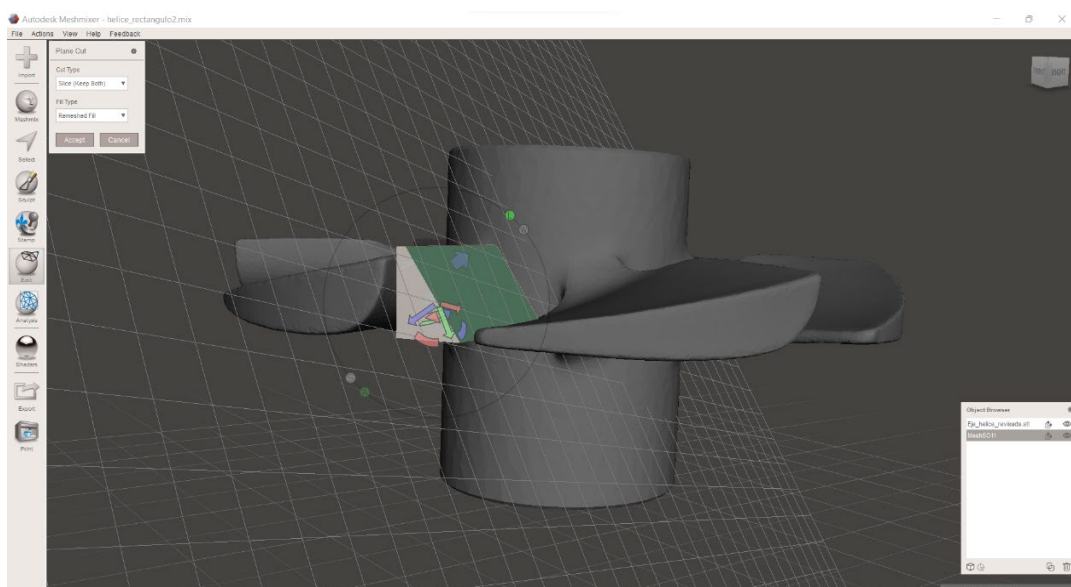


Ilustración 44. Plano de corte con la opción de *Keep Both*.

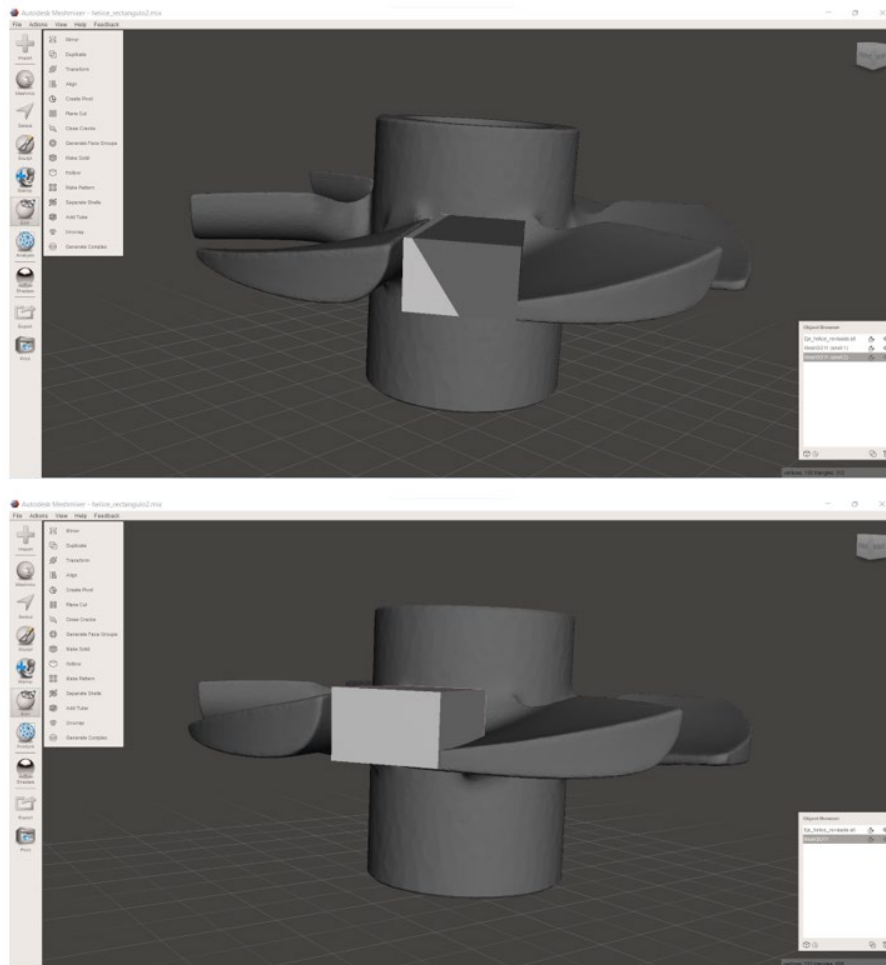


Ilustración 45. Al mantener las dos partes no se separan directamente por lo que con la opción de *Separate* convierten a ambas partes en independientes.

- Se siguen insertando geometrías y planos de corte conforme se vayan necesitando, manteniendo ambas partes durante cada corte. Si en algún caso una de las partes sí que se considera que no es necesaria se puede eliminar directamente.

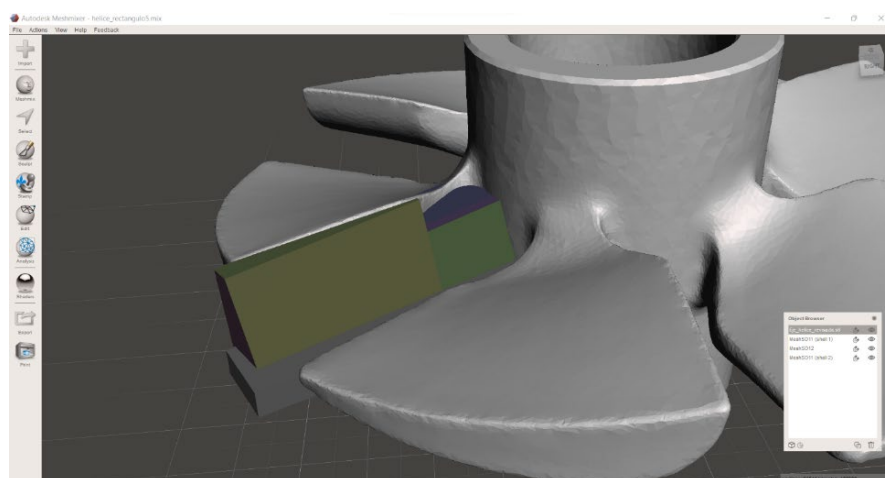


Ilustración 46. Realizando planos de corte e insertando geometrías se va generando el plano de corte del molde entre ambas palas.

- Se continúan repitiendo estas operaciones hasta lograr la geometría deseada. Hay que tener en cuenta que todavía no están unidas entre sí y son independientes unas de otras.

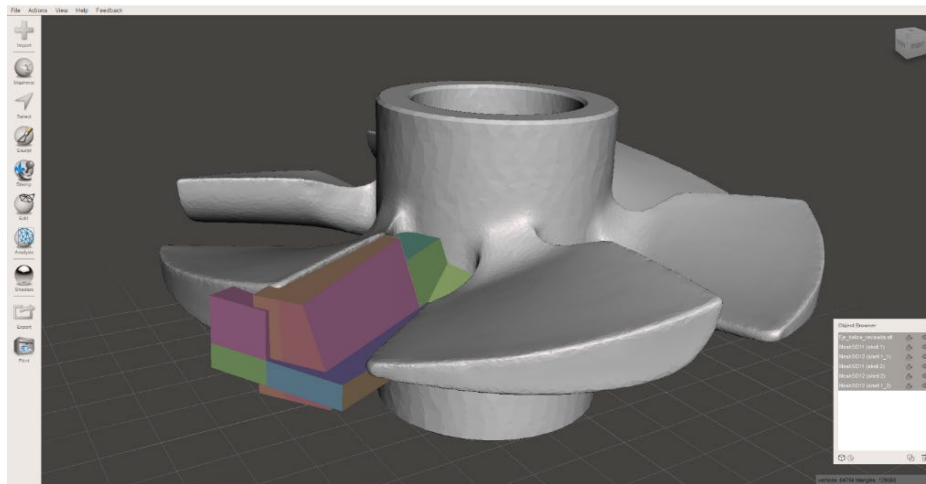


Ilustración 47. Geometría final.

- Para poder unir todas las geometrías independientes se deben remallar todas a un mismo tamaño de malla y realizarla unión booleana de todas ellas hasta volverla en un único modelo.

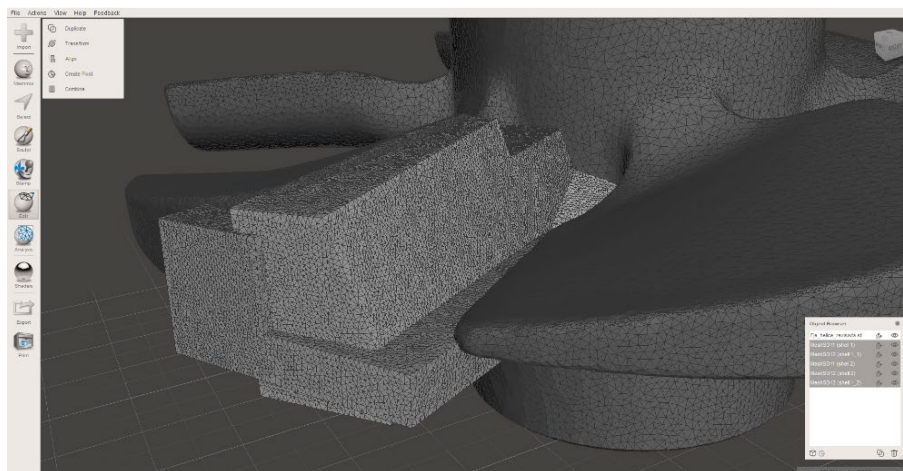


Ilustración 48. Remallado de las geometrías.

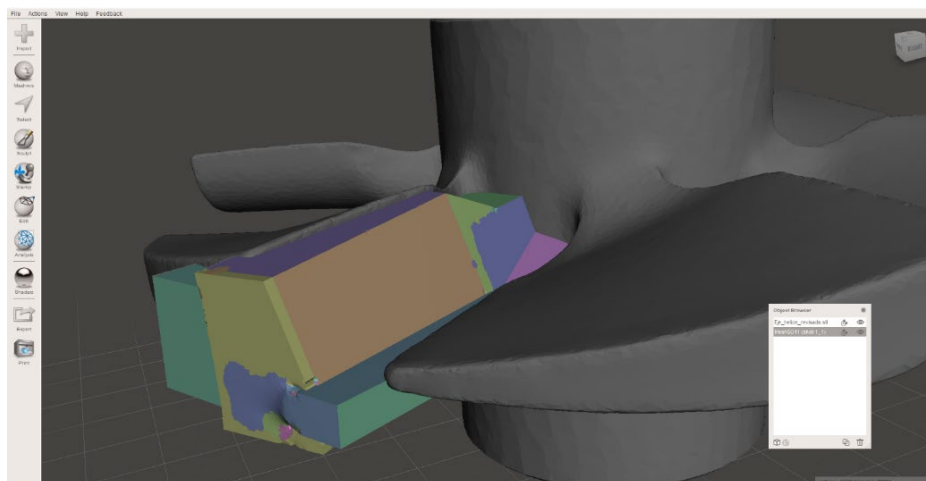


Ilustración 49. Resultado final de la geometría tras realizar las uniones booleanas.

- Para terminar, se aplica la función de *Smooth* para suavizar todas las aristas y vértices existentes y así prevenir posibles futuros problemas al general el plano de corte del molde.

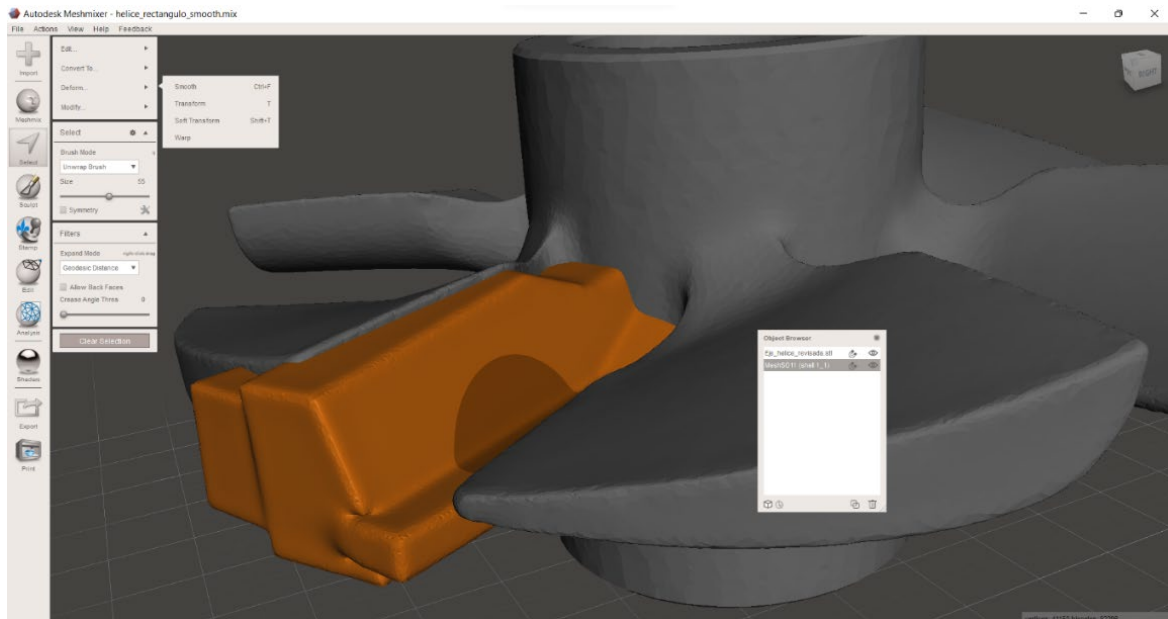


Ilustración 50. Suavizado de las aristas y vértices.

Una vez que la geometría de unión entre ambas palas esté creada, se pasa a duplicarla para cada una de las palas restantes, repitiendo el mismo proceso que empleado en la duplicación de las palas durante la reparación de la hélice. Primero se crea un pivote en el centro del eje, se duplica la geometría y, por último, tomando como referencia el pivote se rota la geometría entre las demás palas. Una vez duplicadas se utiliza la función de *Combine* y pasa a formar un único modelo.

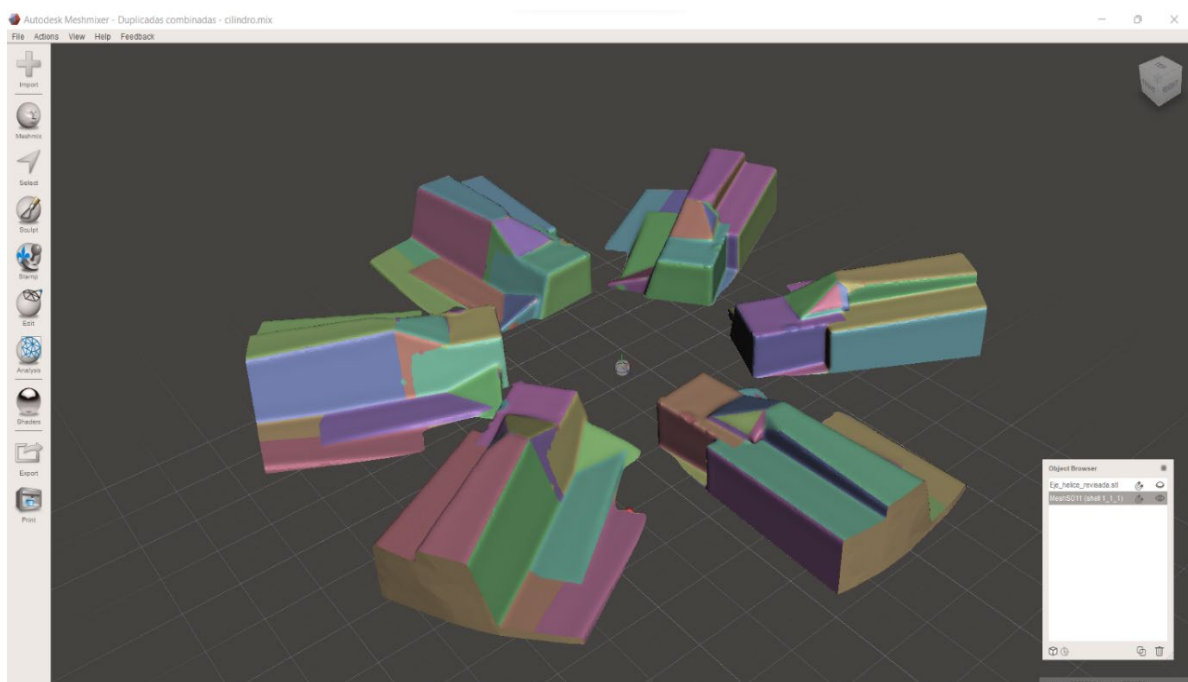


Ilustración 51. Geometrías combinadas a las que también se les ha retirado el exceso de material aplicando una diferencia booleana con el diámetro de la hélice.

Esta geometría será empleada para la parte inferior del molde ya que como se observó en el plano de partición del molde, este pasa por la parte inferior de la pala y por tanto será el lugar donde se colocará esta geometría para el desnivel.

Se inserta la parte inferior del molde separada y se posiciona la geometría sobre ella. Se remalla la superficie del molde y por último, se realiza la unión booleana de ambos modelos.

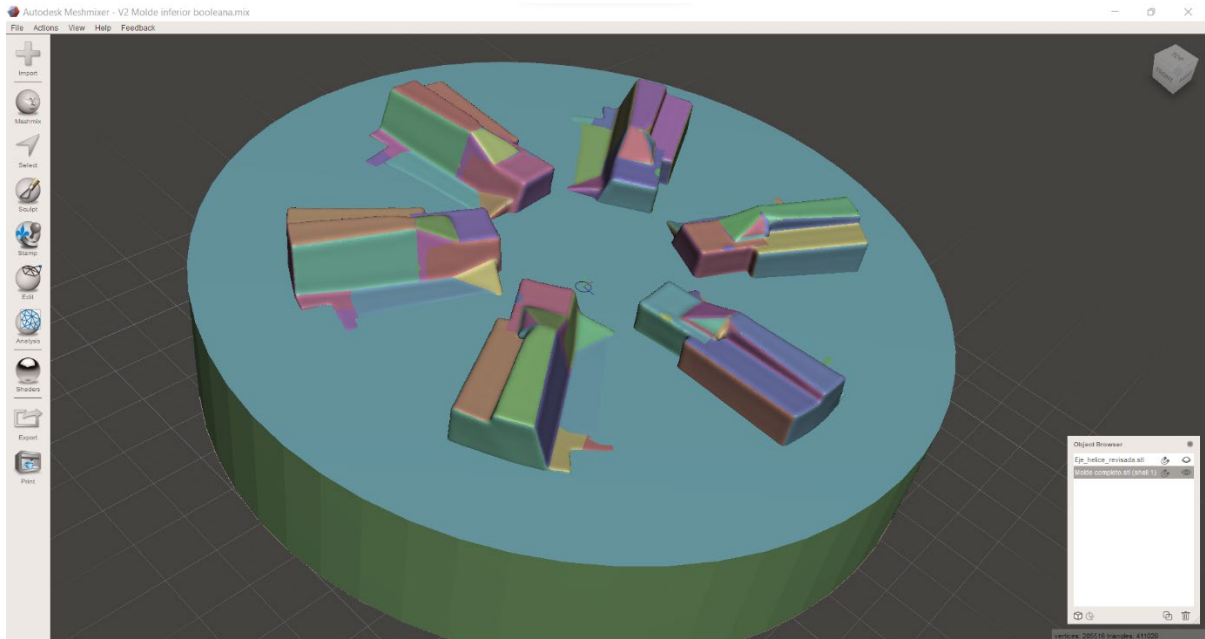


Ilustración 52. Unión booleana de la parte inferior del molde con el desnivel entre pala de la hélice.

