



Universidad de Oviedo

**ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**ÁREA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**IMPRESIÓN 3D EN CERÁMICA TÉCNICA**

**D. GONZÁLEZ PÉREZ, Alejandro**  
**TUTOR: D. HIGUERA GARRIDO, Alberto**

**FECHA: Julio del 2024**

# **ÍNDICE DE CONTENIDO**

<b>1.- HIPÓTESIS DE PARTIDA Y ALCANCE.</b>	<b>15</b>
1.1.- MOTIVACIÓN DEL TRABAJO.	15
1.2.- HIPÓTESIS DE PARTIDA.	16
1.3.- ALCANCE.	16
1.4.- RESUMEN DE CONTENIDO.	17
<b>2.- OBJETIVOS CONCRETOS Y RELACIÓN CON EL ESTADO ACTUAL.</b>	<b>18</b>
2.1.- OBJETIVOS CONCRETOS.	18
2.2.- INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN ADITIVA.	19
2.2.1.- <i>Concepto de fabricación aditiva.</i>	19
2.2.2.- <i>Procedimiento previo necesario para la obtención de piezas mediante impresión 3D.</i>	19
2.2.3.- <i>Principales tecnologías de fabricación aditiva.</i>	21
2.2.4.- <i>Ventajas y desventajas de la fabricación aditiva.</i>	24
2.3.- INTRODUCCIÓN A LA IMPRESIÓN 3D EN CERÁMICA.	26
2.3.1.- <i>Concepto de Impresión 3D en cerámica técnica.</i>	26
2.3.2.- <i>Evolución de la fabricación con cerámica.</i>	27
2.3.3.- <i>Materiales empleados en la impresión 3D en cerámica técnica.</i>	28
2.3.4.- <i>Tecnologías de impresión 3D en cerámica técnica.</i>	31
2.4.- IMPRESIÓN 3D EN CERÁMICA TÉCNICA MEDIANTE FDM.	37
2.4.1.- <i>Material de partida para la impresión FDM con cerámicas técnicas.</i>	37
2.4.2.- <i>Impresoras FDM para cerámicas técnicas.</i>	38
2.4.3.- <i>Proceso de impresión mediante FDM en cerámica técnica.</i>	40
2.4.4.- <i>Post-procesado y acabado necesario.</i>	41
2.4.5.- <i>Aplicaciones y alcance la tecnología.</i>	44
<b>3.- METODOLOGÍA DE TRABAJO.</b>	<b>46</b>
3.1.- EQUIPAMIENTO EMPLEADO.	46
3.1.1.- <i>Software de diseño CAD y de laminación.</i>	47
3.1.2.- <i>Impresora 3D por FDM y filamento de impresión.</i>	50
3.1.3.- <i>Equipo de post-procesamiento químico.</i>	53
3.1.4.- <i>Equipo de post-procesamiento térmico.</i>	54
3.2.- METODOLOGÍA DE TRABAJO.	55
3.2.1.- <i>Proceso de impresión.</i>	56
3.2.2.- <i>Post-procesado químico y térmico.</i>	57

<b>4.- TRABAJO REALIZADO Y RESULTADOS OBTENIDOS. ....</b>	<b>59</b>
4.1.- OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE IMPRESIÓN.....	59
4.1.1.- <i>Perfil de impresión de partida.</i> .....	59
4.1.2.- <i>Primeros pasos y ajustes de máquina iniciales.</i> .....	60
4.1.3.- <i>Optimización perfil de velocidades de impresión y parámetros del filamento.</i> .....	63
4.1.4.- <i>Optimización de los parámetros de impresión para la obtención de sólidos rellenos. ...</i>	73
4.1.5.- <i>Valores orientativos para el micro-paso en el eje Z de la impresora.</i> .....	79
4.1.6.- <i>Resumen del perfil de parámetros optimizado para el proceso de impresión.</i> .....	82
4.2.- OPTIMIZACIÓN DEL POST-PROCESO QUÍMICO Y TÉRMICO. ....	83
4.2.1.- <i>Descripción de las operaciones de post-procesado aplicadas.</i> .....	84
4.2.2.- <i>Optimización del número de capas inferiores.</i> .....	87
4.2.3.- <i>Optimización del número de perímetros.</i> .....	90
4.2.4.- <i>Optimización de los parámetros de relleno.</i> .....	93
4.2.5.- <i>Optimización del número de capas superiores.</i> .....	98
4.2.6.- <i>Resumen del perfil optimizado para las tareas de post-procesado y su comprobación.</i>	98
4.3.- RESUMEN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS DE FABRICACIÓN. ....	101
4.4.- COMPARATIVA FINAL DE RESULTADOS. ....	103
4.4.1.- <i>Norma ISO 52902:2023.</i> .....	104
4.4.2.- <i>Probetas en PLA y resultados.</i> .....	111
4.4.3.- <i>Probetas en cerámica técnica y resultados.</i> .....	118
4.4.4.- <i>Correcciones y aspectos a tener en cuenta extraídos de los resultados.</i> .....	125
4.4.5.- <i>Comparativa entre ambas tecnologías.</i> .....	129
4.4.6.- <i>Conclusiones de la comparativa</i> .....	132
<b>5.- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS. ....</b>	<b>135</b>
5.1.- DEMOSTRADOR FINAL DE PROYECTO.....	135
5.2.- CONCLUSIONES DEL PROYECTO. ....	137
5.3.- LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....	138
<b>6.- PLANIFICACIÓN TEMPORAL.....</b>	<b>141</b>
<b>7.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>142</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. ESQUEMA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN MEDIANTE ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA) (ADDITIVELY, 2015, COMO SE CITÓ EN TORREBLANCA, 2016).	22
FIGURA 2.2. ESQUEMA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN MEDIANTE FDM (ADDITIVELY, 2015, COMO SE CITÓ EN TORREBLANCA, 2016).	22
FIGURA 2.3. ESQUEMA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN MEDIANTE POLYJET (ADDITIVELY, 2015, COMO SE CITÓ EN TORREBLANCA, 2016).	23
FIGURA 2.4. ESQUEMA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN MEDIANTE SINTERIZADO SELECTIVO CON LÁSER (SLS) (ADDITIVELY, 2015, COMO SE CITÓ EN TORREBLANCA, 2016).	24
FIGURA 2.5. ESQUEMA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN MEDIANTE INYECCIÓN DE AGLUTINANTE (ADDITIVELY, 2015, COMO SE CITÓ EN TORREBLANCA, 2016).	35
FIGURA 3.1. INTERFAZ PARA GEOMETRÍA Y PARÁMETROS GENERALES DEL SOFTWARE PRUSASLICER (ELABORACIÓN PROPIA).	48
FIGURA 3.2. INTERFAZ PARA PROCESO DE LAMINACIÓN DEL SOFTWARE PRUSASLICER (ELABORACIÓN PROPIA).	49
FIGURA 3.3. INTERFAZ PARA CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE IMPRESIÓN DEL SOFTWARE PRUSASLICER (ELABORACIÓN PROPIA).	50
FIGURA 3.4. IMPRESORA ORIGINAL PRUSA I3 MK3S+ (ELABORACIÓN PROPIA).	51
FIGURA 3.5. FILAMENTO NANO E ZETAMIX ALÚMINA (AL100-BA) (ZETAMIX, S.F.).	52
FIGURA 3.6. EQUIPO DE ULTRASONIDOS SONOSWISS SW3H (SONOSWISS, 2024)	53
FIGURA 3.7. SISTEMA EMPLEADO PARA LA REALIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DE DESBANDERIZADO QUÍMICO (ELABORACIÓN PROPIA).	54
FIGURA 3.8. HORNO NABERTHERM PARA POST-PROCESOS TÉRMICOS (ELABORACIÓN PROPIA).	55
FIGURA 4.1. PROBETA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDADES Y DE LOS PARÁMETROS DEL FILAMENTO EN PRUSASLICER (ELABORACIÓN PROPIA).	65
FIGURA 4.2. CROQUIS PARA LA MEDICIÓN DEL ESPESOR DE PARED (ELABORACIÓN PROPIA).	65
FIGURA 4.3. RESULTADO DE LA 1ª ITERACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	67
FIGURA 4.4. RESULTADO DE LA 2ª ITERACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	68
FIGURA 4.5. RESULTADO DE LA 3ª ITERACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	70
FIGURA 4.6. RESULTADO DE LA 4ª ITERACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	71
FIGURA 4.7. RESULTADO DE LA 5ª ITERACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	72
FIGURA 4.8. PROBETA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE CUERPOS SÓLIDOS EN PRUSASLICER (ELABORACIÓN PROPIA).	75
FIGURA 4.9. RESULTADO FINAL Y PUNTOS INTERMEDIOS DE LA 1ª ITERACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	77
FIGURA 4.10. RESULTADO FINAL Y PUNTOS INTERMEDIOS DE LA 2ª ITERACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	78
FIGURA 4.11. RESULTADO FINAL Y PUNTOS INTERMEDIOS DE LA 3ª ITERACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA).	79
FIGURA 4.12. PROBETA EMPLEADA PARA LA OBTENCIÓN DE VALORES ORIENTATIVOS PARA EL MICRO-PASO EN EL EJE Z DE LA IMPRESORA (ELABORACIÓN PROPIA).	80
FIGURA 4.13. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VALORES PARA EL MICRO-PASO EN EL EJE Z (ELABORACIÓN PROPIA).	81

FIGURA 4.14. PROBETA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS INFERIORES.....	88
FIGURA 4.15. RESULTADOS, TRAS IMPRESIÓN, DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS INFERIORES (ELABORACIÓN PROPIA). .....	88
FIGURA 4.16. RESULTADOS, TRAS POST-PROCESAMIENTO, DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS INFERIORES (ELABORACIÓN PROPIA). .....	89
FIGURA 4.17. RESULTADOS, TRAS IMPRESIÓN, DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE PERÍMETROS (ELABORACIÓN PROPIA). .....	91
FIGURA 4.18. RESULTADOS, TRAS POST-PROCESAMIENTO, DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE PERÍMETROS (ELABORACIÓN PROPIA). .....	92
FIGURA 4.19. PROBETA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RELLENO (ELABORACIÓN PROPIA).....	94
FIGURA 4.20. RESULTADOS, TRAS IMPRESIÓN, DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL PORCENTAJE DE RELLENO (ELABORACIÓN PROPIA). .....	94
FIGURA 4.21. RESULTADOS, TRAS POST-PROCESAMIENTO, DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL PORCENTAJE DE RELLENO (ELABORACIÓN PROPIA). .....	95
FIGURA 4.22. RESULTADOS, TRAS IMPRESIÓN, DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL TIPO DE PATRÓN DE RELLENO (ELABORACIÓN PROPIA). .....	97
FIGURA 4.23. RESULTADOS, TRAS POST-PROCESAMIENTO, DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL TIPO DE PATRÓN DE RELLENO (ELABORACIÓN PROPIA). .....	97
FIGURA 4.24. RESULTADOS, TRAS IMPRESIÓN, DE LA OBTENCIÓN DE UNA CAJA COMPLETA (ELABORACIÓN PROPIA).....	99
FIGURA 4.25. RESULTADOS, TRAS POST-PROCESAMIENTO, DE LA OBTENCIÓN DE UNA CAJA COMPLETA (ELABORACIÓN PROPIA).....	100
FIGURA 4.26. CROQUIS DE LAS MEDICIONES A REALIZAR SOBRE LOS ARTEFACTOS LINEALES, CÓDIGO A (ELABORACIÓN PROPIA). .....	106
FIGURA 4.27. CROQUIS DE LAS MEDICIONES A REALIZAR SOBRE LOS ARTEFACTOS PARA EL EJE Z, CÓDIGO B (ELABORACIÓN PROPIA). .....	107
FIGURA 4.28. CROQUIS DE LAS MEDICIONES A REALIZAR SOBRE LOS ARTEFACTOS PARA LA RESOLUCIÓN DE PINES, CÓDIGO C (ELABORACIÓN PROPIA). .....	108
FIGURA 4.29. CROQUIS DE LAS MEDICIONES A REALIZAR SOBRE LOS ARTEFACTOS PARA LA RESOLUCIÓN DE AGUJEROS, CÓDIGO D (ELABORACIÓN PROPIA). .....	108
FIGURA 4.30. CROQUIS DE LAS MEDICIONES A REALIZAR SOBRE LOS ARTEFACTOS PARA LA RESOLUCIÓN DE NERVIOS, CÓDIGO E (ELABORACIÓN PROPIA). .....	109
FIGURA 4.31. CROQUIS DE LAS MEDICIONES A REALIZAR SOBRE LOS ARTEFACTOS PARA LA RESOLUCIÓN DE RANURAS, CÓDIGO F (ELABORACIÓN PROPIA). .....	109
FIGURA 4.32. ARTEFACTOS LINEALES FABRICADOS EN PLA (ELABORACIÓN PROPIA). .....	112
FIGURA 4.33. ARTEFACTO PARA EL EJE Z FABRICADO EN PLA (ELABORACIÓN PROPIA). .....	113
FIGURA 4.34. ARTEFACTOS PARA RESOLUCIÓN DE PINES FABRICADOS EN PLA (ELABORACIÓN PROPIA). .....	114
FIGURA 4.35. ARTEFACTO PARA LA RESOLUCIÓN DE AGUJEROS FABRICADO EN PLA (ELABORACIÓN PROPIA).....	115
FIGURA 4.36. ARTEFACTOS PARA LA RESOLUCIÓN DE NERVIOS FABRICADOS EN PLA (ELABORACIÓN PROPIA). .....	116

FIGURA 4.37. ARTEFACTOS PARA LA RESOLUCIÓN DE RANURAS FABRICADOS EN PLA (ELABORACIÓN PROPIA).....	117
FIGURA 4.38. PROBETA PARA EL ACABADO SUPERFICIAL FABRICADO EN PLA (ELABORACIÓN PROPIA).....	118
FIGURA 4.39. ARTEFACTOS LINEALES FABRICADOS EN ALÚMINA (ELABORACIÓN PROPIA).....	119
FIGURA 4.40. ARTEFACTO PARA EL EJE Z FABRICADO EN ALÚMINA (ELABORACIÓN PROPIA). ....	120
FIGURA 4.41. ARTEFACTOS PARA RESOLUCIÓN DE PINES FABRICADOS EN ALÚMINA (ELABORACIÓN PROPIA). ....	121
FIGURA 4.42. ARTEFACTO PARA LA RESOLUCIÓN DE AGUJEROS FABRICADO EN ALÚMINA (ELABORACIÓN PROPIA). ....	122
FIGURA 4.43. ARTEFACTOS PARA LA RESOLUCIÓN DE NERVIOS FABRICADOS EN ALÚMINA (ELABORACIÓN PROPIA). ....	123
FIGURA 4.44. ARTEFACTOS PARA LA RESOLUCIÓN DE RANURAS FABRICADOS EN ALÚMINA (ELABORACIÓN PROPIA). ....	124
FIGURA 4.45. PROBETA PARA EL ACABADO SUPERFICIAL FABRICADO EN ALÚMINA (ELABORACIÓN PROPIA). ....	125
FIGURA 4.46. COMPARATIVA DEL EFECTO TORSOR SEGÚN PARÁMETROS DE INFLUENCIA (ELABORACIÓN PROPIA).....	126
FIGURA 4.47. TRAYECTORIAS A REALIZAR EN LA CAPA ORIGEN DEL PROBLEMA (ELABORACIÓN PROPIA). ....	127
FIGURA 4.48. PUNTOS DE ENTRADA-SALIDA DEL CABEZAL DE EXTRUSIÓN EN LA CADA A ESTUDIAR (ELABORACIÓN PROPIA). ....	128
FIGURA 5.1. BOQUILLA TIG, DEMOSTRADOR FINAL (ELABORACIÓN PROPIA).....	135
FIGURA 5.2. MONTAJE DE LA BOQUILLA EN LA PISTOLA DEL EQUIPO TIG (ELABORACIÓN PROPIA). ....	136
FIGURA 6.1. PLANIFICACIÓN TEMPORAL SEGUIDA DURANTE LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO (ELABORACIÓN PROPIA).....	141

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN BÁSICOS UTILIZADOS DE FORMA INVARIABLE. ....	60
TABLA 4.2. VELOCIDADES Y PARÁMETROS DEL FILAMENTO DE PARTIDA. ....	64
TABLA 4.3. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA 1ª ITERACIÓN. ....	66
TABLA 4.4. ESPESOR DE PARED EN LA 1ª ITERACIÓN. ....	67
TABLA 4.5. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA 2ª ITERACIÓN. ....	68
TABLA 4.6. ESPESOR DE PARED EN LA 2ª ITERACIÓN. ....	69
TABLA 4.7. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA 3ª ITERACIÓN. ....	69
TABLA 4.8. ESPESOR DE PARED EN LA 3ª ITERACIÓN. ....	70
TABLA 4.9. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA 4ª ITERACIÓN. ....	70
TABLA 4.10. ESPESOR DE PARED EN LA 4ª ITERACIÓN. ....	71
TABLA 4.11. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA 5ª ITERACIÓN. ....	72
TABLA 4.12. ESPESOR DE PARED EN LA 5ª ITERACIÓN. ....	73
TABLA 4.13. PERFIL DE VELOCIDADES DE IMPRESIÓN OPTIMIZADO. ....	73
TABLA 4.14. PARÁMETROS DE TRABAJO PARA LA 1ª ITERACIÓN. ....	76
TABLA 4.15. PARÁMETROS DE TRABAJO PARA LA 2ª ITERACIÓN. ....	77
TABLA 4.16. PARÁMETROS DE TRABAJO PARA LA 3ª ITERACIÓN. ....	78
TABLA 4.17. VALORES DEL MICRO-PASO EN EL EJE Z APLICADOS. ....	81
TABLA 4.18. PERFIL DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN OPTIMIZADOS TRAS EL ANÁLISIS DEL PROCESO DE IMPRESIÓN. ....	83
TABLA 4.19. ETAPAS DEL PROCESO DE DESBANDERIZADO TÉRMICO APLICADO. ....	86
TABLA 4.20. ETAPAS DEL PROCESO DE SINTERIZADO APLICADO. ....	86
TABLA 4.21. COEFICIENTES DE CORRECCIÓN DE ESCALA RECOMENDADOS POR EL FABRICANTE. ....	87
TABLA 4.22. PROBETAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS INFERIORES. ....	88
TABLA 4.23. CONDICIONES DEL DESBANDERIZADO QUÍMICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS INFERIORES. ....	89
TABLA 4.24. COMPROBACIÓN DE LA REDUCCIÓN EN MASA DE LAS PROBETAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE CAPAS INFERIORES. ....	89
TABLA 4.25. PROBETAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE PERÍMETROS. ....	91
TABLA 4.26. CONDICIONES DEL DESBANDERIZADO QUÍMICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE PERÍMETROS. ....	91
TABLA 4.27. COMPROBACIÓN DE LA REDUCCIÓN EN MASA DE LAS PROBETAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL NÚMERO DE PERÍMETROS. ....	92
TABLA 4.28. NUEVOS COEFICIENTES DE CORRECCIÓN DE ESCALA CORREGIDOS. ....	93
TABLA 4.29. PROBETAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PORCENTAJE DE RELLENO. ....	94
TABLA 4.30. CONDICIONES DEL DESBANDERIZADO QUÍMICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PORCENTAJE DE RELLENO. ....	95
TABLA 4.31. COMPROBACIÓN DE LA REDUCCIÓN EN MASA DE LAS PROBETAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PORCENTAJE DE RELLENO. ....	95
TABLA 4.32. PROBETAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL TIPO DE PATRÓN DE RELLENO. ....	96
TABLA 4.33. CONDICIONES DEL DESBANDERIZADO QUÍMICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL TIPO DE PATRÓN DE RELLENO. ....	97

TABLA 4.34. COMPROBACIÓN DE LA REDUCCIÓN EN MASA DE LAS PROBETAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL TIPO DE PATRÓN DE RELLENO. .....	97
TABLA 4.35. PERFIL DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN OPTIMIZADO PARA POST-PROCESAMIENTO DE PIEZAS. ....	99
TABLA 4.36. CONDICIONES DEL DESBANDERIZADO QUÍMICO PARA LA OBTENCIÓN DE UNA CAJA COMPLETA.....	99
TABLA 4.37. COMPROBACIÓN DE LA REDUCCIÓN EN MASA DE LA PROBETA PARA LA OBTENCIÓN DE UNA CAJA COMPLETA.....	100
TABLA 4.38. NUEVOS COEFICIENTES DE CORRECCIÓN DE ESCALA PARA LA NUEVA BOBINA DE FILAMENTO. ....	101
TABLA 4.39. PERFIL DE PARÁMETROS DE FABRICACIÓN OPTIMIZADOS TRAS EL ANÁLISIS DE LAS OPERACIONES DE POST-PROCESAMIENTO. .....	103
TABLA 4.40. PERFIL DE PARÁMETROS DE IMPRESIÓN UNIVERSAL PARA PLA. ....	112
TABLA 4.41. MEDIDAS ARTEFACTOS LINEALES (FABRICACIÓN EN PLA).....	113
TABLA 4.42. MEDIDAS ARTEFACTO PARA EJE Z (FABRICACIÓN EN PLA).....	114
TABLA 4.43. MEDIDAS ARTEFACTOS PARA RESOLUCIÓN DE PINES (FABRICACIÓN EN PLA).....	115
TABLA 4.44. MEDIDAS ARTEFACTO PARA RESOLUCIÓN DE AGUJEROS (FABRICACIÓN EN PLA).....	115
TABLA 4.45. MEDIDAS ARTEFACTOS PARA RESOLUCIÓN DE NERVIOS (FABRICACIÓN EN PLA).....	116
TABLA 4.46. MEDIDAS ARTEFACTOS PARA RESOLUCIÓN DE RANURAS (FABRICACIÓN EN PLA). ....	117
TABLA 4.47. MEDIDAS ARTEFACTOS LINEALES (FABRICACIÓN EN ALÚMINA). ....	120
TABLA 4.48. MEDIDAS ARTEFACTO PARA EJE Z (FABRICACIÓN EN ALÚMINA). ....	121
TABLA 4.49. MEDIDAS ARTEFACTOS PARA RESOLUCIÓN DE PINES (FABRICACIÓN EN ALÚMINA). ....	121
TABLA 4.50. MEDIDAS ARTEFACTO PARA RESOLUCIÓN DE AGUJEROS (FABRICACIÓN EN ALÚMINA). ....	122
TABLA 4.51. MEDIDAS ARTEFACTOS PARA RESOLUCIÓN DE NERVIOS (FABRICACIÓN EN ALÚMINA).....	123
TABLA 4.52. MEDIDAS ARTEFACTOS PARA RESOLUCIÓN DE RANURAS (FABRICACIÓN EN ALÚMINA).....	124
TABLA 4.53. CORRECCIONES SOBRE EL PERFIL DE FABRICACIÓN DEL FILAMENTO CERÁMICO.....	129
TABLA 4.54. COMPARATIVA DE MEDICIONES SOBRE ARTEFACTOS LINEALES.....	130
TABLA 4.55. COMPARATIVA DE MEDICIONES SOBRE ARTEFACTOS PARA EL EJE Z.....	131
TABLA 4.56. COMPARATIVA DE MEDICIONES SOBRE ARTEFACTOS PARA RESOLUCIÓN DE PINES.....	131
TABLA 4.57. COMPARATIVA DE MEDICIONES SOBRE ARTEFACTO PARA RESOLUCIÓN DE AGUJEROS.....	131
TABLA 4.58. COMPARATIVA DE MEDICIONES SOBRE ARTEFACTOS PARA RESOLUCIÓN DE NERVIOS.....	132
TABLA 4.59. COMPARATIVA DE MEDICIONES SOBRE ARTEFACTOS PARA RESOLUCIÓN DE RANURAS. ....	132
TABLA 5.1. MEDIDAS RELATIVAS A LA PRECISIÓN LOGRADA SOBRE LA BOQUILLA. ....	136

# **RELACIÓN DE ABREVIATURAS**

A continuación, se indica una relación que contiene las abreviaturas utilizadas a lo largo de la redacción de este documento, junto con su significado:

- **FDM:** Modelado por Deposición de Hilo Fundido.
- **PLA:** Ácido Poli-Láctico.
- **AM:** Fabricación Aditiva.
- **CAD:** Diseño Asistido por Computador.
- **STL:** “Standard Tessellation Language”.
- **SLA:** Estereolitografía.
- **PJ:** “PolyJet”.
- **SLS:** Sinterizado Selectivo con Láser.
- **DMSL:** Sinterizado Láser Directo en Metal.
- **DLP:** Impresión con Luz Directa.
- **LCM:** Modelado Cerámico basado en la Litografía.
- **ABS:** Acrilonitrilo Butadieno Estireno.
- **TIG:** “Tungsten Inert Gas”.

**MEMORIA**



# 1.- Hipótesis de partida y alcance.

## 1.1.- MOTIVACIÓN DEL TRABAJO.

Las tecnologías de impresión 3D, también conocidas como tecnologías de fabricación aditiva, están cada vez más presentes en el mundo industrial. Las aplicaciones en las que se emplean este tipo de procesos están aumentando de forma exponencial gracias a que permiten el modelado de piezas con geometrías complejas, acarreado un coste de proceso relativamente bajo. Estas técnicas sufren una continua adaptación a los requerimientos presentes de la sociedad, lo que se refleja en el progresivo aumento en el número de sectores industriales que están comenzando a utilizar estos procedimientos para la llevar a cabo la producción de sus piezas como, por ejemplo, sectores tan popularizados como el automovilístico, el aeroespacial, el militar o el biomédico.

La tecnología de impresión 3D mediante Modelado por Deposición de Hilo Fundido, técnicamente conocida como FDM, es un proceso totalmente asentado en la fabricación de piezas con materiales plásticos en la industria a nivel mundial. Sin embargo, la investigación y experimentación sobre el empleo de materiales diferentes a los convencionales ha derivado en un aumento de las posibilidades que puede llegar a tener este procedimiento técnico.

De esta forma, surge una tecnología de impresión por FDM que permite la producción de elementos tridimensionales empleando un filamento plástico con carga cerámica (partículas de alúmina, zirconia, entre otras). Esto ha provocado que este tipo de modelado pueda competir con otros procesos de fabricación aditiva con cerámicas, gracias a la reducida complejidad técnica que requiere el manejo de las máquinas empleadas para la impresión y el post-procesado, así como el reducido coste que supone la aplicación de esta tecnología en referencia al resto de metodologías.



## **1.2.- HIPÓTESIS DE PARTIDA.**

Este proyecto de investigación pretende analizar la viabilidad tecnológica, geométrica y dimensional de los procesos de fabricación aditiva mediante impresión por FDM empleando filamentos de matriz plástica cargados con partículas cerámicas de alúmina, así como sus posibles limitaciones en todos los niveles anteriormente mencionados y sus aplicaciones más favorables. Para ello no sólo se tendrá que estudiar el comportamiento de dicho procedimiento durante la impresión de los modelos 3D, si no también cómo responden estas ante la aplicación de las diferentes operaciones de post-procesado necesarias para completar la fabricación de piezas funcionales.

Consecuentemente, con este trabajo se pretende considerar y contrastar la hipótesis de que estos filamentos cerámicos, mediante el empleo de la tecnología de impresión 3D por FDM, son viables para la obtención de buenos resultados de cara a la fabricación de piezas de carácter industrial que se ajusten a las limitaciones del material y del proceso productivo.

## **1.3.- ALCANCE.**

Tras el estudio de todas las operaciones que intervienen en este proceso productivo de piezas cerámicas (impresión, post-procesado químico y post-procesado térmico), se pretende obtener un perfil de parámetros de fabricación, con el que se puedan optimizar todas las anteriores. Dicho perfil será estimado, en primera estancia, para la impresión de los modelos 3D, siendo revisado y corregido más adelante, atendiendo a las tareas que completan la fabricación de este tipo de piezas (tareas de post-procesado). Todo ello, siempre teniendo en consideración las posibles limitaciones geométricas y tecnológicas que pueden surgir durante la realización del estudio experimental.



#### **1.4.- RESUMEN DE CONTENIDO.**

Este documento se ha dividido en siete capítulos, los cuáles ayudarán a estructurar el desarrollo de lo expuesto en los puntos anteriores. Además de este apartado, donde se explican la hipótesis de partida y el alcance del proyecto, también se incluye una parte dedicada a los objetivos concretos y la relación con la situación actual de estas técnicas productivas. En ella, se introduce al lector en el campo de la fabricación aditiva, la impresión 3D con cerámicas técnicas y, más concretamente, el modelado de piezas mediante tecnología FDM utilizando dichos materiales.

Por otro lado, se incluye un apartado donde se expone la metodología de trabajo que se va a seguir y los instrumentos, equipos y materiales que se van a emplear durante la realización del proyecto. Así como un capítulo en el que se describe el procedimiento práctico realizado y los resultados que se han podido extraer de este. Para completar el análisis de este sistema de fabricación, también se realizará una comparación entre este y una tecnología mucho más convencional, como es la impresión FDM con PLA (“Ácido Poli-Láctico”).

Además, con el objetivo de completar el proyecto, se ha añadido un apartado en el que se explican las conclusiones que se han podido extraer tanto de la parte teórica como de la parte práctica y experimental durante la realización de este. Junto a ello, se incluyen posibles líneas futuras de investigación en la materia. Para finalizar se comentará la planificación temporal seguida y las referencias bibliográficas utilizadas en este trabajo.



## **2.- Objetivos concretos y relación con el estado actual.**

### **2.1.- OBJETIVOS CONCRETOS.**

Con el presente trabajo se pretende incidir en el desarrollo de la impresión 3D en cerámica técnica, mediante el modelado por FDM. Este se organizará en torno a los objetivos que se exponen a continuación y que serán la base del desarrollo del estudio posterior:

1. Estudio de las diferentes etapas en las que se puede dividir el proceso de obtención de una pieza. Entre ellas, se analizarán: las variables características que gobiernan la operación de impresión empleando filamentos cerámicos y el control de las operaciones de post-procesado que serán requeridas para la poder producir piezas cerámicas funcionales.
2. Estudio de la viabilidad técnica del proceso en relación a los diferentes parámetros que miden el grado de satisfacción de las piezas resultantes. Entre ellos, se considerarán: la calidad superficial, la precisión dimensional a nivel de tolerancias y la capacidad de resolución del sistema de fabricación objeto de análisis.
3. Derivado del objetivo anterior, será necesario determinar una serie de probetas y demostradores para poder establecer un estudio experimental sobre esta tecnología y el procedimiento a seguir para el análisis de los resultados.
4. Como resultado final del trabajo, se pretende obtener un perfil de parámetros de fabricación para la obtención de piezas tridimensionales en cerámica técnica mediante tecnología FDM. Esta permitirá una producción que mantenga una buena calidad tanto a nivel geométrico (espesores mínimos de pared, geometrías



realizables...), como a nivel dimensional (capacidad de resolución, precisión...). Todo ello teniendo en cuenta las diferentes limitaciones tecnológicas que pueden llegar a surgir a lo largo del proceso de fabricación.

## **2.2.- INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN ADITIVA.**

### **2.2.1.- Concepto de fabricación aditiva.**

El término fabricación aditiva, también conocida como “Additive Manufacturing” (AM) en inglés, hace referencia desde el punto de vista técnico al conjunto formado por todas las tecnologías existentes para procedimientos de impresión 3D. A partir de este tipo de procesos se obtienen objetos tridimensionales por aportación de material (Jorquera, 2016). Esto se consigue mediante la manipulación de carácter micrométrico de la materia prima para ser posteriormente depositada de forma precisa y estratificada, formando multitud de capas que, una vez finalizado el proceso, darán lugar a la geometría final de la pieza (Zahera, 2012).

Cada una de estas capas corresponde a una sección transversal distinta dentro del modelo 3D del objeto a fabricar. De esta forma, las tecnologías de impresión 3D no implican la sustracción de material (técnicas sustractivas) ni la utilización de preformas (técnicas conformativas), sino que se obtiene el producto final partiendo siempre de una geometría virtual (Hopkinson, 2006, como se citó en Zahera, 2012).

### **2.2.2.- Procedimiento previo necesario para la obtención de piezas mediante impresión 3D.**

Como se ha mencionado en el apartado anterior, la fabricación aditiva se basa en la impresión de diferentes capas de forma sucesiva, donde cada una de ellas se corresponde con las diferentes secciones en las que se puede dividir el objeto 3D contenido en el archivo CAD (“Diseño Asistido por Computador”). A nivel práctico, este procedimiento no se puede considerar ideal, ya que cada una de las capas que componen la pieza tiene un espesor finito, que derivará en una aproximación al modelo, cuya fidelidad dependerá del valor que se defina



para dicha dimensión. De esta forma, es importante tener en cuenta el proceso previo al modelado 3D que especifica cómo van a ser las capas a realizar durante la impresión y, por lo tanto, como van a ser las secciones en las que se va a dividir la geometría virtual (Muro et al., 2021).

De esta manera, independientemente del fabricante de la máquina empleada y de la tecnología que se empleará para el proceso, se pueden distinguir ciertas fases previas comunes a todos los procedimientos de fabricación aditiva. Estas se exponen a continuación:

- **Obtención de un modelo 3D digital.**

Esta fase se realiza normalmente a través de un sistema CAD. Sin embargo, en la actualidad, estas geometrías virtuales también pueden ser obtenidas mediante softwares de modelado orgánico que permiten alcanzar geometrías más complejas. Por otro lado, esta tarea puede llevarse a cabo empleando ingeniería inversa, con la que se puede conseguir un modelo 3D de un objeto físico ya existente, mediante la generación de una nube de puntos y una malla que la envuelve adoptando la forma requerida (Hernández-Castellano et al., 2018).

