



universidad  
de león



# Escuela de Ingenierías Industrial, MECÁNICA y Aeroespacial

## GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Fin de Grado

ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE SOPORTES  
PARA LA IMPRESIÓN DE PIEZAS CON GEOMETRÍAS  
COMPLEJAS EN CERÁMICAS TÉCNICAS, MEDIANTE  
ESTEREOLITOGRAFÍA

STUDY AND OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF  
SUPPORTS FOR THE PRINTING OF COMPLEX PIECES IN  
TECHNICAL CERAMICS, BY STEREOLITHOGRAPHY

Autor: Aarón Méndez Souto  
Tutor: Susana Martínez Pellitero

(Julio, 2022)

**UNIVERSIDAD DE LEÓN**  
**Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y**  
**Aeroespacial**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**Trabajo de Fin de Grado**

**ALUMNO:** Aarón Méndez Souto

**TUTOR:** Susana Martínez Pellitero

**TÍTULO:** Estudio y optimización del diseño de soportes para la impresión de piezas con geometrías complejas en cerámicas técnicas, mediante estereolitografía.

**TITLE:** Study and optimization of the design of supports for printing pieces with complex geometries in technical ceramics, by stereolithography.

**CONVOCATORIA:** Julio, 2022

**RESUMEN:**

La estereolitografía con materiales cerámicos es un tipo de fabricación aditiva que permite la creación de piezas cerámicas con geometrías complejas. Esto presenta un gran interés para diversas industrias como la biomédica, la aeroespacial, la electrónica o la automovilística. Sin embargo, a día de hoy, se trata de una tecnología que se encuentra en una fase relativamente temprana de su desarrollo. Es por este motivo por el que se están llevando a cabo diferentes estudios encaminados a mejorar y optimizar este proceso, así como a buscar el empleo de más materiales cerámicos. No obstante, no se han encontrado estudios encaminados al diseño de soportes y la optimización de los mismos para la fabricación de las piezas mediante esta tecnología. Por tanto, en este trabajo se diseñarán varios soportes para corregir los problemas más comunes que han ido apareciendo durante la fabricación de las piezas mediante SLA cerámica. Dentro de los soportes diseñados existen 2 tipos de soportes diferentes, los soportes con contacto y los soportes sin contacto. Los soportes con contacto se emplean principalmente para evitar la aparición del efecto curling en las piezas, el cual consiste en el levantamiento de las esquinas de la pieza. Como estos soportes están en contacto con la pieza, es necesario facilitar su eliminación posterior. Por otro lado, los soportes sin contacto con la pieza se emplean principalmente para evitar los desplazamientos de las capas de la pieza durante el proceso de impresión y para el soporte de voladizos de las mismas. Ambos tipos de soportes serán diseñados en este trabajo para solucionar estos problemas, además de buscar optimizar su diseño para consumir la menor cantidad de material posible.

**ABSTRACT:**

Ceramic stereolithography is a type of additive manufacturing that allows the

printing of complex ceramic pieces. This characteristic arises a great interest in various fields like the biomedical, aerospace, electronical or automotive. However, nowadays, this technology is still in an early stage of development. Because of this, there has been a lot of studies with the objective of improving and optimizing this technology and for searching the implementation of more ceramic materials. Nevertheless, there have been not found many studies regarding the design and optimization of supports for ceramic SLA. For this reason, in this work, supports will be designed for correcting the common defects attached to ceramic SLA. Regarding these supports, there are 2 types of them, contact supports and contactless supports. On one hand, contact supports are used mainly for avoiding the curling effect in the printed pieces, which consist in the curling of the corners of the piece. Because this kind of supports are in direct contact with the part, they should be easy to remove. On the other hand, contactless supports are used mainly for avoiding the displacement of the layers during the part printing and for supporting their cantilevers. Both kind of supports are designed in this work for fixing these defects. Also, in this work, the design of these supports is going to be optimized to waste as little material as possible.

**Palabras clave:** SLA, estereolitografía, cerámica, soportes.

**Firma del alumno:**

**VºBº Tutor/es:**

# Índice.

1	Introducción.....	17
2	Estereolitografía.....	20
3	Estereolitografía cerámica.....	26
3.1	DEBINDING.....	28
3.2	SINTERING.....	37
3.3	RESINAS EMPLEADAS EN ESTEREOLITOGRAFÍA CON MATERIALES CERÁMICOS.....	46
3.4	PARÁMETROS DE LA ESTEREOLITOGRAFÍA CON CERÁMICAS.....	59
4	Metodología y equipamiento.....	65
4.1	PREPARACIÓN E IMPRESIÓN DE LAS PIEZAS.....	65
4.1.1	SOFTWARE PROPIETARIO.....	67
4.1.2	PREPARACIÓN DE LA MÁQUINA PARA LA IMPRESIÓN.....	70
4.2	EQUIPO DE LIMPIEZA.....	76
4.3	DEBINDING.....	79
4.4	SINTERIZADO.....	82
4.5	INSPECCIÓN Y VERIFICACIÓN DE LAS PIEZAS.....	85
4.5.1	ESCÁNER BREUCKMANN SMARTSCAN.....	85
4.5.2	Geomagic Design X.....	90
4.5.3	Geomagic Control X.....	90
5	Reglas de diseño para la fabricación de las piezas.....	92
5.1	REGLA 1. SOBREDIMENSIONAR LA PIEZA.....	92
5.2	REGLA 2. ESPESOR MÁXIMO DE LAS PAREDES DE LA PIEZA.....	93
5.3	REGLA 3. REDONDEADO DE LAS ESQUINAS EN ÁNGULOS REENTRANTES Y CAMBIOS DE SECCIÓN.....	93
5.4	REGLA 4. ESPACIO MÍNIMO ENTRE DOS PAREDES O AGUJEROS CONTIGUOS.....	93
5.5	REGLA 5. DISEÑAR SOPORTES ADECUADOS A LAS PIEZAS.....	94
5.6	REGLA 6. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN PARA PIEZAS DELICADAS.....	94
5.7	REGLA 7. DISEÑO DE CAVIDADES INTERIORES.....	96
5.8	REGLA 8. DISEÑO DE AGUJEROS PASANTES Y CIEGOS.....	96

5.9	REGLA 9. DISEÑO DE PIEZAS CON ESTRUCTURAS CON MATRICES DE CELOSÍAS. ....	97
5.10	REGLA 10. ORIENTACIÓN DE LAS PIEZAS EN LA CAMA DE IMPRESIÓN. ....	98
6	Diseño y comprobación de los soportes para las piezas realizadas mediante SLA con materiales cerámicos. ....	99
6.1	SOPORTES CON CONTACTO PARA EVITAR EL EFECTO CURLING. ....	102
6.1.1	DISEÑO DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 1.....	104
6.1.2	REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 2. ....	117
6.1.3	REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 3 Y PARA LA PIEZA 4. ....	126
6.2	SOPORTES SIN CONTACTO. ....	136
6.2.1	REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 5. ....	136
6.2.2	REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 6. ....	153
6.2.3	REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 7. ....	164
6.2.4	REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 8. ....	177
6.2.5	REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 9. ....	189
7	Conclusiones. ....	193
8	Líneas de investigación futura. ....	196
9	Referencias.....	197

# Índice de figuras.

Figura 2.1. Esquema de una máquina de estereolitografía. Fuente: [5] .....	21
Figura 2.2. a) Esquema del sistema de estereolitografía basado en la proyección; b) Esquema del sistema de estereolitografía basado en el escaneado. Fuente: [5] .....	23
Figura 2.3. a) SLA de arriba hacia abajo; b) SLA de abajo hacia arriba. Fuente: [6] .....	25
Figura 3.1. Esquema de los pasos a seguir para la obtención de una pieza final mediante el proceso de SLA con cerámica. ....	28
Figura 3.2. Gráfica de comparativa de la densidad de las piezas fabricadas con los 3 tipos de pasta en función del tipo de debinding realizado. Fuente: [9] .....	31
Figura 3.3. Fotografías del resultado obtenido tras someter a la pieza en verde a un proceso de debinding con aire. Fuente: [10] .....	32
Figura 3.4. a) Resultados obtenidos del secado de la pieza al aire; b) Resultados obtenidos del secado de la pieza con el desecante líquido PEG400. Fuente: [10] .....	33
Figura 3.5. Densidad y densidad relativa en función de la temperatura de sinterizado cuando el tiempo de mantenimiento es de 60 min. Fuente: [14] .....	40
Figura 3.6. Densidad y densidad relativa en función del tiempo de mantenimiento cuando la temperatura de sinterizado es de 1500°C. Fuente: [14] .....	41
Figura 3.7. Tamaño de las partículas de alúmina y de zirconia en función de la temperatura de sinterizado cuando el tiempo de mantenimiento es de 60 min. Fuente: [14] .....	42
Figura 3.8. Tamaño de las partículas de alúmina y zirconia en función del tiempo de mantenimiento cuando la temperatura de sinterizado es de 1500°C. Fuente: [14] .....	42
Figura 3.9. Esquema del aparato diseñado por O. Santoliquido et al., con el objetivo de permitir la fabricación de piezas de material cerámico a partir de mezclas con una elevada viscosidad. Fuente: [27] .....	55
Figura 3.10: Esquema del proceso de fabricación con el aparato diseñado por O. Santoliquido et al. Fuente: [27] .....	56
Figura 3.11. Diseños empleados en la comparativa de los 3 métodos de fabricación. Fuente: [27] .....	57
Figura 3.12. Resultados obtenidos tras la fabricación de las piezas. La 1ª columna corresponde con la orientación de abajo hacia arriba, la 2ª con la orientación de arriba hacia abajo y la 3ª empleando el dispositivo diseñado por O. Santoliquido et al. Fuente: [27] .....	57
Figura 3.13: Esquema de la utilidad de la compensación del spot del láser. Fuente: [16] .....	60

Figura 3.14. Imagen de la celda unitaria, así como de cada una de las estructuras diseñadas para el experimento, en las que varía el diámetro del puntal ( $d_s$ ).  
Fuente: [28] ..... 63

Figura 4.1. a) Fotografía de la máquina de estereolitografía 3DCERAM C900 FLEX disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León; b) Fotografía de la zona de impresión de la máquina de estereolitografía 3DCERAM C900 FLEX disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León; c) Fotografía del interior de la máquina de estereolitografía 3DCERAM C900 FLEX disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León en la que se puede apreciar el láser en la parte superior de la misma. .... 66

Figura 4.2. Imagen del programa de la máquina 3DCERAM C900 FLEX empleado para la configuración y visualización del proceso de impresión. .... 67

Figura 4.3. Imagen de la pestaña de “Shape” donde se configuran los parámetros del proceso de impresión de la máquina 3DCERAM C900 FLEX. .... 68

Figura 4.4. Imágenes de la previsualización del proceso de impresión a diferentes capas de altura durante este proceso. .... 70

Figura 4.5. Fotografía de la cama de impresión ya preparada con la placa magnética blanca, lista para seguir con el proceso de preparación de la máquina para la impresión..... 71

Figura 4.6. Fotografía del scraper en la que se puede apreciar una de sus 2 cuchillas, pudiendo ver en la parte superior de la misma los tornillos micrométricos empleados para su ajuste. .... 72

Figura 4.7. a) Depósito de la máquina 3DCERAM C900 FLEX; b) Depósito de la máquina 3DCERAM C900 FLEX con la tapa puesta, en la que se puede ver el orificio de salida del material; c) Base del depósito accionada por los pistones para sacar el material del depósito; d) Depósito de la máquina 3DCERAM C900 FLEX instalado en la máquina, en la parte inferior se pueden ver los pistones encargados del movimiento de la base del depósito..... 74

Figura 4.8. Imagen del aspecto que ha de presentar la pasta en el interior del depósito, correspondiendo el lado izquierdo de la imagen con el lado de la puerta de la máquina..... 75

Figura 4.9. Imagen de la pasta distribuida sobre la zona de impresión ..... 75

Figura 4.10. Fotografía de la cama de impresión extraída de la máquina tras el proceso de impresión y tras haber retirado pasta de las esquinas para permitir su extracción..... 76

Figura 4.11. Fotografía de la estación de limpieza para las piezas disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León..... 77

Figura 4.12. Fotografía de la estación de limpieza durante el proceso de limpieza de una de las piezas realizadas. .... 78

Figura 4.13. a) Fotografía del horno empleado para el proceso de debinding disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León; b) Fotografía de la parte delantera del horno para el proceso de debinding disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León, en la que se puede apreciar la parte delantera del mismo, donde se encuentra la puerta del mismo..... 79

Figura 4.14. Fotografía del chiller empleado para el proceso de debinding disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León. ....	80
Figura 4.15. Fotografía de la bomba disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León, empleada para la extracción del aire del interior del horno durante el proceso de debinding. ....	81
Figura 4.16. Gráfica del ciclo de debinding para la alúmina realizado para la eliminación de la resina contenida en el interior de la pieza en verde. Fuente: [29] .....	82
Figura 4.17. Fotografía del horno empleado para el proceso de sintering con las placas de material cerámico empleado para la creación de los recintos.....	83
Figura 4.18. Información relativa al ciclo de sintering realizado. Fuente: [29] .....	83
Figura 4.19. Fotografía del escáner Breuckmann SmartScan empleado para el escaneado de las piezas impresas, disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León. ....	86
Figura 4.20. Fotografía de las 2 cámaras, situadas en los laterales, y del proyector, situado en el centro, del escáner Breuckmann SmartScan, disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León. ....	87
Figura 4.21. Fotografía de la mesa rotatoria sobre la que se colocan las piezas para ser escaneadas.....	88
Figura 4.22. Imagen del grupo de herramientas "Alineación" del software Geomagic Control X. ....	90
Figura 4.23. Imagen de la barra de herramientas de la pestaña "Dimensiones" del software Geomagic Control X.....	91
Figura 4.24. Imagen del grupo de herramientas "Comparar" del software Geomagic Control X. ....	91
Figura 5.1. Fotografía de uno de los botes de pasta de alúmina empleados para la fabricación de las piezas de alúmina mediante SLA en la unidad UFI3D. ....	92
Figura 5.2. Representación de las diferentes dimensiones de la barrera protectora. Fuente: [30] .....	95
Figura 5.3. Representación de las dimensiones geométricas expresadas en la Tabla 5.4 en una estructura con matrices de celosías. Fuente: [30] .....	97
Figura 5.4. Representación de como orientar de forma correcta una pieza en la cama de impresión. Fuente: [30] .....	98
Figura 6.1. Representación de un soporte con contacto, representado en color rojo, el cual se situaría en contacto con la cama de impresión para mejorar la adhesión de la pieza a la misma. ....	100
Figura 6.2. Representación de la distancia que puede presentar un voladizo sin la necesidad de soportes en función de su ángulo con la vertical. [30].....	101
Figura 6.3. Imagen de una pieza escaneada que ha sido fabricada por SLA cerámica, en la que se puede apreciar fácilmente el efecto curling. ....	103
Figura 6.4. Representación de las dimensiones sobre la pieza y el soporte que el fabricante de la máquina recomienda. Fuente: [30] .....	104



Figura 6.5. a) Imagen de la pieza 1 extraída del software Geomagic Design X; b) Imagen de las dimensiones geométricas de la pieza 1 en alzado; c) Imagen de las dimensiones geométricas de la pieza 1 en planta.....	105
Figura 6.6. Imagen del del fichero .STL de la pieza 1 obtenido mediante su escaneado tras finalizar el proceso de debinding.....	106
Figura 6.7. Imagen de la comparación en 3D, realizada en Geomagic Control X, de la base de la pieza 1 en la que se puede comprobar los efectos producidos por el efecto curling. ....	107
Figura 6.8. a) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control; b) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en la parte central de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control X. ....	108
Figura 6.9. Imagen de la comparación en 3D, realizado en Geomagic Control X, de la base de la pieza 1 en la que se puede comprobar los efectos producidos por el efecto curling. ....	110
Figura 6.10. a) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control X; b) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control X.....	110
Figura 6.11. Imagen del boceto de los soportes de la pieza 1 en la que se puede apreciar su tamaño y posición con respecto a la pieza. ....	111
Figura 6.12. Representación gráfica de las dimensiones geométricas de las marcas empleadas para la rotura de los soportes circulares de la pieza. ....	112
Figura 6.13. a) Vista general de la pieza en la que se puede apreciar la posición de los soportes; b) Vista en planta de la pieza 1. ....	112
Figura 6.14. Fotografía de la pieza 1 tras el proceso de impresión y de limpieza de la misma en la que se pueden apreciar tanto los soportes como las marcas realizadas en los mismos para su posterior eliminación. ....	113
Figura 6.15. Fotografía de la pieza 1 tras el proceso de debinding y tras eliminar los soportes de la misma. En esta imagen también se puede apreciar las marcas que dejan los soportes al ser eliminados. ....	114
Figura 6.16. Fotografía de la pieza 1 tras el proceso de sinterizado. ....	114
Figura 6.17. Imagen de la comparación en 3D, realizada en Geomagic Control X, de la base de la pieza 1 impresa con soportes en la que se puede comprobar la eficacia de los soportes diseñados.....	115
Figura 6.18. a) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control X; b) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en la parte central de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control X.....	116
Figura 6.19. Gráfico comparativo de las desviaciones producidas por el efecto curling en la pieza fabricada sin soportes, con las producidas en la pieza fabricada con soportes.....	117
Figura 6.20. Imagen del archivo CAD de la pieza 2. ....	118

Figura 6.21. Fotografía de la pieza 2 impresa sin soportes tras haber finalizado el proceso de fabricación en la que se puede apreciar su base. ....	118
Figura 6.22. Imagen de la pieza 2 escaneada en la que se puede apreciar el efecto curling. ....	119
Figura 6.23. Imagen de la comparación en 3D, realizada en Geomagic Control X, de la base de la pieza 2 impresa sin soportes en la que se puede comprobar la magnitud del efecto curling producido en esta pieza. ....	119
Figura 6.24. Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 2 mediante el software Geomagic Control X. ....	120
Figura 6.25. Imagen de las dimensiones geométricas de los soportes de la pieza 2. ....	120
Figura 6.26. Imagen de los soportes de la pieza 2 con las marcas para facilitar su eliminación. ....	121
Figura 6.27. Imagen del CAD de la pieza 2 con los soportes lista para comenzar el proceso de impresión. ....	122
Figura 6.28. Fotografía de la base de la pieza 2 con los soportes después de haber salido del proceso de limpieza tras la impresión. ....	122
Figura 6.29. Fotografía de la otra parte de la pieza 2 después de haber salido del proceso de limpieza tras la impresión. En esta imagen se puede apreciar en la parte derecha de la pieza el desplazamiento de las capas. ....	123
Figura 6.30. Fotografía de la base de la pieza 2 después de salir del horno de debinding y antes de eliminar los soportes de la pieza. ....	123
Figura 6.31. Fotografía de la otra parte de la pieza 2 tras salir del horno de debinding. ....	123
Figura 6.32. Fotografía de la base de la pieza 2 impresa con soportes tras haber finalizado el proceso de sinterizado. ....	124
Figura 6.33. Fotografía de la otra parte de la pieza 2 impresa con soportes tras haber finalizado el proceso de sinterizado. ....	124
Figura 6.34. Imagen de la comparación 3D, realizada en Geomagic Control X, de la base de la pieza 1 en la que se puede comprobar el efecto de los soportes añadidos. ....	125
Figura 6.35. Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la base de la pieza 2 impresa con soportes. ....	125
Figura 6.36. Gráfico comparativo de las desviaciones producidas por el efecto curling en la pieza fabricada sin soportes, con las producidas en la pieza fabricada con soportes. ....	126
Figura 6.37. a) Imagen del CAD de la placa correspondiente a la pieza 3; b) Imagen del CAD de la placa correspondiente a la pieza 4 en la que se pueden observar los diferentes orificios que presenta. ....	127
Figura 6.38. Representación de las dimensiones geométricas de las marcas para la eliminación de los soportes de la pieza 3 y de la pieza 4. ....	128
Figura 6.39. a) Imagen de la pieza 3 con los soportes ya añadidos; b) Imagen de la pieza 4 con los soportes ya añadidos. ....	128

Figura 6.40. Fotografía de las piezas 3 y 4 después de haber salido del proceso de limpieza tras finalizar la impresión.....	130
Figura 6.41. Fotografía de la pieza 3 después del proceso de debinding en la que se pueden apreciar las marcas que dejan los soportes tras su retirada.....	131
Figura 6.42. Fotografía de la pieza 3 después del lijado de las marcas que dejan los soportes tras su eliminación. ....	131
Figura 6.43. a) Fotografía de la pieza 3 tras haber salido del horno de sinterizado; b) Fotografía de la pieza 4 tras haber salido del horno de sinterizado. ....	132
Figura 6.44. Imagen de la comparación 3D realizada en Geomagic Control X de la pieza 3.....	133
Figura 6.45. a) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 3 mediante el software Geomagic Control X; b) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en la parte central de la pieza 3 mediante el software Geomagic Control X.....	134
Figura 6.46. Imagen de la comparación 3D de la base de la pieza 4 realizada con el software Geomagic Control X.....	135
Figura 6.47. a) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en la zona central de la pieza 4 mediante el software Geomagic Control X; b) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en los bordes de la zona central de la pieza 4 mediante el software Geomagic Control X. ....	135
Figura 6.48. Imagen del CAD de la pieza 5.....	137
Figura 6.49. Fotografías de la pieza 5 impresa sin soportes tras haber finalizado todo el proceso de fabricación.....	137
Figura 6.50. Imagen del grupo de herramientas “Cuerpo/cara” de en la que se encuentra la función de “Transformar cuerpo” del software Geomagic Design X. ....	139
Figura 6.51. Imagen del cuadro de diálogo de la opción “Transformar cuerpo” para realizar el escalado de la copia de la pieza en el software Geomagic Design X.	139
Figura 6.52. Imagen del grupo de herramientas “Editar” en la que se encuentra la opción de operaciones booleanas, empleadas para el diseño del soporte, en el software Geomagic Design X. ....	140
Figura 6.53. Imagen del cuadro de diálogo de la opción de operaciones booleanas en el software Geomagic Design X. ....	141
Figura 6.54. Imagen del CAD del soporte empleado para la fabricación de la pieza 5. ....	141
Figura 6.55. Imagen del CAD de la pieza 5 con el soporte aplicado en la posición en la que la pieza será impresa. En esta imagen se puede apreciar el espacio que existe entre el soporte y la pieza, para evitar así su unión.....	142
Figura 6.56. Imagen del CAD del soporte interior para la fabricación de la pieza 5. ....	143
Figura 6.57. Imagen del CAD de la pieza 5 con el soporte interior aplicado en la posición en la que la pieza sería impresa. En esta imagen se puede apreciar el espacio que existe entre el soporte y la pieza, para evitar así la unión entre ambas partes. ....	143

Figura 6.58. Fotografía en la que se puede apreciar la pieza 5 a la derecha de la imagen, mientras que en la parte izquierda nos encontramos con la base del soporte y en el centro el resto del soporte, tras haber finalizado su proceso de limpieza. ....	144
Figura 6.59. Fotografía en la que se puede apreciar el ajuste entre la pieza 5 y su soporte tras haber finalizado las labores de limpieza de ambos. ....	145
Figura 6.60. a) Fotografía de la pieza 5 tras haber realizado el proceso de debinding; b) Fotografía del soporte empleado para la fabricación de la pieza 5 tras haber realizado el proceso de debinding. ....	146
Figura 6.61. a) Fotografía de la pieza 5 tras haber salido del proceso de sinterizado. En la imagen de la izquierda se puede apreciar como la pieza 5 se encuentra achatada por los laterales; b) Fotografía del soporte empleado para la fabricación de la pieza 5 tras haber realizado el proceso de sinterizado. En la imagen de la izquierda se puede apreciar la deformación producida durante este proceso. ....	147
Figura 6.62. Fotografía de la pieza 5 tras el proceso de sinterizado en la que se puede apreciar la mala calidad superficial de la base de la pieza. ....	148
Figura 6.63. Imagen de la comparativa 3D de las diferentes vistas de la pieza 5 realizada en Geomagic Control X. ....	149
Figura 6.64. Imagen del boceto de los cortes realizados al soporte interior de la pieza 5 para reducir su volumen. ....	151
Figura 6.65. Imagen del CAD del soporte interior de la pieza 5 tras haber realizado la primera optimización para reducir su volumen. ....	151
Figura 6.66. Imagen del boceto de los cortes realizados al soporte interior de la pieza 5 para reducir su volumen en el segundo planteamiento de su optimización. ....	152
Figura 6.67. Imagen del CAD del soporte interior de la pieza 5 tras haber realizado la segunda optimización para reducir su volumen. ....	152
Figura 6.68. Imagen del CAD de la pieza 6. ....	154
Figura 6.69. a) Fotografía de la vista superior de la pieza 6 impresa sin soportes tras haber finalizado el proceso de impresión; b) Fotografía de la pieza 6 impresa sin soportes tras haber finalizado el proceso de impresión. ....	155
Figura 6.70. Imagen de las dimensiones geométricas exteriores de la pieza 6 antes de realizar el diseño de los dientes. ....	156
Figura 6.71. Imagen del CAD del soporte exterior empleado para la fabricación de la pieza 6. ....	157
Figura 6.72. Imagen del CAD del ajuste entre la pieza 6 y el soporte exterior empleado para su fabricación en la que se puede apreciar el espacio entre ambos. ....	157
Figura 6.73. Imagen del CAD del soporte interior de la pieza 6. ....	158
Figura 6.74. Imagen del CAD del tercer tipo de soporte de la pieza 6 en el que se puede observar en color azul la parte externa del soporte y en color gris la parte interna del mismo. ....	159

Figura 6.75. Imagen del CAD de la pieza 6 con el tercer tipo de soporte, en la que en la parte izquierda se puede comprobar la base del mismo que estaría en contacto con la cama de impresión y en la parte derecha la pieza 6 en la posición que se imprimiría con este soporte. ....	159
Figura 6.76. Fotografía de la pieza 6 y de su soporte después de haber finalizado las labores de limpieza de ambos tras su impresión. ....	160
Figura 6.77. Fotografía de la pieza 6 en el interior de su soporte, colocados de igual forma a la que han sido impresos. ....	160
Figura 6.78. Fotografía de la pieza 6 tras haber salido del proceso de debinding. ....	161
Figura 6.79. Fotografía de la pieza 6 tras haber finalizado el proceso de sinterizado. ....	161
Figura 6.80. Imagen de la comparación 3D de las diferentes vistas de la pieza 6 realizada en Geomagic Control X. ....	163
Figura 6.81. a) Imagen del CAD de la pieza 7; b) Imagen del CAD de la pieza 7 en la que se puede apreciar, marcado en azul, la zona de la pieza que impediría la extracción normal de un soporte como los diseñados anteriormente durante la limpieza de la pieza. ....	165
Figura 6.82. Imagen del CAD de una pieza en la que sería necesario diseñar un tipo de soporte diferente a los diseñados en los casos anteriores. ....	165
Figura 6.83. Dimensiones geométricas del boceto empleado para la revolución de la pieza 7. ....	166
Figura 6.84. Dimensiones geométricas del soporte de la pieza 7 empleadas para el diseño del boceto usado para la revolución del mismo. ....	167
Figura 6.85. Imagen del CAD del soporte de la pieza 7 antes de realizar el corte para simplificar la extracción de la pieza del mismo. ....	167
Figura 6.86. a) Imagen del CAD del soporte de la pieza 7 tras haber realizado el corte del mismo para facilitar su retirada; b) Imagen del CAD de una de las 2 partes que forman el soporte empleado para la fabricación de la pieza 7. ....	168
Figura 6.87. a) Imagen del CAD de la pieza 7 con el soporte empleado para su fabricación en la que se puede apreciar el espacio libre entre ambas partes; b) Imagen del CAD de la pieza 7 con una de las 2 partes que forman el soporte de la pieza 7 colocados en la misma posición en la que serían impresos. ....	169
Figura 6.88. Imagen del CAD de la pieza 7 con el segundo tipo de soporte creado para la fabricación de esta pieza. ....	170
Figura 6.89. Dimensiones geométricas empleadas para el diseño del segundo tipo de soporte para la pieza 7. ....	170
Figura 6.90. Imagen del CAD de la parte empleada como herramienta para la operación booleana de corte para el diseño del segundo tipo de soporte para la pieza 7. ....	171
Figura 6.91. Imagen del CAD del segundo tipo de soporte diseñado para la fabricación de la pieza 7. ....	171
Figura 6.92. Imagen del CAD del segundo tipo de soporte para la pieza 7 tras haber sido ajustado a la geometría de la pieza. ....	172

Figura 6.93. a) Fotografía de la pieza 7 tras su limpieza después de haber finalizado el proceso de impresión; b) Fotografía del soporte empleado para la pieza 7 tras su limpieza después de haber finalizado el proceso de impresión; c) Fotografía de la pieza 7 con una de las partes que conforman el soporte empleado para su fabricación en la que se puede apreciar el espacio existente entre ambas partes. ....	173
Figura 6.94. a) Fotografía de la pieza 7 tras salir del horno de sinterizado; b) Fotografía de ambas partes que conforman el soporte de la pieza 7 tras salir del horno de sinterizado; c) Fotografía de la pieza 7 con una de las 2 partes que conforman su soporte tras salir del proceso de sinterizado. ....	174
Figura 6.95. Imagen de la comparativa 3D de las diferentes vistas de la pieza 7 realizada con Geomagic Control X. ....	176
Figura 6.96. Imagen del CAD de la pieza 8. ....	177
Figura 6.97. a) Imagen del CAD del primer tipo de soporte para la fabricación de la pieza 8; b) Imagen del CAD de la pieza 8 con el primer tipo de soporte empleado para su fabricación. ....	178
Figura 6.98. Imagen del CAD del segundo tipo de soporte diseñado para la fabricación de la pieza 8 en la que se pueden apreciar las dimensiones de cada una de las partes y de la separación entre ellas. ....	178
Figura 6.99. Imagen del CAD del tercer tipo de soporte diseñado para la fabricación de la pieza 8 en la que se puede apreciar la separación entre cada una de las partes, así como sus dimensiones. ....	179
Figura 6.100. Imagen del CAD de la pieza 8 con el segundo y el tercer tipo de soporte y con los soportes circulares ya aplicados, listas para comenzar con el proceso de impresión. ....	180
Figura 6.101. Fotografía de la pieza 8 fabricada con el segundo tipo de soporte en la que se pueden apreciar los defectos producidos en el centro de la superficie del voladizo, que corresponde con la zona en la que no existía soporte. ....	180
Figura 6.102. Fotografía de la pieza 8 fabricada con el tercer tipo de soporte empleado para su fabricación en la que se puede apreciar la muesca producida en la parte inferior izquierda de la superficie del voladizo. ....	181
Figura 6.103. Fotografía de la pieza 8 en la que se pueden apreciar los defectos producidos tras el proceso de debinding, encontrándose a la izquierda la pieza fabricada con el segundo tipo de soporte y a la derecha la pieza fabricada con el tercer tipo de soporte. ....	182
Figura 6.104. a) Fotografía de la pieza 8 impresa con el segundo tipo de soporte tras haber salido del horno de sinterizado; b) Fotografía de la pieza 8 impresa con el tercer tipo de soporte tras haber salido del horno de sinterizado. ....	183
Figura 6.105. Imagen de la comparativa 3D de las diferentes vistas de la pieza 8 impresa con el segundo tipo de soporte realizada en Geomagic Control X. ....	184
Figura 6.106. Imagen de la comparativa 3D de las diferentes vistas de la pieza 8 impresa con el tercer tipo de soporte realizada en Geomagic Control X. ....	186

Figura 6.107. Imagen del CAD del soporte 2 modificado en el que se puede apreciar el espesor de las 3 partes del soporte, así como su separación y su base. .... 188

Figura 6.108. Imagen del CAD del soporte 3 modificado en el que se puede apreciar el espesor de las partes del soporte, así como su separación y su base. .... 189

Figura 6.109. Imagen del CAD de la pieza 9..... 189

Figura 6.110. Dimensiones geométricas del diseño de la base de la pieza 9. ... 191

Figura 6.111. Imagen del CAD de la pieza 9, en color gris, y del soporte, en color azul, tras realizar su diseño mediante el escalado y la operación booleana de corte antes de realizar su arreglo. .... 191

Figura 6.112. Imagen del CAD de la pieza 9, en color gris, y de su soporte, en color azul, tras haber realizado el arreglo del soporte. .... 192

Figura 6.113. Imagen del CAD de la pieza 9, en color gris, y de su soporte, en color azul, tras dividir el soporte en dos partes diferentes..... 192

# Índice de tablas.

Tabla 3.1. Ratios de calentamiento, temperaturas máximas, tiempo de mantenimiento de la pieza a la temperatura máxima y ratios de enfriamiento de los 3 sinterizados realizados. Fuente: [15] .....	44
Tabla 3.2. Densidad de las piezas fabricadas mediante SLA con cerámica (DLP-fabricated zirconia) y mediante sustracción de material (SM-fabricated zirconia), y sometidas a los 3 tipos de sinterizado. Fuente: [15].....	45
Tabla 3.3: Porcentajes en volumen de los monómeros en las 4 mezclas estudiadas, así como su profundidad de curado. Fuente: [24].....	52
Tabla 3.4: Composición óptima de la mezcla para la obtención de los mejores resultados. Fuente: [24].....	53
Tabla 3.5. Combinaciones de los diferentes niveles de tiempo de exposición (ET), intensidad de la luz (EP), y espesor de la capa (LT) empleados durante el experimento llevado a cabo por N. Kovacev et al. Fuente: [28] .....	63
Tabla 4.1. Tabla que contiene la información necesaria para comprobar la temperatura mediante el empleo de los anillos. Fuente: [29] .....	84
Tabla 5.1. Valores máximos y mínimos de las dimensiones de la barrera protectora. Fuente: [30] .....	95
Tabla 5.2. Limitaciones de la longitud de los agujeros ciegos en las piezas realizadas con la pasta AL-F02 de 3DCERAM en función de su diámetro. Fuente: [30] .....	96
Tabla 5.3. Limitaciones de la longitud de los agujeros pasantes en las piezas realizadas con la pasta AL-F02 de 3DCERAM en función de su diámetro. Fuente: [30] .....	97
Tabla 5.4. Valores máximos y mínimos de las dimensiones geométricas expresadas en la Figura 5.3. Fuente: [30].....	98
Tabla 6.1. Relación entre la longitud que puede presentar un voladizo en función del ángulo con la vertical sin la necesidad de colocar soportes. Fuente: [30] ....	102
Tabla 6.2. Tabla que recoge las dimensiones recomendadas por el fabricante representadas en la Figura 6.4. Fuente: [30].....	104



# 1 Introducción.

Hoy en día la fabricación aditiva constituye uno de los principales focos de investigación para numerosas industrias como pueden ser la aeroespacial, la automovilística, la electrónica, la industria de fabricación de piezas, la construcción e incluso en industrias como la médica y la alimentaria [1], [2]. A pesar de que en un principio se desarrolló principalmente para la fabricación de prototipos de una forma rápida, en la actualidad también se emplea para la fabricación de piezas totalmente acabadas y lista para ser empleadas en su fin último. Esto ha sido posible gracias a los numerosos avances tecnológicos llevados a cabo en los últimos años, los cuales han permitido la aparición de diferentes técnicas de fabricación aditiva, así como el empleo de distintos tipos de materiales como pueden ser diferentes metales y aleaciones, polímeros, materiales cerámicos, en los cuales nos centraremos principalmente en este trabajo, o incluso materiales como el cemento en la construcción [1], [3]. En cuanto a las diferentes técnicas desarrolladas dentro del campo de la fabricación aditiva, nos encontramos con diferentes grupos en función del proceso de fabricación. De esta forma, tenemos las técnicas basadas en la fotopolimerización, entre las cuales se encuentra la estereolitografía, también conocida como SLA, técnica en la cual nos centraremos en este trabajo, las basadas en los procesos de impresión, de extrusión de material, de fusión en lecho de polvo, de deposición mediante energía dirigida y de laminación de chapas [1], [2]. Además de todos estos avances tecnológicos, se han de tener en cuenta los avances relacionados con los programas de diseño asistido por ordenador (CAD), que hacen posible el diseño de las diferentes piezas a fabricar, así como los programas de control numérico por ordenador (CNC) y los programas de fabricación asistida por ordenador (CAM), que hacen posible el diseño y el control del proceso de fabricación.

Todo este desarrollo ha sido posible gracias a las grandes ventajas que presenta la fabricación aditiva sobre los métodos de fabricación convencionales. Estas ventajas residen principalmente en la flexibilidad que la fabricación aditiva otorga a la geometría de las piezas, ya que, permite el poder realizar piezas con

una geometría muy compleja [4], llegando incluso a poder realizar piezas con estructuras internas formadas por matrices, en lugar de una estructura interna compacta. Además de esto, la fabricación aditiva permite cambiar la producción de una pieza a otra con una geometría totalmente diferente con el simple hecho de cambiar el archivo que contiene la información geométrica de la pieza. Esto da lugar a hacer posible la fabricación de piezas totalmente personalizadas sin un gran sobrecosto, como ocurre en el caso de la fabricación convencional [4]. Además, este tipo de producción también permite la fabricación de piezas completas mediante un solo proceso de fabricación, eliminando en gran medida la necesidad de unir partes diferentes de una misma pieza mediante procesos como por ejemplo la soldadura [4]. No obstante, la fabricación aditiva también presenta desventajas frente a la fabricación convencional, siendo la más destacada el problema que presenta para la producción de grandes lotes de piezas, donde los procesos de fabricación convencional presentan una gran ventaja económica, relegando a la fabricación aditiva a la producción de pequeños lotes de piezas personalizadas y piezas con geometrías muy complejas [4]. Otra de las desventajas que presenta la fabricación aditiva reside en la adaptación de las líneas de producción de las industrias a este tipo de producción, lo cual supone un gran desembolso económico [4].

Dentro de este trabajo nos centraremos, como hemos mencionado anteriormente, en el proceso de estereolitografía con materiales cerámicos, específicamente con la alúmina. Este tipo de fabricación, a pesar de que surgió a mediados de los años 90, no tuvo un gran desarrollo hasta hace unos 10 años, cuando comenzaron a surgir un mayor número de investigaciones en relación a esta forma de producción. Uno de los principales motivos por el que el SLA con materiales cerámicos comenzó a cobrar importancia es por la facilidad que otorga a la producción de piezas cerámicas con geometrías complejas, ya que, mediante los demás métodos de fabricación la producción de estas piezas se encontraba muy limitada en cuanto a la geometría de las mismas. Esta libertad en la geometría de las piezas despertó el interés de diversos investigadores que vieron grandes posibilidades en la fabricación de geometrías complejas como pueden ser los implantes óseos o moldes y núcleos para la fundición de piezas complejas. No

obstante, a pesar del interés que ha despertado este tipo de fabricación aditiva, no existe prácticamente ningún estudio en relación a la creación de soportes que permitan fabricar piezas con geometrías más complejas, o que no podrían ser fabricadas sin ellos. Es por este motivo que en este trabajo se buscará la creación de diferentes tipos de soportes que permitan solucionar los problemas más comunes de este tipo de fabricación aditiva. Entre estos problemas, se buscará solucionar principalmente los derivados del efecto curling y del desplazamiento de capas, mediante el uso de soportes para las piezas. En relación al diseño de estos soportes, se buscará hacer soportes adaptados específicamente a cada una de las piezas, empleando las recomendaciones dadas por el fabricante de la máquina y de la pasta de alúmina empleada para la fabricación de las piezas.

Para ello este trabajo se ha dividido en los siguientes capítulos:

1. **Introducción.**
2. **Estereolitografía.**
3. **Estereolitografía cerámica.**
4. **Metodología y equipamiento.**
5. **Reglas de diseño para la fabricación de las piezas.**
6. **Diseño y comprobación de los soportes para las piezas realizadas mediante SLA con materiales cerámicos.**

En los capítulos 2 y 3 se realizará un estado del arte de este proceso de fabricación. En el capítulo 4 se describirá la metodología y los equipos empleados para la fabricación de las piezas y sus soportes, así como para su posterior verificación e inspección. En el capítulo 5 se mostrarán las reglas seguidas para el diseño de las piezas, mientras que en el apartado 6 se explicará el proceso seguido para la fabricación de los soportes de las piezas y también se comprobará la efectividad de los mismos.

## 2 Estereolitografía.

La estereolitografía es un proceso de fabricación aditiva desarrollado por Chuck Hull, director de tecnología en 3D Systems, en 1986. Como cualquier proceso de fabricación aditiva, está basado en la fabricación de una pieza mediante la unión de materiales capa por capa a partir de un modelo CAD tridimensional.

Para poder llevar a cabo el proceso de estereolitografía se requieren 2 elementos principales, una resina fotopolimerizable y una fuente de luz ultravioleta. Estos dos elementos se encontrarán en el interior de la máquina diseñada para llevar este proceso a cabo, la cual, se encuentra compuesta principalmente por este conjunto de elementos:

- La plataforma sobre la que se fabricará la pieza junto al sistema encargado de su elevación y descenso.
- El tanque encargado de contener la resina, el cual se encuentra acompañado de una bomba encargada de rellenar el tanque con la resina y de un sistema encargado de controlar el nivel de resina en el interior del tanque.
- Los sistemas de control necesarios para llevar a cabo las operaciones designadas en el programa de fabricación y mantener las condiciones de fabricación designadas.
- El sistema óptico está compuesto por la fuente de luz ultravioleta, así como de los sistemas encargados de controlar esta fuente de luz, desde su enfoque sobre la plataforma de fabricación, su movimiento, o controlar su apagado y encendido.
- El sistema encargado de nivelar y distribuir de manera uniforme la capa de resina sobre la plataforma, el cuál es necesario debido a la viscosidad de las resinas.

De esta forma, la máquina empleada para la realización de este proceso sería similar a la del esquema mostrado en la Figura 2.1:

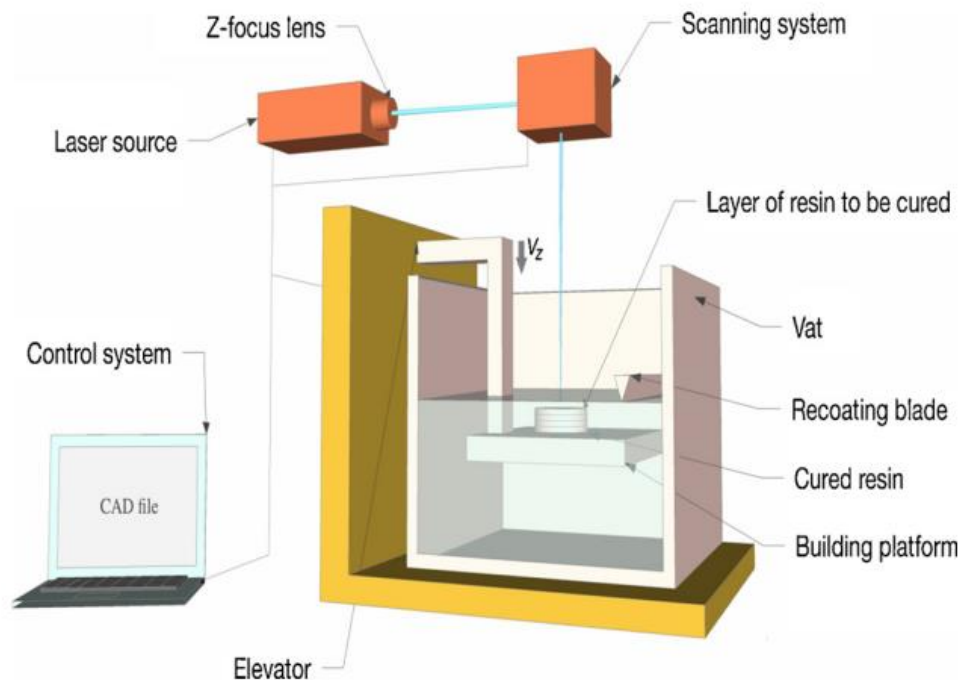


Figura 2.1. Esquema de una máquina de estereolitografía. Fuente: [5]

En cuanto a las resinas mencionadas anteriormente es necesario que cumplan una serie de requisitos para poder ser empleadas en este proceso. Entre estos requisitos nos encontramos con que han de tener una alta sensibilidad a la radiación ultravioleta para así poder lograr un curado correcto de las mismas, su viscosidad ha de tener un valor estable para así poder controlar mejor el proceso de fabricación y han de presentar una cierta estabilidad dimensional y buenas propiedades mecánicas tras el proceso de polimerización para que la pieza final sea apta para el uso que ha sido diseñada. Además, también es recomendable que presenten una baja volatilidad y una baja toxicidad para permitir un manejo más seguro de las mismas por parte de los operarios. En cuanto a la composición de estas resinas, nos encontramos principalmente con 3 grupos distintos de componentes, cada uno con una función concreta. De esta forma nos encontramos con los siguientes componentes de las resinas:

- **Aglutinantes:** Son moléculas con forma de largas cadenas y son las encargadas de dar al sólido sus propiedades finales. Debido a esto, son el

principal constituyente de la resina, encontrándose en una proporción de entre un 50% y un 80% en peso.

- **Monómeros de vinilo o de acrilato:** Su función principal es la de reducir la viscosidad de la resina y así poder mejorar la manipulación de la misma. Su porcentaje en peso se encuentra entre un 10% y un 40%.
- **Fotoiniciadores:** Son moléculas encargadas de unir a los diferentes componentes que conforman la resina fotocurable. Son capaces de realizar esta función gracias a la luz ultravioleta, la cual hace que reaccionen permitiendo su unión con las demás moléculas.

En relación al proceso de fabricación de la pieza, consiste en un proceso cíclico. En primer lugar, se realiza un diseño de la pieza deseada en un software CAD, para que posteriormente este archivo CAD sea convertido en un archivo .STL, el cual consiste en una malla de pequeños triángulos que define la geometría de la pieza diseñada anteriormente. Una vez que se ha realizado el archivo .STL y se ha comprobado que no haya huecos entre los triángulos y que sea correcto, se procede al software de laminado. Este software permite seccionar la pieza en capas longitudinales para el proceso de fabricación, además varios de estos softwares permiten la creación de soportes para la pieza en el caso de que sean necesarios para su proceso de fabricación. Tras esto, se comenzará con el propio proceso de fabricación, en el que, en primer lugar, la plataforma de fabricación descenderá en el tanque una profundidad correspondiente al espesor de capa designado, dando lugar así a una capa de resina de este espesor. A continuación, mediante un haz de luz ultravioleta se escaneará la superficie correspondiente a la primera capa de la pieza, logrando así el curado de la primera capa. Tras esto, la plataforma volverá a descender para repetir el mismo proceso con la segunda capa y el proceso continuaría así hasta la última capa para lograr obtener la pieza completa. Una vez que la pieza completa ha sido fabricada, es necesario retirar las estructuras de soporte, si estas existieran, y posteriormente introducir la pieza en un horno de luz ultravioleta para completar el proceso de curado de la pieza.

En función de la forma de aplicación del haz de luz ultravioleta nos podemos encontrar con dos tipos diferentes de máquinas, compuestas de diferentes fuentes de luz ultravioleta. De esta forma, tenemos los siguientes tipos de estereolitografía:

- **Estereolitografía basada en la proyección:** La aplicación de la luz ultravioleta se realiza a través de una lámpara ultravioleta que ilumina toda la capa de resina a través de un filtro, producido por un micro espejo digital, con la forma deseada. De esta forma, la capa de resina se fotopolimeriza entera al mismo tiempo. Gracias a que la luz ultravioleta se aplica de forma uniforme sobre toda la capa al mismo tiempo, el tiempo de fabricación se ve reducido. Además, esta forma de estereolitografía está recomendada para la fabricación de piezas de pequeño tamaño, permitiendo obtener una gran resolución en las mismas.
- **Estereolitografía basada en el escaneado:** La aplicación de la luz ultravioleta se realiza a través de un escáner laser. Para ello se emplea un espejo dinámico, cuyo objetivo es el de dirigir el haz láser hacia las zonas deseadas. Este tipo de estereolitografía está orientada a piezas de mayor tamaño y en las que no sea necesaria una alta resolución.

Ambos tipos de máquinas pueden ser apreciadas en la Figura 2.2.

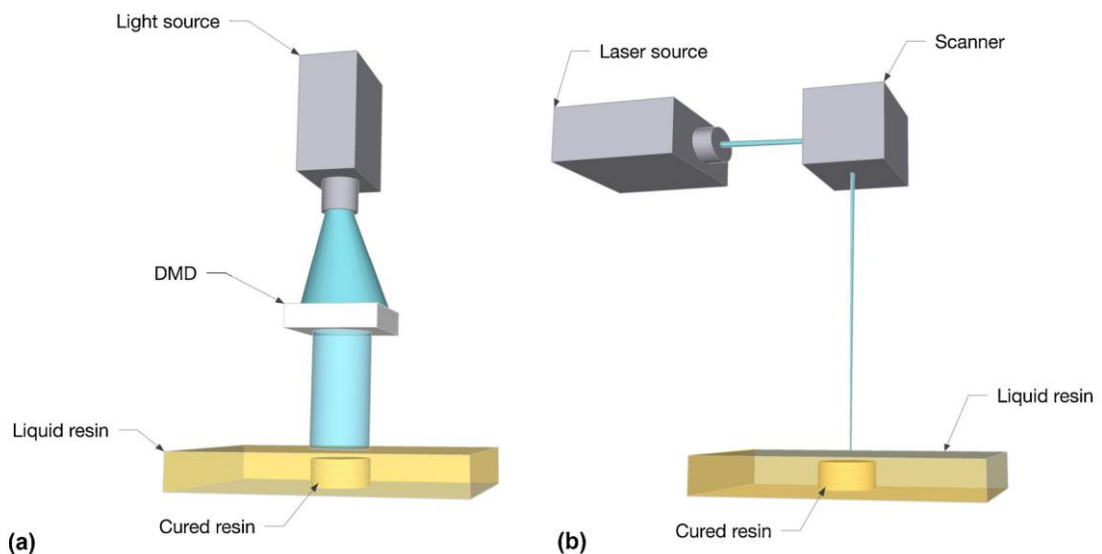


Figura 2.2. a) Esquema del sistema de estereolitografía basado en la proyección; b) Esquema del sistema de estereolitografía basado en el escaneado. Fuente: [5]

Además de su clasificación en función de la forma de aplicación de la luz ultravioleta, las máquinas de estereolitografía también se pueden clasificar en

función de la zona desde la que se proyecta la luz ultravioleta. De esta forma tenemos dos orientaciones, de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo:

- En la **orientación de arriba hacia abajo**, la fuente de luz ultravioleta se encuentra en la parte superior de la máquina de estereolitografía, tal y como se muestra en la figura 2.1 mostrada anteriormente. En esta orientación, la plataforma de fabricación se encuentra justo por debajo de la superficie de la resina contenida en el tanque, dejando únicamente una fina capa de resina sobre ella, con el mismo espesor que la capa de fabricación. Una vez que esta capa se cura, la plataforma desciende hasta dejar encima de esta capa ya curada otra capa de resina del mismo espesor que la primera. Este proceso se continuaría repitiendo hasta que finalmente la fabricación de la pieza finalizase. Con respecto a los principales inconvenientes de este sistema nos encontramos con que este sistema requiere un tanque muy alto y por tanto una gran cantidad de resina. Además, la capa de resina a curar se encuentra en contacto con el aire, lo que provoca que se impida el curado de ciertos tipos de resinas debidos a la acción del oxígeno. Por último, debido a la viscosidad propia de la resina hace que sea complicado el mantener el nivel de la resina y el espesor de las capas cuando se produce el descenso de la plataforma, junto a esto hay que tener en cuenta la tensión superficial cuando se intenta nivelar la resina sobre una capa ya curada. [5]
- En la **orientación de abajo hacia arriba**, la fuente de luz ultravioleta se encuentra en la parte inferior del tanque de resina de la máquina de estereolitografía, por lo que el fondo de este tanque ha de ser transparente a la radiación ultravioleta. En este sistema de estereolitografía, la plataforma se encuentra en la parte inferior del tanque, dejando entre ella y la base del tanque una fina capa de resina con el espesor de la capa de fabricación. Cuando esta capa es curada, la plataforma asciende dejando entre la capa que se ha curado y la base del tanque otra fina capa de resina con el espesor de capa. Este proceso continuaría repitiéndose hasta completar la fabricación de la pieza. Con este sistema se resuelven fácilmente los inconvenientes relativos a la orientación de arriba hacia abajo, ya que el espesor de la capa de resina es fácilmente controlable, además la resina no



se encuentra en contacto con el aire, por lo que no hay problemas con el curado. Tampoco es necesario un tanque tan alto, ya que, al ascender la plataforma, las partes ya curadas pueden salir del mismo y estar en contacto con el aire, por tanto, la cantidad de resina necesaria también es menor. No obstante, el principal inconveniente de este sistema se encuentra en la posible adhesión de la capa curada con el fondo del tanque, lo que hace necesario la aplicación de ciertos recubrimientos para evitar este problema.