Para finalizar con la parte inferior del molde, se inserta la hélice y se realiza la diferencia booleana de ambos modelos, obteniendo finalmente la forma definitiva de la parte inferior.

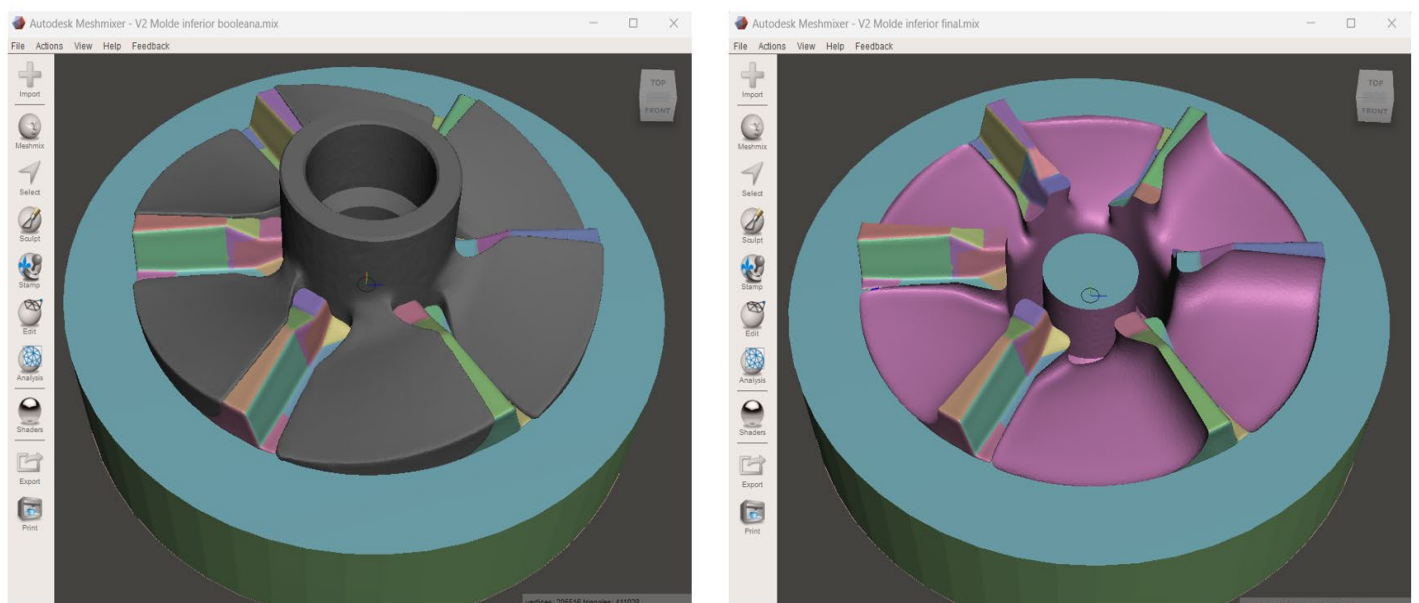


Ilustración 53. Diferencia booleana entre el molde y la hélice, y resultado final.

Realizada la parte inferior del molde, se pasa a trabajar con la superior. En esta ocasión en lugar de realizar una diferencia booleana entre la geometría del desnivel y la hélice, lo que se realiza es la unión para que nos quede un solo modelo con el cual de forma sencilla y mediante una única operación obtendremos la parte superior.

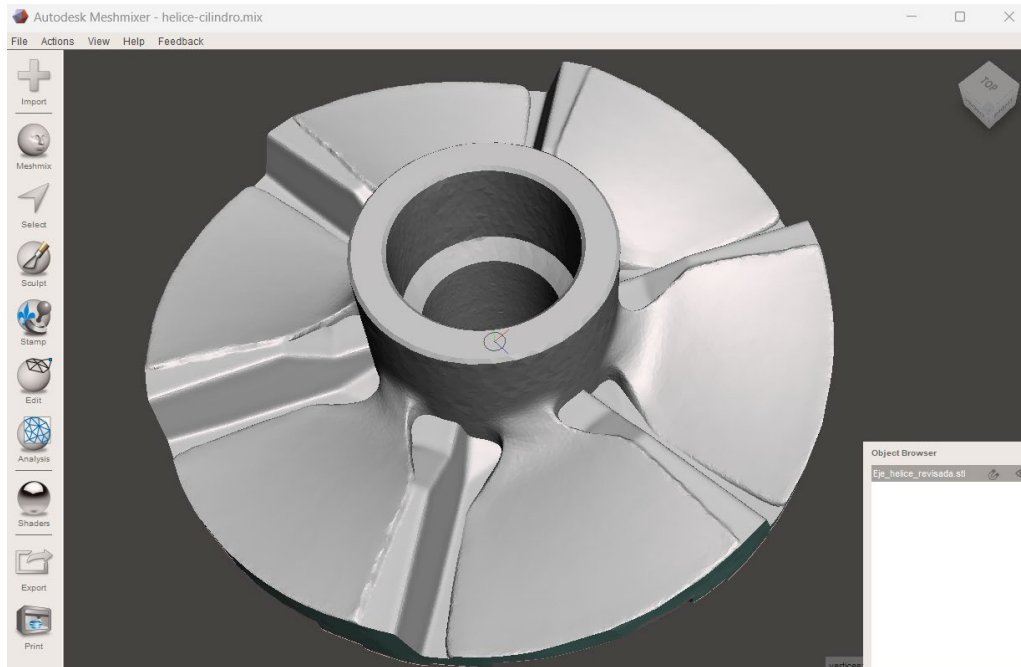


Ilustración 54. Unión booleana de la geometría del desnivel y la hélice.

A continuación, se coloca junto a la parte superior del molde que anteriormente se fue separada y, ahora sí, se realiza la diferencia booleana entre ambos modelos, quedando la forma final de la parte superior del molde.

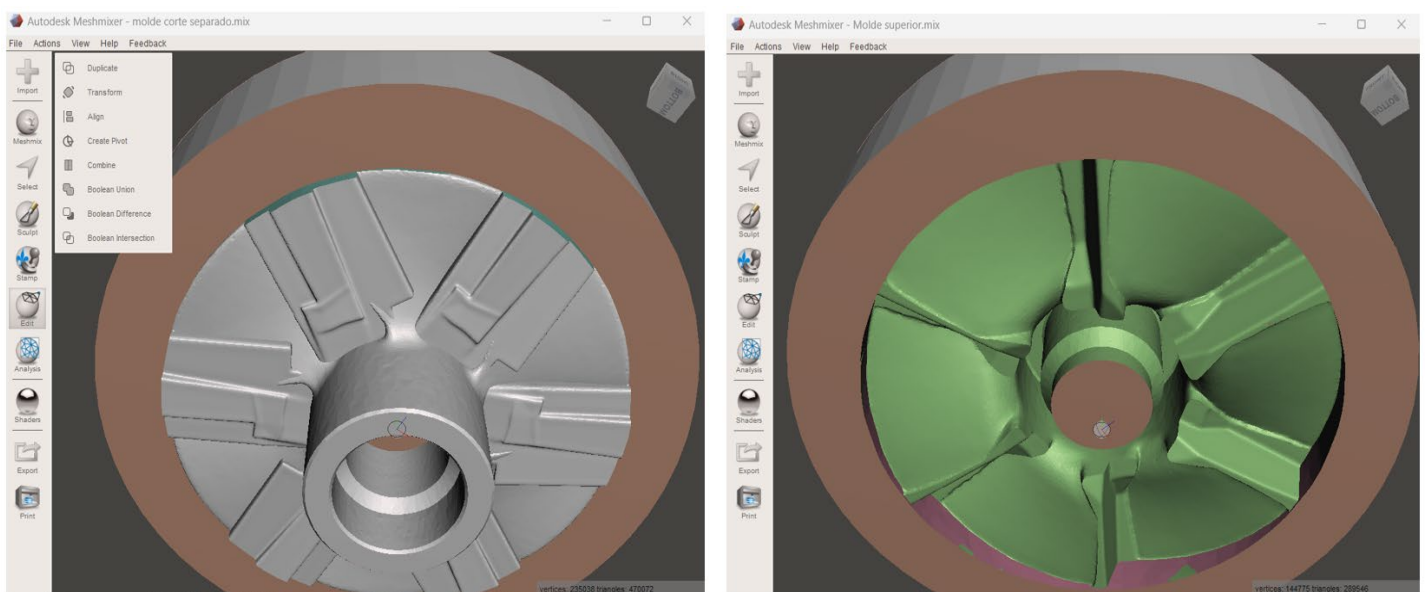


Ilustración 55. Diferencia booleana y resultado final de la parte superior del molde.

2.2.2. Diseño y posicionamiento del punto de inyección y ranuras de venteo

El punto de inyección es muy importante en la inyección de la pieza debido a que una buena colocación del mismo generará una inyección óptima del material en el molde, así como un fácil desmoldeo de la pieza. De la misma manera, las ranuras de venteo o rebosaderos cumplen la importante función de evacuar el aire de la cavidad de molde durante su llenado de tal forma que no se produzcan atrapamientos de aire o se reduzcan lo máximo posible y se asegure un correcto llenado de la cavidad. Para situar ambos de forma correcta nos apoyaremos en una simulación mediante el software especializado de Autodesk, Moldflow, el cual se encarga de generar simulaciones de moldeo por inyección y compresión de termoplásticos.

Debido al diseño de la hélice que posee un eje que no es macizo, necesario para poder acoplar la hélice en los soportes del equipo en el que irá instalada, no se puede colocar un único punto de inyección. Esto puede generar un mal llenado de la cavidad llegando a generar por ejemplo atrapamientos de aire o la solidificación del material antes de completar la cavidad. Por ello, se generará **un bebedero y 3 canales de distribución**, que se encargarán de distribuir el material homogéneamente desde el interior del eje.

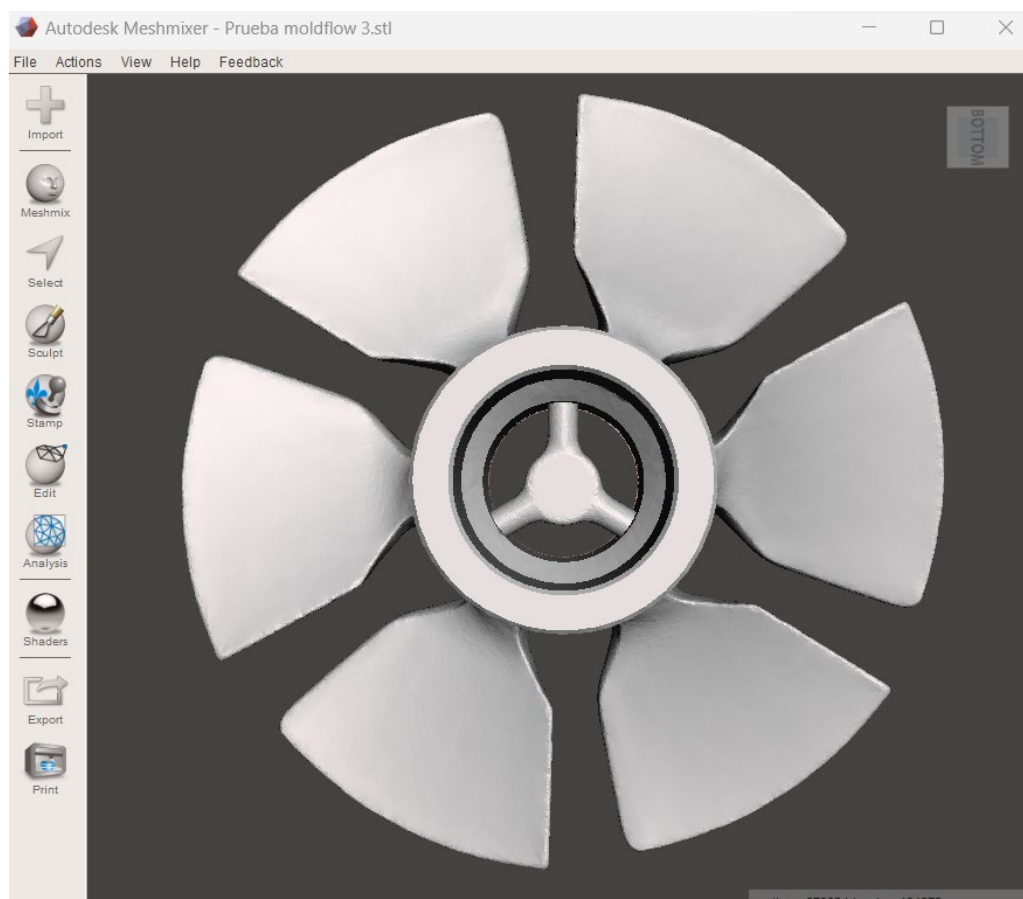


Ilustración 56. Generación de 3 canales de distribución debidos a la geometría del eje.

Además, hay que tener en cuenta que los canales de distribución deben de estar colocados en el plano de partición del molde, de tal forma que a la hora de abrir el molde y retirar la pieza inyectada

no se produzcan problemas como, por ejemplo, que parte de los canales de distribución queden dentro del molde de tal forma que conviertan al molde en uno de un solo uso e impidan que pueda ser utilizado de nuevo.

Para realizarlo en Meshmixer debemos de diseñar previamente la geometría del bebedero y los canales en Autodesk Inventor y posteriormente importarla junto al molde.

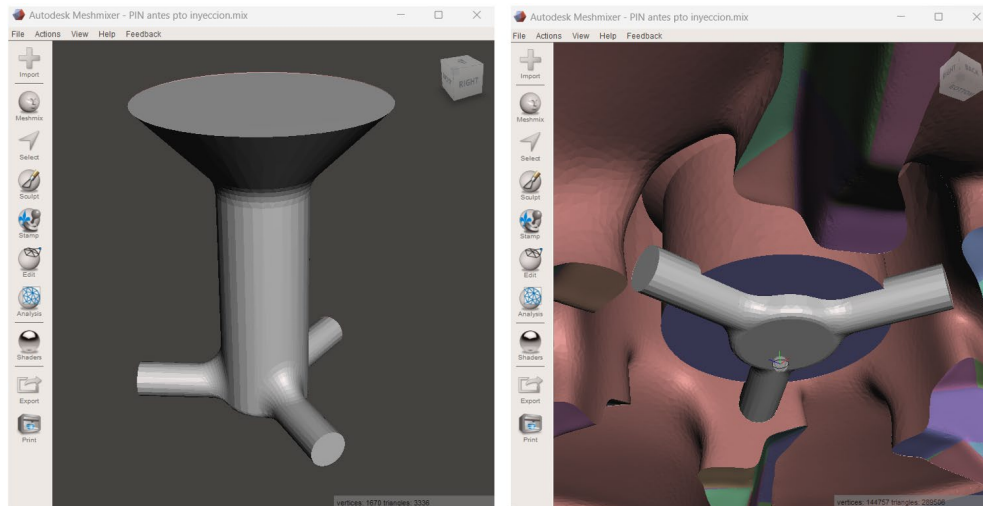


Ilustración 57. Diseño y colocación del bebedero y los canales de distribución.

Una vez situado en el plano de partición del molde se realizarán las operaciones habituales de remallado, duplicación de la geometría para poder operar con ambas partes del molde y diferencias booleanas.

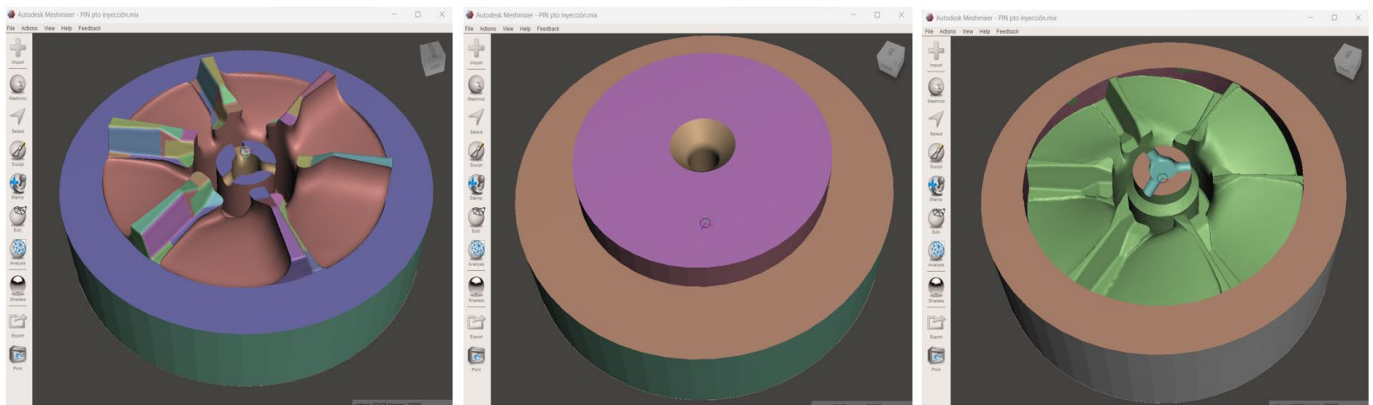


Ilustración 58. Resultado final del bebedero y los canales de distribución.

Se realiza la comprobación mediante el programa Moldflow que tanto el bebedero como los canales de distribución sean suficientes y el llenado se realice de forma correcta. Para ello importaremos en el programa la hélice con el bebedero y los canales de distribución. Después se debe indicar el punto de inyección, el tipo de análisis (llenado, refrigeración, etc.) y el material que se inyectará en el molde. En este caso debemos buscar de entre la biblioteca de materiales y fabricantes uno con las mismas características que el que usaremos más adelante, un polietileno de baja densidad que inyecta a 195 °C. Finalizada la selección se usa la función de *Analizar* y se ejecuta la simulación.