- **Conversión a formato “.STL” (“Standard Tessellation Language”).**

En esta fase, se transforma el modelo CAD a un formato que pueda ser leído por la máquina. En esta conversión se representa mediante una malla triangular la superficie contenida en el archivo original, donde a medida que aumenta la densidad de los triángulos que la forman, la resolución y el resultado de la pieza final mejorará. En contraparte, si dicha variable se incrementa demasiado, los tiempos de procesamiento y fabricación de la operación pueden llegar a ser excesivos (Hernández-Castellano et al., 2018).

- **Seccionado del modelo mediante software “Slicer”.**

En esta última parte del pre-proceso de impresión, se secciona el modelo STL en las diferentes capas que llegarán a conformar el elemento tridimensional. En este punto se pueden



ajustar todos los parámetros de los que va a depender la fabricación de la pieza, tales como la orientación de la pieza, el material de soporte (en caso de que fuese necesario), la velocidad y la temperatura de extrusión, entre otros. Además, una vez que estos se han definido, se pueden conocer ciertos datos sobre la producción, como por ejemplo la duración del proceso y la cantidad de materia prima aportada. Sin embargo, se debe considerar que cada material y tecnología tienen sus propias limitaciones intrínsecas por lo que será necesario tenerlas en cuenta para seleccionar la configuración de parámetros con la que se va a trabajar (Hernández-Castellano et al., 2018).

### **2.2.3.- Principales tecnologías de fabricación aditiva.**

Debido a la gran evolución que ha experimentado este tipo de procesos de fabricación, hoy en día existen numerosas tecnologías de impresión 3D. Todas ellas son diferentes entre sí, con limitaciones y posibilidades propias, y cada una de ellas dota a las piezas conformadas de unas características determinadas. A continuación, se exponen algunas de las principales tecnologías de fabricación aditiva que se emplean en la actualidad.

- **Estereolitografía (SLA).**

Esta tecnología fue el precedente que sentó las bases de los procedimientos de fabricación aditiva. En este tipo de procesos, cuyo esquema de funcionamiento se muestra en la Figura 2.1, la máquina irá formando secuencialmente capas sólidas y horizontales gracias a la foto-polimerización del material de impresión. Este está compuesto fundamentalmente por una resina foto-reactiva, la cual inicialmente se encuentra en estado líquido, pero se solidifica cuando un rayo de luz ultravioleta emitido por el sistema incide sobre ella. Durante el modelado, estas capas se van adhiriendo unas a otras, originando tridimensionalmente el objeto a fabricar (Torreblanca, 2016).

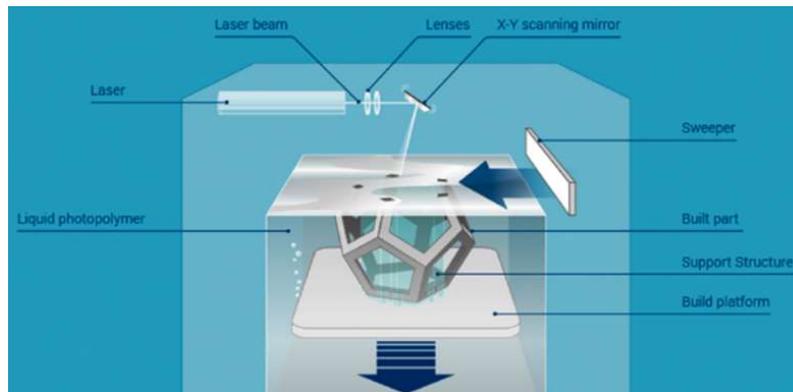


Figura 2.1. Esquema del proceso de fabricación mediante estereolitografía (SLA) (Additively, 2015, como se citó en Torreblanca, 2016).

- **Modelado por Deposición de Hilo Fundido.**

Este procedimiento, también conocido como FDM, hace posible la fabricación de modelos tridimensionales partiendo del uso de diferentes materiales originalmente en estado sólido (en forma de filamentos o “pellets”). Durante el proceso, esquematizado en la Figura 2.2, estos son empujados a través de una boquilla metálica, la cual se calienta a una temperatura por encima del punto de fusión de la materia prima gracias a la acción de una serie de resistencias colocadas a lo largo del extrusor de la máquina. Una vez esta se funde, se deposita formando capas sucesivas y horizontales que se irán adhiriendo unas a otras hasta dar lugar al objeto 3D requerido (Torreblanca, 2016).

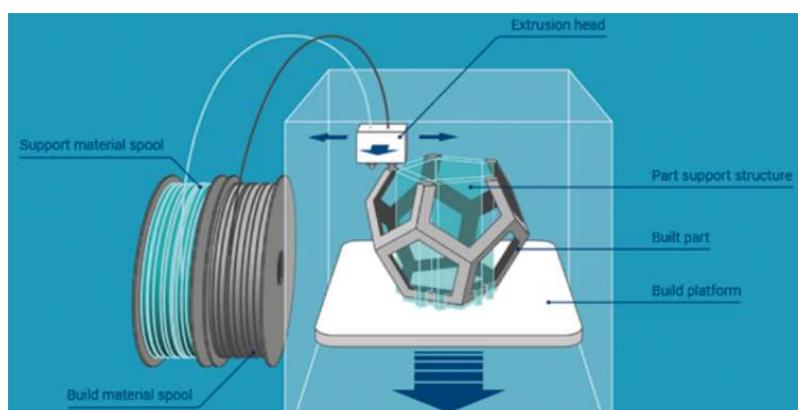


Figura 2.2. Esquema del proceso de fabricación mediante FDM (Additively, 2015, como se citó en Torreblanca, 2016).

- **Tecnología PolyJet (PJ).**

Durante el proceso de impresión 3D mediante tecnología PolyJet, cuyo funcionamiento esquematiza la Figura 2.3, el cabezal de la máquina va depositando de forma sucesiva y horizontal capas de un material foto-sensible y fundamentalmente polimérico, mientras este aún permanece en estado líquido. Seguidamente, unas lámparas ultravioletas las curan y solidifican, mientras se van depositando sobre la plataforma de trabajo, de forma que cada una de ellas se adhiere a la capa posterior, hasta completar la estructura tridimensional sólida requerida (Torreblanca, 2016).

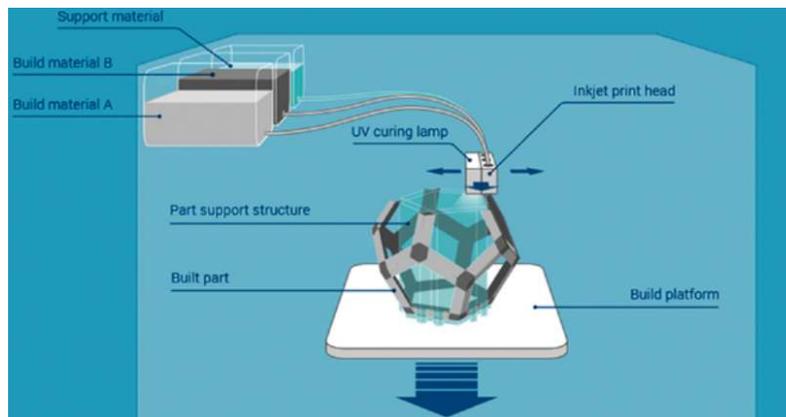


Figura 2.3. Esquema del proceso de fabricación mediante PolyJet (Additively, 2015, como se citó en Torreblanca, 2016).

- **Sinterizado Selectivo con Láser (SLS).**

Esta tecnología permite la fabricación en multitud de materiales (poliméricos, cerámicos o vidrios) de piezas con excelentes propiedades mecánicas. En este proceso, cuyo esquema de funcionamiento se expone en la Figura 2.4, se parte de un material de impresión en polvo que se deposita sobre una plataforma calentada a una temperatura levemente inferior al punto de fusión de la materia prima. Más adelante, un láser de CO<sub>2</sub> de alta potencia y precisión, la va fundiendo de forma selectiva, dando lugar a capas secuenciales y horizontales, que se irán fusionando unas con otras, hasta obtener el objeto sólido requerido. Este procedimiento también

se puede aplicar con metales en polvo (aluminio, acero, titanio o aleaciones), dando lugar a lo que se conoce como Sinterizado Láser Directo en Metal (DMLS) (Torreblanca, 2016).

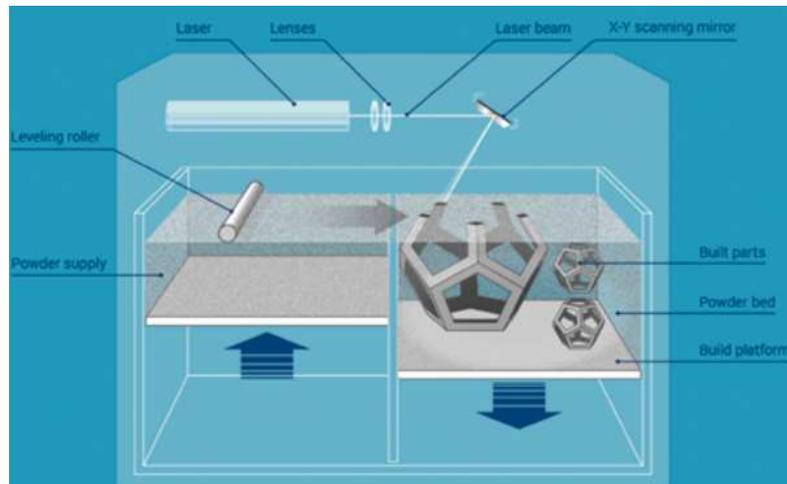


Figura 2.4. Esquema del proceso de fabricación mediante sinterizado selectivo con láser (SLS) (Additively, 2015, como se citó en Torreblanca, 2016).

#### 2.2.4.- Ventajas y desventajas de la fabricación aditiva.

Los procesos de fabricación aditiva están actualmente en auge y cada vez son más las aplicaciones en las que estos intervienen. Esto se debe a que presentan numerosas ventajas frente a otras tecnologías, no solo a nivel económico, sino también desde el punto de vista técnico. Sin embargo, el empleo de estos procedimientos acarrea una serie de inconvenientes que son necesarios considerar antes de escoger la impresión 3D para realizar una operación.

Dentro de las ventajas que supone la fabricación aditiva, la versatilidad, la capacidad de personalización y la flexibilidad son una de las características más importantes, ya que con una sola impresora 3D se pueden modelar una gran variedad de productos con la posibilidad de reajustar la geometría de partida sin tener que cambiar o reprogramar todos los parámetros que controlan el proceso. De esta forma, cuando se varía la pieza que la máquina está produciendo, esta tendrá la capacidad de adaptarse al cambio y considerar dichas modificaciones en la fabricación de los siguientes modelos de la misma tipología (Fang et al., 2020).



Otra de las principales conveniencias de los procesos de impresión 3D es la capacidad de obtener piezas de gran complejidad geométrica sin tener que asumir ningún sobrecoste por ello. El motivo reside en que el modelado se realiza directamente desde un archivo CAD, sin necesidad de dividirlo en varias fases, cambiar la orientación o posición del elemento a imprimir durante la producción o emplear utillajes específicos adaptados a cada uno de los objetos tridimensionales que se están fabricando (Hernández-Castellano et al., 2018).

Todo lo mencionado anteriormente permite a los usuarios que emplean estos métodos tener una gran libertad de diseño, ya que existen pocas limitaciones geométricas que restrinjan la funcionalidad de las piezas. Además, otro aspecto importante es la capacidad que tienen estas máquinas para fabricar mecanismos de forma directa, sin implicar procesos de montaje o ensamblaje posteriores, así como la posibilidad de realizar impresiones multimaterial que dotan al objeto final de mejores propiedades mecánicas y diferentes acabados, entre otras características (Hernández-Castellano et al., 2018).

Desde otra perspectiva, los procesos de fabricación aditiva también conllevan una serie de inconvenientes que son necesarios considerar a la hora de implementar estas técnicas. Uno de los principales es la baja capacidad productiva que tiene este tipo de tecnologías. Pese a que no requieren que se divida la tarea en múltiples fases, la impresión en sí es notablemente lenta (con tiempos de operación que pueden llegar a ocupar varios días) lo que implica ratios de producción bajos (Hernández-Castellano et al., 2018).

La explicación de lo mencionado anteriormente se puede encontrar al considerar que el acabado de la pieza depende del espesor de las capas que la componen (a menor grosor, mejor calidad superficial y mayor fidelidad con respecto al modelo virtual). Esto implica la necesidad de un mayor número de pasadas del cabezal durante la impresión y, consecuentemente, un mayor tiempo de operación. De esta forma, es crucial buscar el equilibrio entre las características superficiales buscadas y tiempo que se quiere invertir en la fabricación. Además, otra desventaja importante del empleo de la mayoría de estas tecnologías es el requisito de realizar una fase de post-procesado, así como que las dimensiones finales están limitadas por el tamaño de la máquina (Hernández-Castellano et al., 2018).



## **2.3.- INTRODUCCIÓN A LA IMPRESIÓN 3D EN CERÁMICA.**

### **2.3.1.- Concepto de Impresión 3D en cerámica técnica.**

La tecnología de modelado mediante impresión 3D en cerámica técnica es un proceso de fabricación aditiva muy innovador que permite la producción de piezas de dicho material, dotadas de las características ventajosas que implican el resto de las tecnologías de la rama. Por ejemplo, la complejidad geométrica y técnica, la eficiencia y la precisión dimensional. Al igual que con el resto de las materias primas, esta metodología crea formas tridimensionales depositando capas de material con carga cerámica (originalmente en forma de polvo o pasta) de manera sucesiva y secuencial. Así, mientras estas se disponen unas encima de otras, se fusionan entre sí obteniendo como resultado final un objeto sólido (López, 2023).

El término cerámica técnica o avanzada hace referencia a los diferentes materiales de esta tipología que son utilizados actualmente en la realización de actividades industriales con aplicaciones tecnológicas concretas. Estos compuestos tienen un comportamiento mecánico mejorado, de forma que presentan algunas de sus propiedades potenciadas, como su resistencia o su comportamiento eléctrico y térmico. Esto hace que sea posible emplearlas para la fabricación de piezas que desempeñen tareas exigentes, como las relacionadas con el sector automovilístico, aeroespacial, militar o la industria biomédica (Beamler, 2020).

El motivo del surgimiento de esta tecnología es que los procesos de fabricación tradicionales, como pueden ser las operaciones de mecanizado por arranque de material, implican una gran complejidad para la obtención de piezas hechas de cerámica debido a su alta dureza, abrasión y fragilidad (sobre todo para grandes dimensiones). Además, con este tipo de materia prima también puede resultar complejo alcanzar niveles altos de precisión al trabajar con geometrías complejas. Por lo tanto, la impresión 3D resulta una buena alternativa para sortear la problemática de la producción de modelos cerámicos. (Beamler, 2020).



### **2.3.2.- Evolución de la fabricación con cerámica.**

Originalmente, la fabricación de elementos hechos con materiales cerámicos surgió en las civilizaciones de la Antigua Grecia, principalmente para la producción de piezas de vajilla y otras aplicaciones de carácter alimentario. Estos primeros utensilios estaban conformados por una mezcla de barro, arena y agua, o también de arcilla (presente de forma natural en el entorno), los cuales posteriormente se sometían a altas temperaturas (alrededor de los 500°C) para que se secasen y solidificasen, manteniendo la forma que se le había dado durante el modelado (Contreras, 2019).

Varios siglos adelante, alrededor del S.XIX, el empleo de estos compuestos cerámicos experimentó un gran aumento debido a que el sector industrial comenzó a ser conocedor de la excelente capacidad de aislamiento térmico y eléctrico que estos presentaban. Además de las anteriores características, estos materiales fueron muy utilizados en aplicaciones que requerían de propiedades mecánicas y geométricas de gran resolución (Contreras, 2019).

Sin embargo, como se mencionó en el apartado anterior, las capacidades de estos materiales no podían ser explotadas al completo debido a que las tecnologías tradicionales de fabricación presentaban ciertas dificultades al trabajar con materia prima cerámica. Es por esto que el empleo de dichos materiales para la producción de piezas industriales no se comenzó a ver hasta la actualidad. Ahora, gracias al uso de las máquinas de impresión 3D se pueden obtener geometrías complejas con las excelentes propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas que garantizan las cerámicas técnicas (Contreras, 2019).

Por último, cabe mencionar los resultados obtenidos en un estudio en el año 2017 de la firma “Smartech Publishing” que garantiza el establecimiento de la impresión con cerámica técnica como uno de los principales procesos de fabricación aditiva que se utilizarán en el sector industrial a partir de 2025. Este defiende que sobre el año 2028 este sector generará, a nivel mundial, alrededor de 3.6 mil millones de dólares a través de esta tecnología, sufriendo un aumento exponencial (Smartech Publishing, 2017, como se citó en Contreras, 2019).



### **2.3.3.- Materiales empleados en la impresión 3D en cerámica técnica.**

Para la realización de procesos de fabricación aditiva con cerámica técnica se emplean suspensiones de partículas de este tipo de materiales que están dispersas en una base de compuesto plástico polimérico que es el que ayuda a que la materia prima empleada en la impresión se solidifique y adopte la forma requerida, quedando las moléculas embebidas y retenidas dentro de dicha matriz (Contreras, 2016).

La formulación de dichas suspensiones es fundamental para el control del proceso, ya que estas deben tener las propiedades adecuadas (en cuanto a su comportamiento reológico, viscosidad y el tamaño de las partículas dispersas) para que la impresión pueda llevarse a cabo. Además, ha de tenerse en cuenta que este aspecto tiene influencia sobre las especificaciones técnicas que las piezas tendrán una vez fabricadas. Por otro lado, debido al carácter abrasivo de la cerámica y a su elevada densidad, es necesario considerar a la hora de producir estos compuestos la posible sedimentación de las partículas de este material dentro de la matriz polimérica (Contreras, 2016).

Este tipo de compuestos se pueden dividir en dos categorías: materiales cerámicos con y sin óxido. La diferencia entre ambos reside en la presencia o no (respectivamente) de al menos un átomo de oxígeno en las moléculas que los componen, debido a la inserción de fibras de óxido en la mezcla cerámica inicial (Barros, 2023).

Mientras que los materiales sin óxido presentan mejores capacidades en cuanto a conductividad eléctrica y dureza, los compuestos con presencia de estas fibras simplifican la fabricación debido a que tienen una mayor facilidad para fundirse y sintetizarse (Barros, 2023).

A continuación, se exponen las cerámicas técnicas más utilizadas dentro de los procesos de fabricación aditiva, agrupadas en las dos categorías mencionadas anteriormente:



- **Materiales cerámicos con presencia de óxido.**

Las cerámicas con alúmina (óxido de aluminio) son las más establecidas dentro del sector de la fabricación aditiva y son las más rentables. Las propiedades que fundamentan su empleo son su alta dureza (triplica el valor atribuido al acero inoxidable), su alta resistencia a la corrosión y su buen desempeño como aislante eléctrico (Beamler, 2020). Además, como su punto de fusión está por encima de los 2000°C, se trata de compuestos muy resistentes a las altas temperaturas y al choque térmico. Otras de sus capacidades son la buena conductividad térmica y biocompatibilidad (respuesta adecuada a la exposición al medio biológico). Todo lo anterior hace que estos materiales tengan diversas aplicaciones, entre las que se encuentran la producción de prótesis biomédicas o su empleo en el sector aeroespacial (Barros, 2023).

Por otro lado, también se deben considerar las cerámicas con circonita (dióxido de zirconio). Estas tienen una conductividad térmica relativamente baja. Además de presentar una alta resistencia a la propagación de grietas internas, también ofrecen unas propiedades equilibradas de dureza y tenacidad, haciendo que presenten una menor fragilidad que otros compuestos similares (Beamler, 2020). Una característica peculiar de este material es su excelente capacidad para conducir la electricidad cuando se calienta por encima de los 1000°C. Incluso presenta cierta inercia a nivel químico, lo que hace que posea una moderada resistencia al ataque corrosivo de otros elementos. Por todos estos aspectos, las cerámicas con circonita se utilizan para aplicaciones relacionadas con la fabricación de joyería, el sector biomédico y, sobre todo, el sector dental (Barros, 2023).

Si las dos moléculas anteriormente descritas se combinan, se puede obtener un compuesto que se conoce como circonita reforzada con alúmina. Se trata de un material con varias aplicaciones en sector industrial, pero gracias a su excelente biocompatibilidad, dureza, resistencia al desgaste y al choque térmico, este permite numerosas opciones en el sector dental, donde se utiliza en la creación de implantes bucales, piezas dentales y partes que requieran de una alta resistencia al desgaste (Barros, 2023).



Por último, también podemos encontrar los compuestos con silicore (dióxido de sílice) que tienen excelente resistencia mecánica y buena estabilidad frente a cambios bruscos de temperatura. Sin embargo, estas cerámicas destacan por su alta porosidad, lo que facilita enormemente los procesos de desmolde de piezas con geometrías complejas y la lixiviación (separación química de partes solubles y no solubles) (Barros, 2023). Por lo tanto, se trata de materiales recurrentemente empleados en la elaboración de carcasas de moldeo para elementos propios de actividades relacionadas con el sector energético y aeroespacial (Beamler, 2020).

- **Materiales cerámicos sin presencia de óxido.**

Dentro de las cerámicas sin presencia de óxido, las primeras que se pueden identificar son aquellas que contienen carburos de silicio. Este material tiene una gran dureza (hasta cuatro veces el valor atribuido al acero inoxidable), pero cuando en el compuesto el silicio se infiltra en el carbono, esta propiedad aumenta drásticamente. Además, presenta una excepcional capacidad de resistencia frente a la corrosión (Beamler, 2020). Por otro lado, su buena conductividad térmica, resistencia al choque térmico y su alta resistencia mecánica a altas temperaturas, hacen que estas cerámicas sean muy útiles en aplicaciones del sector automotriz y energético, donde se utilizan para la fabricación de piezas de bombas, frenos y embragues (Barros, 2023).

Otro carburo ampliamente empleado en este tipo de compuestos es el carburo de boro. Debido su alto punto de fusión (por encima de los 3000°C), estos tienen una muy buena resistencia a la corrosión, al desgaste, a la compresión y a las altas temperaturas. Se trata de una cerámica generalmente orientada a aplicaciones propias del sector aeroespacial, como la fabricación de toberas o revestimientos refractarios, y del sector militar, donde se utiliza en la producción de blindajes de chalecos y carros de combate (Beamler, 2020). Dentro de la fabricación aditiva, estos compuestos suelen aplicarse a través de procesos de impresión mediante tecnología FDM, donde se mezclan con una parte plástica para generar el filamento requerido (Barros, 2023).



Por último, en relación a este tipo de cerámicas también es común el empleo de diferentes compuestos de nitrógeno, como son el nitruro de silicio o el nitruro de aluminio. El primero tiene buenas propiedades de resistencia al desgaste, a la corrosión y a la abrasión; esto, unido a su buen desempeño como aislante eléctrico y su baja humectabilidad (grado de repulsión superficial del material frente a otros metales fundidos), hacen que el nitruro de silicio sea ampliamente utilizado para la producción de semiconductores y tubos de calefacción. Por otro lado, en lo que respecta al nitruro de aluminio, este presenta una buena conductividad térmica, junto con un excelente aislamiento eléctrico, lo que hace que sean materiales especialmente orientados al sector electrónico (Barros, 2023).

#### **2.3.4.- Tecnologías de impresión 3D en cerámica técnica.**

Como se mencionó anteriormente, debido a la alta fragilidad y dureza de estos materiales, la producción de piezas cerámicas mediante las tecnologías tradicionales de fabricación resulta muy compleja. Por este motivo, el sector industrial ha recurrido a la fabricación aditiva como solución a dicho problema. En apartados anteriores de este trabajo se describieron de forma general las principales tecnologías de fabricación aditiva empleadas en la industria, sin tener en cuenta la materia prima del proceso. La siguiente enumeración expone, de forma más precisa, las diferentes técnicas de impresión 3D empleadas al trabajar con cerámicas técnicas:

- **Estereolitografía con pasta cerámica.**

Esta tecnología de fabricación aditiva es notablemente similar a las técnicas de estereolitografía convencionales aplicadas con materiales plásticos (ver esquema de funcionamiento de la Figura 2.1). Sin embargo, la diferencia radica en que las primeras utilizan una pasta cerámica como materia prima en lugar de emplear una resina plástica. Esta está compuesta por una parte en estado sólido de partículas o polvo cerámico en suspensión dentro de una base resinosa líquida con características poliméricas y foto-sensibles, que funciona como aglutinante en la mezcla (Pabón, 2022).



Durante la impresión de piezas empleando este tipo de tecnología, un láser de rayos ultravioleta va depositando capas de forma secuencial mediante la foto-polimerización de la parte plástica de la materia prima, de manera que las partículas cerámicas en suspensión quedan atrapadas en la matriz sólida. Es importante tener en cuenta que para que la producción sea eficaz, debido a que la resina se encuentra en forma líquida antes de ser radiada, el modelo (siempre que sea necesario en cuanto a dimensiones) debe ir acompañado de una serie de columnas o soportes que aguanten su peso y eviten posibles deformaciones en el resultado final (Rodríguez, 2001).

Una vez que el proceso de impresión finaliza, las piezas resultantes se conocen como “piezas en verde” y no presentan las propiedades finales requeridas. Para otorgarles dichas características estas se someten a una fase de post-procesado, donde además de curar el modelo para solidificarlo por completo, se elimina la parte plástica de la pieza y se mejora el comportamiento mecánico a través de técnicas como el desbanderizado y el sinterizado (Campello et al., 2021). Por último, es conveniente mencionar que un procedimiento muy similar al descrito es el que aplican otras tecnologías de fabricación aditiva con cerámicas menos utilizadas en el sector, como pueden ser la Impresión con Luz Directa (DLP) o el Modelado Cerámico basado en la Litografía (LCM) (Beamler, 2020).

En cuanto a sus ventajas, esta tecnología da lugar a piezas con precisiones dimensionales y acabados superficiales muy buenos, empleando para ello un equipo relativamente sencillo en cuanto a su manipulación y mantenimiento. Por otro lado, este proceso también implica una serie de inconvenientes íntimamente relacionados con el post-procesado requerido para obtener modelos funcionales, ya que esta operación conlleva tiempos y costes altos, lo que eleva el gasto económico general necesario para el desarrollo del producto (Cañedo-Argüelles y Domínguez, 1999).

- **SLS con polvo cerámico.**

La tecnología de fabricación aditiva mediante sinterización selectiva por láser puede ser aplicada con una amplia variedad de materiales, desde plásticos hasta metales, incluyendo los



que son de interés para este trabajo, los polvos de cerámicas técnicas. Estos se encuentran inicialmente en estado sólido, mezclados con una parte de partículas de fosfato que funcionan como aglutinante en la mezcla, con forma micro esférica cuyo tamaño ha de ser homogéneo. Esto es importante de cara a garantizar una buena permeabilidad en plataforma de la máquina, así como un proceso de quemado más uniforme y de menor duración. Otra consideración importante es que el polvo ha de ser distribuido de manera pareja sobre la cama caliente, evitando acumulaciones, y el material de impresión debe estar una temperatura un poco por debajo de la correspondiente a su punto de sinterización (Rodríguez, 2001).

El proceso (ver esquema de funcionamiento de la Figura 2.4) comienza cuando la máquina deposita sobre su plataforma una fina capa del polvo de impresión ya precalentado, para que, seguidamente, el cabezal proyecte un haz láser sobre ella, fusionando de forma selectiva las partes que se requieren para construir una sección plana de la pieza a fabricar. Después, sin retirar de la superficie de trabajo el material que no había sido sinterizado durante el paso anterior, esta se vuelve a cubrir con otra capa de materia prima, sobre la que el rayo de luz vuelve a incidir fundiendo a su paso una nueva sección que se anexionará a la anterior (Cañedo-Argüelles y Domínguez, 1999).

Las etapas descritas anteriormente se van repitiendo de forma secuencial hasta completar la totalidad del objeto tridimensional, momento en el cual se elimina todo el polvo cerámico que no había sido sinterizado durante la fabricación. El motivo por el cual este no se extrae hasta el final del proceso productivo es porque a medida que se va completando la impresión este material residual va sirviendo a la pieza como soporte (en caso de que sea necesario) para realizar la siguiente capa del modelado, por ejemplo, para afrontar la existencia de zonas huecas o partes en voladizo (Cañedo-Argüelles y Domínguez, 1999).

Dentro de las principales ventajas de esta tecnología de impresión 3D, este proceso no implica una etapa de post-procesado (ataque químico o calentamiento) para poder obtener un resultado plenamente funcional, ya que las partículas de material cerámico no requieren la presencia de una base de carácter plástico para poder adoptar la forma sólida requerida. Sin embargo, esta técnica también puede suponer una serie de inconvenientes como, por ejemplo,



los largos tiempos de calentamiento del polvo y de enfriamiento de la pieza que son necesarios respetar durante la producción o la porosidad considerablemente alta que poseen los modelos que se obtienen mediante este método (Cañedo-Argüelles y Domínguez, 1999).

- **Inyección de aglutinante o “Binder Jetting” para cerámicas.**

Esta tecnología posibilita la fabricación de piezas conformadas conjuntamente de material polimérico y cerámico, manteniendo una buena definición y precisión, mientras que permite imprimir en diferentes colores de forma simultánea con cierta facilidad. Mediante ésta tecnología se van uniendo capas de dicho compuesto gracias a la mezcla de la parte cerámica en polvo, conocida como “powder”, junto con un producto adhesivo de tipo polimérico que funciona como aglutinante, que recibe el nombre de “binder” (Torreblanca, 2016).

En este proceso las propiedades tanto del material cerámico como del aglutinante polimérico son cruciales para obtener una pieza completamente funcional. La mezcla de partículas sólidas debe tener el tamaño adecuado y estar distribuidas uniformemente, para favorecer la impresión. Además, el aglutinante debe encontrarse en una concentración en la que se pueda disponer del nivel correcto de viscosidad, densidad y tensión superficial, para que no se creen taponamientos en el cabezal de la máquina. Por otro lado, este se debe dispersar en un área con dimensiones específicas para que las capas se puedan adherir unas a otras durante la fabricación (Costa, 2019).

Al inicio del proceso, cuyo esquema de funcionamiento se muestra en la Figura 2.5, se distribuye sobre la bandeja de la máquina una capa de material cerámico y se compacta con la ayuda de un rodillo (proceso mecanizado y automático). Seguidamente, se pulveriza de forma selectiva (mediante gotas de alrededor de 80 micrómetros de diámetro) el aglutinante polimérico a través de un cabezal de impresión similar al que utilizan las impresoras 2D convencionales. Más adelante, se vuelve a aplicar una nueva pasada de polvo sólido y se compacta de nuevo con el rodillo, de manera que ambas capas se adhieren entre sí. Estos pasos se van repitiendo de sucesivamente hasta conseguir la fabricación de la pieza completa (Contreras, 2023).

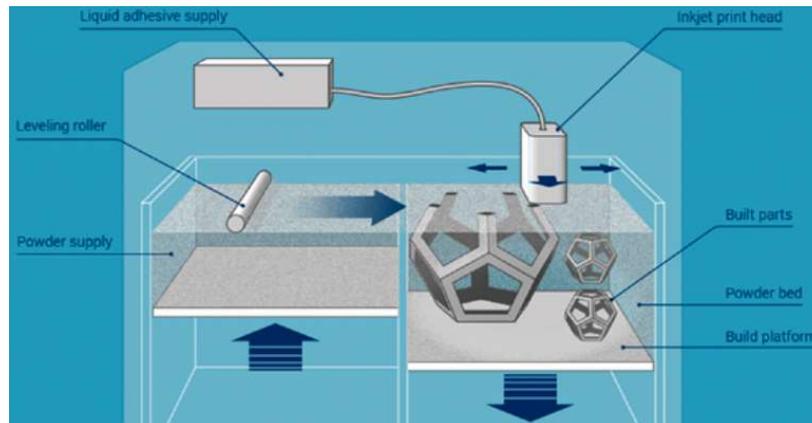


Figura 2.5. Esquema del proceso de fabricación mediante inyección de aglutinante (Additively, 2015, como se citó en Torreblanca, 2016).

Después del proceso de fabricación, se aplican sobre las piezas dos tratamientos de post-procesado para poder obtener un resultado plenamente funcional. Primeramente, estas se someten a una etapa de polimerización a bajas temperaturas para aumentar la resistencia mecánica y terminar de solidificar el aglutinante. Además, con el objetivo de reducir la porosidad del modelo impreso, este pasa a través de una segunda tarea de acabado, que consiste en la inyección de un fluido para rellenar dichos poros y reforzar la estructura del objeto tridimensional (Contreras, 2023).

El uso de esta tecnología conlleva tiempos cortos de operación, también permite fabricar con cierta facilidad piezas de geometrías complejas, manteniendo una buena calidad superficial y precisión. Estos procesos también permiten la impresión en colores y texturas diferentes dentro de un mismo modelo. Por el contrario, su aplicación también acarrea ciertos aspectos negativos, como la baja resistencia mecánica y alta fragilidad de las piezas, el requerimiento de varias etapas de post-procesado y la complejidad que supone el mantenimiento de estas máquinas, debido a los diferentes requisitos y condiciones de trabajo que son necesarios a tener en cuenta para cada uno de los materiales empleados (Torreblanca, 2016).