[5]

Ambos tipos de máquina de SLA pueden ser observados en la Figura 2.3

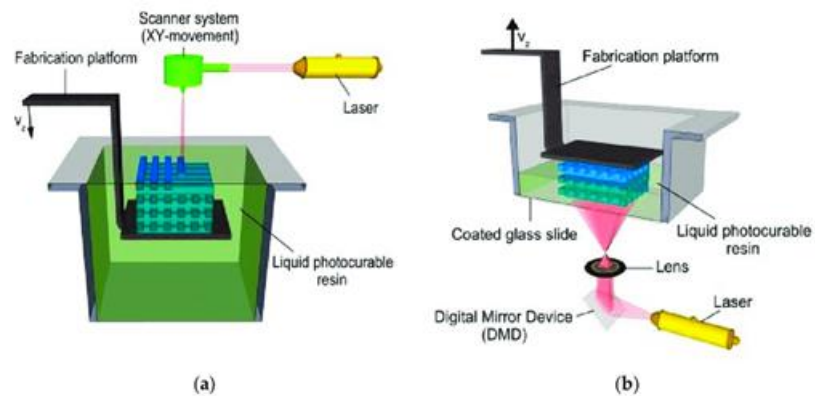


Figura 2.3. a) SLA de arriba hacia abajo; b) SLA de abajo hacia arriba. Fuente: [6]

## 3 Estereolitografía cerámica.

Los materiales cerámicos tienen un gran interés en la fabricación de diferentes piezas para industrias como la aeronáutica, la biomédica, la dental, la joyería o la electrónica. Esto se debe principalmente a sus increíbles propiedades como su gran rigidez, así como también su gran dureza y resistencia. Además, también se ha de tener en cuenta tanto su elevada resistencia a la corrosión como su gran estabilidad química y térmica, lo que les permite trabajar a muy altas temperaturas. Sin embargo, sus otras propiedades como son su elevada fragilidad debida a su gran dureza y su baja tenacidad a la fractura han supuesto un gran obstáculo para la fabricación con este tipo de materiales. Debido a esto, con las técnicas convencionales de fabricación no se pueden conseguir piezas con una estructura compleja, lo que limita de gran forma las posibilidades de estos materiales. Es por este motivo, por el que se han investigado otras técnicas de fabricación diferentes a las convencionales como la fabricación aditiva, la cual permite la fabricación de piezas con geometrías complejas. Dentro de la fabricación aditiva, nos centraremos en la estereolitografía con materiales cerámicos.

En 1994, Griffith, fue el primero en emplear los materiales cerámicos en la estereolitografía con el objetivo de producir piezas funcionales. Este tipo de estereolitografía se logra mezclando polvo de materiales cerámicos con las resinas empleadas en la estereolitografía. Aunque en un principio esta tecnología se empleó para el desarrollo de prototipos, actualmente se emplea para la producción de piezas finales, incluso para aplicaciones en las que se requieren unas propiedades muy elevadas. De esta forma, se han llevado a cabo numerosos estudios para la aplicación de este método de fabricación con materiales cerámicos a las distintas industrias antes mencionadas. Así, W. Wang et al. [7], llevaron a cabo un estudio sobre la precisión en las dimensiones de las piezas cerámicas producidas mediante estereolitografía para la fabricación de implantes dentales, las cuales requieren una alta precisión en sus dimensiones para poder adaptarse correctamente con el resto de la dentadura de una persona. Para ello, en primer lugar, realizaron un escaneado de la pieza dental a replicar y, tras ello, comenzaron

con la fabricación mediante estereolitografía de 10 piezas, empleando para ello 2 equipos diferentes, el CeraFab7500 (CF) alúmina y CSL150 (CL) zirconia, y el X-Mill500 (XM) zirconia. Una vez fabricadas todas las piezas se pudo comprobar que mediante los sistemas de fabricación CeraFab7500 y CSL150 se podían obtener piezas de una gran calidad dimensional, dentro de los estándares clínicos exigidos.

Además de este estudio, Q. Chen et al. [8], llevaron a cabo una investigación en la que estudiaron la seguridad de los implantes óseos de hidroxiapatita fabricados mediante este proceso, ya que, aunque la hidroxiapatita no es una sustancia tóxica para las personas, si lo son las resinas que se emplean en este proceso. Por tanto, el objetivo de este estudio era el conocer si la pieza final, tras ser sometida a los tratamientos térmicos de debinding y sintering, continuaba siendo tóxica para las personas. Para ello, se realizaron diversas prótesis que se implantaron en conejos, con el resultado de que no producían ningún efecto nocivo para las células. Lo que indicaba que los compuestos tóxicos de las resinas habían sido eliminados en su totalidad durante los tratamientos térmicos, en concreto durante el proceso de debinding.

En cuanto al propio proceso de estereolitografía con cerámicas, es muy similar al proceso convencional, con la diferencia principal de que el material de partida es una pasta con partículas cerámicas mezcladas con la resina fotosensible. De esta forma, la resina actúa como el aglutinante de las partículas. Una vez que el proceso de la impresión ha finalizado y la resina ha sido curada obtenemos una primera pieza en verde. Esta pieza en verde no posee las propiedades finales, ya que, a diferencia de la estereolitografía tradicional, es necesaria la aplicación de 2 procesos térmicos posteriores para poder lograr una pieza cerámica con una buena cohesión entre sus partículas y una buena densidad, pudiendo obtener así las propiedades finales de la misma. El primero de estos dos procesos térmicos corresponde con el debinding, cuyo objetivo es la eliminación de la resina que se ha empleado como aglutinante de las partículas cerámicas. Al eliminar la resina, se puede observar que se han formado numerosos poros en la pieza. Debido a esto y a que la cohesión entre las partículas de material cerámico no es lo suficientemente fuerte, la pieza que sale de este proceso es muy frágil, siendo necesario someter la pieza a un segundo proceso térmico conocido como sintering. En este proceso

térmico la pieza se vuelve a introducir en un segundo horno a una temperatura muy superior a la del proceso anterior pero inferior a la temperatura de fusión del material empleado, buscando de esta forma el sinterizado de las partículas cerámicas de la pieza, es decir, la formación de enlaces entre las partículas de material cerámico mediante difusión atómica, logrando así la formación de una pieza compacta. No obstante, al someter a la pieza a estos procesos térmicos se produce una contracción significativa de la misma, además de que se pueden producir diversos problemas en la misma como deformaciones o fracturas, lo que demuestra la importancia del estudio de ambos procesos térmicos. De esta forma, el esquema de pasos a realizar para la fabricación de una pieza mediante SLA con cerámicas sería el mostrado en la Figura 3.1.

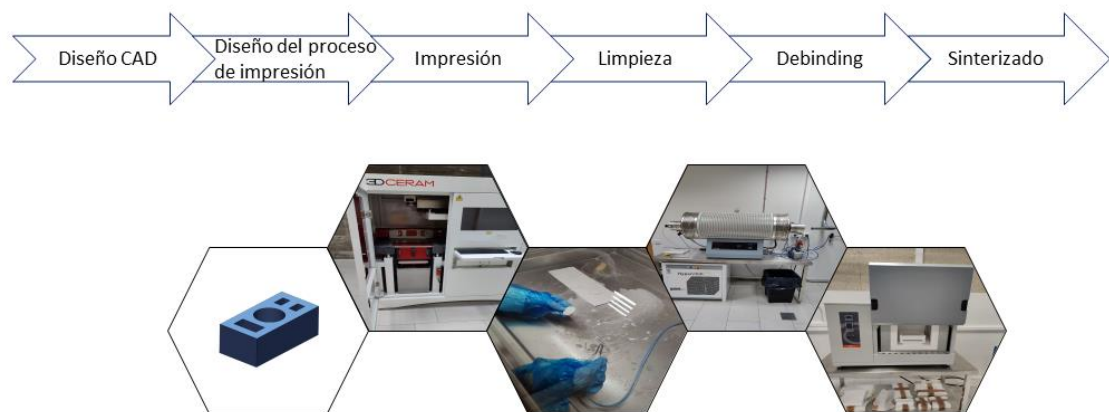


Figura 3.1. Esquema de los pasos a seguir para la obtención de una pieza final mediante el proceso de SLA con cerámica.

### 3.1 DEBINDING.

Como hemos mencionado anteriormente, el debinding es el proceso en el que la pieza en verde salida del proceso de estereolitografía ha de ser introducida en un horno, en el que será calentada con el objetivo de eliminar los restos del aglutinante orgánico empleado para lograr la adhesión de las partículas cerámicas.

En primer lugar, una vez que la pieza en verde ha salido del proceso de impresión se ha de limpiar para eliminar los restos de pasta sin curar de la superficie de la pieza antes de ser introducida en el horno para comenzar el proceso de debinding. A continuación, se introduce en el horno que se calentará hasta una temperatura determinada por la pasta empleada en la fabricación de la pieza para poder eliminar los restos de la resina que están presentes en ella. La pieza que sale de este proceso todavía no presenta sus características finales, ya que solo se han eliminado los restos de resina y la unión de las partículas de cerámica sigue siendo débil, además de la aparición de poros en su interior debido a la eliminación de la pasta, que también provocan la debilitación de la pieza.

Para poder diseñar un proceso de debinding adecuado es necesario tener en cuenta multitud de parámetros como la composición química de la resina, la proporción de partículas cerámicas en la pasta, así como la propia geometría de la pieza. Es por esto que esta etapa está considerada como la más crítica de todo el proceso, ya que durante la misma se pueden producir defectos como grietas, deformaciones e incluso la fractura de la pieza. Debido a esto, es muy importante realizar en un primer lugar, antes de someter la pieza a este proceso, un análisis termogravimétrico para así poder conocer el comportamiento de la pieza durante la descomposición de la resina empleada como aglutinante. Este tipo de análisis consiste principalmente en el estudio del cambio de la masa de la pieza a medida que se varía la temperatura, de esta forma podemos conocer las temperaturas a las que se logra una mayor eliminación de resina y cuando se completa el proceso de su eliminación, lo que permite diseñar un proceso de debinding lo más apropiado posible para la pieza, reduciendo de esta forma las posibilidades de aparición de defectos en la misma.

Se han realizado numerosos estudios buscando la manera más óptima de llevar a cabo este proceso. H. Wu et al. [9], realizaron una comparativa entre realizar el proceso de debinding convencional y el proceso de debinding en vacío en un horno en forma de tubo, empleando 3 pastas diferentes de alúmina con distintos tamaños de partículas. De esta forma se tiene una primera pasta con un tamaño medio de las partículas de alúmina de 9  $\mu\text{m}$ , una segunda con partículas de 50 nm y, por

último, la tercera está compuesta de una mezcla de ambas partículas con un ratio de partículas 1:1.

Para poder realizar esta comparativa, en primer lugar, es necesario realizar un análisis termogravimétrico para comprobar a que temperatura se logra la eliminación de todos los diferentes compuestos que componen el aglutinante en el que se encuentran los polvos de cerámica y para poder conocer a que temperaturas se logra la descomposición de los compuestos que componen el aglutinante. Este paso es muy importante para poder diseñar un tratamiento térmico adecuado al aglutinante y la cerámica empleados en la fabricación de piezas cerámicas mediante estereolitografía, para así poder evitar los defectos propios de este proceso y tipo de material, como son la formación de grietas y la separación en capas propia de los procesos de fabricación aditiva debido a la fabricación de la pieza en láminas.

En cuanto al debinding en vacío, su principal inconveniente se encuentra en la precisión del control de la temperatura, por tanto, el calentamiento del horno ha de realizarse con un primer ritmo de calentamiento lento. Cuando se alcanza una de las temperaturas correspondientes a uno de los puntos en los que se reflejó una pérdida de masa significativa en el análisis termogravimétrico, correspondiente a la temperatura a la que se descompone uno o más componentes del aglutinante, se ha de mantener durante el tiempo necesario para la eliminación completa de estos componentes.

Los resultados obtenidos en la comparativa realizada entre el debinding en vacío y el debinding convencional muestran que mediante el debinding en vacío se logra una mayor densidad de la pieza, independientemente del tamaño de partícula de la alúmina, como se puede comprobar en la Figura 3.2. Esto se debe principalmente a que en el debinding en vacío el gas generado por la descomposición de los compuestos del aglutinante puede salir del cuerpo de la pieza más fácilmente gracias al vacío creado.

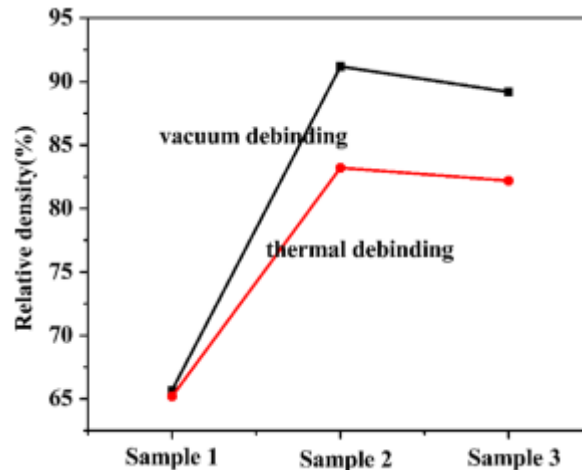


Figura 3.2. Gráfica de comparativa de la densidad de las piezas fabricadas con los 3 tipos de pasta en función del tipo de debinding realizado. Fuente: [9]

Otro estudio realizado por M. Zhou et al. [10] compara el debinding en vacío con el debinding con aire, además de un proceso de debinding realizado en 2 etapas combinando ambos, en primer lugar, realiza el debinding en vacío para luego realizar el debinding con aire. En este estudio se busca comparar y estudiar los defectos relacionados con el debinding y de esta forma poder encontrar un método de realizar este proceso con el menor número posible de defectos mediante la fabricación de una herramienta de corte para un centro de mecanizado.

De esta forma, en primer lugar, se realizó el debinding con aire con una de las piezas fabricadas. La pieza que resultó de este proceso presentó una gran cantidad de defectos, destacando entre ellos una gran separación de las capas, así como grietas de gran tamaño, como se puede comprobar en la Figura 3.3. Esto se produce debido a la gran velocidad a la que se descomponen los compuestos del aglutinante, lo cual produce que el gas generado por esta descomposición no pueda salir de la pieza y genera una presión en su interior. Este problema se puede solucionar mediante el debinding en vacío, ya que la velocidad a la que se descomponen los compuestos del aglutinante es menor y además gracias al vacío generado se favorece la salida de los gases contenidos en el interior de la pieza. Sin embargo, al tratarse de una descomposición más lenta puede producir que se queden partes del aglutinante en el interior de la pieza sin descomponer, lo que puede producir la generación de defectos durante el proceso de sintering.

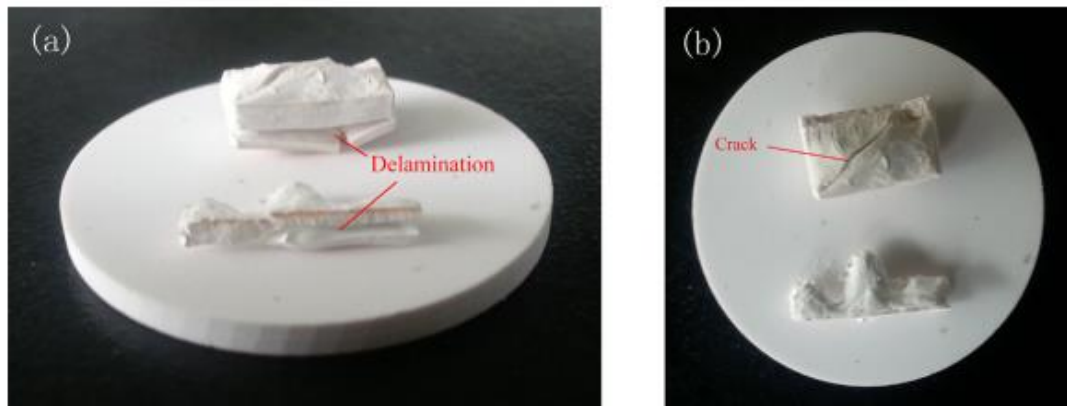


Figura 3.3. Fotografías del resultado obtenido tras someter a la pieza en verde a un proceso de debinding con aire. Fuente: [10]

Es por este motivo que M. Zhou et al. llegaron a la conclusión de que combinando ambos tipos de debinding podrían lograr realizar un proceso de debinding reduciendo en gran medida los defectos en la pieza. De esta forma, en primer lugar, realizaron el debinding en vacío con el objetivo de conseguir la descomposición de la mayor parte del aglutinante y facilitar la salida de los gases generados del interior de la pieza para evitar los defectos que esto produce. A continuación, una vez que el horno se ha enfriado, comenzaron a realizar el debinding con aire con el objetivo de eliminar los restos de aglutinante que quedan en el interior de la pieza gracias a la mayor velocidad de descomposición proporcionada por este método. Así, se logra evitar los futuros defectos que estos restos producirían durante el proceso de sintering al que se sometería la pieza.

Además, en este estudio también realizaron una comparativa entre dos métodos de secado de la pieza, necesario antes de realizar el proceso de debinding. En primer lugar, estudiaron los defectos producidos por el secado de la pieza al aire libre. Mediante este tipo de secado se pudo comprobar que se produce una gran deformación en la pieza provocada por el desigual flujo de aire a la que están sometidas las diferentes partes de la pieza. En segundo lugar, estudiaron el comportamiento de la pieza mediante su secado con el desecante líquido PEG 400. Con este método se logró un secado mucho más regular de la pieza, lo que provocó una contracción más uniforme de la misma como se puede observar en la Figura



3.4, por lo que la deformación fue menor. Además, también se pudo comprobar que con este método se logra una mayor densidad de la pieza secada.

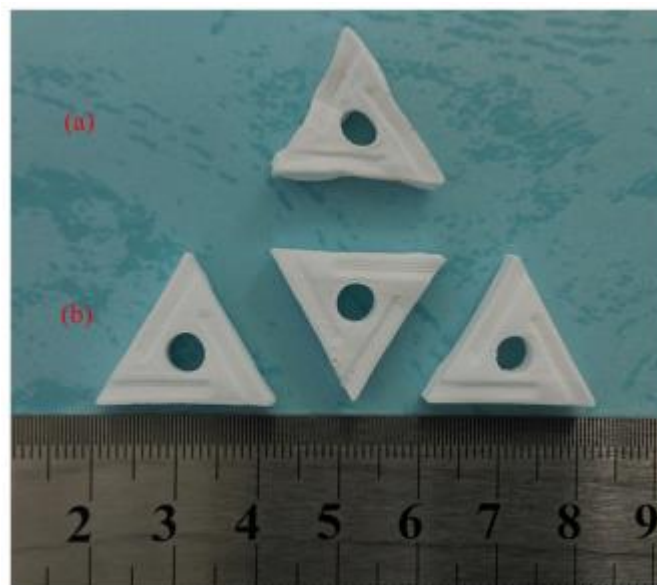


Figura 3.4. a) Resultados obtenidos del secado de la pieza al aire; b) Resultados obtenidos del secado de la pieza con el desecante líquido PEG400. Fuente: [10]

Además, H. Li et al. [11] llevaron a cabo una investigación en la que estudiaron la microestructura y las propiedades de las piezas fabricadas con alúmina en fase  $\alpha$  mediante estereolitografía en función de la velocidad de calentamiento en el debinding en vacío. Este estudio fue realizado en un horno tubular en cuyo interior se produce vacío y manteniendo constante el tiempo de estancia de las piezas en su interior, siendo este de 2 horas. Por tanto, la única variación que se produce es la velocidad la que se calienta el horno hasta alcanzar una temperatura máxima de  $500^{\circ}\text{C}$ , a la cual se asegura la descomposición de todos los componentes del aglutinante. De esta forma, se emplearon 6 velocidades de calentamiento diferentes:  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Una vez que las piezas fueron sometidas a este proceso, se dejaron enfriar hasta la temperatura ambiente, para luego poder someterse al proceso de sintering, el cual fue idéntico para todas ellas. Con respecto a la microestructura y la composición de las piezas se pudo comprobar que el espacio entre las capas crece al aumentar la velocidad de calentamiento. Este aumento del espacio entre las capas favorece su

separación, ya que debilita la unión de las mismas, lo que supone un defecto importante para la pieza. Además, también se comprobó que la velocidad de calentamiento no tiene efectos significativos sobre el tamaño de los cristales de la alúmina ni produce ningún cambio en los enlaces químicos ni en la fase de la alúmina.

En relación a las propiedades físicas, se pudo comprobar que la contracción de la pieza no es igual en las 3 direcciones del espacio, siendo notablemente mayor en el eje Z, mientras que en el eje X y en el eje Y la contracción es muy similar. Esto se debe principalmente a la fabricación capa por capa propia de la fabricación aditiva. En el caso de la estereolitografía se debe principalmente a que a diferencia que el plano XY, el cuál es sometido a una distribución más o menos uniforme de la radiación ultravioleta, el eje Z, debido al grosor de la pieza al ser fabricada a lo largo de este eje, está sometido a una radiación irregular, lo cual produce una unión más débil entre las capas. En cuanto al efecto de la velocidad de calentamiento sobre la contracción de la pieza, se pudo comprobar una disminución de la contracción con el aumento de la misma. Esta disminución de la contracción es relativamente ligera en los ejes X e Y, sin embargo, en el eje Z se produce una disminución muy significativa a partir de los 3°C/min. En relación a la densidad de la pieza y la porosidad final de la pieza después de haber sido sometida al proceso de sintering, se pudo comprobar que la velocidad del calentamiento durante el debinding no tiene una influencia significativa. No obstante, sí que se pudo comprobar que un aumento en ella tiene como consecuencia una reducción del tamaño de los poros en la pieza al salir del debinding, así como un aumento en el tamaño de los granos.

Finalmente, en cuanto a las propiedades mecánicas de las piezas, se pudo comprobar una disminución significativa de la resistencia a flexión de las piezas, así como una reducción también de la dureza obtenida mediante el ensayo Vickers como por el ensayo de nano indentación al aumentar la velocidad de calentamiento durante el debinding. Esto se debe a que como se ha mencionado anteriormente, el aumento de la velocidad de calentamiento favorece la separación de las capas, así como el aumento del tamaño de los granos de cerámica. Estos dos factores

favorecen la aparición de defectos como la delaminación y la aparición de grietas, lo que resulta en una disminución de la resistencia de la pieza.

H. Li et al. [12] también llevaron a cabo otro estudio en el que analizaron las propiedades físicas y las propiedades mecánicas de piezas de alúminas fabricadas mediante estereolitografía en función del tiempo de mantenimiento de las piezas en el horno a la temperatura máxima del ciclo en el proceso de debinding, el cual fue realizado tanto en vacío como en una atmósfera inerte de argón. Para poder llevar a cabo esta comparación se adoptaron los siguientes tiempos de mantenimiento de la pieza en el interior del horno: 0 min, 30 min, 60 min, 120 min y 180 min. En relación a las propiedades mecánicas, se pudo comprobar que realizando el debinding en vacío se logra alcanzar la resistencia a flexión máxima a los 120 min, mientras que, para el debinding con argón, es necesario someter la pieza a un tiempo de mantenimiento de 180 min para obtener un resultado similar. También se pudo comprobar que la resistencia a flexión sin tiempo de mantenimiento, es decir un tiempo de mantenimiento de 0 min, fue un 26,5% inferior en el caso del debinding en vacío, mientras que, para el debinding en argón fue un 62,2% inferior. De esta forma, se puede comprobar la gran importancia del tiempo de mantenimiento para el debinding en una atmósfera de argón. Esta diferencia entre ambos métodos de debinding se debe principalmente a la diferencia de presión de ambos métodos, ya que, en el debinding en vacío la ausencia de presión facilita la salida de los gases generados durante la pirólisis del aglutinante del interior de la pieza, lo que produce una mejora de las propiedades mecánicas de la misma. No obstante, al aumentar el tiempo de mantenimiento por encima de los 180 min, se puede comprobar que para el debinding en vacío se produce una disminución de la resistencia a flexión, mientras que para el debinding en una atmósfera inerte de argón continúa aumentando.

En cuanto a las propiedades físicas, se pudo comprobar que la contracción de la pieza para el debinding en vacío obtenía un mínimo en el eje X y el eje Z y un valor muy bajo para el eje Y para un tiempo de mantenimiento de 120 min. Sin embargo, en el caso del debinding en una atmósfera inerte de argón, la contracción continúa aumentando con el tiempo de mantenimiento.

En conclusión, el debinding es un proceso muy importante en la fabricación de las piezas mediante SLA con materiales cerámicos, por tanto, un correcto diseño del mismo es crítico para poder evitar el mayor número posible de defectos en la pieza, debido a la baja resistencia que presenta la pieza al salir de este proceso. No obstante, también constituye un proceso lento el cual consume una gran cantidad de tiempo en el proceso de fabricación. Es por esto, por lo que se han realizado varios estudios los cuales buscan una forma de reducir la duración de este proceso sin comprometer la integridad de la pieza. Sin embargo, hay que tener en cuenta que reducir el tiempo de este proceso se traduce en una eliminación más rápida de los restos de compuestos orgánicos en el interior de la pieza, lo que provoca una mayor generación de los gases, debidos a la descomposición de estos compuestos, en su interior. Por tanto, si estamos ante una pieza con un grosor considerable o si el ritmo de descomposición es muy elevado, estos gases no podrán abandonar el interior de la pieza, dando lugar a diferentes deformaciones, la cuales pueden derivar en la aparición de grietas en la pieza, así como a la separación de las capas de la misma. De esta forma, han surgido diferentes formas de debinding como pueden ser el debinding en vacío, con aire o con atmósferas de diferentes gases como pueden ser el argón o el nitrógeno, así como la combinación de varios de estos procesos con el objetivo de optimizarlo, ya que el aumentar únicamente el ritmo de calentamiento del propio horno daría lugar a un gran número de defectos, al no poder salir los gases del interior de la pieza de forma adecuada. Entre estos tipos de debinding tenemos que el debinding en vacío, gracias a al vacío que se produce, facilita en gran medida la salida de los gases de la pieza, lo que se traduce en un menor número de defectos, no obstante, hay que tener especial cuidado en el control de su temperatura. Por otro lado, el debinding con aire produce una eliminación muy rápida de los compuestos orgánicos. Sin embargo, esto produce muchos defectos, por lo que este debinding solo es apropiado para la parte final del debinding, cuando la cantidad de compuestos orgánicos no es muy elevada, y de esta forma, su rápida eliminación no afecta a la pieza.

### 3.2 SINTERING.

Tras el proceso de debinding, es necesario someter la pieza a un segundo tratamiento térmico a una temperatura muy superior a la del debinding, pero siempre por debajo de la temperatura de fusión del material cerámico empleado, para así poder conseguir las propiedades finales deseadas de la pieza. De esta forma, mediante este proceso se consigue una unión mucho más fuerte de las partículas de cerámica entre sí, y además se consigue eliminar una gran parte de los poros resultantes del proceso de debinding al lograr compactar las partículas, logrando al mismo tiempo un aumento de la densidad de la pieza. No obstante, esto provoca una contracción de la pieza, la cual no es igual en todas las direcciones del espacio, teniendo gran importancia la contracción en el eje Z, ya que generalmente es significativamente mayor que las otras dos, lo que supone un problema a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño de la pieza a fabricar. Por tanto, se puede comprobar que este proceso supone un punto crítico para la fabricación de piezas cerámicas mediante SLA, ya que es en este punto en el que la pieza adquirirá sus propiedades finales. Es por este motivo, por el que numerosos investigadores han realizado diferentes estudios con el objetivo de optimizar este proceso.

De esta forma, H. Curto et al. [13] realizaron una investigación sobre el proceso de sinterizado por microondas en alúmina con el objetivo de reducir el tiempo de sinterizado. Para ello llevaron a cabo una comparativa entre el proceso de sinterizado convencional y el proceso de sinterizado por microondas entre 3 resinas preparadas con diferentes tamaños de partículas de alúmina. Estas 3 resinas consistían en una resina con partículas de alúmina gruesas ( $d_{50} = 1,3 \mu\text{m}$ ), una resina con granos de alúmina más finos ( $d_{50} = 0,4 \mu\text{m}$ ) y otra resina con una mezcla entre ambos, a la que denominaron 6C4F, constando con de un 60% de granos gruesos y de un 40% de granos finos en peso. En un primer lugar, se realizó un estudio sobre el sinterizado por microondas en piezas fabricadas mediante prensado isostático en frío para así poder conocer el efecto de este tipo de sinterizado sobre la densidad relativa de las piezas al finalizar el proceso y poder conocer de esta forma si este proceso podría suponer una mejora sobre el proceso

convencional. Para ello se compararon los resultados obtenidos mediante el sinterizado por microondas con los obtenidos mediante el sinterizado convencional para los 3 tipos de resinas. En cuanto al sinterizado convencional, las piezas fueron sometidas a un proceso de sinterizado en el que la resina compuesta por las partículas más gruesas de cerámica se sometió a una temperatura de 1690°C durante un periodo de 3 h, mientras que las otras 2 resinas fueron sometidas a una temperatura de 1650°C al mismo periodo de tiempo, mientras que en el caso del sinterizado por microondas, el proceso tuvo una duración de 20 min para las piezas fabricadas con los 3 tipos de resina y unas temperaturas de 1650°C para la resina con partículas de cerámica gruesas y la resina 6C4F y de 1550°C para la otra. Tras realizar los procesos de sinterizado, se pudo comprobar que, para el caso de la resina con granos de cerámica gruesos, el sinterizado por microondas no es un método viable, ya que se obtuvo una densidad relativa significativamente baja debido principalmente a que no se pudo conseguir el crecimiento de los granos. Sin embargo, en el caso de las otras 2 resinas se obtuvieron resultados muy similares para ambos métodos de sinterizado, obteniendo unas densidades relativas un poco inferiores y un menor tamaño de grano. Así, se pudo comprobar en este primer estudio que el sinterizado por microondas podría suponer una optimización frente al sinterizado convencional para resinas con un tamaño de grano medio no muy grande. Por tanto, H. Curto et al. procedieron a realizar un segundo estudio comparando ambos tipos de sinterizado en el caso de la estereolitografía. De esta forma, las piezas fabricadas mediante estereolitografía se realizaron con la mayor carga de cerámica posible, siendo esta de un 72,8% para la gruesa, un 66,7% para la fina y un 66,7% para la 6C4F. Una vez finalizada la fabricación de las piezas en verde y comprobar que no presentan ningún tipo de defecto superficial, se llevó a cabo un proceso de debinding convencional para ambos casos ya que permite un mayor control de las bajas temperaturas que uno por microondas. En cuanto al proceso de sinterizado convencional, tendría las mismas características que las empleadas en el estudio anterior, sin embargo, en este caso se pudo comprobar que, tras este proceso, la pieza fabricada con la resina con granos de cerámica finos presentaría defectos de laminación superficiales, por lo que se descartó del estudio. En el caso del sinterizado por microondas también se mantuvieron los

parámetros del estudio anterior, no obstante, se pudo comprobar que la densidad relativa obtenida para la pieza fabricada con la resina 6C4F era significativamente inferior a la del estudio anterior, por lo que se aumentó el tiempo de sinterizado a 60 min ya que así se pudo conseguir un valor de densidad relativa muy similar al anterior. En el caso de la pieza fabricada con la resina con los polvos de cerámica gruesos, aun aumentando el tiempo de sinterizado, se obtuvo una densidad relativa bastante inferior en comparación al sinterizado convencional por lo que las propiedades finales de esta pieza serían significativamente inferiores a las de la pieza fabricada con la misma resina, pero sinterizada de forma convencional. Sin embargo, en el caso de la pieza fabricada con la resina 6C4F se obtuvieron resultados muy similares en cuanto a su módulo elástico y su dureza pese a presentar una densidad relativa inferior que en el caso del sinterizado convencional. Esto puede explicarse debido al menor crecimiento de los granos en el sinterizado por microondas gracias a la mayor velocidad de calentamiento a la que se somete la pieza. De esta forma, se pudo concluir que, para resinas con un tamaño de grano fino o una mezcla de este con otro más grueso, el sinterizado por microondas puede suponer una mejor opción gracias a la reducción que proporciona en la duración del proceso de sinterizado.

Por otro lado, X. Liu et al. [14] llevaron a cabo un estudio sobre la influencia de la temperatura de sinterizado, así como del tiempo de sinterizado sobre la densidad, las propiedades mecánicas y la microestructura de piezas fabricadas con una mezcla de alúmina y zirconia mediante estereolitografía. El objetivo de añadir la zirconia a la alúmina consiste en intentar mejorar la resistencia a la fractura de esta. Para poder comprobar el efecto de la temperatura de sinterizado sobre las propiedades de las piezas se emplearon temperaturas de 1450°C, 1500°C, 1550°C y 1600°C manteniendo un tiempo de sinterizado constante de 60 min. De igual forma, para poder comprobar el efecto del tiempo de sinterizado sobre las propiedades de las piezas se compararon los resultados de someter las piezas a un tiempo de sinterizado de 30 min, 60 min y 90 min manteniendo una temperatura de sinterizado constante de 1500°C. De esta forma, pudieron comprobar que la densidad de la pieza depende de la temperatura de sinterizado ya que esta aumenta con la temperatura hasta cierto punto en el que se alcanza su máximo, en

este caso ocurre a los 1550°C con un valor de 3,78 g/cm<sup>3</sup>, tras el cual se produce una ligera disminución de la misma al aumentar la temperatura, como se puede comprobar en la Figura 3.5. En el caso del tiempo de sinterizado también se pudo comprobar que se produce un incremento de la densidad con el aumento del tiempo de sinterizado, como lo refleja la Figura 3.6. No obstante, se puede observar que, a partir de los 60 min la densidad de la pieza comienza a aumentar de manera mucho más lenta.

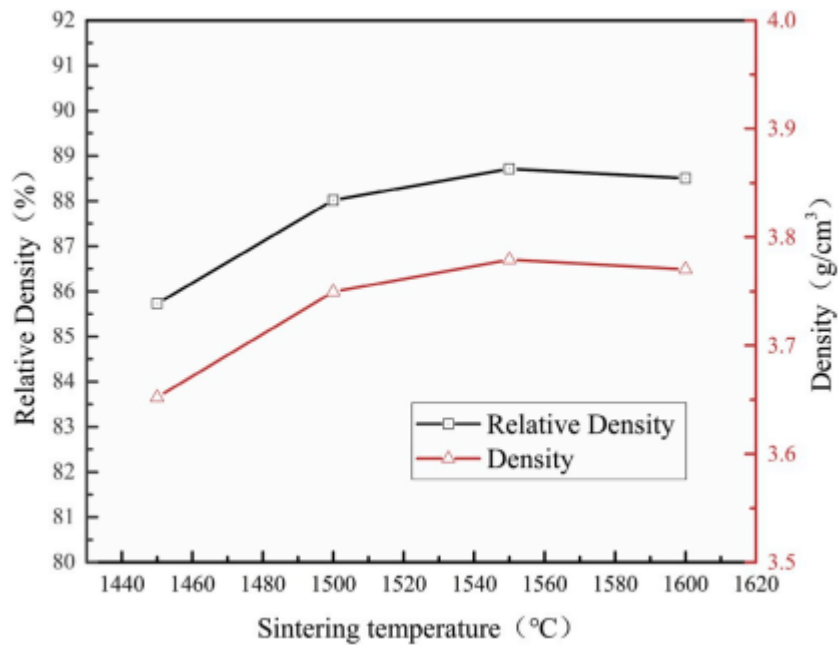


Figura 3.5. Densidad y densidad relativa en función de la temperatura de sinterizado cuando el tiempo de mantenimiento es de 60 min. Fuente: [14]



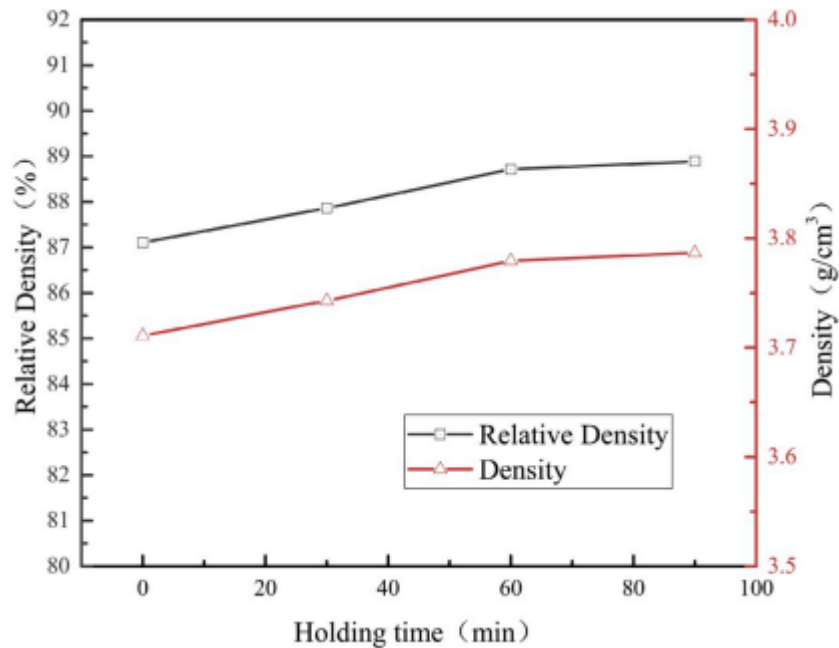


Figura 3.6. Densidad y densidad relativa en función del tiempo de mantenimiento cuando la temperatura de sinterizado es de 1500°C. Fuente: [14]

En cuanto a las propiedades mecánicas de las piezas tras el proceso de sinterizado, se pudo observar que al aumentar la temperatura de sinterizado también se produce un aumento en el tamaño medio de grano de la alúmina y la zirconia hasta alcanzar los 1500°C, temperatura a partir de la cual se produce una disminución del mismo, lo que se puede observar en la Figura 3.7. Lo mismo ocurre en el caso del tiempo de sinterizado ya que, el tamaño medio de grano aumenta hasta los 60 min, tiempo a partir del cual se produce una disminución de este tamaño, como se puede observar en la Figura 3.8.

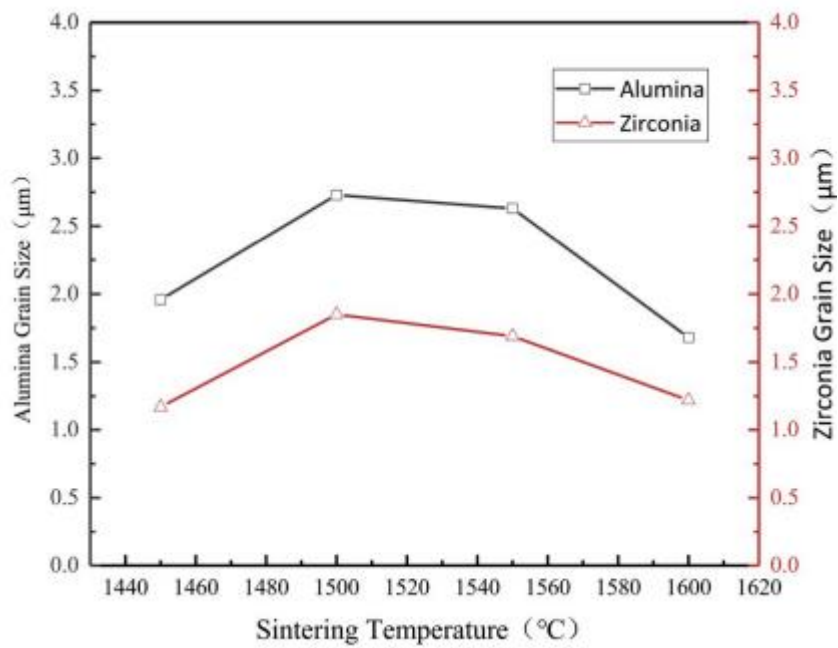


Figura 3.7. Tamaño de las partículas de alúmina y de zirconia en función de la temperatura de sinterizado cuando el tiempo de mantenimiento es de 60 min. Fuente: [14]

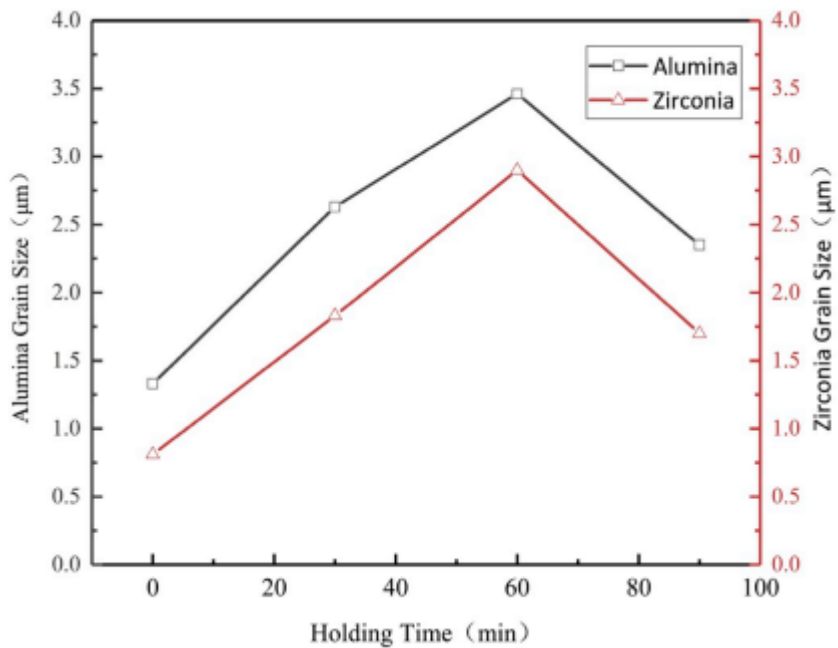


Figura 3.8. Tamaño de las partículas de alúmina y zirconia en función del tiempo de mantenimiento cuando la temperatura de sinterizado es de 1500°C. Fuente: [14]

En el caso de la dureza en función de la temperatura de sinterizado, alcanza su máximo a los 1500°C, ya que es a esta temperatura a la que se alcanza el tamaño

máximo de grano, gracias a lo que se produce un aumento en la superficie de contacto entre las fronteras de granos. Debido a esto, a partir de esta temperatura de sinterizado, se produce una reducción de la dureza, ya que el tamaño de los granos decrecía al aumentar la temperatura por encima de los 1500°C. Esto es idéntico a lo que ocurre al aumentar el tiempo de sinterizado manteniendo constante la temperatura ya que, la dureza alcanza su valor máximo a los 60 min, tiempo en el que el tamaño de grano de la muestra también alcanza su máximo, y es a partir de este punto en el que la dureza comienza a disminuir ya que también lo hace el tamaño de grano.

En relación a la microestructura de la pieza se puede observar que el número de poros disminuye al aumentar la temperatura de sinterizado. De esta forma, se puede comprobar que a una temperatura de 1450°C hay bastantes poros, además de que la distribución de los granos de alúmina y zirconia no es homogénea. Al aumentar la temperatura a 1500°C y 1550°C se pudo comprobar una disminución del número de poros en la muestra. También se pudo comprobar que en este rango de temperaturas la distribución de los granos es mucho más uniforme y tienden a agruparse más entre ellos, lo que produce una mejor unión. En el caso del tiempo de sinterizado, se puede comprobar que su aumento también provoca una reducción del número de poros y una distribución más uniforme de los granos de zirconia alrededor de las fronteras de los granos de alúmina. No obstante, al aumentar el tiempo de sinterizado por encima de los 90 min se pudo observar que a pesar de que en general el tamaño de grano disminuye, algunos granos continúan creciendo de forma anormal, lo que provoca una distribución no uniforme que se traduce en una disminución de las propiedades mecánicas de las muestras.

Además de estos estudios, X. Tan et al. [15], llevaron a cabo una investigación en la que compararon la microestructura, las propiedades mecánicas y la resistencia al paso del tiempo de implantes dentales de zirconia empleado un sinterizado de alto velocidad con los resultados obtenidos mediante la realización del sinterizado convencional. También realizaron una comparativa de la fabricación de estos implantes mediante substracción de material con su fabricación mediante SLA con material cerámico. De esta forma, diseñaron 3 ciclos diferentes de sinterizado, siendo 1 de ellos el sinterizado de alta velocidad y los otros 2

sinterizados convencionales, en los que solo varía la temperatura máxima. En cuanto al sinterizado de alta velocidad, recibe este nombre debido a que se diseña con un mayor ritmo de calentamiento y de posterior enfriamiento, siendo en este caso 5 veces mayor que en los sinterizados convencionales realizados, así como también un menor tiempo de mantenimiento de la pieza a la temperatura pico, el cual es 4 veces menor que en los otros dos sinterizados. Las características de los 3 tipos de sinterizado pueden ser observadas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Ratios de calentamiento, temperaturas máximas, tiempo de mantenimiento de la pieza a la temperatura máxima y ratios de enfriamiento de los 3 sinterizados realizados.

Fuente: [15]

Sintering protocol	Code	Heating rate	Peak temperature	Dwell time	Cooling rate
High-speed sintering	HS	25 °C/min	1580 °C	30min	25 °C/min
Conventional sintering-1	CS-1	5 °C/min	1580 °C	120min	5 °C/min
Conventional sintering-2	CS-2	5 °C/min	1450 °C	120min	5 °C/min

En cuanto a los resultados obtenidos, se pudo comprobar que la densidad de las piezas fabricadas por ambos métodos y sinterizadas mediante los 3 tipos diferentes de sinterizado eran muy similares entre sí, con una densidad relativa muy elevada, superior al 99,2% en todos los casos. Estos resultados se pueden observar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Densidad de las piezas fabricadas mediante SLA con cerámica (DLP-fabricated zirconia) y mediante substracción de material (SM-fabricated zirconia), y sometidas a los 3 tipos de sinterizado. Fuente: [15]

Material	Sintering methods	Density (g/cm <sup>3</sup> )		Relative density (%)
		Mean	SD	
DLP-fabricated zirconia	HS	6.020	0.018	99.26
	CS-1	6.027	0.012	99.44
	CS-2	6.024	0.015	99.42
SM-fabricated zirconia	HS	6.032	0.013	99.78
	CS-1	6.035	0.010	99.74
	CS-2	6.030	0.012	99.77

Por otro lado, se realizó un ensayo de dureza de Vickers y de resistencia a la fractura con las piezas antes y después de ser sometidas a un proceso de envejecimiento de 5 horas en el interior de un autoclave. Se pudo comprobar que antes del envejecimiento, las piezas sometidas al proceso de sinterizado CS-1 eran las que presentaban una menor dureza y una mayor resistencia a la fractura independientemente del proceso de fabricación. En cuanto a las piezas fabricadas por SLA y sinterizadas mediante los otros dos ciclos, se puede observar que presentaban características muy similares entre sí, presentado una menor dureza y una mayor resistencia que las fabricadas mediante el proceso de substracción de material. En estas piezas se puede ver que las sinterizadas mediante el proceso de sinterizado rápido tienen una dureza ligeramente menor y, por tanto, su resistencia a la fractura es un poco mayor. Tras el proceso de envejecimiento realizado, se produjo una reducción tanto en la dureza como en la resistencia a la fractura de todas las piezas.

Para finalizar, el sintering constituye la última fase de la fabricación mediante la estereolitografía con materiales cerámicos, tras la cual, las piezas salen totalmente acabadas y adquieren sus propiedades finales. Por tanto, también supone un paso muy importante, ya que un fallo en este proceso puede suponer que las piezas no adquieran las propiedades necesarias dando lugar a diferentes defectos.

Al igual que en el caso del debinding, el sintering es otro proceso que también consume una cantidad de tiempo considerable. Es por este motivo que varios investigadores han realizado diferentes estudios para reducir este tiempo,

comprometiendo en la menor medida posible las propiedades de la pieza. Para poder llevar a cabo este objetivo se han diseñado diferentes tipos de sintering como pueden ser el sinterizado por microondas o el sinterizado rápido, además, también se han estudiado los efectos del tiempo de mantenimiento de la pieza, así como de los ritmos de calentamiento y enfriamiento del horno. De esta forma, se puede concluir que el proceso de sinterizado constituye un gran campo de investigación dentro de este tipo de fabricación aditiva debido a su gran importancia.

### **3.3 RESINAS EMPLEADAS EN ESTEREOLITOGRAFÍA CON MATERIALES CERÁMICOS.**

Las resinas empleadas para llevar a cabo el proceso de estereolitografía con materiales cerámicos son muy similares a las resinas empleadas en la estereolitografía convencional, con la principal diferencia de que contienen partículas de materiales cerámicos en suspensión. Además, por lo general, estas resinas no contienen oligómeros, ya que estos aumentan en gran medida su viscosidad [5], lo que complicaría en gran medida su manejo. Una alta viscosidad de la resina supone un gran inconveniente en el proceso de estereolitografía con materiales cerámicos porque dificulta su manejo, ya que hace más complicado el proceso de nivelación de la resina cuando la plataforma se desplaza para dar lugar a otra nueva capa de la pieza.

Otra de las propiedades que es necesario que cumplan este tipo de pastas reside en que el índice de refracción de los polvos de material cerámico sea lo más parecido posible al de la resina con la que se van a mezclar, ya que la dispersión del haz de luz ultravioleta aumenta con el incremento de la diferencia entre los índices de refracción de la resina y de los polvos de material cerámico [16], [17]. Esta dispersión del haz de luz ultravioleta supone un problema en el proceso de fabricación de la pieza ya que afecta negativamente a la precisión a la hora de escanear la capa durante el proceso de curado, ya que al dispersarse la luz se produce un aumento en el ancho de curado, lo que da lugar a zonas con dimensiones diferentes a las diseñadas [16]–[18]. Además, esta dispersión de la luz también produce que el haz de luz no se concentre en la zona deseada, lo que

se traduce en una disminución de la densidad de energía que incide sobre dicha zona [5], [19], y por tanto en una reducción de la profundidad de curado, dando lugar a un mayor tiempo de fabricación ya que debido a esto el espesor de las capas ha de ser menor, lo que da lugar a un mayor número de capas a escanear.

Dentro de estas mezclas de resinas y polvos de materiales cerámicos podemos concluir que existen dos tipos diferentes en función del tipo de resina empleada. De esta forma, tenemos las resinas acuosas, con una base de acrilamida, y las resinas no acuosas, con bases de acrilatos y epoxi. Las mezclas de resinas acuosas con base de acrilamida presentan un índice de refracción significativamente bajo que contrasta en gran medida con el de los polvos de material cerámico, lo que provoca un aumento en la dispersión del haz de luz y por tanto una reducción de su penetración en la capa de resina, reduciendo su profundidad de curado, así como también provoca una reducción en la precisión con la que se realiza el escaneado de la capa, como se ha mencionado anteriormente [5]. Además, debido a la gran cantidad de agua que presentan, provocan que la pieza en verde sea muy débil, facilitando de esta forma la aparición de grietas y otro tipo de defectos [5]. No obstante, esta gran cantidad de agua les permite tener una baja viscosidad lo que supone un punto a su favor al facilitar de esta forma su manejo en el proceso de fabricación [5]. Además, también destacan por su baja volatilidad y por permitir el empleo de óxidos cerámicos ya que en este tipo de resinas no tienden a formar conglomerados [5]. Por otro lado, las resinas no acuosas con bases de acrilatos y resinas epoxi, presentan un índice de refracción mayor, mucho más parecido al de los polvos de material cerámico, lo que provoca una disminución de la dispersión, y, por tanto, un aumento de la profundidad de curado, así como de la precisión en la fabricación de la pieza en verde, la cual, presenta una resistencia mucho mayor que la proporcionada por las resinas acuosas con base de acrilamida [5]. Sin embargo, la viscosidad de este tipo de resinas es muy superior comparada con la que presentarían las resinas acuosas con base de acrilamida con la misma fracción de polvos de material cerámico [5].