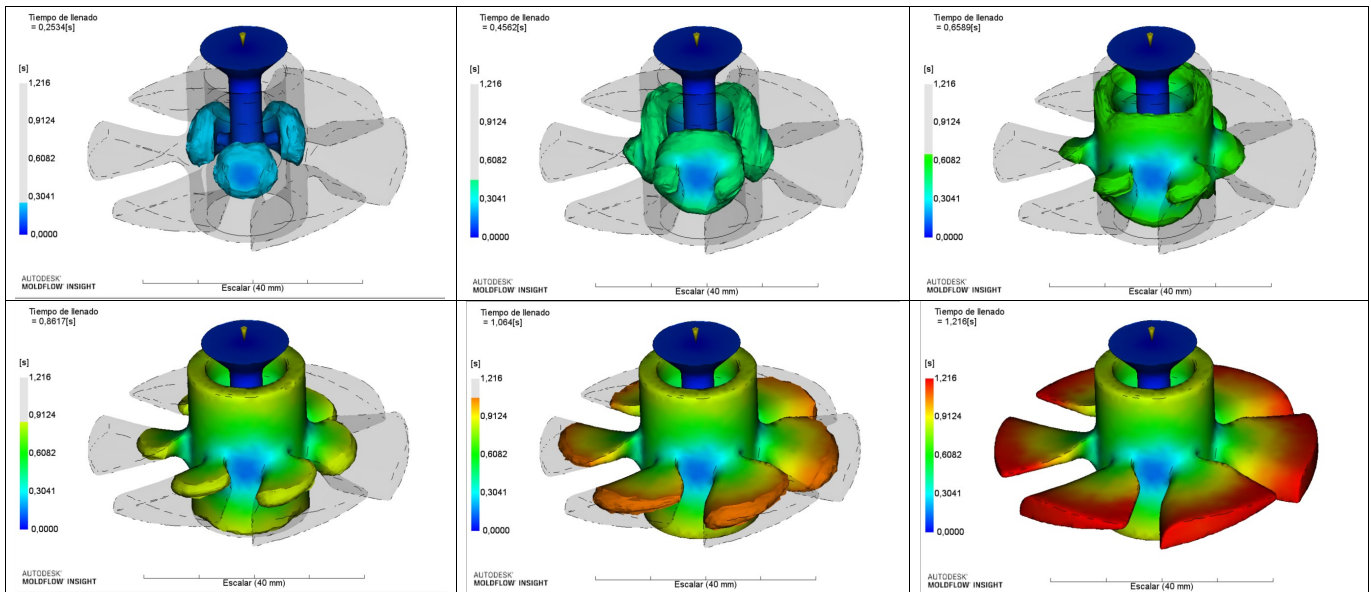


Ilustración 59. Simulación del proceso de inyección en la cavidad del molde.

Una vez finalizado se puede observar que la inyección se produce correctamente. Sin embargo, hay que tener cuidado con la zona de las palas y la parte superior e inferior del eje de la hélice ya que son zonas con mayor facilidad para generar atrapamientos de aire.

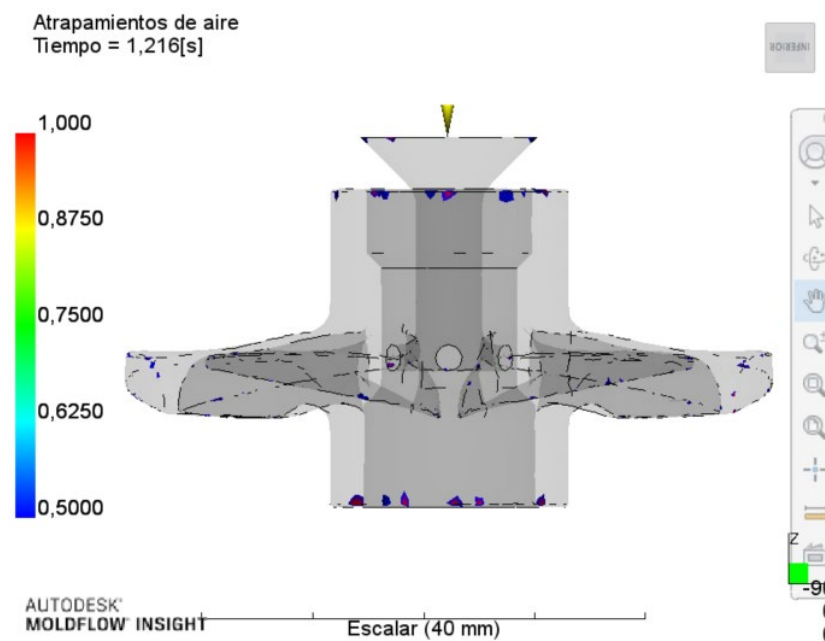


Ilustración 60. Simulación de los atrapamientos de aire durante el proceso de inyección.

Las **ranuras de venteo**, al igual que con el bebedero y los canales de distribución, estos deben ir situadas en el plano de partición del molde, en este caso, situados en los extremos de las palas, facilitando a la extracción del aire de la cavidad y su correcto llenado, así como el desmoldeo.

Para realizar las ranuras de venteo en las palas y teniendo en cuenta que estas deben tener una profundidad de 0.05 mm, se diseñará en Autodesk Inventor la geometría de ranuras. Una vez diseñada la ranura, se importará a Meshmixer y se colocará en el extremo de la pala sobre la superficie de una de las partes del molde, en este caso la superior.

Hay que tener en cuenta que para que la ranura quede con la profundidad indicada anteriormente y la diferencia booleana se produzca sin problemas, se debe situar de manera exacta la ranura al mismo nivel que la superficie del plano de partición. Esto se logra aplicando la función de *Align to Target*.

Para ello, primero se sitúa la ranura lo más cercana posible a la superficie en la que la queremos colocar y a continuación se remalla la ranura, especialmente la superficie que estará al mismo nivel que la superficie del molde.

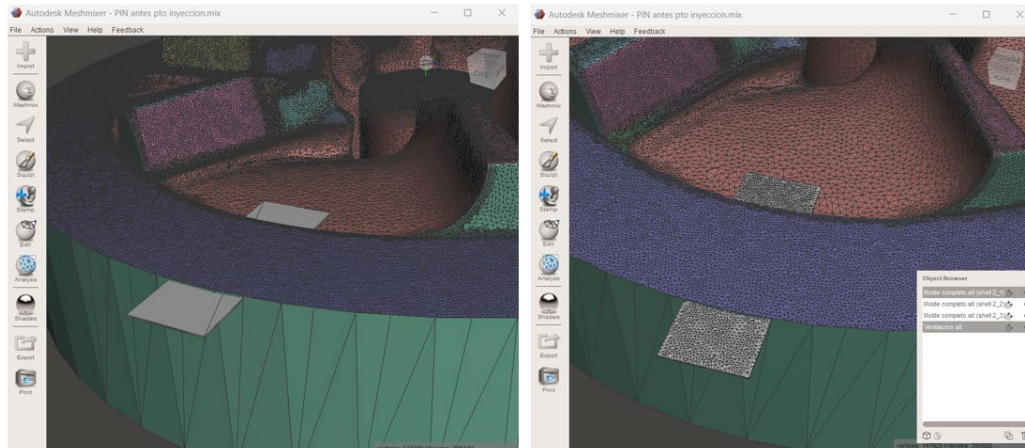


Ilustración 61. Colocación y remallado de la ranura de venteo.

En segundo lugar, debemos dirigirnos al cuadro de *Object Browser* y sobre el modelo del molde que estamos trabajando pincharemos sobre el imán situado junto al nombre. Esto permite poder utilizar la función de *Align to Target* y convierte al molde en la referencia para la aplicación de operaciones.

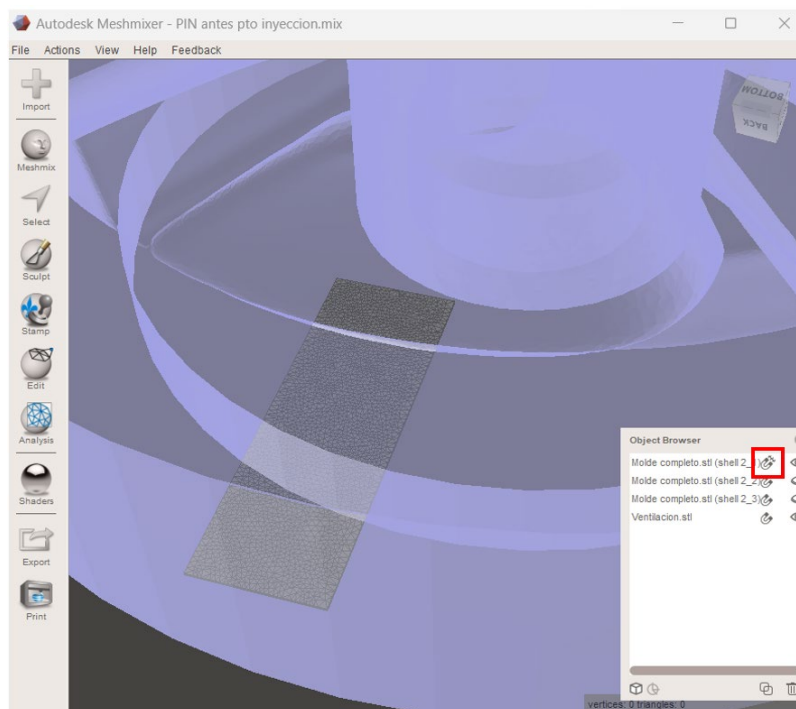


Ilustración 62. Convertimos el modelo de la parte superior del molde en referencia para la operación de *Align to Target*.

El siguiente paso es seleccionar sobre el modelo de la ranura de venteo los triángulos de la superficie que sean paralelos a la superficie del molde. Hay que tener cuidado de no seleccionar algún triángulo cercano a cualquier contorno tanto del molde como de la ranura, ya que de otra forma se podría desplazar la ranura de una forma errónea.

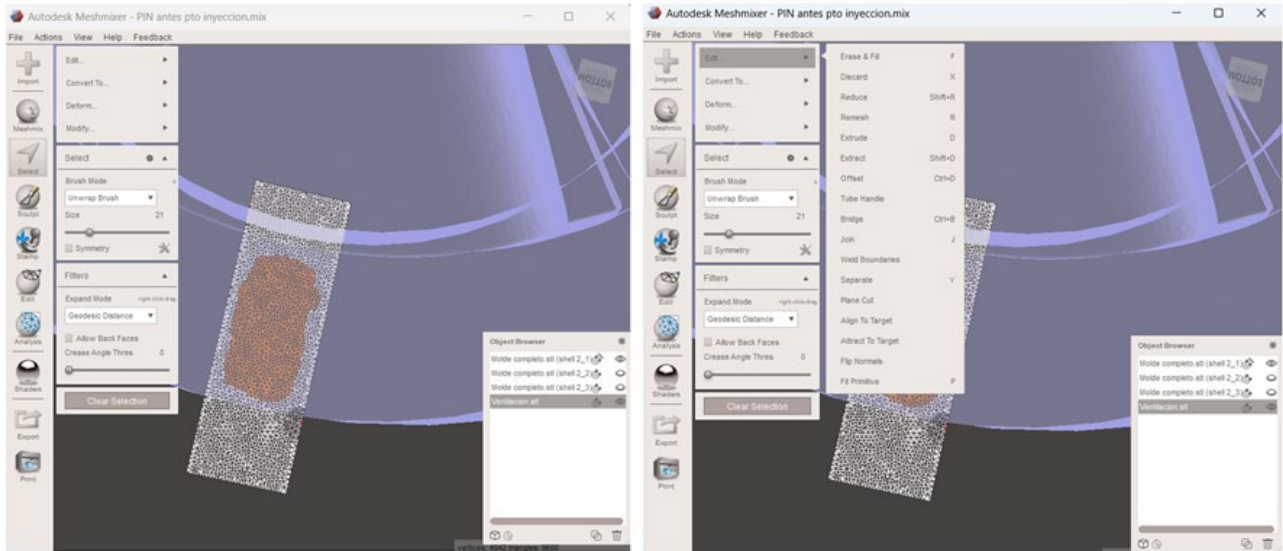


Ilustración 63. Función Align to Target.

Para asegurarnos de que una vez finalizada la operación, la diferencia booleana se realice correctamente, se vuelve a seleccionar la superficie de la ranura al nivel del molde y se emplea la función de *Extrude* que asegurará que no se produzcan errores durante esta operación.

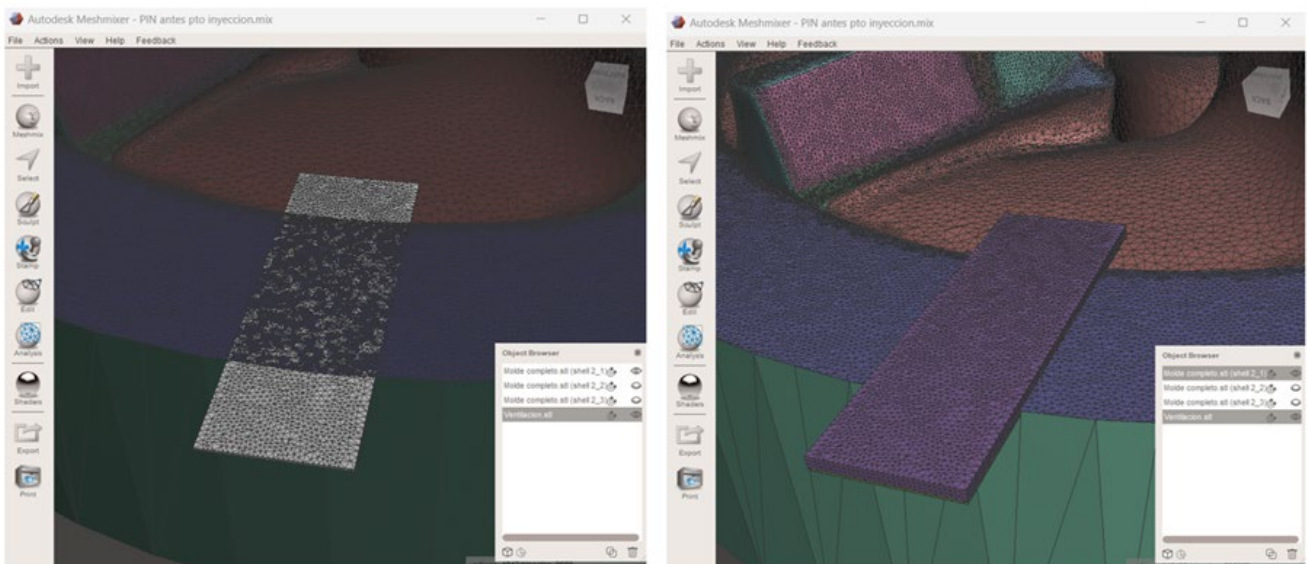


Ilustración 64. Resultado final de la función Align to Target (izquierda) y función Extrude para asegurar la operación de diferencia booleana.

Una vez colocada la ranura de venteo, se usan las mismas funciones y metodología empleadas en la reparación de la hélice: duplicación de la geometría y rotación de la misma 60° tomando como centro el pivote creado. Finalmente se utiliza *Combine* para unir los modelos independientes y se realiza la diferencia booleana entre el molde y las ranuras de venteo.

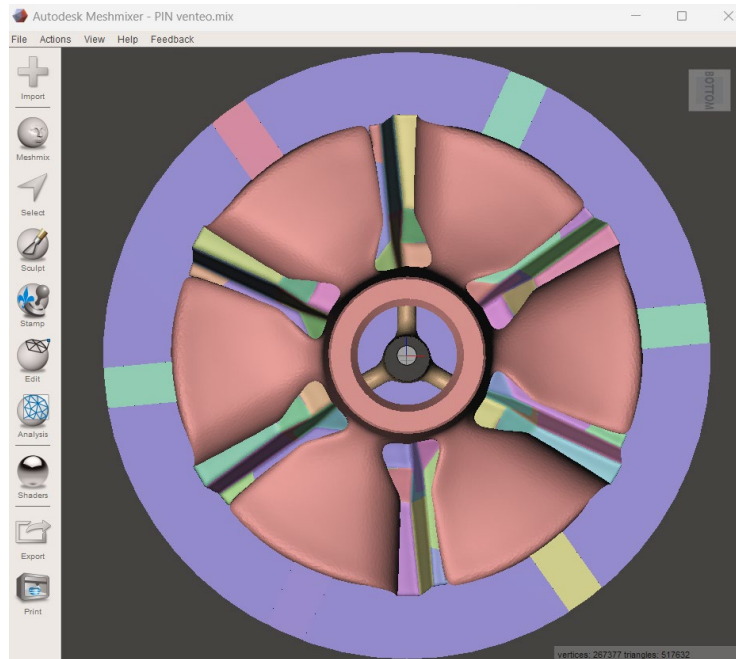


Ilustración 65. Resultado final de las ranuras de venteo.

2.2.3. Diseño de los pernos de sujeción y desmoldeo

Una vez completados la cavidad del molde y el punto de inyección, únicamente queda por diseñar el sistema de sujeción y cierre del molde, así como el sistema de desmoldeo y apertura del molde. Para ello se utilizarán de forma sencilla tornillos de métrica M4 en ambos casos.

En el sistema de sujeción y cierre, normalmente se suele realizar con un agujero pasante en el parte superior y un agujero roscado en la parte inferior. Sin embargo, con el molde impreso y para asegurarnos de que cierre correctamente y sin ningún problema se realiza un agujero pasante de diámetro 4,5 mm con asiento escariado de diámetro 9 mm. De este modo al introducir un tornillo de cabeza cilíndrica, por un lado, la cabeza queda al nivel del molde y no supone ningún inconveniente al colocar el molde en el centro de conformado, y por el otro lado se puede roscar una tuerca y cerrar de manera segura el molde.

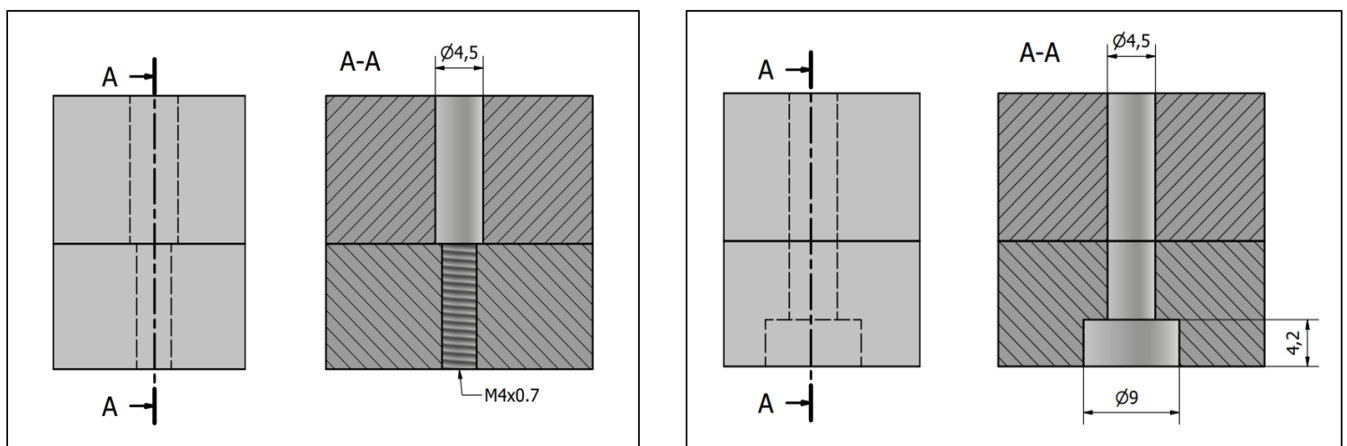


Ilustración 66. Cierre aplicado normalmente (*Izquierda*) y cierre aplicado en el molde impreso (*Derecha*).