- **“PolyJet” con cerámicas.**

Esta tecnología permite la obtención de piezas, mediante máquinas que comparten un parecido razonable con las impresoras 2D convencionales. Los resultados presentan un buen acabado superficial y una buena precisión dimensional. De esta forma, pueden fabricarse paredes de grosor reducido y geometrías complejas, disponiendo de una amplia gama de materiales de partida a emplear. En este aspecto, en la producción de objetos cerámicos mediante PJ, se utiliza como materia prima una mezcla que combina una base líquida de polímero fotosensible, que reacciona endureciéndose frente a la exposición ante radiación ultravioleta, en la que se encuentran suspendidas pequeñas partículas sólidas de algún compuesto cerámico que mejorarán las propiedades finales de la pieza (León et al., 2019).

Durante el proceso de impresión (ver Figura 2.3), uno de los dos cabezales que tiene la máquina va depositando la mezcla de materiales descrita anteriormente (contenida en su cartucho) sobre la plataforma de trabajo. Mientras esto ocurre, el segundo cabezal del dispositivo, que es el encargado de emitir la luz ultravioleta con la que el foto-polímero reacciona, va endureciendo la capa dispuesta, de manera que estas se adhieren unas a otras hasta conformar la pieza al completo. Debido a que a medida que el procedimiento se va realizando el compuesto polimérico se va solidificando bajo la luz ultravioleta, no se requiere de un posterior proceso de curado para terminar de unir el material (León et al., 2019).

En cuanto a las ventajas que presenta esta tecnología, aparte de que no necesita un post-proceso de curado, las piezas fabricadas obtenidas siguiendo esta metodología tienen una buena resolución, pueden presentar geometrías complejas, muestran una superficie con buen acabado y resistente al impacto. Además, este proceso permite la impresión en varios materiales de forma simultánea. Sin embargo, el alto coste de operación, los requerimientos especiales que debe cumplir la materia prima para que dé lugar a resultados satisfactorios y la necesidad del modelado de soportes para sujetar la pieza durante su fabricación, pueden considerarse como algunos de los principales inconvenientes que presenta la aplicación de esta tecnología (León et al., 2019).



- **FDM con filamento cerámico.**

El proceso de impresión 3D en cerámica mediante tecnología FDM, se lleva a cabo de una forma muy similar al procedimiento correspondiente a la fabricación de piezas con filamentos plásticos poliméricos (ver Figura 2.2). Esta técnica y todo lo que conlleva se describirá de forma extensiva y detallada más adelante en este trabajo.

Sin embargo, si conviene definir cuáles son sus ventajas y desventajas frente a otras tecnologías de fabricación aditiva en cerámica. En lo relativo a los aspectos positivos, las máquinas de impresión 3D por FDM son muy compactas, sencillas y versátiles de cara a poder utilizarse con varios materiales (sin generar residuos). Además, no conlleva el uso de un cabezal láser, por lo que el precio de operación no se ve encarecido por ello. Por otro lado, el empleo de estas técnicas conlleva ciertas limitaciones en la producción de piezas de gran tamaño, parcialmente macizas y en el dimensionamiento vertical (Cañedo-Argüelles y Domínguez, 1999).

## **2.4.- IMPRESIÓN 3D EN CERÁMICA TÉCNICA MEDIANTE FDM.**

### **2.4.1.- Material de partida para la impresión FDM con cerámicas técnicas.**

El material de partida para la impresión de piezas con tecnología FDM en cerámica es similar al que se emplean en los procesos FDM convencionales. Sin embargo, en el caso de los primeros, se utilizan filamentos plásticos con cierta carga de partículas cerámicas.

Estos filamentos están compuestos por una parte plástica polimérica, como puede ser el PLA o el ABS (“Acrilonitrilo Butadieno Estireno”), y otra parte de partículas cerámicas que pueden ser de tipología muy diversa. Esta es elegida en función de la aplicación que tendrá la pieza final y de las propiedades que se le quiere otorgar, como la resistencia a altas temperaturas, la conductividad térmica y/o eléctrica o un comportamiento mecánico determinado. Las formulaciones de las proporciones en las que se presenta cada una de las partes se estudian de



forma previa a la producción del filamento para obtener unos resultados que sean funcionales para la impresión, pudiendo variar el nivel de integración de las partículas cerámicas distribuidas a lo largo de la matriz plástica, en función de la incorporación en mayor o menor medida dichas partículas (Rojas-Lozano et al., 2019).

Previo al proceso de obtención de este tipo de filamentos, ambas partes deben combinarse en una mezcladora de forma homogénea para que el producto pueda ser funcional. Debido a lo anterior, después de la producción tanto del compuesto cerámico como del plástico polimérico que se va a utilizar en la impresión, ambos materiales se trituran para conseguir una mezcla lo más uniforme posible, donde se pueda observar partículas de igual tamaño. De esta forma, la materia prima ya estaría preparada para ser sometida a la extrusión del filamento (Rojas-Lozano et al., 2019).

Durante este proceso de extrusión, la mezcla de partículas plásticas y cerámicas en forma de polvo se introduce en un dispositivo con un husillo a través de una tolva. Debido al movimiento de este, el material va avanzando por el interior de la cavidad hasta llegar a un espacio donde se funde, gracias a la acción de unas resistencias que mantienen la temperatura en esa zona en un valor constante un poco por encima del punto de fusión de la fase plástica. Esto, junto a la progresiva reducción de sección que se da en el interior del sistema, provoca la extrusión de ambos materiales de forma homogénea, de manera que tras un corto periodo de enfriamiento se obtiene el filamento plástico con carga cerámica que se empleará en la impresión mediante FDM (García, 2022).

#### **2.4.2.- Impresoras FDM para cerámicas técnicas.**

En la impresión de piezas en cerámica técnica con tecnología FDM, pese a que el filamento difiere de forma notable respecto del utilizado durante los procesos más convencionales, las máquinas empleadas para la realización de ambos son las mismas. Los parámetros que controlan la fabricación serán diferentes en función de la tarea a desempeñar, así como la fase de post-procesado que se deberá aplicar. Sin embargo, los dispositivos FDM mantienen la misma estructura en todos los casos.



En este tipo de máquinas, lo primero que uno se puede encontrar es el sistema mecánico, que es la estructura externa que la rodea protegiendo las partes móviles y delicadas, y otorgando rigidez al conjunto. El sistema móvil está compuesto por tres motores paso a paso que permiten el movimiento sobre los tres ejes de desplazamiento de la impresora, y un cuarto motor (del mismo tipo) que será el encargado de regular la velocidad con la que el filamento entra en el cabezal. Además, estos dispositivos están dotados de un conjunto de finales de carrera que delimitan el rango de movimiento del extrusor y del sistema móvil, protegiendo ambas partes (Hiemenz y Stratasys, 2011).

Por otro lado, el cabezal está compuesto por tres elementos: el “hotend”, el sistema de ventilación y el extrusor. Este último introduce a presión el filamento en el primero mediante el motor paso a paso mencionado anteriormente. Por su parte, el hotend se puede dividir en tres partes claramente diferenciables: una zona superior que recibe el material de impresión desde el extrusor, una zona media cuyas aletas disipan el calor generado por las altas temperaturas que conlleva la fusión de la materia prima y que tienen como principal objetivo evitar el sobrecalentamiento del extrusor, y un cartucho calefactor que fundirá el filamento (Hiemenz y Stratasys, 2011).

El material fundido saldrá a presión por una boquilla cuyo diámetro de apertura determinará el espesor de las capas en las que se dividirá la pieza. Es preciso especificar que en estos procesos de fabricación con cerámicas será necesario utilizar una boquilla de acero reforzado para aumentar su resistencia al desgaste ante la gran capacidad abrasiva de las partículas de estos compuestos. El tercer elemento que compone el cabezal es un sistema de ventilación para ayudar en la tarea de disipación de calor, este se suele situar entre el extrusor y el hotend (Hiemenz y Stratasys, 2011).

A nivel térmico, a parte del incremento de temperatura generado en el hotend para la fusión del filamento, las impresoras FDM también poseen una cama caliente, constituida por una resistencia calefactora plana, que facilita la adhesión de la primera capa de material a la plataforma de trabajo, así como la adhesión entre las diferentes capas que conforman la pieza. Ambos sistemas están controlados por una serie de sensores de temperatura que mandan la



información al ordenador de la máquina para que esta pueda regular el proceso, manteniendo el valor requerido de forma constante en cada uno de ellos. Por último, dentro de la cámara de la impresora, también se puede instalar un segundo sistema de ventilación que ayude a conseguir una distribución de temperaturas lo más homogénea y uniforme posible (Hiemenz y Stratasys, 2011).

#### **2.4.3.- Proceso de impresión mediante FDM en cerámica técnica.**

Previo a cualquier proceso de impresión por FDM, es conveniente que la máquina realice un procedimiento de calibración para que tenga la referencia de donde se sitúa la punta del hotend en todo momento, entendiendo este punto como “origen de herramienta”. Este se realiza mediante el escaneado por puntos de la superficie de trabajo, mediante un palpador, que toma varias medidas de distancias sobre el eje Z, en un conjunto de coordenadas de puntos XY de la plataforma. Una vez realizado esta tarea, el cabezal purga una pequeña cantidad de materia prima, para eliminar cualquier posible impureza que haya podido quedar de fabricaciones anteriores. Tras esto, la máquina esta lista para comenzar la impresión (Prusa, 2022).

En la fabricación, la máquina comienza depositando unas primeras capas de material de soporte, que funcionarán de base para el modelo y evitarán que la pieza se despegue de la cama caliente en mitad del proceso. Durante la impresión, el cabezal se mueve en las coordenadas X e Y mientras deposita el hilo fundido ligeramente aplanado por su propio paso, cuando acaba una capa, este se para y la mesa desciende en el eje Z una pequeña distancia para que se continúe con el modelado de la siguiente. De la misma forma, se realiza la fabricación del resto de la pieza, imprimiendo soportes para la sujeción de las partes en voladizo y de cualquier otra parte que lo requiera (Badel et al., 2017).

La gran precisión y exactitud de las piezas fabricadas por FDM se debe a la excelente capacidad de coordinación que existe entre el proceso de alimentación del material de impresión y el movimiento del cabezal de extrusión. Ambas operaciones se retroalimentan para conseguir la extrusión de un hilo de material fundido con propiedades uniformes a lo largo de toda su



extensión, con un ancho de entre 0.20 y 0.97 milímetros y un alto que puede bajar hasta valores de alrededor de los 0.13 milímetros (Badel et al., 2017).

#### **2.4.4.- Post-procesado y acabado necesario.**

Al igual que en el resto de procesos de impresión por FDM, las piezas cerámicas resultantes deben someterse a la eliminación de todo el material de soporte que se ha empleado durante el procedimiento, tanto para el modelado de la base de la pieza, como para la sujeción de las partes en voladizo. Esta tarea, en función del compuesto plástico elegido para el filamento, se puede realizar mediante el empleo de métodos mecánicos en los que se aplica una fuerza de forma manual sobre los soportes o bien mediante un proceso más automatizado en el que estos se quitan dejando reposar la pieza en una solución de detergente en agua agitada (Badel et al., 2017).

Por otro lado, una vez finalizado el proceso de impresión, debido a que la materia prima utilizada consiste en un filamento que mezcla una parte de material cerámico y otra de plástico polimérico, las piezas obtenidas requieren un post-procesado que va más allá de la eliminación de los soportes. Este es un paso fundamental para lograr resultados plenamente funcionales. Las partículas plásticas se fundirán en el extrusor y, posteriormente, se solidificarán dotando al modelo de la forma sólida requerida. De esta forma, será necesario llevar a cabo un proceso mediante el cual se elimine el material plástico presente en la pieza tras su fabricación y otro que homogenice el resultado anterior, mejorando sus propiedades mecánicas (Contreras, 2016).

Las piezas se someten a un ataque químico y, posteriormente, a un tratamiento térmico para eliminar la matriz plástica, dejando a su paso una estructura cerámica porosa que presenta una fragilidad crítica, este proceso se conoce como desbanderizado. Posteriormente, las resultantes son llevadas a un horno para que se aglutinen y mejoren sus propiedades mecánicas, eliminando en la medida de lo posible la mayor cantidad de poros generados en la fase anterior. Consecuentemente, mediante este post-proceso que se conoce como sinterizado, los modelos adquieren un comportamiento mecánico mejorado y son plenamente funcionales para desempeñar la tarea para la que fueron desarrollados (Contreras, 2016).



Sin embargo, este proceso también afecta negativamente a la pieza. Además de que un fallo en sus parámetros de control, como el tiempo de inmersión en el baño químico o la temperatura a la que se realiza la sinterización, puede provocar un fallo crítico; cuando las impresiones pasan por el proceso de horneado, estas sufren una reducción dimensional drástica (aproximadamente un 20% del tamaño original) que, además, no tiene por qué ser proporcionalmente igual en cada una de sus direcciones. Por lo tanto, esto es algo que se debe considerar durante el diseño digital en el software CAD, teniendo en cuenta una serie de coeficientes de reducción (Contreras, 2016).

Una vez introducido el motivo de la necesidad de realizar este tipo de procesos posteriores a la fabricación de la pieza, a continuación, se describirá de forma más detallada el procedimiento a seguir durante cada una de estas fases, junto con sus principales parámetros y otras características que se deban considerar a la hora de someter los modelos cerámicos FDM a estas tareas de post-procesado.

- **Proceso de desbanderizado.**

El proceso de desbanderizado consiste en un ataque químico y un posterior tratamiento térmico sobre la pieza en verde, mediante los cuales se elimina la matriz plástica que funcionaba como aglutinante para adherir las partículas cerámicas unas a otras durante la fabricación. Antes de esto, será necesario eliminar el material de soporte que haya podido necesitar el modelo, así como cualquier tipo de imperfección superficial que no esté contemplada en el diseño 3D. Tras esto, se introducirá la pieza en el baño químico, cuya formulación y duración dependerá de la composición y naturaleza del compuesto que la conforma y de las dimensiones de esta. Después, se expondrá el resultado a la aplicación de altas temperaturas para completar la eliminación del aglutinante. Ambas fases de desbanderizado son de vital importancia para evitar la aparición de fallos críticos en los modelos (Campello et al., 2021).

Una vez que salen del desbanderizado, los modelos todavía no están dotados de sus propiedades finales, ya que este proceso sólo ha eliminado el aglutinante plástico, dejando la estructura cerámica al descubierto. Los enlaces entre las partículas siguen siendo débiles y,



debido al alto índice de porosidad de la pieza al haber eliminado el compuesto que las rodeaba, esta se habrá debilitado mucho y habrá perdido mucha resistencia mecánica (Campello et al., 2021).

Para poder estimar como se debe realizar el proceso de desbanderizado es importante tener en cuenta diferentes parámetros como la formulación del filamento de impresión, la composición química de la parte plástica, la geometría de la pieza, entre otros. Esta fase es considerada como una de las más críticas del proceso de impresión FDM con cerámicas, ya que una desviación en alguno de los anteriormente citados puede provocar desde grietas y deformaciones en el modelo, hasta incluso su rotura. Además, se trata de una operación que ocupa una buena parte de la duración de la fabricación mediante esta tecnología, por lo que se trata de una tarea lenta, que retrasa los tiempos productivos (Campello et al., 2021).

- **Proceso de sinterizado.**

Tras el proceso de desbanderizado es necesario someter al modelo a otro tratamiento térmico a una temperatura alta pero siempre por debajo del punto de fusión del material cerámico empleado como materia prima. De esta forma, se consigue aumentar la resistencia de los enlaces entre las partículas, a la vez que se compacta la pieza, se reduce la porosidad generada durante el post-procesado anterior y se aumenta su densidad. Como se mencionó anteriormente, esta operación conlleva una importante reducción de las dimensiones originales, que no es proporcionalmente igual en todas las direcciones (teniendo más importancia en el eje Z) y que se deberá tener en cuenta al procesar la geometría de la pieza (Campello et al., 2021).

De esta forma, se trata de un proceso crítico para la obtención de resultados funcionales y con las características finales necesarias. Los parámetros que definen el procedimiento a seguir son la temperatura de sinterizado y el tiempo durante el cual se va a someter la pieza a dicho tratamiento (generalmente se trata de un proceso lento que puede llevar varios días). Así, tanto la temperatura como la duración de este post-proceso pueden tener una gran influencia sobre la densidad, las propiedades mecánicas finales y la microestructura de los modelos fabricados (Campello et al., 2021).



Por ejemplo, hay estudios que demuestran que la densidad de la pieza irá aumentando con el tiempo y la temperatura de sinterizado, primeramente, de forma exponencial y a partir de cierto punto de forma lineal con una pendiente no muy crítica. Algo similar ocurre también en el caso del tamaño de grano y la porosidad (en este caso la evolución es inversa con la temperatura y el tiempo) (Liu et al., 2020).

Por último, cabe mencionar que este post-proceso de sinterizado es el último paso para la obtención de las piezas según esta metodología, a partir del cual estas adquieren su geometría y propiedades finales. Por lo tanto, se trata de una fase crucial, donde un fallo puede suponer que los productos no tengan las características requeridas en el diseño, obteniéndose resultados no funcionales que pueden llegar a presentar ciertos defectos estructurales. Además, se debe considerar que esta operación es lenta y ocupa, junto al desbanderizado, gran parte de la duración de la fabricación de cerámicas mediante tecnología FDM (Campello et al., 2021).

#### **2.4.5.- Aplicaciones y alcance la tecnología.**

Entre las principales aplicaciones de los procesos convencionales de impresión 3D con FDM se pueden encontrar la producción de modelos conceptuales, los cuales a partir de una secuencia iterativa permiten revisar y actualizar los diseños de una pieza y reducir los tiempos y costes de desarrollo del producto, y el modelado de prototipos precisos y plenamente funcionales, los cuales permiten llevar a cabo evaluaciones sobre un diseño y evitan el coste que supondría la realización de cambios de ingeniería posteriores a la fabricación. Sin embargo, en lo referido al FDM con cerámicas técnicas, las aplicaciones están más orientadas a la producción de herramientas para la fabricación y de productos ya terminados (Hiemenz y Stratasys, 2011).

Por una parte, esta tecnología permite la impresión de diferentes herramientas empleadas en otros procesos productivos como pueden ser los moldes, boquillas de equipos de soldeo, accesorios de corte o matrices. Esto, además de reducir el tiempo y el coste de los procesos de fabricación de una empresa, pueden llegar a mejorar su cadena de montaje, con sistemas de ensamblaje más eficientes (Hiemenz y Stratasys, 2011).



Además, una buena parte de las aplicaciones de la impresión 3D mediante FDM de materiales cerámicos es la obtención de productos ya terminados. En la elaboración de piezas de cerámica, las tecnologías de fabricación convencionales no presentan un rendimiento tan alto como las tecnologías de fabricación aditiva. Los productos resultantes de esta técnica están orientados a una inmensa variedad de sectores, como el automovilístico, el siderúrgico, el aeroespacial, el militar o el biomédico. En la mayoría de las situaciones, el tipo de material presente en el filamento, dependerá de las propiedades finales que se requieran y, por lo tanto, la aplicación que tendrá el objeto tridimensional es la que determinará el tipo de cerámica con la que la máquina va a trabajar (Hiemenz y Stratasys, 2011).



## **3.- Metodología de trabajo.**

### **3.1.- EQUIPAMIENTO EMPLEADO.**

Como se ha comentado en el capítulo anterior, para llevar a cabo la producción de una pieza por impresión 3D y, más concretamente, la de una fabricada mediante tecnología FDM en material cerámico técnico, es necesario tener a disposición un equipamiento determinado que posibilitará y facilitará las tareas a realizar.

El equipamiento que se elija para llevar a cabo las operaciones que engloba este sistema de fabricación permanecerá invariable para la obtención de todos los modelos que se van analizar en este proyecto, con el propósito de que los resultados extraídos de las probetas impresas estén lo menos afectados posible por los dispositivos empleados para su producción. De esta manera, es posible estudiar cada una de estas etapas en función, únicamente, de los parámetros que las gobiernan, evitando todos factores externos que dependan del equipo.

Consecuentemente, para la realización del proceso experimental, se elegirá un determinado equipamiento para cada uno de los softwares digitales, equipos de impresión y equipos de post-procesado que se exponen a continuación:

- Software de diseño CAD y de laminación.
- Impresora 3D por FDM y filamento de impresión.
- Equipo de post-procesado químico.
- Equipo de post-procesado térmico.

Para cada uno de los aspectos anteriores, se definirá tanto el equipamiento que se va a emplear, como las características de este. Así, se establecerá un conjunto de condiciones invariables y comunes a todas las piezas, bajo las que éstas serán obtenidas.



### **3.1.1.- Software de diseño CAD y de laminación.**

En este trabajo, se empleará un software de diseño CAD con el objetivo de iniciar los primeros pasos de la fabricación de las piezas, en los que se creará su geometría virtual. Así, se crea un archivo que contiene la información geométrica y dimensional, la cual se tratará y convertirá en un proceso posterior para obtener el modelo digital que se enviará a la máquina de impresión 3D para que pueda comenzar sus operaciones.

Para este proyecto, se ha decidido utilizar un software CAD conocido “SolidWorks”. Este se usará para el diseño 3D de aquellas piezas a fabricar, cuya geometría no pueda ser modelada dentro del propio software de laminación que se comentará más adelante. Por lo tanto, este software será el primer paso dentro de dicho proceso y el que ayudará a reflejar la información característica y propia de la geometría de la pieza.

Por otro lado, como se ha mencionado en el capítulo anterior, de manera previa a la impresión de una pieza por fabricación aditiva es necesario procesar el archivo digital que contiene su geometría, con el objetivo de adaptarlo a las exigencias y capacidades de la máquina. En esta operación, además de convertir el modelo digital procedente del software CAD a un formato que pueda ser interpretado por la impresora 3D, también se especifican todos los parámetros con los que se va a imprimir, así como otros aspectos cruciales dentro del proceso productivo, como pueden ser: los materiales comerciales de partida para el modelado 3D, el rango de velocidades del cabezal, el posible material de soporte que sea requerido o la necesidad de material extra para aumentar la adhesión de la pieza a la plataforma de trabajo.

Para el tratamiento de las geometrías virtuales de todas las piezas que se requerirán a lo largo de este proyecto se empleará el software de laminación propio de una de las empresas con más presencia en el sector de la fabricación aditiva como es Prusa, conocido como “PrusaSlicer” (versión 2.7.1 + win64). Mediante este programa, se procesarán los diseños digitales para que puedan ser interpretados por la máquina de impresión y se definirán los parámetros productivos para la obtención de cada pieza.

Dentro de este programa, se pueden visualizar las características geométricas de las piezas y las condiciones sobre las que se va a realizar su modelado como, por ejemplo, el material de partida, la impresora que se va a emplear y la separación que el extrusor dejará entre cada una de las capas que formarán dicha pieza (altura de capa). Además, se le pueden indicar al software unas primeras indicaciones sobre si se va a emplear material de soporte o algún tipo de estrategia para el aumento de la adherencia con la cama caliente, así como otras consideraciones relacionadas con los parámetros de relleno a aplicar (porcentaje y tipo de patrón). En el caso de las cerámicas, en esta parte es donde se especificarán los coeficientes de corrección de escala a tener en cuenta debido a la contracción en la pieza durante las etapas de post-procesado térmico. La Figura 3.1 refleja el interfaz del programa que corresponde a lo anteriormente descrito.

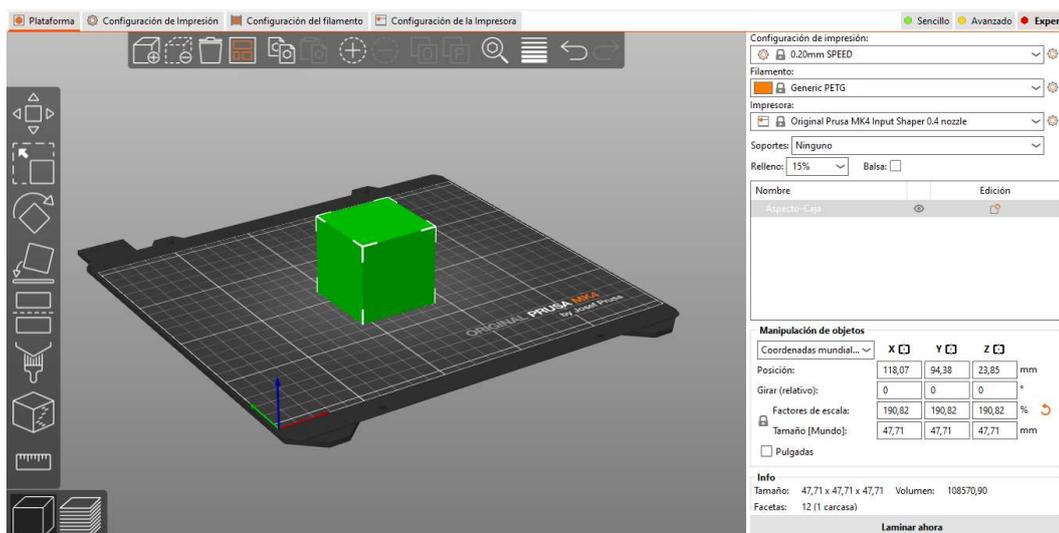


Figura 3.1. Interfaz para geometría y parámetros generales del software PrusaSlicer (Elaboración propia).

Por otro lado, este software también permite la visualización de cómo se va a llevar a cabo la impresión. De esta forma, no solo permite ver la manera en la que se distribuye el material fundido en cada una de las capas, sino que también permite conocer la trayectoria que seguirá el cabezal del dispositivo durante la deposición en cada una de ellas y la línea del código de programación que corresponde a dicho movimiento.

Esta información se completa con un detalle desglosado en el que se indican los tiempos de fabricación que conllevará cada una de las partes en las que el programa divide una pieza (balsa, soportes, perímetro, relleno...) y el porcentaje que estas ocupan dentro del proceso de impresión. La Figura 3.2 refleja el interfaz del programa que corresponde a lo anteriormente descrito.

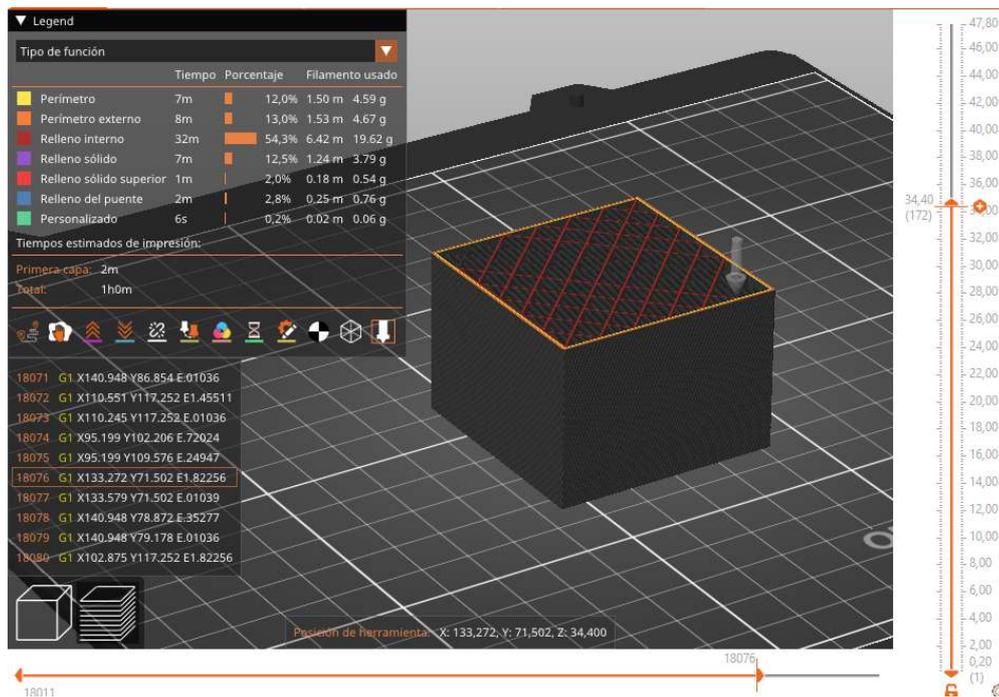


Figura 3.2. Interfaz para proceso de laminación del software PrusaSlicer (Elaboración propia).

Por último, como se comentó anteriormente, mediante este software se pueden configurar todos los parámetros que intervienen en el proceso de fabricación de una pieza, como pueden ser: las capas y perímetros, faldas y balsas, relleno, material de soporte, velocidades y temperaturas de trabajo, entre muchos otros campos. Esto hace que la impresión sea muy versátil y se pueda adaptar a las características de una geometría concreta, al mismo tiempo que eleva la complejidad de la operación al aumentar el número de parámetros que influyen en ella. La Figura 3.3 refleja el interfaz del programa que corresponde a lo anteriormente descrito.

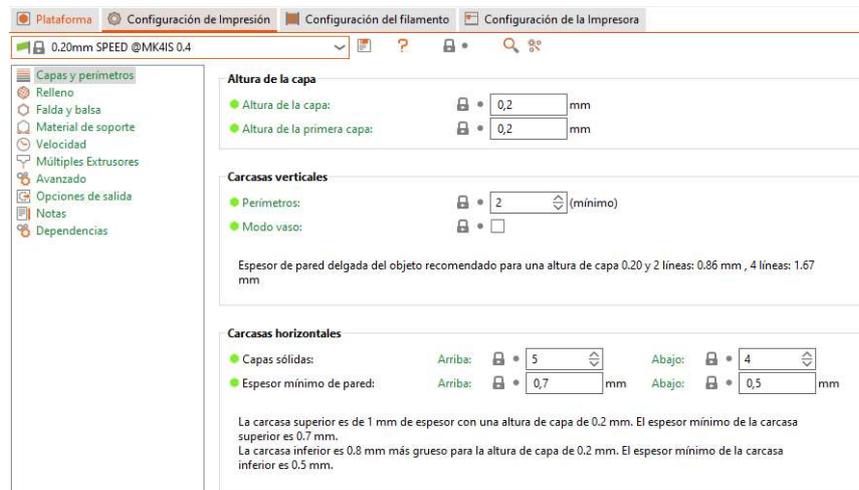


Figura 3.3. Interfaz para configuración de parámetros del proceso de impresión del software PrusaSlicer (Elaboración propia).

### 3.1.2.- Impresora 3D por FDM y filamento de impresión.

Uno de los pilares de cualquier proceso de fabricación aditiva es la máquina de impresión 3D a emplear. En el caso de la tecnología FDM, este dispositivo es el encargado de transformar el filamento de impresión, fundirlo y modelarlo, para dar forma al sólido que se quiere obtener. Esto se realiza en consonancia con los parámetros que fueron especificados en el paso anterior, durante la laminación de la geometría de la pieza contenida en un archivo digital. Por lo tanto, es de especial interés para que los resultados experimentales no se vean condicionados por fallos externos a la producción de las piezas, que la comunicación entre el software de laminación y la máquina de impresión 3D sea buena.

Por este motivo, en este proyecto se empleará una impresora 3D de la misma compañía que la que ha proporcionado el software de laminación utilizado para el tratamiento de las geometrías virtuales. De esta forma, se utilizará una impresora Prusa Original, modelo i3 MK3S+. El modelo a emplear no afectará a los resultados finales, ya que los parámetros de influencia son independientes de este aspecto. La Figura 3.4 muestra la configuración mecánica de este dispositivo. Como se puede ver, se trata de una impresora de tipo cartesiano, con tres ejes de movimiento, es decir, con tres grados de libertad.



Dos de esos ejes se encuentran sobre el mecanismo de movimiento del cabezal de extrusión (el eje Z para el acercamiento a la cama caliente y el eje X para el movimiento a izquierda y derecha), mientras que el último está incluido sobre el mecanismo de desplazamiento de la propia plataforma de trabajo (eje Y para movimientos hacia delante y hacia atrás de la cama caliente). Por otro lado, esta impresora cuenta con un extrusor (formado por las partes ya mencionadas en capítulos anteriores) que, como va a fabricar piezas a partir de filamentos con carga cerámica, incluirá una boquilla de acero reforzado para contrarrestar la alta abrasión de dicho material.

Además, en la Figura 3.4, se puede ver como esta impresora 3D dispone de un soporte para colocar cualquier tipo de filamento con el que se esté imprimiendo desde temperatura ambiente, como el PLA (material que se ve en la figura) o el filamento cerámico con el que se trabajará durante este proyecto. Sin embargo, también dispone de un pequeño contenedor que mantiene la bobina a una temperatura más elevada o más baja, para la impresión de materiales que requieran de estas condiciones como, por ejemplo, filamentos elásticos o aquellos con matriz plástica cargada con partículas de fibra de carbono.



Figura 3.4. Impresora Original Prusa i3 MK3S+ (Elaboración propia).

En cuanto al filamento de impresión que se empleará para el estudio de las capacidades de la tecnología FDM con cerámicas técnicas, la materia prima comercial utilizada para la producción de las piezas es el filamento Nanoe Zetamix Alúmina (Al100-BA), el cual se muestra en la Figura 3.5. Este está fabricado por la empresa Nanoe, referente en el sector de la impresión 3D con materiales cerámicos. Está compuesto por una mezcla formada por un 55% de aglutinante termoplástico polimérico (poli-olefina) y un 45% de polvo cerámico (alúmina u óxido de aluminio) con un tamaño de partícula menor de una micra, dando lugar a un filamento blanco, muy frágil y que se funde a temperaturas relativamente bajas (Zetamix, s.f.).