Además de todo lo expuesto anteriormente, a la hora de crear una nueva mezcla de resina con polvos de material cerámico también es necesario tener en cuenta otros factores para que esta mezcla pueda ser empleada para producir piezas de

calidad mediante la estereolitografía con materiales cerámicos. Uno de los principales factores a tener en cuenta a la hora de diseñar una mezcla apta para este proceso de fabricación aditiva se encuentra en el porcentaje de partículas de material cerámico en la muestra, el cual suele rondar sobre el 50% en peso de la mezcla, ya que este porcentaje suele ser suficiente para la impresión de piezas con una alta densidad [20]. No obstante, es necesario que este porcentaje sea lo más elevado posible, para así poder producir piezas con la mayor densidad posible, ya que se reduce el número de poros en la pieza y por tanto también la contracción de la misma, dando lugar a piezas con mejores propiedades mecánicas y una reducción en la probabilidad de que aparezcan diversos defectos en la misma, ya que, al aumentar la densidad de la pieza, esta presenta una estructura interna mucho más uniforme [5], [20]. Además, como hay una mayor fracción de polvos, la cantidad de resina que se ha de eliminar mediante el proceso de debinding es menor, lo que reduce el tiempo que ha de pasar la pieza en el interior del horno, produciendo de esta forma una optimización del proceso.

No obstante, el principal factor que limita la cantidad de polvos de material cerámico es la viscosidad de la mezcla, ya que, cuanto mayor es el porcentaje de polvos, mayor es la viscosidad de la resina. Una viscosidad elevada de la mezcla hace que sea mucho más complicado trabajar con ella, además de que limita la fabricación de piezas con geometrías muy complejas [21]. Por tanto, otro de los factores a tener en cuenta a la hora de crear una nueva mezcla para la estereolitografía con materiales cerámicos es la viscosidad que ha de ser lo más baja posible. Por este motivo, se suelen añadir dispersantes y disolventes a las mezclas de resinas fotopolimerizables con materiales cerámicos para reducir su viscosidad y evitar la aglomeración de los polvos y su sedimentación [20], [22]. Por tanto, la viscosidad será el principal parámetro empleado para poder limitar la carga de partículas cerámicas en la mezcla y así poder asegurar que esta puede ser empleada en el proceso de estereolitografía.

Otro factor crucial a la hora de diseñar una nueva mezcla de resinas con partículas de material cerámico es la profundidad de curado, mencionada anteriormente. La profundidad de curado corresponde con la profundidad de la capa de la mezcla que el haz de luz ultravioleta es capaz de curar, por tanto, supone el



límite de espesor máximo que podría tener la capa para poder ser curada. No obstante, el espesor real de la capa ha de ser como máximo, ligeramente inferior a la profundidad de curado para asegurar el curado completo de todo el espesor de la capa. La profundidad de curado se ve afectada en gran medida por la dispersión del haz de luz ultravioleta como se ha mencionado anteriormente. Esto implica que a la hora de diseñar una nueva mezcla es necesario tener en cuenta todos los parámetros que afectan a este fenómeno para así poder reducir lo máximo posible su influencia. De esta manera, en primer lugar, es necesario seleccionar una resina y unos polvos de material cerámico que tengan un índice de refracción muy similar, ya que cuanto mayor sea la diferencia entre ambos, menor será la profundidad de curado para esa mezcla, debido a la dispersión del haz de luz, tal y como se mencionó anteriormente. Además, la profundidad de curado también se ve afectada por el tamaño de los polvos de material cerámico, así como su distribución y cantidad [5], [23]. Así, cuanto menor sea el tamaño medio de los polvos de material cerámico y cuanto mayor sea su porcentaje en volumen en la mezcla, menor será la profundidad de curado, ya que aumenta la dispersión del haz de luz [5], [16], [17], [23]. Por último, la profundidad de curado también depende de forma directa de la cantidad de fotoiniciadores, así como de la energía aportada por el haz de luz, la cual favorece la profundidad de curado [5], [16], [17].

En cuanto a la preparación de una de estas mezclas de resinas fotosensibles y partículas de material cerámico, H. Xing et al. [18] llevaron a cabo un estudio sobre la preparación de una mezcla de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) con un tamaño medio de partícula de  $d_{50} = 600\text{nm}$  para poder realizar con ella el proceso de SLA. De esta forma, crearon una mezcla usando como resina aglutinante el di (trimetilolpropano) tetraacrilato (Di-TMPTA) y empleando como monómeros para reducir la viscosidad el diacrilato de 1-6 hexanodiol (HDDA), 4-Aciloilmorfolina (ACMO) y el poli[oxi(metil-1-2-etanodilo)] (NPG2PODA). Además, como agente fotoiniciador decidieron emplear el 1-hidroxiciclohexil fenil cetona.

Para poder lograr la correcta mezcla de las partículas de alúmina con la resina, es necesario modificar su superficie, ya que estas presentan un comportamiento hidrófilo, el cual se encuentra en oposición del comportamiento hidrófobo de la mayor parte de las resinas, lo que provoca la aglomeración y sedimentación de las

partículas. Debido a este motivo, H. Xing et al. tuvieron que modificar la superficie de las partículas de alúmina mediante el empleo de sustancias tensioactivas. De esta forma, realizaron una comparativa entre 3 sustancias de este tipo, siendo 2 de ellas agentes de acoplamiento de silano como son la KH550 y la KH560, a las cuales se tuvo que añadir ácido acético y amoniaco para regular su pH, y siendo la otra el ácido esteárico, mezcladas todas ellas con etanol. De esta forma, se mezclaron las partículas de alúmina con estas sustancias, teniendo estas un porcentaje en peso del 2% del peso de la alúmina, en una disolución a 60°C y sometida a vibraciones ultrasónicas durante 1 hora. Por otro lado, se realizaron varias mezclas diferentes de la Di-TMPTA con cada uno de los 3 monómeros empleados y el fotoiniciador, cuya proporción corresponde con un 3% en masa del peso total de las resinas. Esta mezcla fue realizada a 30°C y sometida a vibraciones ultrasónicas durante un periodo de 30 min.

Tras esto, llevaron a cabo un estudio en el que compararon el comportamiento de los polvos de alúmina tratados con cada una de las sustancias y polvos de alúmina sin tratar en el seno de las mezclas de resina y monómeros. Así, pudieron comprobar que las partículas tratadas tenían un menor grado de precipitación, debido a que las partículas tratadas habían pasado de tener un comportamiento hidrófilo a un comportamiento hidrófobo. No obstante, dentro de las 3 sustancias para tratar las partículas de alúmina, las tratadas con el KH560 presentaron la menor sedimentación en todas las mezclas de los diferentes monómeros seguidas de las tratadas con el ácido esteárico, aunque solo en el caso de la mezcla formada por el Di-TMPTA y el NPG2PODA y la formada por el Di-TMPTA y el HDDA.

También llevaron a cabo una comparativa en relación a la viscosidad, en la que, al igual que en el caso anterior, realizaron diferentes mezclas con los polvos de alúmina sin tratar y los polvos tratados con cada uno de los agentes tensioactivos en cada una de las mezclas formadas por los diferentes monómeros. Todas estas mezclas presentaban la misma cantidad de partículas de alúmina, siendo esta de un 60% en peso, ya que un porcentaje superior haría que el uso de la mezcla de polvos sin tratar no pudiese ser empleada en el proceso de estereolitografía debido a su elevada viscosidad. De esta forma, desde un primer momento se pudo observar que las mezclas con polvos de alúmina sin ser modificados presentaban

una viscosidad notablemente superior a aquellas que presentaban los polvos modificados por las sustancias tensioactivas. Dentro de las demás mezclas, las que presentaban la menor viscosidad eran las de las partículas de alúminas tratadas con KH560 y, dentro de ellas, la mezcla de Di-TMPTA con NPG2PODA. Seguida de ellas, al igual que en el caso anterior se encuentran las tratadas con ácido esteárico, aunque en el caso de la mezcla de Di-TMPTA con ACMO se pudo ver una viscosidad significativamente superior que en los casos anteriores. Por último, las mezclas de las partículas tratadas con el agente KH550 presentaban la mayor viscosidad de todas ellas, siendo la de la mezcla de Di-TMPTA con HDDA la de mayor viscosidad de todas, sin contar las de las partículas de alúmina sin tratar.

Por otra parte, investigaron los efectos de la proporción de los monómeros y la matriz de la resina. De esta forma, estudiaron los efectos al tener una proporción de 3/7, 5/5, 7/3 y 9/1 de los monómeros y de Di-TMPTA respectivamente. Se pudo comprobar que, al aumentar el porcentaje de monómeros en la mezcla, se producía una reducción de la viscosidad. Además, también fue observable que un aumento en la cantidad de monómeros producía una reducción en la profundidad de curado.

Aparte de esta investigación, otro estudio fue llevado a cabo por J. Tang et al. [24] cuyo objetivo se centraba en la preparación de una mezcla de resinas fotocurables con partículas de carburo de silicio (SiC), ya que el principal inconveniente de este material en el proceso de estereolitografía se encuentra en su gran absorción del haz de luz y su elevado índice de refracción, el cual contrasta en gran medida con el de las resinas, lo que provoca una gran dispersión del haz de luz, impidiendo así el correcto curado de las capas de resina durante la fabricación de la pieza mediante estereolitografía. Debido a esto, el contenido de SiC en la mezcla debería ser muy pequeño para poder lograr una profundidad de curado adecuada, no obstante, esto provocaría una gran cantidad de defectos en la pieza, ya que al no haber suficiente SiC se produciría una gran contracción de la misma tras el proceso de debinding. Para evitar esto, J. Tang et al. decidieron añadir óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) como relleno para aumentar de esta forma el contenido en sólidos de la mezcla y así poder reducir la contracción producida tras el proceso de debinding.

La resina creada para este estudio estaba compuesta por los siguientes monómeros HDDA, triacrilato de trimetilopropano (TMPTA) y diacrilato de polietilenglicol (PEG600DA). Como fotoiniciador emplearon óxido de fenilbis(2,4,6-trimetilbenzoil)fosfina (BAPO) y también usaron polietilenglicol (PEG) como agente tensioactivo y lubricante. Finalmente, como contenido sólido emplearon partículas de SiC con un tamaño medio de partícula de  $d_{50} = 30 \mu\text{m}$  y partículas de SiO<sub>2</sub> de dos tamaños diferentes, unas más gruesas con un tamaño medio de partícula de  $d_{50} = 46 \mu\text{m}$  y otras más finas de  $d_{50} = 2 \mu\text{m}$ .

En un primer lugar, se estudiaron los efectos que tenía la proporción de los distintos monómeros en la mezcla. De esta forma, se crearon 4 mezclas diferentes en función de la proporción de estos monómeros como se indica en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3: Porcentajes en volumen de los monómeros en las 4 mezclas estudiadas, así como su profundidad de curado. Fuente: [24]

Group	HDDA/vol%	TMPTA/vol%	PEG600DA/vol%	$D_c/\mu\text{m}$
1#	0.3	0.5	0.2	119
2#	0.7	0.2	0.1	141
3#	0.6	0.3	0.1	139
4#	0.3	0.7	0	144

Así se pudo comprobar que la cantidad de TMPTA y de PEG600DA estaba directamente relacionada con la viscosidad de la mezcla. Por tanto, aunque como se muestra en la tabla que la mezcla 4 es la de mayor profundidad de curado, su viscosidad era demasiado elevada como para poder ser empleada. Es por ello, que la mejor proporción de monómeros es la de la muestra 2, ya que presenta una profundidad de curado bastante alta, y una viscosidad relativamente baja ya que el monómero de mayor proporción es el HDDA.

Además de la proporción de los monómeros, también es necesario investigar los efectos de la proporción de polietilenglicol en la mezcla. De esta forma se pudo comprobar que el efecto de la proporción de polietilenglicol en la viscosidad no era el mismo para una tasa de cizallamiento inferior a 10 Pa.s que más de 10 Pa.s, ya que en la zona cercana a 10 Pa.s se puede ver un aumento en la viscosidad para todos los porcentajes de polietilenglicol. En cuanto a la profundidad de curado, se

pudo observar que a mayor contenido de PEG, menor se veía afectada. Por último, en relación a la sedimentación, se pudo comprobar que hasta un 2,3% aproximadamente de PEG en peso esta disminuía, sin embargo, a partir de este valor se produce un aumento de la misma.

En cuanto a la proporción de partículas gruesas de óxido de silicio, se puede comprobar que, a mayor cantidad, la viscosidad de la mezcla aumenta significativamente, también, al aumentar su cantidad se produce un incremento en la profundidad de curado.

También fue necesario estudiar la proporción del fotoiniciador en la mezcla. De esta forma, pudieron comprobar que la cantidad óptima se encontraba en torno a un 2% en peso, ya que por debajo de este valor la cantidad de energía que llegaba era insuficiente para conseguir su activación y por encima de ella se reducía la profundidad de curado.

Por último, en relación a la proporción de SiC se pudo comprobar que la cantidad óptima de este elemento se encontraba en torno al 32,5% en peso de la mezcla, ya que un valor más elevado reduciría la profundidad de curado, y un valor menor daría lugar a un peor producto final.

De esta forma, la composición óptima de la mezcla a la que se llegó mediante este estudio se muestra en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4: Composición óptima de la mezcla para la obtención de los mejores resultados.  
Fuente: [24]

HDDA	TMPTA	PEG600DA	BAPO	PEG	SiO <sub>2</sub>		SiC
					15 vol%		
70 %	20 %	10 %	2 wt %	7.5 wt%	Coarse	fine	32.5 vol%
					SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	
					30 wt%	70wt %	

Por otra parte, Z. Xing et al. [25] llevaron a cabo otro estudio en el que investigaron el efecto que produce la adición de un plastificante, en este caso polietilenglicol 400 (PEG-400), a una mezcla de resina fotosensible y partículas de

alúmina. El objetivo de este estudio era buscar una forma de conseguir que las piezas en verde presentasen una mayor resistencia y cohesión. De esta forma, realizaron 5 resinas que van del 20% al 28% de plastificante en peso, denominadas P-20, P-22, P-24, P-26 y P-28 respectivamente. De esta forma, se fabricaron las piezas en verde, de las cuáles no se pudo observar ningún defecto de ellas a simple vista excepto en las fabricadas con una menor cantidad de plastificante como es el caso de las fabricadas con las mezclas P-20 y P-22, en las cuáles se puede observar una cierta delaminación. Tras el sinterizado de las piezas se pudo comprobar la mala integridad de las piezas fabricadas con la mezcla P-20. No obstante, las piezas fabricadas con un porcentaje de PEG-400 superior al 22% no presentaban ningún defecto aparente. Además, en cuanto a su densidad, no existía una diferencia significativa entre ellas, al igual que en el caso de su resistencia a flexión. Por tanto, pudieron concluir que el uso de un plastificante era beneficioso ya que mejoraba la integridad de las piezas en verde, evitando en gran medida la aparición de defectos en las mismas, sin afectar negativamente a las propiedades finales de las piezas tras el final de su proceso de sinterizado.

Y. Gao et al. [26], llevaron a cabo un estudio en el que emplearon una mezcla de resina con una baja carga de partículas de material cerámico con el objetivo de obtener una pieza con una gran precisión al intentar controlar la contracción que se producirá en la pieza. De esta forma, tras realizar un análisis de la viscosidad entre 2 mezclas de resina con titanato de bario ( $\text{BaTiO}_3$ ), una con un 10% y otra con un 15% de bario en peso, decidieron emplear la mezcla del 10% en peso por ser la que tenía un comportamiento mejor. Como la carga de partículas sólidas en la resina es bastante baja, la viscosidad de la mezcla también es baja lo que favorece al proceso de fabricación. No obstante, tras el proceso de sinterizado, como la carga de partículas es muy baja, la contracción que sufren las piezas es muy elevada siendo esta de un 87,36% en volumen a una temperatura de sinterizado de 1100°C, de un 93,37% a una temperatura de 1200°C, y de un 98,25% a una temperatura de 1300°C. Aun así, teniendo en cuenta estos altos valores de contracción, se podrían crear piezas con una buena precisión con una baja carga de partículas sólidas, lo que daría lugar a un proceso relativamente económico.

A diferencia de este estudio, O. Santoliquido et al. [27] diseñaron un dispositivo para la fabricación de piezas mediante este proceso con mezclas muy viscosas. Para ello emplearon una mezcla de partículas de alúmina con un diámetro  $d_{50} = 2,50 \mu\text{m}$  con diacrilato de tripropilenglicol (TPGDA) con unas proporciones en peso de un 34% y un 66% respectivamente. En cuanto al aparato diseñado se puede apreciar en el esquema mostrado en la Figura 3.9:

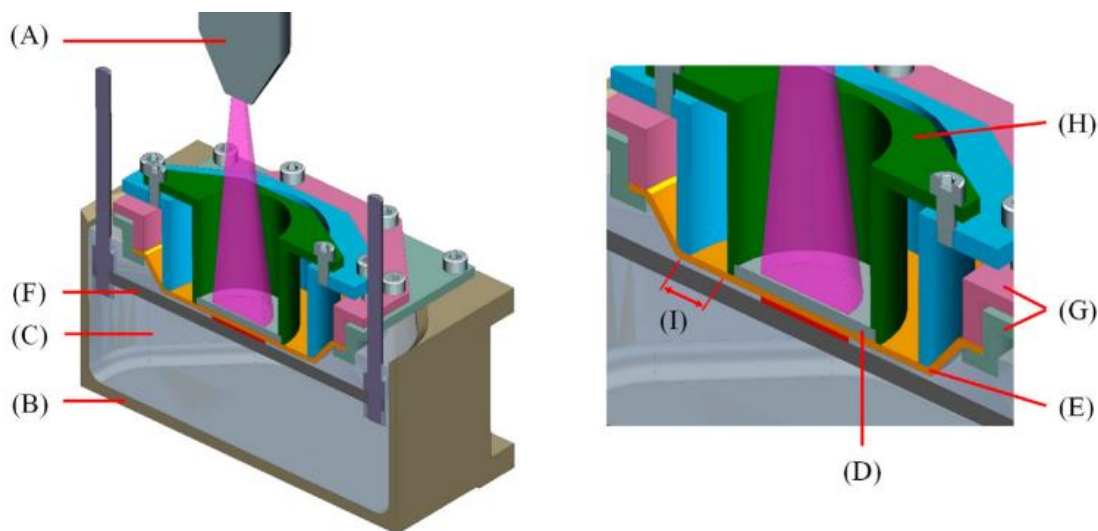


Figura 3.9. Esquema del aparato diseñado por O. Santoliquido et al., con el objetivo de permitir la fabricación de piezas de material cerámico a partir de mezclas con una elevada viscosidad. Fuente: [27]

Este aparato está diseñado para ser acoplado a una máquina de estereolitografía con una orientación de arriba hacia abajo. Como se puede comprobar en la figura 3.3.1 la fuente de luz se situaría en el punto A, proyectándose la luz sobre D que corresponde con una placa de vidrio que se encuentra justo encima de E, que constituye una fina capa de silicona de polidimetilsiloxano. Esta película flexible de silicona se encuentra montada sobre G, y su tensión es determinada por el cilindro H el cual puede moverse verticalmente y está unido a D. Por último, se puede comprobar la zona I de la película de silicona la cual no está en contacto con D, esto permite llevar a cabo el efecto de despegue buscado con este tipo de aparato. Todo esto se encuentra montado sobre la plataforma de fabricación F dejando un espacio igual al espesor

de capa para permitir que la resina C pueda entrar y dentro del tanque B. Cabe destacar que la película de silicona está sometida a desgaste tras los procesos de despegue y su tiempo de vida depende principalmente de su espesor.

De esta forma el proceso de fabricación con este aparato consiste en que, en un primer lugar, la plataforma de fabricación se detiene a una distancia igual al espesor de capa de la película de silicona, dejando entrar la resina en ese espacio. En segundo lugar, se produce el escaneado y curado de la capa de resina, tras el cual la plataforma desciende, provocando que la película, la cual sigue pegada a la capa de resina curada, comience a despegarse poco a poco, reduciendo el estrés al que está sometida la pieza. Una vez que se ha despegado por completo, este proceso volvería a comenzar. En la Figura 3.10 se puede observar un esquema del mismo.

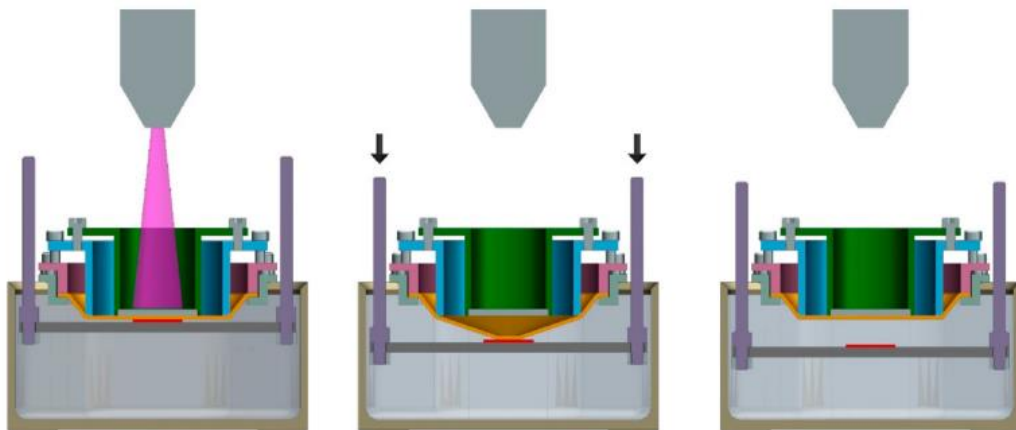


Figura 3.10: Esquema del proceso de fabricación con el aparato diseñado por O. Santoliquido et al. Fuente: [27]

En cuanto a la investigación, se realizó un estudio de la fabricación de las piezas en verde con este aparato, comparándolas con las obtenidas mediante el proceso convencional de estereolitografía con orientación de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo. De esta forma, se realizaron 3 diseños con estructuras diferentes, como se muestra en la Figura 3.11, para ser fabricados por cada uno de los 3 métodos de fabricación. Los resultados obtenidos por estos 3 métodos de fabricación pueden ser observados en la Figura 3.12.



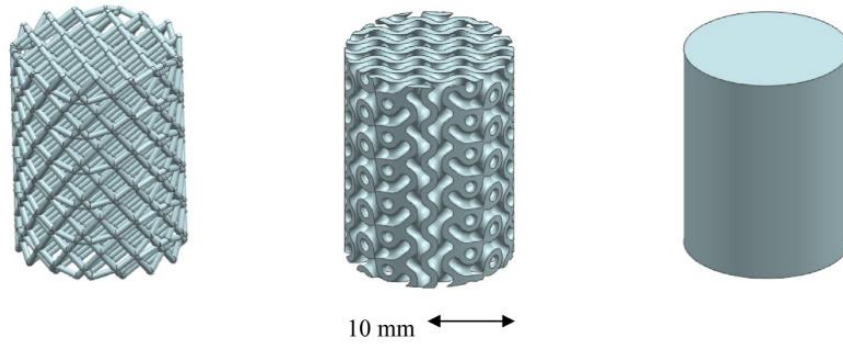


Figura 3.11. Diseños empleados en la comparativa de los 3 métodos de fabricación.  
Fuente: [27]

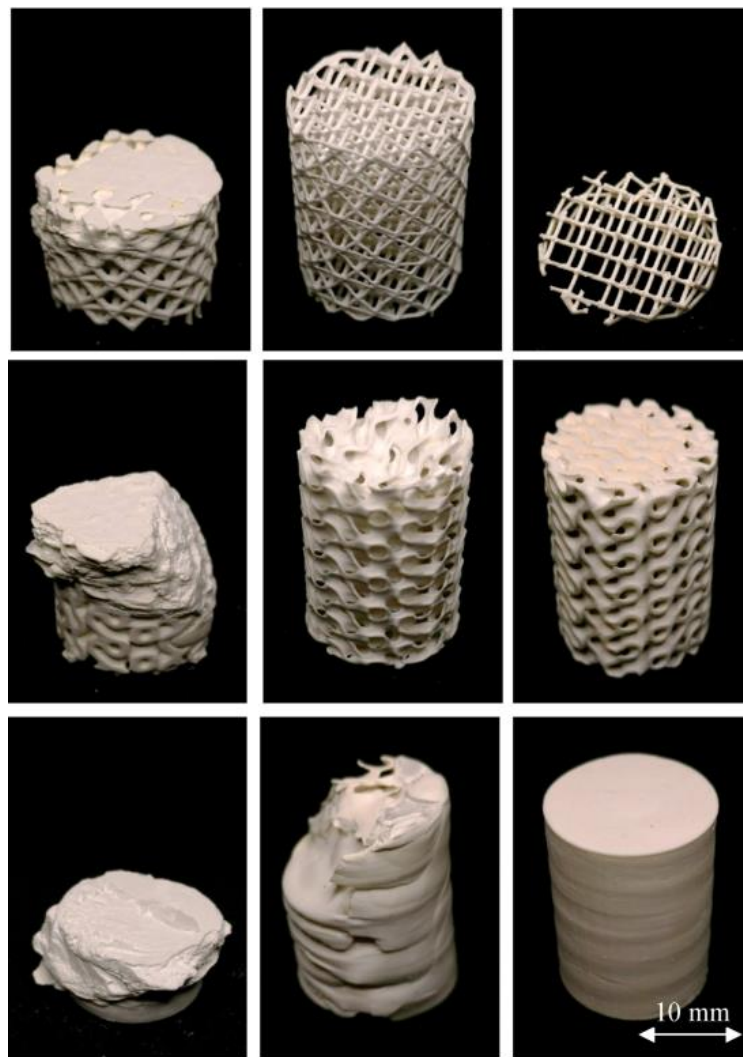


Figura 3.12. Resultados obtenidos tras la fabricación de las piezas. La 1ª columna corresponde con la orientación de abajo hacia arriba, la 2ª con la orientación de arriba hacia abajo y la 3ª empleando el dispositivo diseñado por O. Santoliquido et al. Fuente: [27]

Como se puede comprobar en la Figura 3.12, exceptuando en el caso del primer diseño, los resultados obtenidos mediante el empleo del aparato diseñado en este estudio han sido muy superiores al de los otros métodos de fabricación. No obstante, en el primer caso, el cual no pudo resistir las fuerzas generadas por el empleo del aparato.

En conclusión, las resinas empleadas para poder llevar a cabo el proceso de estereolitografía con materiales cerámicos han de cumplir las siguientes características:

- Elevada carga de partículas de material cerámico.
- Índice de refracción similar entre el material cerámico y la resina.
- Baja viscosidad.
- Profundidad de curado adecuada al espesor de capa.

Además, numerosos estudios se han llevado a cabo a lo largo de estos años en relación a la fabricación y mejora de las resinas empleadas en el proceso de SLA con materiales cerámicos. Esto es así debido a la constante búsqueda de mejorar las propiedades de las piezas fabricadas, así como de incluir nuevos materiales para la fabricación de las mismas. Entre los objetivos más comunes de este tipo de estudios nos encontramos con buscar el aumento de la carga de partículas de la resina sin incrementar significativamente la viscosidad de la mezcla. Para lograr este objetivo, se busca emplear diferentes componentes en la fabricación de la resina, así como mediante el tratamiento de las propias partículas y la variación de las proporciones de estos componentes. De esta forma se busca facilitar la fabricación de piezas con una mayor densidad, sin complicar el propio proceso de fabricación de las mismas debido a una elevada viscosidad. Otro de los objetivos de estos estudios, como se ha mencionado anteriormente, es intentar emplear diversos materiales cerámicos los cuáles presentan cierta problemática para ser empleados en este proceso, generalmente debida a su gran diferencia de índice de refracción con respecto al de la resina, lo que provoca la aparición de una gran dispersión del haz de luz UV. Este objetivo se puede llevar a cabo de varias formas como pueden ser la búsqueda de otro material afín a este para emplear como relleno y así poder tener una alta carga de la resina sin aumentar en gran medida

la dispersión o también mediante el estudio de la compatibilidad y los resultados de nuevos tipos de resinas con un índice de refracción más similar al de estos materiales. Estos problemas también pueden estar derivados debido a la alta viscosidad que presentan algunos materiales cerámicos, lo que dificulta en gran medida su empleo, llegando incluso a imposibilitar su uso debido a que las propias máquinas de impresión no sean capaces de manejar su gran viscosidad. Entre las soluciones llevadas a cabo para poder solventar este tipo de problema se encuentra la modificación de las propias máquinas para así adaptarlas a estas viscosidades o la fabricación de dispositivos especiales para el empleo de este tipo de materiales, como puede ser el caso del dispositivo fabricado por O. Santoliquido et al. [27]. No obstante, también se están realizando diferentes investigaciones sobre la producción de piezas mediante el empleo de resinas con una baja carga de partículas. En el caso de estas investigaciones nos encontramos con un cambio radical de los objetivos, ya que, en estas investigaciones chocamos directamente con una de las propiedades principales de las resinas para este tipo de proceso, que es presentar una carga de partículas lo más elevada posible. El objetivo de este tipo de estudios busca abaratar los elevados costes de este tipo de producción, no obstante, hay que tener en cuenta los riesgos presentes debido a la gran contracción de las piezas producidas durante el proceso de sinterizado debido a la baja densidad que presentan las mismas.

### **3.4 PARÁMETROS DE LA ESTEREOLITOGRAFÍA CON CERÁMICAS.**

Los parámetros que afectan a la estereolitografía con materiales cerámicos están relacionados con los parámetros propios de la máquina de estereolitografía, como pueden ser los relacionados con la fuente de luz ultravioleta, así como los relacionados con el proceso de fabricación como el espesor de capa, y los relacionados con la resina empleada para la fabricación de la pieza, los cuales varían en función de las características de la resina y de los polvos de material cerámico empleados, ya que ambos elementos afectan a la dispersión del haz de luz.

Dentro de los parámetros dependientes del propio equipo nos encontramos con:

- La **velocidad de escaneado**, que corresponde con la velocidad a la que el haz de luz escanea la capa que se va a curar. Generalmente, el valor de este parámetro es introducido manualmente antes de comenzar con el proceso de estereolitografía por el propio operario.
- La **distancia entre las líneas** que recorre el haz de luz ultravioleta durante el escaneado de la capa.
- El **espesor de la capa**.
- La **compensación del spot del láser** necesaria para evitar curar zonas de la capa que se encuentren fuera de los límites de la parte a escanear de la misma, tal y como se muestra en la Figura 3.13:

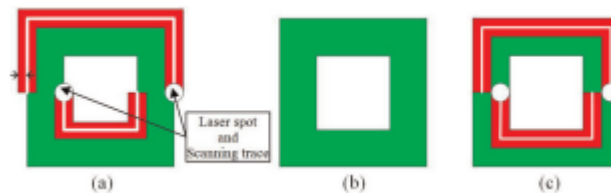


Figura 3.13: Esquema de la utilidad de la compensación del spot del láser. Fuente: [16]

Otro parámetro muy importante dentro de este proceso es el valor máximo de energía aportado por la fuente de luz ultravioleta, el cual se corresponde con la energía en la superficie de la resina, ya que a medida que la luz penetra en su interior sufre una atenuación debida a la absorción y la dispersión provocada por la resina y las partículas de materiales cerámicos contenidas en su interior. No obstante, el valor de la densidad de energía máxima en la superficie de la resina depende únicamente de parámetros propios de la fuente de luz y de la máquina de estereolitografía. De esta forma, tenemos la ecuación 3.1 para conocer el valor de la energía máxima [5], [16]:

$$E_{Máx} = \sqrt{\frac{2}{\pi} * \frac{P}{w_0 * v_s}} \quad (3.1)$$

Donde  $P$  es la potencia de la fuente de luz ultravioleta,  $w_0$  es el radio del haz de luz y  $v_s$  es la velocidad de escaneado.

Otro parámetro con gran relevancia en este proceso es la profundidad de curado, la cual puede ser calculada empíricamente mediante la ecuación de Jacob 3.2 [5], [16]:

$$C_d = D_p * \left( \ln \frac{E_{Máx}}{E_c} \right) \quad (3.2)$$

Donde  $E_{Máx}$  corresponde con la energía máxima del haz de luz en la superficie de la resina,  $E_c$  corresponde con el valor de energía mínimo necesario para lograr el curado de la resina, conocido como energía crítica, y  $D_p$  es la profundidad a la cual la intensidad del haz de luz se reduce  $1/e^2$  veces el valor máximo de la energía. Esta profundidad puede ser calculada mediante la ecuación 3.3 [5], [16], [17]:

$$D_p = \frac{2}{3} * \frac{d}{\phi * Q} \quad (3.3)$$

En esta ecuación  $d$  corresponde con el tamaño medio de las partículas de polvo de material cerámico empleado en la resina,  $\phi$  es el porcentaje de polvo de material cerámico en volumen en la resina y  $Q$  que puede ser expresado mediante la ecuación 3.4 [5], [16], [17]:

$$Q = \frac{h}{\lambda} * \Delta n^2 \quad (3.4)$$

Como se ha comprobado en la anterior ecuación,  $Q$  es un parámetro que depende de  $h$  que es la distancia entre partículas, de  $\lambda$  que es la longitud de onda y de  $\Delta n^2$  que corresponde con la diferencia de los cuadrados de los índices de refracción de la resina y de las partículas de material cerámicos que esta contiene.

Otro de los parámetros que es necesario tener en cuenta para la realización de este proceso es el ancho de curado para así poder tener una buena resolución durante el escaneado de las capas para la fabricación de la pieza. Este parámetro depende de la profundidad de curado, del radio del haz de luz que incide sobre la capa y del parámetro  $D_p$ . De esta forma podemos calcular este valor mediante la ecuación 3.5 [16]:

$$C_w = w_0 * \sqrt{\frac{2 * C_d}{D_p}} \quad (3.5)$$

Del conjunto de todos estos parámetros depende la calidad de la pieza obtenida mediante este proceso de fabricación aditiva. Es por este motivo por el que se han llevado a cabo diversas investigaciones para su optimización.

Chen et al. [16] estudiaron la optimización de los parámetros introducidos en la propia máquina por los operarios con el objetivo de lograr la mayor precisión dimensional posible mediante el método de diseño fraccional factorial de Taguchi. Mediante este método pudieron comprobar que la velocidad de escaneado no tiene una influencia significativa en la contracción de la pieza. Por otro lado, cuanto mayor es la distancia entre las líneas que sigue el haz de luz durante el escaneado de la capa, mayor es la contracción. Además, se pudo comprobar que el espesor de la capa tiene una gran influencia en la contracción producida en el eje Z de la pieza, ya que esta aumenta cuanto menor es este espesor.

Por otro lado, N. Kovacev et al. [28] estudiaron el efecto que tienen el espesor de la capa de pasta, el tiempo de exposición de la capa de pasta a la luz ultravioleta y la intensidad de la luz ultravioleta en la precisión de las dimensiones de las piezas fabricadas mediante SLA con materiales cerámicos. Para ello diseñaron un experimento factorial y emplearon un análisis de varianza (ANOVA) para poder conocer esta influencia. De esta forma, seleccionaron 3 niveles de tiempo de exposición y de la intensidad de la luz ultravioleta, mientras que del espesor de capa solo seleccionaron 2 niveles. De esta forma, emplearon 18 combinaciones, mostradas en la Tabla 3.5, diferentes para poder comprobar el efecto de estos parámetros en la precisión de las piezas.

Tabla 3.5. Combinaciones de los diferentes niveles de tiempo de exposición (ET), intensidad de la luz (EP), y espesor de la capa (LT) empleados durante el experimento llevado a cabo por N. Kovacev et al. Fuente: [28]

Run	ET, s	EP, mW/cm <sup>2</sup>	LT, μm
1	1.5	6.72	10
2	1.5	14	10
3	1.5	20.79	10
4	2.0	6.72	10
5	2.0	14	10
6	2.0	20.79	10
7	3.0	6.72	10
8	3.0	14	10
9	3.0	20.79	10
10	1.5	6.72	25
11	1.5	14	25
12	1.5	20.79	25
13	2.0	6.72	25
14	2.0	14	25
15	2.0	20.79	25
16	3.0	6.72	25
17	3.0	14	25
18	3.0	20.79	25

Para poder comprobar las variaciones en las dimensiones en función de estos parámetros, se diseñaron unas estructuras reticulares compuestas por celdas unitarias con estructura de diamante, alargadas a lo largo del eje z. Además, se diseñaron 5 tipos diferentes de estas estructuras, las cuales se diferenciaban en el diámetro de los puntales, el cual varía de 100 μm a 500 μm. Estas estructuras se pueden observar en la Figura 3.14.

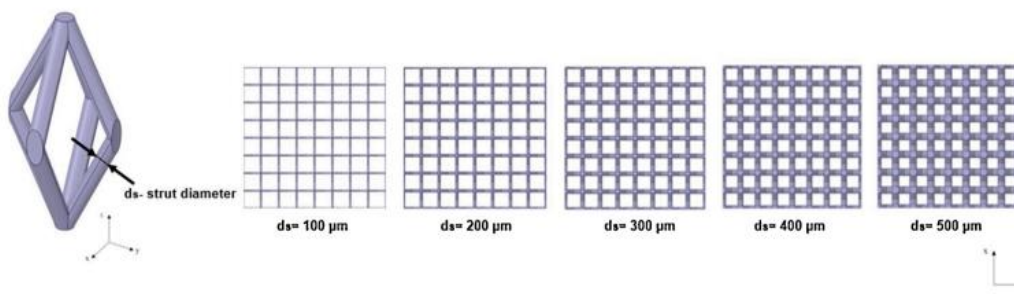


Figura 3.14. Imagen de la celda unitaria, así como de cada una de las estructuras diseñadas para el experimento, en las que varía el diámetro del puntal (ds). Fuente: [28]

Una vez que se dio comienzo a la fabricación de las piezas, se pudo comprobar que las estructuras con un  $d_s$  de 100  $\mu\text{m}$  no pudieron ser fabricadas debido a que la estructura no era capaz de soportar el proceso de fabricación, por lo que no se tuvieron en cuenta para el estudio.

Para conocer la influencia de los parámetros en las piezas, se realizó el análisis de varianza, el cual, reveló que tanto el tiempo de exposición como la intensidad de la luz ultravioleta, así como la interacción entre ambos eran los parámetros que más afectaban a la precisión dimensional de las piezas.



## 4 Metodología y equipamiento.

Como se ha comentado, el proceso de fabricación de piezas cerámicas por SLA consta de 4 etapas diferentes:

- Preparación e impresión de las piezas.
- Limpieza de las piezas impresas.
- Debinding para la eliminación de las resinas.
- Sinterizado de las piezas para la eliminación de la porosidad.

Además, también se realizará una inspección y verificación de las piezas impresas con soportes para comprobar la eficacia de los mismos. Todas estas etapas requieren de un equipo específico, que se describirá en los siguientes apartados.

### 4.1 PREPARACIÓN E IMPRESIÓN DE LAS PIEZAS.

Para poder llevar a cabo la fabricación de las piezas emplearemos la máquina C900 Flex de 3DCERAM disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León, la cual puede ser observada en la Figura 4.1.



Figura 4.1. a) Fotografía de la máquina de estereolitografía 3DCERAM C900 FLEX disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León; b) Fotografía de la zona de impresión de la máquina de estereolitografía 3DCERAM C900 FLEX disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León; c) Fotografía del interior la de la máquina de estereolitografía 3DCERAM C900 FLEX disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León en la que se puede apreciar el láser en la parte superior de la misma.

#### 4.1.1 SOFTWARE PROPIETARIO.

Por tanto, para comenzar el proceso de la fabricación de las piezas, en primer lugar, es necesario introducir el archivo .STL que contiene la información geométrica de la pieza en la máquina mediante el ordenador integrado en la misma el cual puede ser apreciado en la Figura 4.1 a).

Una vez que estos archivos han sido cargados en el software propietario de esta máquina, se procede a colocar las piezas en la cama de impresión dentro de este programa, tal como se ve en la Figura 4.2.

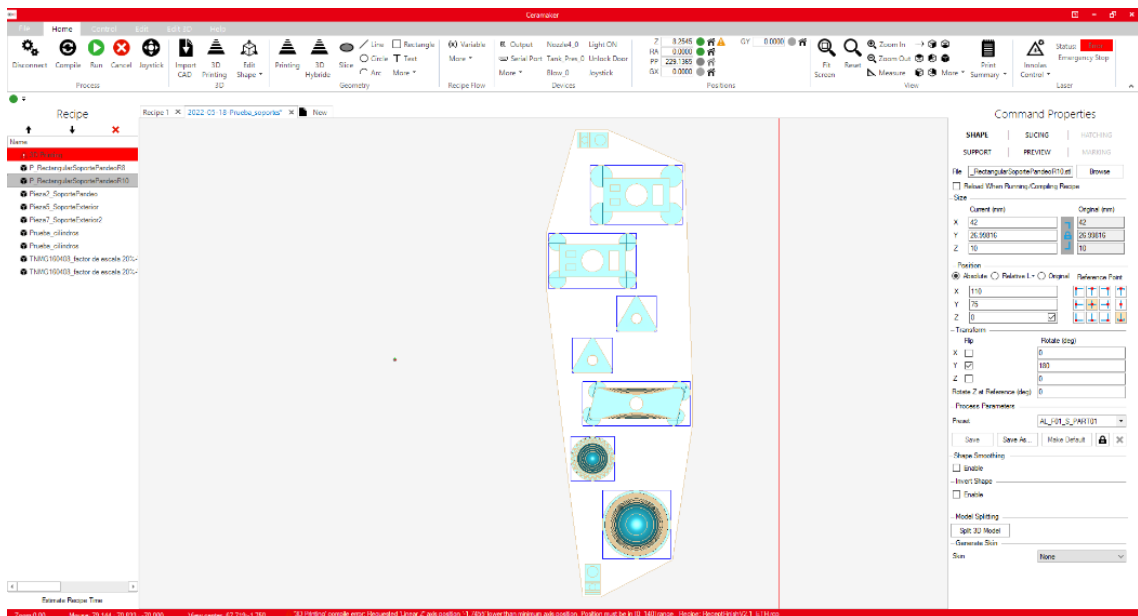


Figura 4.2. Imagen del programa de la máquina 3DCERAM C900 FLEX empleado para la configuración y visualización del proceso de impresión.

Una vez que las piezas han sido colocadas correctamente, se procede a la configuración del programa de impresión, definiendo diversos parámetros como pueden ser el espesor de capa, la posición de las piezas en la cama de impresión, el material empleado para la impresión de las piezas, etc. Aunque cabe destacar que en el caso del espesor de capa hay que emplear una configuración especial del programa para poder cambiar este parámetro, ya que en caso contrario tiene un valor prestablecido de 100  $\mu\text{m}$  el cual no se puede cambiar.

#### 4.1.1.1 Pestaña “Shape”.

Los parámetros del proceso de impresión son configurados en la ventana que se abre al seleccionar la pestaña “Shape”, mostrada en la Figura 4.3.

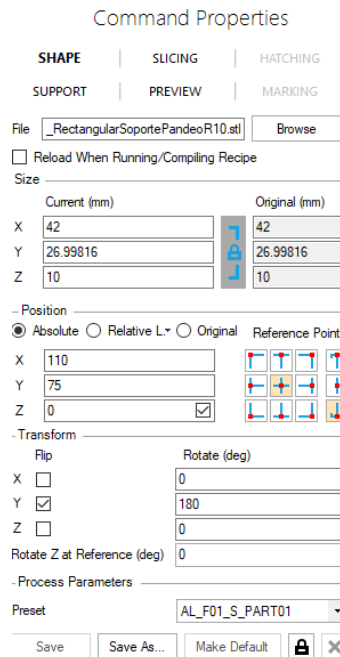


Figura 4.3. Imagen de la pestaña de “Shape” donde se configuran los parámetros del proceso de impresión de la máquina 3DCERAM C900 FLEX.

En relación a las opciones que se pueden modificar en esta ventana, nos encontramos, en orden descendente, con:

- La selección del **archivo .STL** de la pieza a imprimir.
- Las **dimensiones de la pieza** en los 3 ejes del espacio.
- La **posición de la pieza en la cama de impresión**. La posición de la pieza se puede dar de 3 formas, en coordenadas absolutas con respecto al sistema de coordenadas de la máquina, en coordenadas relativas o con respecto al sistema de coordenadas original de la pieza. En general se suele emplear el sistema absoluto por ser el más sencillo de los 3.
- La **orientación de la pieza en la cama de impresión**. La pieza se puede girar con respecto a los 3 ejes del espacio para así poder colocarla en la orientación más adecuada para realizar el proceso de impresión.

- El **material** empleado para la fabricación de la pieza, empleando en esta máquina la alúmina en su configuración “Soft”, por ser la recomendada por el fabricante. Esta configuración presenta una dureza menor, ya que, la potencia del láser a la que es sometida también es menor.

#### **4.1.1.2 Pestaña “Support”.**

La pestaña “Support” permite crear una fina capa en la base de la cama de impresión para mejorar la adhesión de las piezas a la misma, con el objetivo de evitar que las piezas se despeguen de la cama y se muevan durante el proceso de impresión, lo que daría lugar a defectos de desplazamiento de las capas.

#### **4.1.1.3 Pestaña “Preview”.**

La pestaña “Preview”, permite ver una previsualización de la fabricación de las piezas capa a capa, tal y como se muestra en la Figura 4.4.

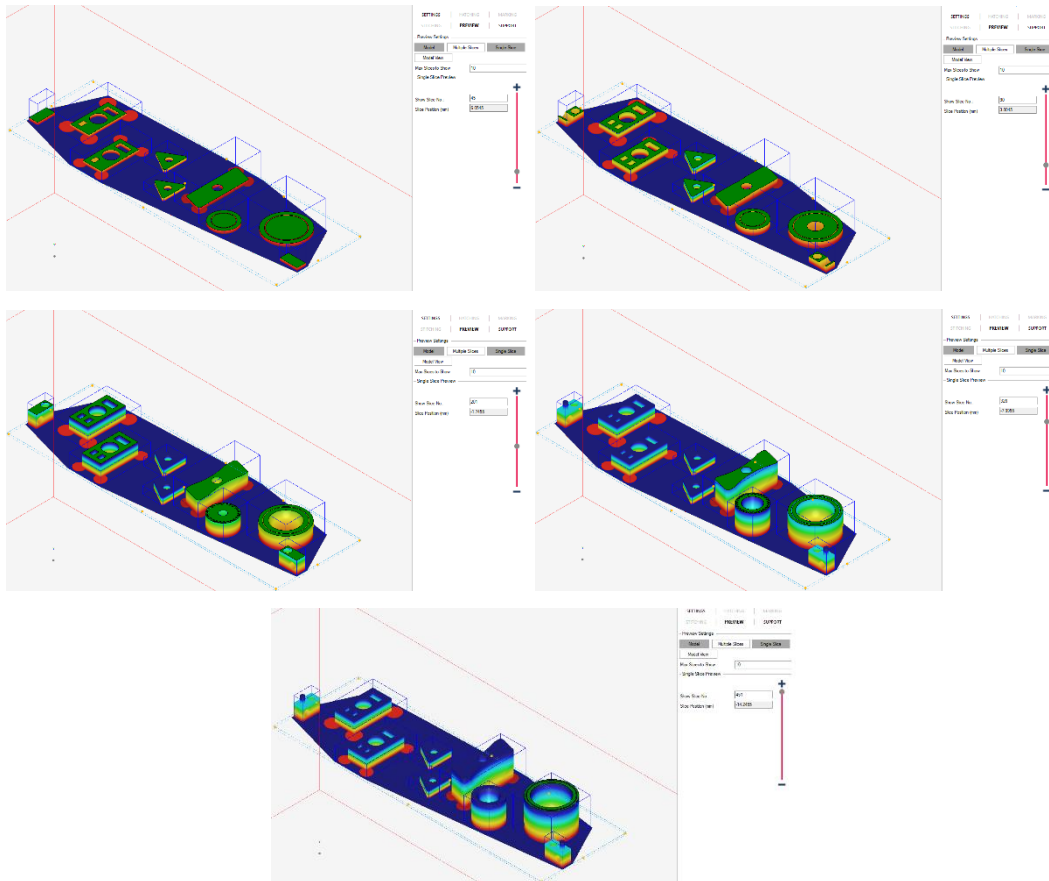


Figura 4.4. Imágenes de la previsualización del proceso de impresión a diferentes capas de altura durante este proceso.

#### 4.1.2 PREPARACIÓN DE LA MÁQUINA PARA LA IMPRESIÓN.

Mientras se configuran los parámetros en el software propietario, se puede proceder a preparar la máquina para poder dar comienzo al proceso de impresión. Los pasos necesarios a realizar para la preparación de la máquina para imprimir alúmina se explicarán en este apartado, y una vez realizados la máquina podrá comenzar con el proceso de impresión, tal y como se describió en los capítulos 2 y 3, hasta que finalice la impresión de las piezas en verde.

##### 4.1.2.1 Preparación de la cama de impresión.

La preparación de la cama de impresión consiste en la colocación de una hoja magnética sobre ella. Esta hoja magnética se coloca encima de la placa metálica

de la cama de impresión, y es sobre esta hoja sobre la que se realizará el proceso de impresión. La preparación de esta hoja magnética consiste en recortarla a medida de la cama de impresión y recortar tanto las aristas como las esquinas con un ángulo de 45°. Una vez que la hoja magnética ha sido recortada, es necesario pegarla a la placa metálica, para lo que se emplea un pegamento en spray aplicado a través de una plantilla. De esta forma, en la Figura 4.5 puede observarse la cama de impresión ya preparada.



Figura 4.5. Fotografía de la cama de impresión ya preparada con la placa magnética blanca, lista para seguir con el proceso de preparación de la máquina para la impresión.

#### **4.1.2.2 Preparación del láser.**

Mientras se prepara la cama de impresión, se puede encender el láser para que comience su proceso de calentamiento el cual tarda en torno a unos 3 minutos. Una vez que el láser ha terminado su proceso de calentamiento, se procede a su calibración para poder ajustar de esta forma la potencia y la longitud de onda del mismo en función del material empleado para la fabricación de las piezas, ya que ambos parámetros son específicos para cada material. Para el caso de la pasta de alúmina empleada para la fabricación de las piezas de este trabajo se emplea una longitud de onda de 355 nm y una potencia del láser de 105 W.

#### 4.1.2.3 Nivelación de las cuchillas encargadas de distribuir y nivelar la pasta.

Después de que la cama de impresión ya ha sido totalmente preparada se procede a la nivelación de las cuchillas encargadas de distribuir y nivelar la pasta. De esta forma, en primer lugar, es necesario llevar la cama a la altura adecuada en el eje Z. Esta altura es la necesaria para que exista una diferencia de 0,6 mm de altura entre la superficie de la placa magnética de la cama de impresión con el granito de la máquina.

Tras esto moveremos el scraper con las cuchillas de forma que estas queden sobre la placa magnética de la cama de impresión y a continuación bajaremos una de las 2 cuchillas del scraper mediante el software de la máquina para realizar la calibración. Una vez realizada su calibración se volverá a subir y se realizará lo mismo con la otra cuchilla. La calibración de las cuchillas consiste en dejar una distancia de 100  $\mu\text{m}$  entre la placa magnética y la cuchilla haciendo uso de una galga de 100  $\mu\text{m}$ , teniendo que pasar la galga con cierta resistencia entre ambas y prestando especial atención en las esquinas de las cuchillas. Para poder nivelar las cuchillas, estas presentan unos tornillos micrométricos en cada una de sus esquinas superiores, lo que permite el ajuste de las mismas. El scraper puede ser observado en la Figura 4.6.



Figura 4.6. Fotografía del scraper en la que se puede apreciar una de sus 2 cuchillas, pudiendo ver en la parte superior de la misma los tornillos micrométricos empleados para su ajuste.



#### **4.1.2.4 Llenado del depósito de la máquina.**

Una vez que las cuchillas han sido niveladas correctamente, se puede comenzar a introducir la pasta en el interior del depósito de la máquina, el cual puede observarse en la Figura 4.7. La pasta ha de introducirse realizando un vibrado en ángulo y hacia la puerta de la máquina para evitar la formación de burbujas de aire en el interior de la pasta, ya que pueden dar lugar a diferentes tipos de defectos en las piezas impresas. La cantidad de pasta a introducir en el depósito depende principalmente del tamaño de las piezas, ya que el software la calcula para poder cubrir toda la cama de impresión por igual, independientemente de la posición y cantidad de las piezas. De esta forma, el objetivo es que la pasta quede de forma similar a la mostrada en la Figura 4.8.