Para realizarlo en Meshmixer, se parte del modelo importado del agujero descrito anteriormente, previamente diseñado en Autodesk Inventor, y lo colocaremos sobre el molde. Debemos de tener cuidado de colocarlo de tal forma que, al realizar operaciones con el molde, la cavidad no se vea afectada y puedan llegar a producirse deformaciones.

Una vez colocado, pasaremos a realizar las operaciones de duplicación y rotación del modelo teniendo en cuenta que al rotarlo se vuelve a tomar como centro el pivote creado. A continuación, se usa *Combine* dejando un solo modelo y se duplica, ya que se necesita hacer la misma operación por cada parte del molde, una para la superior y otra para la inferior. Esto se debe a que, si se realiza la diferencia booleana en ambas partes al mismo tiempo, se pueden producir errores en la malla de ambas superficies.

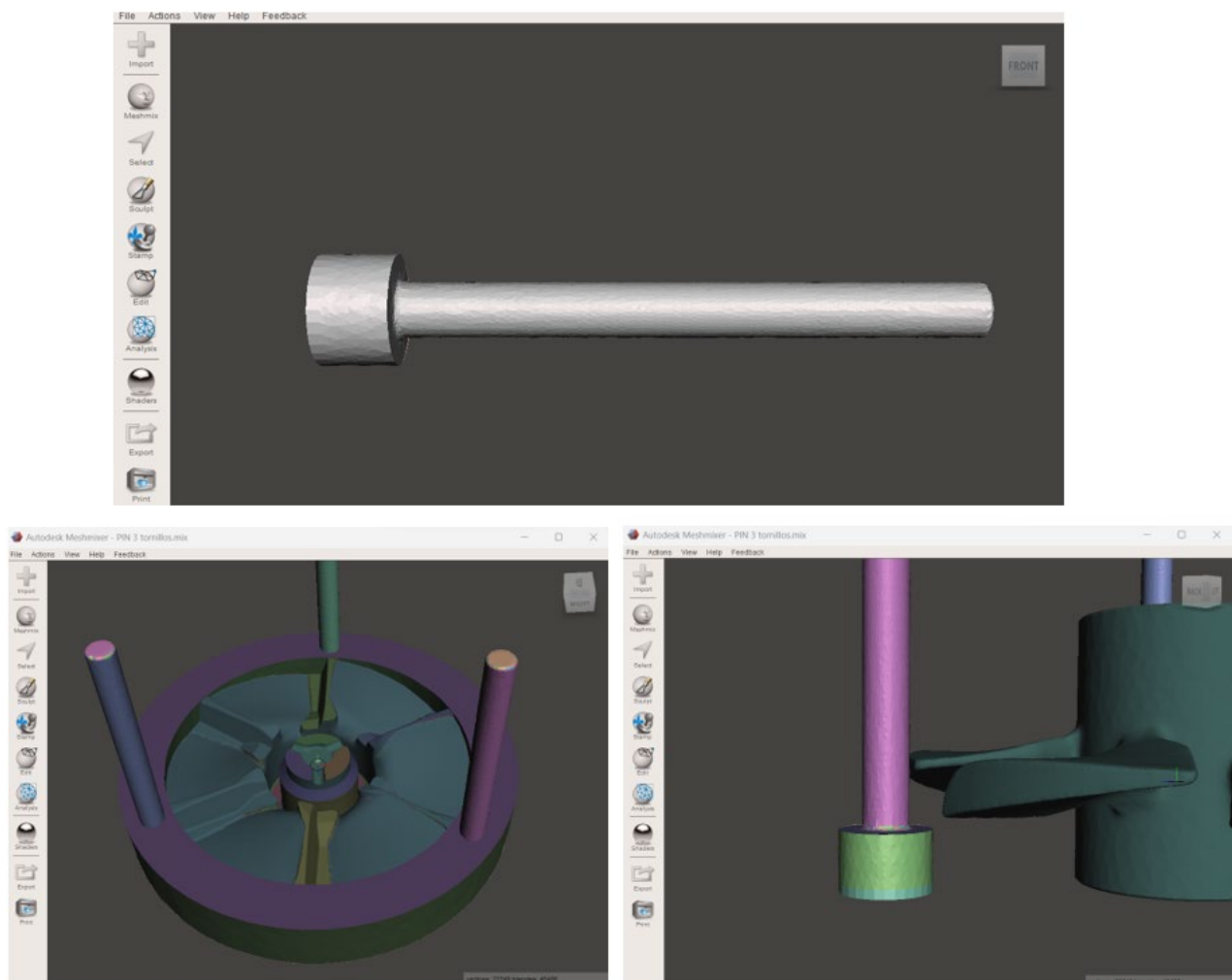


Ilustración 67. Modelo del tornillo para realizar el agujero en el molde (*arriba*), colocación de los 3 modelos en el molde (*abajo izquierda*), y distancia a tener en cuenta con la cavidad del molde para evitar deformaciones (*abajo derecha*).

Se remallan tanto los modelos del tornillo como los alrededores de los mismos en las superficies en las que se realizarán las operaciones de diferencias booleanas. Finalmente, usamos *Boolean Difference* y creamos los agujeros para los tornillos encargados del cierre del molde.

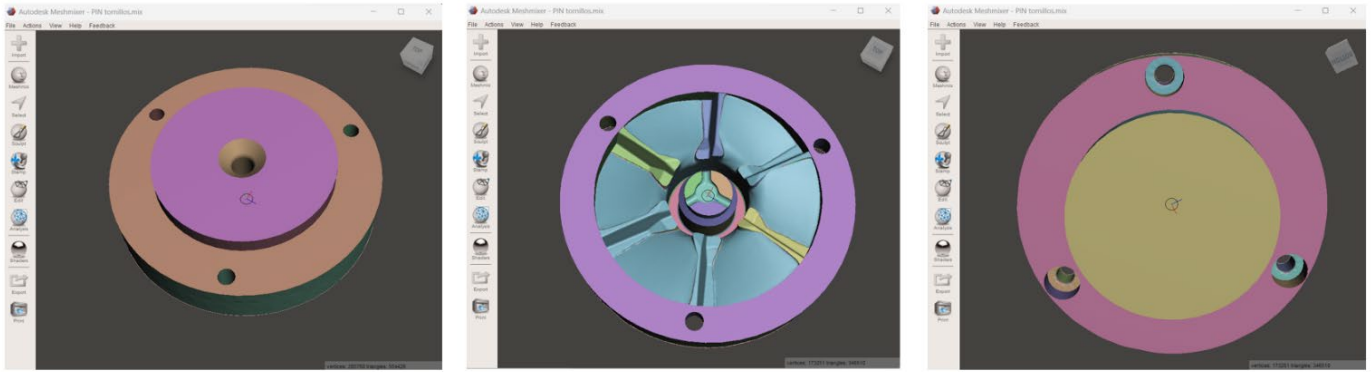


Ilustración 68. Resultado de la diferencia booleana entre ambas partes del molde y los tornillos.

Para realizar el desmoldeo, el sistema empleado suele estar formado por una rosca en una de las partes del molde y una hendidura de apoyo en la otra parte. No obstante, como se indicó anteriormente para el cierre, puede no ser la mejor opción para un molde impreso y habrá que adaptarlo.

En este caso, para desmoldar se usará una tuerca colocada dentro de una de las partes en el plano de partición del molde. De esta forma insertando un tornillo podremos roscar en la tuerca y separar ambas partes logrando desmoldar la pieza.

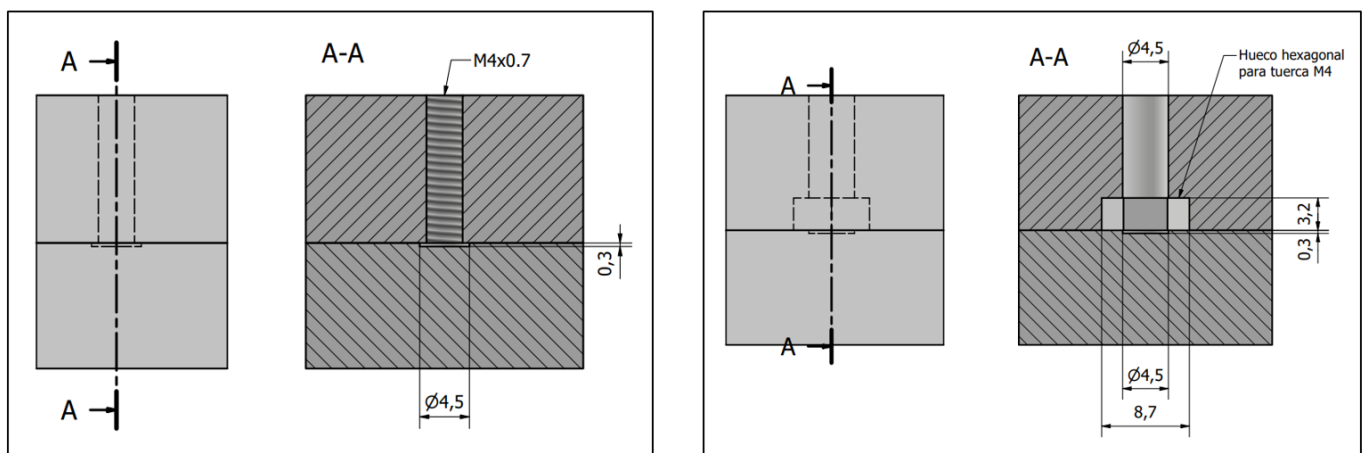


Ilustración 69. Sistema de desmoldeo aplicado normalmente (*Izquierda*) y sistema de desmoldeo aplicado en el molde impreso (*Derecha*).

Del mismo modo que realizamos los agujeros para los tornillos de cierre, para realizar los agujeros de desmoldeo también partiremos de un modelo con la misma forma del agujero que queremos crear.

Las operaciones son las mismas del proceso anterior y se realizan en el mismo orden. Se inserta la geometría del agujero, se coloca teniendo en cuenta la cavidad de la hélice, se duplica y se combina en un mismo modelo, y finalmente se remalla y se realiza la diferencia booleana.

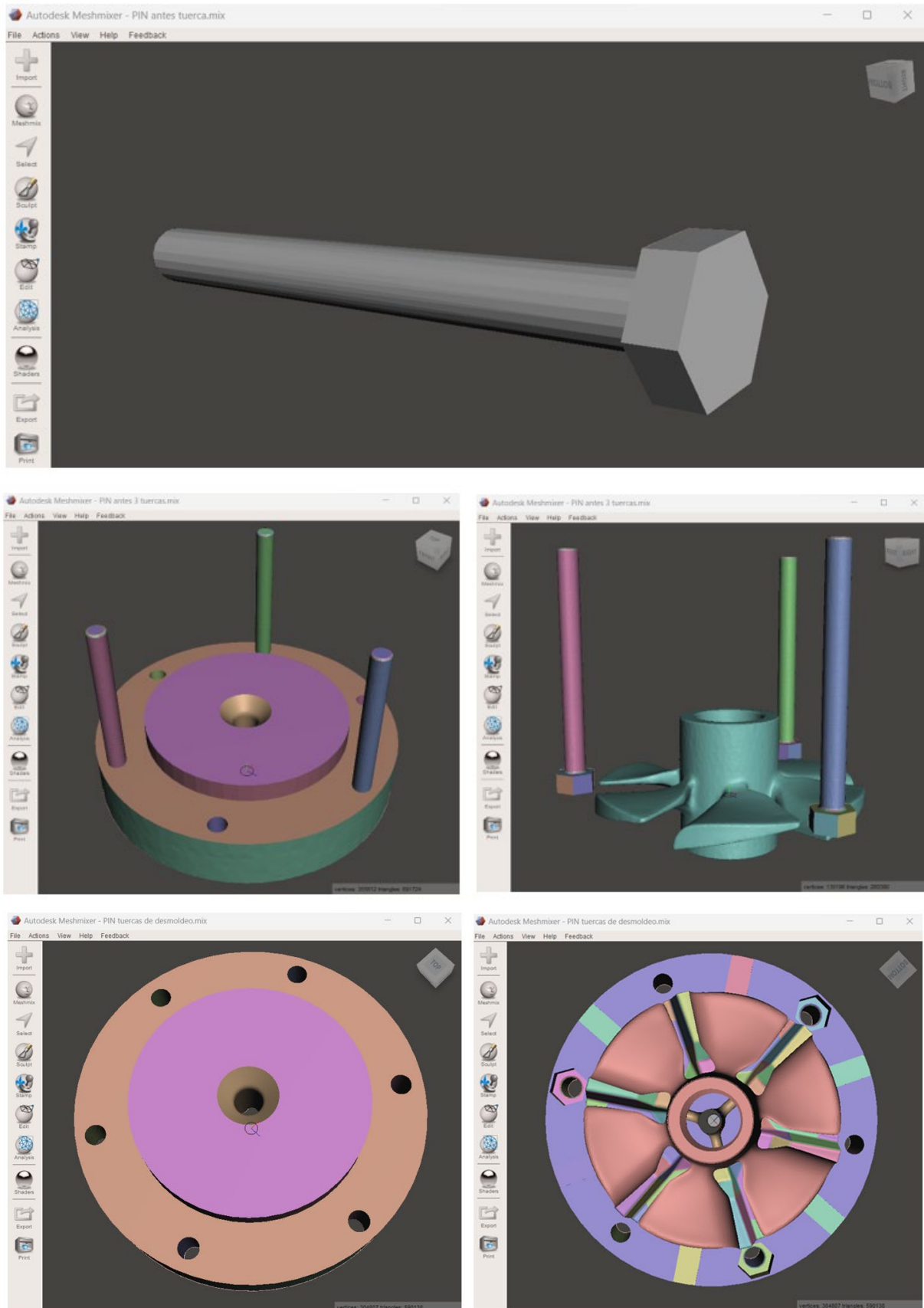


Ilustración 70. Modelo de tuerca para realizar el agujero del desmoldeo (*arriba*), colocación de los 3 modelos en el molde (*medio izquierda*), distancia a tener en cuenta con la cavidad del molde para evitar deformaciones (*medio derecha*), y resultado final agujero (*abajo izquierda*) y resultado final para tuercas (*abajo derecha*).

Por último, al ser un molde completamente simétrico se puede cometer el error de cerrar el molde de forma incorrecta de tal modo que a la hora de realizar la inyección los canales o la cavidad no coincidan y el llenado del molde no se produzca adecuadamente. Para solucionar este posible inconveniente y poder colocar correctamente las dos partes del molde, se realiza una marca en la misma posición en ambas partes.

Para ello se repiten las operaciones anteriores. Primero se vuelve a insertar una geometría con la forma de la marca. A continuación, se remalla la geometría y la zona de las partes del molde en las que realizaremos la operación. Se duplica la geometría y se realizan las diferencias booleanas en cada una de las partes.

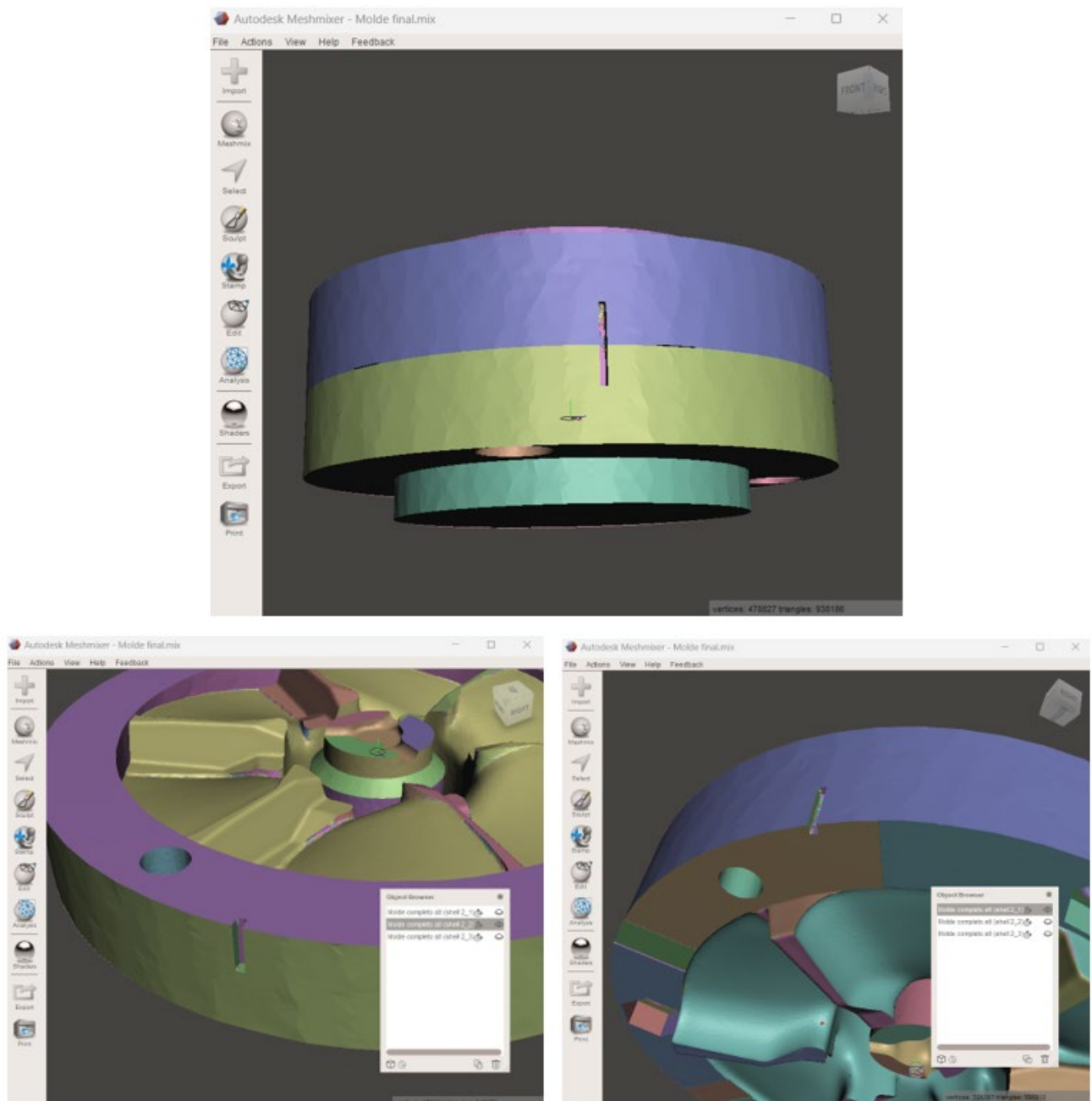


Ilustración 71. Marca que indica la posición correcta de ambas partes del molde.