Figura 3.5. Filamento Nanoe Zetamix Alúmina (Al100-BA) (Zetamix, s.f.).

Este polvo de alúmina tiene una pureza del 99.95% aproximadamente (según fabricante), al que se le añaden ciertos aditivos para mejorar sus propiedades y comportamiento para ser impresas por FDM. Esto, unido al pequeño tamaño de grano que el fabricante es capaz de conseguir para que sea mezclado con el aglutinante plástico, hace que las piezas resultantes posean unas propiedades mecánicas mejoradas después del post-procesado. Los sólidos fabricados poseerán una alta resistencia al desgaste y a las altas temperaturas, gran dureza y estabilidad termodinámica y presentarán propiedades térmicas y eléctricas interesantes. Sin embargo, la desventaja que tiene este filamento es que se degrada y pierde sus propiedades al estar expuesto a las condiciones ambientales durante periodos de tiempo prolongados, por lo que será un aspecto importante a considerar durante la producción de las piezas cerámicas (Nanoe, 2023).

### 3.1.3.- Equipo de post-procesado químico.

Para llevar a cabo las operaciones de post-procesado químico (proceso de desbanderizado químico) se empleará un equipo de ultrasonidos de la marca SonoSwiss, modelo SW3H, como el que se muestra en la Figura 3.6. Este dispositivo permitirá elevar la temperatura del baño químico por encima de la temperatura ambiente del laboratorio y, gracias a la agitación que genera en el baño químico, permitirá aumentar la velocidad de eliminación del material plástico de las piezas.



Figura 3.6. Equipo de ultrasonidos SonoSwiss SW3H (SonoSwiss, 2024)

Por otro lado, este aparato se complementará con una campana de extracción de gases, ya que será necesario eliminar los residuos gaseosos que generan los productos químicos empleados al evaporarse durante la operación. Esta configuración se muestra en la Figura 3.7 (cabe mencionar que la sala donde está situado el dispositivo está iluminada con luz roja y no con luz blanca, no porque sea necesario para llevar a cabo esta tarea, si no debido a que en la misma sala se encuentra una máquina de fabricación con tecnología SLA para cerámicas que requiere de este tipo de iluminación para evitar la degradación del material de impresión).

En cuanto al producto químico que se empleará para llevar a cabo el desbanderizado químico, se utilizará una acetona al 99.5% de concentración, del distribuidor de material químico de laboratorio “LabKem”. Será preciso usar una gran cantidad de este agente, debido a su elevada volatilidad (velocidad de evaporación), las largas duraciones de los tratamientos y la necesidad de calentamiento del baño químico.



Figura 3.7. Sistema empleado para la realización del tratamiento de desbanderizado químico (Elaboración propia).

### 3.1.4.- Equipo de post-procesado térmico.

Con el objetivo de poder realizar los tratamientos térmicos de desbanderizado y sinterizado, una vez que se haya completado el proceso de desbanderizado químico, se empleará un pequeño horno comercial. En él, las piezas serán sometidas a altas temperaturas durante un tiempo de exposición elevado, que será superior a un día. Por lo tanto, será necesario un equipo que tenga una potencia y consumo adecuados para llevar a cabo esta operación.

De esta manera, el dispositivo que se utilizará para dichos tratamientos es un horno de la marca Nabertherm, que permite alcanzar temperaturas dentro de un intervalo de entre 30°C y 3000°C. Se trata de un dispositivo no muy grande, tal y como se puede ver en la Figura 3.8, con varias resistencias calefactoras situadas en las paredes de la cavidad interna del horno, la cual ha sido recubierta, en su totalidad, por un material refractario para reducir la inercia térmica y ayudar en el mantenimiento de una temperatura constante.



Figura 3.8. Horno Nabertherm para post-procesos térmicos (Elaboración propia).

### 3.2.- METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Como se ha ido mencionando a lo largo de los anteriores capítulos, el proceso de fabricación aditiva de una pieza cerámica mediante tecnología FDM puede dividirse fundamentalmente en las cuatro etapas que se exponen a continuación y sobre las que se trabajará para poder optimizar el procedimiento de obtención de dichas piezas:

- Proceso de impresión
- Post-proceso químico de desbanderizado.
- Post-proceso térmico de desbanderizado.
- Post-proceso térmico de sinterizado.

De esta manera, se llevará a cabo la fabricación y posterior análisis de diversas probetas a través de dichas operaciones, para poder encontrar y seleccionar los parámetros de influencia en la obtención de modelos cerámicos que consigan resultados óptimos en las piezas. Se dividirá el trabajo en una primera etapa donde se elegirán los parámetros adecuados para la impresión con el filamento cerámico comercial y una segunda etapa en la que se reajustarán estos para que se puedan obtener piezas óptimas tras la aplicación de todas las operaciones de post-procesado. En cada una de ellas, se seguirá un proceso específico y una metodología de trabajo determinada.



A continuación, se detalla esta información para cada una de las etapas en las que se divide el procedimiento experimental.

### **3.2.1.- Proceso de impresión.**

Durante esta etapa, se estudiarán cuáles han de ser los parámetros que gobiernen sobre la impresión por FDM con el filamento cerámico comercial elegido y su valor correspondiente. Para ello, se realizarán diferentes estudios sobre las velocidades de impresión, la confección de cuerpos sólidos y sus requisitos técnicos mínimos y los acabados alcanzables, teniendo siempre en cuenta que se trata de piezas en verde que requerirán de un post-procesado para llegar a ser funcionales. Este proceso tiene el objetivo de sentar una base de trabajo para poder comenzar con el posterior estudio de cara a las diferentes operaciones de desbanderizado y sinterizado necesarias, el cuál si marcará unos parámetros de impresión definitivos para la optimización de este tipo de piezas.

En cuanto a las condiciones de impresión de partida para comenzar con este análisis, se empleará un perfil FDM universal para la producción de piezas en PLA, conocido como “PLA Prusament” (perfil por defecto para PLA en PrusaSlicer). En este se modificarán los parámetros indicados por el fabricante del filamento cerámico en su manual de uso, dejando el resto que no hayan sido especificados como los valores por defecto de dicho perfil universal. Esto generará una configuración de parámetros base con la que se podrá realizar la fabricación de la primera probeta del proceso experimental, el cual se irá modificando en función de los diferentes defectos que presenten las sucesivas probetas obtenidas.

De esta forma, se requerirá la obtención de probetas que permitan distinguir la presencia de cualquier defecto en su fabricación a simple vista, adaptadas a los parámetros que se estén estudiando en cada caso. Cada característica del proceso de impresión se analizará a partir de la obtención de varias versiones de una misma probeta, para la que se irán actualizando y modificando los parámetros del perfil que sean objeto de estudio en cada situación.



Este proceso iterativo contemplará la fabricación de piezas bajo diferentes condiciones de trabajo (parámetros de operación y de trabajo de la máquina). De esta forma, se llegará a una pieza que presente la menor cantidad de defectos posible obtenida mediante la aplicación de una configuración de parámetros que será considerada como óptima, observando los defectos que presenta cada una de las versiones y sus posibles causas. En esta fase del procedimiento experimental, el análisis se llevará a cabo tras el proceso de impresión (piezas en verde), sin pasar por ninguna operación de post-procesado.

### **3.2.2.- Post-procesado químico y térmico.**

Durante esta segunda etapa del procedimiento experimental, se revisarán los parámetros elegidos anteriormente para que la impresión se pueda adaptar a las diferentes operaciones de post-procesado que se tienen que llevar a cabo sobre las piezas en verde. Esto requerirá el análisis de varias probetas ya post-procesadas, que permita obtener un perfil de parámetros de fabricación definitivo. Este se centrará en la obtención de modelos sólidos y sus requisitos técnicos para para que estos cuenten con un buen acabado superficial y una elevada dureza y resistencia al desgaste.

Los parámetros que controlan las operaciones de post-procesado de las piezas serán los recomendados por el fabricante. Este proyecto se limitará a conseguir una versión optimizada de un perfil de impresión de cara a adaptarse a las indicaciones del fabricante del filamento comercial, por lo que no se modificarán parámetros como, por ejemplo, la temperatura del baño de acetona, la temperatura de los dos tratamientos térmicos requeridos o su duración, debido a que el tiempo y los recursos necesarios para llevar este estudio a cabo no se adaptan a las condiciones del proyecto. Sin embargo, sí se ajustará la impresión para que las piezas en verde se adapten a las especificaciones y requerimientos que puedan surgir durante estas últimas operaciones. Para la realización de este análisis experimental, se utilizarán geometrías que permitan ver los defectos propios del post-procesado a simple vista y sus posibles causas. Estas probetas permiten obtener conclusiones para cada uno de los aspectos objeto de estudio en esta etapa y se adaptarán a los requerimientos que estos suponen.



De esta forma, mediante la fabricación iterativa de diferentes probetas y la observación de los defectos que presentan cada una de ellas y sus posibles causas, se llegará a una pieza que presente la menor cantidad de imperfecciones posible. Consecuentemente, se obtendrán como resultado final un perfil de parámetros de fabricación optimizado que permita la obtención de piezas en cerámica técnica mediante tecnología FDM funcionales, haciendo que el proceso sea lo más eficiente y eficaz posible.



## **4.- Trabajo realizado y resultados obtenidos.**

Una vez que se ha descrito la metodología seguida para el estudio y análisis de cada una de las etapas en las que se divide el proceso de impresión 3D mediante tecnología FDM para piezas cerámicas, ya sería posible describir el trabajo experimental realizado y los resultados obtenidos.

De esta forma, se procederá, para cada una de ellas, a la descripción del procedimiento que fue necesario para conseguir su optimización. Para ello, se comentarán las condiciones de partida para el proceso experimental, así como cuáles fueron todas las modificaciones que se tuvieron que realizar, el motivo por el cual estas fueron consideradas y los resultados que estas generaron. Por último, se mostrará, a modo de resumen, el perfil óptimo de parámetros de fabricación para la producción de este tipo de piezas.

### **4.1.- OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE IMPRESIÓN.**

#### **4.1.1.- Perfil de impresión de partida.**

Antes de exponer el proceso llevado a cabo durante esta etapa del procedimiento experimental, será necesario describir el perfil de impresión inicial con el que se comenzó el proceso iterativo de fabricación de probetas. Como se ha comentado anteriormente, se partió del perfil universal para la obtención por FDM de piezas en PLA del software de PrusaSlicer y se completó y modificó considerando las especificaciones expuestas por el fabricante del filamento cerámico comercial, manteniendo el resto de parámetros no indicados en la guía para el usuario como los predeterminados de dicho perfil para PLA. De esta forma, se pueden distinguir una serie de parámetros básicos que fueron invariables para la obtención de todas las probetas experimentales, los cuales se pueden ver en la Tabla 4.1.



Temperaturas de Impresión	
Temperatura Boquilla	150°C
Temperatura Boquilla 1ª Capa	150°C
Temperatura Cama	40°C
Temperatura Cama 1ª Capa	40°C
Capas y Perímetros	
Diámetro Boquilla Extrusión	0.4 mm
Altura de Capa	0.15 mm
Altura de 1ª Capa	0.2 mm
Falda y Balsa	
Las probetas que se fabricaron no requerían el empleo de balsa para aumentar la adherencia de la pieza a la plataforma de trabajo de la impresora. En cuanto a la falda, se estableció una por defecto, de mínimo un bucle, con una altura de tres capas y a una distancia de 3 milímetros de la probeta fabricada.	
Soporte	
Las probetas que se fabricaron no requerían el empleo de material de soporte para aumentar la estabilidad de la pieza durante la impresión.	

Tabla 4.1. Parámetros de impresión básicos utilizados de forma invariable.

#### 4.1.2.- Primeros pasos y ajustes de máquina iniciales.

Lo primero que fue necesario realizar fue una limpieza del equipo, para eliminar restos de impresiones anteriores con otros materiales que, al fundirse a una temperatura mucho mayor que la temperatura de fusión del filamento cerámico empleado, podían suponer ciertos problemas de funcionamiento debido al atascamiento del material fundido en el cabezal de la impresora. De esta forma, se limpió tanto la parte interna del extrusor, eliminando los restos de otros filamentos, como la plataforma de trabajo, que se limpió con agua jabonosa, evitando dañar la superficie de plástico que la recubre y le confiere sus propiedades especiales. Además, como se indicó anteriormente, para poder contrarrestar la alta abrasión que conlleva el empleo de filamentos plásticos con carga de partículas sólidas, se colocó una boquilla antiabrasiva de 0.4 milímetros de diámetro, fabricada en acero endurecido.

Por otro lado, el fabricante del filamento comercial recomienda que las piezas no se impriman directamente sobre la plataforma de trabajo, si no que se emplee una lámina de vidrio para ello y un posterior baño de ultrasonidos para facilitar el despegado. Esto se hace con el



objetivo de evitar una adherencia excesiva del material cerámico a la cama caliente que puede conllevar a un uso excesivo de fuerza para despegar los modelos, poniendo en peligro la integridad de la geometría. Sin embargo, como no se disponían de los medios necesarios para llevar a cabo esta operación, se optó por imprimir las piezas sobre cinta de carroceros, cuya superficie rugosa facilitó el despegado de las probetas.

Por último, con el objetivo de probar el correcto funcionamiento del dispositivo de forma previa al inicio de la fabricación de las probetas experimentales, se procedió a la impresión de una probeta de control (un cubo sólido de pequeñas dimensiones). Sin embargo, surgieron varios problemas que fue necesario solucionar para poder continuar con la investigación:

- **Ajuste de la temperatura umbral de seguridad de la impresora.**

La temperatura de la boquilla para la fusión de la materia prima recomendada por el fabricante del filamento cerámico es de 150°C, pero cuando se intentó precalentar el extrusor a dicha temperatura, saltó un error de seguridad que impedía el cambio. Se optó entonces por ir aumentando la temperatura hasta un valor aceptado por la máquina para llevar a cabo este proceso, hasta llegar a los 180°C (temperatura umbral de seguridad). Sin embargo, cuando se inició la impresión de la pieza a una temperatura de extrusión de 150°C, la impresora realizaba las trayectorias de forma correcta, pero en ningún momento era capaz de depositar material. Por lo tanto, se optó por incrementar la temperatura de impresión al valor empleado en el proceso de precalentamiento del cabezal (180°C).

Mediante una investigación sobre el modelo empleado, en lo referente al problema surgido con las temperaturas de la boquilla en el precalentamiento y la impresión de las piezas, se obtuvo como conclusión que este estaba relacionado con la temperatura umbral de seguridad de la máquina. Este valor está ajustado en este tipo de impresoras, por defecto, a unos 180°C, debido a que la mayor parte de filamentos empleados en FDM tienen un punto de fusión muy superior a dicho valor. Por lo tanto, fue necesario reconfigurar este parámetro en el dispositivo, lo cual se debía realizar desde su código inicial de arranque.



La línea codificada “M302 [S]” permite establecer una nueva temperatura mínima de extrusión. Esto hace que la impresora permita el movimiento del motor paso a paso que controla la inserción de filamento en el extrusor por encima de una temperatura determinada. De esta manera, se introdujo en código inicial de la impresora la línea “M302 S110”, para establecer como nueva temperatura umbral de seguridad unos 110°C, permitiendo así la extrusión de material a la temperatura buscada de 150°C.

- **Ajuste de la potencia introducida en el motor del extrusor.**

Una vez realizado el ajuste anterior, se intentó de nuevo la fabricación de dicha probeta. Sin embargo, se detectó que una vez que la impresión alcanzaba, aproximadamente, la tercera capa del modelo (alrededor de tres minutos de trabajo del extrusor), el proceso se interrumpía de forma automática debido a un error causado por un atasco de material de fundido entre las ruedas de arrastre del filamento. Esto hacía que estos discos dentados no fueran capaces de empujar el filamento, deslizándose sobre él y provocando la parada del sistema.

Tras un análisis de las posibles causas de dicho problema, se detectó que este suceso estaba relacionado con la potencia que era suministrada al motor paso a paso que gobierna sobre el movimiento de las ruedas dentadas de impulsión. Con una potencia elevada, como era la predeterminada para este modelo de impresora 3D, la temperatura que alcanzaba el motor era elevada y, por lo tanto, esto implicaba el calentamiento de las ruedas dentadas que impulsaban el material.

Cuando se trabaja con filamentos plásticos, esto no supone ninguna problemática ya que las temperaturas que estas alcanzan no es lo suficientemente alta como para afectar a dicha materia prima. Sin embargo, con filamentos con carga cerámica, mucho más sensibles a las altas temperaturas, este sobrecalentamiento producía un aplastamiento del filamento que entraba en el sistema de alimentación, provocando un atasco a la entrada del extrusor y, consecuentemente, la parada de emergencia de la impresión que se estuviese llevando a cabo en ese momento.



La línea codificada “M907 [E]” permite configurar la corriente del motor del potenciómetro digital en miliamperios para el controlador del motor paso a paso del extrusor de la impresora. Mediante un proceso iterativo, se redujo primero este valor hasta uno que produjera el salto de pasos por parte del sistema de impulsión de filamento para, seguidamente, subirlo a otro un poco por encima del anterior. Esta nueva potencia suministrada al motor paso a paso del mecanismo de impulsión, configurado a través de la línea de código inicial “M907 E260”, permitió evitar los atascos de material por aplastamiento del filamento entre las ruedas dentadas, con un valor lo suficientemente alto como para evitar el salto de pasos durante la impresión.

- **Ajuste de la tensión aplicada por las ruedas de impulsión sobre el filamento.**

Por último, tras los dos ajustes de máquina mencionados anteriormente, se observó que el filamento cerámico al tener una elevada fragilidad era muy propenso a romper a la entrada del sistema de impulsión, en el momento en el que era arrastrado por las ruedas dentadas. Tras realizar un análisis de las posibles causas de este problema, se llegó a la conclusión de que la tensión que aplicaban dichas ruedas sobre el filamento era demasiado elevada y derivaba en un aumento de la frecuencia con la que se rompía la materia prima a la entrada del sistema de impulsión, provocando una parada en la fabricación de la pieza.

Este ajuste se llevó a cabo aflojando de forma manual el tornillo que regula dicha condición, de manera que solo estuviese roscado sobre unos pocos filetes. Así, se logró alcanzar una tensión lo suficientemente alta para que el filamento de impresión pudiese ser arrastrado dentro del hotend del cabezal, pero sin llegar a provocar una rotura repentina.

#### **4.1.3.- Optimización perfil de velocidades de impresión y parámetros del filamento.**

En esta fase se ajustaron los valores de las velocidades de impresión que fueron aplicadas sobre todos los desplazamientos y movimientos que la impresora tiene que realizar durante la fabricación de las piezas. Estas incluyen las velocidades de impresión de los perímetros y del relleno de la pieza, así como la de fabricación de cualquier material de soporte que sea necesario.



Por otro lado, también se consideraron las modificaciones pertinentes sobre un parámetro propio del filamento de impresión que gobierna sobre el flujo de material que se extruye, denominado como “multiplicador de extrusión”. De esta manera, se partió de las condiciones de impresión, en cuanto a velocidades y a parámetros de filamento, que se muestran sobre la Tabla 4.2. Estas fueron obtenidas del perfil de parámetros universal para la fabricación de piezas en PLA, el cual, como se mencionó anteriormente, se utilizó como perfil de partida en este proyecto.

Perfil de Velocidades de Impresión	
Perímetros	25 mm/s
Perímetros Pequeños	20 mm/s
Perímetros Externos	20 mm/s
Relleno	30 mm/s
Relleno Sólido	35 mm/s
Relleno Sólido Superior	35 mm/s
Soporte	35 mm/s
Puentes	35 mm/s
Relleno de Hueco	35 mm/s
Velocidad de la 1ª Capa	20 mm/s
Parámetros del Filamento	
Multiplicador de Extrusión	1.00

Tabla 4.2. Velocidades y parámetros del filamento de partida.

Para llevar a cabo este proceso experimental, se empleó una geometría que permitiese observar los posibles defectos derivados de los parámetros objeto de estudio a simple vista sobre las probetas. Así, se optó por la fabricación de prismas rectangulares de 20 milímetros de ancho y largo y 10 milímetros de altura, aplicando el “modo vaso” que permite el software PrusaSlicer, tal y como muestra la Figura 4.1. Como estas no se iban a post-procesar, en esta etapa del proceso no se requirió la aplicación de ningún coeficiente de corrección de escala. Este modo permite la fabricación de piezas con un número de capas inferiores variable, pero sin la necesidad de incluir ningún tipo de relleno interior o capas superiores, ni más de un perímetro. Esto permitió una reducción en el tiempo de impresión de las probetas y en el gasto de materia prima que estas suponían.

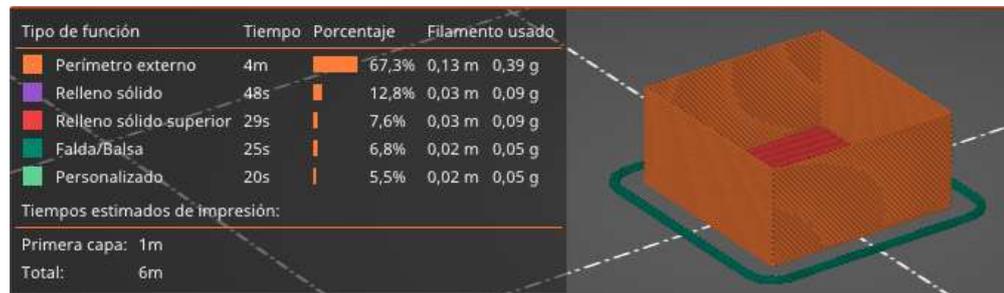


Figura 4.1. Probeta para la optimización del perfil de velocidades y de los parámetros del filamento en PrusaSlicer (Elaboración propia).

De esta forma, para la obtención de conclusiones sobre los parámetros de estudio se observarán diferentes condiciones que se deben cumplir sobre las probetas. Estas se exponen a continuación:

- Las probetas no deben presentar deformaciones en las paredes, ni en la base.
- Deben observarse el mínimo rechufe posible sobre las aristas del prisma.
- Las capas de impresión deben ser uniformes.
- Se debe evitar el redondeo de las esquinas de las probetas.
- Las paredes deben tener un espesor aproximado de 0,4 milímetros, igual al diámetro de la boquilla que se empleó para la fabricación de los demostradores (en función del valor del multiplicador de extrusión). La medición se llevará a cabo con un calibre digital según concluya el proceso de impresión, sin despegar la probeta de la cama caliente, materializando las dimensiones que se muestran en el croquis de la Figura 4.2.

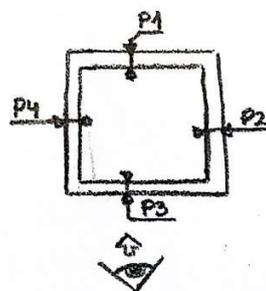


Figura 4.2. Croquis para la medición del espesor de pared (Elaboración propia).



En función de estos criterios, se inició un proceso experimental dividido en diferentes iteraciones, por el cual se fueron actualizando los parámetros de impresión hasta llegar a los valores óptimos del proceso. Consecuentemente, se realizaron las siguientes iteraciones:

- **1º Iteración.**

La probeta fabricada en esta iteración se imprimió con el perfil de velocidades y el multiplicador de extrusión indicados en la Tabla 4.2. Sin embargo, como se puede observar en la geometría de la pieza mostrada en la Figura 4.1, no todas ellas afectan al resultado obtenido, ya que el software laminador al realizar el capeado de la geometría, la dividió en perímetros exteriores, relleno sólido, relleno sólido superior y material de soporte (en referencia a la falda). Por lo tanto, las velocidades con las que se trabajó para realizar esta optimización fueron las relacionadas con las características geométricas anteriores y con la velocidad de impresión de la 1ª capa. Además, también fue preciso elegir el número de capas inferiores que se iban a aplicar sobre la probeta. Esta propiedad también se modificó a lo largo del proceso experimental, por lo que es necesario especificar dichas variaciones y los motivos que derivaron en ellas. Todos estos parámetros se pueden resumir en la Tabla 4.3.

Perfil de velocidades de impresión	
Perímetros exteriores	20 mm/s
Relleno sólido	35 mm/s
Relleno sólido superior	35 mm/s
Soporte	35 mm/s
Velocidad de la 1ª capa	20 mm/s
Parámetros del filamento	
Multiplicador de extrusión	1.00
Características geométricas	
Nº de capas sólidas inferiores	2

Tabla 4.3. Parámetros de impresión para la 1ª iteración.

Bajo dichas condiciones de trabajo, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.3. Como se puede ver, las esquinas de la caja están completamente redondeadas y se puede observar la presencia de varios rechupes de material en la parte interna y externa de las

aristas y en las esquinas de la última capa de la probeta. Además, hay cierta falta de uniformidad en las capas de la base (también durante la 1ª capa) y existen pequeñas discontinuidades en los perímetros externos de la pieza. Por todo esto, se optó por reducir sutilmente todos los valores del perfil de velocidades. Por otro lado, la pieza obtenida presentaba una alta fragilidad en la base durante el despegado de la plataforma de trabajo de máquina, por lo que se decidió aumentar el número de capas inferiores para facilitar esta operación en las iteraciones posteriores.



Figura 4.3. Resultado de la 1ª Iteración (Elaboración propia).

Por otro lado, también se obtuvieron los espesores de pared que se exponen en la Tabla 4.4. Como se puede ver, se trata de un valor próximo al objetivo (0.40 milímetros), pero no se trata del valor exacto. En este punto, se decidió esperar a obtener los resultados de la siguiente iteración, para analizar la variabilidad de estas dimensiones y poder estudiar más en detalle las acciones necesarias para intentar disminuir esta desviación.

Pared	P1	P2	P3	P4
Espesor [mm]	0.38	0.38	0.37	0.38

Tabla 4.4. Espesor de pared en la 1ª iteración.

- **2ª Iteración.**

Con lo observado en la iteración anterior, se procedió a fabricar una nueva probeta utilizando como nuevo perfil de parámetros de trabajo los que se muestran en la Tabla 4.5.

Perfil de velocidades de impresión	
Perímetros exteriores	17.5 mm/s
Relleno sólido	30 mm/s
Relleno sólido superior	30 mm/s
Soporte	30 mm/s
Velocidad de la 1ª capa	17.5 mm/s
Parámetros del filamento	
Multiplicador de extrusión	1.00
Características geométricas	
Nº de capas sólidas inferiores	3

Tabla 4.5. Parámetros de impresión para la 2ª iteración.

Bajo dichas condiciones de trabajo, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.4. Tal y como se puede ver en la figura, pese a que se redujo el rechupe en las aristas de la caja, estas aún continúan deformadas y siguen presentando una ligera redondez. Existían, de nuevo, pequeñas discontinuidades físicas tanto en las paredes de la caja como en la base, por lo que se consideró una mayor reducción del perfil de velocidades de impresión. Además, durante la fabricación se observó que la uniformidad del material depositado en la primera capa de la probeta continuaba sin lograrse, por lo que se optó por reducir más la velocidad de la primera capa. Por otro lado, el aumento del número de capas inferiores en la probeta consiguió disminuir su fragilidad, facilitando el despegado de la plataforma de trabajo de la máquina.



Figura 4.4. Resultado de la 2ª Iteración (Elaboración propia).

Por otro lado, también se obtuvieron los espesores de pared que se exponen en la Tabla 4.6. Como se comentó anteriormente, el multiplicador de extrusión del filamento no se cambió tras la primera iteración, con el objetivo de poder observar la variabilidad de los resultados.



Como se puede observar, la dispersión de las medidas es muy reducida, lo que implica que es necesario un ajuste de este parámetro para iteraciones posteriores. De esta manera, se decidió aumentar el valor de esta característica para intentar ajustar el espesor de pared en las probetas, lo que también ayudaría a solventar las discontinuidades de las paredes.

Pared	P1	P2	P3	P4
Espesor [mm]	0.37	0.38	0.37	0.38

Tabla 4.6. Espesor de pared en la 2ª iteración.

- **3ª Iteración.**

Con lo observado en la iteración anterior, se procedió a fabricar una nueva probeta utilizando como nuevo perfil de parámetros de trabajo los que se muestran en la Tabla 4.7.

Perfil de velocidades de impresión	
Perímetros exteriores	15 mm/s
Relleno sólido	25 mm/s
Relleno sólido superior	25 mm/s
Soporte	25 mm/s
Velocidad de la 1ª capa	15 mm/s
Parámetros del filamento	
Multiplicador de extrusión	1.10
Características geométricas	
Nº de capas sólidas inferiores	3

Tabla 4.7. Parámetros de impresión para la 3ª iteración.

Bajo dichas condiciones de trabajo, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.5. Como se puede observar en esta imagen, las deformaciones tienen una menor presencia que en iteraciones anteriores. Sin embargo, se puede observar como las aristas continúan siendo ligeramente redondeadas y todavía se puede apreciar el rechupe en la parte más alta de estas. Además, tanto las capas inferiores de la probeta como la primera capa de impresión presentan una mejora en cuanto a su uniformidad y al nivel de discontinuidades, pero está por debajo de la uniformidad conseguida en los perímetros exteriores de la pieza. Por consiguiente, se optó por reducir más todas las velocidades del perfil de parámetros de trabajo.

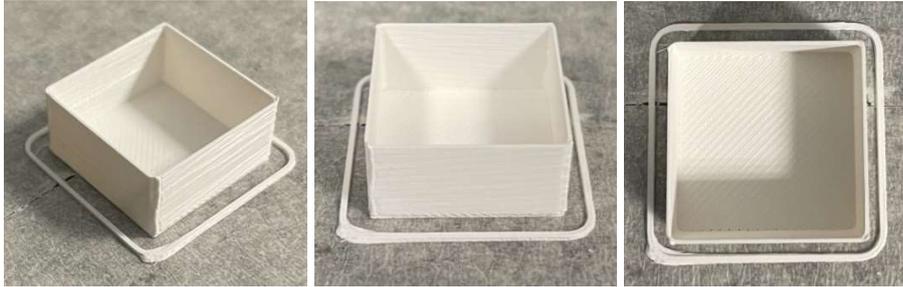


Figura 4.5. Resultado de la 3ª Iteración (Elaboración propia).

Por otro lado, también se obtuvieron los espesores de pared que se exponen en la Tabla 4.8. Como se puede observar, se han obtenidos unos valores de espesor de pared cuya desviación del resultado objetivo (0.40 milímetros) es aproximadamente igual que la de los primeros resultados, pero estando estas por encima del dicho valor. Por lo tanto, se optó por reducir el multiplicador de extrusión del filamento a un valor intermedio a los considerados en iteraciones anteriores.

Pared	P1	P2	P3	P4
Espesor [mm]	0.41	0.42	0.41	0.41

Tabla 4.8. Espesor de pared en la 3ª iteración.

- **4ª Iteración.**

Con lo observado en la iteración anterior, se procedió a fabricar una nueva probeta utilizando como nuevo perfil de parámetros de trabajo los que se muestran en la Tabla 4.9.

Perfil de velocidades de impresión	
Perímetros exteriores	12.5 mm/s
Relleno sólido	20 mm/s
Relleno sólido superior	20 mm/s
Soporte	20 mm/s
Velocidad de la 1ª capa	12.5 mm/s
Parámetros del filamento	
Multiplicador de extrusión	1.05
Características geométricas	
Nº de capas sólidas inferiores	3

Tabla 4.9. Parámetros de impresión para la 4ª iteración.

Bajo dichas condiciones de trabajo, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.6. Como se puede observar y en comparación con los resultados obtenidos en la iteración anterior, el rechufe de las aristas se redujo considerablemente, hasta ser prácticamente imperceptible, así como las deformaciones. No obstante, se optó por reducir la velocidad de impresión de los perímetros exteriores con el objetivo de eliminar al máximo posible la redondez de las aristas. Por otro lado, la uniformidad de las capas inferiores de la probeta era muy buena, pero durante la impresión de la primera capa se alcanzaba a observar como existían ciertas zonas donde el material no se distribuía uniformemente. Por ello, se decidió no reducir más ninguna otra velocidad del perfil de trabajo, a excepción de la anteriormente mencionada y de la velocidad de impresión de la 1ª capa. Cabe mencionar que, tras la fabricación de esta probeta, fue necesario cambiar la cinta de carroceros que se había colocado sobre la plataforma de trabajo de la máquina, concluyendo que esta presentaría una vida útil de aproximadamente seis impresiones.

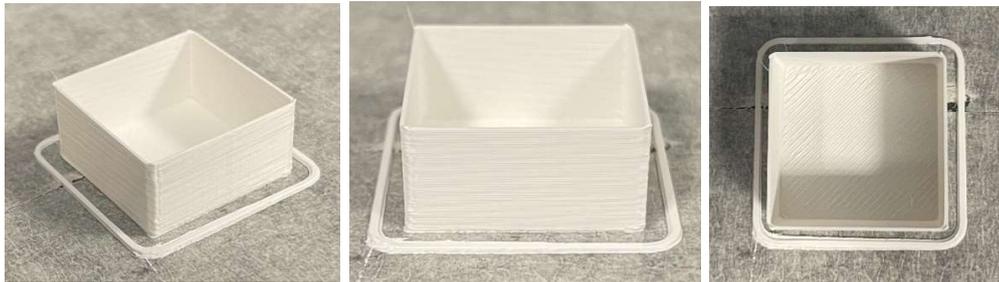


Figura 4.6. Resultado de la 4ª Iteración (Elaboración propia).