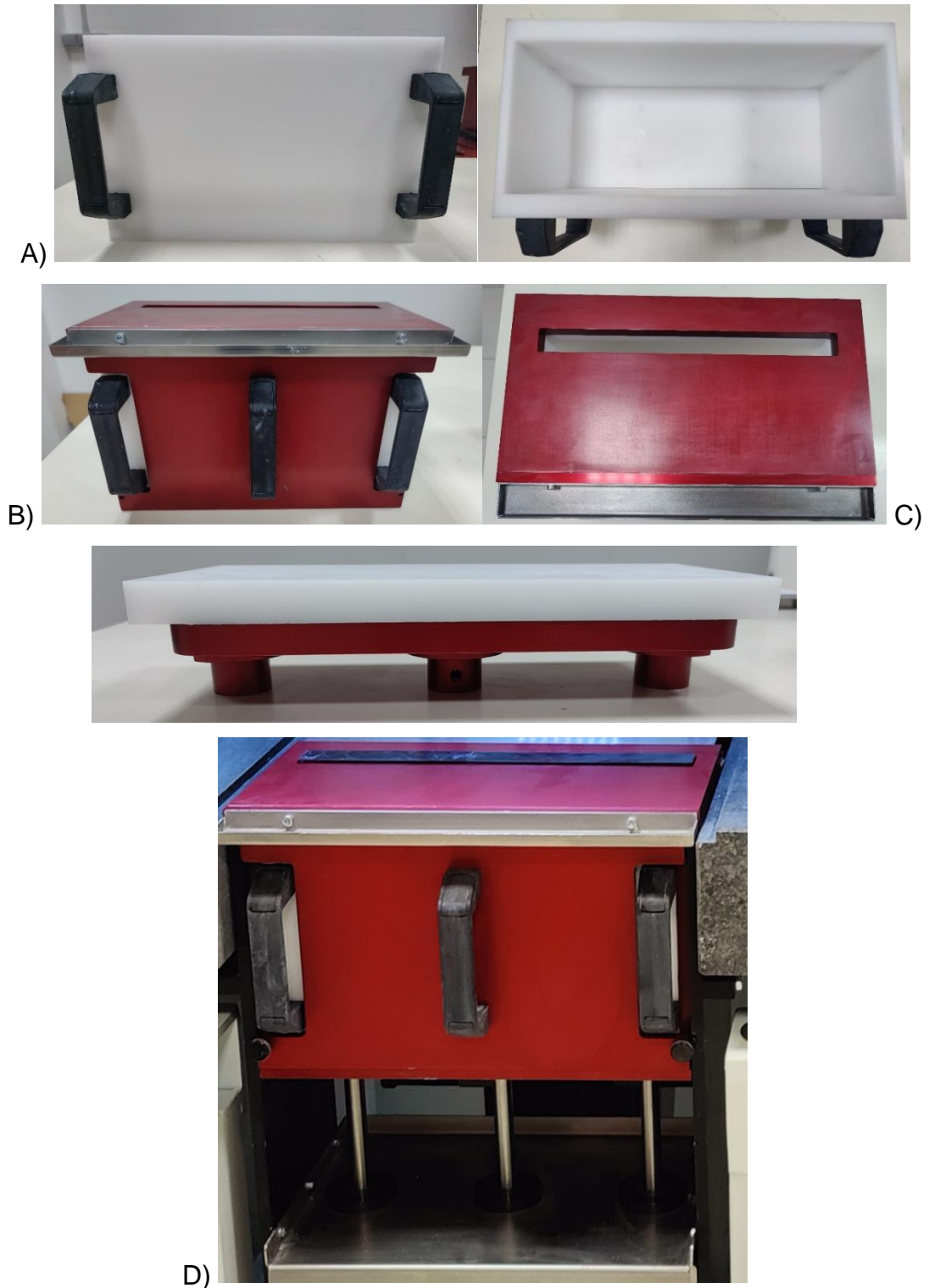


Figura 4.7. a) Depósito de la máquina 3DCERAM C900 FLEX; b) Depósito de la máquina 3DCERAM C900 FLEX con la tapa puesta, en la que se puede ver el orificio de salida del material; c) Base del depósito accionada por los pistones para sacar el material del depósito; d) Depósito de la máquina 3DCERAM C900 FLEX instalado en la máquina, en la parte inferior se pueden ver los pistones encargados del movimiento de la base del depósito.

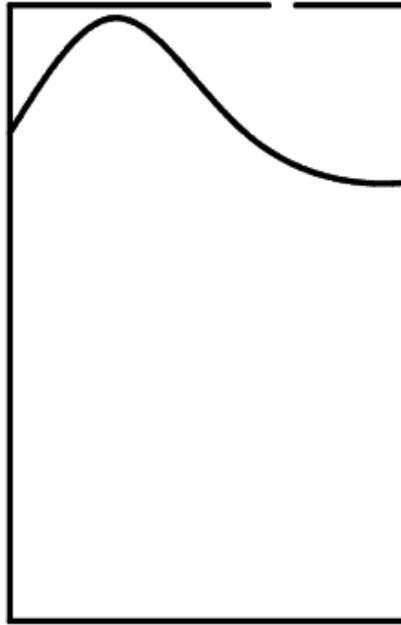


Figura 4.8. Imagen del aspecto que ha de presentar la pasta en el interior del depósito, correspondiendo el lado izquierdo de la imagen con el lado de la puerta de la máquina.

#### 4.1.2.5 Distribución de la pasta cerámica sobre la cama de impresión.

Tras haber llenado el depósito, se procede a extender, mediante el empleo de espátulas, la pasta sobre la cama de impresión y sobre los laterales de la misma, es decir, sobre las zonas por las que pasa el scraper con las cuchillas, tal y como se puede ver en la Figura 4.9.



Figura 4.9. Imagen de la pasta distribuida sobre la zona de impresión .

Una vez que este paso ha sido realizado se procede a realizar el scraping, cuyo proceso se encuentra definido en un programa propio de la máquina. El scraping consiste en el paso del carrito sobre la cama de impresión esparciendo y nivelando la pasta con sus cuchillas. Para ello, el primer paso a realizar antes de ejecutar el programa del scraping consiste en asegurarse de que hay una cantidad de pasta suficiente entre las dos cuchillas del scraper. Esta cantidad de pasta ha de ser suficiente como para aproximadamente cubrir la longitud de las cuchillas y tener un dedo de altura. En el caso de que la cantidad de pasta entre las 2 cuchillas no sea suficiente, se colocará el scraper de tal forma que entre las 2 cuchillas se encuentre el orificio del depósito, para poder sacar así la cantidad de pasta necesaria.

Tras esto se procede a realizar el proceso de scraping en ambos sentidos de movimiento del scraper. En cuanto se realiza este proceso en uno de los sentidos es necesario comprobar la profundidad de la capa de material dejado sobre la cama de impresión, la cual ha de estar comprendida entre 90  $\mu\text{m}$  y 120  $\mu\text{m}$ . A continuación, se realizará el scraping en el otro sentido y se volverá a realizar esta comprobación.

## 4.2 EQUIPO DE LIMPIEZA.

Una vez que las piezas en verde han salido de la máquina, es necesario someterlas a un proceso de limpieza, ya que salen rodeadas y cubiertas de la pasta que no se ha curado para su fabricación, como se puede apreciar en la Figura 4.10.



Figura 4.10. Fotografía de la cama de impresión extraída de la máquina tras el proceso de impresión y tras haber retirado pasta de las esquinas para permitir su extracción.

Por ello, en primer lugar, es necesario retirar la mayor cantidad posible de esta pasta, con el objetivo de que pueda ser reutilizada. Tras esto, las piezas pasarán a la estación de limpieza, la cual puede ser observada en la Figura 4.11, para completar la eliminación de los restos sobrantes de pasta que han quedado adheridos a ellas.



Figura 4.11. Fotografía de la estación de limpieza para las piezas disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León.

La limpieza de las piezas se realiza mediante el empleo de un líquido propio del fabricante que ayuda a eliminar los restos de la pasta que no se ha llegado a curar. Este líquido es bastante tóxico para las personas, por lo que es necesario el empleo de equipos de seguridad para evitar de esta manera entrar en contacto con él y evitar la inhalación de los vapores que desprende. El líquido es aplicado a las piezas mediante boquilla especial que está basada en el efecto Venturi, la cual puede observarse en la Figura 4.12 durante el proceso de limpieza de una de las piezas.

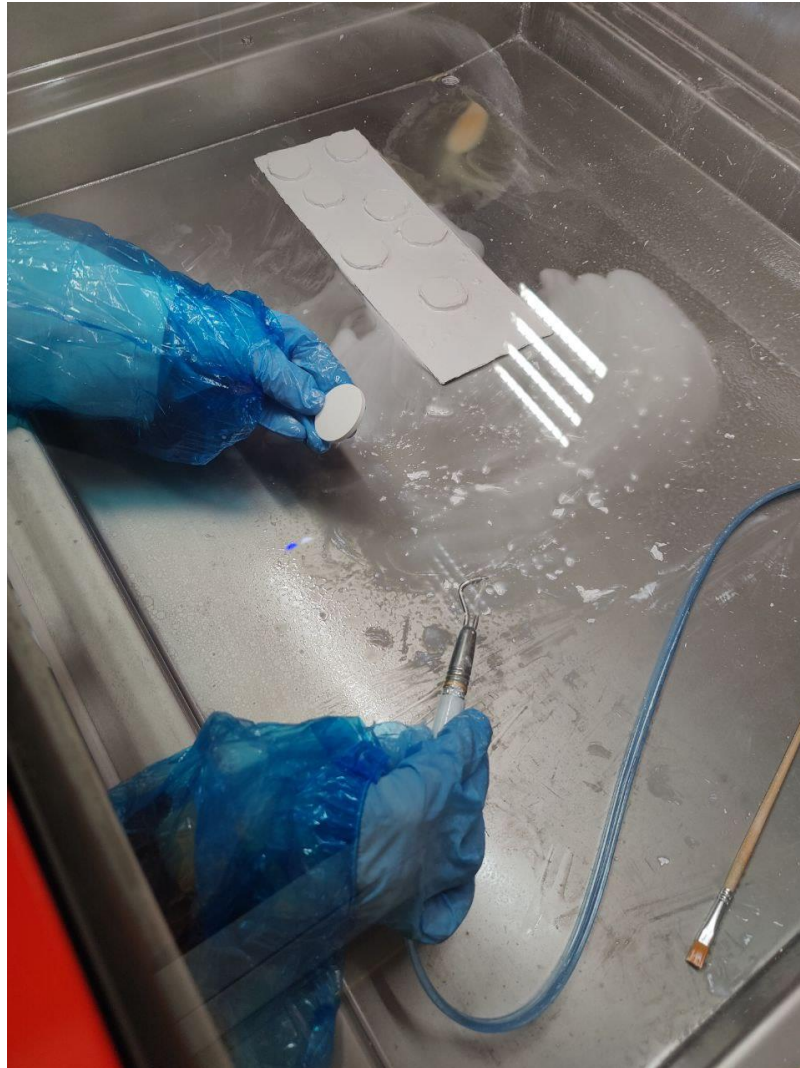


Figura 4.12. Fotografía de la estación de limpieza durante el proceso de limpieza de una de las piezas realizadas.

El proceso de limpieza es una etapa crítica, ya que las piezas verdes no tienen la consistencia final, y las piezas pueden sufrir roturas indeseadas durante la limpieza. Una vez que las piezas están limpias, teniendo cuidado de haber eliminado todos los restos de la pasta de alúmina, es necesario introducirlas cuanto antes en el horno de debinding, para así evitar que se siga produciendo el curado de las mismas por el efecto de la luz UV. A pesar de que las fuentes de luz de la sala están recubiertas con filtros de luz UV, se recomienda proteger las piezas de la luz, mientras estén fuera del horno.

### 4.3 DEBINDING.

El proceso de debinding es necesario para eliminar la resina que tiene la pasta cerámica. El horno empleado puede ser observado en la Figura 4.13. Se trata de un horno tubular especialmente diseñado para trabajar a altas temperaturas y con rampas de calentamiento y enfriamiento, con atmósfera rica en nitrógeno.

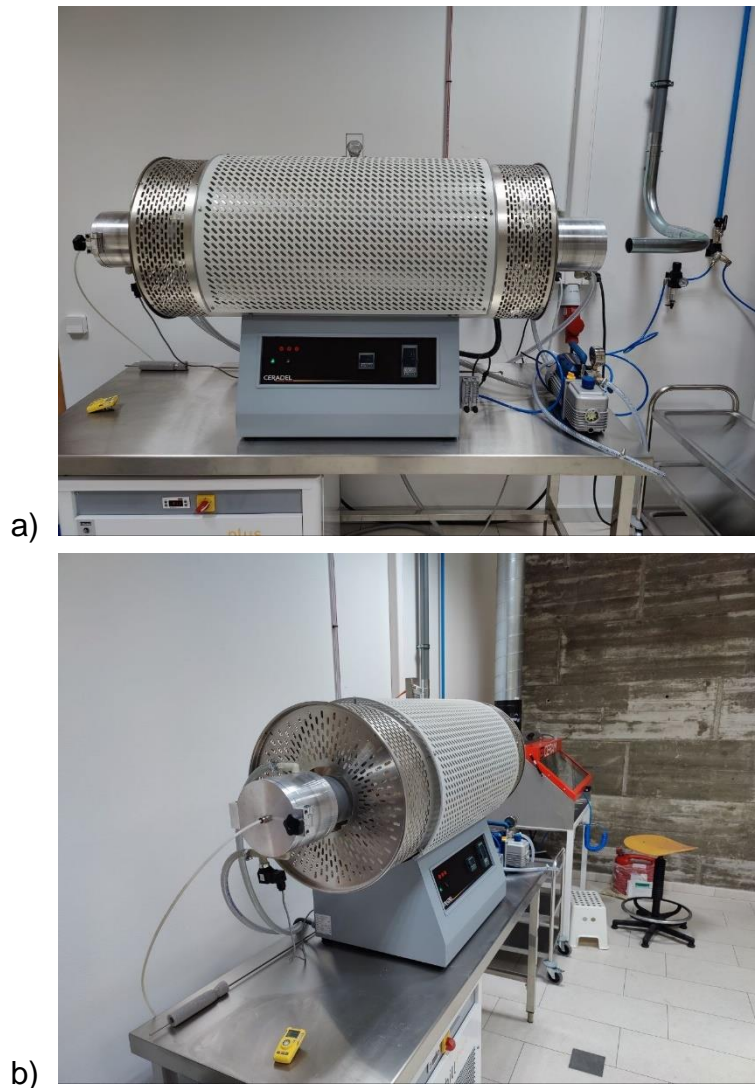


Figura 4.13. a) Fotografía del horno empleado para el proceso de debinding disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León; b) Fotografía de la parte delantera del horno para el proceso de debinding disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León, en la que se puede apreciar la parte delantera del mismo, donde se encuentra la puerta del mismo.

Para poder llevar a cabo este proceso de forma correcta, es necesario seguir el siguiente orden de pasos:

- La **limpieza del horno** es necesaria para asegurarse de que el interior del horno se encuentra limpio, sin restos de polvo o partículas en su interior, por lo que debe ser aspirado antes de comenzar el proceso de debinding.
- Para **introducir las piezas** en verde dentro del horno, se colocan encima de una placa de material cerámico a una distancia de unos 50 cm de la puerta del horno. Tras esto se colocará la tapa de material cerámico a unos 30 cm de la puerta del horno, la cual será cerrada a continuación.
- **Encendido del chiller**, para lo que es necesario en primer lugar la comprobación del nivel de agua del mismo. El chiller se puede ver en la Figura 4.14.



Figura 4.14. Fotografía del chiller empleado para el proceso de debinding disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León.

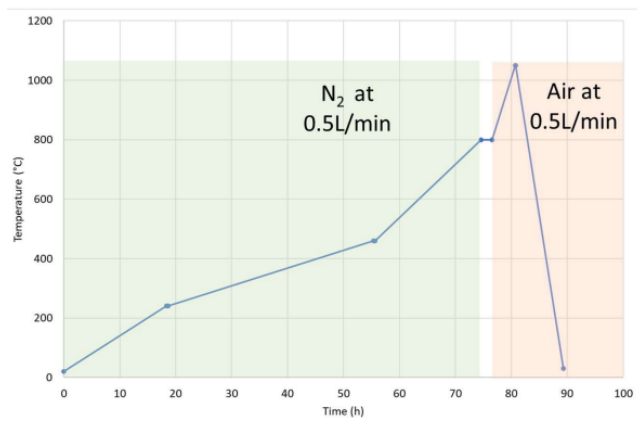
- **Conexión de la bomba**, a la parte trasera del horno para extraer el aire contenido en el interior del mismo hasta que el manómetro de la bomba indique una presión de - 900 mbar, momento en que se apagará la bomba. Esta bomba puede ser apreciada en la Figura 4.15.





Figura 4.15. Fotografía de la bomba disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León, empleada para la extracción del aire del interior del horno durante el proceso de debinding.

- **Introducción del N<sub>2</sub>** en el interior del horno hasta que el manómetro de la bomba indica una presión de 0 mbar, ya que este debinding se realiza en una atmosfera rica en nitrógeno, y finalmente se desconectará la bomba del horno.
- **Desconexión de la bomba**, tras lo que se establecerá un flujo de entrada de N<sub>2</sub> al interior del horno de 0,5 L/min.
- **Activación del programa del ciclo de debinding**. Este ciclo puede ser apreciado en la Figura 4.16.



	TEMPERATURE (°C)	RAMP (°C / min)	STAGE (min)
1	20-240	0,2	20
2	240-460	0,1	20
3	460-800	0,3	120
4	800-1050	1	5
5	1050-20	2	

Figura 4.16. Gráfica del ciclo de debinding para la alúmina realizado para la eliminación de la resina contenida en el interior de la pieza en verde. Fuente: [29]

Como se puede apreciar en este ciclo, el proceso es largo, ya que los calentamientos y enfriamientos pueden causar grietas y roturas en las piezas. Por ello, se realizan de forma muy lenta. Para la alúmina, trascurridas unas 72 h, es decir, unos 3 días, es necesario eliminar el flujo de nitrógeno en el interior del horno y sustituirlo por uno de aire de igual caudal. Finalmente, tras unas 96 h y si la temperatura del horno es inferior a 50°C, las piezas pueden ser extraídas del horno y pasar al siguiente tratamiento térmico, el sintering.

#### 4.4 SINTERIZADO.

A diferencia del debinding, el proceso del sintering es más sencillo. Las piezas se introducen en el interior del horno, dentro de una especie de recintos creados por placas de material cerámico, los cuales pueden ser apreciados en la Figura 4.17 en el interior del horno. La función de estos recintos es evitar la contaminación de las piezas. Junto a las piezas también se introducen, en distintas posiciones del horno, unos anillos térmicos que permiten conocer la temperatura a la que fueron sometidas las piezas para comprobar que el proceso se ha realizado correctamente. Finalmente se cierra la puerta del horno y se da comienzo al ciclo del sintering.

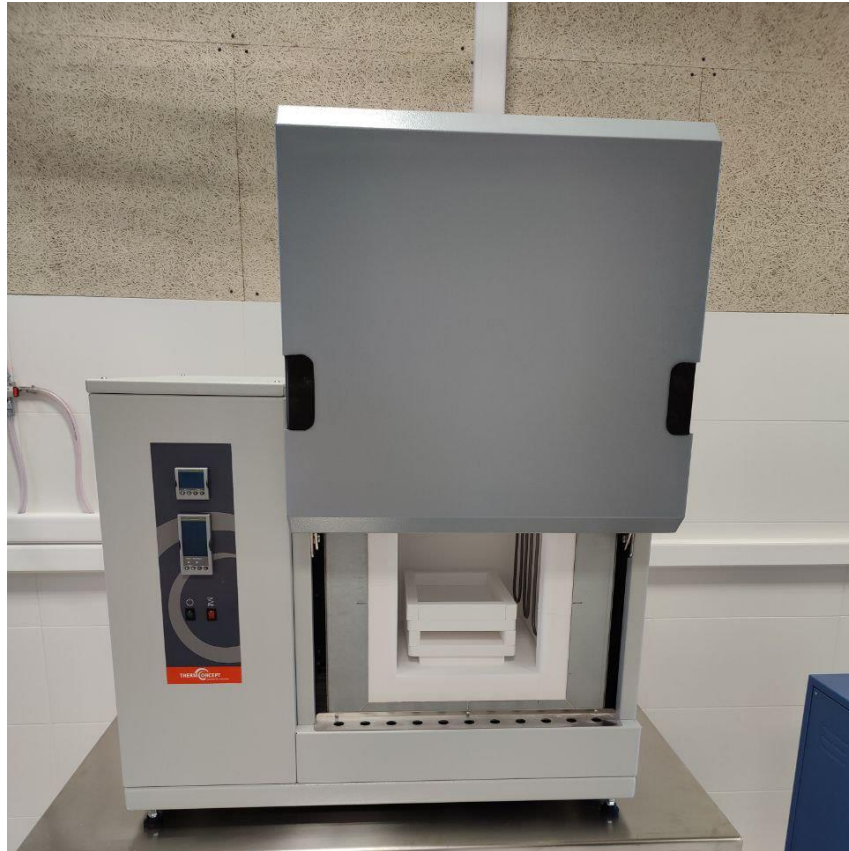


Figura 4.17. Fotografía del horno empleado para el proceso de sintering con las placas de material cerámico empleado para la creación de los recintos.

En cuanto al ciclo de sinterizado para la alúmina, este puede ser observado en la Figura 4.18.

<b>ALUMINA</b>			
	TEMPERATURE	RAMP (°C / min)	STAGE (min)
<b>1</b>	20-1250	3	/
<b>2</b>	1250-1700	2	90
<b>3</b>	1700-20	3	/

Figura 4.18. Información relativa al ciclo de sintering realizado. Fuente: [29]

Una vez que el ciclo ha sido finalizado tras unas 24 h y la temperatura del horno es inferior a 50°C, se pueden extraer las piezas. Tras esto, es necesario medir la contracción que han sufrido los anillos y buscar la temperatura a la que corresponde en la tabla mostrada en la Tabla 4.1, para de esta forma conocer la temperatura del interior del recinto y la temperatura en el exterior del mismo y comprobar así que el sinterizado de las piezas ha sido realizado de forma correcta.

Tabla 4.1. Tabla que contiene la información necesaria para comprobar la temperatura mediante el empleo de los anillos. Fuente: [29]

TEMPERATURE-TABLE for PTCR											
Higher quality products and lower costs through improved, reliable firing control											
Type PTCR - HTH SCHUPP no. : 1405610 Temperature Range °C : 1450 - 1750°C						Ring Colour : White Dimensions : ± 20 x 10 x 7,0 mm					
Ring diameter	Ring temperature	Ring diameter	Ring temperature	Ring diameter	Ring temperature	Ring diameter	Ring temperature	Ring diameter	Ring temperature	Ring diameter	Ring temperature
mm	°C	mm	°C	mm	°C	mm	°C	mm	°C	mm	°C
		17,45	1712 *	17,36	1686 *	18,46	1627 *	18,35	1616 *	19,46	1507 *
		17,46	1711 *	17,36	1685 *	18,46	1626 *	18,36	1615 *	19,46	1499 *
		17,47	1710 *	17,37	1684 *	18,47	1625 *	18,37	1614 *	19,47	1497 *
		17,48	1708 *	17,36	1683 *	18,48	1625 *	18,38	1613 *	19,48	1495 *
		17,49	1707 *	17,39	1683 *	18,49	1624 *	18,39	1611 *	19,49	1494 *
		17,50	1705 *	18,30	1682 *	18,50	1623 *	18,00	1610 *	18,30	1593 *
		17,51	1704 *	18,31	1681 *	18,51	1622 *	18,01	1609 *	18,31	1490 *
		17,52	1704 *	18,32	1680 *	18,52	1621 *	18,02	1608 *	18,32	1488 *
		17,53	1702 *	18,33	1680 *	18,53	1620 *	18,03	1606 *	18,33	1485 *
		17,54	1702 *	18,34	1679 *	18,54	1620 *	18,04	1605 *	18,34	1484 *
		17,55	1701 *	18,35	1678 *	18,55	1619 *	18,05	1604 *	18,35	1482 *
		17,56	1700 *	18,36	1677 *	18,56	1618 *	18,06	1603 *	18,36	1481 *
		17,57	1699 *	18,37	1677 *	18,57	1617 *	18,07	1601 *	18,37	1479 *
		17,58	1698 *	18,38	1676 *	18,58	1616 *	18,08	1600 *	18,38	1477 *
		17,59	1697 *	18,39	1675 *	18,59	1615 *	18,09	1599 *	18,39	1475 *
		17,60	1694 *	18,10	1654 *	18,60	1614 *	18,10	1597 *	18,60	1472 *
		17,61	1693 *	18,11	1654 *	18,61	1613 *	18,11	1595 *	18,61	1471 *
		17,62	1694 *	18,12	1653 *	18,62	1612 *	18,12	1594 *	18,62	1469 *
		17,63	1693 *	18,13	1652 *	18,63	1611 *	18,13	1592 *	18,63	1467 *
		17,64	1692 *	18,14	1652 *	18,64	1610 *	18,14	1591 *	18,64	1465 *
		17,65	1691 *	18,15	1651 *	18,65	1609 *	18,15	1590 *	18,65	1463 *
		17,66	1690 *	18,16	1650 *	18,66	1608 *	18,16	1589 *	18,66	1461 *
		17,67	1689 *	18,17	1649 *	18,67	1607 *	18,17	1587 *	18,67	1459 *
		17,68	1688 *	18,18	1649 *	18,68	1606 *	18,18	1585 *	18,68	1457 *
		17,69	1687 *	18,19	1648 *	18,69	1605 *	18,19	1584 *	18,69	1455 *
17,18	1759 *										
17,19	1748 *										
17,20	1746 *	17,70	1686 *	18,20	1647 *	18,70	1604 *	18,20	1542 *	18,70	1453 *
17,21	1745 *	17,71	1685 *	18,21	1646 *	18,71	1603 *	18,21	1541 *	18,71	1450 *
17,22	1743 *	17,72	1684 *	18,22	1646 *	18,72	1602 *	18,22	1539 *		
17,23	1742 *	17,73	1684 *	18,23	1645 *	18,73	1601 *	18,23	1538 *		
17,24	1740 *	17,74	1683 *	18,24	1644 *	18,74	1600 *	18,24	1536 *		
17,25	1739 *	17,75	1682 *	18,25	1643 *	18,75	1599 *	18,25	1535 *		
17,26	1737 *	17,76	1681 *	18,26	1642 *	18,76	1598 *	18,26	1533 *		
17,27	1736 *	17,77	1680 *	18,27	1642 *	18,77	1597 *	18,27	1531 *		
17,28	1734 *	17,78	1679 *	18,28	1641 *	18,78	1596 *	18,28	1530 *		
17,29	1732 *	17,79	1678 *	18,29	1640 *	18,79	1595 *	18,29	1528 *		
17,30	1731 *	17,80	1678 *	18,30	1639 *	18,80	1594 *	18,30	1527 *		
17,31	1730 *	17,81	1677 *	18,31	1639 *	18,81	1593 *	18,31	1526 *		
17,32	1728 *	17,82	1676 *	18,32	1638 *	18,82	1592 *	18,32	1523 *		
17,33	1727 *	17,83	1675 *	18,33	1637 *	18,83	1591 *	18,33	1522 *		
17,34	1726 *	17,84	1674 *	18,34	1636 *	18,84	1589 *	18,34	1520 *		
17,35	1724 *	17,85	1674 *	18,35	1635 *	18,85	1588 *	18,35	1518 *		
17,36	1723 *	17,86	1673 *	18,36	1635 *	18,86	1587 *	18,36	1517 *		
17,37	1722 *	17,87	1672 *	18,37	1634 *	18,87	1586 *	18,37	1515 *		
17,38	1720 *	17,88	1671 *	18,38	1633 *	18,88	1585 *	18,38	1513 *		
17,39	1719 *	17,89	1670 *	18,39	1632 *	18,89	1584 *	18,39	1512 *		
17,40	1718 *	17,90	1670 *	18,40	1631 *	18,90	1583 *	18,40	1510 *		
17,41	1717 *	17,91	1669 *	18,41	1631 *	18,91	1581 *	18,41	1508 *		
17,42	1715 *	17,92	1668 *	18,42	1630 *	18,92	1580 *	18,42	1506 *		
17,43	1714 *	17,93	1667 *	18,43	1629 *	18,93	1579 *	18,43	1505 *		
17,44	1713 *	17,94	1666 *	18,44	1628 *	18,94	1578 *	18,44	1503 *		
Powder Batch # : 442						Batch approved					
Date : 07.08.2018						Quality Inspection :					

## **4.5 INSPECCIÓN Y VERIFICACIÓN DE LAS PIEZAS.**

En cuanto las piezas salen del horno de sinterizado, finaliza su proceso de fabricación, obteniendo así la pieza final. Debido a las grandes contracciones que se producen durante el ciclo de sinterizado, las cuales afectan de forma desigual a los 3 ejes del espacio, es recomendable realizar una inspección geométrica de las piezas. Para poder llevar a cabo esta inspección y verificación de las piezas se realizará en primer un lugar un escaneado de las mismas con el escáner Breuckmann SmartScan, disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León. Tras haber escaneado las piezas, se obtienen unos archivos .STL, los cuales se usarán para realizar la comparativa de las piezas impresas con sus CAD. Para ello, estos archivos se pasarán en primer lugar por el software Geomagic Design X en el caso de que fuese necesario realizar algún arreglo o modificación de la malla obtenida durante el escaneado, para finalmente realizar la comparativa mediante las herramientas del software Geomagic Control X.

### **4.5.1 ESCÁNER BREUCKMANN SMARTSCAN.**

El primer paso para poder realizar la inspección y verificación de las piezas impresas consiste en obtener las mallas de las mismas, para así poder emplearlas con algún software de análisis geométrico y dimensional. Por tanto, es necesario realizar el escaneado de las piezas para así poder obtener estas mallas. Para ello se empleará el escáner Breuckmann SmartScan que se encuentra disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León, el cual puede verse en la Figura 4.19.



Figura 4.19. Fotografía del escáner Breuckmann SmartScan empleado para el escaneado de las piezas impresas, disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León.

Además, como se puede ver en esta figura, está soportado por un trípode el cual permite regular tanto su altura como su inclinación, permitiendo regular así las cámaras y el proyector del escáner para mejorar la obtención de datos en función de la geometría de las piezas a escanear.

Este escáner consiste en un escáner de luz estructurada, lo que implica que emite un patrón de luz sobre la pieza, el cual consiste en una serie de rayas. Estas rayas del patrón se deforman al incidir sobre la pieza. Esta deformación es recogida por las cámaras del escáner y es procesada mediante su software, permitiéndole obtener así la información geométrica de la pieza. Esta información geométrica es analizada por los algoritmos del software OPTOCAT, que transforman esta información en las mallas empleadas por los softwares de análisis geométrico.

Este escáner cuenta con 2 cámaras laterales y un proyector en el centro del mismo tal y como puede apreciarse en la Figura 4.20.



Figura 4.20. Fotografía de las 2 cámaras, situadas en los laterales, y del proyector, situado en el centro, del escáner Breuckmann SmartScan, disponible en la unidad UFI3D de la Universidad de León.

Por otro lado, las piezas se colocan sobre una mesa rotatoria, permitiendo así el escaneado de las diversas caras de la pieza sin ser necesario mover el escáner de su posición. Esta mesa, al igual que el escáner, también se encuentra conectada al ordenador, de forma que los ángulos que gira son controlados por el software del escáner, permitiendo así, en la gran mayoría de casos, realizar una reconstrucción automática de la geometría de la pieza durante el escaneado. Esta mesa puede ser observada en la Figura 4.21.



Figura 4.21. Fotografía de la mesa rotatoria sobre la que se colocan las piezas para ser escaneadas

Finalmente tenemos el software OPTOCAT, que es el encargado de recoger y analizar la información provista por el escáner para generar las mallas de las piezas.

#### 4.5.1.1 Escaneado de las piezas con el escáner Breuckmann SmarScan.

Para comenzar con el proceso de escaneado de las piezas, la pieza se colocará más o menos en el centro de la mesa rotatoria. A continuación, se procederá a comenzar con el propio proceso de escaneado. Para ello se empleará el software OPTOCAT, siguiendo los pasos mostrados a continuación:

1. Creación de un nuevo proyecto.
2. Confirmación del escáner y la mesa rotatoria empleados.
3. Selección de la herramienta de escaneado automático.
4. Dentro de la herramienta de escaneado automático, se empleará la herramienta de “Teach”. Esta herramienta permite calcular al software el eje de giro de la mesa para así poder unir la información recogida por el escáner en las diferentes capturas realizadas de forma automática. Además, en esta herramienta también se ajusta la exposición a la que se someten las piezas mediante la variación de la velocidad del



obturador. Este ajuste tiene una gran importancia, ya que de él depende el poder captar las diferentes zonas de la pieza.

5. Con la herramienta "Measure" se procederá a realizar el propio escaneado de la pieza.
6. Una vez que la pieza ha sido escaneada, es necesario realizar el alineado de las diferentes capturas que ha tomado el escáner, para así formar la malla de toda la pieza. Para ello, se emplea la herramienta "Align".
7. Con la herramienta "Merge" uniremos todas estas capturas creando así un único fichero .STL.
8. Utilizando la herramienta "Processing", podremos retocar el archivo .STL creado anteriormente. Esto suele ser necesario para borrar las partes de la mesa que se escanean junto a la pieza.

Una vez realizados todos estos pasos, obtendríamos la malla de la pieza lista para ser empleada. No obstante, en algunos casos es necesario realizar un paso a mayores para escanear zonas que el escáner no ha podido capturar, el cual se realizará a continuación del punto 5 y luego se continuará como se especifica arriba. Esto ocurre, por ejemplo, en la cara sobre la que se apoya la pieza en la mesa. En primer lugar, para poder capturar esta zona es necesario darle la vuelta a la pieza. En piezas con geometrías simétricas o que no tienen zonas que las caractericen fácilmente, es recomendable marcar la pieza con algún tipo de material que posteriormente sea fácil de eliminar, por ejemplo, la plastilina. El marcado de la pieza ha de realizarse antes de su escaneado. Estas marcas nos permitirán alinear más fácilmente las capturas realizadas en el punto 5 con la captura de la zona que no se ha podido captar. Para capturar esta zona, se empleará la herramienta de "Single Scan", indicando en la ventana que se abre que lo que cambia es la posición de la pieza. Tras realizar esta captura, hay que alinearla manualmente con el resto de capturas, para lo que se emplearán las marcas realizadas anteriormente como una ayuda para realizar este alineado, ya que servirán como puntos de referencia.

#### 4.5.2 Geomagic Design X.

Además de ser el software empleado para el diseño de los soportes de las piezas, el Geomagic Design X también permite la modificación y arreglo de los ficheros .STL. Por tanto, como en este caso no se busca realizar una reconstrucción completa de la pieza, se empleará principalmente para eliminar las marcas realizadas con plastilina en las piezas en las que fue necesario realizar una captura adicional.

#### 4.5.3 Geomagic Control X.

El Geomagic Control X será el software empleado para comparar las mallas obtenidas mediante el escaneado de las piezas con sus CAD. Este programa consiste en un software diseñado para el control de calidad y la inspección dimensional de las piezas. Antes de comenzar a realizar la inspección será necesario realizar un alineamiento de la malla escaneada con el CAD de la pieza. Para ello, se emplearán las opciones del grupo de herramientas “Alineación”, localizado en la pestaña de “Inicio”. Este grupo de herramientas puede ser observado en la Figura 4.22. Dentro de este grupo de herramientas se utilizarán principalmente la opción de “Alineación inicial” y tras esta la de “Alineación de ajuste perfecto”. Las demás opciones serán empleadas en caso de que no se pueda lograr un alineamiento correcto entre la malla y el CAD con las opciones anteriores.

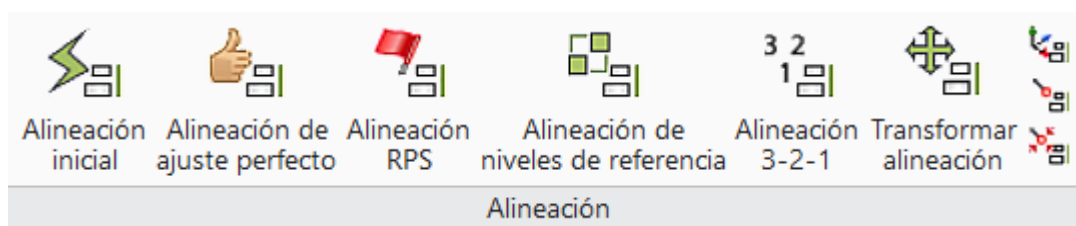


Figura 4.22. Imagen del grupo de herramientas “Alineación” del software Geomagic Control X.

Para realizar la inspección y verificación de las piezas se emplearán principalmente 2 grupos de herramientas de este software. En primer lugar, se usarán las herramientas de la pestaña “Dimensiones”, mostradas en la Figura 4.23.

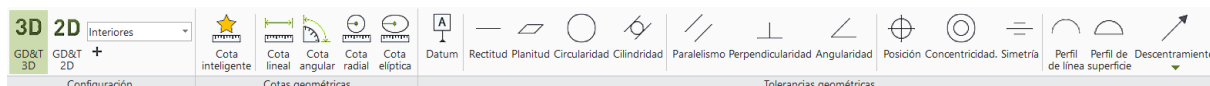


Figura 4.23. Imagen de la barra de herramientas de la pestaña "Dimensiones" del software Geomagic Control X.

Este grupo de herramientas nos permite realizar una comparativa entre las dimensiones del CAD de la pieza y de la malla de la pieza escaneada, estableciendo la tolerancia que sea deseada. Además, también permite analizar geoméricamente la pieza mediante el empleo de las diferentes opciones de tolerancias geométricas. Esto es de gran importancia porque como las contracciones que experimenta la pieza a lo largo del proceso de fabricación no son uniformes para los 3 ejes del espacio, hace que las geometrías de la pieza se deformen y no solo reduzcan su tamaño.

El otro grupo de herramientas que se empleará para verificar e inspeccionar las piezas escaneadas se encuentra en la pestaña “Inicio”, y corresponde con el grupo de herramientas “Comparar”, mostrado en la Figura 4.24.



Figura 4.24. Imagen del grupo de herramientas "Comparar" del software Geomagic Control X.

# 5 Reglas de diseño para la fabricación de las piezas.

A la hora de diseñar las diferentes piezas a fabricar mediante este tipo de tecnología es necesario tener en cuenta una serie de reglas para disminuir el riesgo de la aparición de defectos en las mismas, así como diseñar piezas aptas para este tipo de procesos de impresión.

## 5.1 REGLA 1. SOBREDIMENSIONAR LA PIEZA.

Una de las principales reglas a tener en cuenta en el diseño reside en sobredimensionar la pieza, ya que esta se contraerá durante el proceso de sinterizado de la misma. Es decir, no se puede diseñar la pieza con las dimensiones finales que se necesitan, sino que hay que sobredimensionar la pieza en función de los coeficientes de contracción de cada resina, los cuales son diferentes en los 3 ejes del espacio. En el caso de la pasta de alúmina empleada en la UFI3D, la cual pueden ser observada en la Figura 5.1, nos encontramos con unas contracciones de 1,159 en el eje X, de 1,146 en el eje Y y de 1,187 en el eje Z.



Figura 5.1. Fotografía de uno de los botes de pasta de alúmina empleados para la fabricación de las piezas de alúmina mediante SLA en la unidad UFI3D.

## **5.2 REGLA 2. ESPESOR MÁXIMO DE LAS PAREDES DE LA PIEZA.**

Otra regla muy importante a tener en cuenta durante el diseño de las piezas reside en el espesor de las paredes, el cuál si es muy grande puede dificultar la salida de los gases del interior de la pieza durante el proceso de debinding, lo que puede resultar en la deformación de la pieza, así como la aparición de grietas en la misma. La recomendación dada por el fabricante de la pasta establece un espesor máximo recomendado de 5 mm.

## **5.3 REGLA 3. REDONDEADO DE LAS ESQUINAS EN ÁNGULOS REENTRANTES Y CAMBIOS DE SECCIÓN.**

Para evitar también la aparición de defectos en la pieza durante el proceso de sinterizado, se ha de tener especial cuidado con los ángulos reentrantes de las piezas. Este tipo de ángulos puede dar lugar a la aparición de grietas debido a que actúan como un concentrador de tensiones. Por tanto, para evitar este tipo de problema se suele hacer un redondeado en este tipo de ángulos, para los cuales, el fabricante de la pasta establece un radio mínimo de 0,2 mm, aunque recomienda que en su lugar se emplee uno de 0,5 mm. Lo mismo ocurre para el caso de los cambios de sección bruscos, los cuales también actúan como concentradores de tensiones durante el proceso de sinterizado. En este caso también se procederá al redondeado de estas secciones.

## **5.4 REGLA 4. ESPACIO MÍNIMO ENTRE DOS PAREDES O AGUJEROS CONTIGUOS.**

Otro factor que se ha de tener en cuenta durante el diseño de las piezas es el espacio necesario que ha de dejar entre dos paredes y entre dos agujeros contiguos. En el caso de dos paredes contiguas se ha de dejar un espacio de al menos 0,3 mm, aunque se recomienda que al menos se deje un espacio de 0,5 mm. En el caso de los agujeros este espacio ha de ser mayor, ya que ha de ser

mínimo de 0,5 mm y se recomienda que se deje un espacio de 0,65 mm. El motivo de dejar estos espacios reside en evitar que durante la impresión ambos elementos se fusionen en uno solo, así como facilitar la posterior labor de limpieza de la pieza en verde tras su salida del proceso de impresión.

## **5.5 REGLA 5. DISEÑAR SOPORTES ADECUADOS A LAS PIEZAS.**

También, a la hora de realizar piezas cilíndricas con una longitud que requiera que sean impresas de forma horizontal, hay que realizar una especie de apoyo o soporte para permitir su impresión. Si la pieza es sencilla, este soporte generalmente consiste en una especie de banda plana a lo largo del cilindro que servirá como su soporte. Esta banda será eliminada de forma manual tras el proceso de debinding mediante el lijado de la misma. Un ejemplo de este tipo de banda podrá ser observado en la Figura 6.1 mostrada en el capítulo 6. En caso de piezas más complejas, será necesario diseñar un soporte específico para la misma, lo cual requerirá un mayor consumo de material. Esta parte será tratada con mayor profundidad en el capítulo 6.

## **5.6 REGLA 6. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN PARA PIEZAS DELICADAS.**

En el caso de piezas con paredes exteriores o detalles muy finos, estructuras con diseños de matrices de celosías, piezas con una superficie de adhesión pequeña a la cama de impresión, especialmente si son altas, y para piezas que requieren cierto tipo de soportes, es necesario diseñar una especie de barrera de protección a su alrededor. Estas barreras protectoras han de tener los bordes que se encuentran con las cuchillas de la máquina redondeados, además se recomienda hacerlas en dos partes para facilitar su retirada durante el proceso de limpieza. Las dimensiones recomendadas para este tipo de barreras pueden ser observadas en la Figura 5.2 y en la Tabla 5.1.

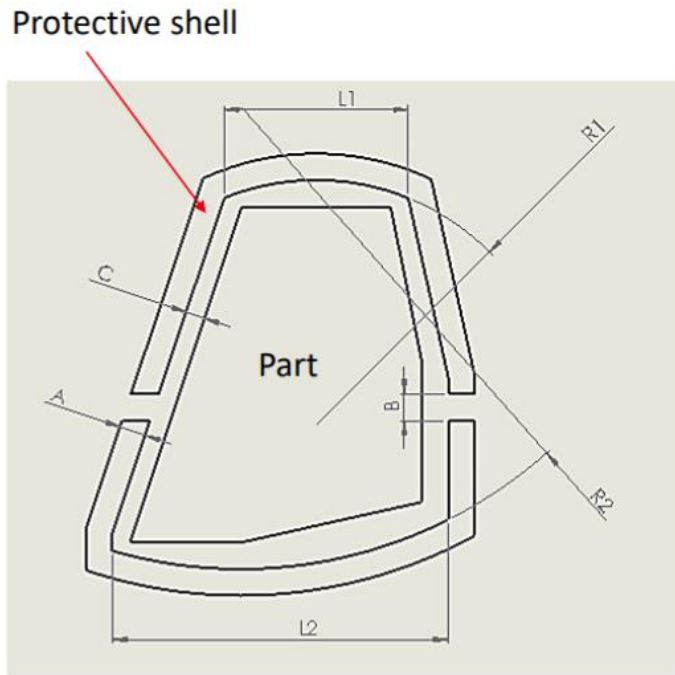


Figura 5.2. Representación de las diferentes dimensiones de la barrera protectora. Fuente: [30]

Tabla 5.1. Valores máximos y mínimos de las dimensiones de la barrera protectora. Fuente: [30]

	Min	MAX
A	1,5 (for small parts < 10 mm)	3 (for high parts > 80 mm)
B	B=A	B=2*A
C (space between part and shell)	2 mm	10 mm
R1 (radius)	$R1=0,7*L1$	$R1=L1$
R2 (radius)	$R2=0,7*L2$	$R2=L2$

## 5.7 REGLA 7. DISEÑO DE CAVIDADES INTERIORES.

Otro factor clave a tener en cuenta es que en una pieza cerrada no pueden existir cavidades interiores en las que haya quedado pasta sin polimerizar, ya que en este caso no habría ninguna forma de eliminar esta resina. Si esta resina no es eliminada, daría lugar a una gran cantidad de problemas durante el proceso de debinding que provocarían la aparición de grietas en la pieza. Por tanto, es necesario que en el caso que sea necesario hacer cavidades en el interior de una pieza, siempre se realice un orificio que permita extraer la pasta de su interior durante el proceso de limpieza.

## 5.8 REGLA 8. DISEÑO DE AGUJEROS PASANTES Y CIEGOS.

Algo similar ocurre con los agujeros a través de las piezas, especialmente en el caso de los agujeros ciegos con un diámetro pequeño, ya que presentan una gran complicación en su proceso de limpieza. Esto implica establecer una limitación en relación a la longitud de los agujeros en función de su diámetro y de la pasta empleada. En el caso de la pasta empleada en la UFI3D, esta relación puede verse reflejada en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Limitaciones de la longitud de los agujeros ciegos en las piezas realizadas con la pasta AL-F02 de 3DCERAM en función de su diámetro. Fuente: [30]

Diámetro del agujero (mm)	Longitud máxima del agujero (mm)
0,8	5
1	10
1,5	20

En el caso de los agujeros pasantes de diámetros pequeños también nos encontramos con ciertas limitaciones debido a la dificultad que presentan en relación a su proceso de limpieza. Es por este motivo que también se limita la longitud que estos pueden tener en función de su diámetro. Esta relación puede verse reflejada en la Tabla 5.3.



Tabla 5.3. Limitaciones de la longitud de los agujeros pasantes en las piezas realizadas con la pasta AL-F02 de 3DCERAM en función de su diámetro. Fuente: [30]

Diámetro del agujero (mm)	Longitud del agujero (mm)
0,6	40
0,8	60

### 5.9 REGLA 9. DISEÑO DE PIEZAS CON ESTRUCTURAS CON MATRICES DE CELOSÍAS.

También es necesario tener en cuenta las limitaciones relacionadas con las piezas con estructuras con matrices de celosías, las cuales, son uno de los tipos de piezas más importantes que permite producir los procesos de fabricación aditiva gracias a las reducciones de peso que proporcionan frente a las estructuras convencionales, ya que resultan de procesos de optimización topológica. Para este tipo de estructuras existen limitaciones relacionadas con el tamaño mínimo y máximo de del diámetro de los puntales que las forman, así como para la distancia mínima y máxima entre cada una de las celdas. Esta relación puede ser comprobada en la Figura 5.3 y en la Tabla 5.4 en la cual se exponen estos valores límites.

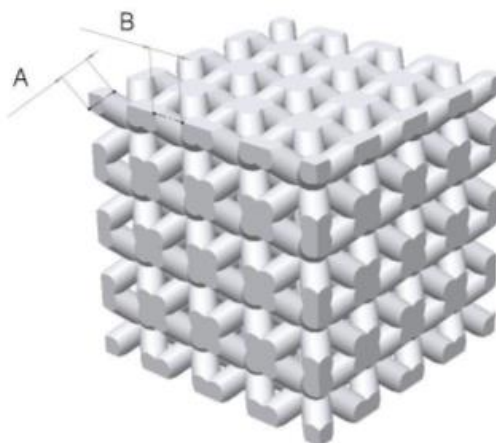


Figura 5.3. Representación de las dimensiones geométricas expresadas en la Tabla 5.4 en una estructura con matrices de celosías. Fuente: [30]

Tabla 5.4. Valores máximos y mínimos de las dimensiones geométricas expresadas en la Figura 5.3. Fuente: [30]

	A Mín.	A Máx.	B Mín.	B Máx.
Distancia (mm)	0,3	3	2	30

### 5.10 REGLA 10. ORIENTACIÓN DE LAS PIEZAS EN LA CAMA DE IMPRESIÓN.

Por otro lado, a pesar de que no es un parámetro de diseño, es muy importante tener en cuenta la orientación de la pieza en la cama de impresión, ya que, una mala orientación de la misma puede dar lugar a diferentes problemas durante el proceso de impresión tales como el levantamiento completo de la pieza de la cama de impresión, e incluso provocar daños a la propia pieza pudiendo provocar la rotura de la misma. Para poder evitar la aparición de estos problemas, la pieza debe colocarse de forma que no sufra grandes esfuerzos debido al paso de las cuchillas al distribuir y nivelar la pasta. Así, la pieza ha de colocarse de forma que esta siga la dirección de las cuchillas, para ello, generalmente la pieza se colocará de forma que la mayor de sus dimensiones siga la dirección de las cuchillas, tal y como se muestra en la Figura 5.4. En la imagen de la izquierda de esta figura se puede observar una orientación incorrecta de la pieza, la cual provocaría con gran seguridad su levantamiento de la cama de impresión, mostrándose en la imagen de la derecha su correcta orientación.

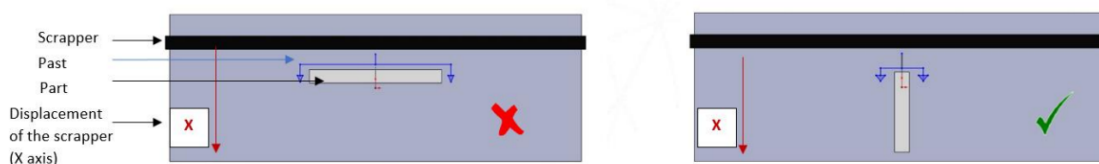


Figura 5.4. Representación de como orientar de forma correcta una pieza en la cama de impresión. Fuente: [30]

## 6 Diseño y comprobación de los soportes para las piezas realizadas mediante SLA con materiales cerámicos.

Los soportes constituyen una parte muy importante dentro de los procesos de fabricación aditiva ya que permiten la fabricación de piezas que sin ellos no sería posible imprimir. Entre estas piezas que los soportes nos permiten imprimir nos encontramos con piezas que presentan partes en voladizo, o piezas que por su geometría no podrían ser impresas mediante el proceso de fabricación capa a capa propio de la fabricación aditiva.

Además, los soportes también permiten evitar la aparición de otros defectos comunes en las piezas fabricadas mediante SLA cerámica. Entre los más habituales nos encontramos con el efecto curling y los desplazamientos de capas, como se verá en los apartados siguientes.

En el caso de la estereolitografía con materiales cerámicos nos encontramos con 2 tipos de soportes en función de su contacto con la pieza:

- **Los soportes con contacto**, los cuales van unidos directamente a la pieza y forman parte de la misma. Este tipo de soportes deberá ser eliminado antes del proceso de sinterizado y generalmente después del proceso de debinding mediante su eliminación con procesos manuales como por ejemplo mediante el lijado de los mismos. Estos soportes suelen ser de tamaño pequeño y suelen ser empleados en piezas con geometrías curvas sobre las que se apoyan para ser impresas, como se refleja en la Figura 6.1. Estos soportes también suelen ser empleados para mejorar la adherencia de ciertos tipos de piezas a la cama de impresión, principalmente para evitar el levantamiento de las esquinas o efecto curling.

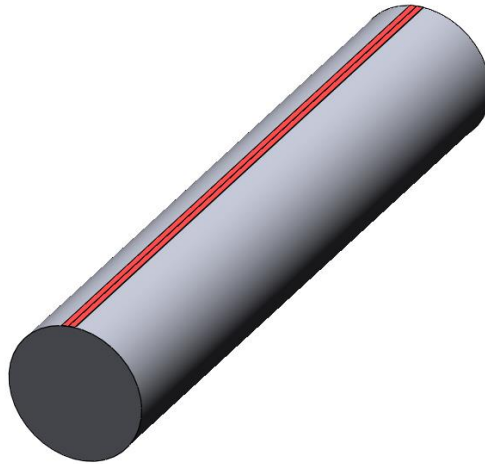


Figura 6.1. Representación de un soporte con contacto, representado en color rojo, el cual se situaría en contacto con la cama de impresión para mejorar la adhesión de la pieza a la misma.