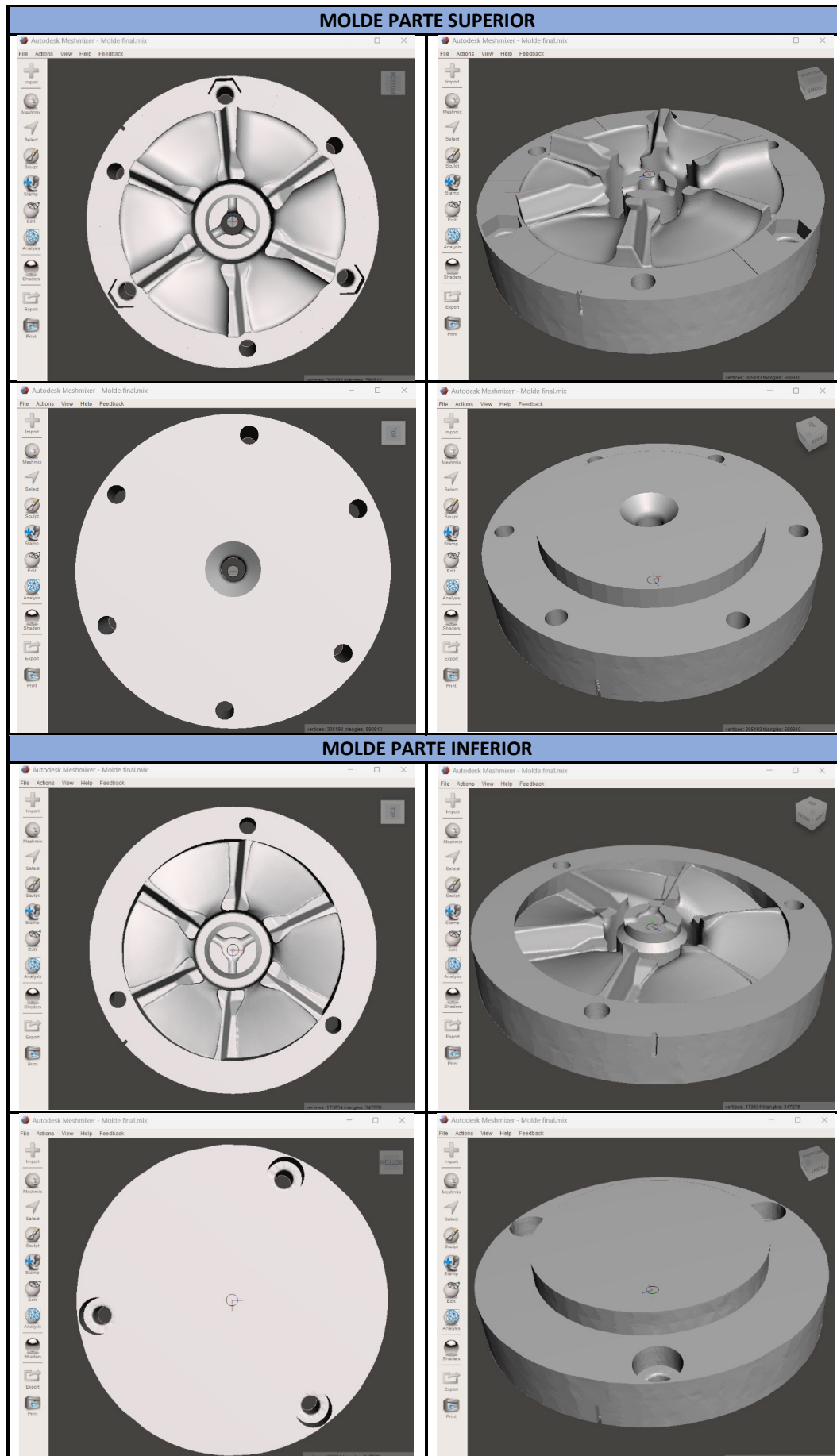


Ilustración 72. Resultado final del molde.

3. MATERIALES

Como se observó dentro del apartado *1.4 Moldes de inyección con impresión 3D*, entre las diferentes tecnologías de impresión 3D, la mejor opción para realizar el molde es mediante impresión 3D por estereolitografía o SLA.

Este tipo de impresión 3D proporciona un acabado superficial liso y de alta precisión y, a diferencia de la FDM, las impresiones tienen una mayor densidad e isotropía debido a su estructura homogénea que permite una mejor transmisión térmica. Además, en los últimos años han ido surgiendo cada vez más materiales de impresión SLA de alto rendimiento que dan a los ingenieros acceso a una mayor gama de materiales de plásticos.

A partir de este punto nos centraremos en los diferentes materiales y resinas existentes, principalmente en las resinas de la empresa estadounidense Formlabs, empresa especializada en impresión 3D de estereolitografía. Esto es debido también a que la impresora 3D utilizada para el desarrollo de este proyecto es una perteneciente a esta empresa, la Form 3B (para más información sobre la impresora consultar *Anexo II. Especificaciones de los equipos*).



Ilustración 73. Impresora Form 3B y resinas de la empresa Formlabs (tomadas del propio catálogo de la empresa en <https://formlabs.com/es/>).

Dentro de la amplia gama de resinas de las que dispone Formlabs, encontraremos unas especialmente creadas para cumplir los requisitos necesarios para fabricar moldes de inyección, como son soportar presiones de sujeción e inyección, las temperaturas de inyección o refrigerantes o agentes de desmoldeo. Todo esto recogido dentro del documento Formlabs, Julio 2022.

Las resinas que el propio fabricante nos recomienda que cumplen estos requisitos son la resina Rigid 10k, la resina High Temp y la resina Grey Pro.

Rigid 10k

Resina muy recomendada para moldes de inyección por su combinación de fuerza, rigidez y resistencia térmica. Es un material de grado industrial con alto contenido de vidrio con una temperatura de deformación al calor (HDT) de 218 °C a 0,45 MPa y un módulo de tracción de 10 000 MPa. Se puede imprimir a alturas de capa de 50 o 100 micras.

High Temp

Alternativa a la resina Rigid 10k en casos en los que se necesite una mayor resistencia térmica debido a que su temperatura de deformación al calor (HDT) es la mayor dentro de todas las resinas de Formlabs, siendo esta de 238 °C a 0,45 MPa. Sin embargo, esta resina es más frágil que la Rigid 10k y se romperá mucho más rápido bajo presión. Imprime a una altura de capa de 25 micras y funcionará mejor en paredes delgadas y detalles finos.

Grey Pro

Esta resina solo es adecuada para piezas pequeñas y en cantidades pequeñas. Debe usarse cuando las presiones y las temperaturas son bajas y la precisión dimensional de su pieza moldeada es menos crítica. Los moldes fabricados con esta resina se doblarán antes de romperse, lo que empeorará la precisión con el tiempo a medida que se utilice el molde.



Ilustración 74. Rigid 10k (izquierda), High Temp (derecha) y Grey Pro (abajo).

* Para más información sobre las especificaciones de cada una de las resinas consultar *Anexo I. Especificaciones de los materiales.*

El termoplástico empleado para realizar la inyección es **polietileno de baja densidad**, el cual funde a una temperatura de 190-195 °C y será inyectado con una presión de 1 MPa.

Por tanto, la resina que utilizaremos para imprimir el molde será la resina **High Temp**. Esta resina tras realizarle los debidos tratamientos térmicos alcanzará la temperatura de deformación de 238 °C a 0,45 MPa, mientras que la resina Rigid 10k solamente alcanzará los 218 °C a 0,45 MPa, siendo insuficiente para los 1 MPa a los que se realizará la inyección. Y la resina Grey Pro queda descartada al no trabajar con temperaturas altas.

CRITERIOS	RIGID 10K RESIN	HIGH TEMP RESIN	GREY PRO RESIN
Alta temperatura de moldeo	●●	●●●	●
Tiempo de enfriamiento corto	●●	●●●	●
Alta presión	●●●	●	●●
Aumento del número de ciclos para geometrías complejas	●●●	●	●●

Ilustración 75. Tabla comparativa de las resinas con los principales requisitos y criterios para la impresión 3D de moldes de inyección (tomada de Formlabs, Julio 2022).

4. IMPRESIÓN DEL MOLDE

Para realizar la impresión 3D del molde utilizaremos, como se dijo anteriormente, la impresora Form 3B (más información en *Anexo II. Especificaciones de los equipos*). Antes de empezar a imprimir el molde, debemos de laminar el modelo e indicar los parámetros a los que realizará la impresión. Para ello utilizaremos el software propio de Formlabs, PreForm.

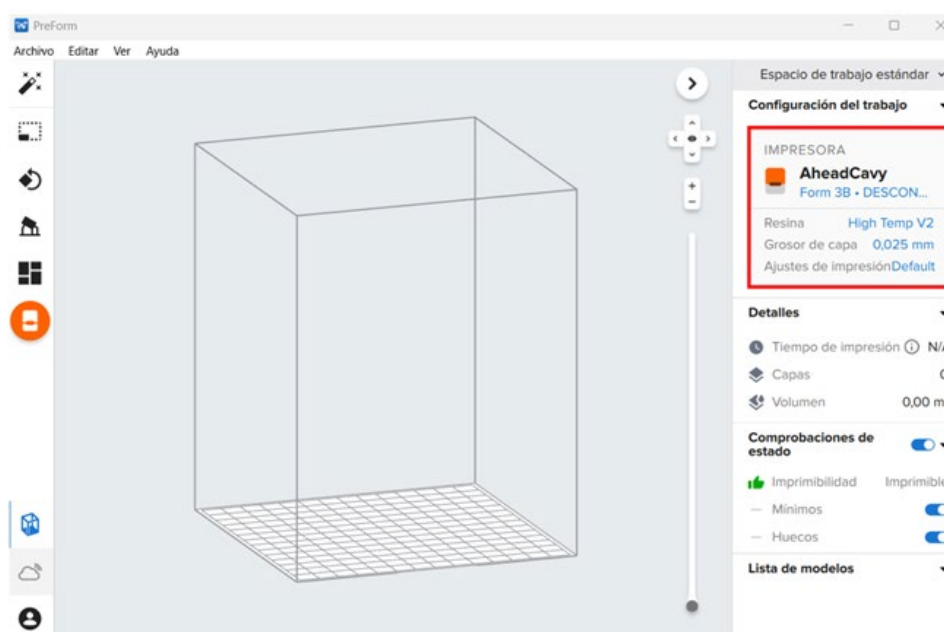


Ilustración 76. Interfaz del software propio de FormLabs, PreForm.

4.1. Proceso de impresión 3D

Dentro de Meshmixer, se exportan ambas partes del molde en archivo .stl, esencial para poder importarlas al laminador de Formlabs. Dentro del laminador se irá a la esquina superior derecha y se selecciona la impresora con la que vamos a trabajar, el material y la altura de capa necesaria para la impresión. La altura de capa a la que se realizará la impresión es de 25 micras para obtener un mejor resultado de las partes más complejas del molde como son las curvas de las palas de la hélice.

Como se observa, el laminador es muy intuitivo y sencillo haciéndolo fácil de manejar, incluso para usuarios que nunca hayan trabajado con este tipo de software.

1 Elección de una impresora

Elige una impresora ahora o configura el tipo de impresora para tomar tu decisión final cuando cargues el trabajo.

Tipo de impresora Form 2 Form 3/3+ Form 3B/3B+ Form 3L Form 3BL Fuse 1 Fuse 1+ 30W

Buscar impresoras... Mostrar todos los tipos de impresora

Impresora	Modelo	Estado	Consumibles	☐ Gestionar dispositivos
	Form 3B+ Impresora 3D SLA 145 x 145 x 185 mm No Form 3B+ printers have been found. To add a new printer, go to File > Devices > Add. Más información			

2 Elige un material

Elige el material con el que quieres imprimir.

Uso general Ingeniería Odontología Medicina Joyería

3 Elige el grosor de capa

El grosor de capa influye en la velocidad y en la resolución en el eje Z de una impresión.

 0,100 mm Impresión más rápida	 0,050 mm
 0,025 mm Detalles más finos	 Adaptativo Varía el grosor de la capa según la geometría de la pieza

4 Elige los ajustes de impresión

Los ajustes de impresión controlan la velocidad de la impresión, la forma de las puntas de los soportes y otros aspectos del funcionamiento de la impresión.

Default v2.0
Ajustes actualizados que mejoran la eliminación de los soportes y se imprimen un 20-40 % que los ajustes Legacy.

Legacy v1.1
Los anteriores ajustes Default para este material, para asegurar la compatibilidad con trabajos de impresión más antiguos.

Ilustración 77. Selección de la impresora (1), selección del material (2) y selección de la altura de capa de la impresión (3).

Una vez seleccionados todos parámetros principales, se importan ambas partes del molde. Sin embargo, al importarlas el programa las coloca aleatoriamente y en una orientación no válida para su impresión. En la parte derecha de la interfaz del programa aparecerán varias alertas que indican posibles errores en la impresión, y sobre el modelo se podrán observar dos problemas. El primero lo indica en rojo y muestra las zonas en las que son necesarios soportes para que la impresión se realice correctamente. El segundo se muestra de color amarillo e indica que existen huecos que pueden provocar vacíos en la impresión, produciéndose el denominado como Efecto Ventosa, o producirse acabados superficiales de baja calidad.

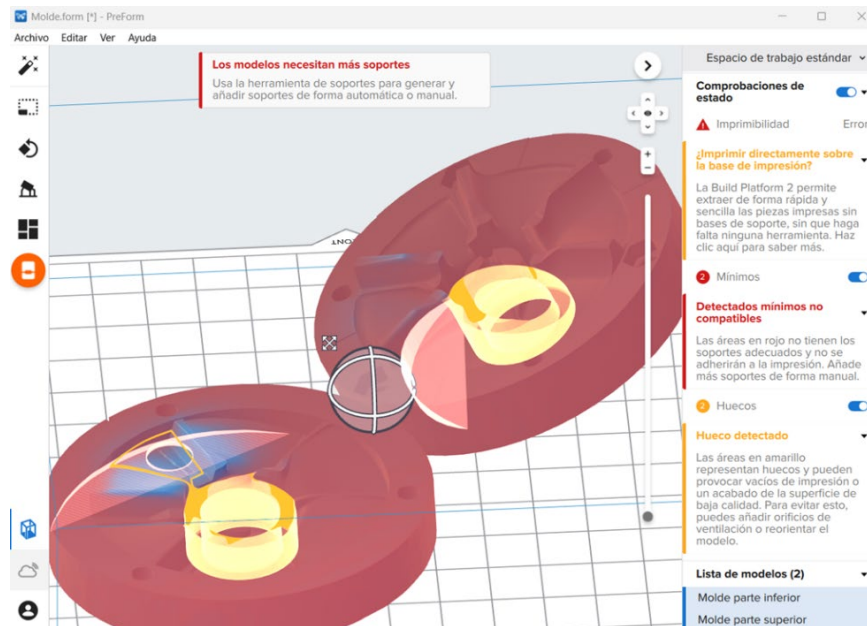


Ilustración 78. Alertas de impresión tras importar el modelo en el laminador.

Para ello, PreForm contiene una serie de opciones para ayudar al usuario a posicionar de manera correcta el modelo, calculando internamente a partir de la geometría, la posición óptima para la impresión. En la parte izquierda superior de la interfaz podremos ver una serie de símbolos como los que se muestran en la siguiente tabla.

	Impresión a un Clic	Reorganiza y reorienta el modelo y genera los soportes necesarios
	Tamaño	Permite escalar el modelo
	Orientación	Reorienta el modelo
	Soportes	Genera los soportes necesarios
	Organizar	Reorganiza las posiciones de los diferentes modelos
	Comenzar la impresión	Inicia la impresión una vez estén definidos los parámetros anteriores

Ilustración 79. Opciones de selección previas a la impresión.

Principalmente se utilizarán las opciones de orientación y soportes. Dentro de la opción de orientación, se marca en *Orientar automáticamente la selección* y buscará la orientación óptima para que el modelo pueda imprimirse sin generar vacíos, y tanto las alertas como la zona amarilla marcada en el modelo que indicaba riesgo por huecos desaparecerá, sin embargo, en algunas ocasiones habrá que repetir esta operación varias veces hasta que estos errores desaparezcan de manera definitiva.

Con los modelos orientados correctamente utilizaremos la opción de *Soportes*, marcando en *Generar automáticamente la selección* previamente indicando para este caso, una reducción del porcentaje de generación hasta el 60% para que al momento de retirar los soportes sea más sencillo sin afectar a la estabilidad del modelo, al mismo tiempo que ahorramos en material.

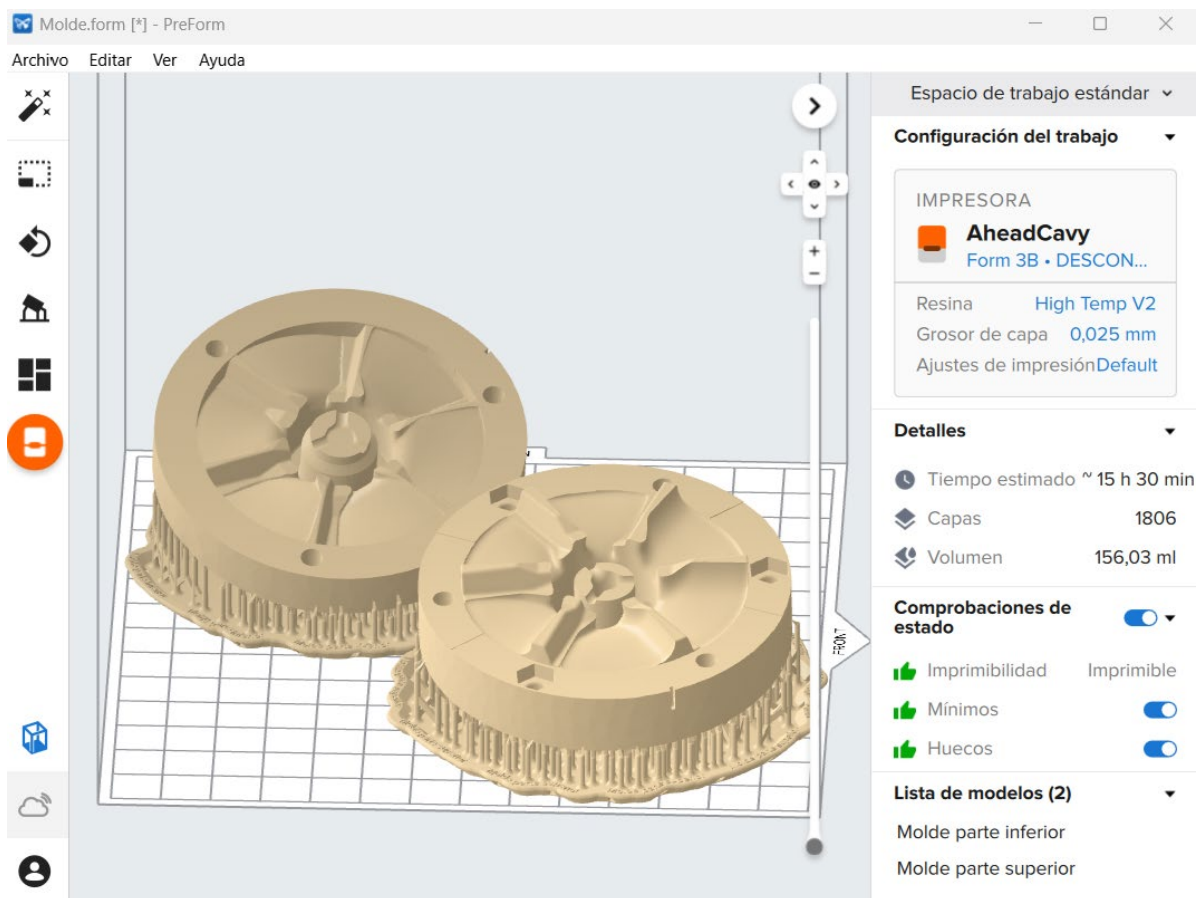


Ilustración 80. Resultado final previo a su impresión.