Por otro lado, también se obtuvieron los espesores de pared que se exponen en la Tabla 4.10. Como se puede distinguir, en esta iteración los resultados obtenidos en cuanto al espesor de pared de la probeta son muchos más precisos en relación al valor objetivo marcado por el diámetro de la boquilla. Para la siguiente iteración, se mantuvo el multiplicador de extrusión en este mismo valor para observar la posible variabilidad de los resultados.

Pared	P1	P2	P3	P4
Espesor [mm]	0.40	0.40	0.39	0.40

Tabla 4.10. Espesor de pared en la 4ª iteración.

- **5ª Iteración.**

Con lo observado en la iteración anterior, se procedió a fabricar una nueva probeta utilizando como nuevo perfil de parámetros de trabajo los que se muestran en la Tabla 4.11.

Perfil de velocidades de impresión	
Perímetros exteriores	10 mm/s
Relleno sólido	20 mm/s
Relleno sólido superior	20 mm/s
Soporte	20 mm/s
Velocidad de la 1ª capa	10 mm/s
Parámetros del filamento	
Multiplicador de extrusión	1.05
Características geométricas	
Nº de capas sólidas inferiores	3

Tabla 4.11. Parámetros de impresión para la 5ª iteración.

Bajo dichas condiciones de trabajo, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.7. Como se puede ver, tras esta iteración se consiguió obtener una pieza sin deformaciones, rechupes o redondeos en sus aristas. Además, la uniformidad de las capas inferiores se mantuvo igual que en la etapa anterior, pero mejoró la de la primera capa de impresión. Tras esta iteración, se ha podido obtener un perfil de velocidades optimizado para la impresión de piezas con este filamento cerámico.



Figura 4.7. Resultado de la 5ª Iteración (Elaboración propia).



Por otro lado, también se obtuvieron los espesores de pared que se exponen en la Tabla 4.12. De esta forma, se comprueba que el valor otorgado al multiplicador de extrusión del filamento es el correcto y que la variabilidad de los resultados para esta característica es muy reducida.

Pared	P1	P2	P3	P4
Espesor [mm]	0.40	0.40	0.40	0.40

Tabla 4.12. Espesor de pared en la 5ª iteración.

Una vez que se dio por concluida esta etapa experimental, se calcularon el resto de velocidades de impresión que no se pudieron considerar debido a la propia geometría de probeta empleada, de forma proporcional a las ya optimizadas. De esta manera, se pudo obtener el perfil de trabajo que se muestra en la Tabla 4.13.

Perfil de Velocidades de Impresión	
Perímetros	15 mm/s
Perímetros Pequeños	10 mm/s
Perímetros Externos	10 mm/s
Relleno	15 mm/s
Relleno Sólido	20 mm/s
Relleno Sólido Superior	20 mm/s
Soporte	20 mm/s
Puentes	20 mm/s
Relleno de Hueco	20 mm/s
Velocidad de la 1ª Capa	10 mm/s

Tabla 4.13. Perfil de velocidades de impresión optimizado.

#### 4.1.4.- Optimización de los parámetros de impresión para la obtención de sólidos rellenos.

En esta fase del proceso experimental, se optimizaron los parámetros geométricos de impresión de cara a la obtención de modelos sólidos con relleno. Para ello, se fueron alterando diferentes parámetros técnicos, como son el número de perímetros exteriores, el número de capas inferiores y superiores, y el porcentaje de relleno de la pieza, hasta conseguir un perfil de parámetros que sirviese para obtener una pieza tridimensional sólida y robusta.



En este aspecto, es preciso tener en cuenta que estas piezas se analizarán sin llegar a ser post-procesadas, por lo que la robustez que se buscará con este proceso no es equivalente a la que tendrán las piezas finales una vez tratadas.

Para la realización de este proceso, se partió del perfil de velocidades de impresión y parámetros de filamento obtenidos en la etapa experimental anterior, así como del resto de parámetros predeterminados que ya fueron expuestos anteriormente. Por otro lado, resulta preciso especificar que en este proceso no se tuvo en cuenta la fabricación de ningún tipo de material de soporte, más allá de la falda de las piezas. El tiempo disponible para este proyecto no permitió analizar las posibilidades y parámetros propios de esta característica. Sin embargo, en el caso de que estos fuesen necesarios, según el fabricante los soportes podrían ser realizados con el propio filamento cerámico o con un filamento plástico que sea soluble en un baño químico, para lo que se necesitaría un sistema de multiextrusión.

En cuanto al patrón de relleno empleado, el fabricante del filamento cerámico recomienda que se utilice un patrón bidimensional como, por ejemplo, un patrón rectilíneo o triangular. Para la realización de este estudio, se aplicó un relleno de tipo rectilíneo con un porcentaje de relleno del 5%, para la primera iteración. Este es el valor recomendado por dicho distribuidor, pero se analizarán los resultados para ajustar este parámetro.

La probeta que se empleó en esta etapa fue muy similar a la que se utilizó en el estudio anterior, con el objetivo de poder observar las imperfecciones en las piezas a simple vista. Por lo tanto, se empleó un prisma rectangular de 20 milímetros de ancho y largo y 10 milímetros de altura, al que se le incluyó el rellano especificado anteriormente. Sin embargo, no se aplicó el “modo vaso” ya que los parámetros que delimita esta condición son las características objeto de estudio. Tampoco se tuvieron en cuenta ningún tipo de coeficientes de corrección de escala, puesto que las probetas no se someterían a ningún post-procesado. Por otro lado, se analizó la fabricación de la pieza no sólo al finalizar el proceso de impresión, sino también en dos puntos intermedios de la operación (al 65% y al 85% del proceso), permitiendo obtener conclusiones sobre la calidad del relleno y de las capas superiores. Las características geométricas de las probetas y los puntos de estudio intermedios se muestran en la Figura 4.8.

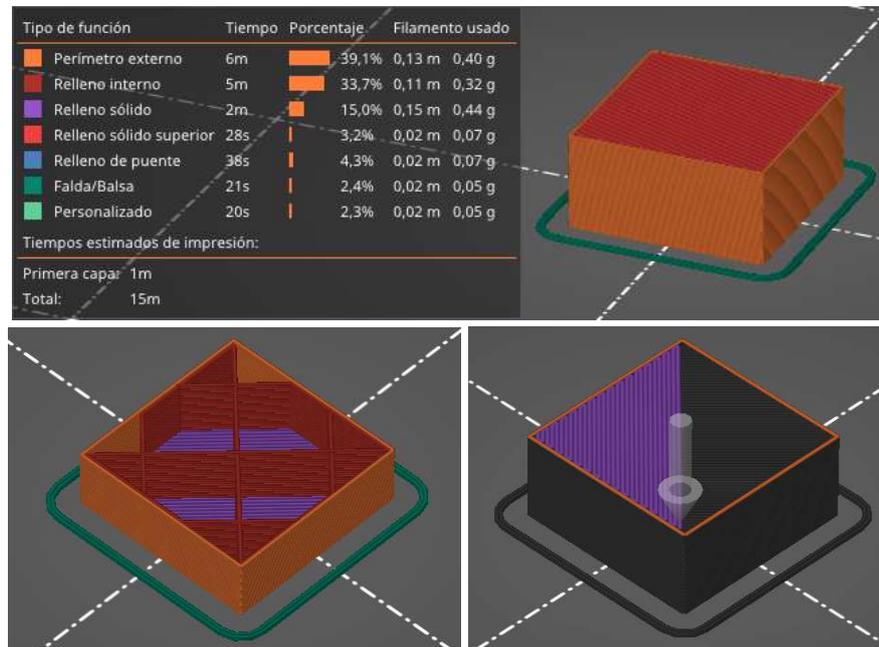


Figura 4.8. Probeta para la optimización de los parámetros de impresión para la obtención de cuerpos sólidos en PrusaSlicer (Elaboración propia).

De esta forma, para la obtención de conclusiones sobre los parámetros de estudio se observarán diferentes condiciones que se deben cumplir sobre las probetas. Estas se exponen a continuación:

- Buena calidad de resolución y uniformidad del relleno interno de la probeta.
- Las capas superiores deben haber sido depositadas de forma uniforme, evitando discontinuidades y defectos en su acabado.
- La robustez de la probeta debe ser suficiente como para que pueda ser manipulada de forma previa al post-procesado químico y térmico.
- La probeta debe soportar ciertos esfuerzos ligeros de compresión para comprobar que la densidad del relleno es la correcta.

En función de estos criterios, se inició un proceso experimental dividido en diferentes iteraciones, por el cual se fueron actualizando los parámetros de impresión hasta llegar a los valores óptimos del proceso. Consecuentemente, se realizaron las siguientes iteraciones:



- **1ª Iteración.**

En relación a lo expuesto anteriormente, se pudo establecer un perfil de parámetros iniciales empleados para la obtención de la probeta en esta primera iteración, que se muestran en la Tabla 4.14.

Parámetros geométricos de impresión	
Nº de perímetros	1
Nº de capas inferiores	3
Nº de capas superiores	3
Parámetros del relleno	
Porcentaje de relleno (patrón rectilíneo)	5%

Tabla 4.14. Parámetros de trabajo para la 1ª iteración.

Bajo dichas condiciones de trabajo, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.9. Como se puede ver en la figura en el punto en el que la fabricación se encontraba aproximadamente al 65%, el relleno no logró depositarse de forma uniforme y homogénea, de forma que en muchas de las capas las líneas de material acabaron convirtiéndose en voladizo y se solidificaron en posición incorrecta, dejando a su paso grandes huecos en la malla de relleno. Por otro lado, al cabo de aproximadamente un 85% de la fabricación, se puede observar como la poca densidad de relleno en la probeta deriva en una mala deposición de la primera capa superior de la pieza, de manera que esta se comba y mantiene estas deformaciones al solidificarse. Esto también provoca que el resto de capas superiores de la pieza no tengan una base estable sobre la que ser depositadas, por lo que su acabado pierde calidad.

El resultado final de esta iteración presenta una capa superior con ciertas discontinuidades y falta de uniformidad. Esto se debe a que el número de capas en la parte superior de la pieza es demasiado pequeño. Además, se ha observado que tampoco son suficientes el número de perímetros y el número de capas inferiores en la pieza, puesto que la robustez y resistencia es demasiado baja y la pieza resulta muy poco resistente a pequeños esfuerzos de compresión.

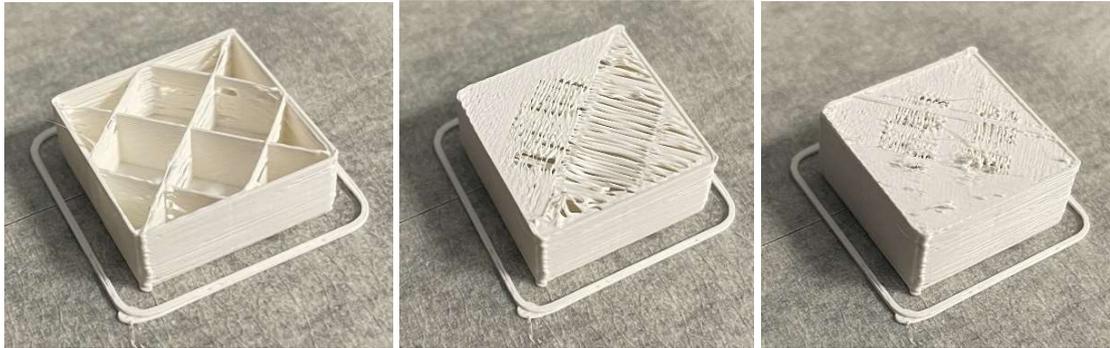


Figura 4.9. Resultado final y puntos intermedios de la 1ª iteración (Elaboración propia).

Por consiguiente, se optó por aumentar el número de capas inferiores y superiores, así como el número de perímetros de la probeta de cara a la siguiente iteración. Además, para contrarrestar los defectos estructurales provocados por una falta de densidad de relleno, se decidió aumentar este parámetro.

- **2ª Iteración.**

En relación a lo expuesto anteriormente, se determinaron unas correcciones necesarias sobre el perfil de impresión inicial, que se muestran en la Tabla 4.15.

Parámetros geométricos de impresión	
Nº de perímetros	2
Nº de capas inferiores	4
Nº de capas superiores	4
Parámetros del relleno	
Porcentaje de relleno (patrón rectilíneo)	7.5%

Tabla 4.15. Parámetros de trabajo para la 2ª iteración.

Bajo dichas condiciones de trabajo, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.10. Como se puede distinguir, todavía se pueden ver voladizos en la capa más alta del relleno, lo que provoca la presencia de grandes agujeros entre las capas del relleno de la probeta. Sin embargo, el aumento de la densidad del relleno logró una mejor estabilidad de las primeras capas superiores de la pieza, permitiendo un mejor acabado, aunque esta condición no se

encuentra del todo optimizada. Además, el número de capas superiores e inferiores es suficiente para evitar la presencia de discontinuidades y falta de uniformidad en dichas partes de la probeta. Por último, se observó una gran mejoría en la robustez de la pieza, sobre todo considerando el pequeño porcentaje de aumento en la densidad del relleno que se aplicó.

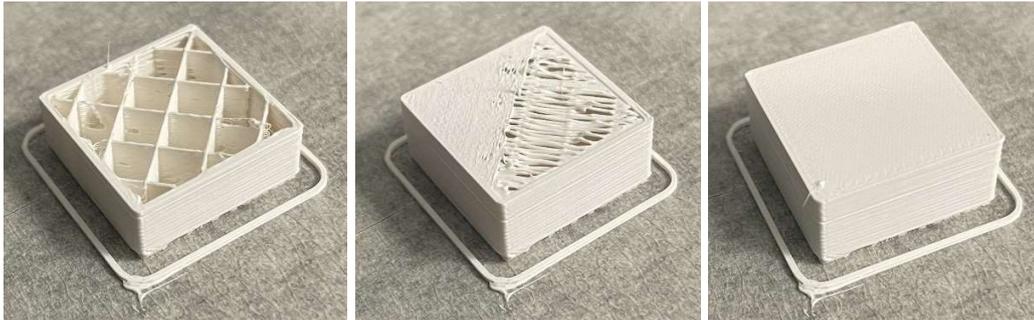


Figura 4.10. Resultado final y puntos intermedios de la 2ª iteración (Elaboración propia).

Por consiguiente, con el objetivo de aumentar más la robustez de la probeta y de establecer una mejor superficie para la deposición de las capas superiores, así como conseguir reducir el tamaño de los huecos presentes en la malla del relleno, se optó por aumentar su densidad. Sin embargo, no se consideró un aumento en el resto de parámetros de estudio, ya que dicha modificación también ayudaría a optimizar el resto de características de la probeta.

- **3ª Iteración.**

En relación a lo expuesto anteriormente, se determinaron unas correcciones necesarias sobre el perfil de impresión anterior, que se muestran en la Tabla 4.16.

Parámetros geométricos de impresión	
Nº de perímetros	2
Nº de capas inferiores	4
Nº de capas superiores	4
Parámetros del relleno	
Porcentaje de relleno (patrón rectilíneo)	10%

Tabla 4.16. Parámetros de trabajo para la 3ª iteración.

Bajo dichas condiciones de trabajo, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.11. Como se puede observar en la imagen, la proporción de huecos en la malla del relleno ha disminuido, junto con su tamaño. La mayor parte de los voladizos se sitúan en la parte superior de la rejilla por lo que los espacios que se dejan durante la impresión no condicionarán su comportamiento estructural, ya que el cabezal pasará por estas zonas, durante la deposición de las primeras capas superiores de la probeta, rellenando y uniformando estos defectos. Al haber aumentado la densidad del relleno, se ve como hay una mayor uniformidad y precisión en el modelado de las primeras capas superiores. Por último, se observó como la robustez de la probeta de esta iteración aumento considerablemente, llegando a presentar una resistencia asequible para una pieza que carece de post-procesado.

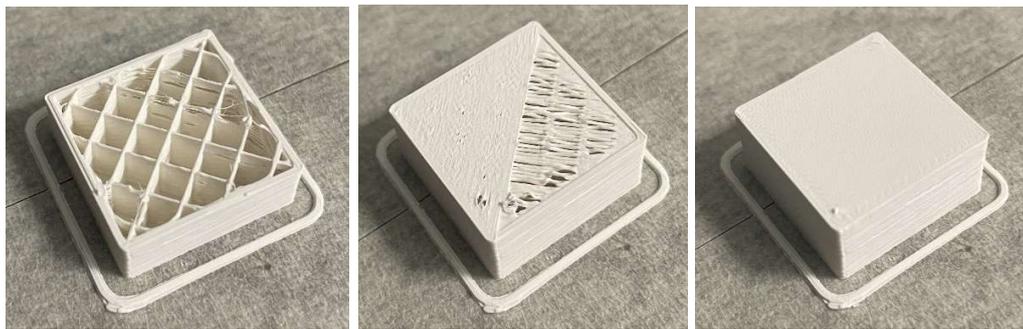


Figura 4.11. Resultado final y puntos intermedios de la 3ª iteración (Elaboración propia).

De esta forma, se puede considerar que los parámetros empleados en la fabricación de la probeta de esta iteración son los óptimos para la obtención de cuerpos sólidos con relleno. Así, se puede considerar que las piezas que tengan una densidad de relleno por encima del 10% (porcentaje de relleno mínimo) y cumplan con el resto de parámetros geométricos tendrán un buen comportamiento tras el proceso de impresión. Consecuentemente, este perfil de parámetros es el que se utilizará como base para el análisis de las operaciones de post-procesado.

#### **4.1.5.- Valores orientativos para el micro-paso en el eje Z de la impresora.**

El último estudio experimental que se realizó en esta primera fase del proyecto fue el análisis de uno de los parámetros de una impresora 3D que garantizan un buen acabado y una buena uniformidad en sus capas inferiores, como es el micro-paso en el eje Z. Esta característica

depende en gran medida de como se ha llevado a cabo el montaje del cabezal de extrusión, al tratarse de la distancia inicial que deja la máquina entre la boquilla del extrusor y la plataforma de trabajo. Además, este parámetro también depende de la impresora empleada.

Por lo tanto, no es posible establecer un valor único para su configuración, si no que el verdadero objetivo de este proceso experimental es establecer un intervalo de valores aproximado donde una máquina con un montaje estándar (montaje del cabezal dejando un espacio de aproximadamente un milímetro entre la boquilla y la resistencia para el calentamiento del material de impresión) permita un buen acabado en las capas inferiores de las piezas.

Para ello, se fabricaron una serie de probetas con el perfil de parámetros optimizado obtenido en las etapas experimentales anteriores. Estas probetas serán cajas prismáticas, igual que en los casos anteriores, de 20 milímetros de ancho y largo y 3 milímetros de altura empleando el “modo vaso” del software PrusaSlicer, las cuales se exponen en la Figura 4.12. Sobre ellas no se aplicará ningún tipo de corrección de escala, ya que los resultados obtenidos no tendrán que pasar por ninguna operación de post-procesado.

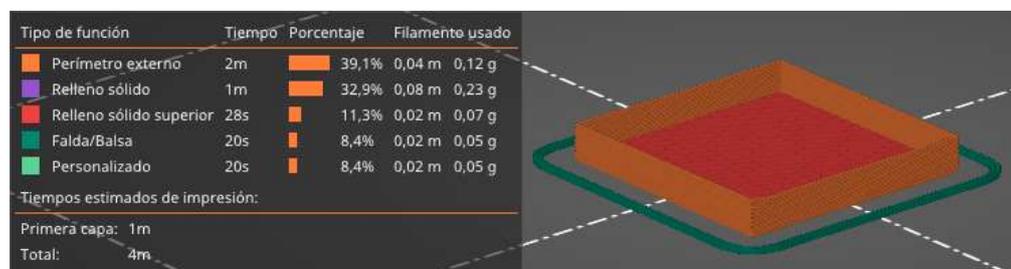


Figura 4.12. Probeta empleada para la obtención de valores orientativos para el micro-paso en el eje Z de la impresora (Elaboración propia).

De esta forma, para la obtención de conclusiones sobre los parámetros de estudio se observarán diferentes condiciones que se deben cumplir sobre las probetas. Estas se exponen a continuación:

- Uniformidad en la deposición de la primera capa.
- Buena adhesión entre los hilos depositados en la primera capa.

- Buen acabado en la superficie inferior de la probeta.
- Evitar deformaciones en las aristas y esquinas de la base.

Al contrario que en los casos anteriores, este proceso no se dividió en iteraciones experimentales donde los parámetros de trabajo de cada una de ellas se fundamentaban en los resultados obtenidos en la anterior. Sin embargo, se fabricaron varias probetas con diferentes valores de micro-paso en el eje Z de la máquina con las que, mediante comparación, se pudieron extraer conclusiones sobre dicho intervalo de validez. Los valores de micro-paso con los que se fabricaron cada una de las probetas se muestran en la Tabla 4.17. Además, los resultados obtenidos se muestran sobre la Figura 4.13.

Probeta	1	2	3	4	5	6	7
Micro-paso	-1.100	-1.200	-1.300	-1.350	-1.400	-1.500	-1.600

Tabla 4.17. Valores del micro-paso en el eje Z aplicados.



Figura 4.13. Resultados del análisis de valores para el micro-paso en el eje Z (Elaboración propia).



Como se puede observar, las probetas 1 y 2 presentan grandes discontinuidades en la primera capa, así como una uniformidad muy baja en sus capas inferiores y un acabado superficial malo. Por el contrario, las probetas número 5 y 6 presentan ciertas deformaciones en las esquinas de la base y la probeta 6 también presenta este tipo de defectos geométricos en las aristas de la superficie inferior. Por último, se puede observar que las probetas con valores intermedios de micro-paso en el eje Z (probetas 3 y 4) presentan una buena uniformidad y adhesión en sus primeras capas, sin manifestar deformaciones en las aristas o esquinas, o discontinuidades en la base de las probetas.

Cabe mencionar que durante la fabricación de la probeta 7 (micro-paso de -1.600) se observó un mal funcionamiento de la impresora debido a problemas originados por el atascamiento del cabezal de extrusión en su boquilla, por lo que se optó por cancelar su impresión y considerarlo directamente como un valor de parámetro erróneo. Consecuentemente, se concluyó que para la fabricación con este tipo de material comercial y con esta impresora son recomendables valores de micro-paso entre -1.300 y -1.350.

#### 4.1.6.- Resumen del perfil de parámetros optimizado para el proceso de impresión.

Con todo lo expuesto anteriormente, se puede recoger, a modo de resumen, el perfil de parámetros de impresión que se empleará como base para realizar las operaciones experimentales de la segunda mitad de esta investigación, relacionada con las tareas de post-procesado de las piezas. Los resultados obtenidos se exponen sobre la Tabla 4.18, recordando que para el resto de parámetros de trabajo se mantendrán los especificados en el perfil universal para la obtención de piezas en PLA, mencionado de forma previa en este documento.

Temperaturas de Impresión	
Temperatura Boquilla	150°C
Temperatura Boquilla 1ª Capa	150°C
Temperatura Cama	40°C
Temperatura Cama 1ª Capa	40°C
Capas y Perímetros	
Diámetro Boquilla Extrusión	0.4 mm
Altura de Capa	0.15 mm
Altura de 1ª Capa	0.2 mm



Falda y Balsa	
Las probetas que se fabricaron no requieren el empleo de balsa para aumentar la adherencia de la pieza a la plataforma de trabajo de la impresora. En cuanto a la falda, se estableció una por defecto, de mínimo un bucle, con una altura de tres capas y a una distancia de 3 milímetros de la probeta fabricada.	
Soporte	
Las probetas que se fabricaron no requieren el empleo de material de soporte para aumentar la estabilidad de la pieza durante la impresión.	
Perfil de Velocidades de Impresión	
Perímetros	15 mm/s
Perímetros Pequeños	10 mm/s
Perímetros Externos	10 mm/s
Relleno	15 mm/s
Relleno Sólido	20 mm/s
Relleno Sólido Superior	20 mm/s
Soporte	20 mm/s
Puentes	20 mm/s
Relleno de Hueco	20 mm/s
Velocidad de la 1ª Capa	10 mm/s
Parámetros del filamento de impresión	
Multiplicador de extrusión	1.05
Parámetros geométricos de impresión	
Nº de perímetros	2
Nº de capas inferiores	4
Nº de capas superiores	4
Parámetros del relleno	
Porcentaje de relleno mínimo	10%
Patrón de relleno	Patrón rectilíneo
Micro-paso en el eje Z	
Intervalo de validez (aproximado)	[-1.350 , -1.300]

Tabla 4.18. Perfil de parámetros de impresión optimizados tras el análisis del proceso de impresión.

#### 4.2.- OPTIMIZACIÓN DEL POST-PROCESO QUÍMICO Y TÉRMICO.

Partiendo del perfil de parámetros ya optimizado de cara al proceso de impresión de piezas con tecnología FDM con filamento cerámico que se muestra en la Tabla 4.18, se tuvo como objetivo la corrección y modificación de dichos valores teniendo en cuenta las operaciones



de post-procesado por las que las piezas deben pasar para resultar funcionales. Estas tareas, como ya se mencionó anteriormente en este documento, engloban un tratamiento químico (desbanderizado químico) y dos tratamientos térmicos (desbanderizado térmico y sinterizado). Por lo tanto, los resultados de las probetas se tomaron una vez que estas fueron sometidas a los procesos anteriores, de forma que se logró obtener un perfil optimizado final que contenía los parámetros de trabajo requeridos para la producción de piezas finales plenamente optimizadas y funcionales.

#### **4.2.1.- Descripción de las operaciones de post-procesado aplicadas.**

Antes de comenzar a comentar los resultados obtenidos en los procesos experimentales que se llevaron a cabo durante esta etapa del proyecto, es necesario especificar, no solo el perfil de parámetros inicial del que se partió para iniciar dicha investigación, sino también la configuración de parámetros que se aplicó sobre las piezas ya impresas en las operaciones de post-procesado. Estos parámetros elegidos fueron los recomendados en el manual de uso del filamento comercial por su fabricante.

Cabe mencionar que la extensión y duración de este proyecto hace que sea imposible una experimentación más profunda de cara a conocer que parámetros de estas operaciones son los que permiten obtener las mejores propiedades finales. Por lo tanto, de cara a esta investigación se modificarán los parámetros de impresión para que se adapten a las condiciones recomendadas por el fabricante. De esta forma, el tratamiento que fue aplicado a la probeta se puede dividir en cuatro etapas, cuya configuración se expone a continuación:

- **Desbanderizado químico.**

Se aplicó un baño químico en acetona con una concentración del 99.5%, la cual se mantuvo a una temperatura alrededor de los 40°C, gracias a la ayuda de un equipo de ultrasonidos que calentaba el baño a la vez que generaba pequeñas vibraciones que mejoraban y aceleraban este proceso. El fabricante del filamento comercial recomienda para esta operación



un mantenimiento en el baño de una duración de 6 horas para piezas con espesor de pared de 2 milímetros, con una duración siempre superior a las 2 horas.

- **Secado a temperatura ambiente.**

El fabricante del material de impresión recomienda que tras la aplicación del desbanderizado químico a las piezas, estas se dejen secar a temperatura ambiente sobre una superficie absorbente para eliminar cualquier resto remanente de químico disolvente que pueda permanecer en la pieza. La duración mínima de esta operación, independientemente del espesor de las paredes de la pieza, es de 2 horas. Tras la aplicación de esta operación, el fabricante especifica que se debe medir el porcentaje de reducción en masa de las piezas, con respecto a las piezas originales, con el objetivo de comprobar si el desbanderizado químico ha profundizado correctamente. Así, valores superiores al 5% de reducción en masa, implicarán una correcta aplicación de estas dos primeras operaciones.

- **Desbanderizado térmico.**

El primero de los tratamientos térmicos que se deberán aplicar consiste en un proceso de eliminación del material plástico que el desbanderizado químico no hubiese logrado extraer. Para su realización se recomienda el empleo de un horno refractario para altas temperaturas, como el que se describió en capítulos anteriores. Este, tal y como especifica el fabricante del filamento cerámico empleado, se aplicará con una configuración de parámetros constante, independientemente del espesor de las paredes de la pieza, y consistirá en un periodo de calentamiento hasta una temperatura media y luego un enfriamiento continuo con el horno apagado hasta temperatura ambiente. Las etapas en las que se puede dividir dicho proceso se exponen en la Tabla 4.19.

Etapa	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Incremento de temperatura (°C/h)	Duración de la etapa (min)
1	20 (T. Ambiente)	125	35	180
2	125	200	50	90
3	200	215	22	40



4	215	250	11	180
5	250	280	20	90
6	280	320	8	300
7	320	510	24	480
8	510	20 (T. Ambiente)	Enfriamiento continuo con el horno apagado	

Tabla 4.19. Etapas del proceso de desbanderizado térmico aplicado.

Como se puede observar, la extensión total del tratamiento se puede dividir en una etapa de calentamiento, con una duración de 22 horas y 40 minutos, y una etapa de enfriamiento que conlleva, aproximadamente, 24 horas.

- **Sinterizado.**

La última operación de post-procesado a realizar es el sinterizado, que permite reducir la porosidad de las piezas generada por la eliminación del material plástico en el desbanderizado. Para ello, también se recomienda el uso de un horno refractario, aplicando un sencillo ciclo de calentamiento y enfriamiento, como el que se muestra en la Tabla 4.20.

Etapas	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Incremento de temperatura (°C/h)	Duración de la etapa (h)
1	20 (T. Ambiente)	1550	50	30
2	1550	1550	0 (Mantenimiento)	2
3	1550	20 (T. Ambiente)	100	15

Tabla 4.20. Etapas del proceso de sinterizado aplicado.

Como se puede observar, la duración total de este tratamiento térmico es de 47 horas. Esto, unido al tratamiento anterior, implica un total de aproximadamente cuatro días de horno para llevar a cabo los tratamientos térmicos que precisan las piezas. Además, durante este proceso de sinterizado las piezas sufren una reducción de sus dimensiones debido a la contracción del material de impresión al eliminar los poros existentes. Esto hace que sea necesario aplicar sobre las piezas unos coeficientes de corrección de escala para contrarrestar dicho efecto. En el caso de esta experimentación, se aplicarán aquellos recomendados por el



fabricante del filamento comercial, y se comprobarán y corregirán posteriormente. Estos parámetros, en función del eje de la máquina sobre el que se considere la corrección de la escala, son los que se exponen en la Tabla 4.21.

Eje de la máquina	Eje X	Eje Y	Eje Z
Coefficiente de corrección de escala	124.5%	124.5%	124%

Tabla 4.21. Coeficientes de corrección de escala recomendados por el fabricante.

#### 4.2.2.- Optimización del número de capas inferiores.

En esta parte del proceso experimental se pretendió obtener una primera indicación sobre el espesor mínimo de pared que las piezas han de presentar para poder ser post-procesadas. Esto se hizo a partir del estudio del número mínimo de capas inferiores de la pieza. Como se trata de procesos muy largos al tener que considerar diversas operaciones de post-procesado tras la impresión de las probetas, esta experimentación no se llevará a cabo de manera iterativa, si no que se fabricarán tandas de piezas con diferentes características para ser post-procesadas de manera conjunta. Así, se evitarían tiempos de espera innecesarios para poder obtener resultados de forma más rápida.

Para este estudio, se fabricarán cajas prismáticas de 20 milímetros de ancho y largo y 10 milímetros de altura. Tras aplicar los coeficientes de corrección de escala necesarios, especificados en la Tabla 4.21, se concluyó en que las dimensiones de las piezas impresas debían ser 24.9 milímetros de ancho y largo y 12.4 milímetros de altura. Además, se debe tener en cuenta que, como se mencionó anteriormente, la altura de capa será de 0.15 milímetros, a excepción de la primera capa que será de 0.2 milímetros. El resto de parámetros aplicados son los que se obtuvieron como resultado de la optimización del proceso de impresión, expuestos en la Tabla 4.18 (sin tener en cuenta ni las capas superiores, ni el relleno de la probeta). La Figura 4.14 muestra cómo son dichas probetas.

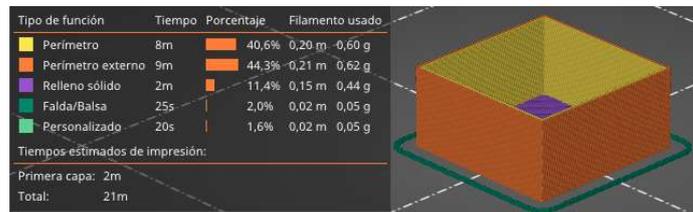


Figura 4.14. Probeta para la optimización del número de capas inferiores.

De esta forma, se llevó a cabo la impresión de cinco tipos de probetas, cuyas características específicas se muestran en la Tabla 4.22. Los resultados obtenidos de la impresión se muestran en la Figura 4.15.

Código	Nº de capas inferiores	Espesor de la pared inferior (mm)
1.1	4	0.65
1.2	5	0.8
1.3	6	0.95
1.4	7	1.1
1.5	8	1.25

Tabla 4.22. Probetas para la optimización del número de capas inferiores.