- **Los soportes sin contacto con la pieza final.** La realización de este tipo de soportes es algo propio del proceso de fabricación de SLA con materiales cerámicos y es posible gracias a la gran viscosidad que presenta la pasta empleada en esta forma de fabricación. Así, nos encontramos con una fina capa de pasta entre el soporte y la pieza, gracias a la cual se mitigan los esfuerzos producidos debido a las fuerzas de fricción generadas por el paso de las cuchillas sobre las capas de pasta y la pieza. Este tipo de soporte presenta una gran ventaja frente al anterior durante su proceso de eliminación, ya que, al no estar unido con la pieza, puede ser eliminado fácilmente durante el proceso de limpieza, sin tener que recurrir a labores de lijado o similares. La separación entre la pieza y el soporte depende principalmente de la pasta empleada, en el caso de la pasta empleada para la impresión de las piezas nos encontramos con una separación mínima recomendada por el fabricante de 0,3 mm para los ejes X e Y, y de una separación mínima de 0,26 mm para el eje Z. Estos valores tienen una gran importancia y han de tenerse en cuenta para evitar la fusión de la pieza con el soporte, lo que daría lugar a una pieza defectuosa. Estos soportes son los que se emplean generalmente en piezas que presentan partes en voladizo, piezas esbeltas que pueden sufrir desplazamiento de capas de impresión o

piezas con geometrías interiores. No obstante, estos soportes, a diferencia de los anteriores, consumen una mayor cantidad de material, por lo que la optimización de los mismos adquiere una gran importancia, debido a que la pasta empleada en la fabricación de las piezas es bastante cara. Esto implica buscar formas que nos permitan reducir en la mayor medida posible el tamaño de estos soportes, para así malgastar la menor cantidad posible de pasta. Una de las formas más sencillas de lograr este objetivo es mediante la propia orientación de la pieza en la cama de impresión. Otro de los factores a tener en cuenta que nos puede permitir reducir el material que se emplea en los soportes reside en jugar con la distancia que puede tener un voladizo sin necesidad de poner un soporte en función del ángulo del voladizo y de la pasta empleada para la fabricación de la propia pieza. Esta relación de valores puede ser observa en la Figura 6.2 y en la Tabla 6.1.

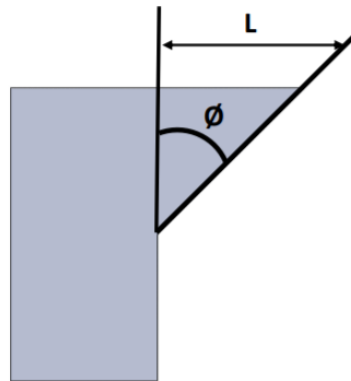


Figura 6.2. Representación de la distancia que puede presentar un voladizo sin la necesidad de soportes en función de su ángulo con la vertical. [30]

Tabla 6.1. Relación entre la longitud que puede presentar un voladizo en función del ángulo con la vertical sin la necesidad de colocar soportes. Fuente: [30]

Ángulo	Distancia (mm)
45°	Sin límite
50°	4
60°	3
70°	2,5
90°	2

A pesar de la gran importancia que presentan los soportes para este método de fabricación aditiva, no existe mucha información sobre los mismos más allá de unas simples recomendaciones. Es por este motivo, por lo que en este trabajo se realizarán distintos tipos de soportes que permitan la fabricación de diferentes piezas buscando la reducción del mayor número posible de defectos y complicaciones.

Teniendo todo esto en cuenta, el objetivo de este trabajo consiste en estudiar y diseñar diferentes tipos de soportes que se adapten a distintas piezas y a sus necesidades, de forma que se puedan producir piezas funcionales que sin la existencia de estos soportes no sería posible o que sin ellos presentarían diversos tipos de problemas. Para el diseño tanto de los soportes como de las propias piezas, así como para la creación de los archivos .STL se empleará el programa Geomagic Design X.

## 6.1 SOPORTES CON CONTACTO PARA EVITAR EL EFECTO CURLING.

El efecto curling es uno de los tipos de defectos más comunes dentro de la fabricación aditiva, el cual también se produce con bastante frecuencia en las piezas producidas por SLA cerámica. Este tipo de defecto consiste en el levantamiento de las esquinas de la pieza de la cama de impresión. Este levantamiento es mucho más notable en piezas con formas planas y rectangulares,

ya que, las geometrías con ángulos, especialmente ángulos rectos son las que tienden a sufrir este efecto en mayor medida, a diferencia de las piezas con geometrías curvas. Es por este motivo, por el que, para solucionar este problema, emplearemos unos soportes con formas redondeadas colocados en las esquinas de las piezas. Este tipo de soportes es bastante similar a los soportes empleados en otros tipos de tecnologías de fabricación aditiva, como puede ser en el caso de las máquinas de fabricación FDM. Este tipo de defecto se puede apreciar fácilmente en la Figura 6.3.



Figura 6.3. Imagen de una pieza escaneada que ha sido fabricada por SLA cerámica, en la que se puede apreciar fácilmente el efecto curling.

Es necesario tener en cuenta que estos soportes se encuentran unidos a la pieza, pero que no forman parte de la pieza final. Por lo tanto, ha de facilitarse su eliminación, de forma que esta no afecte a la propia pieza. Para ello, se realizarán ciertas modificaciones en estos soportes en forma de disco para poder lograr este objetivo. Así, se han de realizar unas pequeñas marcas en los mismos que faciliten su eliminación mediante su rotura. Estas marcas han de estar ligeramente separadas de la pieza, ya que, en caso contrario, al romper el soporte, se podría producir daños a la propia pieza. En relación al diseño de estas marcas, el fabricante de la máquina establece una serie de recomendaciones. Estas recomendaciones pueden ser observadas mediante la Figura 6.4 y la Tabla 6.2.

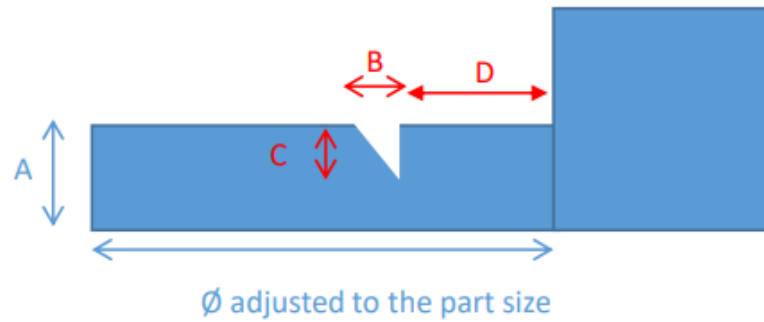


Figura 6.4. Representación de las dimensiones sobre la pieza y el soporte que el fabricante de la máquina recomienda. Fuente: [30]

Tabla 6.2. Tabla que recoge las dimensiones recomendadas por el fabricante representadas en la Figura 6.4. Fuente: [30]

	Minimum (mm)	Maximum (mm)
A	0,8	1,5
B	0,2	$1/3 \times A$
C	0,2	$1/3 \times A$
D	0,3	$2 \times B$

### 6.1.1 DISEÑO DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 1.

La pieza 1 es una pieza rectangular alargada con diversos orificios, como se puede observar en la Figura 6.5, por lo que como hemos mencionado anteriormente, va a sufrir cierto pandeo en sus esquinas.



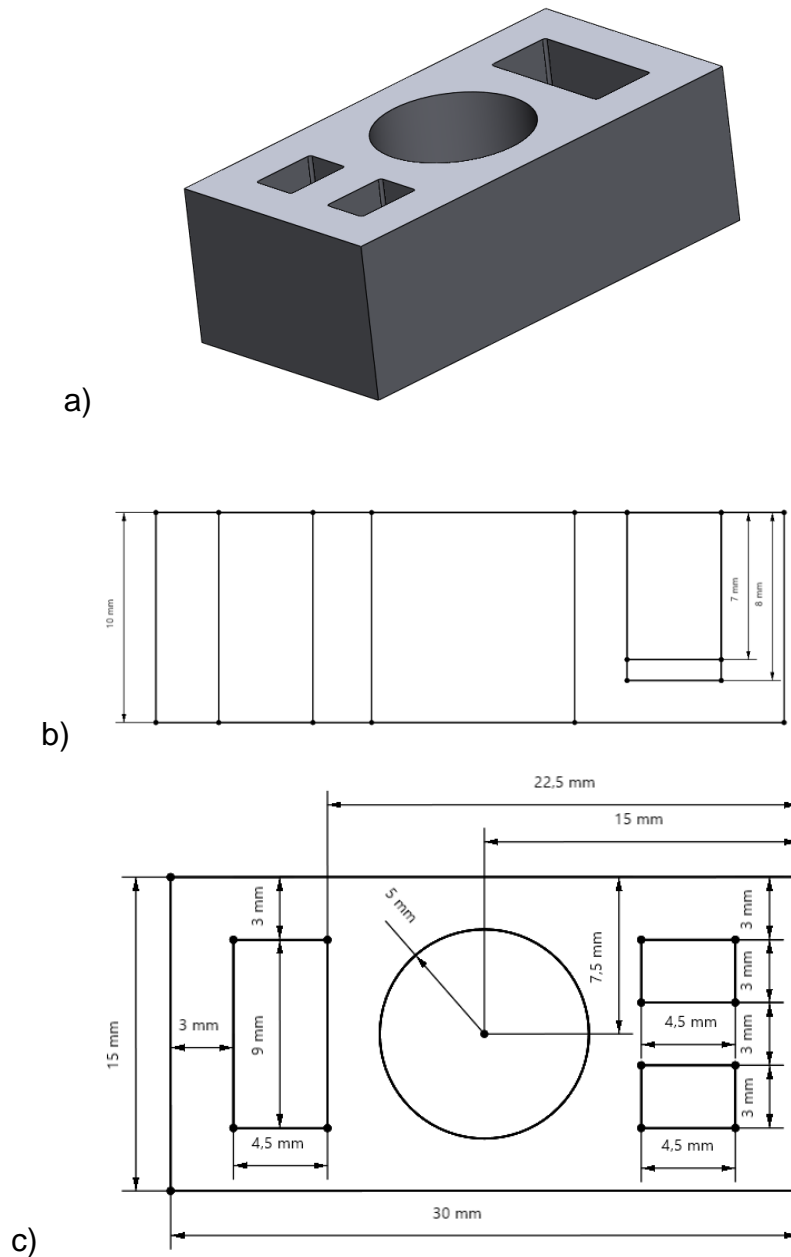


Figura 6.5. a) Imagen de la pieza 1 extraída del software Geomagic Design X; b) Imagen de las dimensiones geométricas de la pieza 1 en alzado; c) Imagen de las dimensiones geométricas de la pieza 1 en planta.

### 6.1.1.1 Impresión e inspección de la pieza 1 impresa sin soportes.

Esta pieza fue fabricada en primer lugar sin ningún tipo de soporte, ya que debido a su pequeño tamaño se consideró que no serían necesarios. Sin embargo, una vez finalizada su impresión y las tareas de limpieza, se podía observar a simple

vista la aparición del efecto curling en las esquinas de la pieza, este fenómeno seguía siendo notable tras finalizar el proceso de fabricación completo. Esta pieza fue escaneada y contrastada contra su CAD para poder observar este fenómeno con una mayor precisión. La pieza 1 impresa sin soportes fue escaneada en 2 puntos del proceso de fabricación, en primer lugar, tras salir del horno de debinding y en segundo lugar tras salir del horno de sinterizado. El análisis geométrico de la pieza fue realizado mediante el software de análisis geométrico Geomagic Control X.

- **Magnitud del efecto curling tras el debinding.**

Una vez finalizado el proceso de debinding de la pieza 1, se procedió a realizar su escaneado, lo que permitió observar de manera más clara el efecto curling producido en la base de la pieza, tal y como se puede observar en la Figura 6.6.



Figura 6.6. Imagen del del fichero .STL de la pieza 1 obtenido mediante su escaneado tras finalizar el proceso de debinding.

Contrastando el archivo .STL de la pieza contra el CAD de la misma mediante la opción de comparación en 3D del Geomagic Control X, se puede apreciar la magnitud de este fenómeno. De esta forma, estableciendo un rango máximo de desviación de 0,2 mm en el mapa de colores se obtiene el resultado mostrado en la Figura 6.7. En esta figura se puede comprobar como en la zona de las esquinas se produce una contracción de la pieza, mientras que en el centro de la misma se produce el efecto contrario.

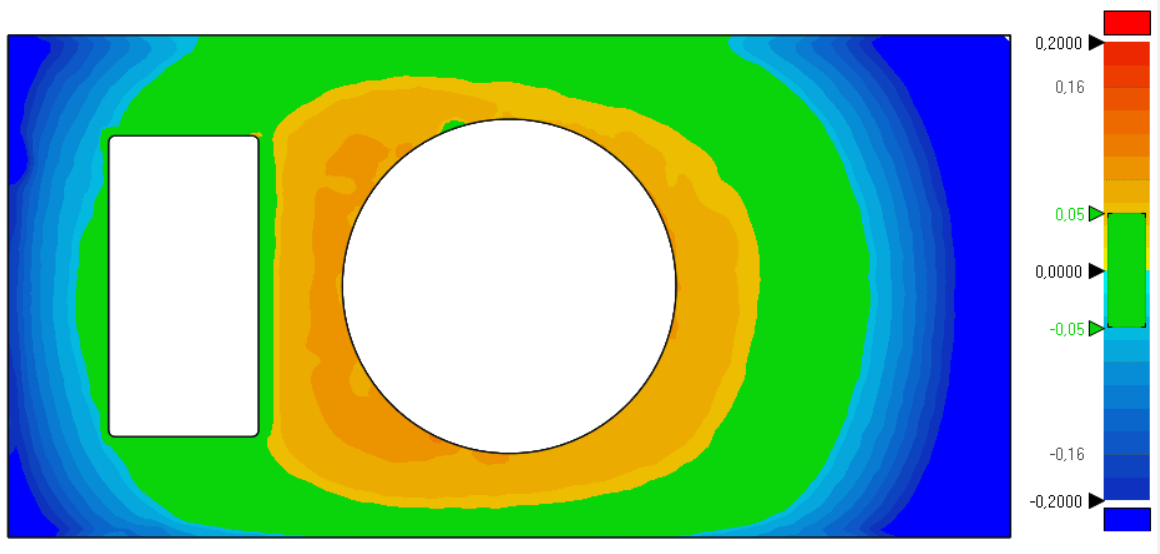


Figura 6.7. Imagen de la comparación en 3D, realizada en Geomagic Control X, de la base de la pieza 1 en la que se puede comprobar los efectos producidos por el efecto curling.

De esta forma, empleando 4 puntos de comparación en las esquinas de esta pieza, podemos conocer la contracción producida en estos puntos, tal y como se puede ver en la Figura 6.8 a). La contracción producida en estos 4 puntos no es uniforme, sino que se puede observar cómo esta contracción es ligeramente superior en la parte derecha de la pieza, lo cual puede deberse a la presencia del agujero pasante presente en la parte izquierda de la misma. Realizando esta misma operación en la parte central de la pieza, podemos observar cómo se produce un aumento del tamaño de la pieza en esta zona. No obstante, la magnitud de esta deformación es inferior a la producida en las esquinas, aunque sigue siendo bastante significativa, tal y como se puede observar en la Figura 6.8 b). En esta zona ocurre lo contrario a lo producido en las esquinas, ya que la deformación de la pieza es mayor en la parte izquierda de la pieza.

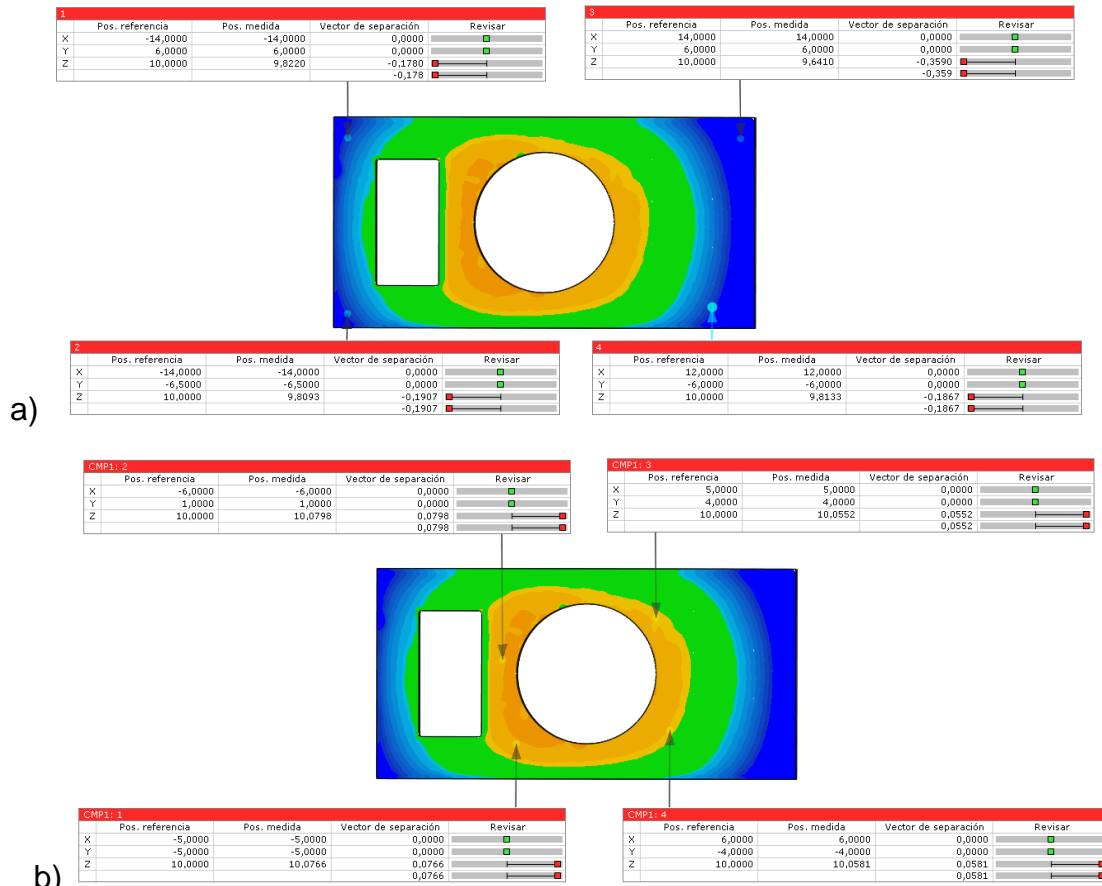


Figura 6.8. a) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control; b) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en la parte central de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control X.

En cuanto a las dimensiones del resto de la pieza, se pudo observar en general una ligera contracción de la misma. Esta contracción era esperada debido a la eliminación de los restos de resina de la pasta que se realiza durante el proceso de debinding de la propia pieza.

- **Magnitud del efecto curling tras el sinterizado.**

Una vez que la pieza finalizó el ciclo de debinding y fue retirada del horno, se procedió a su escaneado. En este caso, las dimensiones de la pieza presentan una mayor importancia que en el caso anterior, ya que, en este momento la pieza ha finalizado el proceso de fabricación, por lo que presenta sus

dimensiones y características finales, que si no coinciden con las deseadas dentro de las tolerancias establecidas convertiría a la pieza en una pieza defectuosa. En este caso, la pieza ha de ser comparada con el CAD con las dimensiones finales de la pieza, a diferencia que, en el CAD de la comparación anterior, el cual, correspondía con las dimensiones de diseño. Esto es necesario debido a las importantes contracciones que se producen durante la etapa de sinterizado de la pieza. Las contracciones que se suponen para el diseño de este CAD son las que da el fabricante de la pasta empleada para la fabricación de la pieza, las cuales se pueden ver en el capítulo 5 de este trabajo. Teniendo esto en cuenta, realizaremos las mismas operaciones que el caso anterior. De esta forma, en la Figura 6.9, podemos comprobar el cambio que se ha producido en la pieza tras realizar el ciclo de sinterizado. Así, se puede comprobar como la deformación producida en la parte central de la pieza, en la que se produce un aumento de tamaño en esta zona, afecta a una región mayor de la pieza, y es más pronunciada que en el caso anterior, mientras que en la zona de las esquinas de sigue apreciando una contracción importante de la pieza. Volviendo a emplear 4 puntos de comparación en las esquinas, tal y como se ve en la Figura 6.10 a), podemos comprobar como la contracción sigue siendo mayor en la parte derecha de la pieza. En el caso de la parte central de la pieza, la deformación producida sigue siendo mayor en la parte izquierda de la pieza, tal y como se muestra en la Figura 6.10 b).

No obstante, en relación al resto de dimensiones de la pieza 1, nos encontramos con un aumento de las mismas, a excepción de las 2 caras laterales de menor tamaño, donde existe una contracción de la pieza.

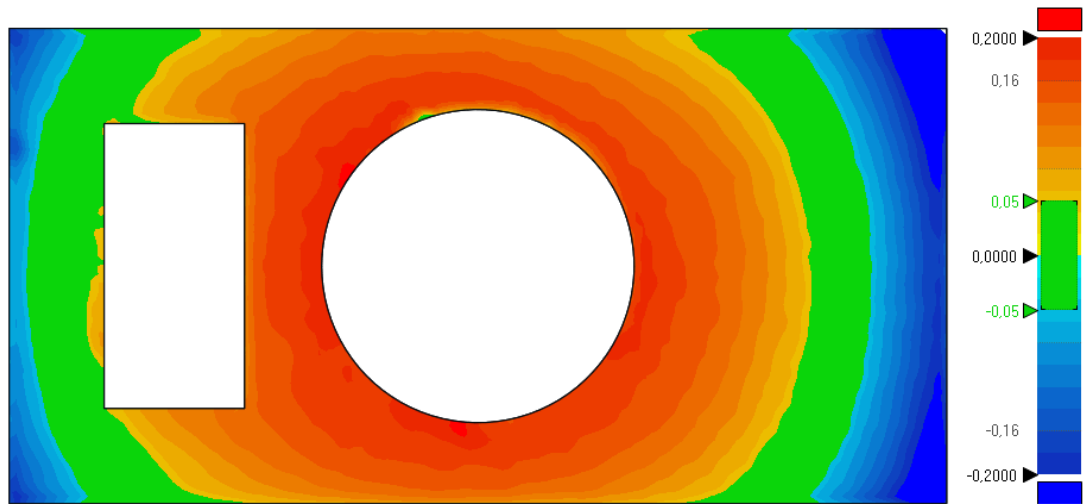


Figura 6.9. Imagen de la comparación en 3D, realizado en Geomagic Control X, de la base de la pieza 1 en la que se puede comprobar los efectos producidos por el efecto curling.

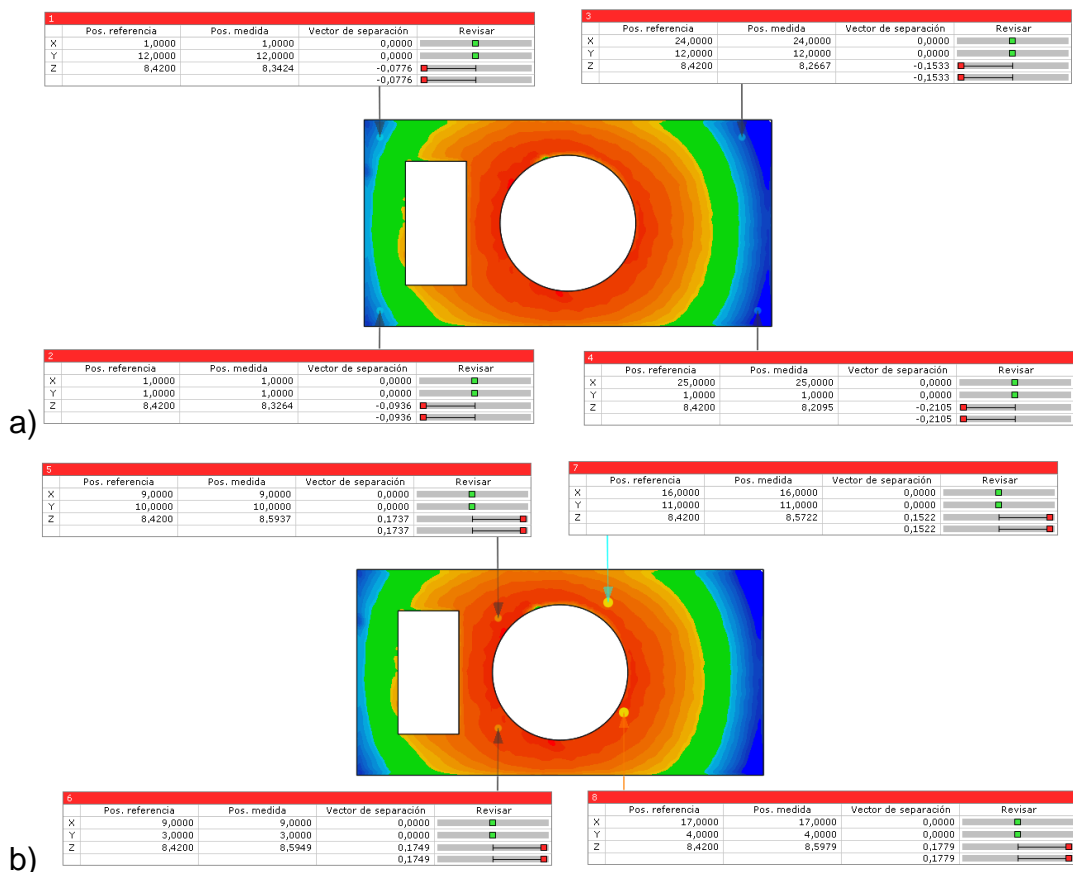


Figura 6.10. a) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control X; b) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control X.

### 6.1.1.2 Diseño de los soportes para la pieza 1.

Para poder evitar la aparición del efecto curling, el cual es bastante significativo en esta pieza, ya que se puede apreciar a simple vista, se aplicaron unos soportes circulares colocados en las esquinas de la pieza.

Estos soportes consisten en unas “pastillas o discos” con un radio de 5 mm y desplazados ligeramente hacia el exterior de la pieza para así poder maximizar la superficie de contacto de los mismos con la cama de impresión mejorando así su eficacia y facilitando también su posterior eliminación, ya que, en su caso, estos soportes se encuentran unidos a la propia pieza. De esta forma, el diseño básico de los soportes corresponde con el mostrado en la Figura 6.11.

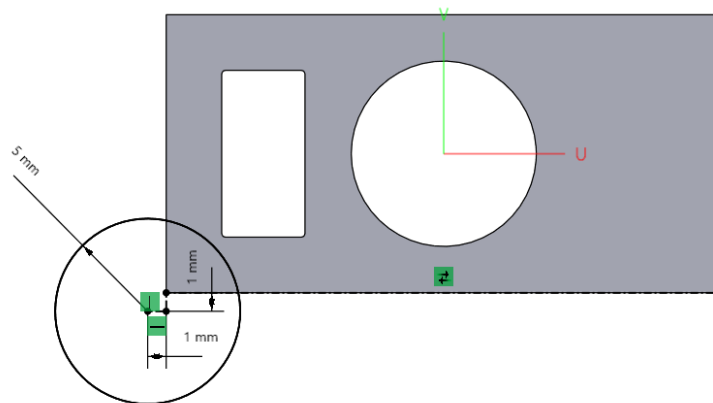


Figura 6.11. Imagen del boceto de los soportes de la pieza 1 en la que se puede apreciar su tamaño y posición con respecto a la pieza.

Teniendo en cuenta las recomendaciones del fabricante de la pasta mencionadas anteriormente, se ha realizado un diseño de los soportes empleando las dimensiones mínimas para cada uno de los parámetros establecidos en estas recomendaciones. Esta decisión se ha basado en emplear el mínimo espesor posible para el disco, con lo cual se busca un menor consumo de material y una mayor facilidad para su posterior eliminación. De esta forma, el diseño de estas marcas puede ser observado en la Figura 6.12.

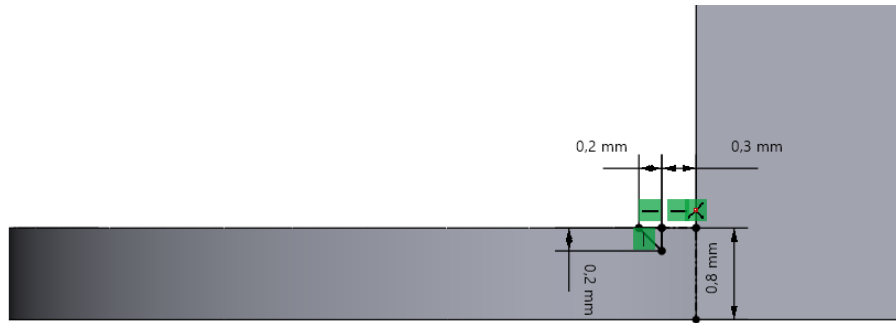


Figura 6.12. Representación gráfica de las dimensiones geométricas de las marcas empleadas para la rotura de los soportes circulares de la pieza.

Finalmente, habiendo realizado este proceso para cada uno de los discos, habríamos finalizado el diseño de los soportes de la pieza, siendo únicamente necesario extraer el archivo .STL que contiene su información para así poder dar comienzo al proceso de impresión. El diseño final de la pieza puede ser observado en la Figura 6.13.

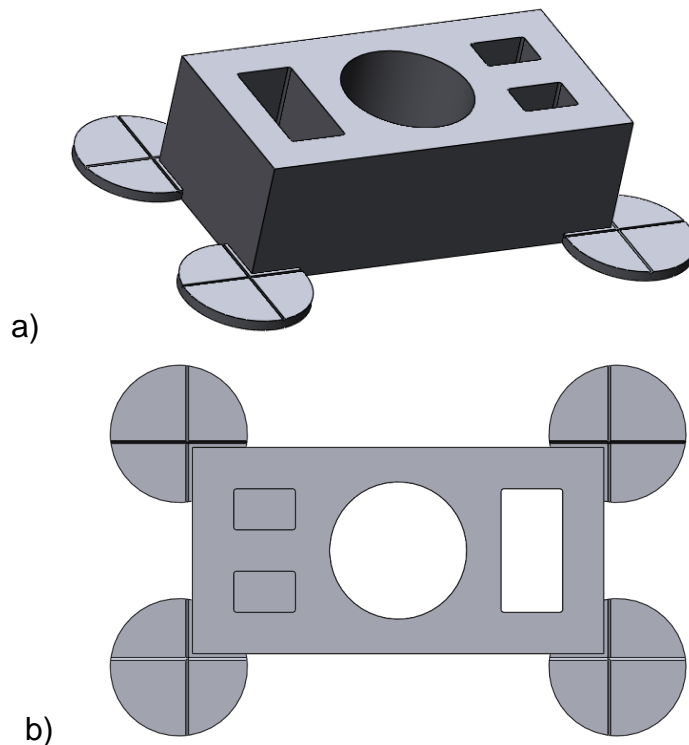


Figura 6.13. a) Vista general de la pieza en la que se puede apreciar la posición de los soportes; b) Vista en planta de la pieza 1.



### 6.1.1.3 Impresión de la pieza 1 con soportes.

Tras tener el diseño de la pieza finalizado, se dio comienzo al proceso de impresión de la misma. De esta impresión obtuvimos la pieza mostrada en la Figura 6.14.



Figura 6.14. Fotografía de la pieza 1 tras el proceso de impresión y de limpieza de la misma en la que se pueden apreciar tanto los soportes como las marcas realizadas en los mismos para su posterior eliminación.

En la pieza impresa con soportes, a diferencia de la impresa sin ellos, no se podía apreciar a simple vista un levantamiento de las esquinas de la misma, lo que implica que los soportes fueron efectivos cumpliendo su cometido. No obstante, durante las labores de limpieza de la pieza tras el proceso de impresión, se pudo comprobar que los soportes eran demasiado débiles, rompiéndose durante el mismo y provocando así daños a la propia pieza. Para evitar este problema, una posible solución es aumentar el espesor de los soportes, ya que el valor utilizado para este parámetro corresponde al mínimo de los valores recomendados por el fabricante. Los soportes que no se rompieron durante las labores de limpieza se decidieron eliminar antes del proceso de debinding para comprobar la facilidad de su eliminación en este momento. Como resultado, se pudo comprobar que había que tener especial cuidado en su eliminación para no dañar la pieza al retirarlos. Tras eliminar los soportes, la pieza pasaría al proceso de debinding, obteniendo, una vez finalizado este paso, la pieza mostrada en la Figura 6.15.

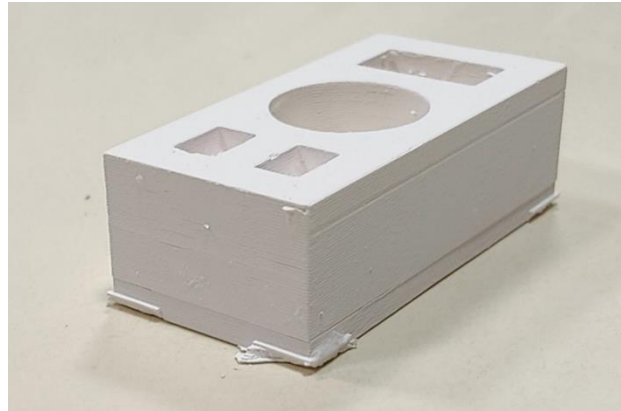


Figura 6.15. Fotografía de la pieza 1 tras el proceso de debinding y tras eliminar los soportes de la misma. En esta imagen también se puede apreciar las marcas que dejan los soportes al ser eliminados.

Como podemos observar en la Figura 6.15, tras eliminar los soportes nos quedan restos de material correspondientes a la separación de las marcas de rotura de los soportes de la pieza. Estas marcas deberían ser eliminadas en este preciso momento mediante un proceso manual de lijado, con unas lijas de grano muy fino, con un grado entre 1000 y 3000. No obstante, en este caso se decidió dejar sin retirar estas marcas, para así tener un ejemplo de las mismas.

Finalmente, llegamos al último paso de este proceso de fabricación, el sinterizado. Tras realizar el sinterizado obtenemos la pieza final, la cual, puede ser observada en la Figura 6.16.

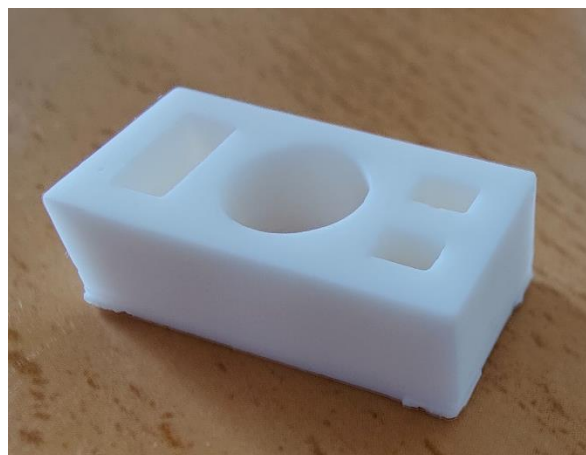


Figura 6.16. Fotografía de la pieza 1 tras el proceso de sinterizado.

#### 6.1.1.4 Inspección de la pieza 1 impresa con soportes.

Al igual que la pieza 1 impresa sin soportes, la pieza 1 impresa con soportes también fue escaneada tras finalizar su sinterizado para realizar una inspección de la misma, y así poder comprobar la eficacia de los soportes puestos en esta pieza. De esta forma, se siguió el mismo procedimiento que en el caso de la pieza sin soportes.

En el caso de la pieza 1 impresa con soportes se puede comprobar una importante disminución del efecto curling, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.17 del análisis 3D realizado en Geomagic Control X.

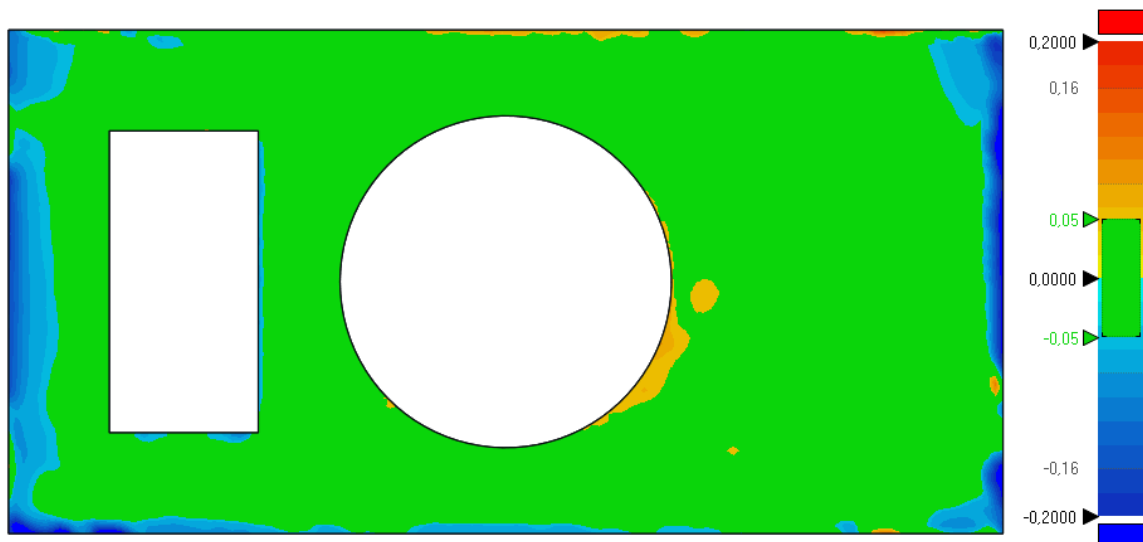


Figura 6.17. Imagen de la comparación en 3D, realizada en Geomagic Control X, de la base de la pieza 1 impresa con soportes en la que se puede comprobar la eficacia de los soportes diseñados.

Empleando los mismos puntos que fueron empleados en el caso anterior para conocer la magnitud del efecto curling en las diferentes zonas de la pieza se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 6.18.

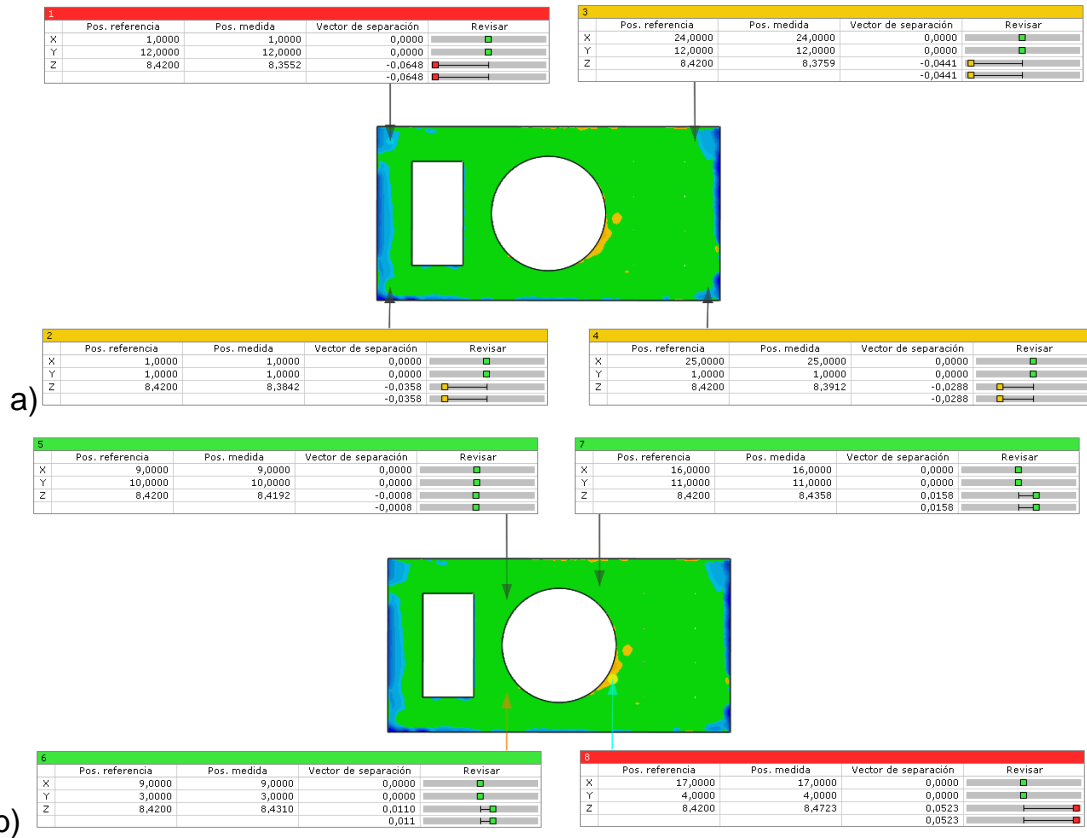


Figura 6.18. a) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control X; b) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en la parte central de la pieza 1 mediante el software Geomagic Control X.

Comparando los datos obtenidos en estos puntos en la pieza fabricada sin soportes con los de la pieza fabricada con los soportes se puede concluir que los soportes han cumplido con su cometido. Las desviaciones con respecto al CAD producidas por el efecto curling se han reducido de forma significativa, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.19.

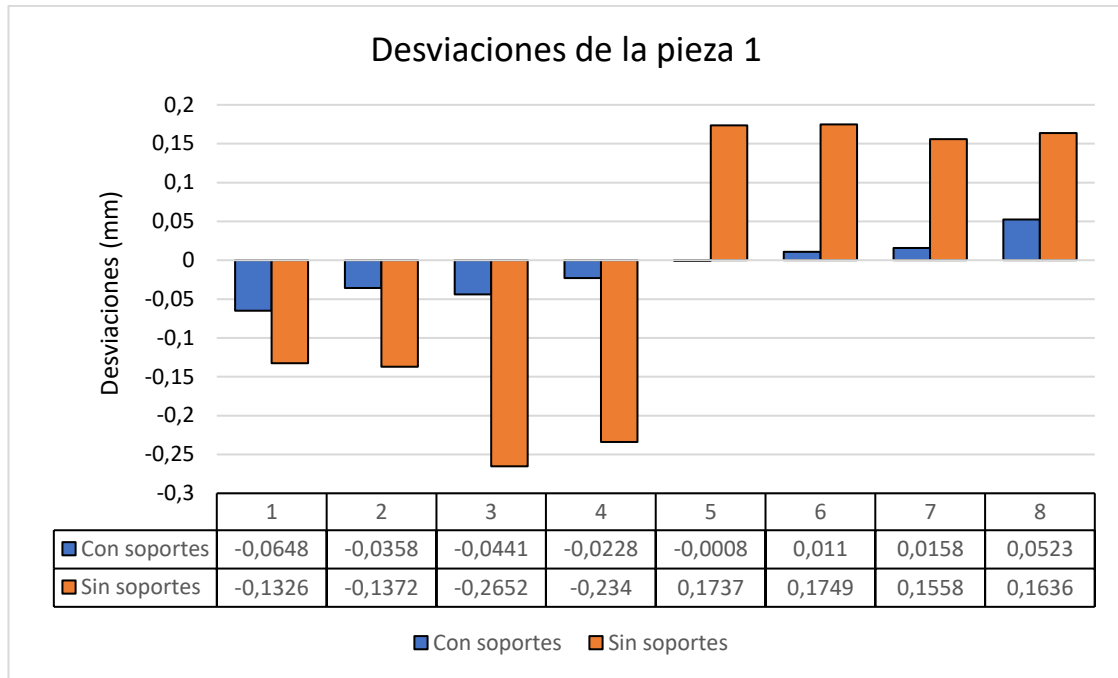


Figura 6.19. Gráfico comparativo de las desviaciones producidas por el efecto curling en la pieza fabricada sin soportes, con las producidas en la pieza fabricada con soportes.

En cuanto al resto de dimensiones de la pieza, se ha podido observar que se ajustan bastante bien al CAD de la pieza, a excepción de las caras laterales de menor tamaño de la pieza, al igual que ocurriría con la pieza impresa sin soportes.

### 6.1.2 REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 2.

La pieza 2 también presenta una cierta geometría alargada, sin embargo, a diferencia de la pieza 1, esta no tiene una geometría rectangular, sino que se asemeja a un romboide con las esquinas redondeadas y con un agujero pasante en su parte central. Esta pieza puede ser observada en la Figura 6.20.

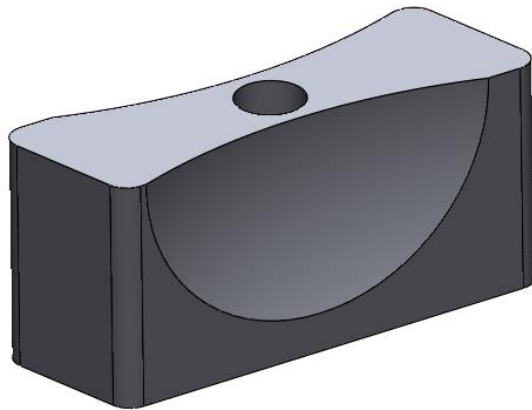


Figura 6.20. Imagen del archivo CAD de la pieza 2.

En el caso de esta pieza, el objetivo de los soportes es el mismo que en el caso anterior, debido a que esta pieza ya había sido diseñada y fabricada anteriormente y se pudo comprobar un importante levantamiento de las esquinas de la base de la pieza debido al efecto curling. Este defecto puede verse en la Figura 6.21.



Figura 6.21. Fotografía de la pieza 2 impresa sin soportes tras haber finalizado el proceso de fabricación en la que se puede apreciar su base.

#### **6.1.2.1 Inspección de la pieza 2 impresa sin soportes.**

En el caso de esta pieza, el defecto a corregir vuelve a tratarse del efecto curling, el cual, puede apreciarse perfectamente en la pieza escaneada mostrada en la Figura 6.22. En el caso de esta pieza, el efecto curling producido presenta una gran desviación, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.23.



Figura 6.22. Imagen de la pieza 2 escaneada en la que se puede apreciar el efecto curling.

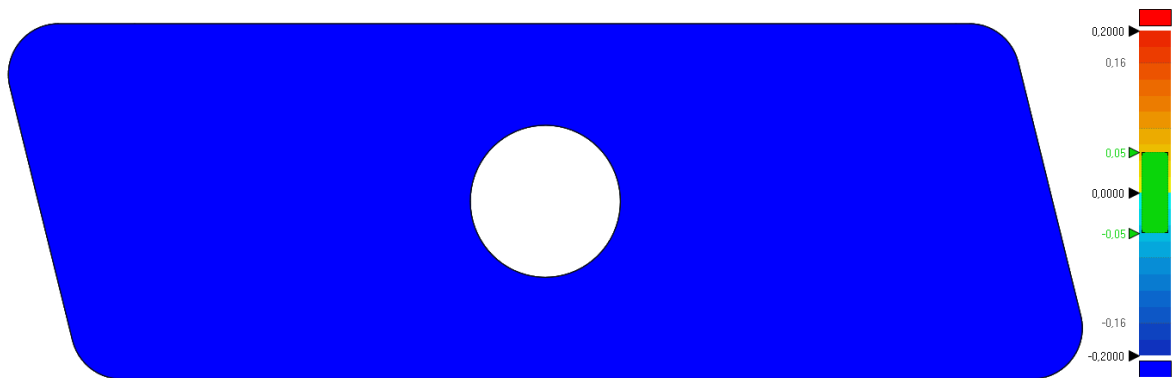


Figura 6.23. Imagen de la comparación en 3D, realizada en Geomagic Control X, de la base de la pieza 2 impresa sin soportes en la que se puede comprobar la magnitud del efecto curling producido en esta pieza.

Esta desviación es mucho más apreciable en las esquinas de la pieza, tal y como se muestra en la Figura 6.24, llegando incluso a superar 1 mm de error en la parte izquierda de la pieza.

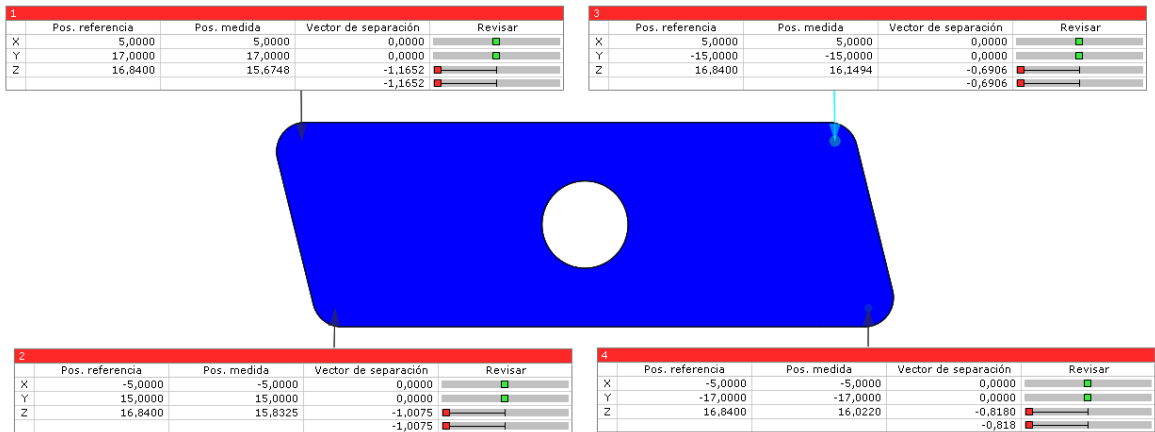


Figura 6.24. Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 2 mediante el software Geomagic Control X.

### 6.1.2.2 Diseño de los soportes de la pieza 2.

Debido a la geometría de la pieza, en lugar de usar unos discos con forma circular como en el caso anterior, se buscó realizar unos soportes con geometrías curvas que se acomodasen más a la geometría de esta pieza. Además, como esta pieza se asemeja a un romboide, presenta ángulos iguales 2 a 2, lo que da lugar a la necesidad de diseñar dos tipos de soportes diferentes que se acomoden a estos ángulos. Teniendo todo esto en cuenta, se realizó el diseño de los soportes para esta pieza. Este diseño se encuentra representado en la Figura 6.25.

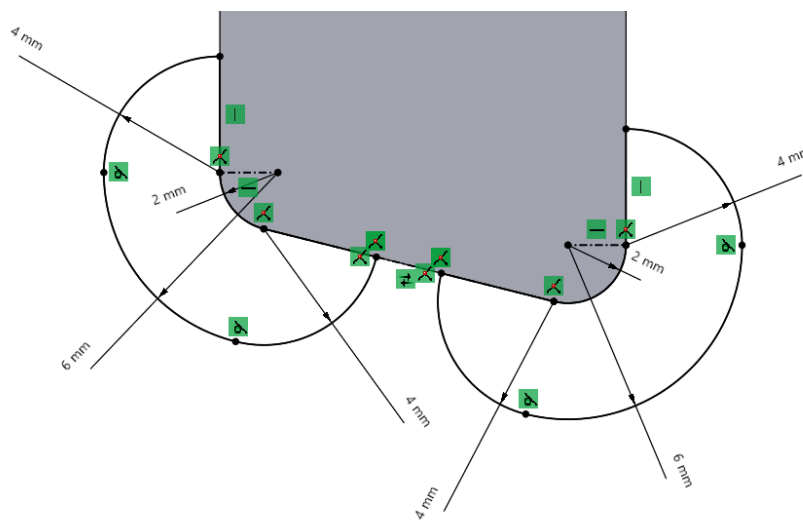


Figura 6.25. Imagen de las dimensiones geométricas de los soportes de la pieza 2.



Una vez que el diseño general de los soportes ha sido realizado, es necesario, al igual que en el caso anterior, realizar unas marcas sobre los mismos para facilitar su rotura y de esta forma hacer su eliminación más sencilla. Estas marcas son muy similares a las empleadas en el caso anterior, ya que también siguen el contorno de la pieza y su geometría es idéntica a las del caso anterior, presentando las mismas dimensiones. Estas marcas pueden ser apreciadas en la Figura 6.26.