Con el modelo posicionado correctamente y los soportes generados, se procede a mandar el modelo a la impresora en un archivo de extensión .form propio de Formlabs, para así comenzar con el proceso de impresión del molde.

El tiempo estimado de impresión será de unas **15 horas y 30 min**, como se puede observar en la *Ilustración 80*. A este tiempo estimado indicado por el software habrá que añadir otros 40 minutos aproximadamente de comprobaciones y preparaciones que realiza la propia impresora antes de cada impresión como, por ejemplo, comprobar los niveles del tanque o la óptica de la impresora.

Durante toda la impresión es muy importante mantener la habitación y la zona de impresión bien ventilada ya que la resina empleada, al estar caliente durante la impresión, genera vapores que pueden llegar a ser tóxicos para una persona si se expone durante un largo periodo de tiempo, además de generar un fuerte olor.



Ilustración 81. Finalización de la impresión 3D del molde.

4.2. Proceso de posprocesado

Concluido el tiempo de impresión, se procederá a realizar la limpieza de ambas piezas para retirar los excesos de resina que puedan quedar entre los huecos y agujeros de los modelos, así como su posprocesado, necesario para adquirir las características térmicas esenciales para el proceso de inyección posterior. Antes de manipular los modelos impresos es importante llevar puestos unos guantes como medida de seguridad para no estar en contacto directo con los restos de resina que puedan quedar y así manipular tranquilamente ambas partes del modelo impresas.

Para realizar el lavado de la impresión se utiliza el equipo de limpieza y lavado Form Wash (información y especificaciones incluidas en *Anexo II. Especificaciones de los equipos*). Este equipo consta de un tanque de hasta 8,6 litros de alcohol isopropílico en el cual se sumergen los modelos impresos y mediante la agitación y movimiento del líquido se consigue limpiar cada hueco y rincón de las piezas. El equipo también permite programar el tiempo de lavado necesario de tal forma que, cuando termina de lavar y limpiar la impresión, automáticamente extrae las piezas del alcohol isopropílico, con lo que se evita que pasen un tiempo excesivo en el baño o se deformen.

Una vez las piezas se han lavado, se dejan secar al aire libre. El tiempo empleado para su lavado es de 15 minutos, cambiando de posición la pieza en mitad del proceso para un mejor lavado, y el tiempo empleado para secar todo el alcohol isopropílico de las paredes del modelo es de 15 minutos también, asegurándonos de que todo el alcohol se ha evaporado correctamente. Para asegurarnos de que las piezas no sufren ningún golpe ni desperfecto, las introducimos en el equipo sin retirarles los soportes. Tras este proceso podemos observar como el molde impreso ha pasado de un tono casi transparente a adquirir un color blanco semitransparente.



Ilustración 82. Proceso de lavado y secado del molde.

El siguiente paso después del lavado y secado del molde es el curado con luz ultravioleta, con el cual garantizamos que la resina esté completamente endurecida y obtenga unas propiedades mecánicas óptimas. Para ello se utiliza el equipo de Form Cure (información y especificaciones incluidas en *Anexo II. Especificaciones de los equipos*).

Se introduce el molde en el centro del equipo sin retirar aún los soportes, ya que estos también ayudarán a realizar el curado del molde de manera más sencilla. Siguiendo las instrucciones y datos proporcionados por el fabricante (información incluida en *Anexo I. Especificación de los materiales*), programaremos el equipo para funcionar a 80 °C durante 120 minutos, y posteriormente dejaremos el molde en el interior enfriándose durante al menos 1 hora más. Transcurrido ese tiempo, nuestras piezas pasarán de tener una temperatura de deformación al calor (HDT) de 49 °C a 0,45 MPa sin aplicarle el curado de luz ultravioleta, a una temperatura de 120 °C a 0,45 MPa tras el curado, aumentando y mejorando mayoritariamente sus propiedades térmicas.

Tras realizar el curado el molde va adquiriendo un color amarillento. Tras este procedimiento se pasarán a retirar los soportes.

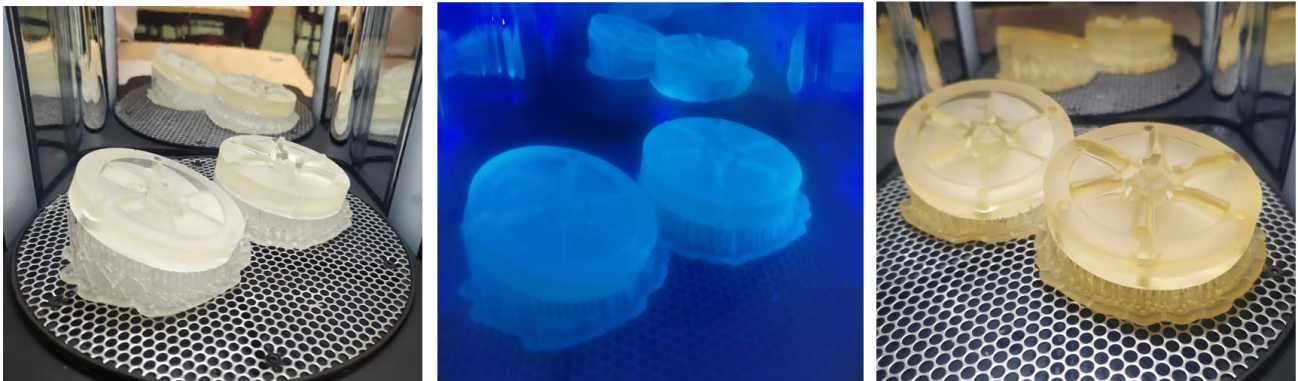


Ilustración 83. Proceso de curado con luz ultravioleta. Introducción del molde en el equipo de curado (*izquierda*), proceso de curado (*medio*) y resultado final del curado (*derecha*).

Finalmente, y continuando con las instrucciones del fabricante, realizaremos un tratamiento térmico adicional para aumentar aún más las propiedades térmicas del molde. Esta mejora de las propiedades térmicas del molde también provoca una disminución de las propiedades de resistencia a rotura y tracción. Sin embargo, para este trabajo daremos prioridad a las propiedades térmicas sobre las propiedades de tracción ya que el objetivo de estos tratamientos a los que se somete el molde es para asegurar una alta resistencia a altas temperaturas sin que el molde se deforme, y la presión a la que se inyectará el termoplástico es de 1 MPa.

Para realizar el tratamiento térmico al molde se utilizará el horno del centro de termoformado 911, un equipo que incluye diferentes procesos de termoformado entre los que se encuentran el conformado al vacío, soplado de cúpula, revestimiento por inmersión, soldadura de plásticos, extrusión y moldeo por inyección. Además de incluir también un horno para poder precalentar los moldes y el crisol utilizados en el moldeo por inyección. Para más información del equipo o su funcionamiento consultar el *manual de instrucciones y mantenimiento* impreso que incluye o visitar <https://www.flecneland.nl/lanotattachments/download/file/id/78/store/1/>.



Ilustración 84. Centro de termoformado 911.

Previamente a iniciar el tratamiento térmico del molde y como precaución ante posibles deformaciones que puedan surgir en el molde al estar directamente en contacto con la placa metálica del horno, durante el proceso se colocará fibra de vidrio para actuar como superficie intermedia y aislante entre el molde y la placa del horno.



Ilustración 85. Introducción del molde en el horno del centro de termoformado.

Además, para evitar cambios bruscos de temperatura, durante la etapa de encendido introduciremos el molde en el interior del horno para que vaya adquiriendo la temperatura necesaria al mismo tiempo y de esta forma evitar que el molde sufra un choque de temperatura. Siguiendo las indicaciones del fabricante, el tratamiento térmico se realizará a 160 °C durante 180 minutos (información incluida en *Anexo I. Especificación de los materiales*).

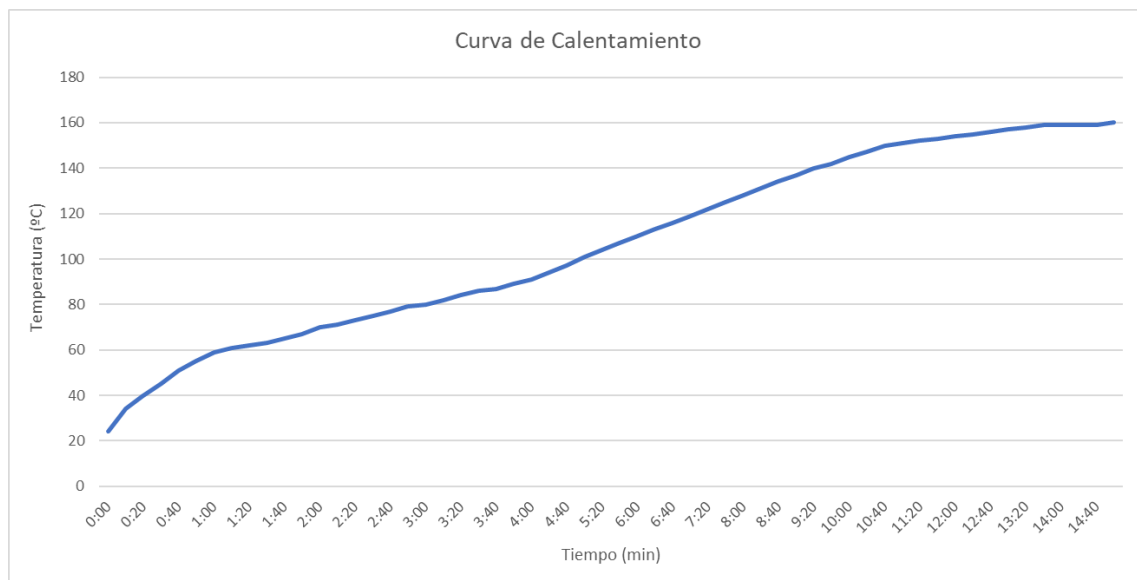


Ilustración 86. Curva de temperaturas durante el calentamiento del horno.

Tras transcurrir los 180 minutos, se dejará enfriar el molde hasta temperatura ambiente para que, del mismo modo que se realizó el enfriamiento del molde después del curado con luz ultravioleta y durante el calentamiento del horno, el molde no sufra un fuerte contraste de temperaturas y se puedan llegar a producir grietas a lo largo de su estructura.

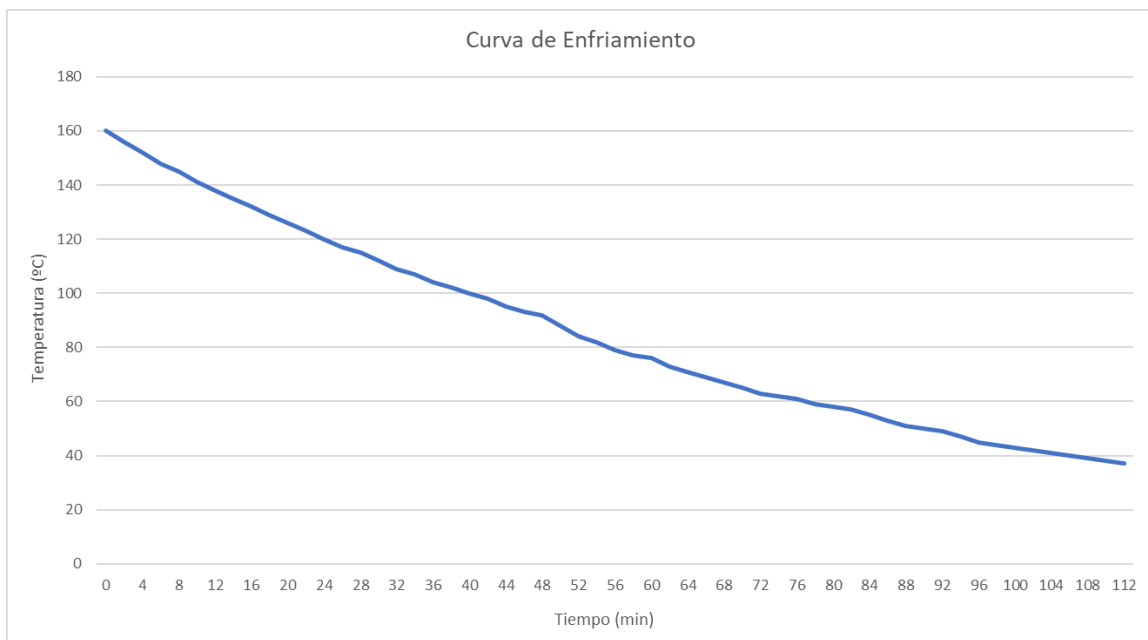


Ilustración 87. Curvas de temperaturas durante el enfriamiento del horno.

Como resultado del tratamiento térmico en el horno se puede apreciar que el color del molde pasará a un amarillo más oscuro.



Ilustración 88. Resultado final del molde tras los procesos de curado y tratamiento térmico.

4.3. Comprobación dimensional

Una vez concluidos todos los procesos de curado y tratamiento térmico aplicados al molde impreso, se procede a realizar una verificación dimensional en relación al diseño original del molde. Esto permite determinar si durante la impresión o alguno de los procesos de curado o tratamiento ha habido alguna variación en las dimensiones del molde. En caso de que se detecte alguna variación, será necesario tener en cuenta dichas desviaciones para ajustar el diseño en consecuencia.

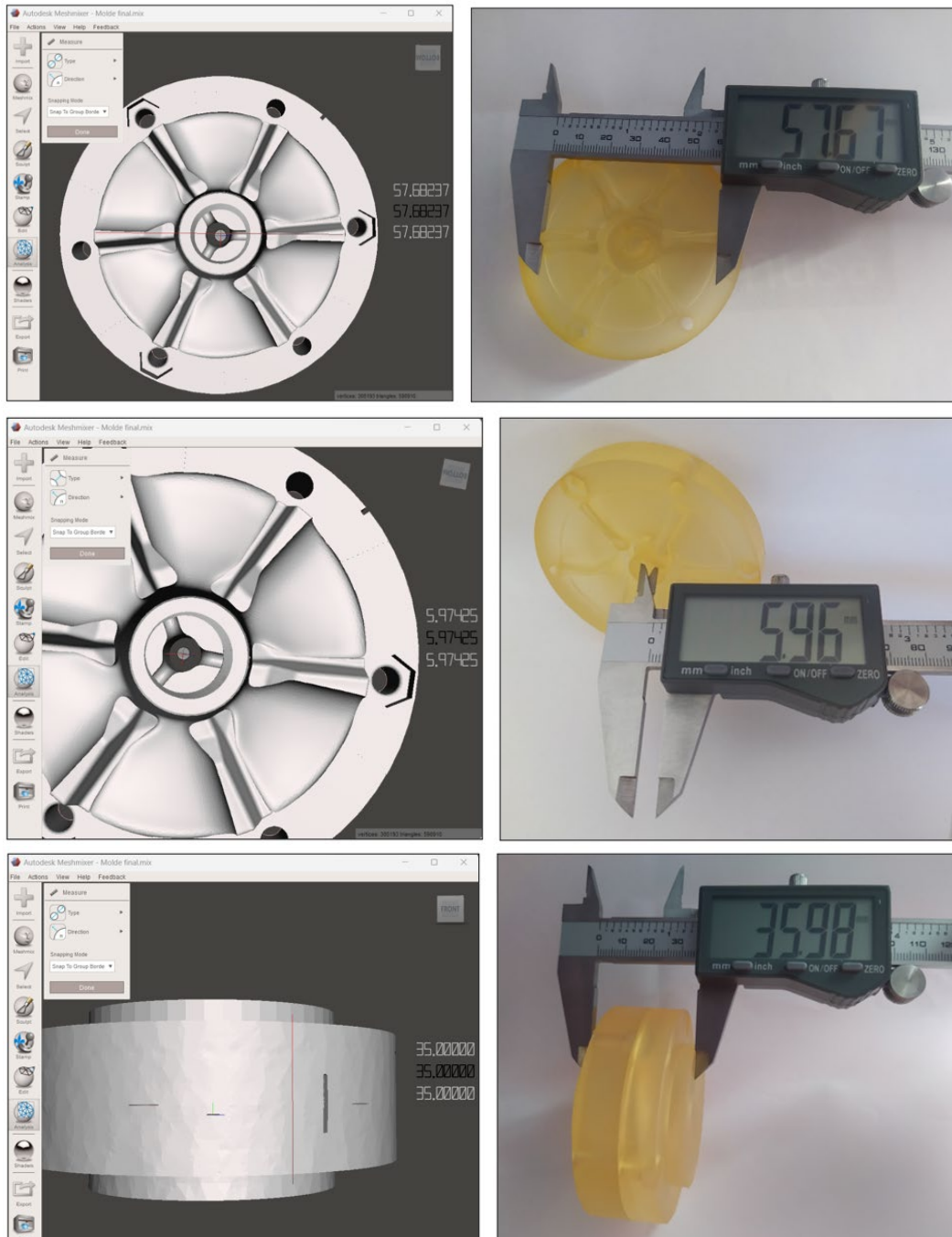


Ilustración 89. Comprobación de las dimensiones del molde.

Como se puede observar después de la impresión y el posprocesado el molde mantiene sus dimensiones de diseño, exceptuando en la altura que ha adquirido casi 1 mm más. Nos obstante, esta dimensión no tiene mucha importancia dentro de este análisis, y puede estar influida por los puntos de apoyo de los soportes.

5. PROCESO DE INYECCIÓN DEL MOLDE

Con el molde finalizado solo queda hacer la prueba de inyección, utilizando nuevamente el centro de termoformado 911. Anteriormente se utilizó en módulo del horno para realizar el tratamiento térmico al molde, sin embargo, en esta ocasión a parte del módulo del horno también se utilizará el módulo de inyección.

El primer paso a realizar es el cálculo del material de la cavidad necesario para realizar la inyección, calculando principalmente el peso de la cavidad del molde. Para ello, nos ayudaremos de la simulación del llenado de la cavidad anteriormente realizada mediante el programa de Moldflow, la cual en una de sus opciones nos indica el peso total de la cavidad. Una vez obtenido, nos iremos al taller a por el material, el polietileno, y se procederá con el pesaje de la cantidad indicada.

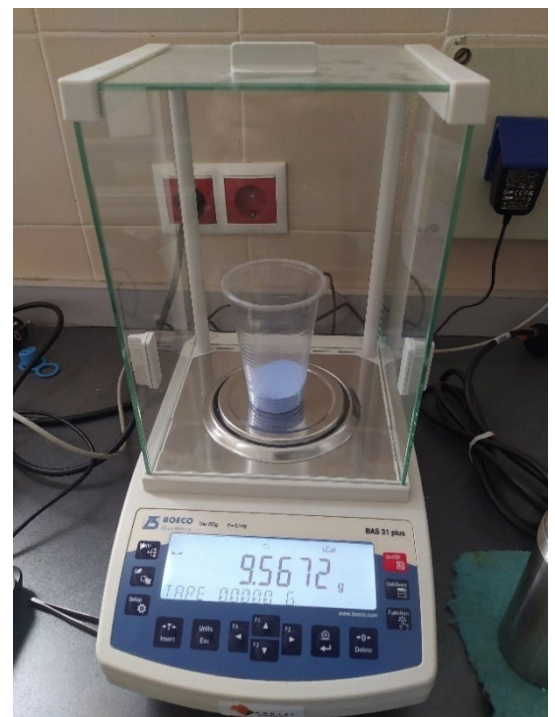


Ilustración 90. Simulación del peso de la cavidad mediante Moldflow (*izquierda*) y pesaje de polietileno realmente utilizado para la inyección (*derecha*).