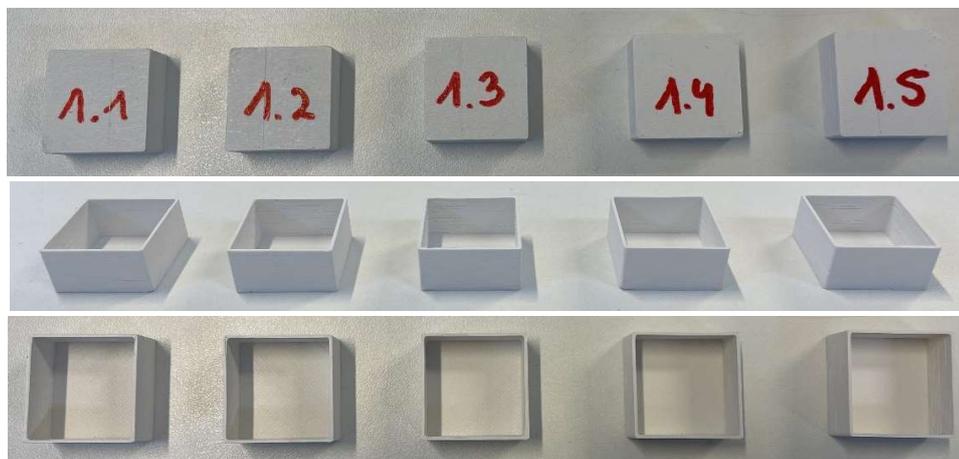


Figura 4.15. Resultados, tras impresión, del proceso de optimización del número de capas inferiores (Elaboración propia).

Después, estas piezas fueron sometidas a un proceso de desbanderizado químico y su posterior secado a temperatura ambiente. Como dicho proceso depende del espesor de pared, se ajustó la configuración de parámetros de este proceso a las probetas que se iban a fabricar. De

esta forma, las condiciones del tratamiento para cada probeta se muestran en la Tabla 4.23. Una vez concluido esto, se midió el porcentaje de reducción en masa que sufrieron las probetas, para comprobar que este proceso se llevó a cabo de forma correcta, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante (reducción mínima del 5%). Los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 4.24.

Código de la probeta	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Duración del baño químico (min)	150	150	180	180	180

Tabla 4.23. Condiciones del desbanderizado químico para la optimización del número de capas inferiores.

Cód.	Peso inicial (g)	Peso final 1ª tanda (g)	Peso final 2ª tanda (g)	% Reducción 1ª tanda	% Reducción 2ª tanda	¿Cumple?
1.1	2.940	2.513	2.543	14.52%	13.50%	Sí - Sí
1.2	3.093	2.669	2.674	13.71%	13.54%	Sí - Sí
1.3	3.274	2.823	2.831	13.47%	13.53%	Sí - Sí
1.4	3.466	2.988	2.992	13.79%	13.68%	Sí - Sí
1.5	3.588	3.101	3.104	13.57%	13.49%	Sí - Sí

Tabla 4.24. Comprobación de la reducción en masa de las probetas para la optimización del número de capas inferiores.

Una vez concluido lo anterior, las piezas se sometieron a los diferentes tratamientos térmicos requeridos: el desbanderizado térmico (con la configuración de parámetros de la Tabla 4.19) y el sinterizado (con la configuración de parámetros de la Tabla 4.20). De esta forma, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.16.



Figura 4.16. Resultados, tras post-procesamiento, del proceso de optimización del número de capas inferiores (Elaboración propia).



Se pudo observar que las probetas con 4 y 5 capas inferiores (0.65 y 0.80 milímetros de espesor en la pared inferior respectivamente) eran demasiado finas, con un aspecto poco resistente, lo que puede ser debido a que el proceso de post-procesado de las probetas afectó por demás a dichas superficies. De forma contraria, la probeta con 8 capas inferiores (1.25 milímetros de espesor de pared inferior) presentaba una textura y una apariencia todavía plástica, de forma que la pieza no se había endurecido por completo, dejando una parte de matriz plástica en su estructura, pese al desbanderizado. Por lo tanto, solo restaban como alternativas viables las probetas con 6 y 7 capas inferiores (paredes inferiores de 0.95 y 1.1 milímetros, respectivamente) y, atendiendo a las recomendaciones del fabricante que marcan un espesor de pared mínimo para la impresión de 1 milímetro, se optó por seleccionar como solución la probeta de 7 capas inferiores.

#### **4.2.3.- Optimización del número de perímetros.**

Tras optimizar el número de capas inferiores que han de tener las piezas impresas según este proceso de impresión 3D, el siguiente paso fue la optimización del número de perímetros de las probetas. Se trabajó de la misma forma que en el paso anterior, con una tanda de piezas con diferentes parámetros de impresión en cuenta a la característica objeto de estudio. Además, una vez obtenidos los resultados de esta etapa experimental, y como ya se podría observar cierta repetitividad en los resultados geométricos relacionados con la reducción que sufren las piezas debido al proceso de sinterizado, se procedió a comprobar y corregir el factor de corrección de escala correspondiente.

Para este estudio, se fabricaron probetas de las mismas dimensiones que las de la etapa experimental anterior (24.9x24.9x12.4 milímetros tras aplicar los coeficientes de reducción necesarios). Se fue variando el número de perímetros de las probetas, de manera que se mantuvieron los parámetros ya optimizados anteriormente y el resto de parámetros de impresión indicados en la Tabla 4.18 (sin tener en cuenta ni las capas superiores, ni el relleno de la probeta). Anteriormente, se obtuvo un espesor de pared mínimo de 1.10 milímetros, por lo tanto, se fabricarán probetas con paredes laterales de un espesor similar al anterior, garantizando la proximidad de los parámetros a la solución buscada.

De esta forma, se llevó a cabo la impresión de tres tipos de probetas, cuyas características específicas se muestran en la Tabla 4.25. Los resultados obtenidos de la impresión se muestran en la Figura 4.17, donde la probeta 2.2 se muestra a la izquierda y la 2.3 a la derecha de la imagen.

Código	Nº de perímetros	Espesor de la pared lateral (mm)
2.1 <sup>1</sup>	2	0.80
2.2	3	1.20
2.3	4	1.60

Tabla 4.25. Probetas para la optimización del número de perímetros.



Figura 4.17. Resultados, tras impresión, del proceso de optimización del número de perímetros (Elaboración propia).

Posteriormente, estas piezas se sometieron a un desbanderizado químico y secado a temperatura ambiente, ajustándose el tiempo del primero según se indica en la Tabla 4.26. También se midió el porcentaje de reducción en masa para realizar las comprobaciones pertinentes, cuyos resultados se exponen en la Tabla 4.27.

Código de la probeta	2.2	2.3
Duración del baño químico (min)	180	210

Tabla 4.26. Condiciones del desbanderizado químico para la optimización del número de perímetros.

<sup>1</sup> Se debe tener en cuenta que la probeta 2.1 de este estudio experimental, con 7 capas inferiores y 2 perímetros, es idéntica a la probeta 1.4 del primer estudio de esta fase. Consecuentemente, no se volvió a fabricar y se extrajeron los resultados de dicha pieza.

Cód.	Peso inicial (g)	Peso final 1ª tanda (g)	Peso final 2ª tanda (g)	% Reducción 1ª tanda	% Reducción 2ª tanda	¿Cumple?
2.2	4.286	3.732	3.744	12.92%	12.64%	Sí - Sí
2.3	5.106	4.432	4.414	13.20%	13.55%	Sí - Sí

Tabla 4.27. Comprobación de la reducción en masa de las probetas para la optimización del número de perímetros.

Una vez concluido lo anterior, las piezas se sometieron a los diferentes tratamientos térmicos indicados previamente en este documento. De esta forma, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.18, donde la probeta 2.2 se muestra a la izquierda y la 2.3 a la derecha de la imagen.

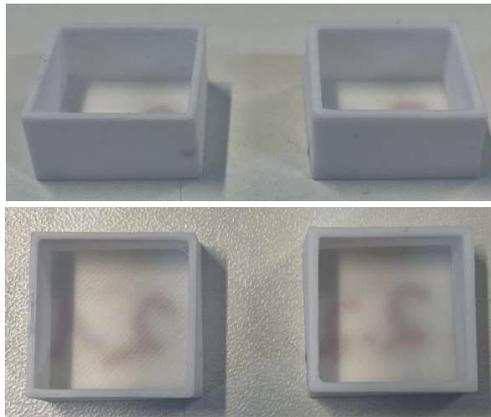


Figura 4.18. Resultados, tras post-procesamiento, del proceso de optimización del número de perímetros (Elaboración propia).

Se pudo observar que la probeta 2.1, con 2 perímetros, presentaba una apariencia muy frágil, con un claro exceso en cuanto a la afeción del proceso de desbanderizado, de manera que presentaba unas características distintas a la superficie inferior de la probeta, que era de mayor espesor. Por el contrario, pese a que se aumentó el tiempo de permanencia en el baño de acetona durante el desbanderizado químico, la probeta 2.3 (4 perímetros) seguía presentando una apariencia plástica y endeble que se contrastaba con una degradación de las propiedades de la capa inferior, la cual, al ser de menor espesor se vio más afectada por el post-procesamiento. Sin embargo, la probeta 2.2, con 3 perímetros laterales y un espesor de pared muy similar al de la capa inferior (1.2 y 1.1 milímetros, respectivamente), presentaba una gran dureza y robustez



en todas sus superficies, con características y propiedades homogéneas en toda su geometría. Por lo tanto, esta será la configuración correcta para el número de perímetros de las piezas a fabricar.

Por otro lado, al disponerse en este punto de suficientes probetas, con la misma geometría, fabricadas y procesadas en distintas tandas, como para poder comprobar y corregir el coeficiente de corrección de escala que es necesario aplicar debido al encogimiento de las piezas durante el proceso de sinterizado, se procedió a la medición y cálculo del nuevo coeficiente, cuyo resultado se expone en la Tabla 4.28.

Eje de la máquina	Eje X	Eje Y	Eje Z
Coeficiente de corrección de escala	126.52%	126.52%	129.30%

Tabla 4.28. Nuevos coeficientes de corrección de escala corregidos.

#### 4.2.4.- Optimización de los parámetros de relleno.

Una vez optimizada la geometría y apariencia exterior de las piezas, se llevó a cabo la optimización del relleno interno de estas. Esto implica tanto el porcentaje de relleno que se va a aplicar, como el tipo de patrón que se va a elegir para confeccionar esta parte de las piezas. Se trabajó de la misma forma que en el paso anterior, con una tanda de pieza con diferentes parámetros de impresión en cuanto a la característica objeto de estudio. Para ello, partiendo de los datos obtenidos en la primera mitad del proceso experimental, primero se elegirá el porcentaje de relleno adecuado para garantizar la resistencia de la pieza aplicando un patrón rectilíneo de relleno, y luego se estudiará cual de dichos patrones es el más conveniente para este tipo de material.

Para este estudio, se fabricarán cajas prismáticas de 20 milímetros de ancho y largo y 10 milímetros de altura. Tras aplicar los coeficientes de corrección de escala necesarios, especificados en la Tabla 4.28, se concluyó en que las dimensiones de las piezas impresas debían ser 25.30 milímetros de ancho y largo y 12.93 milímetros de altura. Se fue variando el porcentaje y patrón de relleno, de manera que se mantuvieron los parámetros ya optimizados anteriormente

y el resto de los parámetros de impresión indicados en la Tabla 4.18 (sin tener en cuenta las capas superiores). La Figura 4.19 muestra cómo son dichas probetas.

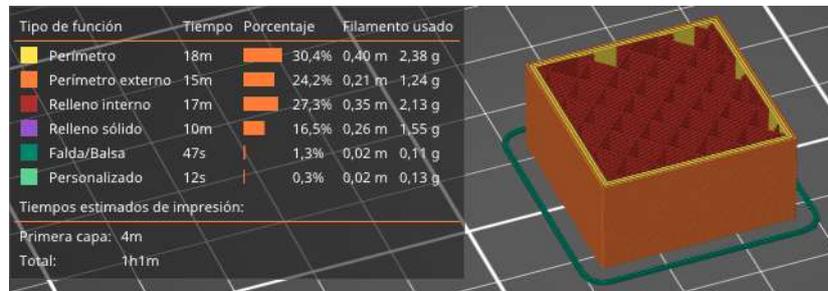


Figura 4.19. Probeta para la optimización de los parámetros de relleno (Elaboración propia).

Primeramente, se llevó a cabo la impresión de tres tipos de probetas para el estudio del porcentaje de relleno, cuyas características específicas se muestran en la Tabla 4.29. Los resultados obtenidos de la impresión se muestran en la Figura 4.20, donde la probeta 3.1 se muestra a la izquierda, la 3.2 en el centro y la 3.3 a la derecha de la imagen.

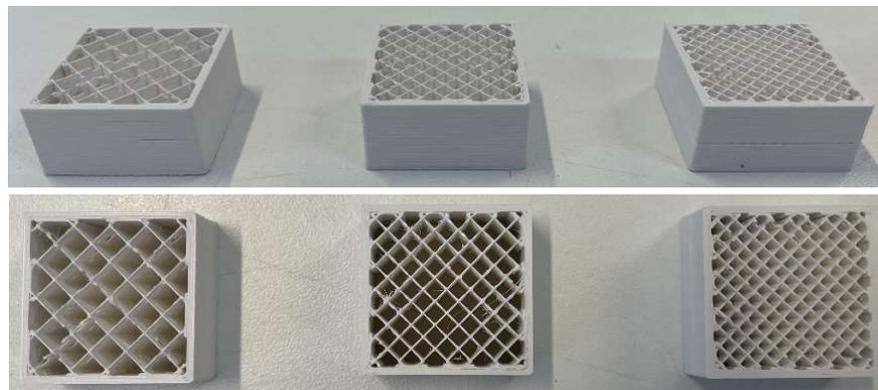


Figura 4.20. Resultados, tras impresión, del proceso de optimización del porcentaje de relleno (Elaboración propia).

Código	Porcentaje de relleno	Patrón de relleno
3.1	10%	Rectilíneo
3.2	15%	Rectilíneo
3.3	20%	Rectilíneo

Tabla 4.29. Probetas para la optimización del porcentaje de relleno.

Posteriormente, estas piezas se sometieron a un desbanderizado químico y secado a temperatura ambiente, ajustándose el tiempo del primero según se indica en la Tabla 4.30. También se midió el porcentaje de reducción en masa para realizar las comprobaciones pertinentes, cuyos resultados se exponen en la Tabla 4.31.

Código de la probeta	3.1	3.2	3.3
Duración del baño químico (min)	180	180	180

Tabla 4.30. Condiciones del desbanderizado químico para la optimización del porcentaje de relleno.

Cód.	Peso inicial (g)	Peso final 1ª tanda (g)	Peso final 2ª tanda (g)	% Reducción 1ª tanda	% Reducción 2ª tanda	¿Cumple?
3.1	5.970	5.305	5.232	11.13%	12.36%	Sí - Sí
3.2	6.671	5.793	5.693	13.16%	14.66%	Sí - Sí
3.3	7.187	6.398	6.236	10.97%	13.23%	Sí - Sí

Tabla 4.31. Comprobación de la reducción en masa de las probetas para la optimización del porcentaje de relleno.

Una vez concluido lo anterior, las piezas se sometieron a los diferentes tratamientos térmicos indicados previamente en este documento. De esta forma, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.21, donde la probeta 3.1 se muestra a la izquierda, la 3.2 en el centro y la 3.3 a la derecha de la imagen.



Figura 4.21. Resultados, tras post-procesamiento, del proceso de optimización del porcentaje de relleno (Elaboración propia).

Se pudo observar que la probeta 3.1, con un porcentaje de relleno del 10%, presentaba cierta fragilidad y ciertas discontinuidades en el relleno, debidas a la falta de puntos de apoyo que provocaba ese porcentaje aplicado, ya que aumentaba el recorrido que el cabezal tenía que



realizar hasta poder encontrar el siguiente punto de anclaje. Por otro lado, para la probeta 3.3 se concluyó que el porcentaje de relleno (20%) era demasiado alto, ya que se observó que, tras las etapas de post-procesado, la pieza había experimentado una torsión alrededor de eje Z de la máquina mucho mayor que el resto de las piezas pese a mantener una buena resistencia y dureza. Por consiguiente, la probeta 3.2, con un porcentaje de relleno del 15%, fue la elegida como la solución para este aspecto de la fabricación de las piezas, ya que no era lo suficientemente bajo como para presentar un relleno con propiedades no homogéneas, ni lo suficientemente alto como para inducir una torsión excesiva en la probeta.

Tras la impresión y post-procesado de las probetas necesarias para llevar a cabo esta etapa del proceso experimental, que fueron las primeras fabricadas utilizando los nuevos coeficientes de corrección expuestos en la Tabla 4.28, se comprobó que el ajuste aplicado era correcto y se obtuvieron unas probetas con unas desviaciones máximas con respecto a las dimensiones objetivo de alrededor de 0.1 milímetros, resultado válido para el rango de valores dimensionales manejados.

Por otro lado, se llevó a cabo la impresión de cuatro tipos de probetas para el estudio del tipo de patrón de relleno, cuyas características específicas se muestran en la Tabla 4.32. Los resultados obtenidos de la impresión se muestran en la Figura 4.22, donde la probeta 4.2 se muestra a la izquierda, la 4.3 en el centro y la 4.4 a la derecha de la imagen.

Código	Porcentaje de relleno	Patrón de relleno
4.1 <sup>2</sup>	15%	Rectilíneo
4.2	15%	Triangular
4.3	15%	Panal de abeja 2D
4.4	15%	Giroide

Tabla 4.32. Probetas para la optimización del tipo de patrón de relleno.

<sup>2</sup> Se debe tener en cuenta que la probeta 4.1 de este estudio experimental, con patrón de relleno rectilíneo al 15%, es idéntica a la probeta 3.2 del anterior estudio de esta fase. Consecuentemente, no se volvió a fabricar y se extrajeron los resultados de dicha pieza.



Figura 4.22. Resultados, tras impresión, del proceso de optimización del tipo de patrón de relleno (Elaboración propia).

Posteriormente, estas piezas se sometieron a un desbanderizado químico y secado a temperatura ambiente, ajustándose el tiempo del primero según se indica en la Tabla 4.33. También se midió el porcentaje de reducción en masa para realizar las comprobaciones pertinentes, cuyos resultados se exponen en la Tabla 4.34.

Código de la probeta	4.2	4.3	4.4
Duración del baño químico (min)	180	180	180

Tabla 4.33. Condiciones del desbanderizado químico para la optimización del tipo de patrón de relleno.

Cód.	Peso inicial (g)	Peso final (g)	% Reducción	¿Cumple?
4.2	7.607	6.629	12.86%	Sí
4.3	7.807	6.819	12.65%	Sí
4.4	6.583	5.738	12.84%	Sí

Tabla 4.34. Comprobación de la reducción en masa de las probetas para la optimización del tipo de patrón de relleno.

Una vez concluido lo anterior, las piezas se sometieron a los diferentes tratamientos térmicos indicados previamente en este documento. De esta forma, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.23, donde la probeta 3.1 se muestra a la izquierda, la 3.2 en el centro y la 3.3 a la derecha de la imagen.



Figura 4.23. Resultados, tras post-procesamiento, del proceso de optimización del tipo de patrón de relleno (Elaboración propia).



Como se puede ver, la resolución que permite este proceso de fabricación aditiva para los cuatro tipos de patrones de relleno a estudiar es muy buena. Además, con un porcentaje de relleno del 15% las probetas obtenidas presentan buena resistencia y rigidez. Sin embargo, en relación al relleno de interior de las piezas impresas en 3D es importante considerar la influencia que tiene el patrón de relleno elegido sobre la duración de la impresión de la pieza. Los patrones de relleno triangular y de panal de abeja en 2D suponen un incremento de aproximadamente el 20% de este aspecto para cualquier pieza, con respecto al patrón rectilíneo y giroidal. Por otro lado, el fabricante del filamento cerámico comercial no recomienda el empleo de patrones de relleno en 3D (como es el caso de este último), ya que podría presentar ciertos problemas durante la impresión de piezas con geometrías complejas. Por lo tanto, el patrón de relleno rectilíneo será la opción más aconsejable para la fabricación de las piezas con este material.

#### 4.2.5.- Optimización del número de capas superiores.

Para la optimización del número de capas superiores se tienen las mismas condiciones que para el proceso aplicado para las capas inferiores. Por lo tanto, es conveniente considerar que se podría aplicar la misma configuración y criterio para este parámetro que el aplicado con anterioridad para las capas inferiores de las piezas. Consecuentemente, se configurará la impresión para que las piezas presenten 7 capas superiores, con un espesor de pared superior de 1.10 milímetros. Pese a ello, este aspecto se comprobará más adelante con el objetivo de garantizar una correcta impresión de las piezas.

#### 4.2.6.- Resumen del perfil optimizado para las tareas de post-procesado y su comprobación.

Con todo lo expuesto anteriormente, la Tabla 4.35 muestra, a modo de resumen, todos los parámetros que se han optimizado en esta segunda etapa del proceso experimental en el que se consideran las diferentes operaciones de post-procesado que son necesarias aplicar sobre las piezas impresas para que sean plenamente funcionales.

Parámetros geométricos de impresión	
Nº de perímetros	3
Nº de capas inferiores	7
Nº de capas superiores	7



Parámetros del relleno	
Porcentaje de relleno mínimo	15%
Patrón de relleno	Patrón rectilíneo

Tabla 4.35. Perfil de parámetros de impresión optimizado para post-procesamiento de piezas.

Con el objetivo de comprobar si estos parámetros son los correctos y si se pueden obtener buenos resultados mediante su aplicación, se fabricó una última probeta dentro de esta fase del proceso experimental. El objetivo fue la producción de una caja prismática de 25.3x25.3x12.93 milímetros (tras aplicar los coeficientes de reducción necesarios) Para ello, se aplicaron los parámetros optimizados anteriormente (Tabla 4.35) y el resto de los parámetros de impresión indicados en la Tabla 4.18. De esta forma, se llevó a cabo la impresión de esta probeta, cuyos resultados procedentes de la impresión se muestran en la Figura 4.24.

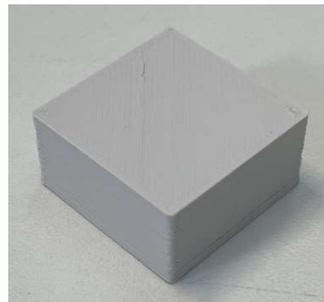


Figura 4.24. Resultados, tras impresión, de la obtención de una caja completa (Elaboración propia).

Posteriormente, esta pieza se sometió a un desbanderizado químico y secado a temperatura ambiente, ajustándose el tiempo del primero según se indica en la Tabla 4.36. También se midió el porcentaje de reducción en masa para realizar las comprobaciones pertinentes, cuyos resultados se exponen en la Tabla 4.37.

Código de la probeta	5.0
Duración del baño químico (min)	180

Tabla 4.36. Condiciones del desbanderizado químico para la obtención de una caja completa.

---

Cód.	Peso inicial (g)	Peso final (g)	% Reducción	¿Cumple?
5.0	8.017	6.946	13.36%	Sí

Tabla 4.37. Comprobación de la reducción en masa de la probeta para la obtención de una caja completa.

Una vez concluido lo anterior, la pieza se sometió a los diferentes tratamientos térmicos indicados previamente en este documento. De esta forma, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 4.25.



Figura 4.25. Resultados, tras post-procesamiento, de la obtención de una caja completa (Elaboración propia).

Como se puede ver, se obtuvo una pieza con una definición y acabado muy buenos en toda su extensión. Además, la probeta era resistente y no presentaba ninguna superficie poco rígida o flexible. Por lo tanto, se concluye que el perfil de parámetros expuesto anteriormente permite la obtención de piezas funcionales y resistentes, sin ningún defecto a simple vista.

Por otro lado, cabe señalar que de forma previa a la impresión de esta probeta fue necesario cambiar la bobina de filamento con el que se estaba trabajando, ya que este estaba próximo a agotarse. Se seleccionó una bobina del mismo fabricante, distribuidor y modelo, pero una versión más actual. Esto es importante ya que, pese a que en las especificaciones del manual de uso del operador explica que los parámetros de impresión son los mismos que los de la versión del filamento anterior, también se especifica que algunas características pueden variar y que será necesario adecuar el perfil de impresión al nuevo material ante dichas alteraciones en los resultados.



La primera diferencia se ve a simple vista, este nuevo filamento tras ser sometido a todas las operaciones de post-procesado, toma un color rosado, muy diferente del blanco puro del anterior material. Por otro lado, se midieron las dimensiones de esta pieza y se pudo observar que, pese a haber considerado los coeficientes de corrección de escala ya corregidos, las dimensiones de la pieza fabricada con el nuevo material diferían mucho de los resultados esperados. Las dimensiones medidas sobre el eje Z de la máquina sí estaban bien materializadas de forma aproximada, pero las de los otros dos ejes presentaban una desviación de aproximadamente 0.50 milímetros respecto a la dimensión objetivo. Para corregir este aspecto de cara a las siguientes impresiones, se llevó a cabo la fabricación de pequeñas probetas de geometría muy sencilla que permitiesen corregir dichos coeficientes. Después de dicho proceso de cálculo, se obtuvieron los resultados que se exponen sobre la Tabla 4.38.

Eje de la máquina	Eje X	Eje Y	Eje Z
Coefficiente de corrección de escala	129.88%	129.88%	130.6%

Tabla 4.38. Nuevos coeficientes de corrección de escala para la nueva bobina de filamento.

Sin embargo, más allá de lo comentado anteriormente, no se detectaron más alteraciones entre el perfil de parámetros de impresión necesario para fabricar con la primera bobina empleada durante el proceso experimental y el que se debe aplicar para la obtención de piezas con esta nueva bobina.

#### **4.3.- RESUMEN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS DE FABRICACIÓN.**

Con todo lo expuesto anteriormente, se puede recoger, a modo de resumen, el perfil de parámetros de fabricación que se empleará para la obtención del resto de piezas del proceso experimental. Los resultados obtenidos se exponen sobre la Tabla 4.39, recordando que para el resto de parámetros de trabajo se mantendrán los especificados en el perfil universal para la obtención de piezas en PLA, mencionado de forma previa en este documento.



Temperaturas de Impresión	
Temperatura Boquilla	150°C
Temperatura Boquilla 1ª Capa	150°C
Temperatura Cama	40°C
Temperatura Cama 1ª Capa	40°C
Capas y Perímetros	
Diámetro Boquilla Extrusión	0.4 mm
Altura de Capa	0.15 mm
Altura de 1ª Capa	0.2 mm
Falda y Balsa	
Las probetas que se fabricaron no requieren el empleo de balsa para aumentar la adherencia de la pieza a la plataforma de trabajo de la impresora. En cuanto a la falda, se estableció una por defecto, de mínimo un bucle, con una altura de tres capas y a una distancia de 3 milímetros de la probeta fabricada.	
Soporte	
Las probetas que se fabricaron no requieren el empleo de material de soporte para aumentar la estabilidad de la pieza durante la impresión.	
Perfil de Velocidades de Impresión	
Perímetros	15 mm/s
Perímetros Pequeños	10 mm/s
Perímetros Externos	10 mm/s
Relleno	15 mm/s
Relleno Sólido	20 mm/s
Relleno Sólido Superior	20 mm/s
Soporte	20 mm/s
Puentes	20 mm/s
Relleno de Hueco	20 mm/s
Velocidad de la 1ª Capa	10 mm/s
Parámetros del filamento de impresión	
Multiplicador de extrusión	1.05
Parámetros geométricos de impresión	
Nº de perímetros	3
Nº de capas inferiores	7
Nº de capas superiores	7
Parámetros del relleno	
Porcentaje de relleno mínimo	15%
Patrón de relleno	Patrón rectilíneo
Micro-paso en el Eje Z	
Intervalo de validez (aproximado)	[-1.350 , -1.300]



Parámetros para el desbanderizado químico	
Duración baño químico (min)	180
Temperatura baño químico	40°
Duración secado a T <sup>a</sup> ambiente (min)	120 (mínimo)
Ciclo para desbanderizado térmico	
Indicado en la Tabla 4.19	
Ciclo para sinterizado	
Indicado en la Tabla 4.20	

Tabla 4.39. Perfil de parámetros de fabricación optimizados tras el análisis de las operaciones de post-procesamiento.

#### 4.4.- COMPARATIVA FINAL DE RESULTADOS.

Una vez que se han obtenidos los parámetros que optimizan cada una de las operaciones del proceso de impresión mediante tecnología FDM con materiales cerámicos técnicos, se podría realizar una comparativa de los resultados que se pueden conseguir de esta forma con los alcanzables mediante otras tecnologías FDM con materiales más convencionales, con el objetivo de poder esclarecer el alcance real de la tecnología.

La norma ISO 52902:2023 determina como se debe llevar a cabo la obtención de varios artefactos que permitan conocer la capacidad técnica de un sistema de fabricación aditiva, así como el procedimiento a seguir para su medición y el análisis de los resultados obtenidos. Mediante su aplicación, se elaborarán un conjunto de demostradores que permitan sacar conclusiones sobre esta tecnología de fabricación.

Además, siguiendo esta norma también se llevará a cabo la fabricación del mismo tipo de probetas mediante tecnología FDM, pero con un material más convencional como es el PLA. Para ello, se empleará un perfil de parámetros ya optimizado (el perfil universal mencionado en capítulos anteriores), con el objetivo establecer una comparación entre ambas técnicas de modelado por deposición fundida y observar cuáles son las capacidades geométricas y el verdadero alcance de la impresión FDM con cerámica técnica, en relación a los resultados obtenidos para piezas plásticas.



#### **4.4.1.- Norma ISO 52902:2023.**

Como se comentó anteriormente, esta norma tiene como objetivo la descripción de la geometría de una serie de artefactos que se pueden utilizar para realizar una valoración, a partir de medidas cualitativas y cuantitativas sobre estas probetas, del comportamiento de una tecnología de fabricación aditiva. Cada uno de los artefactos especificados en dicho documento, ha sido diseñado para evaluar e investigar el desempeño geométrico de la técnica estudiada en uno o varios aspectos en los que se puede desglosar la calidad de los resultados impresos (ISO 52902, 2023).

A través de esta norma, la principal caracterización del alcance de una tecnología de este tipo se lleva a cabo mediante la evaluación de parámetros de exactitud geométrica, acabado superficial y capacidad dimensional mínima. Este proceso se lleva a cabo para probar el alcance del sistema bajo un perfil de parámetros de funcionamiento y un material de alimentación de la impresora determinado. Por este motivo, es especialmente necesario que la fabricación de todos los artefactos se realice con la misma máquina y bajo las mismas condiciones externas al proceso de impresión y de post-procesado. De esta forma, se conseguirá que los resultados extraídos estén los menos influenciados posible por dichos factores ajenos a la producción de las piezas (ISO 52902, 2023).

Siguiendo la metodología anterior, la norma establece una serie de principios de funcionamiento para la obtención de los artefactos, que se enumeran a continuación (ISO 52902, 2023):

- La producción de las piezas se debe realizar con un perfil de parámetros de impresión que este optimizado para que se consiga observar el verdadero alcance de la tecnología.
- La obtención de los artefactos ha de realizarse siguiendo el mismo proceso para todas las fabricaciones, de forma que estas se repitan siguiendo una misma secuencia operativa, y bajo las mismas condiciones de trabajo externas e internas.



- Las geometrías deben introducirse en el software laminador, según se obtienen en formato STEP, desde el repositorio de documentos de la página web de la ISO. Se emplea este formato para evitar, dentro de lo posible, las alteraciones dimensionales que puede sufrir un modelo digital por el proceso de conversión de la información, de manera que se asegura una precisión dimensional de al menos 2.5 micrómetros.
- Los modelos están específicamente diseñados para que no sea necesario la inclusión de material de apoyo para fabricarlos. De esta forma, no será necesario emplear ningún tipo de soportes en la impresión.

Por otro lado, este documento también especifica cómo se han de realizar las mediciones sobre los artefactos, una vez estos hayan sido impresos, cuyas especificaciones se tendrán en cuenta a la hora de realizar esta tarea. El principio básico a seguir en esta fase es que las medidas deben tomarse sobre cada probeta nada más su fabricación haya finalizado y se haya separado de la plataforma de trabajo donde fueron impresas, esto garantizará que los resultados no se vean alterados por alteraciones posteriores al proceso de producción (ISO 52902, 2023).

Por último, es necesario considerar que la norma recoge tres niveles de calidad en las que se pueden clasificar las tecnologías de fabricación aditiva, de forma que se debe distinguir en que categoría se está trabajando, ya que la geometría y dimensiones de los artefactos variarán de una a otra. Tecnologías de fabricación más avanzadas y exactas, como la estereolitografía (SLA) o el sinterizado selectivo por láser (SLS), ocupan los niveles de calidad fina y media. Por el contrario, a las técnicas de impresión menos desarrolladas y precisas, como el modelado por deposición fundida (FDM), se les encasilla y deben evaluarse como proceso de calidad grosera. Por lo tanto, este será la categoría que se empleará como referencia para la fabricación de los artefactos y su evaluación (ISO 52902, 2023).

De esta forma, a continuación, se especificarán todos los ámbitos de cualificación que contempla la norma, así como los artefactos que se emplean para valorar cada uno de ellos y su propósito. Junto con esta información, se adjunta un croquis para cada artefacto en el que se

detallan las dimensiones que se van a medir para establecer esta valoración y la codificación de cada una de ellas que se va a emplear para poder referirse a cada una de ellas en apartados posteriores.

- **Precisión.**

La precisión es la cualidad del sistema que mide el grado de magnitud del error cometido durante el proceso de obtención de las piezas. Los artefactos que contempla la norma ISO 52902:2023 para valorar este parámetro geométrico de fabricación son los siguientes:

- **Artefacto lineal.**

Este artefacto evalúa la precisión en el posicionamiento lineal sobre una dirección de la máquina. En función de la orientación de la probeta (alineación con el eje X o con el eje Y), se podrán distinguir errores en las mediciones debidos a un fallo en el sistema de posicionamiento de la herramienta, permitiendo que se tengan los datos necesarios para realizar un reajuste sobre el este (ISO 52902, 2023). Las mediciones que se realizarán sobre estas piezas, así como su código, se representan en el croquis de la Figura 4.26.