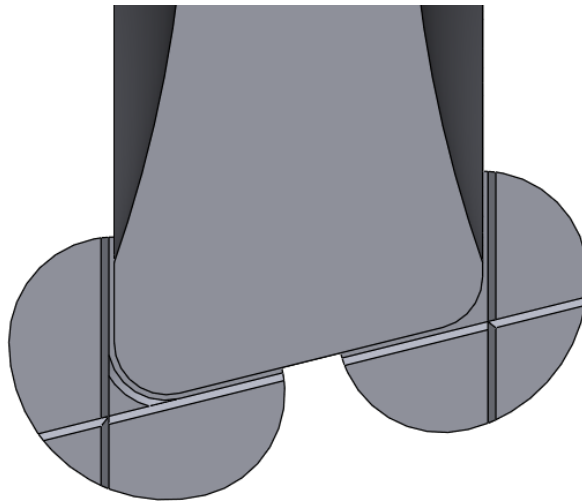


Figura 6.26. Imagen de los soportes de la pieza 2 con las marcas para facilitar su eliminación.

### 6.1.2.3 Impresión de la pieza 2 con soportes.

Una vez realizadas estas marcas, habríamos completado el diseño de los soportes, teniendo de esta forma la pieza lista para ser impresa. El estado final de la pieza puede ser observado en la Figura 6.27.

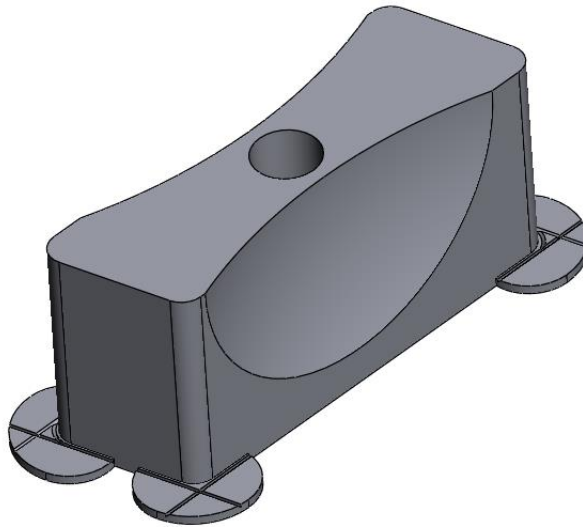


Figura 6.27. Imagen del CAD de la pieza 2 con los soportes lista para comenzar el proceso de impresión.

En el caso de esta pieza, durante la impresión se produjo una parada de la máquina por un fallo de la misma al poco tiempo de empezar la impresión. Esto provocó una separación de la pieza en 2 partes, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.28 y en la Figura 6.29. Esta fractura de la pieza también provocó un desplazamiento de las capas, observable a simple vista en la segunda parte de la pieza, debido principalmente a que esta parte ya no se encontraba pegada a la cama de impresión, provocando así un ligero desplazamiento de la misma debido a los esfuerzos producidos por el paso de las cuchillas.



Figura 6.28. Fotografía de la base de la pieza 2 con los soportes después de haber salido del proceso de limpieza tras la impresión.



Figura 6.29. Fotografía de la otra parte de la pieza 2 después de haber salido del proceso de limpieza tras la impresión. En esta imagen se puede apreciar en la parte derecha de la pieza el desplazamiento de las capas.

Ambas partes se sometieron al proceso de debinding, tras el cual, se obtuvieron los resultados mostrados en las Figura 6.30 y Figura 6.31.



Figura 6.30. Fotografía de la base de la pieza 2 después de salir del horno de debinding y antes de eliminar los soportes de la pieza.



Figura 6.31. Fotografía de la otra parte de la pieza 2 tras salir del horno de debinding.

Como se puede apreciar en la Figura 6.30, en este caso decidimos no eliminar los soportes hasta después del debinding. A diferencia que, en el caso anterior, se pudo comprobar que la eliminación de los soportes es mucho más sencilla en este punto, disminuyendo en gran medida la posibilidad de dañar la pieza al conseguir una rotura más limpia de los soportes siguiendo las marcas que se habían diseñado. En este caso tampoco se eliminaron los restos de los soportes de la pieza.

En la Figura 6.31 puede apreciarse el desplazamiento de las capas producido durante la impresión al no estar esta parte de la pieza pegada a la cama de impresión.

Finalmente, la pieza fue introducida en el horno de sinterizado, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 6.32 y en la Figura 6.33.



Figura 6.32. Fotografía de la base de la pieza 2 impresa con soportes tras haber finalizado el proceso de sinterizado.



Figura 6.33. Fotografía de la otra parte de la pieza 2 impresa con soportes tras haber finalizado el proceso de sinterizado.

### 6.1.2.4 Inspección de la pieza 2 impresa con soportes.

Al igual que en la pieza 1, en esta pieza analizaremos la influencia de los soportes en la parte de la base de la pieza 2 impresa con soportes. En esta pieza, el resultado de añadir los soportes se puede comprobar en la Figura 6.34.

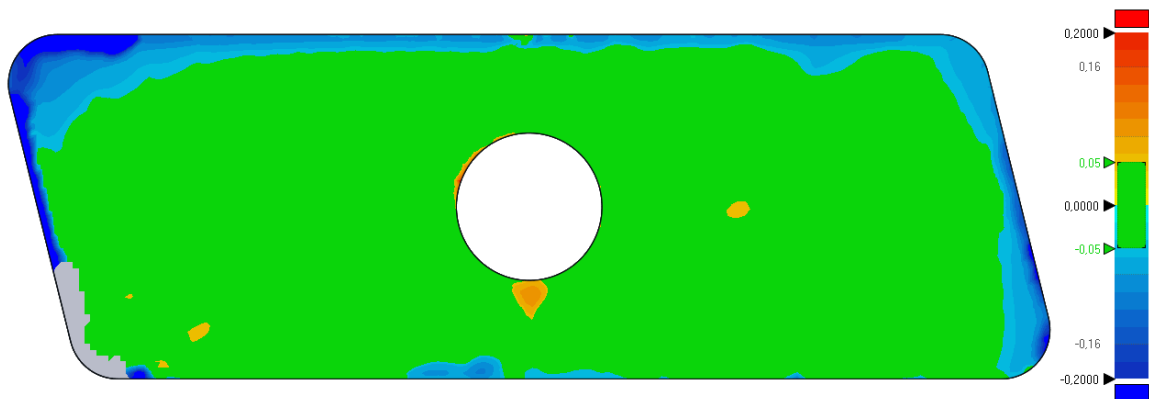


Figura 6.34. Imagen de la comparación 3D, realizada en Geomagic Control X, de la base de la pieza 1 en la que se puede comprobar el efecto de los soportes añadidos.

Gracias a los soportes el efecto curling se ha visto reducido en gran medida, ya que como se puede ver en la Figura 6.34, la mayor parte de la base de la pieza se encuentra comprendida en el rango de  $\pm 0,05$  mm de desviación con el CAD. Tomando los mismos 4 puntos en la base de la pieza 2 impresa con soportes, tal y como se puede ver en la Figura 6.35, se puede realizar una comparativa similar a la realizada en la pieza 1.

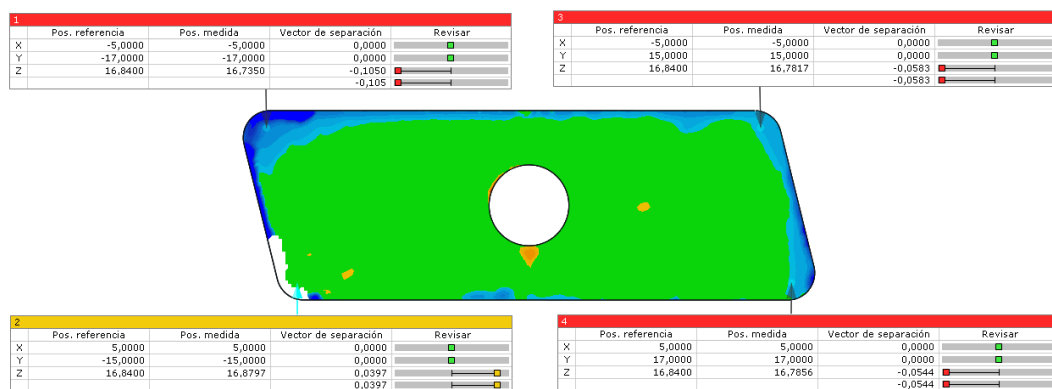


Figura 6.35. Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la base de la pieza 2 impresa con soportes.

De esta forma, podemos comprobar que los soportes han vuelto a cumplir su función con una gran eficacia, siendo en este caso mucho más notable que en el caso anterior. Estos resultados pueden comprobarse en la Figura 6.36.



Figura 6.36. Gráfico comparativo de las desviaciones producidas por el efecto curling en la pieza fabricada sin soportes, con las producidas en la pieza fabricada con soportes.

### 6.1.3 REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 3 Y PARA LA PIEZA 4.

En el caso de las piezas 3 y 4 nos encontramos con 2 placas de dimensiones idénticas realizadas con el objetivo de realizar un ensayo posterior de recubrimiento con metales. Como se tratan de dos placas rectangulares con forma alargada, con unas dimensiones de 65x30x4 mm antes del sinterizado, es totalmente necesaria la aplicación de soportes en la mismas para evitar el levantamiento de sus esquinas. En cuanto a su diseño, la diferencia principal entre ambas se encuentra en que la pieza 3 consiste en una placa normal, mientras que en la pieza 4, esta se encuentra perforada por diversos agujeros de distinto de tamaño. El diseño de ambas placas puede ser observado en la Figura 6.37.

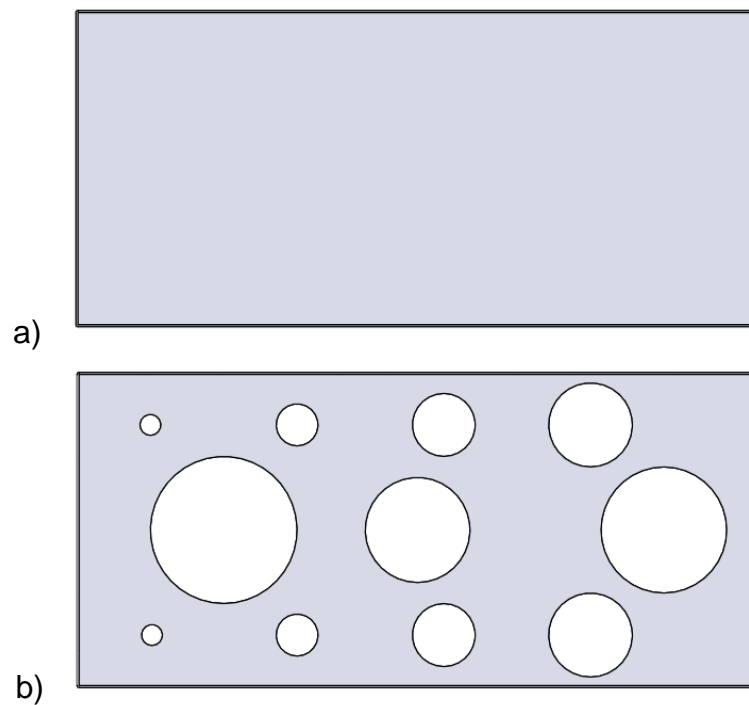


Figura 6.37. a) Imagen del CAD de la placa correspondiente a la pieza 3; b) Imagen del CAD de la placa correspondiente a la pieza 4 en la que se pueden observar los diferentes orificios que presenta.

#### 6.1.3.1 Diseño de los soportes para las piezas 3 y 4.

Los soportes que empleamos en esta pieza eran iguales a los empleados en la pieza 1. Sin embargo, tras comprobar los problemas que estos presentaban, se decidió realizar unas modificaciones a los valores de los parámetros de su diseño. De esta forma, para intentar evitar la rotura de los soportes durante el proceso de limpieza, se aumentó el espesor de los soportes, pasando de 0,8 mm a 1 mm, no aumentando más el mismo debido al bajo espesor de la propia pieza. Además, también se modificó ligeramente los valores de las dimensiones de las marcas de rotura de los soportes, separándolas un poco más de la pieza y haciendo estas marcas un poco más grandes, tal y como se puede comprobar en la Figura 6.38.

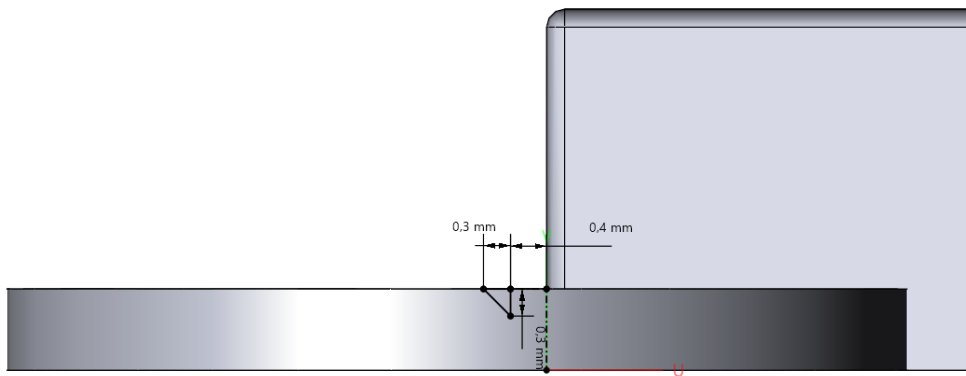


Figura 6.38. Representación de las dimensiones geométricas de las marcas para la eliminación de los soportes de la pieza 3 y de la pieza 4.

Finalmente, ambas piezas se pueden observar con los soportes ya diseñados en la Figura 6.39.

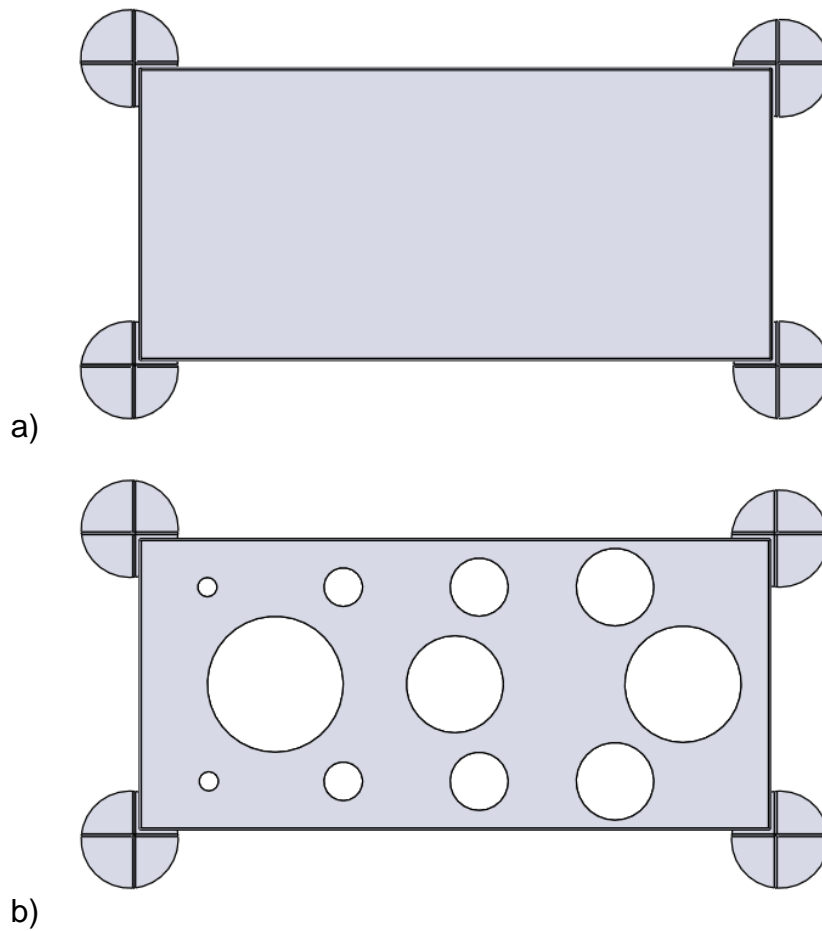


Figura 6.39. a) Imagen de la pieza 3 con los soportes ya añadidos; b) Imagen de la pieza 4 con los soportes ya añadidos.



### 6.1.3.2 Impresión de las piezas 3 y 4.

Tras realizar el proceso de impresión y haber limpiado las piezas, se pudo comprobar que, a pesar de haber puesto los soportes, ambas piezas se habían levantado por las esquinas. Este fenómeno era más apreciable en la pieza 4 que en la pieza 3, lo cual puede deberse a los orificios que presenta. Este levantamiento de las esquinas de la pieza implica que los soportes diseñados no han sido apropiados para la pieza, por lo que necesitan ciertas modificaciones para así poder cumplir su cometido. Entre las posibles modificaciones que podemos realizar para lograr este objetivo, nos encontramos con el aumento del tamaño de los mismos, aumentando de esta forma el radio de 5 mm de estos soportes a un valor superior, teniendo en cuenta que los soportes no pueden tocarse entre sí. Otra posible solución para este problema es la introducción de 2 soportes más, colocados cada uno de ellos en el punto medio de los lados cortos de la placa, situados entre los soportes originales. No obstante, ninguno de estos posibles enfoques a solucionar este problema ha sido probados debido a la falta de material para poner la máquina en funcionamiento.

En cuanto a las piezas obtenidas, estas pueden ser observadas en la Figura 6.40, tras haberse realizado el proceso de limpieza de las mismas. Como puede observarse en esta imagen, a pesar de haber introducido las modificaciones anteriormente citadas al diseño de los soportes, la mayoría de los soportes se rompieron durante el proceso de limpieza de las piezas, provocando así defectos en las mismas debidos la rotura de parte de la esquina de la pieza al romperse el soporte. Esto implica que habría que volver a modificar las dimensiones de los soportes y de las marcas de los mismos, para evitar su rotura durante el proceso de limpieza de la pieza.



Figura 6.40. Fotografía de las piezas 3 y 4 después de haber salido del proceso de limpieza tras finalizar la impresión.

Tras haberse realizado la limpieza de ambas piezas y haberse secado, se introducen en el horno de debinding. Tras lo cual se realiza la eliminación de los soportes restantes y se procede al lijado de las marcas, apreciables en la Figura 6.41, que estos han dejado en la pieza mediante el lijado de las mismas. Para este lijado se han empleado una lija de grado 1200 y otra de grado 2500 para lijado de estas marcas, empleando la primera de ellas para la eliminación de la mayor parte de material y la segunda para el acabado. Tras haber lijado estas marcas obtenemos un resultado como el mostrado en la Figura 6.42.



Figura 6.41. Fotografía de la pieza 3 después del proceso de debinding en la que se pueden apreciar las marcas que dejan los soportes tras su retirada.



Figura 6.42. Fotografía de la pieza 3 después del lijado de las marcas que dejan los soportes tras su eliminación.

Por último, solo quedaría introducir ambas piezas al horno de sinterizado, para así poder obtener las piezas finales, listas para realizar el ensayo para el que han sido diseñadas. Las piezas finales pueden ser observadas en la Figura 6.43.

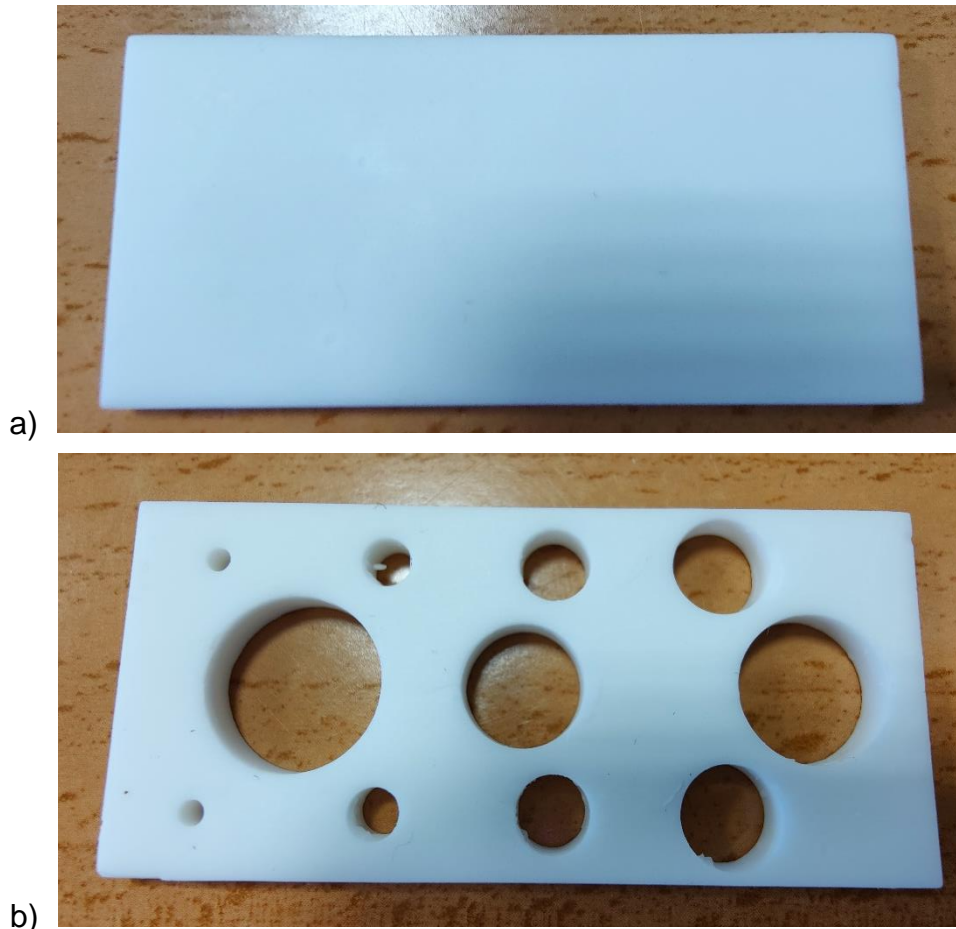


Figura 6.43. a) Fotografía de la pieza 3 tras haber salido del horno de sinterizado; b) Fotografía de la pieza 4 tras haber salido del horno de sinterizado.

### 6.1.3.3 Inspección de las piezas 3 y 4.

En el caso de estas 2 piezas, como se imprimieron directamente con soportes, no se pueden comparar con casos anteriores. No obstante, mediante su inspección con el software Geomagic Control X se puede conocer si los soportes han cumplido su tarea para evitar la aparición del efecto curling.

En el caso de la pieza 3 a pesar de haber empleado soportes, no se ha evitado la aparición del efecto curling. No obstante, las desviaciones dimensionales producidas por este fenómeno no son tan importantes como las producidas en los casos anteriores de las piezas impresas sin soportes, a pesar de ser esta pieza de un tamaño mayor. Como se puede observar en la Figura 6.44, los errores del efecto curling se localizan principalmente en las esquinas y en el centro de la pieza.

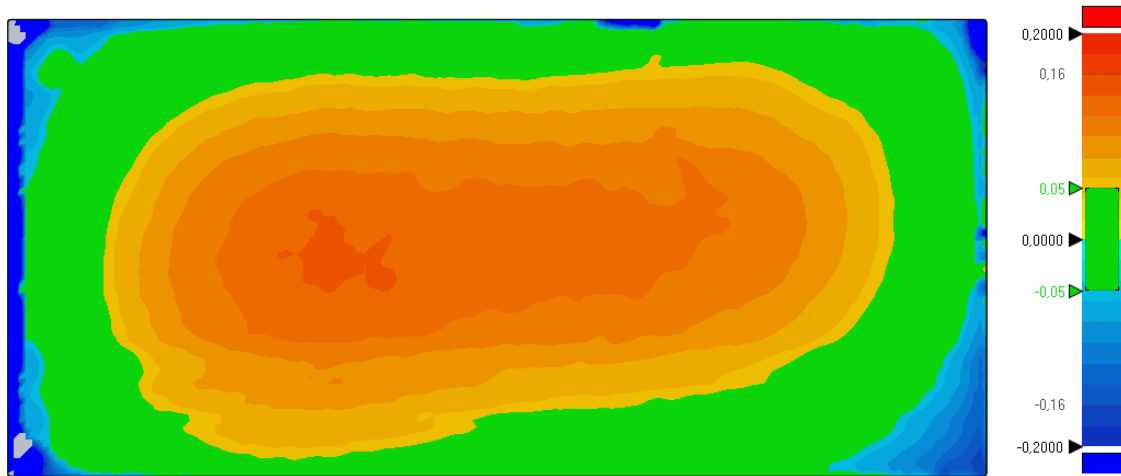


Figura 6.44. Imagen de la comparación 3D realizada en Geomagic Control X de la pieza 3.

Tanto en las esquinas como en el centro, estas desviaciones se encuentran en torno a 0,1 mm, siendo negativas en las esquinas y positivas en la zona central, tal y como puede comprobarse en la Figura 6.45.

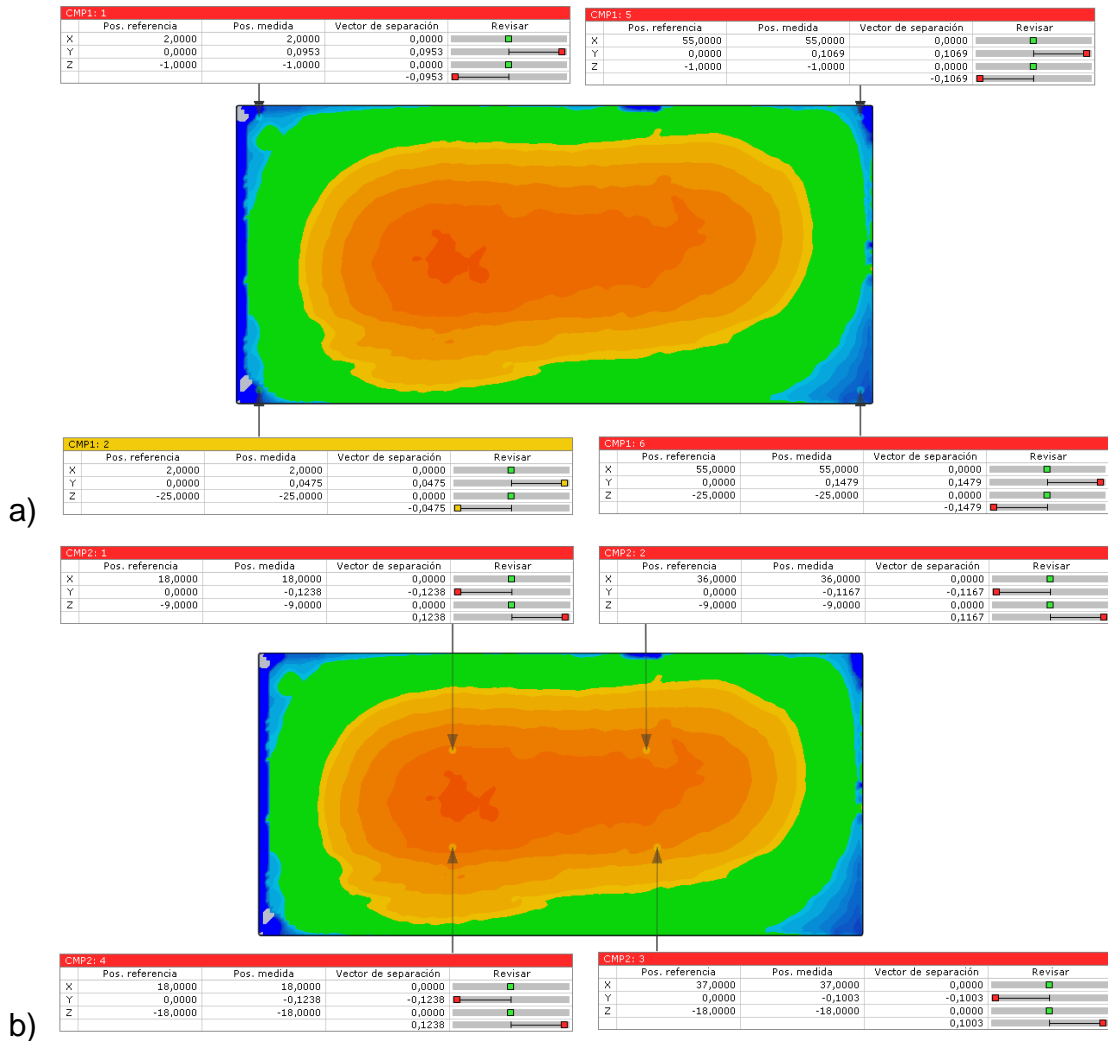


Figura 6.45. a) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en las esquinas de la pieza 3 mediante el software Geomagic Control X; b) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en la parte central de la pieza 3 mediante el software Geomagic Control X.

En el caso de la pieza 4, los errores dimensionales debidos al efecto curling presentan una menor magnitud que en el caso de la pieza 3. Esto puede deberse a los orificios presentes en ella, que tienen forma circular. La magnitud de estas desviaciones puede apreciarse en la Figura 6.46.

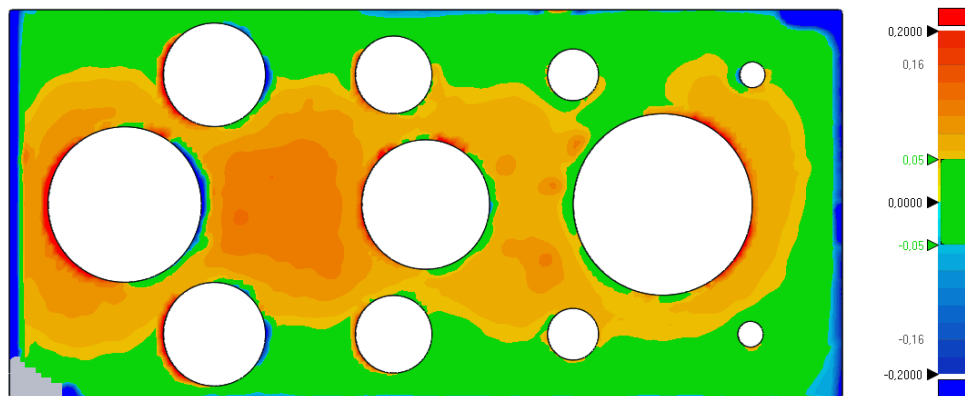


Figura 6.46. Imagen de la comparación 3D de la base de la pieza 4 realizada con el software Geomagic Control X.

En este caso no se realizará la comparación en las esquinas por los daños producidos en las mismas al retirar los soportes. No obstante, la magnitud de estas desviaciones en la zona central de la pieza puede ser apreciada en la Figura 6.47.

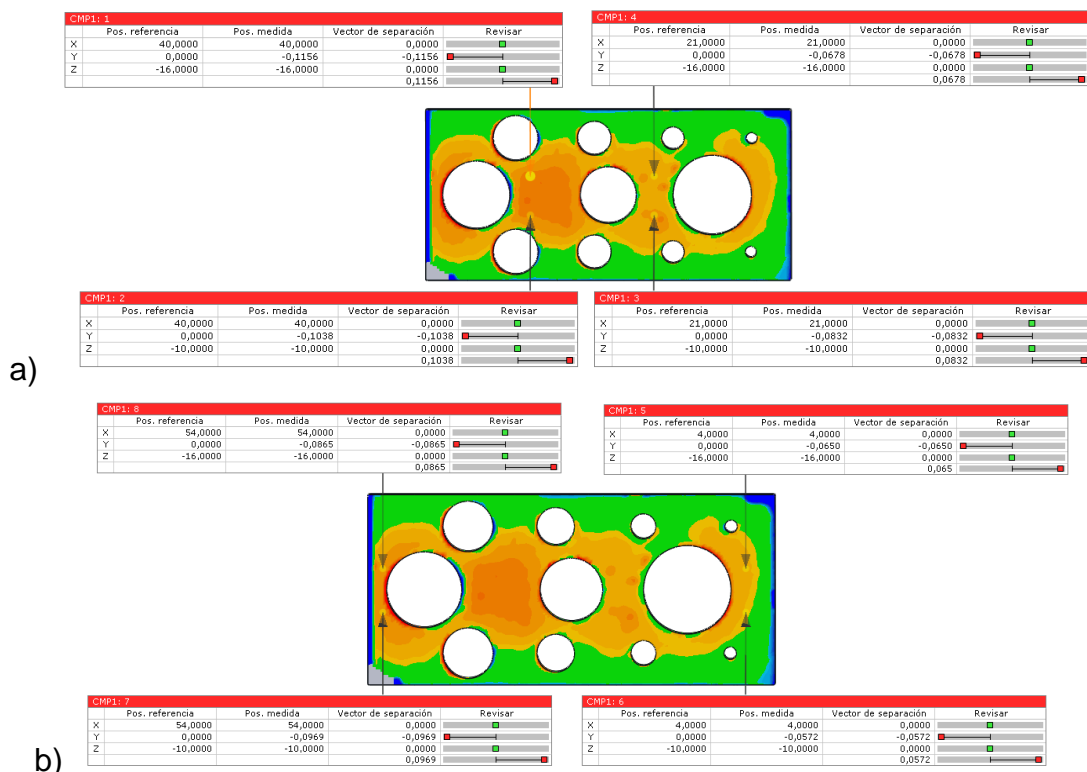


Figura 6.47. a) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en la zona central de la pieza 4 mediante el software Geomagic Control X; b) Resultados obtenidos en los puntos de comparación situados en los bordes de la zona central de la pieza 4 mediante el software Geomagic Control X.

## **6.2 SOPORTES SIN CONTACTO.**

Este tipo de soportes se caracteriza principalmente porque no existe contacto directo de los mismos con la pieza. Esto implica que su eliminación tras la impresión es muy sencilla y disminuye prácticamente en su totalidad la posibilidad de producir daños en la pieza. El hecho de que estos soportes no requieran de un contacto directo con la pieza reside en la gran viscosidad de la pasta empleada para su fabricación, ya que entre el soporte y la pieza fabricada existe una fina capa de pasta, entorno a los 0,3 mm de espesor, la cual resiste los esfuerzos producidos durante el proceso de fabricación.

No obstante, a diferencia de la simpleza del tipo de soportes anterior, este tipo de soportes requiere un diseño más cuidado, ya que este se tiene que adaptar a la pieza en cuestión. Además, también es muy importante tener en cuenta la orientación de la pieza, así como el diseño del propio soporte para consumir la menor cantidad posible de material, ya que al final, todo el material empleado en la fabricación del soporte corresponde con material que ya no se puede reutilizar, es decir, material desechado.

Teniendo todo esto en cuenta, en este apartado se procederá a diseñar diversos soportes para diferentes piezas con el objetivo de solucionar problemas que han surgido durante su fabricación sin los mismos, o permitir la fabricación de algunos tipos de piezas que sin ellos no serían posibles. Además, también se buscará una cierta optimización de los mismos, dentro de los límites que permite el propio material de fabricación, para reducir el consumo de pasta en la realización de los soportes.

### **6.2.1 REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 5.**

En el caso de la pieza 5, esta consiste en una especie de pequeño recipiente, tal y como se puede comprobar en la Figura 6.48.





Figura 6.48. Imagen del CAD de la pieza 5.

Esta pieza ya había sido impresa anteriormente, sin embargo, la pieza resultante presentó un defecto por el desplazamiento de sus capas, el cual se puede apreciar fácilmente a simple vista, especialmente en la parte superior de la misma, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.49.



Figura 6.49. Fotografías de la pieza 5 impresa sin soportes tras haber finalizado todo el proceso de fabricación.

Uno de los posibles motivos por los que este defecto se ha producido puede encontrarse en el pequeño espesor de las paredes de la pieza, el cual es de tan solo 2 mm en la parte superior de la misma, y como no existe un soporte que realice una función de protección de la pieza ante los esfuerzos provocados por las cuchillas durante su paso para distribuir la pasta y nivelarla, es la propia pieza la

encargada de resistir estos esfuerzos. Por tanto, este desplazamiento de las capas se debe principalmente a que la pieza no es capaz de soportar los esfuerzos provocados por las cuchillas. Además, debido a la ausencia de un soporte, también se puede comprobar como la pieza también se ha achatado, ya que, presenta un cierto ángulo con la vertical el cual no pudo ser soportado por el resto de la pasta que no forma parte de la pieza.

#### **6.2.1.1 Diseño de los soportes de la pieza 5.**

Viendo los defectos producidos en la pieza 5 impresa sin soportes, se puede concluir que el soporte diseñado para esta pieza ha de tener la función de soportar los esfuerzos producidos durante las funciones de esparcimiento y nivelación de la pasta para evitar el desplazamiento de las capas de la pieza.

Para el diseño de este soporte emplearemos las funciones de operaciones booleanas con el objetivo de realizar un soporte que se adapte perfectamente a la geometría de la pieza. No obstante, también hay que tener en cuenta que el soporte ha de presentar una cierta separación de la propia pieza para evitar que ambas partes se unan durante el proceso de impresión.

De esta forma, comenzaremos el proceso de diseño del soporte realizando una copia de la pieza para así poder escalarla. No obstante, hay que tener cuidado al realizar un escalado de la pieza, ya que la separación entre la pieza y el soporte no será uniforme en todas las dimensiones. Por tanto, solo es recomendable realizar este proceso para piezas donde las diferencias entre las dimensiones no son muy grandes, y siempre tener en cuenta para realizar el escalado de la pieza las dimensiones más críticas de la misma.

Teniendo esto en cuenta y habiendo realizado una copia de la pieza desde el árbol de modelo del software Geomagic Design X, procederemos a realizar el escalado de la copia de la pieza mediante la función “Transformar cuerpo”, la cual puede ser observada en la Figura 6.50, localizada en la pestaña de modelo y dentro del grupo de herramientas “Cara/Cuerpo”.

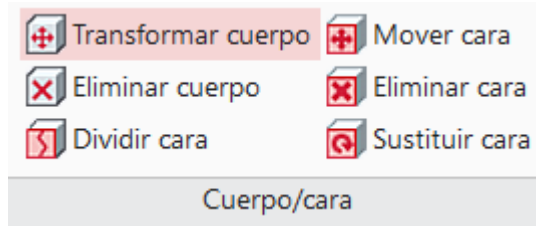


Figura 6.50. Imagen del grupo de herramientas “Cuerpo/cara” de en la que se encuentra la función de “Transformar cuerpo” del software Geomagic Design X.

Dentro de esta función y una vez seleccionado el cuerpo a transformar nos saldrá un cuadro de diálogo como el que se muestra en la Figura 6.51. Dentro de este cuadro de diálogo seleccionaremos la opción de escalar, dentro de la cual nos encontramos que podemos realizar un escalado uniforme, o en caso contrario, especificar una escala diferente para cada uno de los tres ejes del espacio.



Figura 6.51. Imagen del cuadro de diálogo de la opción “Transformar cuerpo” para realizar el escalado de la copia de la pieza en el software Geomagic Design X.

En el caso de esta pieza, como es una pieza con una geometría relativamente sencilla y en la que las dimensiones que afectan al diseño del soporte son bastante

similares entre sí, realizaremos un escalado uniforme de la misma. En cuanto a la escala empleada para ello corresponderá con un aumento de 1,03 de las dimensiones de la pieza original. El cálculo de esta escala resulta bastante sencillo, ya que solo hay que emplear la dimensión más crítica de la pieza para ello, en este caso el diámetro de la circunferencia exterior de la parte inferior de la pieza, el cual es de 12 mm. En este caso, esta dimensión corresponde con la más pequeña de las que se ve afectada por el empleo del soporte. Finalmente, el cálculo de la escala se reduce a realizar una simple división entre este valor más la separación mínima recomendada, en este caso de 0,3 mm, entre este valor.

Una vez que tenemos ya el escalado de la copia de la pieza realizado, procederemos al diseño del propio soporte. En primer lugar, diseñaremos la geometría básica del soporte, que, en este caso, debido a la geometría de la pieza, se ha decidido que tenga una forma cilíndrica. De esta forma, realizaremos un cilindro con la misma altura de la pieza y con un diámetro ligeramente superior, siendo en este caso de 31 mm frente a los 28 mm de la pieza en su diámetro máximo. Una vez que hemos diseñado este cilindro, procederemos al diseño del propio soporte, para lo cual emplearemos la operación booleana de corte. Esta operación se encuentra dentro de la pestaña “Modelo” y dentro del grupo de operaciones de “Editar”, como se puede ver en la Figura 6.52.

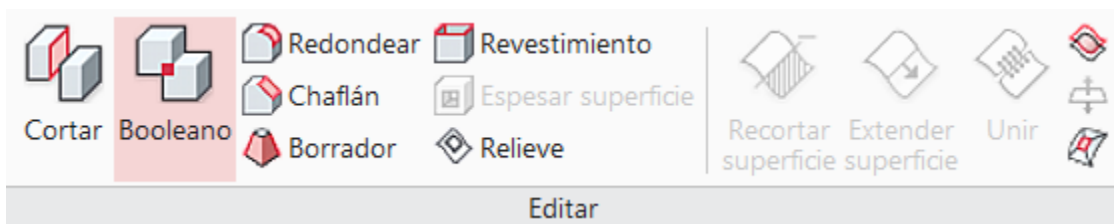


Figura 6.52. Imagen del grupo de herramientas “Editar” en la que se encuentra la opción de operaciones booleanas, empleadas para el diseño del soporte, en el software Geomagic Design X.

Dentro de esta opción se abrirá un cuadro de diálogo, tal y como se muestra en la Figura 6.53, en el que seleccionaremos la opción de cortar. Tras seleccionar esta opción, se ha de indicar cual será la herramienta para realizar el corte, en este caso

la copia escalada de la pieza, y el cuerpo sobre el que se realizará el corte, en este caso el cilindro realizado.



Figura 6.53. Imagen del cuadro de diálogo de la opción de operaciones booleanas en el software Geomagic Design X.

Tras esto tendremos el soporte finalizado, tal y como se puede comprobar en la Figura 6.54.

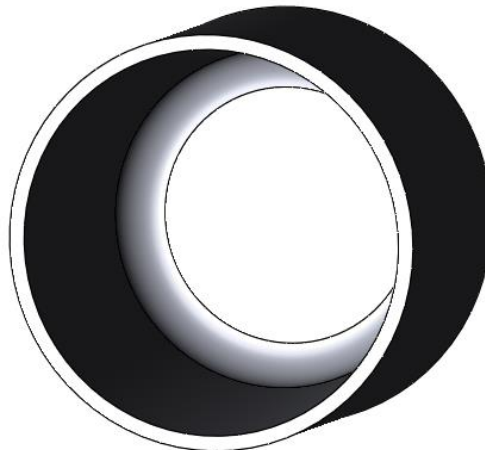


Figura 6.54. Imagen del CAD del soporte empleado para la fabricación de la pieza 5.

Una vez realizado el soporte, solo queda comprobar el ajuste del mismo con la pieza y de esta forma, comprobar que existe separación suficiente entre ambos para evitar su unión. Este ajuste puede ser observado en la Figura 6.55.

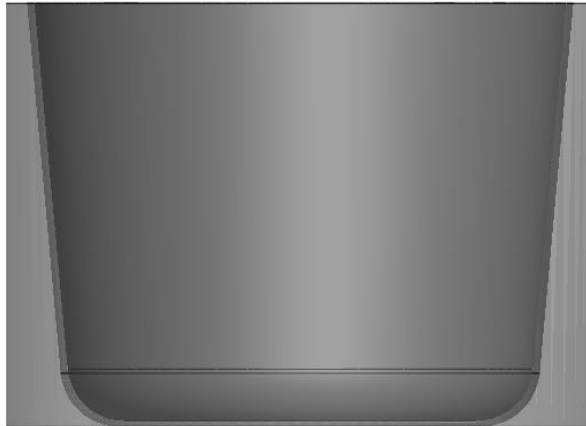


Figura 6.55. Imagen del CAD de la pieza 5 con el soporte aplicado en la posición en la que la pieza será impresa. En esta imagen se puede apreciar el espacio que existe entre el soporte y la pieza, para evitar así su unión.

Tras esto, ya tendríamos la pieza con el soporte lista para extraer su archivo .STL para comenzar con el proceso de impresión.

No obstante, este ha sido un planteamiento para realizar un soporte exterior para la pieza, pero en este caso también se podría haber realizado un soporte interior, realizando el mismo procedimiento, y teniendo en cuenta que la orientación de la pieza en la impresión debería invertirse.

Teniendo esto en cuenta, para realizar el soporte interior seguiremos los mismos pasos que realizamos anteriormente. En primer lugar, escalaremos una copia de la pieza, con la diferencia, de que en este caso no realizaremos una escala de aumento, si no que buscaremos disminuir el tamaño de la pieza. En este caso, la dimensión más crítica corresponde con el redondeo de 10 mm de radio de la parte inferior del orificio de la pieza. Con esto podemos concluir que la escala a emplear es de 0,97. Tras esto, al igual que en el caso anterior, realizaremos un cilindro con un diámetro 0,3 mm inferior a la dimensión más grande del orificio y volveremos a realizar de igual forma una operación booleana de corte. Dando lugar al soporte inferior que puede ser observado en la Figura 6.56.

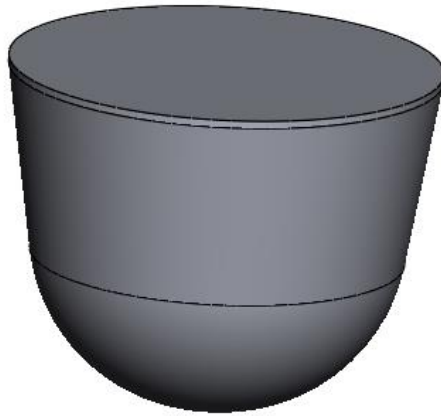


Figura 6.56. Imagen del CAD del soporte interior para la fabricación de la pieza 5.

Al igual que en el caso anterior, es necesario comprobar el ajuste de este soporte con la pieza y ver que existe una separación entre ambos, tal y como se puede comprobar en la Figura 6.57.

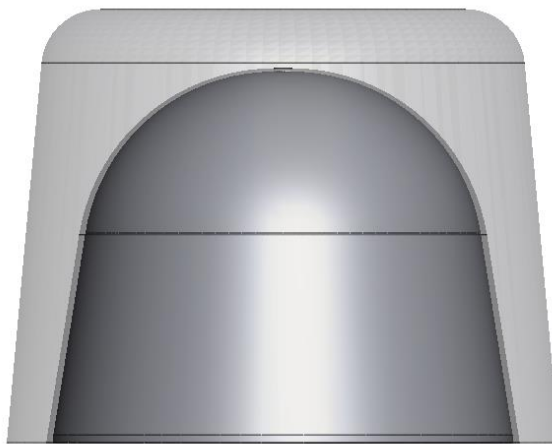


Figura 6.57. Imagen del CAD de la pieza 5 con el soporte interior aplicado en la posición en la que la pieza sería impresa. En esta imagen se puede apreciar el espacio que existe entre el soporte y la pieza, para evitar así la unión entre ambas partes.

El hecho de emplear un soporte u otro, reside principalmente en la cantidad del material empleado para su realización, así como de otros factores que pueden afectar al proceso de impresión, como, por ejemplo, la superficie en contacto con la cama de impresión, ya que si no es lo suficientemente grande puede dar lugar a

la aparición de problemas como que la pieza se despegue de la cama. En el caso de esta pieza se decidió emplear el soporte exterior por el simple motivo de que el volumen de material empleado para su fabricación era menor, siendo este 4550,71 mm<sup>3</sup> frente a los 5589,74 mm<sup>3</sup> del soporte interior.

#### 6.2.1.2 Impresión de la pieza 5 con soportes.

En el caso de la impresión de esta pieza, como se imprimió junto a la pieza 2, también se vio afectada por la parada de la máquina, sin embargo, en este caso afectó principalmente a la base del soporte, por lo que, a simple vista, la pieza no se veía afectada. La separación del soporte en dos partes, así como la pieza tras la impresión y limpieza de los mismos pueden ser observados en la Figura 6.58. En esta figura, puede observarse la separación del soporte en dos partes, la base del mismo a la izquierda y el resto en el centro de la imagen. Por otro lado, en la Figura 6.59, podemos ver el ajuste de la pieza en el interior del soporte.



Figura 6.58. Fotografía en la que se puede apreciar la pieza 5 a la derecha de la imagen, mientras que en la parte izquierda nos encontramos con la base del soporte y en el centro el resto del soporte, tras haber finalizado su proceso de limpieza.





Figura 6.59. Fotografía en la que se puede apreciar el ajuste entre la pieza 5 y su soporte tras haber finalizado las labores de limpieza de ambos.

En cuanto al proceso de debinding, se decidió realizarlo con las piezas introducidas en el interior de los soportes, para así reducir las posibles deformaciones durante ese proceso. Una vez finalizado este proceso, la pieza y su soportes son sacados del horno, pudiendo ser observados en la Figura 6.60. Sin embargo, la base del soporte se rompió durante la realización de este proceso, posiblemente debido a su pequeño espesor.

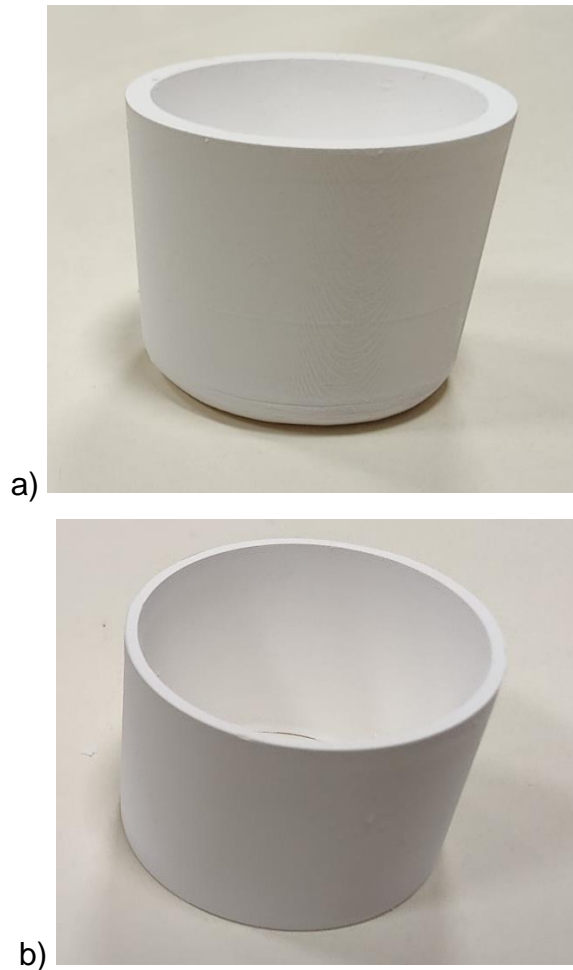


Figura 6.60. a) Fotografía de la pieza 5 tras haber realizado el proceso de debinding; b) Fotografía del soporte empleado para la fabricación de la pieza 5 tras haber realizado el proceso de debinding.

Finalmente, tanto la pieza como su soporte se introducen en el horno de sinterizado, no obstante, en este caso se introducen por separado, ya que, en este proceso se producen contracciones significativas que pueden provocar diversos problemas si la pieza se introduce en el interior del soporte. Esto pudo confirmarse tras finalizar este proceso, ya que ambas partes sufrieron considerables contracciones de forma que, a simple vista, era observable que su geometría se deformó durante este proceso, pasando de una forma circular a una ovalada, tal y como se puede observar en las Figura 6.61. Además, también se pudo comprobar que la pieza ya no entraba en el soporte, indicando de esta forma que la contracción sufrida por cada una de las partes no fue la misma.