Debido a que el polietileno en la simulación es ligeramente distinto al utilizado durante la inyección y al hecho de que el modelo empleado en la misma simulación contiene una apertura de inyección mayor a la real, se decidió utilizar un poco menos de la cantidad estimada por la simulación, como se puede observar en la *Ilustración 90*.

A continuación, se introduce el material en el crisol del centro de termoformado empleado para inyección y precalentaremos el horno a 195 °C donde, una vez alcanzada la temperatura, introduciremos el crisol. Este precalentamiento es necesario para lograr que el polietileno en polvo se funda y esté preparado para realizar la inyección.

Una vez el horno alcance la temperatura indicada, introduciremos el crisol en su interior y

esperaremos 20 minutos, tiempo estimado para que el polietileno se funda. Es importante tener cuidado y realizar estas operaciones utilizando guantes y elementos de protección adecuados debidos a las altas temperaturas con las que se trabaja. Además de utilizar la herramienta específica para la manipulación del crisol para situarlo en el módulo de inyección del centro de termoformado.

Durante estos 20 minutos preparemos el molde para la inyección. Para ello, tendremos que introducir las tuercas en las cavidades preparadas con el objetivo de ayudar a abrir el molde después de todo el proceso y poder extraer la pieza. Posteriormente cerraremos la cavidad asegurándonos que de que los tornillos y tuercas estén lo suficientemente apretados para que durante el proceso la presión de inyección no provoque una fuga de material más allá de una pequeña rebaba.

Finalmente, el molde se situa en el módulo de inyección, ya que este tipo de moldes no necesitan precalentarse a diferencia de los moldes metálicos en los que sin el precalentamiento del mismo puede generar una solidificación prematura del material al entrar en contacto con la superficie del molde a menor temperatura.

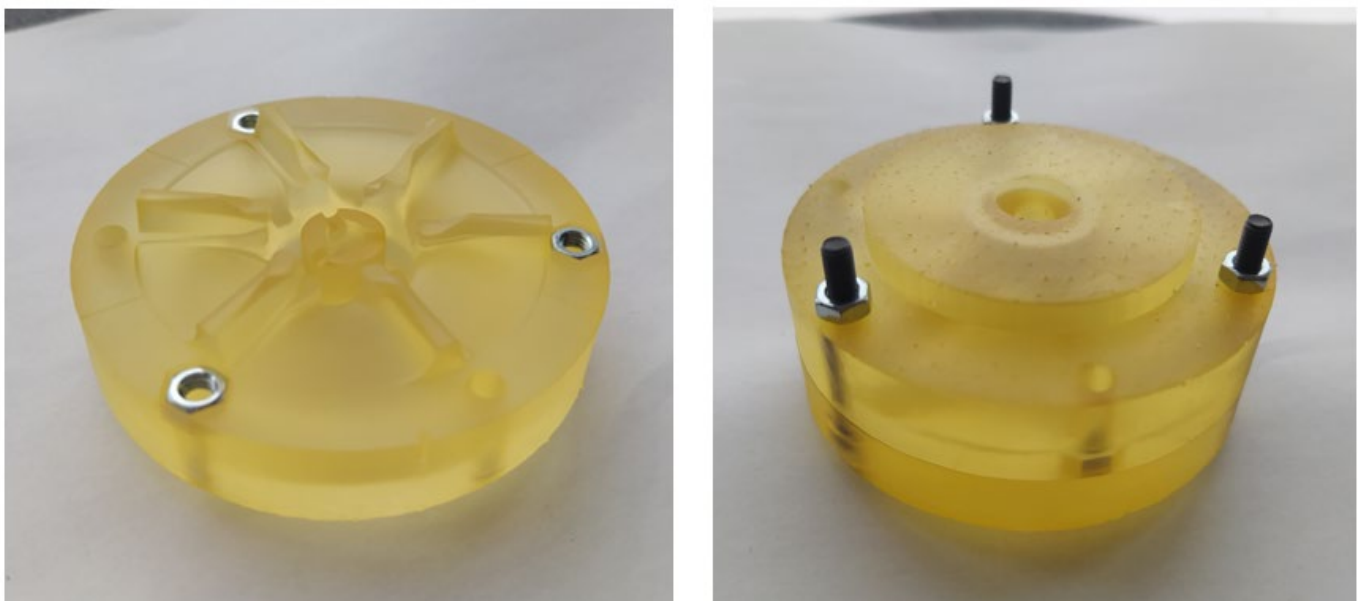


Ilustración 91. Tuerca para desmoldeo (*izquierda*) y cierre del molde (*derecha*).

Transcurridos los 20 minutos necesarios para que se funda el polietileno sacaremos el crisol del horno y lo introduciremos en el módulo de inyección con mucho cuidado empleando la herramienta mencionada anteriormente. Una vez colocado correctamente sobre el molde y siguiendo el *manual de instrucciones y mantenimiento* del equipo procederemos a realizar la inyección. Esta únicamente se basa en un émbolo accionado neumáticamente que empuja el material a través de la boquilla del crisol hasta el bebedero del molde, llenado su cavidad.

Finalizado el proceso de inyección procedemos a apagar el equipo y a retirar el crisol para su enfriamiento. Se puede observar que el material ha conseguido salir y desbordarse por uno de los agujeros encargados del posterior desmoldeo (*Ilustración 93, 4*), razón por la que se decidió realizar la parada del proceso de inyección.

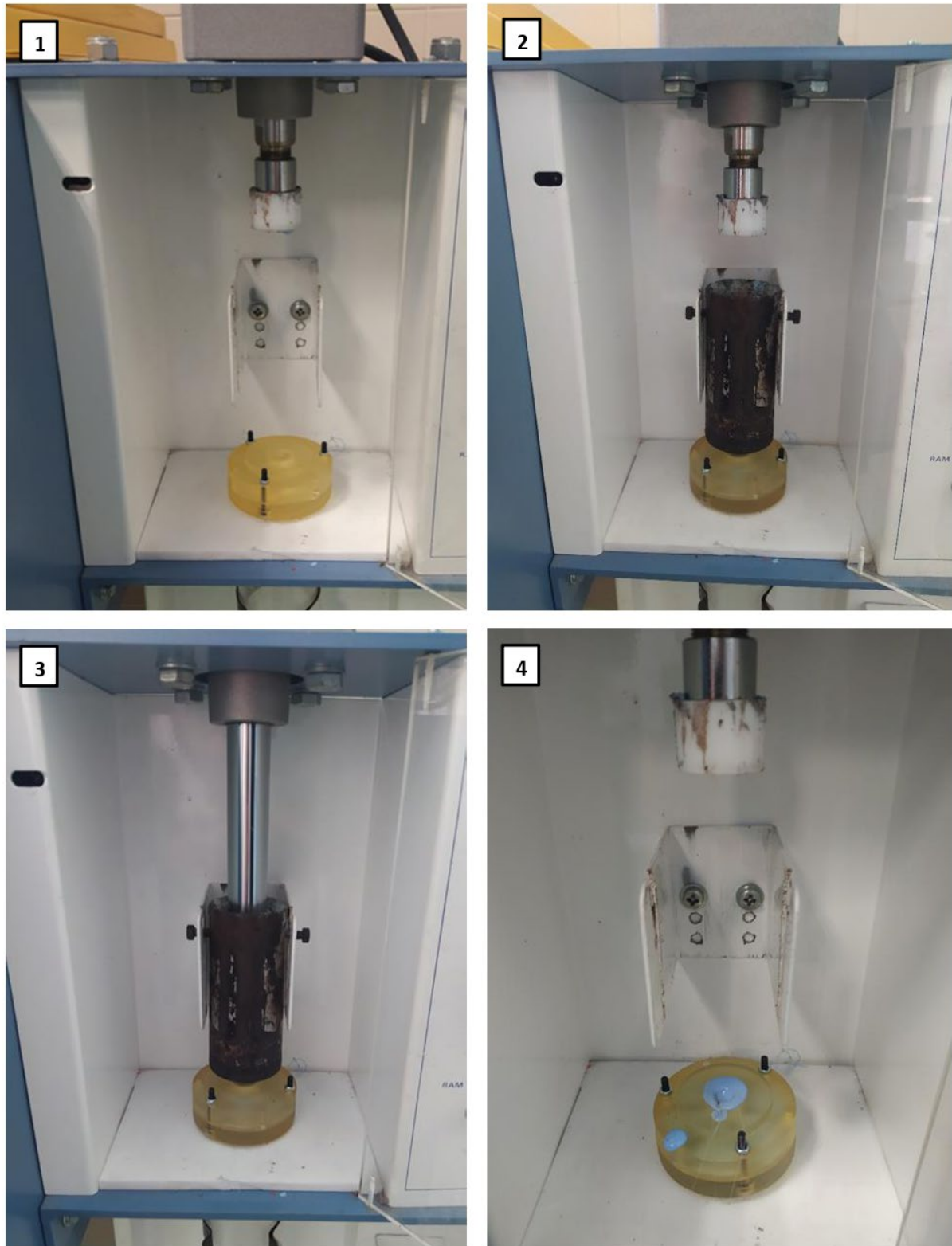


Ilustración 92. Proceso de inyección. Introducción del molde en el módulo de inyección (1), colocación del crisol con el polietileno fundido (2), descenso el émbolo e inyección del molde (3) y retirado del crisol finalizada la inyección (4).

El molde se dejará enfriar un día entero para lograr una perfecta solidificación del material en su cavidad y de esta manera asegurarnos que al desmoldar no se genere ninguna deformación en la pieza.

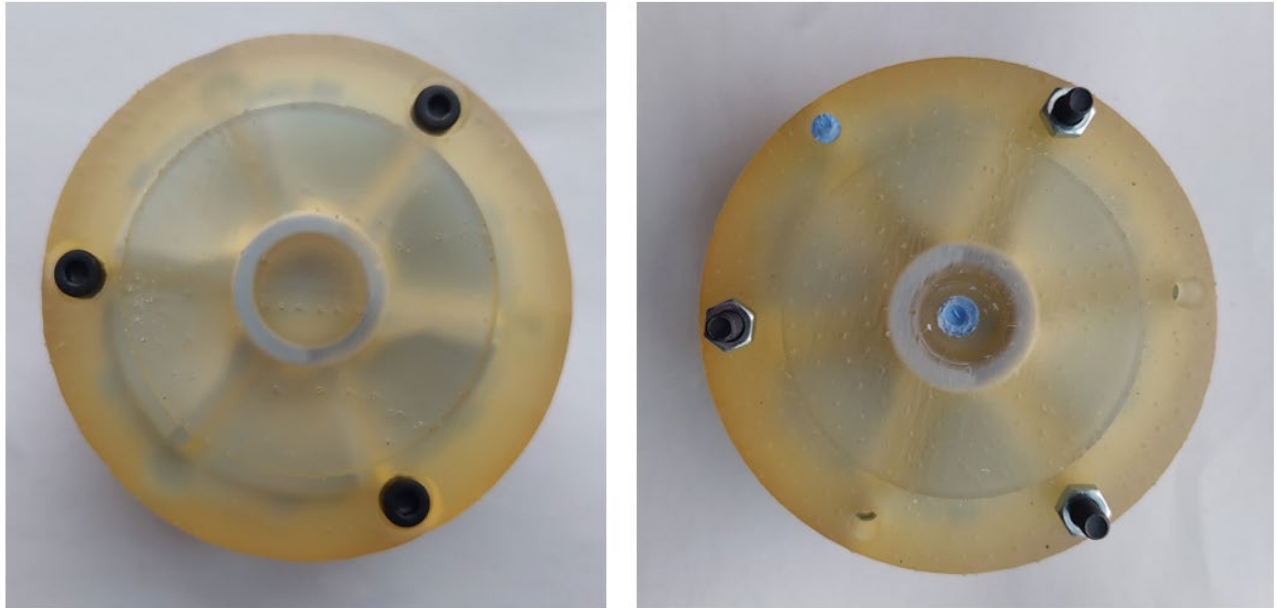


Ilustración 93. Molde tras el proceso de inyección y posterior enfriamiento.

6. RESULTADOS

Transcurrido el tiempo de enfriamiento pasaremos a realizar el desmoldeo. Para ello, se retiran los pernos de sujeción y se emplea el sistema descrito en el capítulo 2.2.3. *Diseño de los pernos de sujeción y desmoldeo*, mostrado también en la *Ilustración 91*.

Al realizar el roscado de los tornillos, se observa que el molde se abre fácilmente y sin dificultades, requiriendo apenas una fuerza de roscado moderada. Esto demuestra que, a pesar de no haber sido utilizado ningún agente de desmoldeo, el desmoldeo se produce de manera efectiva, en parte gracias al acabado superficial del molde. En este punto, se pueden apreciar con mayor claridad las rebabas y el exceso de material generados durante la inyección del molde.

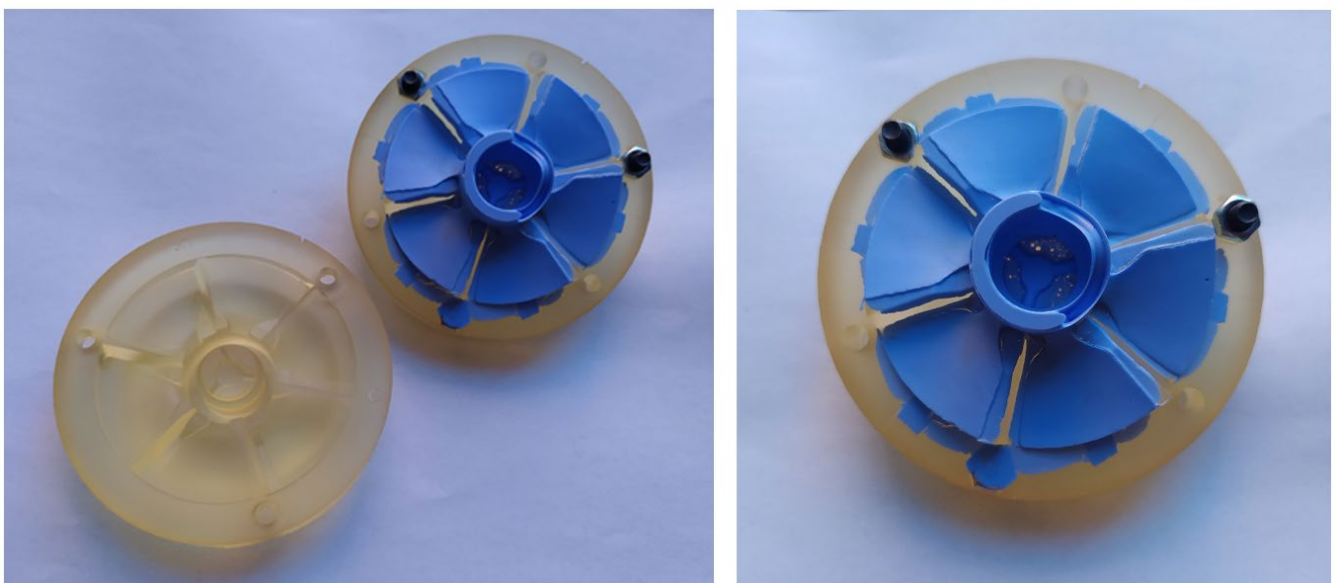


Ilustración 94. Desmoldeo y rebabas en la hélice inyectada.

Para completar la extracción de la otra parte de la hélice, se requiere ejercer una fuerza ligeramente mayor debido a la presencia del bebedero en esta zona del molde, así como a la cavidad de la tuerca que terminó rellena con el exceso de material durante la inyección. No obstante, de manera similar a la primera parte y a pesar de contar con ángulos de salida limitados, la hélice se extrae sin dificultades.



Ilustración 95. Hélice desmoldada completamente.

Tras retirar y limpiar todo el exceso de material de hélice, se pasará a realizar un análisis de la pieza inyectada.

En relación a las palas de la hélice, se observa que han sido inyectadas de manera adecuada y los canales de ventilación han funcionado sin contratiempos durante la inyección. No obstante, se han identificado atrapamientos de aire en los extremos del eje, tal como se había previsto en la simulación realizada. Inicialmente, no se incluyeron respiraderos en dichos extremos debido a la posible interferencia con la extracción de la pieza. Sin embargo, al examinar detenidamente la extracción del bebedero y la cavidad de la tuerca de desmoldeo, estos se han podido retirar de manera sencilla gracias a la superficie lisa del molde, permitiendo su deslizamiento y salida sin dificultades. Por lo tanto, la incorporación de respiraderos en los extremos del molde se considera una posible medida efectiva para evitar o reducir el atrapamiento de aire, sin afectar el proceso de desmoldeo de la pieza.



Ilustración 96. Atrapamiento de aire en la parte superior del eje.



Ilustración 97. Atrapamiento de aire en la parte inferior del eje.

Respecto al molde tras el proceso de inyección y su posterior enfriamiento, se observa la ausencia de deformaciones a lo largo de toda su superficie. Tanto la cavidad de las palas como los canales de distribución y el bebedero mantienen su forma original, sin verse afectadas por la temperatura de inyección del termoplástico.

En consecuencia, se puede deducir que la resina High Temp empleada, una vez sometida a los procesos de curado y tratamientos térmicos correspondientes, adquiere las propiedades térmicas necesarias para resistir el proceso de inyección. Estas características la posicionan como una opción idónea para su implementación como material en la fabricación de moldes, superando ampliamente las expectativas previamente establecidas para dicho material.