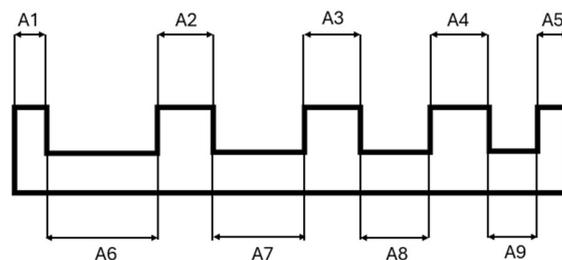


Figura 4.26. Croquis de las mediciones a realizar sobre los artefactos lineales, código A (Elaboración propia).

- **Artefacto para el eje Z.**

Estos artefactos pretenden medir y evaluar la precisión en el posicionamiento de la herramienta en la dirección del eje Z. Se trata de modelos similares a los mencionados anteriormente, pero que no requieren del empleo de estructuras de soporte para poder realizar

dicha valoración en el tercer eje de la máquina. De esta forma, se podrían distinguir errores en las mediciones debidos a un fallo en el sistema de posicionamiento en el eje Z, permitiendo que se tengan los datos necesarios para recalibrar el sistema motriz (ISO 52902, 2023). Las mediciones que se realizarán sobre estas piezas, así como su código, se representan en el croquis de la Figura 4.27.

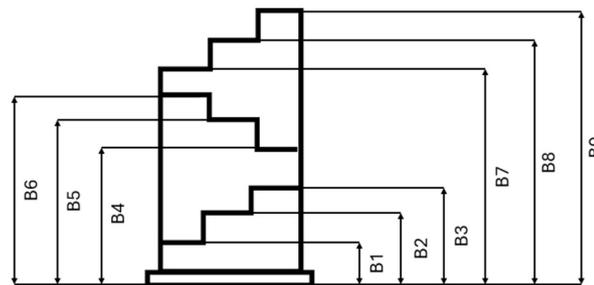


Figura 4.27. Croquis de las mediciones a realizar sobre los artefactos para el eje Z, código B (Elaboración propia).

- **Resolución.**

La resolución es la cualidad del sistema que determina el grado de distinción que puede apreciarse entre dos piezas próximas en el espacio o en el tiempo. Los artefactos que contempla la norma ISO 52902:2023 para valorar este parámetro geométrico de fabricación son los siguientes:

- **Resolución de pasadores.**

Estos artefactos se emplean para realizar una evaluación sobre la capacidad del material empleado durante la fabricación para producir características finas en una pieza, mediante la impresión de geometrías que pueden estar presentes en piezas del sector industrial. El pasador más fino que la máquina es capaz de modelar informa sobre los detalles geométricos más finos que se pueden obtener mediante el empleo del sistema de fabricación aditiva que se está analizando. La medida sobre el diámetro de los pasadores también puede aportar información sobre la precisión del sistema. (ISO 52902, 2023). Las mediciones que se realizarán sobre estas piezas, así como su código, se representan en el croquis de la Figura 4.28.

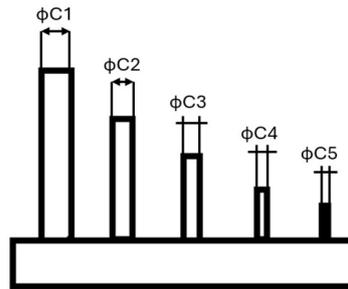


Figura 4.28. Croquis de las mediciones a realizar sobre los artefactos para la resolución de pines, código C (Elaboración propia).

○ **Resolución de agujeros.**

Estas probetas tienen como objetivo valorar cualitativamente la capacidad mínima de producción de características cilíndricas internas en una pieza mediante el empleo de la tecnología que se está analizando. El agujero con menor diámetro que la máquina es capaz de modelar informa sobre los detalles geométricos más finos que se pueden obtener mediante esta técnica. Además de esta información, este artefacto también sirve para sacar en conclusión cuál es el grado de facilidad del sistema para la eliminación de material no solidificado del interior de agujeros pequeños. La medida sobre el diámetro de los agujeros también puede aportar información sobre la precisión del sistema. (ISO 52902, 2023). Las mediciones que se realizarán sobre estas piezas, así como su código, se representan en el croquis de la Figura 4.29.

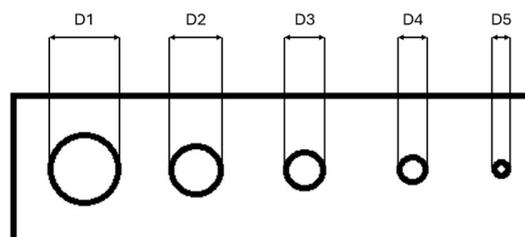


Figura 4.29. Croquis de las mediciones a realizar sobre los artefactos para la resolución de agujeros, código D (Elaboración propia).

○ **Resolución de nervios.**

Estos artefactos se utilizan para poder conocer el valor mínimo de espesor de pared que se puede llegar a obtener aplicando este sistema de fabricación aditiva. El nervio más fino que la máquina es capaz de imprimir informa sobre los detalles geométricos más finos que se pueden

obtener de esta manera, sobre todo de cara al modelado de estructuras de paredes finas. La medida sobre el ancho de los nervios también puede aportar información sobre la precisión del sistema. (ISO 52902, 2023). Las mediciones que se realizarán sobre estas piezas, así como su código, se representan en el croquis de la Figura 4.30.

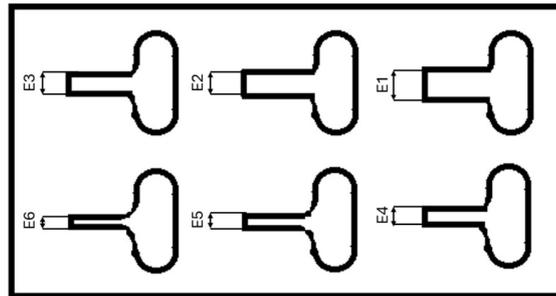


Figura 4.30. Croquis de las mediciones a realizar sobre los artefactos para la resolución de nervios, código E (Elaboración propia).

- **Resolución de ranuras.**

Estos artefactos se emplean con el propósito de conocer la capacidad del sistema en cuanto al valor mínimo de espesor de ranura que se puede llegar a conseguir en las piezas, o bien el valor mínimo de la separación entre dos características geométricas que se puede lograr mediante dicho sistema. La ranura más fina que la máquina es capaz de imprimir informa sobre los detalles geométricos más finos que se pueden obtener. La medida sobre el ancho de las ranuras también puede aportar información sobre la precisión del sistema (ISO 52902, 2023). Las mediciones que se realizarán sobre estas piezas, así como su código, se representan en el croquis de la Figura 4.31.

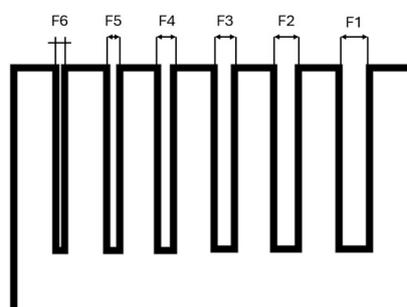


Figura 4.31. Croquis de las mediciones a realizar sobre los artefactos para la resolución de ranuras, código F (Elaboración propia).



- **Acabado superficial.**

El acabado superficial es la cualidad de un sistema que mide su capacidad para producir piezas de calidad respecto a los detalles finales de su fabricación, a nivel superficial. La norma ISO 52902:2023 solamente contempla un tipo de artefacto para valorar este parámetro geométrico de fabricación.

Sin embargo, debido a su gran tamaño su empleo como artefacto para la evaluación y valoración de esta propiedad es poco productivo. Esto no se debe solamente al tiempo y material que implicaría su impresión en PLA, si no, sobre todo, a los recursos que implicaría fabricar una pieza de estas dimensiones con el filamento cerámico (considerando los coeficientes de corrección de escala y las etapas de post-procesado necesarias).

Por lo tanto, se decidió diseñar una pieza que permitiera obtener las mismas conclusiones que dicho artefacto, presentado una geometría mucho más sencilla y una menor dificultad en cuanto a las trayectorias de impresión necesarias y el material a emplear. De esta forma, sobre esta pieza se podrá medir, principalmente el acabado superficial de una superficie en función de su inclinación, observando el efecto de los voladizos en una pieza fabricada con este material. Además de este condicionante, también se pueden considerar muchos otros como, por ejemplo, el diámetro de la boquilla extrusora empleada, la gravedad, la disipación de calor y el perfil de parámetros de funcionamiento que emplea la máquina durante el modelado. Todo ello provoca que la textura y el acabado de las piezas, cambien a lo largo de su superficie.

La valoración del acabado superficial de este artefacto se realizará mediante una inspección visual y táctil de las superficies generadas por la impresora, pese a que la norma recomienda el empleo de equipos que sean capaces de obtener el valor de alguno de los parámetros de rugosidad que se contemplan. Esto se debe a que, durante la realización de este proyecto, no se disponía del equipo necesario para poder obtener estas mediciones. Sin embargo, esto no es un inconveniente para el estudio de los artefactos, ya que el verdadero objetivo es poder establecer una comparación entre las dos tecnologías de fabricación aditiva.



#### 4.4.2.- Probetas en PLA y resultados.

Como se ha mencionado antes, uno de los principios de funcionamiento a tener en cuenta es que la fabricación de los artefactos se debe realizar utilizando un perfil de parámetros de fabricación ya optimizado, para que los resultados sean representativos del verdadero alcance de la tecnología. Por ello, para la impresión de estas probetas se ha empleado el perfil de parámetros de impresión universal para PLA que se indica en la Tabla 4.40, que fue empleado como la base para la elaboración del propio perfil de impresión experimental obtenido.

Temperaturas de Impresión	
Temperatura Boquilla	215°C
Temperatura Boquilla 1ª Capa	215°C
Temperatura Cama	60°C
Temperatura Cama 1ª Capa	60°C
Capas y Perímetros	
Diámetro Boquilla Extrusión	0.4 mm
Altura de Capa	0.15 mm
Altura de 1ª Capa	0.15 mm
Falda y Balsa	
Las probetas que se fabricaron no requieren el empleo de balsa para aumentar la adherencia de la pieza a la plataforma de trabajo de la impresora. En cuanto a la falda, se estableció una por defecto, de mínimo un bucle, con una altura de tres capas y a una distancia de 3 milímetros de la probeta fabricada.	
Soporte	
Las probetas que se fabricaron no requieren el empleo de material de soporte para aumentar la estabilidad de la pieza durante la impresión.	
Perfil de Velocidades de Impresión	
Perímetros	40 mm/s
Perímetros Pequeños	25 mm/s
Perímetros Externos	30 mm/s
Relleno	80 mm/s
Relleno Sólido	80 mm/s
Relleno Sólido Superior	40 mm/s
Soporte	40 mm/s
Puentes	25 mm/s
Relleno de Hueco	40 mm/s
Velocidad de la 1ª Capa	20 mm/s
Parámetros del filamento de impresión	
Multiplicador de extrusión	1.00

Parámetros geométricos de impresión	
Nº de perímetros	2
Nº de capas inferiores	5
Nº de capas superiores	8
Parámetros del relleno	
Porcentaje de relleno mínimo	15%
Patrón de relleno	Giroide

Tabla 4.40. Perfil de parámetros de impresión universal para PLA.

Además, también es necesario considerar que la tecnología de fabricación aditiva por FDM con PLA no requiere una fase de post-procesado posterior a la impresión de las piezas, por lo que las mediciones sobre los artefactos se realizarán según concluya este proceso. A continuación, se muestran los artefactos obtenidos mediante esta técnica y los resultados extraídos de ellos.

- **Precisión.**
  - **Artefacto lineal.**

La Figura 4.32 muestra los artefactos fabricados para la realización del estudio. Como se ha mencionado anteriormente, se han fabricado dos artefactos de esta tipología. El primero de ellos servirá para valorar los posibles errores de posicionamiento sobre el eje X de la máquina, mientras que el segundo hará lo propio sobre el eje Y de esta. En la Tabla 4.41 se muestran los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.26.

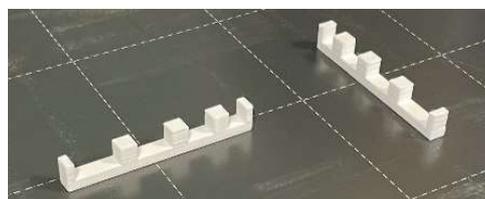


Figura 4.32. Artefactos lineales fabricados en PLA (Elaboración propia).

<b>Mediciones obtenidas para artefactos lineales (código A)</b>			
Descripción	Artefacto lineal para desviaciones sobre el eje X de la máquina (fabricación en PLA)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
A1	2.50	2.48	-
A2	5.00	4.87	-
A3	5.00	4.88	-
A4	5.00	4.90	-
A5	2.50	2.44	-
A6	12.50	12.50	-
A7	10.00	10.00	-
A8	7.50	7.47	-
A9	5.00	4.90	-
Descripción	Artefacto lineal para desviaciones sobre el eje Y de la máquina (fabricación en PLA)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
A1	2.50	2.45	-
A2	5.00	5.03	-
A3	5.00	5.04	-
A4	5.00	5.03	-
A5	2.50	2.55	-
A6	12.50	12.57	-
A7	10.00	10.01	-
A8	7.50	7.52	-
A9	5.00	5.03	-

Tabla 4.41. Medidas artefactos lineales (fabricación en PLA).

○ **Artefacto para el Eje-Z.**

La Figura 4.33 muestra el artefacto fabricado para la realización del estudio. En la Tabla 4.42 se muestran los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.27.



Figura 4.33. Artefacto para el eje Z fabricado en PLA (Elaboración propia).

<b>Mediciones obtenidas para artefacto para eje Z (código B)</b>			
Descripción	Artefacto para eje Z (fabricación en PLA)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
B1	4.50	4.61	-
B2	8.25	8.20	-
B3	13.88	13.81	-
B4	19.50	19.60	-
B5	23.25	23.22	-
B6	25.75	25.81	-
B7	28.25	28.22	-
B8	32.00	32.05	-
B9	37.63	37.68	-

Tabla 4.42. Medidas artefacto para eje Z (fabricación en PLA).

- **Resolución.**
  - **Resolución de pines.**

La Figura 4.34 muestra el artefacto fabricado para la realización del estudio. De entre todos los demostradores de este tipo de los que dispone la norma, con diámetros iguales, pero con diferente relación altura-diámetro, se decidió imprimir aquella con relación 4:1 para reducir los tiempos de impresión. En la Tabla 4.43 se muestran los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.28.

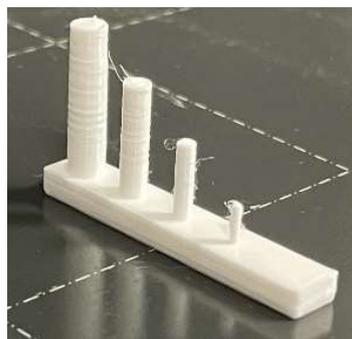


Figura 4.34. Artefactos para resolución de pines fabricados en PLA (Elaboración propia).

<b>Mediciones obtenidas para artefactos para resolución de pines (código C)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de pines, relación altura-diámetro 4:1 (fabricación en PLA)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
C1	4.00	3.81	-
C2	3.00	2.87	-
C3	2.00	1.89	-
C4	1.00	1.08	Acabado superficial muy pobre, excesiva cantidad de hilos de material de impresión.
C5	0.50	-	El sistema de fabricación no ha podido modelar el pin de este diámetro.

Tabla 4.43. Medidas artefactos para resolución de pines (fabricación en PLA).

○ **Resolución de agujeros.**

La Figura 4.35 muestra el artefacto fabricado para la realización del estudio. En la Tabla 4.44 se muestran los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.29.



Figura 4.35. Artefacto para la resolución de agujeros fabricado en PLA (Elaboración propia).

<b>Mediciones obtenidas para artefacto para resolución de agujeros (código D)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de agujeros (fabricación en PLA)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
D1	4.00	3.88	-
D2	3.00	2.81	-
D3	2.00	1.80	-
D4	1.00	-	La dimensión fue demasiado pequeña para ser medida con los medios de los que se disponía.
D5	0.50	-	El sistema de fabricación no ha podido modelar el agujero de este diámetro.

Tabla 4.44. Medidas artefacto para resolución de agujeros (fabricación en PLA).

- **Resolución de nervios.**

La Figura 4.36 muestra el artefacto fabricado para la realización del estudio. La norma dispone de varias clases de artefactos de esta tipología, donde los espesores de los nervios no cambian de una a otra, pero si lo hacen tanto su altura como la forma de los pilares de sujeción. De esta forma, se eligió la probeta de pilares redondeados de 10 milímetros de altura para realizar la comparación. En la Tabla 4.45 se muestran los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.30.

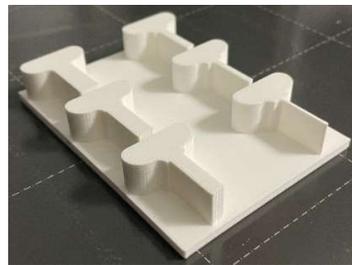


Figura 4.36. Artefactos para la resolución de nervios fabricados en PLA (Elaboración propia).

<b>Mediciones obtenidas para artefactos para resolución de nervios (código E)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de nervios, pilares redondeados de 10 milímetros de altura (fabricación en PLA)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
E1	6.00	5.91	-
E2	5.00	4.92	-
E3	4.00	3.92	-
E4	3.00	2.90	-
E5	2.00	1.88	-
E6	1.00	0.96	-

Tabla 4.45. Medidas artefactos para resolución de nervios (fabricación en PLA).

- **Resolución de ranuras.**

La Figura 4.37 muestra el artefacto fabricado para la realización del estudio. La norma permite la impresión de varios tipos de artefactos para la valoración de este aspecto, donde los espesores de las ranuras no cambian de uno a otro, pero si lo hacen tanto su altura como la

inclinación de las paredes que separan las ranuras. De esta forma, se eligió como probeta aquella con paredes sin inclinación y una altura de 10 milímetros. En la

Tabla 4.46 se muestran los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.31.

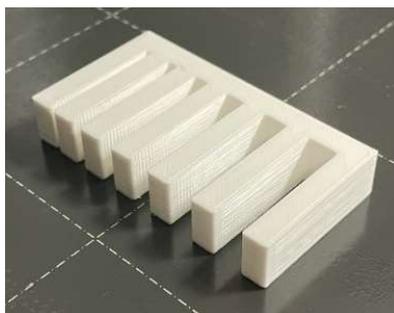


Figura 4.37. Artefactos para la resolución de ranuras fabricados en PLA (Elaboración propia)

<b>Mediciones obtenidas para artefactos para resolución de nervios (código F)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de ranuras, disposición plana de 10 milímetros de altura (fabricación en PLA)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
F1	6.00	6.04	-
F2	5.00	5.07	-
F3	4.00	4.07	-
F4	3.00	3.06	-
F5	2.00	2.09	-
F6	1.00	1.07	-

Tabla 4.46. Medidas artefactos para resolución de ranuras (fabricación en PLA).

- **Acabado superficial.**

La Figura 4.38 muestra la pieza fabricada para la realización del estudio. Como se mencionó anteriormente, se valorará la calidad superficial de la superficie superior e inferior de la probeta, las cuales presentan una inclinación progresiva con respecto a la vertical, comprendida entre los 30° y los 80°.

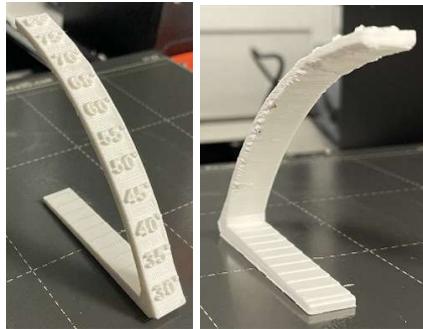


Figura 4.38. Probeta para el acabado superficial fabricado en PLA (Elaboración propia).

Como se puede observar, por la cara superior no se pueden distinguir grandes defectos en la pieza. Esta superficie presenta unas propiedades aproximadamente homogéneas, a excepción de que aumenta la percepción de las diferencias entre cada una de las capas de impresión. Sin embargo, en la superficie inferior si se pueden identificar grandes defectos que son menos importantes hasta los 45° y que empiezan a cobrar más importancia e influencia sobre el acabado de la pieza a partir de los 60°, con un defecto importante a una inclinación de 70°.

#### 4.4.3.- Probetas en cerámica técnica y resultados.

De acorde con el principio de funcionamiento establecido en la norma, para la fabricación de los artefactos en cerámica técnica se empleará el perfil de parámetros que había sido obtenido mediante el proceso de optimización descrito en el capítulo anterior y cuyo resultado final se muestra resumido en la Tabla 4.39. Este perfil optimizado se aplicará tanto al proceso de impresión de las probetas, como a todas las operaciones de post-procesado posteriores necesarias para la obtención de la pieza final.

De esta forma, las mediciones sobre los artefactos se realizarán una vez finalizada la etapa de post-procesado, con el objetivo de analizar el verdadero alcance de la tecnología. Por último, pese a que la norma impide el escalado de las probetas, para la fabricación en cerámica técnica será necesario tener en consideración los coeficientes de corrección de escala que se deben aplicar a los modelos digitales fabricados según esta tecnología, para contrarrestar el

efecto de la contracción microestructura de las piezas. A continuación, se muestran los artefactos obtenidos mediante esta técnica y los resultados extraídos de ellos.

- **Precisión.**
  - **Artefacto lineal.**

Para este estudio, se fabricaron los mismos artefactos que los empleados en el estudio de probetas en PLA. La Figura 4.39 muestra las piezas fabricadas para la realización del estudio. En la Tabla 4.47. se muestran los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.26.

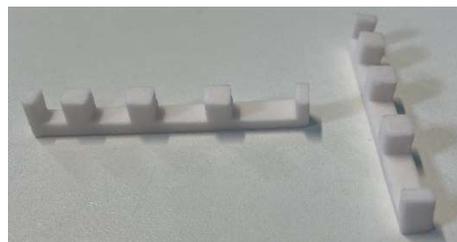


Figura 4.39. Artefactos lineales fabricados en alúmina (Elaboración propia).

<b>Mediciones obtenidas para artefactos lineales (código A)</b>			
Descripción	Artefacto lineal para desviaciones sobre el eje X de la máquina (fabricación en alúmina)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
A1	2.50	2.56	La pieza ha sufrido una torsión marcada, que ha provocado que las dimensiones de las distancias entre cada uno de los salientes de la pieza no se puedan materializar correctamente. Sin embargo, aquellas partes sin torsión (salientes) están bien materializadas.
A2	5.00	5.00	
A3	5.00	5.02	
A4	5.00	5.01	
A5	2.50	2.57	
A6	12.50	12.01	
A7	10.00	9.63	
A8	7.50	7.22	
A9	5.00	4.70	
Descripción	Artefacto lineal para desviaciones sobre el eje Y de la máquina (fabricación en alúmina)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
A1	2.50	2.54	La pieza ha sufrido una torsión marcada, que ha provocado que
A2	5.00	5.01	

A3	5.00	5.03	las dimensiones de las distancias entre cada uno de los salientes de la pieza no se puedan materializar correctamente. Sin embargo, aquellas partes sin torsión (salientes) están bien materializadas.
A4	5.00	5.10	
A5	2.50	2.57	
A6	12.50	11.89	
A7	10.00	9.59	
A8	7.50	7.10	
A9	5.00	4.76	

Tabla 4.47. Medidas artefactos lineales (fabricación en alúmina).

○ **Artefacto para el eje Z.**

Para este estudio, se fabricó el mismo artefacto que el empleado en el estudio de probetas en PLA. La Figura 4.40 muestra la pieza fabricada para la realización del estudio. En la Tabla 4.48 se muestran los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.27.



Figura 4.40. Artefacto para el eje Z fabricado en alúmina (Elaboración propia).

Mediciones obtenidas para artefacto para eje Z (código B)			
Descripción	Artefacto para eje Z (fabricación en alúmina)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
B1	4.50	4.42	La torsión que ha sufrido la pieza durante las operaciones de post-procesamiento ha provocado que las dimensiones en el eje Z vayan presentando un error acumulado cada vez más alto, alcanzándose finalmente una desviación de
B2	8.25	8.17	
B3	13.88	13.68	
B4	19.50	19.28	
B5	23.25	22.88	
B6	25.75	25.35	
B7	28.25	27.76	
B8	32.00	31.50	

B9	37.63	36.84	aproximadamente 0.8 milímetros.
----	-------	-------	---------------------------------

Tabla 4.48. Medidas artefacto para eje Z (fabricación en alúmina).

- **Resolución.**
  - **Resolución de pines.**

Para este estudio, se fabricó el mismo artefacto que el empleado en el estudio de probetas en PLA. La Figura 4.41 muestra la pieza fabricada para la realización del estudio. La Tabla 4.49 muestra los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.28.

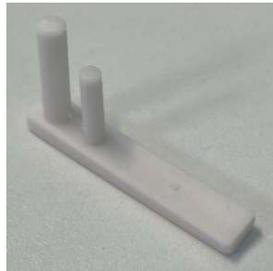


Figura 4.41. Artefactos para resolución de pines fabricados en alúmina (Elaboración propia).

<b>Mediciones obtenidas para artefactos para resolución de pines (código C)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de pines, relación altura-diámetro 4:1 (fabricación en alúmina)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
C1	4.00	4.03	-
C2	3.00	3.02	-
C3	2.00	-	Este pin se despegó de la base del artefacto, durante el proceso de sinterizado.
C4	1.00	-	Este pin fue disuelto durante la etapa de desbanderizado químico.
C5	0.50	-	El sistema de fabricación no ha podido modelar el pin de este diámetro.

Tabla 4.49. Medidas artefactos para resolución de pines (fabricación en alúmina).

Por otro lado, es preciso indicar que en esta pieza surgieron problemas con la retracción del filamento cerámico durante su impresión. Más adelante, se comentarán tanto la raíz de este problema, como la solución adoptada para poder sobrellevarlo y corregirlo para que no vuelva a repetirse en la impresión de otras piezas similares.

- **Resolución de agujeros.**

Para este estudio, se fabricó el mismo artefacto que el empleado en el estudio de probetas en PLA. La Figura 4.42 muestra la pieza fabricada para la realización del estudio. La Tabla 4.50 muestra los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.29.

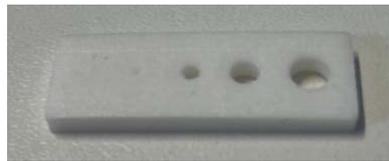


Figura 4.42. Artefacto para la resolución de agujeros fabricado en alúmina (Elaboración propia).

<b>Mediciones obtenidas para artefacto para resolución de agujeros (código D)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de agujeros (fabricación en alúmina)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
D1	4.00	3.89	-
D2	3.00	2.94	-
D3	2.00	1.92	-
D4	1.00	-	Este agujero se cerró debido a la reducción de la pieza durante la operación de sinterizado.
D5	0.50	-	El sistema de fabricación no ha podido modelar el pin de este diámetro.

Tabla 4.50. Medidas artefacto para resolución de agujeros (fabricación en alúmina).

- **Resolución de nervios.**

Para este estudio, se fabricó el mismo artefacto que el empleado en el estudio de probetas en PLA. Sin embargo, con el objetivo de no tener tiempos de impresión excesivamente largos y

poder post-procesar las piezas resultantes, se dividió dicho demostrador en 6 piezas más sencillas, cada una de las cuales contiene un único nervio. La Figura 4.43 muestra las piezas fabricadas para la realización del estudio. En la Tabla 4.51 se muestran los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.30.

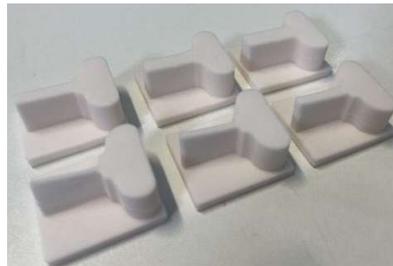


Figura 4.43. Artefactos para la resolución de nervios fabricados en alúmina (Elaboración propia).

<b>Mediciones obtenidas para artefactos para resolución de nervios (código E)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de nervios, pilares redondeados de 10 milímetros de altura (fabricación en alúmina)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
E1	6.00	5.95	Todos y cada uno de los nervios sufrieron una torsión grave, alterando su geometría original. Esta deformación era más notable, cuanto más se reducía el espesor del nervio.
E2	5.00	5.00	
E3	4.00	3.95	
E4	3.00	3.02	
E5	2.00	2.03	
E6	1.00	1.10	

Tabla 4.51. Medidas artefactos para resolución de nervios (fabricación en alúmina).

No solo en estas piezas han existido problemas derivados de la torsión que estas experimentan durante las operaciones de post-procesado. Sin embargo, para este artefacto y, como se verá a continuación, para el siguiente, estas deformaciones son muy notables. Más adelante, se comentarán tanto la raíz de este problema, como la solución adoptada para poder sobrellevarlo y corregirlo para que no vuelva a tener lugar en la impresión de otras piezas similares.

- **Resolución de ranuras.**

Para este estudio, se fabricó el mismo artefacto que el empleado en el estudio de probetas en PLA. Sin embargo, con el objetivo de no tener tiempos de impresión excesivamente largos y poder post-procesar las piezas resultantes, se dividió dicho demostrador en 3 piezas más sencillas. La Figura 4.44 muestra las piezas fabricadas para la realización del estudio. En la Tabla 4.52 se muestran los resultados y observaciones de las mediciones, especificadas en la Figura 4.31.



Figura 4.44. Artefactos para la resolución de ranuras fabricados en alúmina (Elaboración propia).

<b>Mediciones obtenidas para artefactos para resolución de nervios (código F)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de ranuras, disposición plana de 10 milímetros de altura (fabricación en alúmina)		
Código	Objetivo (mm)	Medida (mm)	Observaciones
F1	6.00	5.76	Todas y cada una de las paredes entre ranuras sufrieron una torsión grave, alterando su geometría original. Esta deformación era más notable en las paredes de menor espesor.
F2	5.00	4.62	
F3	4.00	3.67	
F4	3.00	2.74	
F5	2.00	2.03	
F6	1.00	0.92	

Tabla 4.52. Medidas artefactos para resolución de ranuras (fabricación en alúmina).

- **Acabado superficial.**

Para este estudio, se fabricó el mismo artefacto que el empleado en el estudio de probetas en PLA. La Figura 4.45 muestra la pieza fabricada para la realización del estudio. Como se puede observar en la imagen, en comparación con la pieza fabricada en PLA, se puede ver que la pieza cerámica tiene muchos defectos a lo largo de ambas superficies (superior e inferior) e, incluso, no logró realizar la impresión al completo de la pieza. La superficie superior tiene peor resolución que en el primer caso y la inferior presenta defectos importantes desde los 30° hasta

los 60°. Además, a partir de los 65° la pieza pierde cualquier tipo de definición y los voladizos de la pieza hacen que la impresión se detenga provocando un atasco en el cabezal de impresión.

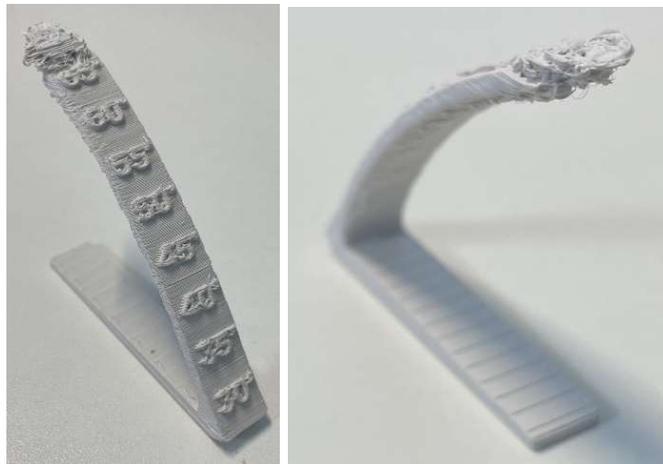


Figura 4.45. Probeta para el acabado superficial fabricado en alúmina (Elaboración propia).

#### 4.4.4.- Correcciones y aspectos a tener en cuenta extraídos de los resultados.

Las piezas de la norma ISO-52902 presentan una geometría mucho más compleja que cualquier otra pieza de las que fueron fabricadas durante el estudio experimental para la optimización del perfil de parámetros de fabricación de este filamento. Por lo tanto, dichas geometrías conllevaban nuevas trayectorias y desafíos tecnológicos que no habían podido ser abordados hasta este momento. A continuación, se exponen las dos adversidades que se encontraron durante la fabricación de estas geometrías más complejas, así como su proceso de estudio y la solución aportada para sobrellevarlas y mejorar impresiones posteriores.

- **Torsión de las piezas durante el post-procesado.**

Como se puede observar, al post-procesar algunas de estas probetas de geometría compleja, como por ejemplo los artefactos para la evaluación de la resolución de nervios y ranuras, las piezas sufren una torsión que se va incrementando a lo largo que esta pasa a través de las operaciones de post-procesado. De esta forma, la torsión comienza en el proceso de desbanderizado químico, acentuándose durante los tratamientos térmicos de desbanderizado y sinterizado.