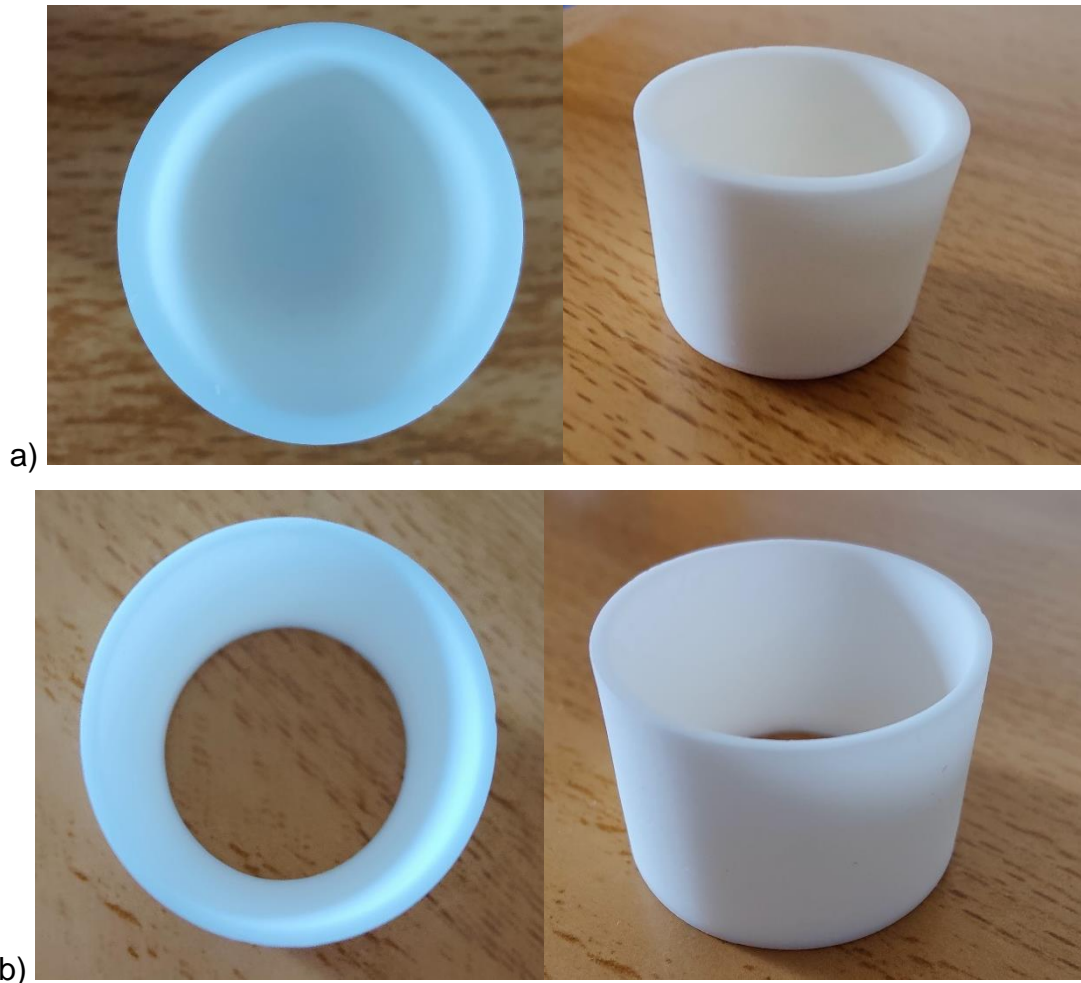


Figura 6.61. a) Fotografía de la pieza 5 tras haber salido del proceso de sinterizado. En la imagen de la izquierda se puede apreciar como la pieza 5 se encuentra achatada por los laterales; b) Fotografía del soporte empleado para la fabricación de la pieza 5 tras haber realizado el proceso de sinterizado. En la imagen de la izquierda se puede apreciar la deformación producida durante este proceso.

No obstante, cabe destacar un problema observado con el diseño del soporte, el cual reside en la base del mismo. Este problema se encuentra en la calidad superficial de la parte de la pieza que se encuentra encima de la base del soporte, tal y como se puede observar en la Figura 6.62. Una posible solución para este defecto se encontraría en eliminar la base del soporte, dejando así en contacto directo la base de la pieza con la cama de impresión. Evitando de esta forma las labores de rectificado posteriores necesarias para mejorar el acabado superficial de las piezas.



Figura 6.62. Fotografía de la pieza 5 tras el proceso de sinterizado en la que se puede apreciar la mala calidad superficial de la base de la pieza.

### **6.2.1.3 Inspección de la pieza 5 impresa con soportes.**

Debido a los grandes defectos que presenta la pieza 5 impresa sin soportes, no se ha realizado una comparativa entre ambas piezas, ya que la mejora de la pieza 5 impresa con soportes es fácilmente apreciable a simple vista.

La verificación de la pieza 5 impresa con soportes consistirá en comprobar cómo se ajusta esta pieza con respecto al CAD correspondiente a la pieza 5 final. Para ello, se volverá a emplear la herramienta de comparación 3D del Geomagic Control X. Empleando esta herramienta se obtienen los resultados mostrados en la Figura 6.63.

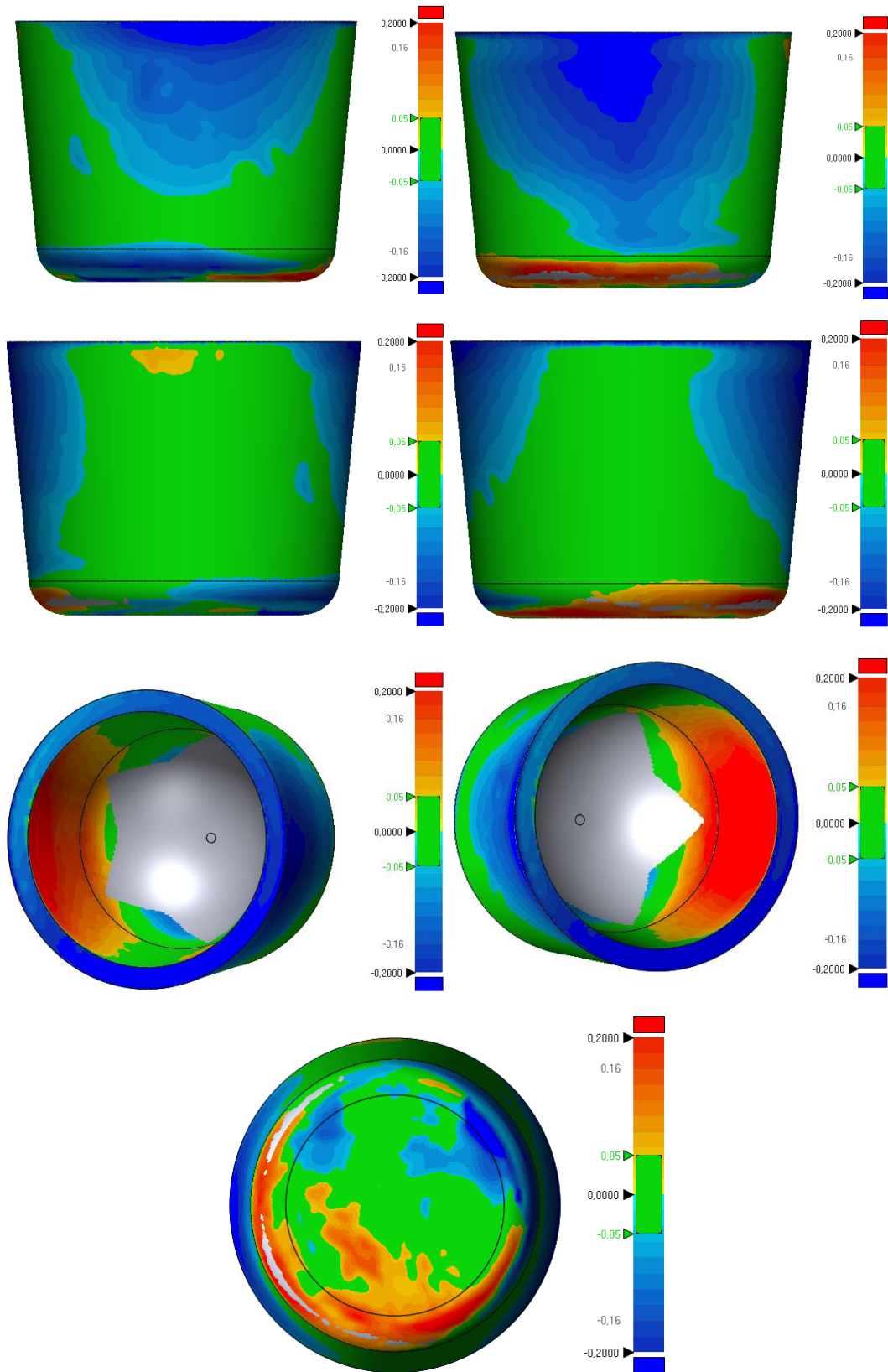


Figura 6.63. Imagen de la comparativa 3D de las diferentes vistas de la pieza 5 realizada en Geomagic Control X.

Como se puede comprobar en la Figura 6.63, la pieza ha sufrido una contracción significativa en dos de sus laterales, tal y como se había comprobado en el apartado anterior, al sacar la pieza del horno de sinterizado. A este defecto hay que sumarle también los derivados del mal acabado superficial de la base de la pieza 5.

#### **6.2.1.4 Optimización de los soportes de la pieza 5.**

Por otro lado, en el caso del soporte interior para la pieza 5, se pueden realizar una serie de optimizaciones para reducir el volumen de material empleado para su fabricación. Para realizar esta optimización nos basaremos en los soportes en forma de pilares empleados en otros tipos de fabricación aditiva. Para lograr este objetivo realizaremos una serie de cortes al soporte interior de esta pieza a lo largo del eje X y del eje Y, de forma que crearemos un soporte formado por un conjunto de columnas encargadas de soportar la pieza 5. En un primer lugar, se decidió realizar 8 cortes iguales de 1 mm de espesor en ambas direcciones, dando lugar a la primera optimización del soporte para la pieza 5. El diseño de estos cortes puede ser apreciado en la Figura 6.64. No obstante, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la pieza 8, los cuales son mostrados más adelante en el apartado 6.2.4 de este trabajo, se dejará una base que une a todas las columnas del soporte de 1 mm de espesor para así aumentar la superficie de contacto de las partes del soporte con la cama de impresión. De esta forma, se obtiene un soporte como el mostrado en la Figura 6.65.

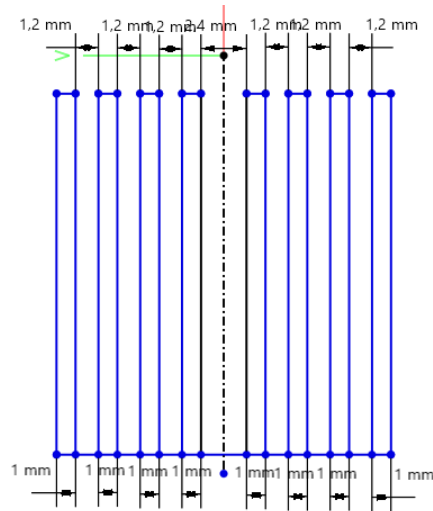


Figura 6.64. Imagen del boceto de los cortes realizados al soporte interior de la pieza 5 para reducir su volumen.

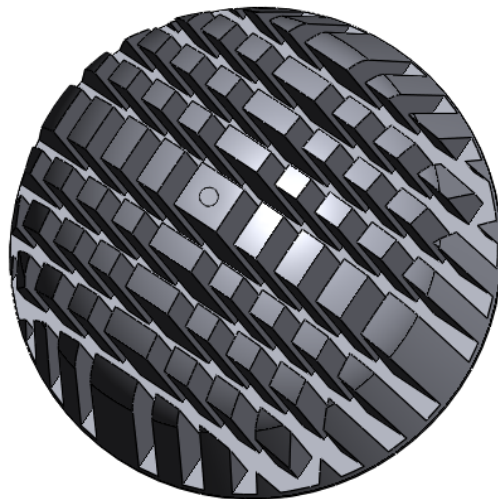


Figura 6.65. Imagen del CAD del soporte interior de la pieza 5 tras haber realizado la primera optimización para reducir su volumen.

Sin embargo, volviendo a tener en cuenta los resultados obtenidos en la pieza 8 y la geometría de la pieza 5, es posible que la primera optimización para este soporte no sea válida. Esto es así por el mayor tamaño de la pieza 5, lo que supone una mayor altura que se ha de soportar, a lo que se suma que el ángulo de la parte superior de la cavidad de la pieza 5 es de  $90^\circ$  con la vertical, el cual consiste en un ángulo más crítico que el de la pieza 8. Es por este motivo por el que se decide realizar otro soporte diferente al anterior, constando en este caso de 6 cortes a lo

largo del eje X e Y, dejando así, unas columnas de mayor espesor en la parte central del soporte. El diseño de estos cortes puede ser observado en la Figura 6.66. Este segundo planteamiento de la optimización del soporte interior de la pieza 5 puede ser observado en la Figura 6.67.

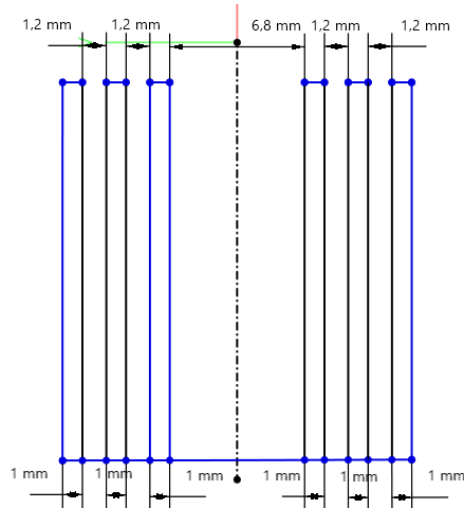


Figura 6.66. Imagen del boceto de los cortes realizados al soporte interior de la pieza 5 para reducir su volumen en el segundo planteamiento de su optimización.

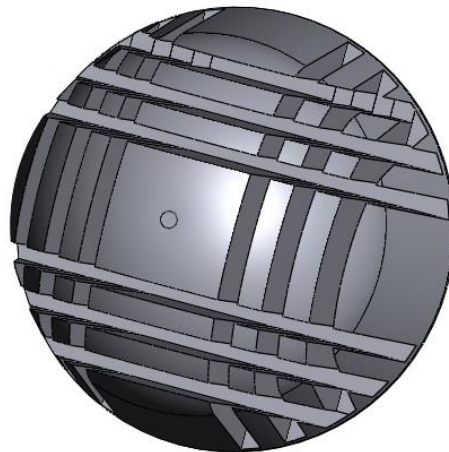


Figura 6.67. Imagen del CAD del soporte interior de la pieza 5 tras haber realizado la segunda optimización para reducir su volumen.

En ambos casos el volumen del soporte interior de la pieza 5 se ve reducido de forma significativa. En el primer planteamiento de esta optimización nos



encontramos con un volumen total del soporte de 2270,95 mm<sup>3</sup> de material necesario para su fabricación frente a los 5589,74 mm<sup>3</sup> del soporte original, lo que supone un volumen 2,46 veces menor. En el caso del segundo planteamiento de esta optimización, nos encontramos con un volumen de 3135,83 mm<sup>3</sup>, teniendo así un volumen 1,78 veces menor que con el soporte original. Como se puede comprobar en ambos casos, la reducción del volumen de material empleado para la fabricación de estos soportes es notablemente inferior a la del soporte interior original, e incluso también es inferior a la del volumen del soporte exterior con el que las piezas se fabricaron anteriormente, dando lugar así a un nuevo enfoque en cuanto a la fabricación de piezas de este tipo. No obstante, la eficacia de estos soportes no ha podido ser probada, al igual que en varios de los casos expuestos en este trabajo, debido a la falta del material necesario para la fabricación de las piezas, así como debido al gran coste de este material.

### **6.2.2 REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 6.**

El caso de esta pieza es muy similar al anterior, ya que los defectos producidos en la pieza 6 impresa sin soportes son muy similares a los producidos en el caso de la pieza 5 impresa sin soportes, ya que ambas piezas presentan geometrías relativamente similares, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.68. No obstante, en esta pieza el soporte cobra una mayor importancia que en el caso anterior, ya que su geometría es más compleja debido a los dientes que presenta en su parte externa, y, además, requieren de una mayor precisión debido a que se trata de un engranaje que ha de encajar con otro.

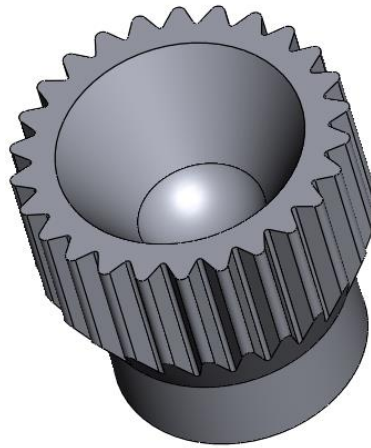


Figura 6.68. Imagen del CAD de la pieza 6.

Como ya se ha mencionado, la pieza 6 había sido impresa anteriormente sin el empleo de soportes, obteniendo una pieza con unos defectos muy importantes, tal y como puede comprobarse en la Figura 6.69. En la Figura 6.69 a) se puede apreciar de manera bastante notable el desplazamiento de las capas que también se había producido en la pieza 5 impresa sin soportes, aunque en este caso es mucho más significativo. También se puede apreciar la gran cantidad de muescas que presenta la pieza en la zona de los dientes de su parte exterior. Cabe destacar, como se muestra en la Figura 6.69 b), la aparición de una grieta a lo largo de la base de la pieza.



a)



b)

Figura 6.69. a) Fotografía de la vista superior de la pieza 6 impresa sin soportes tras haber finalizado el proceso de impresión; b) Fotografía de la pieza 6 impresa sin soportes tras haber finalizado el proceso de impresión.

#### 6.2.2.1 Diseño de los soportes para la pieza 6.

En relación al procedimiento a seguir para el diseño de este soporte, este tendrá un planteamiento idéntico al del caso anterior. De esta forma, se ha de volver a crear una copia de la pieza para poder realizar así un aumento de escala de la misma, que permita crear un soporte con la misma geometría de la pieza pero que

no entre en contacto directo con la misma. Como volvemos a estar frente a una pieza con dimensiones relativamente similares entre sí, volveremos a emplear una misma escala para los 3 ejes del espacio. El cálculo de esta escala será igual que en el caso anterior, así, cogeremos la dimensión más desfavorable de la pieza para el diseño del soporte, es decir, en este caso corresponde con el radio de la base la cual es de 7 mm, tal y como se puede comprobar en la Figura 6.70. De esta forma, sabiendo la separación mínima entre la pieza y el soporte podemos calcular fácilmente la escala, siendo esta finalmente de 1,04. Una vez calculada esta escala, al igual que en el caso anterior, diseñaremos la base del soporte, la cual, debido a la geometría de la pieza, vuelve a ser un cilindro, ya que es la geometría que mejor se adapta a la pieza. Por tanto, diseñaremos un cilindro con un radio ligeramente superior al máximo de la pieza, es decir, mayor que 10 mm en este caso. En este caso se ha empleado un radio de 11 mm para la creación del soporte.

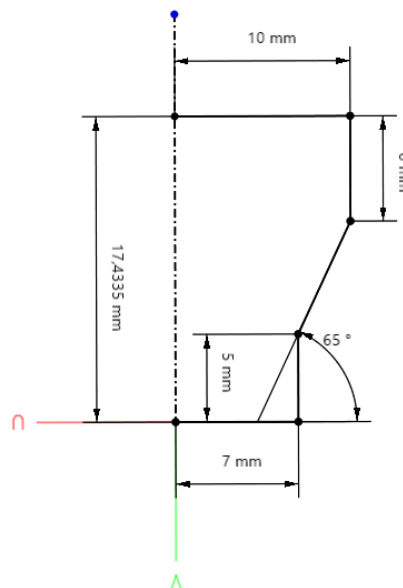


Figura 6.70. Imagen de las dimensiones geométricas exteriores de la pieza 6 antes de realizar el diseño de los dientes.

Una vez realizada la base del soporte, pasaremos a realizar el propio soporte en sí. Para ello seguiremos los mismos pasos que en el caso anterior, por lo que volveremos a emplear la operación booleana de corte, empleando la copia de la pieza con la escala ya aplicada como herramienta y el cilindro base del soporte

como cuerpo de destino. De esta manera, nos quedará un soporte como el que se puede observar en la Figura 6.71. Tras esto, solo quedará comprobar que existe una cierta separación entre la pieza y el soporte, tal y como se puede observar en la Figura 6.72, y finalmente extraer el archivo .STL para poder comenzar con el proceso de fabricación.

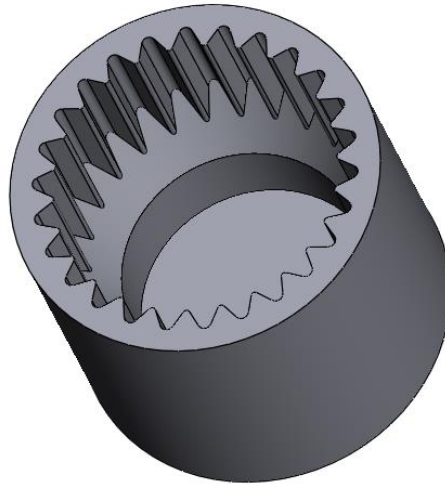


Figura 6.71. Imagen del CAD del soporte exterior empleado para la fabricación de la pieza 6.

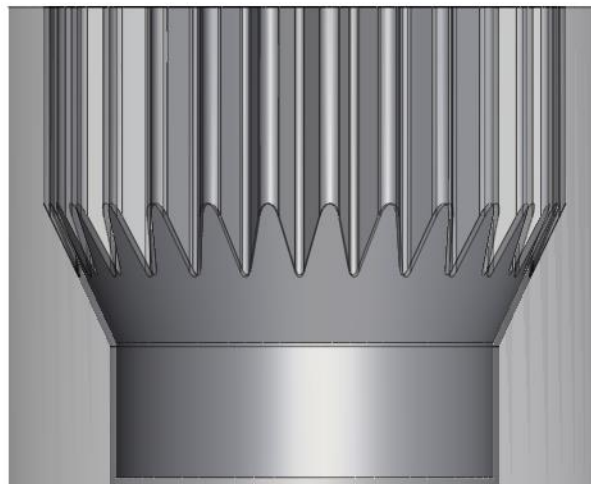


Figura 6.72. Imagen del CAD del ajuste entre la pieza 6 y el soporte exterior empleado para su fabricación en la que se puede apreciar el espacio entre ambos.

No obstante, al igual que en caso anterior, invirtiendo la orientación de la pieza verticalmente, podemos realizar un soporte interior para su impresión. Este soporte interior se diseñará de igual forma que todos los casos anteriores, dando lugar al soporte interior mostrado en la Figura 6.73.

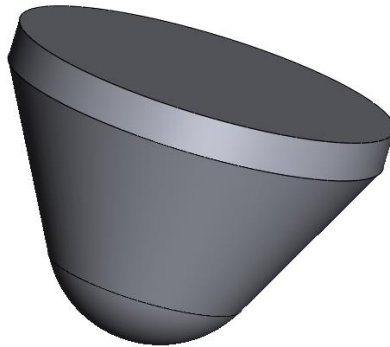


Figura 6.73. Imagen del CAD del soporte interior de la pieza 6.

No obstante, a pesar de que en este caso este soporte consume una menor cantidad de material que el primer tipo de soporte, se ha decidido emplear el primer tipo de soporte. El motivo de esta decisión radica en la importancia de los dientes de la pieza, ya que requieren una gran precisión para asegurar su posterior ajuste. Sin embargo, a pesar de que la impresión se realizó con la primera configuración mencionada, cabe destacar que existe un tercer enfoque en cuanto al diseño del soporte. Este tercer tipo de soporte se basa en el empleo de una combinación de los dos anteriores, logrando de esta forma una reducción de la cantidad del material empleado para la fabricación de la pieza. En este tercer tipo de soporte contamos con un soporte interno idéntico al diseñado anteriormente, al que se le suma una parte del soporte externo diseñado anteriormente. De esta forma, un soporte formado por 2 partes, tal y como se muestra en la Figura 6.74, teniendo así la configuración final de la pieza mostrada en la Figura 6.75.

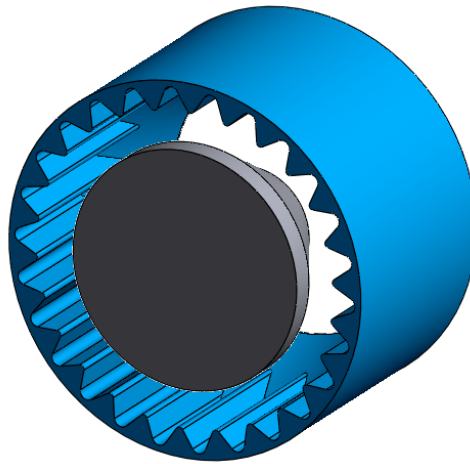


Figura 6.74. Imagen del CAD del tercer tipo de soporte de la pieza 6 en el que se puede observar en color azul la parte externa del soporte y en color gris la parte interna del mismo.

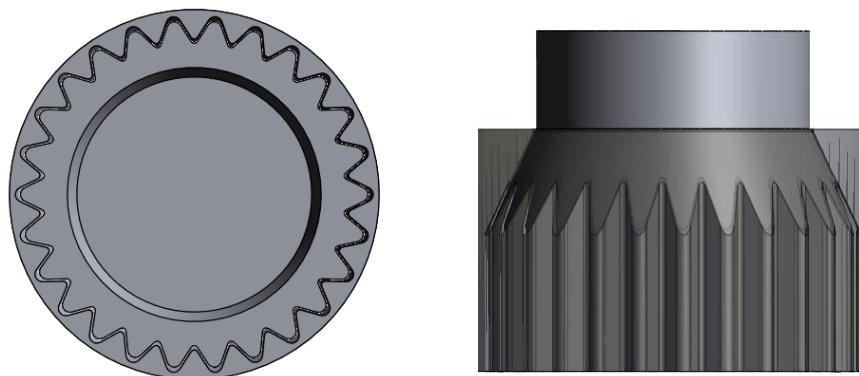


Figura 6.75. Imagen del CAD de la pieza 6 con el tercer tipo de soporte, en la que en la parte izquierda se puede comprobar la base del mismo que estaría en contacto con la cama de impresión y en la parte derecha la pieza 6 en la posición que se imprimiría con este soporte.

En el caso de este tercer tipo de soporte tenemos un volumen final de material necesario para la fabricación del mismo de  $1539,34 \text{ mm}^3$ , a diferencia de los  $2843,22 \text{ mm}^3$  necesarios para la fabricación del primer tipo de soporte. Sin embargo, este tipo de configuración no pudo ser probada por falta de material para su fabricación.

### 6.2.2.2 Impresión de la pieza 6 con soportes.

Una vez tomada la decisión de que soporte emplear, se procede con la impresión de la pieza, en la cual, al ser impresa junto a la pieza 2, nos encontramos con el mismo defecto debido a la parada de máquina. No obstante, esto no afecta a los dientes de la pieza, los cuales, como se puede apreciar en la Figura 6.76, no han sufrido ningún tipo de defecto aparente. En esta figura también se puede apreciar la parte principal del soporte, la cual se separó de su base en el proceso de impresión por el error de la máquina mencionado anteriormente. En la Figura 6.77 se puede observar la pieza en el interior del soporte, tal y como ha sido impresa.



Figura 6.76. Fotografía de la pieza 6 y de su soporte después de haber finalizado las labores de limpieza de ambos tras su impresión.



Figura 6.77. Fotografía de la pieza 6 en el interior de su soporte, colocados de igual forma a la que han sido impresos.



Tras el proceso de debinding, realizado con la pieza en interior del soporte para minimizar los posibles defectos producidos durante esta etapa, se pudo comprobar que la pieza seguía sin presentar ningún tipo de deformación apreciable a simple vista. Esto es apreciable en la Figura 6.78, en la cual se puede observar la pieza recién salida del horno de debinding.

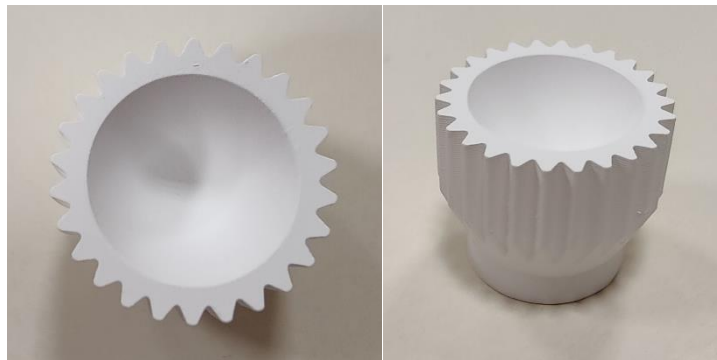


Figura 6.78. Fotografía de la pieza 6 tras haber salido del proceso de debinding.

No obstante, tras el proceso de sinterizado, al igual que en el caso de la pieza 2, se produjo una deformación de la misma la cual ya era apreciable a simple vista. Este defecto se debe a que la contracción de la pieza durante el proceso de sinterizado no es uniforme en los 3 ejes del espacio, tal y como se comentó anteriormente en este trabajo. La pieza final puede verse en la Figura 6.79.

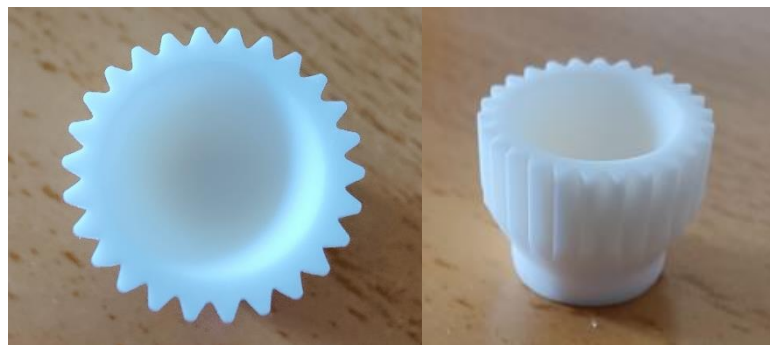


Figura 6.79. Fotografía de la pieza 6 tras haber finalizado el proceso de sinterizado.

### **6.2.2.3 Inspección de la pieza 6 impresa con soportes.**

Al igual que en el caso de la pieza 5, no se realizó ningún tipo de análisis de la pieza 6 impresa sin soportes, ya que los defectos presentes en esta pieza son lo suficientemente grandes como para que esto no sea necesario. En el caso de la pieza 6 impresa con soportes se pudo apreciar una gran mejoría con la salvedad de que al ser impresa junto con la pieza 2, también se separó de su base. No obstante, se realizará una comparativa del resto de la pieza con el CAD de la pieza 6 final para así comprobar el resultado obtenido mediante la adición de los soportes. Esta comparativa se puede ver en la Figura 6.80.

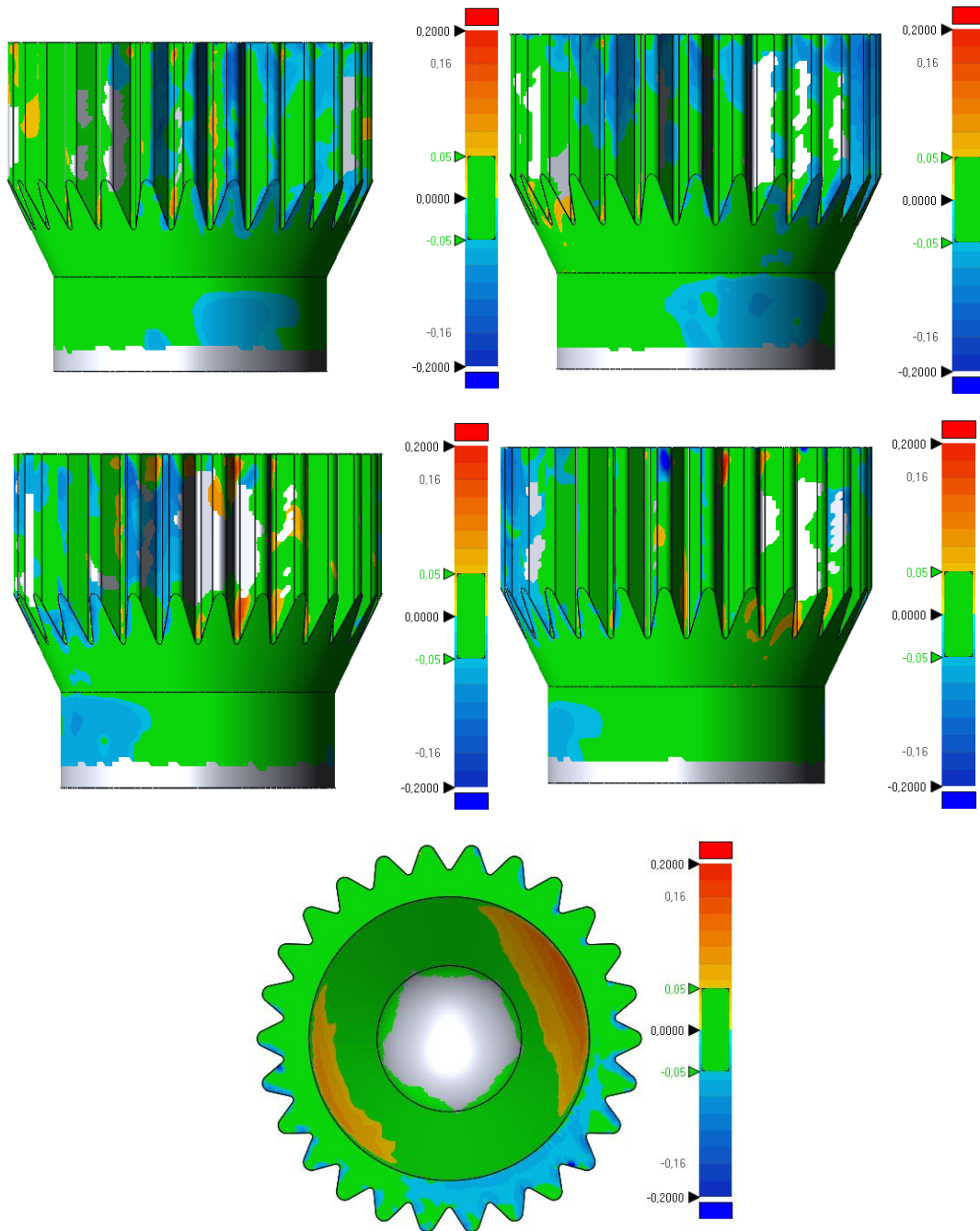


Figura 6.80. Imagen de la comparación 3D de las diferentes vistas de la pieza 6 realizada en Geomagic Control X.

En la Figura 6.80 se puede comprobar como la pieza presenta dos laterales opuestos en los que se produce una contracción de la misma, al igual que ocurrió con la pieza 5. Esta contracción también pudo ser observada tras el proceso de

sinterizado. El resto de la pieza se ajusta bastante bien al CAD, encontrándose dentro del rango de  $\pm 0,05$  mm.

### **6.2.3 REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 7.**

La pieza 7, la cual puede ser vista en la Figura 6.81 a), a diferencia de los dos casos anteriores, no había sido fabricada anteriormente, si no que esta sería la primera vez que se imprimiría. En relación al diseño de esta pieza nos volvemos a encontrar con otra pieza de revolución. No obstante, en este caso no se realizará su impresión en la orientación más favorable de la misma, sino que se realizará su impresión en la misma orientación que en la mostrada en la Figura 6.81 b). El motivo de este cambio de orientación reside en el estudio de la creación de soportes para piezas en las que la orientación más óptima suponga problemas similares a los de este caso, como puede ser el caso de la pieza mostrada en la Figura 6.82. Estos problemas residen en que como se puede ver en la Figura 6.81 b), existe una ranura en la pieza que impediría la extracción de los soportes en el caso de que fuesen creados de igual forma que los dos casos anteriores, ya que si fuesen iguales a los de estas piezas habría que romper estos soportes para lograr su extracción. Es por este motivo que se ha de buscar una forma en la que los soportes puedan ser extraídos de forma que no sea necesario romperlos, y así aprovechar al máximo las ventajas de los soportes sin contacto que este método de fabricación nos permite emplear.

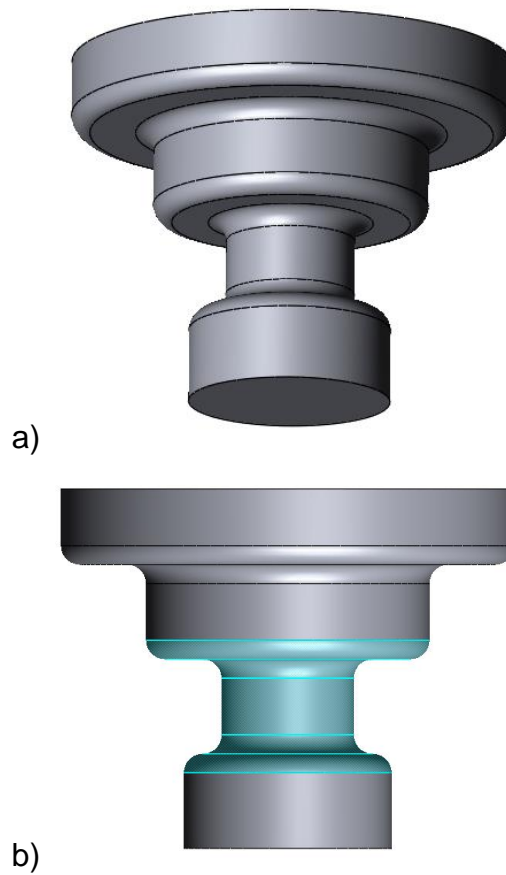


Figura 6.81. a) Imagen del CAD de la pieza 7; b) Imagen del CAD de la pieza 7 en la que se puede apreciar, marcado en azul, la zona de la pieza que impediría la extracción normal de un soporte como los diseñados anteriormente durante la limpieza de la pieza.

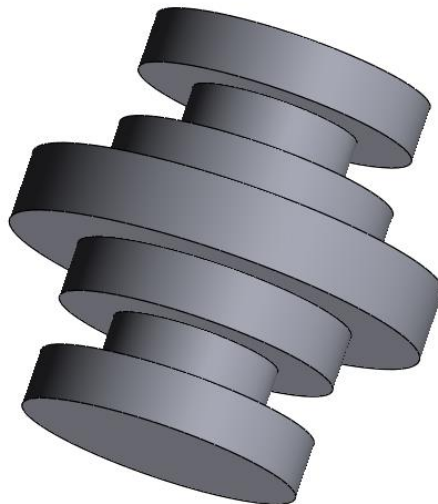


Figura 6.82. Imagen del CAD de una pieza en la que sería necesario diseñar un tipo de soporte diferente a los diseñados en los casos anteriores.

### 6.2.3.1 Diseño de los soportes para la pieza 7.

Teniendo todo esto en cuenta, se procederá a la creación del primer tipo de soporte, cuyo planteamiento será similar al de los casos anteriores, con la salvedad de que se encontrará dividido en 2 partes, para así facilitar su extracción. Además, debido a la sencilla geometría que presenta esta pieza, así como para lograr un mejor ajuste del soporte con la pieza, el soporte ha sido diseñado en su totalidad teniendo en cuenta las medidas de la pieza, mostradas en la Figura 6.83, y las distancias recomendadas por el fabricante. De esta forma, para la creación de este soporte no se empleará la operación booleana de corte, sino que se realizará el diseño del soporte de forma manual.

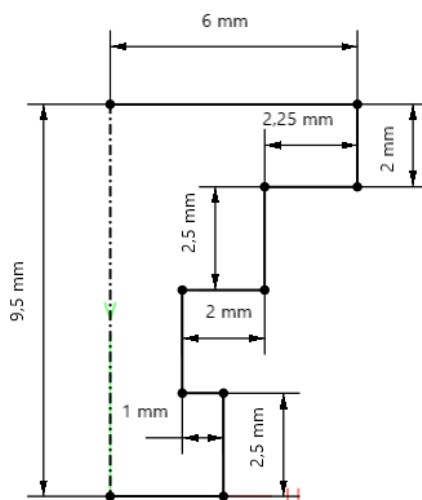


Figura 6.83. Dimensiones geométricas del boceto empleado para la revolución de la pieza 7.

Con esto en mente, se realizará el diseño del soporte para que se adapte de manera óptima a la pieza, quedando así la geometría mostrada en la Figura 6.84. Una vez realizado este diseño, se procedería la creación del sólido mediante una operación de revolución del mismo. Tras la cual, habría que realizar el redondeado de las aristas para obtener un soporte apto para la pieza. Finalmente, se obtendría el sólido mostrado en la Figura 6.85.

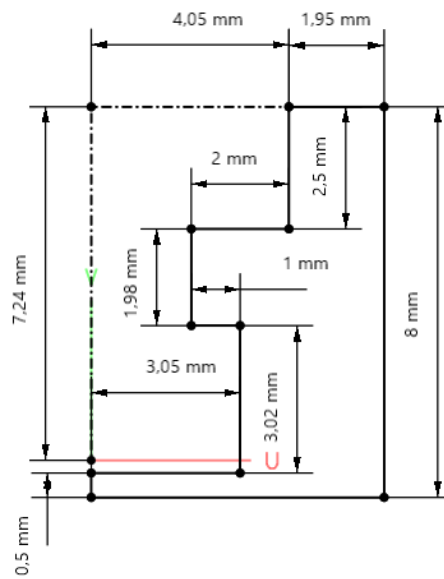


Figura 6.84. Dimensiones geométricas del soporte de la pieza 7 empleadas para el diseño del boceto usado para la revolución del mismo.

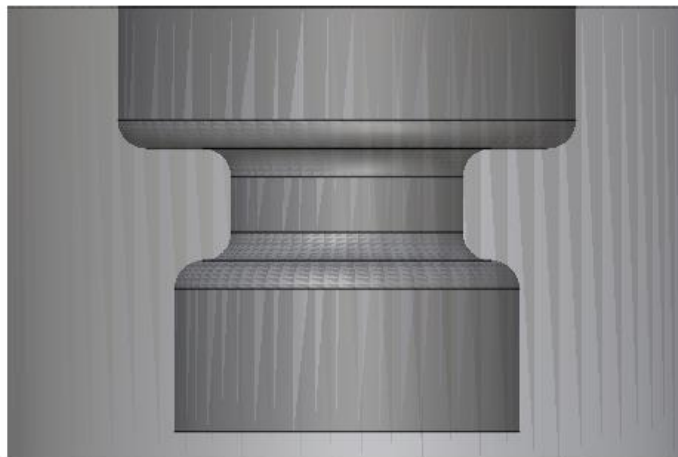


Figura 6.85. Imagen del CAD del soporte de la pieza 7 antes de realizar el corte para simplificar la extracción de la pieza del mismo.

Sin embargo, a diferencia de los casos anteriores y como se ha mencionado anteriormente, el soporte no estaría finalizado, ya que, si se imprimiera con la pieza, este no podría ser extraído sin su fractura. Para evitar esto, en este primer tipo de soporte se ha decidido separarlo en 2 partes iguales, realizando un corte a través

de su centro de 1 mm de espesor. De esta forma, obtenemos los soportes mostrados en la Figura 6.86.

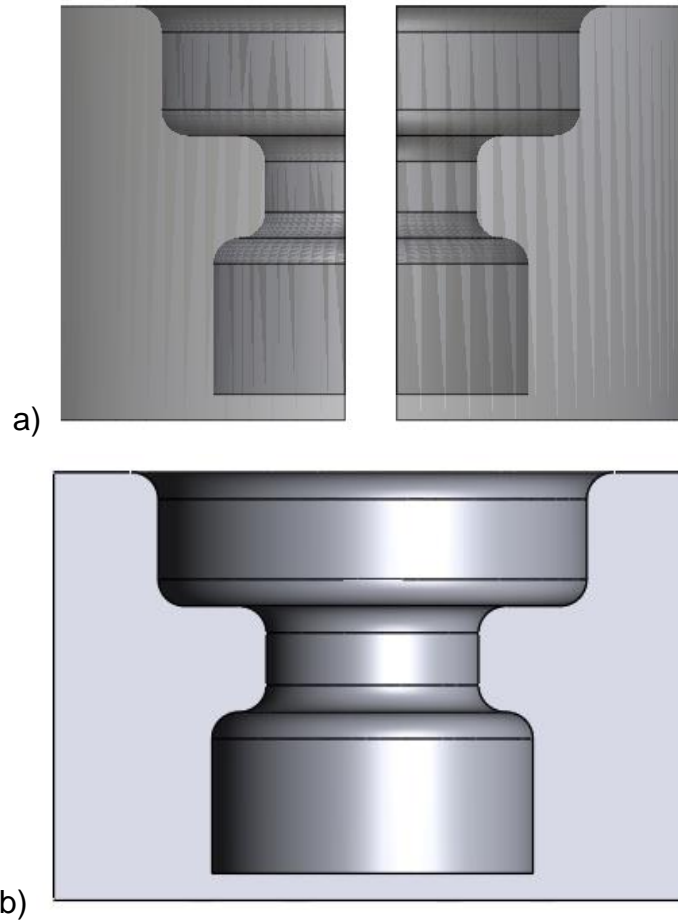


Figura 6.86. a) Imagen del CAD del soporte de la pieza 7 tras haber realizado el corte del mismo para facilitar su retirada; b) Imagen del CAD de una de las 2 partes que forman el soporte empleado para la fabricación de la pieza 7.

Finalmente, el ajuste de la pieza con los soportes se puede ver en la Figura 6.87, quedando únicamente la extracción del STL para comenzar con la impresión de la pieza.



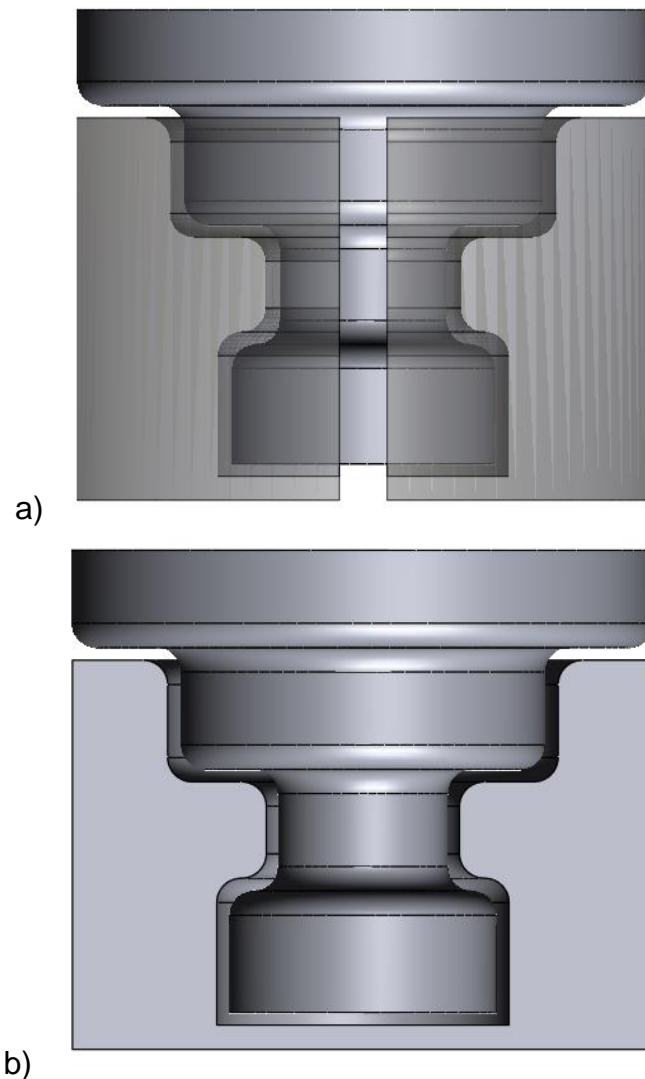


Figura 6.87. a) Imagen del CAD de la pieza 7 con el soporte empleado para su fabricación en la que se puede apreciar el espacio libre entre ambas partes; b) Imagen del CAD de la pieza 7 con una de las 2 partes que forman el soporte de la pieza 7 colocados en la misma posición en la que serían impresos.

No obstante, además de este planteamiento, también se puede proceder a fabricar la pieza, cambiando la orientación de la misma de forma que el tipo de piezas anteriormente mencionadas puedan ser fabricadas. De esta forma, fabricando la pieza con una orientación horizontal de la misma, podemos realizar un soporte como el mostrado en la Figura 6.88. Como podemos comprobar en esta figura, en este caso tampoco existiría ningún problema para la retirada del mismo por lo que podría ser apto para la fabricación de la misma.

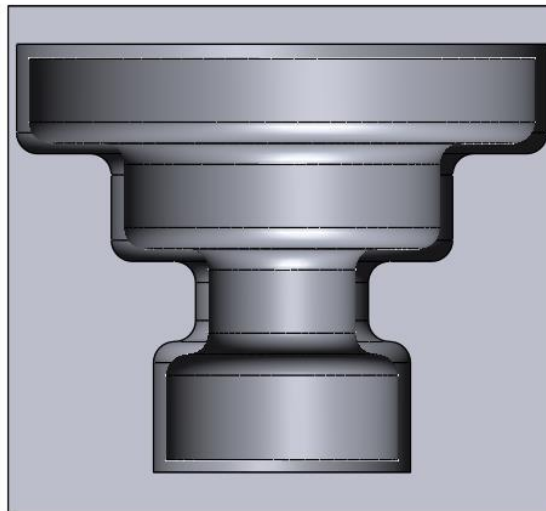


Figura 6.88. Imagen del CAD de la pieza 7 con el segundo tipo de soporte creado para la fabricación de esta pieza.

En el caso del diseño de este soporte seguiremos un planteamiento similar al de los casos anteriores. Diseñaremos de forma manual la cavidad interior de forma que se ajuste perfectamente a la geometría de la pieza, obteniendo así el resultado mostrado en la Figura 6.89.

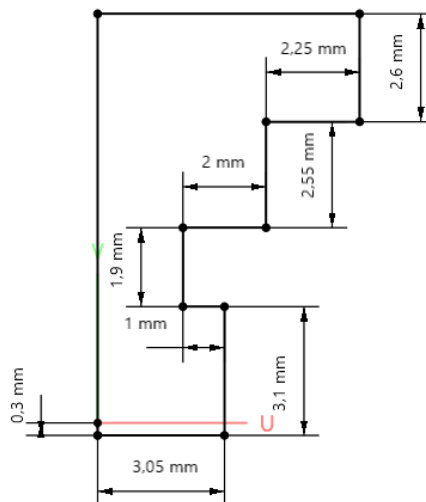


Figura 6.89. Dimensiones geométricas empleadas para el diseño del segundo tipo de soporte para la pieza 7.

Una vez realizado este diseño, se realizará una revolución de  $180^\circ$  del mismo y se redondearán sus esquinas para obtener un sólido como el de la Figura 6.90.

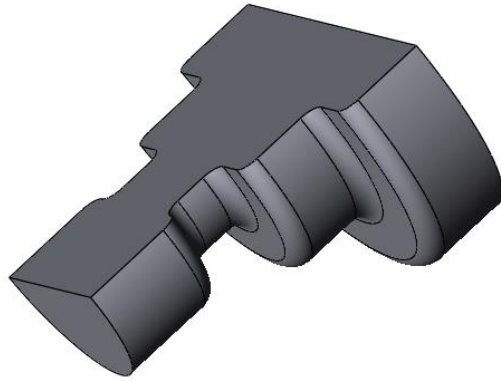


Figura 6.90. Imagen del CAD de la parte empleada como herramienta para la operación booleana de corte para el diseño del segundo tipo de soporte para la pieza 7.

Una vez que tenemos esta parte, solo nos faltará realizar el soporte como tal. Este consiste en un prisma rectangular de 13x12x7 mm sobre el que se realizará una operación booleana de corte con la parte anterior. Quedando de esta forma el soporte mostrado en la Figura 6.91.

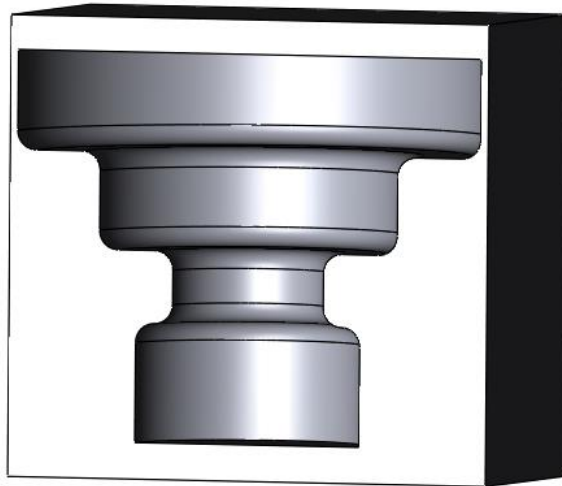


Figura 6.91. Imagen del CAD del segundo tipo de soporte diseñado para la fabricación de la pieza 7.

En cuanto a seleccionar un soporte u otro, nos volveremos a basar en el consumo de material necesario para su fabricación. De esta forma, tenemos que el volumen total de los dos soportes empleados en el primer caso es de 558,98 mm<sup>3</sup>,

mientras que en el caso de último soporte es de  $807,13 \text{ mm}^3$ . Es por este motivo por el que hemos empleado el primer tipo de soporte para la fabricación de esta pieza. No obstante, ajustando este soporte a la geometría de la pieza, tal y como se muestra en la Figura 6.92, se logra reducir el volumen de este soporte hasta los  $561,17 \text{ mm}^3$ . Obteniendo de esta forma un volumen prácticamente idéntico al del primer tipo de soporte, quedando este relegado a un segundo lugar por ofrecer una menor protección a la pieza frente a los esfuerzos provocados por las cuchillas durante el proceso de fabricación.