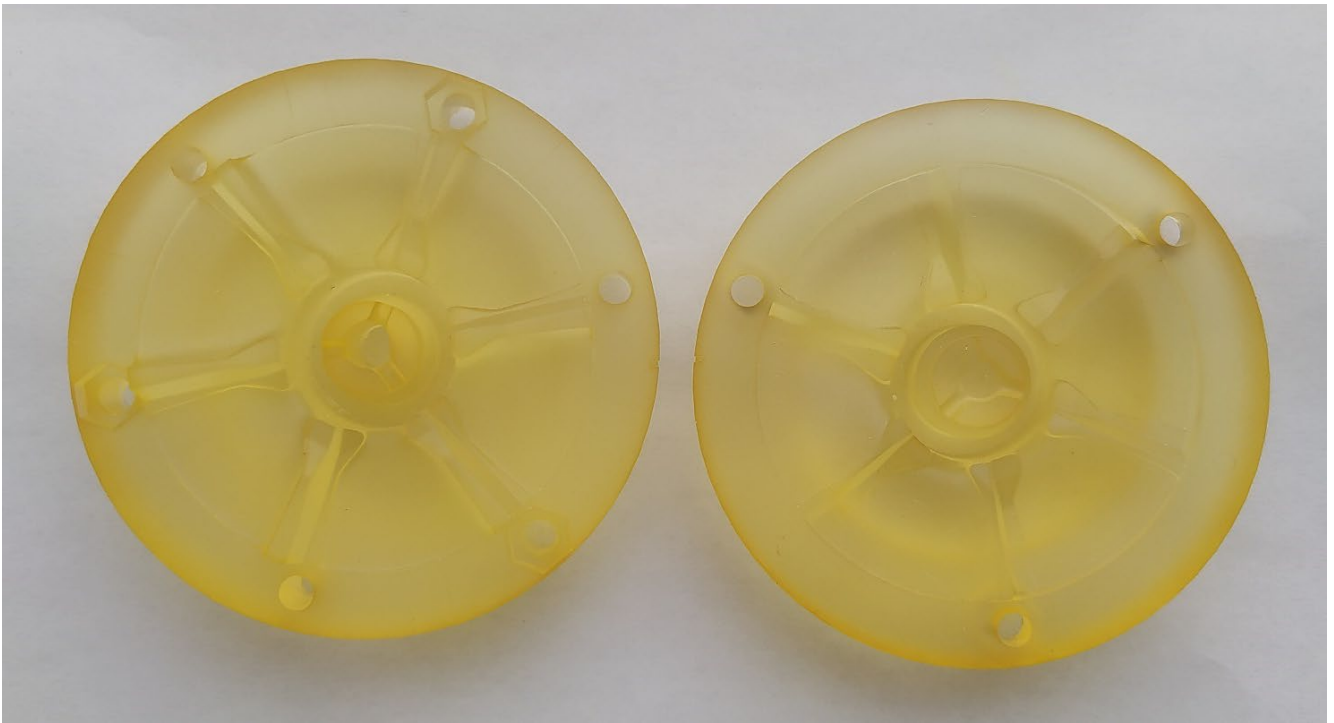


Ilustración 98. Molde tras el proceso de inyección, no se aprecian deformaciones en su superficie.

7. CONCLUSIONES FINALES

Como se ha podido observar en este trabajo, la impresión 3D representa una muy buena alternativa a la fabricación de moldes de inyección convencionales. Esto se debe a la posibilidad de dejar atrás su utilidad únicamente como moldes de pruebas y ensayos, y pasar a convertirse en moldes completamente funcionales y definitivos.

Este tipo de tecnología de impresión 3D ofrece una mayor libertad de diseño y flexibilidad en la creación de moldes complejos y personalizados, haciendo posible la fabricación de moldes con geometrías complejas, cavidades internas huecas, canales de optimizados y detalles finos, que serían difíciles o incluso imposibles de lograr utilizando métodos de fabricación convencionales.

Por otro lado, la impresión 3D permite una reducción significativa en los tiempos de producción. Esto es debido a que en la fabricación tradicional de moldes de inyección se involucran procesos complejos con equipos y mano de obra especializada, a diferencia de la impresión 3D que puede producir un molde completo en un solo proceso automatizado, lo que acelera considerablemente los tiempos de fabricación.

Dentro de las diferentes tecnologías de impresión 3D podemos destacar especialmente la estereolitografía o SLA como una gran opción a la fabricación de moldes de inyección debido a su alta precisión y su acabado superficial liso. Además, con el desarrollo de nuevas resinas especializadas y la aplicación de los debidos tratamientos y posprocesados a las impresiones, se ha logrado conseguir una mejora de las propiedades mecánicas entre las que destacar la mejora de

resistencia y durabilidad, o resistencia a altas temperaturas. Esta última siendo ideal para la creación de moldes de inyección capaces de aguantar las altas temperaturas del proceso.

En resumen, la impresión 3D ofrece ventajas significativas en términos de diseño, tiempo de producción, costos y flexibilidad, lo que la convierte en una de las mejores alternativas para la producción de moldes de inyección en comparación con los métodos tradicionales de fabricación.

Bibliografía

Formlabs (Enero 2020), Introducción a la impresión 3D por estereolitografía. <https://3d.formlabs.com/libro-blanco-introduccion-a-la-impresion-3d-por-estereolitografia/>, pp. 9-10.

Formlabs (Agosto 2021), Moldmaking with 3D Prints: Techniques for Prototyping and Production. <https://3d.formlabs.com/moldmaking-with-3d-prints/>, pp. 13-14.

Formlabs (Julio 2022), Low-Volume Rapid Injection Molding With 3D Printed Molds. <https://3d.formlabs.com/injection-molding/>, pp. 54-56.

Formlabs (Febrero 2023), Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. <https://3d.formlabs.com/white-paper-guide-to-selective-laser-sintering-3d-printing/>, p. 11.

Jorquera Ortega, A. & Coronel Romero, P. (2016) *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Área de Educación, pp. 7-12.

Martín Vicente, L. et al. (1976) *INGENIERIA de moldes para plástico*. Bilbao: Urmo, p. 5

Morton-Jones, D. H. (1993) *Procesamiento de plástico*. México [etc: Limusa, pp. 3-6.

Anexo I. Especificaciones de los materiales.

DATOS DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL

Rigid 10K Resin

	MÉTRICO				MÉTODO
	No poscurada	Curado con luz UV ¹	Curado con luz UV + Curado térmico ²	Curado con luz UV + Granallado	
Propiedades de tracción					
Resistencia a la rotura por tracción	55 MPa	65 MPa	53 MPa	88 MPa	ASTM D638-14
Módulo de tracción	7,5 GPa	10 GPa	10 GPa	11 GPa	ASTM D638-14
Alargamiento de rotura	2 %	1 %	1 %	1,7 %	ASTM D638-14
Propiedades de flexión					
Resistencia a la flexión	84 MPa	126 MPa	103 MPa	158 MPa	ASTM D790-15
Módulo de flexión	6 GPa	9 GPa	10 GPa	9,9 GPa	ASTM D790-15
Propiedades de impacto					
Resiliencia IZOD entallada	16 J/m	16 J/m	18 J/m	20 J/m	ASTM D256-10
Resiliencia IZOD no entallada	41 J/m	47 J/m	41 J/m	130 J/m	ASTM D4812-11
Propiedades térmicas					
Temperatura de flexión bajo carga a 0,45 MPa	65 °C	163 °C	218 °C	92 °C	ASTM D648-16
Temperatura de flexión bajo carga a 1,8 MPa	56 °C	82 °C	110 °C	238 °C	ASTM D648-16
Expansión térmica (0-150 °C)	48 µm/m/°C	47 µm/m/°C	46 µm/m/°C	41 µm/m/°C	ASTM E831-13

Generación de gas tóxico

Norma de ensayo BSS 7239 (comparable a la prueba NFPA 258)	Concentración máxima permitida según la BSS 7239 (ppm)	Modo con llama (ppm)	Modo sin llama (ppm)
Cianuro de hidrógeno (HCN)	150	1	0,5
Monóxido de carbono (CO)	3500	50	10
Óxidos de nitrógeno (N ₂ O _x)	100	<2	<2
Dióxido de azufre (SO ₂)	100	<1	<1
Fluoruro de hidrógeno (HF)	200	<1,5	<1,5
Cloruro de hidrógeno (HCl)	500	1	<1

Densidad de humo

Norma de ensayo	Absorbancia específica		
	a los 90 s	a los 4 min	Valor máximo
ASRM E662 (modo con llama)	2	95	132
ASRM E662 (modo sin llama)	0	1	63

Inflamabilidad

Norma de ensayo	Calificación
Apartado 7 de la Norma UL 94 (3 mm)	HB

COMPATIBILIDAD DE LOS DISOLVENTES

Incremento de peso porcentual a lo largo de 24 horas de un cubo impreso de 1 × 1 × 1 cm, poscurado y sumergido en el disolvente respectivo:

Disolvente	Incremento de peso en 24 h (%)	Disolvente	Incremento de peso en 24 h (%)
Ácido acético 5 %	<0,1	Isotano (gasolina)	0
Acetona	<0,1	Aceite mineral ligero	0,2
Alcohol isopropílico	<0,1	Aceite mineral pesado	<0,1
Lejía ~5 % NaOCl	0,1	Agua salada (3,5 % NaCl)	0,1
Acetato de butilo	0,1	Solución de hidróxido de sodio (0,025 % PH 10)	0,1
Gasóleo	0,1	Agua	<0,1
Éter monometílico de dietilenglicol	0,4	Xileno	<0,1
Aceite hidráulico	0,2	Ácido fuerte (HCl concentrado)	0,2
Skydrol 5	0,6	Éter monometílico de tripropilenglicol	0,4
Peróxido de hidrógeno (3 %)	<0,1		

Todas las muestras de ensayo se imprimieron con la Form 3.

¹ Datos obtenidos de piezas impresas con la Form 3, con alturas de capa de 100 µm. Las piezas se han sometido a un poscurado con una Form Cure a 70 °C durante 60 minutos.

² Datos obtenidos de piezas impresas con la Form 3, con alturas de capa de 100 µm. Las piezas se han sometido a un poscurado con una Form Cure a 70 °C durante 60 minutos y, posteriormente, a un curado térmico adicional a 90 °C durante 125 minutos.

MATERIAL PROPERTIES DATA

High Temp Resin

	METRIC ¹			IMPERIAL ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Post-Cured + additional Thermal Cure ⁴	Green ²	Post-Cured ³	Post-Cured + additional Thermal Cure ⁴	
Tensile Properties							
Ultimate Tensile Strength	21 MPa	58 MPa	49 MPa	3031 psi	8456 psi	7063 psi	ASTM D638-14
Tensile Modulus	0.75 GPa	2.8 GPa	2.8 GPa	109 ksi	399 ksi	406 ksi	ASTM D638-14
Elongation at Break	14%	3.3%	2.3%	14%	3.3%	2.3%	ASTM D638-14
Flexural Properties							
Flexural Strength at Break	24 MPa	95 MPa	97 MPa	3495 psi	13706 psi	14097 psi	ASTM D 790-15
Flexural Modulus	0.7 GPa	2.6 GPa	2.8 GPa	100 ksi	400 ksi	406 ksi	ASTM D 790-15
Impact Properties							
Notched IZOD	33 J/m	18 J/m	17 J/m	0.61 ft-lbf/in	0.34 ft-lbf/in	0.32 ft-lbf/in	ASTM D256-10
Thermal Properties							
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	44 °C	78 °C	101 °C	111 °F	172 °F	214 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	49 °C	120 °C	238 °C	120 °F	248 °F	460 °F	ASTM D 648-16
Thermal Expansion	118 µm/m/°C	80 µm/m/°C	75 µm/m/°C	41 µin/in/°F	44 µin/in/°F	41 µin/in/°F	ASTM E 831-13

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

² Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, High Temp settings, washed for 5 minutes in Form Wash and air dried without post cure.

³ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes.

⁴ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 180 minutes.

SOLVENT COMPATIBILITY

Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent

Solvent	24 hr size gain, %	24 hr weight gain, %	Solvent	24 hr size gain, %	24 hr weight gain, %
Acetic Acid 5%	< 1	< 1	Mineral oil (Light)	< 1	< 1
Acetone	< 1	2	Mineral oil (Heavy)	< 1	< 1
Bleach ~5% NaOCl	< 1	< 1	Salt Water (3.5% NaCl)	< 1	< 1
Butyl Acetate	< 1	< 1	Skydrol 5	< 1	1.1
Diesel Fuel	< 1	< 1	Sodium Hydroxide solution (0.025% PH 10)	< 1	< 1
Diethyl glycol Monomethyl Ether	< 1	1	Strong Acid (HCl conc)	1.2	< 1
Hydraulic Oil	< 1	< 1	Tripropylene glycol monomethyl ether	< 1	< 1
Hydrogen peroxide (3%)	< 1	< 1	Water	< 1	< 1
Isooctane (aka gasoline)	< 1	< 1	Xylene	< 1	< 1
Isopropyl Alcohol	< 1	< 1			

DATOS DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL

Grey Pro Resin

	MÉTRICO ¹		IMPERIAL ¹		MÉTODO
	No poscurada ²	Poscurada ³	No poscurada ²	Poscurada ³	
Propiedades de tracción					
Resistencia a la rotura por tracción	35 MPa	61 MPa	5076 psi	8876 psi	ASTM D 638-14
Módulo de tracción	1,4 GPa	2,6 GPa	203 ksi	377 ksi	ASTM D 638-14
Alargamiento de rotura	33 %	13 %	33 %	13 %	ASTM D 638-14
Propiedades de flexión					
Resistencia a la flexión a un 5 % de esfuerzo	39 MPa	86 MPa	5598 psi	12400 psi	ASTM D 790-15
Módulo de flexión	0,94 GPa	2,2 GPa	136 ksi	319 ksi	ASTM D 790-15
Propiedades de impacto					
Resiliencia IZOD entallada	No sometida a ensayo	19 J/m	No sometida a ensayo	0,35 ft-lbf/in	ASTM D 256-10
Propiedades térmicas					
Temperatura de flexión bajo carga a 1,8 MPa	No sometida a ensayo	62 °C	No sometida a ensayo	144 °F	ASTM D 648-16
Temperatura de flexión bajo carga a 0,45 MPa	No sometida a ensayo	78 °C	No sometida a ensayo	171 °F	ASTM D 648-16
Expansión térmica (0-150 °C)	No sometida a ensayo	79 µm/mv°C	No sometida a ensayo	43 µin/in/°F	ASTM E 831-13

¹ Las propiedades pueden variar en función de la geometría de la pieza, la orientación y ajustes de impresión y la temperatura.

² Datos obtenidos de piezas no poscuradas, impresas con la Form 2, a 100 µm, con ajustes para Grey Pro Resin y sin tratamiento adicional.

³ Datos obtenidos de piezas impresas con la Form 2, a 100 µm y con ajustes para Grey Pro Resin. Las piezas se han sometido a un poscurado con una Form Cure a 80 °C durante 120 minutos.

COMPATIBILIDAD DE LOS DISOLVENTES

Incremento de peso porcentual a lo largo de 24 horas de un cubo impreso de 1 × 1 × 1 cm, poscurado y sumergido en el disolvente respectivo:

Disolvente	Incremento de peso en 24 h (%)	Disolvente	Incremento de peso en 24 h (%)
Ácido acético 5 %	0,8	Isoctano (gasolina)	<0,1
Acetona	11,0	Aceite mineral pesado	0,4
Alcohol isopropílico	1,6	Aceite mineral ligero	0,3
Lejía ~5 % NaOCl	0,7	Agua salada (3,5 % NaCl)	0,6
Acetato de butilo	0,8	Solución de hidróxido de sodio (0,025 % pH 10)	0,7
Combustible diesel	<0,1	Agua	0,8
Éter monometílico de dietilenglicol	2,4	Xileno	0,4
Aceite hidráulico	0,2	Ácido fuerte (concentración de cloruro de hidrógeno)	8,2
Skydrol 5	0,5		
Peróxido de hidrógeno (3 %)	0,8		

<https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/1801086-TDS-ES-0P.pdf>

Anexo II. Especificaciones de los equipos.

EINSCAN-SP/ SP V2

Modelo	Einscan-SP	Einscan-SP V2
Modo de escaneo	Escaneo fijo con plataforma giratoria; Escaneo fijo sin plataforma giratoria	
Modo de alineación	Alineación manual; Alineación por geometría; Alineación con plataforma giratoria; Alineación por marcadores; Alineación por marcadores codificados de la plataforma giratoria	
Exactitud de escaneo	≤0.05mm	
Volumen mínimo de escaneo	30mm × 30mm × 30mm	
Volumen máximo de escaneo	Escaneo fijo: 1200mm × 1200mm × 1200mm Plataforma giratoria: 200mm × 200mm × 200mm	
Alcance de un solo escaneo	200mm × 150mm	
Velocidad de un solo escaneo	< 8s	< 1s
Velocidad de una vuelta de escaneo	< 2mins	< 45s
Distancia entre puntos	0.17mm ~ 0.2mm	
Escaneo a color	Sí	
Formatos de salida	OBJ, STL, ASC, PLY, 3MF	
Resolución de cámara	1.3MP	
Fuente de luz	LED Blanco	
Distancia de trabajo	290mm ~ 480mm	
Fuente de energía	12V, 3.33A, 40W	
Configuración requerida	SO: Win7, 8, 10 (64bit) CPU: Intel Dual Core i5 o superior; RAM: > 16GB Tarjeta gráfica: Nvidia GTX660 o superior; Memoria de video: > 2GB Puerto USB: 2.0/ 3.0	
Tamaño del dispositivo	570mm × 210mm × 210mm	
Tamaño del paquete	640mm × 410mm × 230mm	
Peso	4.2KG	
Certificados	CE, FCC, ROHS, WEEE	
Placa de calibración	Placa de calibración de elevada exactitud	
Plataforma giratoria	Con marcadores codificados	
Capacidad de carga de la plataforma giratoria	5KG	
Accesorios	Trípodes; Software para Solid Edge SHINING 3D Edition	



Printer



Form 3B+

Technology

Low Force Stereolithography
(LFS)TM

XY Resolution^a

25 microns

Laser Spot Size

85 microns

Laser Power

One 250 mW laser

Build Volume (W x D x H)

14.5 × 14.5 × 18.5 cm
5.7 × 5.7 × 7.3 in

Layer Thickness^b

25 – 300 microns
.001 – .012 in

Biocompatible Materials

Yes

PreForm Dental

Yes

Scan to Model

Yes

Fast Arch Printing

Yes

<https://formlabs.com/es/3d-printers/form-3/tech-specs/>

	Form Wash
Printer Compatibility	Form 3+, Form 3B+, Form 3, Form 3B, Form 2
Dimensions	26.2 x 29.3 x 34.0 cm 10.3 x 11.5 x 13.4 in Height when open: 64 cm (25.2 in)
Weight	6.7 kg 14.5 lbs
Bucket Volume	8.6 L
Maximum Part Size	14.5 x 14.5 x 17.5 cm 5.7 x 5.7 x 6.9 in
Suggested Operating Environment	Suggested 18–28 °C Suggested 64–82 °F
Agitation Method	Magnetically coupled impeller
Included Accessories	a. Wash Bucket b. Wash Basket c. Hydrometer d. Siphon Pump e. Flexible Scraper f. Scraper g. Tweezers h. Flush Cutters
Power Requirements	90–240 V 2.0 A 50/60 Hz 50 W
Compatible Solvents	IPA, TPM, Water

<https://formlabs.com/es/store/post-processing/form-wash/>

	Form Cure
Printer Compatibility	Form 3+, Form 3B+, Form 3, Form 3B, Form 2
Dimensions	26.2 x 26.2 x 34.0 cm 10.3 x 10.3 x 13.4 in Height when open: 64 cm (25.2 in)
Weight	5.6 kg 12.4 lbs
Turntable Diameter	19.3 cm 7.6 in
Maximum Part Size	18.5 cm 7.28 in
Operating Temperature	Suggested 18—28 °C Suggested 64—82 °F
Maximum Cure Chamber	80 °C 176 °F
Light Source	13 multi-directional LEDs
LED Power	39 W
LED Wavelength	405 nm
Power Requirements	90–240 V 6.0 A 50/60 Hz 144 W

<https://formlabs.com/es/store/post-processing/form-cure/>