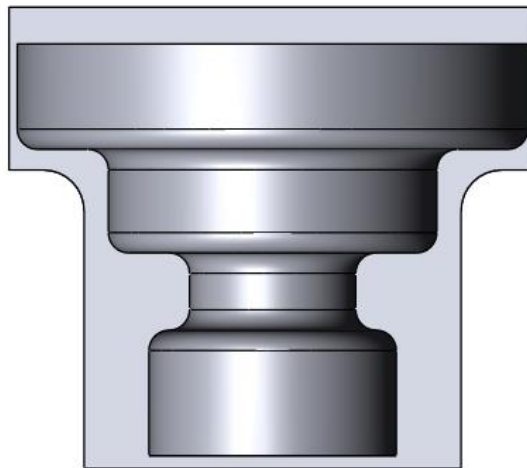


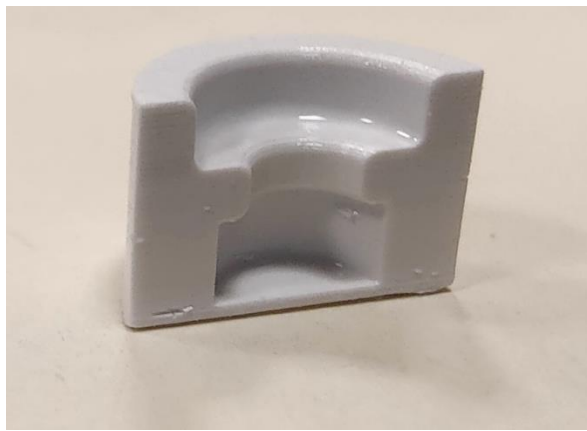
Figura 6.92. Imagen del CAD del segundo tipo de soporte para la pieza 7 tras haber sido ajustado a la geometría de la pieza.

### 6.2.3.2 Impresión de la pieza 7.

Una vez finalizado el diseño de los soportes y tras haber elegido el soporte a emplear para la fabricación de la pieza 7 se da comienzo al proceso de impresión de la misma. El resultado de la pieza y de los soportes tras haber finalizado el proceso de impresión y haberse realizado la limpieza tanto de la pieza como de los soportes, puede ser observado en la Figura 6.93.



a)



b)



c)

Figura 6.93. a) Fotografía de la pieza 7 tras su limpieza después de haber finalizado el proceso de impresión; b) Fotografía del soporte empleado para la pieza 7 tras su limpieza después de haber finalizado el proceso de impresión; c) Fotografía de la pieza 7 con una de las partes que conforman el soporte empleado para su fabricación en la que se puede apreciar el espacio existente entre ambas partes.

Finalmente, tras salir del horno de sinterizado obtenemos las piezas con sus características finales, tal y como puede comprobarse en la Figura 6.94. Al igual que en los casos anteriores, los soportes también han sido sometidos al proceso de debinding, solo que separados de la pieza. Además, en el caso de esta pieza, nos encontramos que incluso tras el proceso de sinterizado, sigue encajando en sus soportes perfectamente.

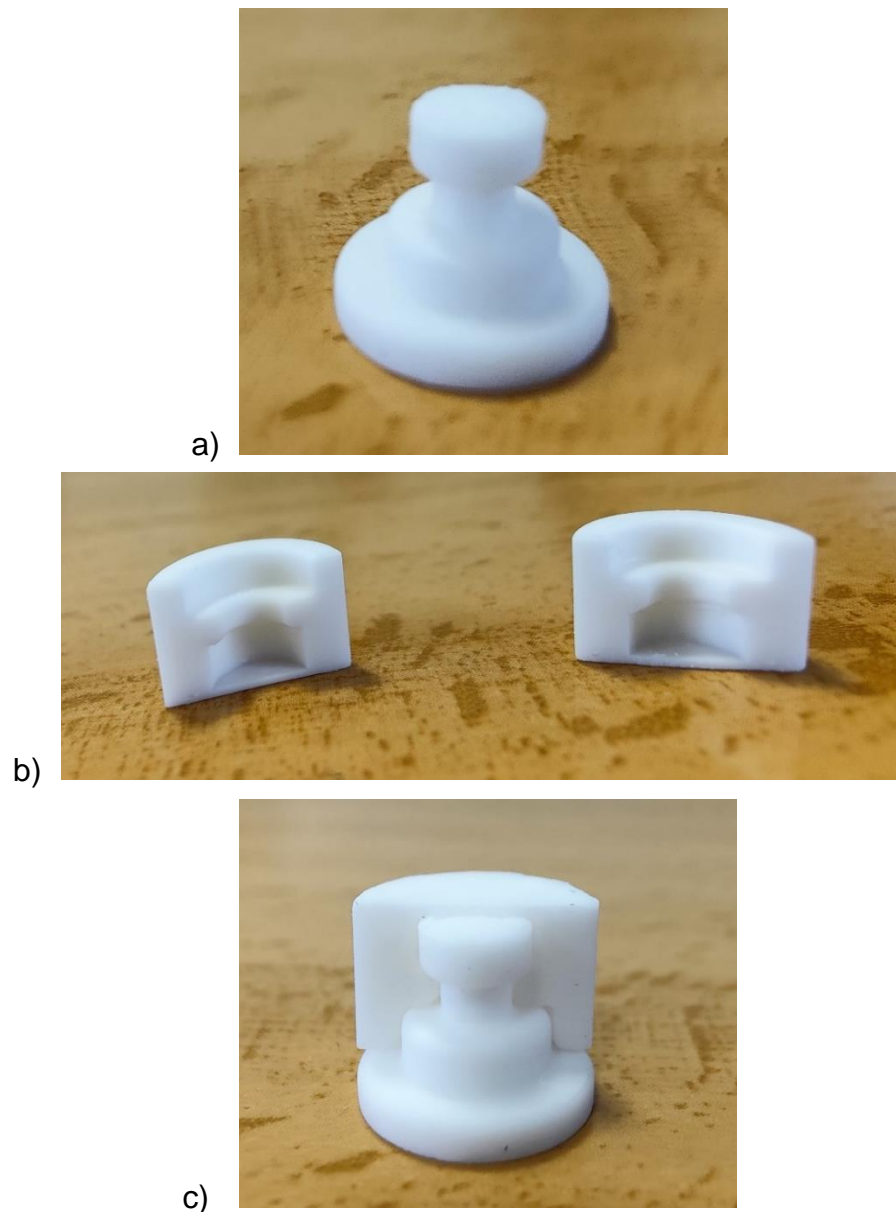


Figura 6.94. a) Fotografía de la pieza 7 tras salir del horno de sinterizado; b) Fotografía de ambas partes que conforman el soporte de la pieza 7 tras salir del horno de sinterizado; c) Fotografía de la pieza 7 con una de las 2 partes que conforman su soporte tras salir del proceso de sinterizado.

No obstante, en el caso de esta pieza, al igual que en el caso de la pieza 5, se pudo observar que la calidad superficial de su base que se encuentra cubierta por la base del soporte es bastante inferior a la del resto de la pieza, tal y como puede observarse en la Figura 6.94. Confirmando así que siempre que sea posible, la base de la pieza ha de estar en contacto con la cama de impresión, para así poder conseguir un mejor resultado, evitando labores de rectificado posteriores.

### **6.2.3.3 Inspección de la pieza 7.**

En el caso de la pieza 7, esta fue impresa directamente con soportes, por lo que no existen casos anteriores para su comparación. No obstante, se realizará una comparativa para ver la precisión dimensional de la pieza con respecto a su CAD final, especialmente para comprobar si la división del soporte en 2 partes tiene una influencia en las dimensiones de la pieza. De esta forma, al igual que en todos los casos anteriores, se realizará una comparativa 3D entre la pieza escaneada y su CAD, obteniendo así los resultados mostrados en la Figura 6.95.

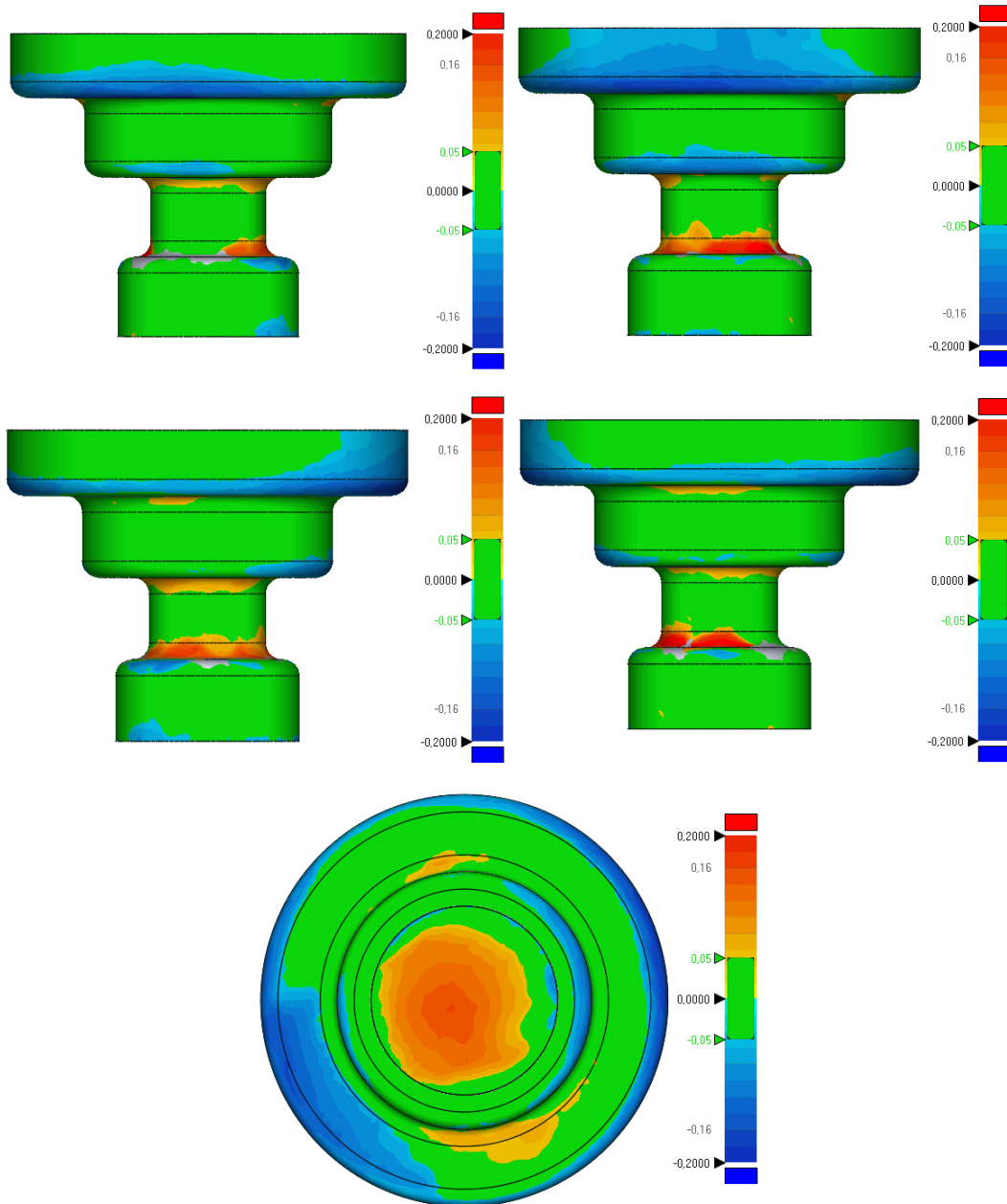


Figura 6.95. Imagen de la comparativa 3D de las diferentes vistas de la pieza 7 realizada con Geomagic Control X.

En la Figura 6.95 se puede comprobar que al igual que la en la pieza 5 y la pieza 6, se ha producido una contracción de la pieza significativa localizada principalmente en dos laterales opuestos de la misma. Además, en esta figura también se puede apreciar los problemas de calidad superficial localizados en la base de la pieza. No obstante, no se observa ninguna deformación de la pieza



significativa que pudiese deberse a la división en 2 partes del soporte de la misma, lo que indica que la separación de 1 mm entre ambas partes es adecuada.

#### 6.2.4 REALIZACIÓN DE LOS SOPORTES PARA LA PIEZA 8.

La pieza 8 se trata de una pieza sencilla cuya única finalidad residía en comprobar la eficacia de la optimización, mediante la reducción de material, de los soportes. Esta pieza, como puede observarse en la Figura 6.96, consta de un voladizo de 15 mm de longitud con un ángulo de  $60^\circ$  con respecto a la vertical. Para poder llevar a cabo la optimización del soporte necesario para esta pieza nos basaremos en las recomendaciones que el fabricante de la resina da sobre la máxima longitud del voladizo que puede soportar la pasta sin soporte.

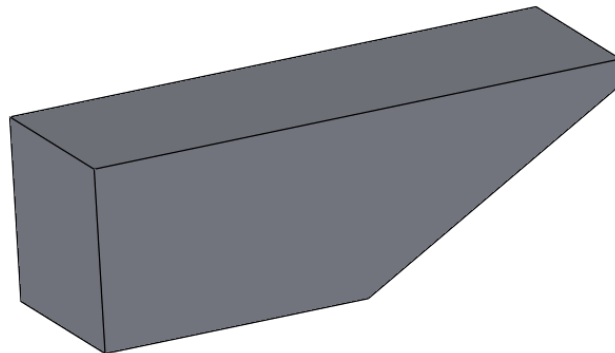


Figura 6.96. Imagen del CAD de la pieza 8.

##### 6.2.4.1 Diseño de los soportes para la pieza 8.

Teniendo esto en cuenta se han diseñado 3 tipos de soportes diferentes entre sí, siendo el primero de ellos el soporte normal, sin ningún tipo de optimización. Para el diseño de este soporte se ha seguido la misma estrategia de diseño que los casos anteriores, volviendo a realizar el escalado de la pieza y posteriormente la operación booleana de corte. De esta forma, este primer soporte consiste en su sólido macizo, tal y como puede comprobarse en la Figura 6.97, que servirá como base para las posteriores labores de optimización del mismo.

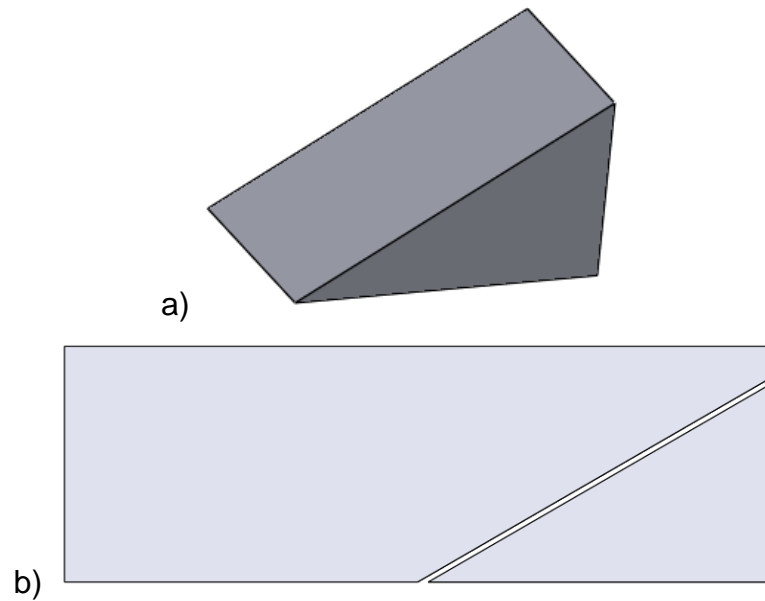


Figura 6.97. a) Imagen del CAD del primer tipo de soporte para la fabricación de la pieza 8; b) Imagen del CAD de la pieza 8 con el primer tipo de soporte empleado para su fabricación.

En el caso del segundo soporte para esta pieza, se ha realizado un corte longitudinal por el centro del soporte de 3 mm de espesor, ya que, esta es la distancia máxima que fabricante establece que este voladizo puede aguantar sin la necesidad de colocar un soporte. De esta forma, el soporte nos quedaría dividido en dos partes de 3,5 mm cada una, separadas por una distancia de 3 mm entre ellas, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.98.

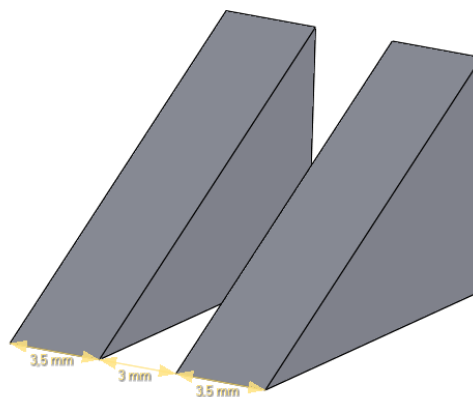


Figura 6.98. Imagen del CAD del segundo tipo de soporte diseñado para la fabricación de la pieza 8 en la que se pueden apreciar las dimensiones de cada una de las partes y de la separación entre ellas.



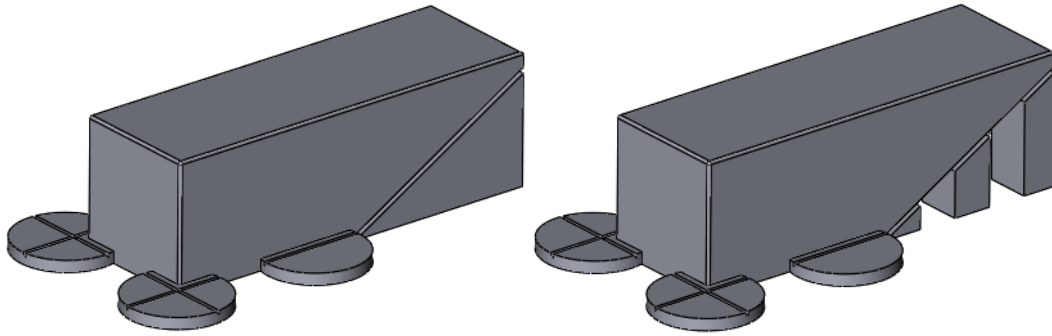


Figura 6.100. Imagen del CAD de la pieza 8 con el segundo y el tercer tipo de soporte y con los soportes circulares ya aplicados, listas para comenzar con el proceso de impresión.

#### 6.2.4.2 Impresión de la pieza 8.

Tras la impresión de las dos piezas se pudo comprobar que en ambos casos aparecieron defectos, siendo estos más apreciables en la pieza con el tercer tipo de soporte. En el caso del segundo tipo de soporte, se pudo comprobar una cierta pérdida de calidad en la superficie del voladizo que no presentaba ningún tipo de soporte, pudiendo apreciar en esta zona un mayor marcado de las capas de la pieza. Este fenómeno es ligeramente apreciable en la Figura 6.101.



Figura 6.101. Fotografía de la pieza 8 fabricada con el segundo tipo de soporte en la que se pueden apreciar los defectos producidos en el centro de la superficie del voladizo, que corresponde con la zona en la que no existía soporte.

En el caso del tercer tipo de soporte, los defectos producidos fueron mayores, llegando a producirse una muesca en la superficie del voladizo, tal y como puede comprobarse en la Figura 6.102.



Figura 6.102. Fotografía de la pieza 8 fabricada con el tercer tipo de soporte empleado para su fabricación en la que se puede apreciar la muesca producida en la parte inferior izquierda de la superficie del voladizo.

Estos defectos se acentuaron más tras el proceso de debinding realizado para ambas piezas, especialmente en el caso de la pieza con el tercer tipo de soporte. En este caso, a parte de la muesca producida, se puede observar una cierta delaminación de la superficie a lo largo de toda la superficie del voladizo. Los defectos de ambas piezas pueden ser observados en la Figura 6.103.

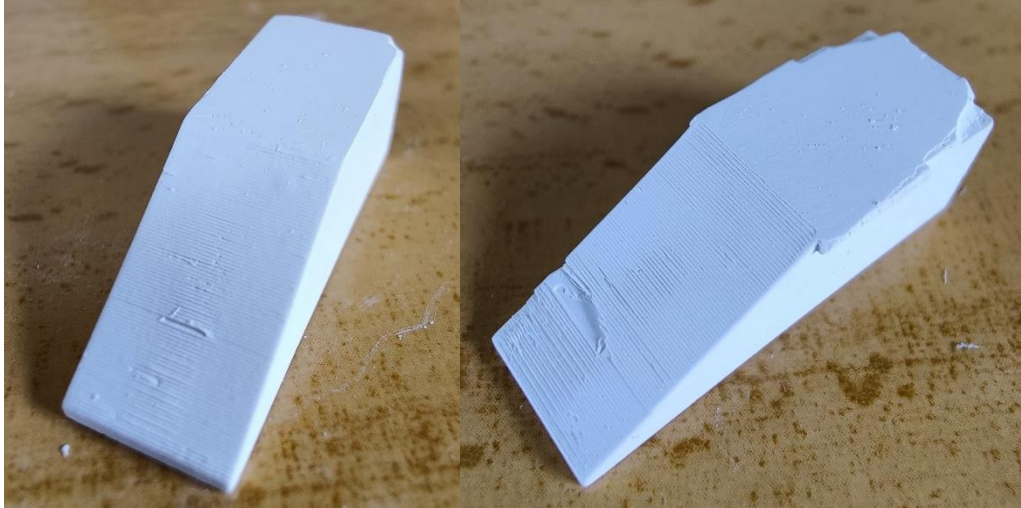


Figura 6.103. Fotografía de la pieza 8 en la que se pueden apreciar los defectos producidos tras el proceso de debinding, encontrándose a la izquierda la pieza fabricada con el segundo tipo de soporte y a la derecha la pieza fabricada con el tercer tipo de soporte.

Una vez eliminadas las marcas de los soportes circulares mediante su lijado se procedió a introducir las piezas en el horno de sinterizado. Tras lo cual obtenemos los resultados observados en la Figura 6.104. A pesar de que en la Figura 6.104 no se aprecia de forma significativa, los defectos producidos en la pieza 8 impresa con el segundo tipo de soporte siguen presentes, no obstante, al producirse la contracción de la pieza, estos defectos son menos apreciables a simple vista.



a)



b)

Figura 6.104. a) Fotografía de la pieza 8 impresa con el segundo tipo de soporte tras haber salido del horno de sinterizado; b) Fotografía de la pieza 8 impresa con el tercer tipo de soporte tras haber salido del horno de sinterizado.

### 6.2.4.3 Inspección de la pieza 8.

En el caso de la pieza 8 se realizarán dos comparativas, una para cada una de las 2 piezas impresas con los dos tipos de soporte. De esta forma, realizando una comparación en 3D para la pieza 8 impresa con el segundo tipo de soporte diseñado en el apartado anterior, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 6.105.

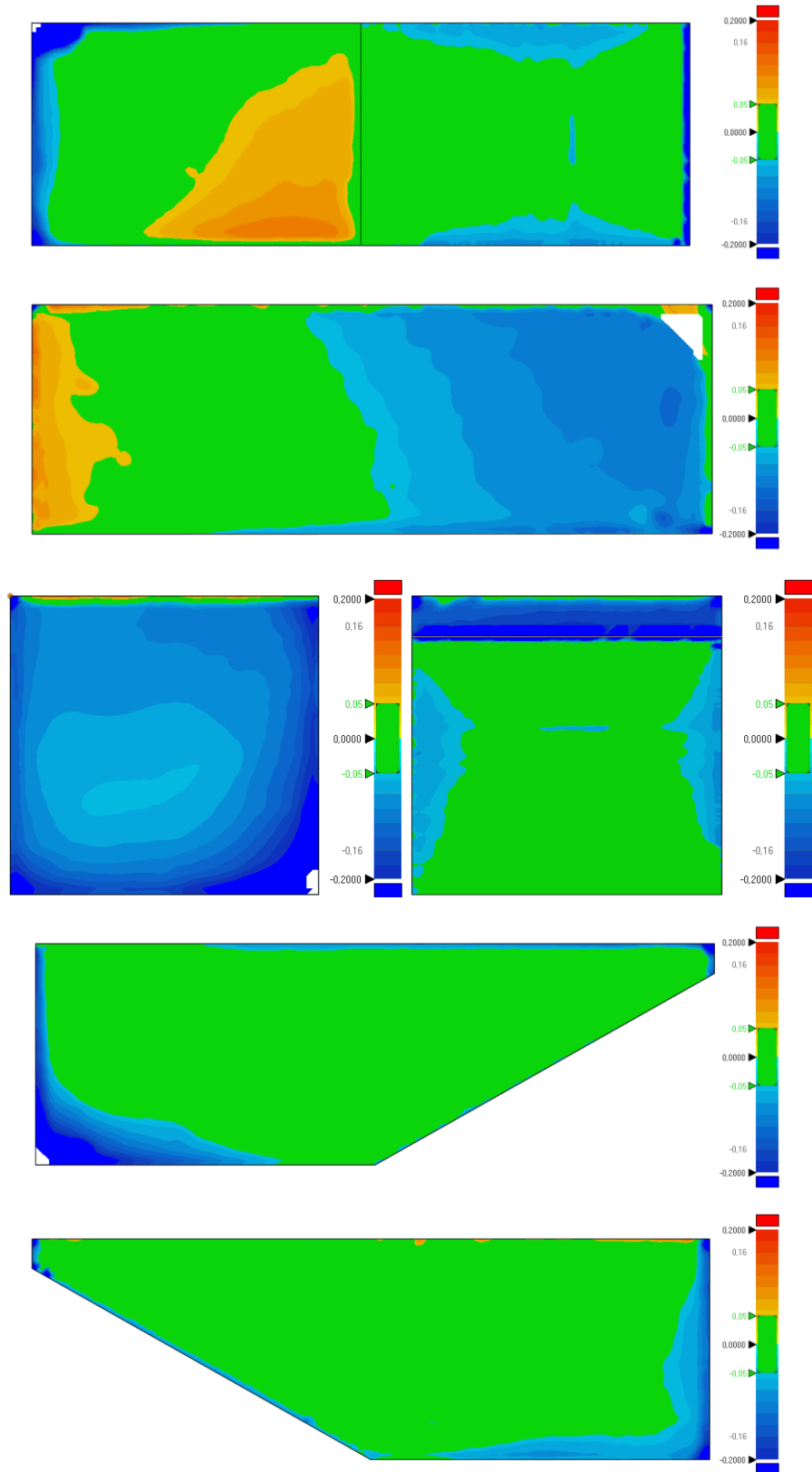


Figura 6.105. Imagen de la comparativa 3D de las diferentes vistas de la pieza 8 impresa con el segundo tipo de soporte realizada en Geomagic Control X.



En esta figura se puede apreciar como en la superficie que se encuentra encima del voladizo se ha producido una contracción de la misma. Por otro lado, se puede ver que superficie del voladizo se encuentra en su mayoría dentro del rango  $\pm 0,05$  mm, lo que indica que los defectos que se podían apreciar en la misma afectaban principalmente al acabado de la superficie del voladizo. Al igual que en todas las piezas impresas con una geometría prismática, se puede apreciar una contracción en ambas caras longitudinales de la pieza. El resto de la pieza no se desvía dimensionalmente del CAD, con la excepción de una zona en la base de la pieza donde se produce una desviación positiva y de las zonas cercanas a la base de la pieza y las caras longitudinales.

En el caso de la pieza 8 impresa con el tercer tipo de soporte diseñado, se puede comprobar que los defectos producidos son muy similares a los producidos en la pieza impresa con el segundo tipo de soporte. No obstante, en este caso los defectos presentan una magnitud y un área mayor que en el caso anterior. Las principales diferencias de este caso con el anterior se encuentran en que los defectos producidos en la superficie del voladizo presentan una mayor importancia y en que en la cara de la pieza opuesta al voladizo, la contracción típica de las piezas prismáticas en sus caras laterales de menor tamaño tiene una magnitud menor. Todo esto puede verse en la Figura 6.106.

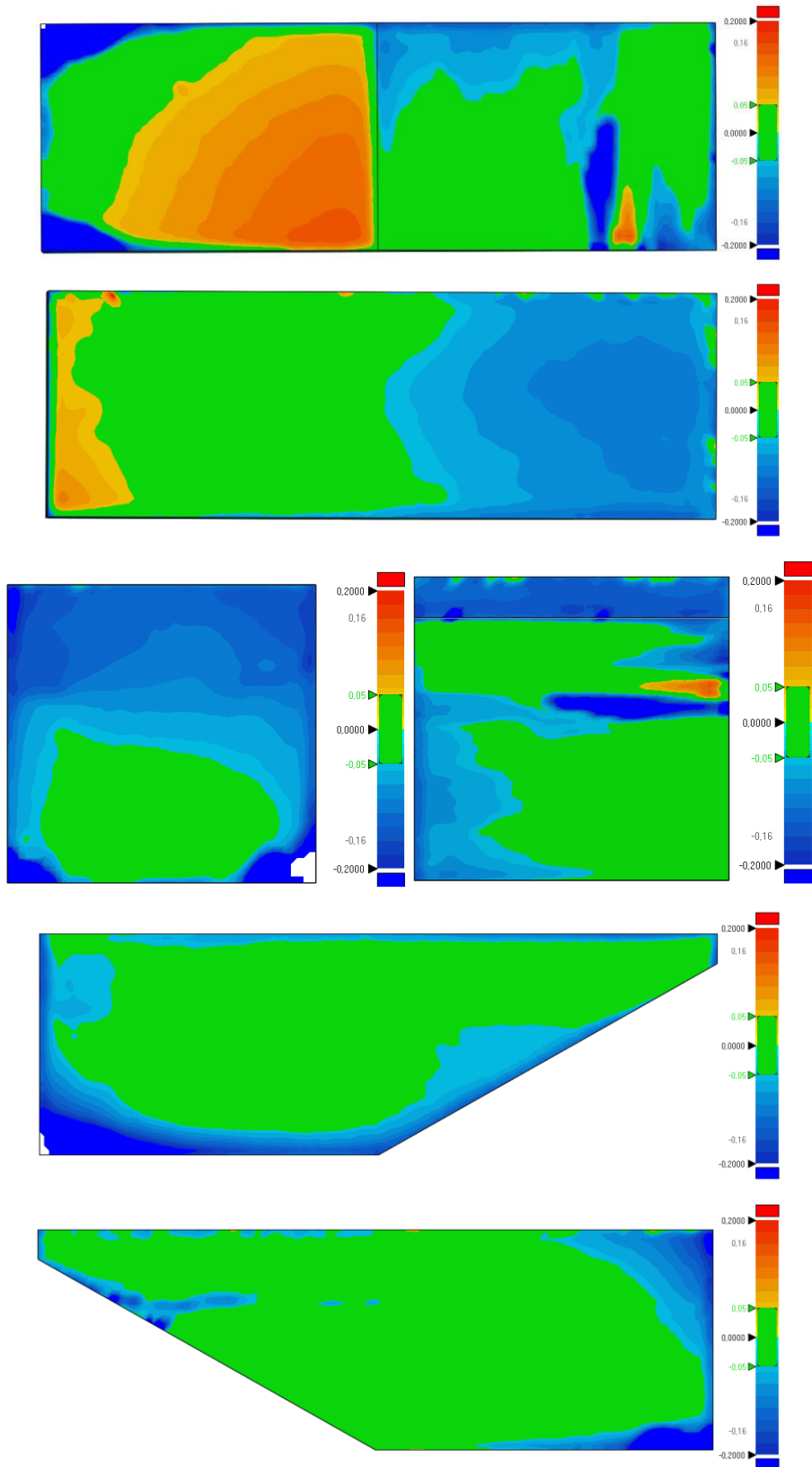


Figura 6.106. Imagen de la comparativa 3D de las diferentes vistas de la pieza 8 impresa con el tercer tipo de soporte realizada en Geomagic Control X.

#### **6.2.4.4 Optimización y mejora de los soportes de la pieza 8.**

Como se ha podido comprobar, en ambos casos han aparecido defectos en la superficie del voladizo de la pieza. Por este motivo, ambos tipos de soportes no son válidos, por lo que sería necesario realizar modificaciones en los 2 tipos de soportes. Estas modificaciones han de ir enfocadas principalmente a reducir el espacio entre las diferentes partes de los soportes, ya que, como se ha podido comprobar, la separación que el fabricante recomendaba para un voladizo que no necesitase soportes era demasiado grande.

Teniendo esto en cuenta, en el caso del segundo tipo de soporte, se reducirá la separación entre las partes del soporte, teniendo presente el objetivo de reducir en la mayor medida posible el volumen del soporte. Para lograr este objetivo se ha decidido dividir el soporte 1 en 3 partes iguales entre sí, dejando entre cada una de las partes una separación de 1,25 mm, a diferencia del soporte 2 realizado anteriormente, el cual constaba de 2 partes con una separación entre ellas de 3 mm. El hecho de dejar una separación de 1,25 mm se basa en la separación entre las dos partes del soporte de la pieza 7, la cual era de 1 mm para un ángulo respecto a la vertical de 90°. Este ángulo es mucho más crítico que el de la pieza 8, por tanto, la separación dejada en esta pieza es algo mayor. No obstante, al reducir el espesor de las partes del soporte, también se reduce su superficie de contacto con la cama de impresión, pudiendo dar lugar a problemas por desplazamiento de las mismas durante el proceso de impresión. Por este motivo se creará una especie de base que una las 3 partes que componen el soporte, aumentando de esta forma la superficie en contacto con la cama de impresión. De esta forma, tendríamos un soporte como el mostrado en la Figura 6.107, el cual presenta un volumen total de 483,35 mm<sup>3</sup>, frente a los 427,80 mm<sup>3</sup> del soporte 2 sin modificar.

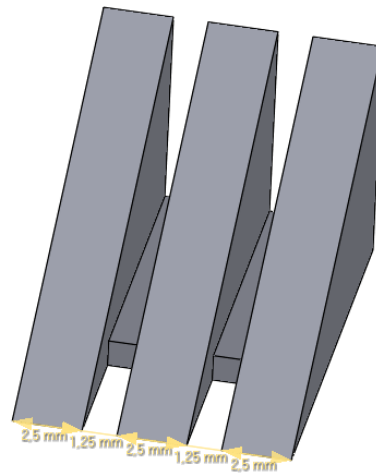


Figura 6.107. Imagen del CAD del soporte 2 modificado en el que se puede apreciar el espesor de las 3 partes del soporte, así como su separación y su base.

En el caso del tercer tipo de soporte, emplearemos el soporte 2 modificado como base para la realización de este soporte. A diferencia del soporte 3 creado anteriormente, a este nuevo soporte se le han realizado 4 cortes transversales, de 1 mm de espesor cada uno. Además, al igual que en el caso anterior, este soporte 3 modificado también presenta una base que une todas sus partes, para así mejorar la adhesión a la cama de impresión, ya que la superficie de las piezas en contacto con ella sería muy pequeña, dando lugar a problemas de movimientos de las mismas. De esta forma, tendríamos un soporte como el mostrado en la Figura 6.108.



#### 6.2.5.1 Diseño de los soportes para la pieza 9.

Como se puede apreciar en la propia Figura 6.109, la parte de la pieza que requiere del diseño de un soporte presenta dimensiones geométricas bastante diferentes entre sí. Esto implica que no podremos realizar un soporte adecuado a la misma realizando únicamente un escalado de la pieza, porque de esta forma, no podríamos mantener las distancias recomendadas de separación entre la pieza y el soporte en todos los puntos. Por lo que, teniendo esto en cuenta, como la geometría es sencilla, se realizará el diseño del soporte escalando una copia de la pieza y realizando una operación booleana de corte, con la diferencia de que será necesario arreglar, posteriormente, las zonas donde la distancia entre la pieza y el soporte sean menores que las recomendadas. De esta forma, en este caso no realizaremos un escalado de la pieza teniendo en cuenta la dimensión geométrica más desfavorable. Esto es debido, a que, como se muestra en la Figura 6.110, si realizamos el escalado de la pieza teniendo en cuenta la dimensión de 4 mm, afectará mucho a las demás medidas, provocando que las distancias entre la pieza y el soporte sean demasiado grandes. Para evitar este problema, se realizará un escalado de la pieza teniendo como referencia el arco de circunferencia de 17 mm de radio. Tras esto se realizará el sólido sobre el que se aplicará la operación booleana de corte que consiste en un cilindro de 23,7 mm de radio y con un espesor de 1,74 mm. Finalmente se aplicará la operación booleana de corte. Sin embargo, como se puede apreciar en la Figura 6.111, este soporte ha de ser retocado, como ya se había mencionado anteriormente. En esta figura se puede ver claramente como en la zona central de la pieza, el soporte sigue en contacto con esta, no existiendo así una separación suficiente entre ambas partes.

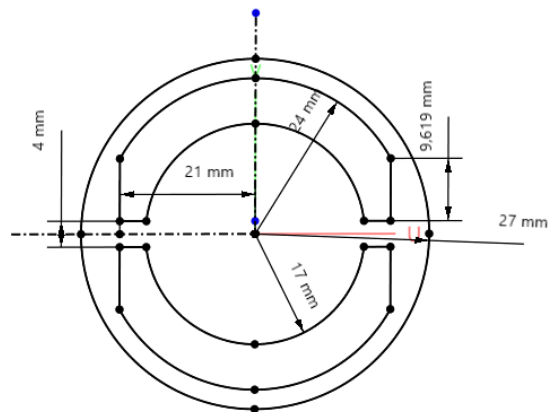


Figura 6.110. Dimensiones geométricas del diseño de la base de la pieza 9.

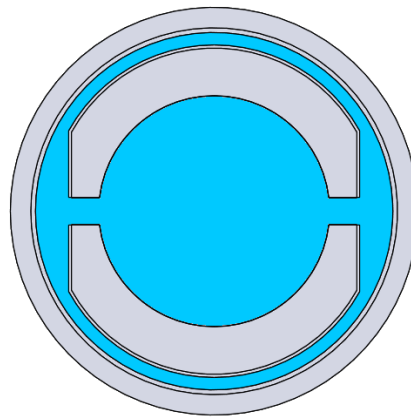


Figura 6.111. Imagen del CAD de la pieza 9, en color gris, y del soporte, en color azul, tras realizar su diseño mediante el escalado y la operación booleana de corte antes de realizar su arreglo.

Es por este motivo por el que, a continuación, se realizará de forma manual un ajuste del soporte en estas zonas, para así lograr una separación adecuada. Por tanto, una vez realizado el arreglo del soporte, obtendremos el resultado mostrado en la Figura 6.112. Finalmente, para facilitar la retirada del propio soporte, se realizará un corte de 1 mm de espesor por la mitad del mismo, de forma que nos queda un soporte como el mostrado en la Figura 6.113. De esta forma, tendríamos la pieza 9 lista para realizar su impresión. No obstante, esta pieza tampoco se ha podido imprimir debido a la falta y el alto coste del material necesario para su fabricación, por lo que la eficacia del soporte no ha podido ser probada.

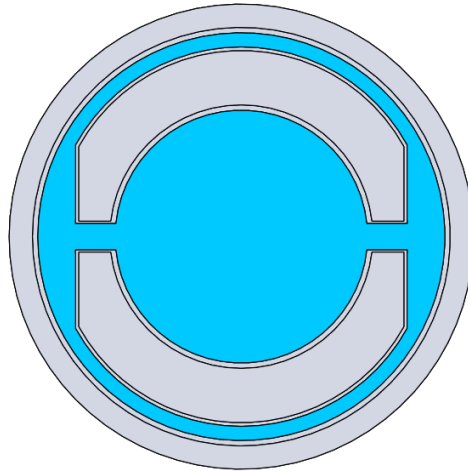


Figura 6.112. Imagen del CAD de la pieza 9, en color gris, y de su soporte, en color azul, tras haber realizado el arreglo del soporte.

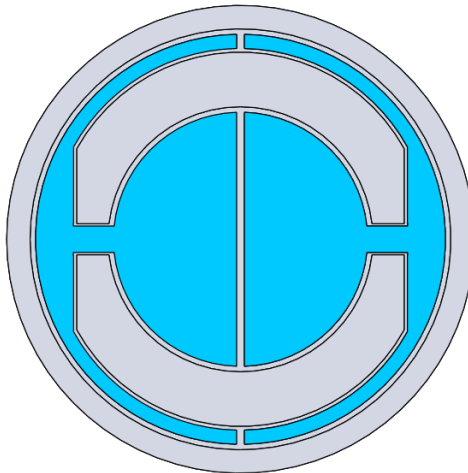


Figura 6.113. Imagen del CAD de la pieza 9, en color gris, y de su soporte, en color azul, tras dividir el soporte en dos partes diferentes.



## 7 Conclusiones.

La estereolitografía con materiales cerámicos es un tipo de fabricación aditiva que permite la creación de piezas cerámicas con geometrías complejas. Sin embargo, a día de hoy, se trata de una tecnología que se encuentra en una fase relativamente temprana de su desarrollo. Es por este motivo por el que se están realizando diversas investigaciones encaminadas a buscar optimizar y mejorar el proceso de fabricación de este tipo de tecnología. Estas investigaciones se han enfocado en diversos puntos del proceso de producción de este tipo de fabricación aditiva, no obstante, el foco de atención de estas investigaciones no se ha puesto en el diseño de soportes para las piezas creadas mediante este tipo de tecnología. Es por este motivo por lo que se ha realizado este trabajo, teniendo como objetivo el diseño de soportes que solucionen los problemas más comunes que han ido apareciendo en la fabricación de las piezas con esta tecnología. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las piezas impresas con soportes podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- Mediante los análisis dimensionales realizados de las piezas 1 y 2 se ha podido comprobar que los soportes para evitar el efecto curling son correctos. Esto se debe a que como se ha podido ver en el caso de estas piezas, este efecto ha disminuido su influencia en gran medida con la adición de los soportes en comparación con las respectivas piezas impresas sin soportes.
- En las piezas 3 y 4 se ha comprobado que los soportes empleados para evitar la aparición del efecto curling no han sido suficientes. Esto es debido al mayor tamaño de las piezas en comparación con las anteriores, lo que implica que los soportes para estas piezas deberían haber presentado un mayor tamaño, así como haber agregado más soportes.
- En relación al diseño de los soportes para evitar la aparición del efecto curling se ha podido comprobar que su modificación es necesaria. Esto se debe principalmente a su rotura durante la fase de limpieza, la cual suele provocar daños a la pieza. Por tanto, es necesario hacer que estos soportes

sean lo suficientemente resistentes para evitar su rotura accidental, pero teniendo en cuenta que después del proceso de debinding han de ser eliminados.

- Los soportes sin contacto empleados para la impresión de las piezas 5 y 6 han resultado ser adecuados para corregir los problemas que habían surgido en la impresión de estas piezas sin el uso de soportes.
- El soporte empleado para la fabricación de la pieza 7 ha permitido la fabricación de la misma sin que se produjese un defecto de desplazamiento de capas. Como se ha podido comprobar en su comparativa 3D, la separación entre ambas partes del soporte no parece presentar ningún tipo de influencia negativa sobre la pieza, lo que indica que es posible emplear este tipo de soportes.
- Como se pudo comprobar tanto en la pieza 5 como en la pieza 7, el hecho de que la base se encuentre contenida en el interior del soporte y no en contacto directo con la cama de impresión ha derivado en un mal acabado superficial de la misma.
- En el caso de los soportes diseñados para la impresión de la pieza 8 se ha podido comprobar que ambos tipos de soportes no eran aptos, ya que dieron lugar a diversos tipos de defectos en las mismas. Estos defectos se han debido principalmente a que la separación entre las partes del soporte era demasiado grande y a que, en el tercer tipo de soporte, la superficie de adhesión de las partes del soporte con la cama de impresión no era lo suficientemente grande.
- Tras el proceso de sinterizado se ha podido comprobar una mayor contracción de la esperada en los laterales de menor tamaño de todas las piezas con geometrías prismáticas.
- También, tras el proceso de sinterizado, se ha podido comprobar que todas las piezas con geometría circular han sufrido una contracción en dos laterales opuestos, siendo esta contracción especialmente notable en la pieza 5 y la responsable de darles el aspecto ovalado mencionado anteriormente.

Por lo que se concluye que hay un claro desconocimiento del comportamiento a nivel geométrico y dimensional que sufren las piezas fabricadas con esta técnica, y que sería necesario seguir abordando este problema, tal como se propone en las líneas futuras.

## 8 Líneas de investigación futura.

En cuanto a las posibles líneas de investigación que se quedan abiertas a raíz de este trabajo, como se ha dicho, nos encontramos con la necesidad de seguir investigando los problemas geométricos y dimensionales que tienen lugar durante las etapas de fabricación de las piezas cerámicas de alúmina, por SLA. Sería necesario conocer exactamente el comportamiento y establecer las reglas necesarias para el diseño correcto de soportes siguiendo al menos las siguientes pautas:

- Análisis del comportamiento del material durante la impresión considerando diferentes geometrías y espesores de pieza.
- Estudio de las deformaciones producidas durante el proceso de sinterizado en función de la colocación de la pieza en el interior del horno.
- Estudio y desarrollo de la creación de soportes para evitar la deformación de las piezas durante el proceso de sinterizado.
- Estudio del máximo espacio posible entre las partes de un soporte sin que afecte a la pieza.
- Estudio de la eficacia de los soportes para evitar el efecto curling en función de su tamaño y del tamaño de la pieza.
- Estudio de la optimización de los soportes en función de la orientación y ángulo de impresión de la pieza.
- Estudio de los parámetros del diseño de soportes para la fabricación de piezas en otros materiales diferentes a la alúmina.

Además, y debido a la aparición de nuevos materiales cerámicos orientados a la impresión, sería conveniente extender esta investigación al estudio de los parámetros del diseño de soportes para la fabricación de piezas en otros materiales diferentes a la alúmina, tales como la zirconia o la hidroxiapatita, ya con un amplio campo de aplicación en diferentes sectores importantes, tanto industriales como biomédicos.

## 9 Referencias.

- [1] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, no. December 2017, pp. 172–196, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [2] S. K. Parupelli and S. Desai, “A Comprehensive Review of Additive Manufacturing (3D Printing): Processes, Applications and Future Potential,” *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 16, no. 8, pp. 244–272, 2019, doi: 10.3844/ajassp.2019.244.272.
- [3] A. Vafadar, F. Guzzomi, A. Rassau, and K. Hayward, “Advances in metal additive manufacturing: A review of common processes, industrial applications, and current challenges,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–33, 2021, doi: 10.3390/app11031213.
- [4] T. Pereira, J. V. Kennedy, and J. Potgieter, “A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job,” *Procedia Manuf.*, vol. 30, pp. 11–18, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.003.
- [5] S. Zakeri, M. Vippola, and E. Levänen, “A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography,” *Addit. Manuf.*, vol. 35, no. February, p. 101177, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101177.
- [6] “Schematic of two kinds of SLA approaches. (a) Bottom-up setup. In the... | Download Scientific Diagram.” [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-two-kinds-of-SLA-approaches-a-Bottom-up-setup-In-the-top-down-setup-b\\_fig1\\_322014553](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-two-kinds-of-SLA-approaches-a-Bottom-up-setup-In-the-top-down-setup-b_fig1_322014553) (accessed Jun. 23, 2022).
- [7] W. Wang and J. Sun, “Dimensional accuracy and clinical adaptation of ceramic crowns fabricated with the stereolithography technique,” *J. Prosthet. Dent.*, vol. 125, no. 4, pp. 657–663, 2021, doi: 10.1016/j.prosdent.2020.02.032.

- [8] Q. Chen *et al.*, “A study on biosafety of HAP ceramic prepared by SLA-3D printing technology directly,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 98, no. April, pp. 327–335, 2019, doi: 10.1016/j.jmbbm.2019.06.031.
- [9] H. Wu *et al.*, “Effect of the particle size and the debinding process on the density of alumina ceramics fabricated by 3D printing based on stereolithography,” *Ceram. Int.*, vol. 42, no. 15, pp. 17290–17294, 2016, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.08.024.
- [10] M. Zhou *et al.*, “Preparation of a defect-free alumina cutting tool via additive manufacturing based on stereolithography – Optimization of the drying and debinding processes,” *Ceram. Int.*, vol. 42, no. 10, pp. 11598–11602, 2016, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.04.050.
- [11] H. Li *et al.*, “Microstructure and properties of 3D-printed alumina ceramics with different heating rates in vacuum debinding,” *Rare Met.*, vol. 39, no. 5, pp. 577–588, 2020, doi: 10.1007/s12598-020-01372-x.
- [12] H. Li *et al.*, “Influence of debinding holding time on mechanical properties of 3D-printed alumina ceramic cores,” *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 4, pp. 4884–4894, 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.10.061.
- [13] H. Curto *et al.*, “Coupling additive manufacturing and microwave sintering: A fast processing route of alumina ceramics,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 40, no. 7, pp. 2548–2554, 2020, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.009.
- [14] X. Liu, B. Zou, H. Xing, and C. Huang, “The preparation of ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite ceramic by SLA-3D printing and sintering processing,” *Ceram. Int.*, vol. 46, no. 1, pp. 937–944, 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2019.09.054.
- [15] X. Tan, Y. Lu, J. Gao, Z. Wang, C. Xie, and H. Yu, “Effect of high-speed sintering on the microstructure, mechanical properties and ageing resistance of stereolithographic additive-manufactured zirconia,” *Ceram. Int.*, vol. 48, no. 7, pp. 9797–9804, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.12.181.
- [16] Z. Chen, D. Li, and W. Zhou, “Process parameters appraisal of fabricating ceramic parts based on stereolithography using the Taguchi method,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 226, no. 7, pp. 1249–1258, 2012, doi: 10.1177/0954405412442607.
- [17] T. Chartier, C. Chaput, F. Doreau, and M. Loiseau, “Stereolithography of

- structural complex ceramic parts,” *J. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 15, pp. 3141–3147, 2002, doi: 10.1023/A:1016102210277.
- [18] H. Xing *et al.*, “Preparation and characterization of UV curable Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> suspensions applying for stereolithography 3D printing ceramic microcomponent,” *Powder Technol.*, vol. 338, pp. 153–161, 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2018.07.023.
- [19] J. Tarabeux, V. Pateloup, P. Michaud, and T. Chartier, “Development of a numerical simulation model for predicting the curing of ceramic systems in the stereolithography process,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 38, no. 11, pp. 4089–4098, 2018, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.03.052.
- [20] W. Zimbeck and R. Rice, “Stereolithography of Ceramics and Metals,” *IS&T’s 50th Annu. Conf.*, pp. 649–655, 1997.
- [21] C. J. Bae, A. Ramachandran, K. Chung, and S. Park, “Ceramic stereolithography: Additive manufacturing for 3D complex ceramic structures,” *J. Korean Ceram. Soc.*, vol. 54, no. 6, pp. 470–477, 2017, doi: 10.4191/kcers.2017.54.6.12.
- [22] C. Chaput, C. De Transfert, D. T. Céramiques, and E. Technopole, “RTEjournal - Forum für Rapid Technologie Fabrication of ceramics by stereolithography,” pp. 1–15, 2020.
- [23] M. L. Griffith and J. W. Halloran, “Freeform fabrication of ceramics via stereolithography,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 79, no. 10, pp. 2601–2608, 1996, doi: 10.1111/j.1151-2916.1996.tb09022.x.
- [24] J. Tang *et al.*, “The preparation of SiC ceramic photosensitive slurry for rapid stereolithography,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 41, no. 15, pp. 7516–7524, 2021, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.08.029.
- [25] Z. Xing, W. Liu, Y. Chen, and W. Li, “Effect of plasticizer on the fabrication and properties of alumina ceramic by stereolithography-based additive manufacturing,” *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 16, pp. 19939–19944, 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.07.259.
- [26] Y. Gao and J. Ding, “Low solid loading, low viscosity, high uniform shrinkage ceramic resin for stereolithography based additive manufacturing,” *Procedia Manuf.*, vol. 48, pp. 749–754, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.109.

- [27] O. Santoliquido, F. Camerota, A. Rosa, and A. Ortona, "A novel device to simply 3D print bulk green ceramic components by stereolithography employing viscous slurries," *Open Ceram.*, vol. 5, no. March, p. 100089, 2021, doi: 10.1016/j.oceram.2021.100089.
- [28] N. Kovacev, S. Li, and K. Essa, "Effect of the preparation techniques of photopolymerizable ceramic slurry and printing parameters on the accuracy of 3D printed lattice structures," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 41, no. 15, pp. 7734–7743, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.08.052.
- [29] S. Group, "3D PRINTING TECHNICAL CERAMICS Thermal treatments Training for C900 / C100 users."
- [30] S. G. 3DCERAM SINTO, "Diseño de piezas para la impresión cerámica 3D."