Sin embargo, es preciso incidir en que el grado en el que las piezas sufren dicho efecto torsor no es constante e igual en todas ellas, si no que se presenta en mayor o menor medida en función de la geometría de la pieza. Por lo tanto, la causa de este defecto reside en cómo es la propia geometría. Después de un proceso de análisis y consulta de diferentes documentos propios del fabricante del filamento cerámico comercial, se llegó a la conclusión de que esto estaba provocado por la esbeltez que pueden llegar a presentar ciertas partes de la pieza y las diferencias de sección contempladas en su diseño.

De forma similar a como ocurre en el campo de la transmisión de esfuerzos, estas esbelteces y variaciones bruscas de sección generan un efecto parecido al que implican los factores concentradores de tensión. La transmisión de las tensiones internas que se dan durante ambos procesos de desbanderizado y, sobre todo, durante el sinterizado (debido a la contracción de las piezas al tratar de eliminar la porosidad existente) no se realiza de forma suave y moderada en estas zonas, lo que somete a las partes más esbeltas de la pieza a un retorcimiento severo. Al igual que en dichos casos, cuanto más brusca sea dicha variación o mayor sea la esbeltez de esa parte de la pieza, más visibles serán estos defectos geométricos (Véle et al., 2022). En la Figura 4.46 se puede observar una comparativa de la intensidad del efecto torsor en función de dichos parámetros.

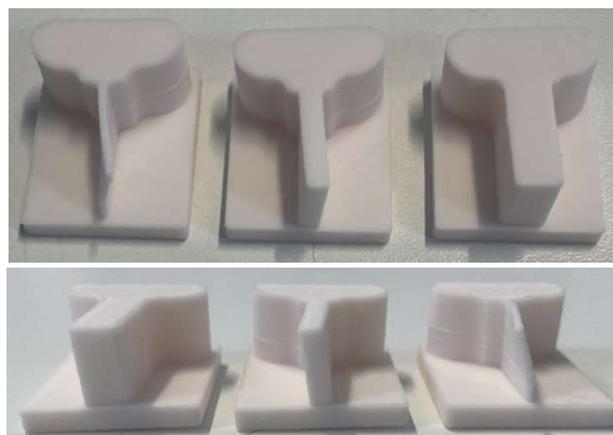


Figura 4.46. Comparativa del efecto torsor según parámetros de influencia (Elaboración propia).



Esta hipótesis queda confirmada con el análisis de la guía de diseño proporcionada por el fabricante de filamento comercial. En dicho documento, se indica que se deben evitar los cambios bruscos de sección en el diseño de las piezas, siendo preferible la existencia de redondeos en las aristas en lugar de ángulos abruptos entre sus caras. También se expone que se pueden ocasionar colapsos o deformaciones de las paredes de una pieza en función del valor de la relación altura-ancho de dicha pared, siendo esta crítica cuando es superior a 2. El propio documento del fabricante propone como solución para sobrellevar esta problemática, además del redondeo de las aristas, la posibilidad de situar varios refuerzos sobre las paredes o, si se dispone de un software de laminación lo suficientemente avanzado, imprimir las capas de la pieza en sentidos alternos de las agujas del reloj (Zetamix, s.f.).

- **Fallos de impresión debidos a los movimientos de retracción en el extrusor.**

Durante la obtención de la pieza para la valoración de resolución de pines, se detectó un problema en la impresión de dicho artefacto al emplear el perfil de parámetros que se venía aplicando. Dicha problemática conllevaba un atasco en el cabezal de extrusión en la zona de conexión entre el barrel y la boquilla, cuando el proceso alcanzaba siempre la misma capa. Cuando, tras dos intentos, se observó el mismo fallo se inició un proceso de análisis para estimar la posible causa del problema.

En la Figura 4.47 se muestran las características de la capa del artefacto objeto de estudio según el software de laminación de Prusa, de manera que se muestran las trayectorias a realizar por el extrusor.

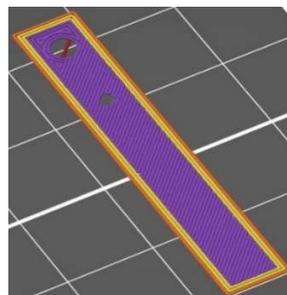


Figura 4.47. Trayectorias a realizar en la capa origen del problema (Elaboración propia).

Además, en la Figura 4.48 se exponen también los puntos de entrada-salida en la capa que realiza el extrusor en un intervalo de tiempo muy corto, el cual es precisamente el origen del problema.

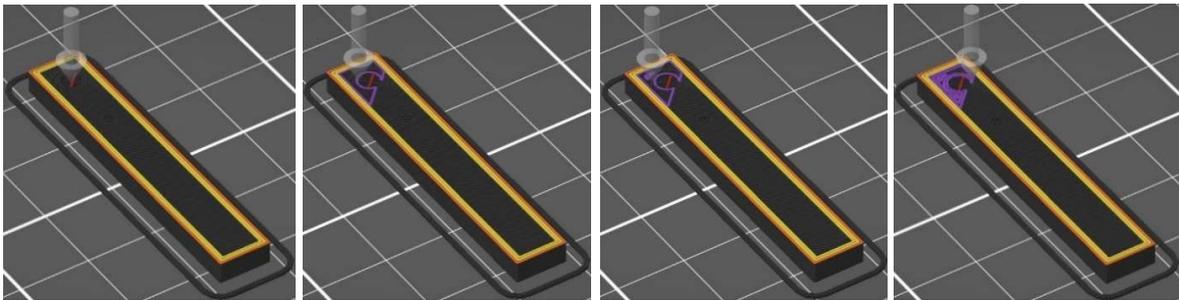


Figura 4.48. Puntos de entrada-salida del cabezal de extrusión en la cada a estudiar (Elaboración propia).

Como se puede ver, el cabezal de extrusión realiza un número elevado de entradas y salidas en la capa en un intervalo de tiempo muy corto. Cada uno de estos movimientos entre trayectorias de impresión se denomina como “movimiento en vacío del cabezal”, en el que el extrusor deja de imprimir, se eleva en el eje Z, se traslada al punto de entrada de la siguiente trayectoria, vuela a bajar hasta la altura de trabajo y continúa la impresión. Para cada uno de estos movimientos, el extrusor realiza lo que se conoce como retracción, con el objetivo de evitar el goteo de material de impresión entre un punto y otro del desplazamiento. En esta retracción, cuando el cabezal se levanta, el filamento es empujado hacia el interior del extrusor, de manera que el material fundido se introduce en el interior del barrel para que, cuando se tiene que reanudar la impresión de la pieza, el filamento vuelva a ser impulsado hacia la boquilla, evitando el goteo de material.

Sin embargo, no todos los materiales permiten este tipo de movimientos. Por ejemplo, el PLA (cuyo perfil de impresión fue utilizado como base para la optimización del perfil del filamento de alúmina), al tratarse de un material poco pegajoso, con buen flujo en estado fundido y con una temperatura de impresión alta, permite realizar retracciones largas, sin implicar atascos de material en el extrusor. Por el contrario, en el caso de filamento cerámico objeto de



estudio, al ser tan pegajoso y corrosivo, e imprimir a una temperatura relativamente baja, no tiene un buen comportamiento al aplicar sobre él un movimiento de retracción.

Para corregir este problema, fue suficiente con eliminar los movimientos de retracción del perfil de impresión del filamento. Por lo tanto, en la parte relacionada con la configuración del filamento del software de PrusaSlicer, en el menú de anulaciones de material, se seleccionó una longitud de retracción de 0 milímetros.

Por todo lo mencionado anteriormente, se deben tener en cuenta las correcciones sobre el perfil de parámetros de impresión y consideraciones sobre el diseño de las piezas que se exponen en la Tabla 4.53.

Consideraciones en el diseño de las piezas (siempre que sea posible)	
Evitar los cambios bruscos de sección. Redondeo de las aristas de la pieza. Evitar partes con relación altura-ancho mayor que 2. Evitar paredes y partes muy esbeltas.	
Movimiento de retracción	
Longitud de retracción (mm)	0

Tabla 4.53. Correcciones sobre el perfil de fabricación del filamento cerámico.

#### 4.4.5.- Comparativa entre ambas tecnologías.

Una vez que se han obtenido todos los artefactos para cada una de las tecnologías de fabricación aditiva por FDM que se van a comparar y se han realizado todas las mediciones convenientes para poder determinar el comportamiento geométrico de cada una de ellas, ya se puede realizar una comparativa entre los resultados de ambos procedimientos. A continuación, se exponen las desviaciones dimensionales con respecto al valor objetivo de cada una de las mediciones realizadas sobre los artefactos de la norma.



- **Precisión.**
  - **Artefacto lineal.** Comparación en Tabla 4.54.

<b>Comparativa de mediciones sobre artefactos lineales (código A)</b>			
Descripción	Artefacto lineal para desviaciones sobre el eje X de la máquina		
Código	Objetivo (mm)	Desviación artefactos PLA (mm)	Desviación artefactos alúmina (mm)
A1	2.50	0.02	0.06
A2	5.00	0.13	0.00
A3	5.00	0.12	0.02
A4	5.00	0.10	0.01
A5	2.50	0.06	0.07
A6	12.50	0.00	0.49
A7	10.00	0.00	0.37
A8	7.50	0.03	0.28
A9	5.00	0.10	0.30
Descripción	Artefacto lineal para desviaciones sobre el eje Y de la máquina		
Código	Objetivo (mm)	Desviación artefactos PLA (mm)	Desviación artefactos alúmina (mm)
A1	2.50	0.05	0.04
A2	5.00	0.03	0.01
A3	5.00	0.04	0.03
A4	5.00	0.03	0.10
A5	2.50	0.05	0.07
A6	12.50	0.07	0.61
A7	10.00	0.01	0.41
A8	7.50	0.02	0.40
A9	5.00	0.03	0.24

Tabla 4.54. Comparativa de mediciones sobre artefactos lineales.

- **Artefacto para el eje Z.** Comparación en Tabla 4.55.

<b>Comparación de mediciones sobre artefacto para eje Z (código B)</b>			
Descripción	Artefacto para eje Z		
Código	Objetivo (mm)	Desviación artefactos PLA (mm)	Desviación artefactos alúmina (mm)
B1	4.50	0.11	0.08
B2	8.25	0.05	0.08
B3	13.88	0.07	0.20



B4	19.50	0.10	0.22
B5	23.25	0.03	0.37
B6	25.75	0.06	0.40
B7	28.25	0.03	0.49
B8	32.00	0.05	0.50
B9	37.63	0.05	0.79

Tabla 4.55. Comparativa de mediciones sobre artefactos para el eje Z.

- **Resolución.**
  - **Resolución de pines.** Comparación en Tabla 4.56.

<b>Comparación de mediciones sobre artefactos para resolución de pines (código C)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de pines, relación altura-diámetro 4:1		
Código	Objetivo (mm)	Desviación artefactos PLA (mm)	Desviación artefactos alúmina (mm)
C1	4.00	0.09	0.03
C2	3.00	0.13	0.02
C3	2.00	0.11	-
C4	1.00	0.08	-
C5	0.50	-	-

Tabla 4.56. Comparativa de mediciones sobre artefactos para resolución de pines.

- **Resolución de agujeros.** Comparación en Tabla 4.57.

<b>Comparación de mediciones sobre artefacto para resolución de agujeros (código D)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de agujeros		
Código	Objetivo (mm)	Desviación artefactos PLA (mm)	Desviación artefactos alúmina (mm)
D1	4.00	0.12	0.11
D2	3.00	0.19	0.06
D3	2.00	0.20	0.08
D4	1.00	-	-
D5	0.50	-	-

Tabla 4.57. Comparativa de mediciones sobre artefacto para resolución de agujeros.



- **Resolución de nervios.** Comparativa en Tabla 4.58.

<b>Comparación de mediciones sobre artefactos para resolución de nervios (código E)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de nervios, pilares redondeados de 10 milímetros de altura		
Código	Objetivo (mm)	Desviación artefactos PLA (mm)	Desviación artefactos alúmina (mm)
E1	6.00	0.09	0.05
E2	5.00	0.08	0.00
E3	4.00	0.08	0.05
E4	3.00	0.10	0.02
E5	2.00	0.12	0.03
E6	1.00	0.04	0.10

Tabla 4.58. Comparativa de mediciones sobre artefactos para resolución de nervios.

- **Resolución de ranuras.** Comparativa en Tabla 4.59.

<b>Comparativa de mediciones sobre artefactos para resolución de nervios (código F)</b>			
Descripción	Artefacto para resolución de ranuras, disposición plana de 10 milímetros de altura		
Código	Objetivo (mm)	Desviación artefactos PLA (mm)	Desviación artefactos alúmina (mm)
F1	6.00	0.04	0.24
F2	5.00	0.07	0.38
F3	4.00	0.07	0.33
F4	3.00	0.06	0.26
F5	2.00	0.09	0.03
F6	1.00	0.07	0.08

Tabla 4.59. Comparativa de mediciones sobre artefactos para resolución de ranuras.

#### 4.4.6.- Conclusiones de la comparativa

Como se ha podido observar mediante esta comparativa experimental, las piezas fabricadas con el filamento cerámico de alúmina tienen una calidad geométrica similar a las realizadas en PLA, en algunas ocasiones incluso por encima de estas. Por un lado, la precisión de las fabricaciones con ambos materiales es muy similar, un poco mejor en las piezas cerámicas. Sin embargo, el efecto torsor que sufren las piezas cerámicas en las operaciones de



post-procesado pueden provocar que las dimensiones estén mal materializadas, con grandes deformaciones y desviaciones dimensionales muy elevadas en comparación al pequeño tamaño de las piezas fabricadas.

Por otro lado, en lo relativo a la resolución alcanzable con la tecnología, el filamento de PLA tiene un mejor comportamiento que el filamento cerámico. El primero permite fabricar características más pequeñas que el filamento que se está estudiando en este proyecto, el cuál se ve perjudicado por la reducción dimensional que sufren las piezas en la operación de sinterizado, donde características que tanto el software laminador como la impresora son capaces de procesar, terminan desapareciendo en dicho post-proceso. En este aspecto, cabe mencionar que, pese a su peor resolución, los artefactos de esta tipología fueron fabricados con mayor precisión mediante el filamento cerámico que con PLA, a excepción de las piezas de resolución de ranuras, en las que, debido a la torsión de las paredes de la pieza, las dimensiones no fueron correctamente materializadas.

Por último, en cuanto a acabado superficial y capacidad de impresión de voladizos, el filamento de PLA tiene mejor comportamiento que la cerámica en todos los sentidos, a excepción del acabado superficial que presenta la cerámica en superficies sin inclinación (totalmente verticales o horizontales). Esto se debe a que, en el sinterizado, como la pieza reduce mucho su tamaño, hace que no sea posible distinguir las diferencias entre las capas que forman la pieza. Sin embargo, se ha visto como la capacidad del filamento cerámico de fabricar superficies con inclinación es relativamente baja en comparación con el PLA, de manera que su calidad geométrica en este aspecto también está por debajo.

Una vez analizados los resultados de la comparativa experimental, es preciso tener en cuenta que, para conseguir los niveles alcanzados en cuanto a precisión dimensional en las piezas de cerámica, ha sido necesario realizar un cálculo estadístico previo para comprobar y corregir los factores de corrección de escala que se deben aplicar a los modelos 3D para que puedan ser fabricados de forma correcta. No solo esto, si no que ese mismo proceso de cálculo ha tenido que ser repetido, debido a la reposición de la bobina de filamento cerámico empleado.



Pese a que no se cambió ni el modelo, ni el fabricante del filamento, este presentaba factores de corrección distintos y, como se trata de un material que todavía está en proceso experimental pese a ser comercial, está constantemente sufriendo modificaciones que llevan a tener que repetir dicho proceso estadístico cada vez que se cambia de bobina. Por lo tanto, en comparación con la relativa facilidad con la que el usuario puede obtener piezas con buena precisión dimensional mediante el empleo del filamento de PLA, el uso del material cerámico implica un mayor esfuerzo en este aspecto.

## 5.- Conclusiones y trabajos futuros.

### 5.1.- DEMOSTRADOR FINAL DE PROYECTO.

Hasta este punto, no se ha fabricado ninguna pieza en alúmina con una verdadera aplicación en el sector industrial, si no que se limitaron los modelos a piezas experimentales que o bien eran útiles para optimizar el perfil de trabajo del material, o bien permitían valorar el alcance de esta tecnología. Sin embargo, antes de poder extraer conclusiones sobre el comportamiento real del material y del proceso productivo, sería de verdadera importancia obtener una pieza industrial, otorgándole una aplicación veraz a este filamento cerámico.

Por lo tanto, se decidió fabricar una boquilla para un equipo de soldeo TIG. Como este componente en su versión más básica tiene un precio relativamente bajo, se optó por fabricar una versión más avanzada, cuyo precio es diez veces superior en el mercado y cuya obtención mediante el método objeto de estudio supondría una reducción en los costes de operación de dicho equipo de soldeo. De esta forma, la Figura 5.1 representa la pieza fabricada como demostrador final del proyecto, cuyas medidas para la obtención del modelo 3D se extrajeron de un modelo comercial estándar. Cabe mencionar que, como esta pieza de alúmina debería ir acompañada de un difusor con forma de rejilla metálica, la boquilla no podría ser probada, pero aun así da cuenta de las posibilidades que tiene este sistema de fabricación dentro del sector industrial actual.

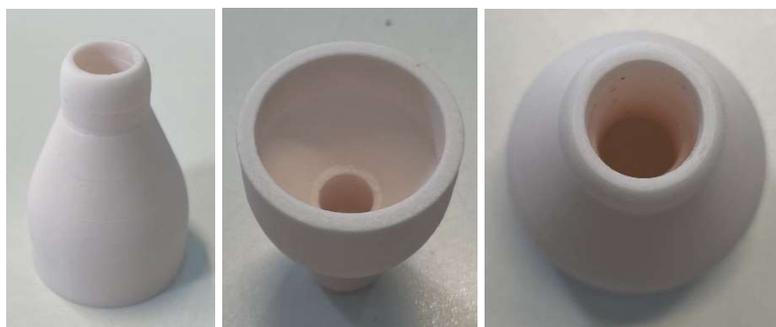


Figura 5.1. Boquilla TIG, demostrador final (Elaboración propia).

Pese a no ser un demostrador orientado a ser testado, la parte dimensional cobra gran importancia en esta pieza, ya que esta presenta una rosca que debe tener un apriete lo suficientemente ajustado como para que el gas de protección no pueda fugarse de la boquilla, pero no puede tener tanto apriete como para que el elemento no pueda roscar. El resultado fue especialmente prometedor, ya que el ajuste dimensional era muy bueno, la boquilla roscaba en la pistola del equipo TIG y tenía un buen sellado en la zona de conexión con esta. La Figura 5.2 muestra la boquilla fabricada ya montada sobre el equipo, mientras que la Tabla 5.1 da cuenta de la precisión dimensional lograda en ella.



Figura 5.2. Montaje de la boquilla en la pistola del equipo TIG (Elaboración propia).

Diámetro interior a la salida de la boquilla	
Medida objetivo (mm)	Medida obtenida (mm)
32.80	32.90
Diámetro exterior a la salida de la boquilla	
Medida objetivo (mm)	Medida obtenida (mm)
35.50	35.50
Espesor de la pared a la salida de la boquilla	
Medida objetivo (mm)	Medida obtenida (mm)
2.70	2.75

Tabla 5.1. Medidas relativas a la precisión lograda sobre la boquilla.



## 5.2.- CONCLUSIONES DEL PROYECTO.

Tras el proceso experimental que se ha descrito en este documento y en relación a los objetivos del proyecto de investigación sobre impresión 3D en cerámica técnica mediante tecnología FDM descritos al inicio de este, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Tanto las operaciones de impresión, como las de post-procesado son realmente importantes para poder obtener piezas con buenas características finales. Durante el proceso de impresión, es necesario prestar atención a posibles atascos de material en el cabezal de extrusión o a posibles roturas del filamento a la entrada de este que pueden para o echar a perder la pieza que se estaba llevando a cabo. Antes de ser post-procesadas, las piezas en verde son muy frágiles y han de tratarse con gran cuidado para no generar defectos e imperfecciones irreparables. Además, el ajuste y control de las condiciones en las que se realizan las operaciones de post-procesado son cruciales para poder obtener piezas dentro del margen de tolerancias establecido, sin deformaciones que provoquen que la pieza deje de ser funcional.
2. La capacidad de resolución de este sistema de fabricación está por debajo de las características que se pueden alcanzar con los materiales plásticos comerciales disponibles en mercado, lo que se ve contrarrestado con las propiedades mecánicas que presentan las piezas de alúmina en comparación con aquellas realizadas con dichos filamentos más convencionales. A nivel de acabados superficiales, el acabado cerámico de las piezas fabricadas es bueno, pero no se han logrado difuminar completamente las diferencias entre cada una de las capas que componen las piezas. En cuanto a precisión dimensional, este sistema de fabricación tiene un buen comportamiento, siempre teniendo en cuenta la necesidad de comprobación y corrección de los factores de corrección de escala cuando se modifique alguna de las condiciones de operación.



3. Se estima que la norma ISO-52902 permite el análisis, de forma completa, de las características y capacidades de los sistemas de fabricación aditiva objeto de estudio. Los artefactos que esta contempla permiten definir al completo las propiedades geométricas y dimensionales de cualquiera de estos procesos productivos. Además, no solo permite el análisis, sino también la comparación entre diferentes tecnologías de fabricación.
4. El perfil de parámetros de fabricación expuesto en la Tabla 4.39, junto con las consideraciones y correcciones indicadas en la Tabla 4.53 y los diferentes factores de corrección de escala considerados (para cada una de las bobinas empleadas), permiten la fabricación de piezas con una buena calidad geométrica y dimensional. Además, se puede considerar que este sistema de fabricación presenta una buena repetitividad, de manera que las características y propiedades finales de las piezas se mantuvieron constantes a lo largo de toda la producción.

Sin embargo, es necesario considerar las limitaciones de diseño que existen para esta tecnología, así como la necesidad de comprobación y corrección de dicho perfil de parámetros en función de la versión de filamento cerámico que se esté empleando y en el caso de que haya tenido lugar cualquier alteración en las condiciones iniciales de operación. En este aspecto, se debe considerar que este filamento cerámico, pese a estar disponible de forma comercial, no está totalmente desarrollado y optimizado siendo sometido a cambios constantes, por lo que el perfil de trabajo también deberá evolucionar con él, hasta que se comercialice un modelo más estandarizado.

### **5.3.- LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.**

Durante la realización de este proyecto, se han ido extrayendo algunas características del sistema productivo objeto de estudio sobre las que sería interesante poder profundizar y explorar. Sin embargo, debido a la corta extensión de este trabajo, estas no se han podido



concretar, ni detallar. De esta forma, a continuación, se recogen diferentes aspectos a considerar como líneas futuras de trabajo, para poder aumentar los conocimientos disponibles acerca de este material:

- **Estudio de la capacidad de fabricación de piezas con soportes.**

Ninguna de las piezas que han sido fabricadas a lo largo del procedimiento experimental requerían la aplicación de estructuras externas a la geometría original del modelo 3D, ya que no había grandes partes en voladizo (exceptuando el artefacto para el análisis del acabado superficial). El fabricante indica en la ficha técnica del filamento cerámico comercial que estos soportes podrían ser modelados utilizando este mismo filamento u otro material plástico que sea soluble en acetona, permitiendo su extracción y limpieza. De esta forma, sería necesario optimizar los parámetros que gobiernan sobre la producción de ambos tipos de soporte, estudiando su comportamiento y acabado.

- **Viabilidad de empleo de otro tipo de barrel en el extrusor.**

Como se ha indicado a lo largo de todo el proceso experimental, el material cerámico empleado en la fabricación de las piezas se fundía a temperaturas muy bajas y, al ser extremadamente pegajoso y abrasivo, provocaba atascos a la entrada de la boquilla por acumulación de material que no hubiese sido fundido de forma correcta. En el mercado existe un tipo de barrel distinto al empleado, que presenta un tubo de teflón (material muy resistente a las altas temperaturas). Esto podría evitar que la cerámica se pegase a sus paredes, reduciendo las posibilidades de obstrucción. Consecuentemente, habría que comprobar y corregir el perfil de parámetros de trabajo para adaptarlo a la nueva configuración de la impresora.

- **Optimización de los parámetros de las operaciones de post-procesado.**

Debido a la corta duración del intervalo de tiempo disponible para la investigación con filamento cerámico de alúmina y los largos tiempos necesarios para poder aplicar a las piezas impresas en dicho material las operaciones de post-procesado adecuadas, no ha sido posible el



estudio de los parámetros que gobiernan dichos procesos. En lugar de llevar a cabo su optimización se optó por emplear aquella configuración recomendada por el fabricante, tanto para los tratamientos químicos, como para los térmicos. Sin embargo, este estudio experimental puede ser beneficioso de cara a mejorar las propiedades finales obtenidas en las piezas de alúmina.

- **Estudio del diseño de las piezas a fabricar.**

Como se ha mencionado anteriormente, el fabricante del filamento comercial incluye una guía de diseño para piezas fabricadas con su producto. Puede resultar beneficioso invertir tiempo y recursos en el estudio de las capacidades de este material, para tratar de definir el alcance de esta tecnología para la materialización de geometrías complejas, sin deformaciones visibles y con buena precisión dimensional.

Como se puede observar, pese a tratarse de un material comercial, este está en continuo desarrollo y evolución. Además, todavía hay muchas líneas de investigación que no se han considerado y que pueden aportar nueva información y aplicaciones a este sistema de fabricación.

# 6.- Planificación temporal.

La planificación temporal seguida durante el transcurso de este proyecto se muestra en la Figura 6.1.

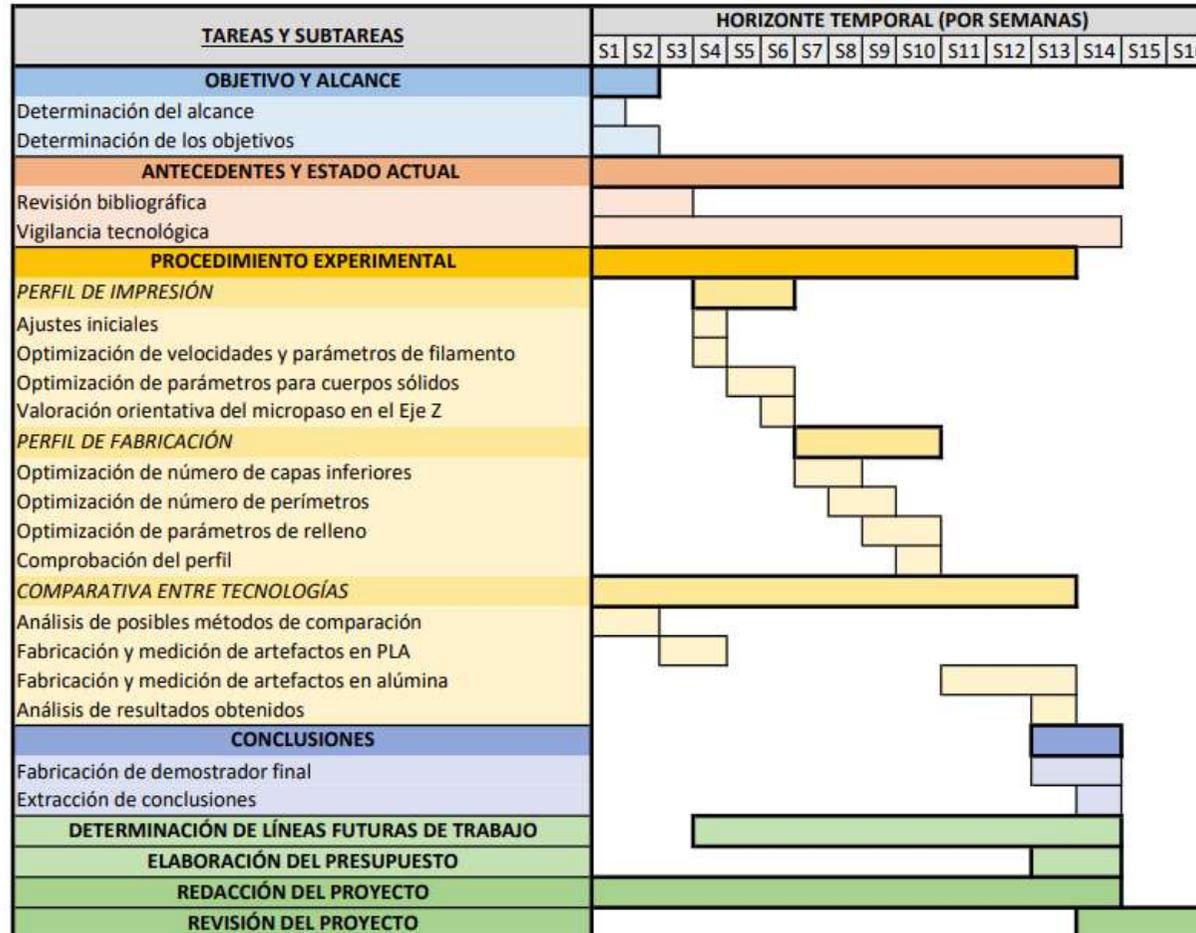


Figura 6.1. Planificación temporal seguida durante la realización del proyecto (Elaboración propia).



## 7.- Referencias bibliográficas

- Badel, H., Suenaga, G., y García, F. (2017). Desarrollo de una impresora 3D basada en la tecnología FDM. *Atenea*, (14), 17-21.
- Barros, J. (Noviembre, 2023). *Los diferentes tipos de cerámicas para impresión 3D*. 3Dnatives. <https://bit.ly/48ArgLJ>
- Beamler – Additive Manufacturing. (Octubre, 2020). *Impresión 3D con cerámica técnica*. Beamler. <https://www.beamler.com/es/impresion-3d-con-ceramica-tecnica/>
- Campello, J. R., Miranda, M., Castaño, D., Blanco, L., Grande, C., y Sieres, P. (2021). *Desarrollo de nuevos sistemas de materiales cerámicos susceptibles de procesamiento mediante fabricación aditiva* (3dCERA). [https://ria.asturias.es/RIA/bitstream/123456789/13605/1/3dCERA\\_RIA.pdf](https://ria.asturias.es/RIA/bitstream/123456789/13605/1/3dCERA_RIA.pdf)
- Cañedo-Argüelles, E. L., y Domínguez, M. (1999). Estado actual del prototipado rápido y futuro de éste. In *Actas del XI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica* (Vol. 3, pp. 1242-1255). <https://bit.ly/4c7bMC6>
- Contreras, L. (Abril, 2019). *Impresión 3D de cerámica: ¿Una revolución dentro de la fabricación aditiva?* 3Dnatives. <https://bit.ly/3uPaScu>
- Contreras, L. (Junio, 2023). *Guía completa: Binder Jetting o inyección de aglutinante*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/#>
- Contreras, L. (Diciembre, 2016). *3DCeram, la impresión 3D aplicada a la cerámica*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/3dceram-impresion-3d-ceramica-14122016/#>
- Costa, J. A. (2019). Procesos de manufactura con tecnología 3D. *CTS Café*, III (7), 40-49.
- Fang, J., Liu, X., Muñoz, J., Yang, Z., y Zhu, X. (2020). *Mercado de la impresión 3d a nivel mundial*. <https://bit.ly/4cIv0x8>
- García, J. (Noviembre, 2022). *Filastruder, una máquina para crear un PLA más barato*. Hardwarelibre. <https://www.hwlibre.com/filastruder-un-maquina-para-crear-un-pla-mas-barato/>



- Hernández-Castellano, P. M., Gutiérrez, A., Martínez, M. D., Marrero-Alemán, M. D., Paz, R., Suárez, L. A., y Ortega, F. (2018). *Tecnologías de fabricación aditiva*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. <http://hdl.handle.net/10553/52521>
- Hiemenz, J., y Stratasys, I. (2011). *La impresión 3D con FDM: ¿Cómo funciona?*. Pixel Sistemas. <http://caminstech.upc.edu/sites/default/files/FDM%20I%20-%20Tecnologia.pdf>
- Jorquera, A. (2016). *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. Aula mentor. <https://bit.ly/3P26UEj>
- León, M., Marcos-Fernández, Á., y Rodríguez-Hernández, J. (2019). *Impresión 3D con materiales elastoméricos*. Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP-CSIC). <http://hdl.handle.net/10261/203003>
- Liu, X., Zou, B., Xing, H., y Huang, C. (2020). 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.*, 46 (1), 937–944. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.054>
- López, B. (Junio, 2023). *Impresión 3D en cerámica: una nueva era de producción personalizada*. LadoB3D. <https://ladob3d.com/impresion-3d-en-ceramica/>
- Muro, J. S., Gomáriz, M. P., Lozoya, A. C., y Trolle, R. O. D. C. (2021). *Combinando Impresión 3D y electrónica como estrategia para mejorar la experiencia de aprendizaje*. RIED. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia, 24(1), 115-135. <https://www.redalyc.org/journal/3314/331464460006/331464460006.pdf>
- Nanoe (Octubre, 2021). *Zetamix Technology: easy to use Ceramic 3D Printing*. Nanoe. <https://nanoe.com/en/zetamix-3d-printing/>
- International Organization for Standardization. (2023). *Additive manufacturing – Test artifacts – Geometric capability assessment of additive manufacturing systems* (ISO Standard No. 52902:2023).
- Pabón, J. (2022). *Adelantos y tendencias en el uso de materiales avanzados y su procesamiento por métodos de manufactura aditiva. Manufactura y gestión del ciclo de vida del producto (PLM)*. Fondo Editorial ITM.
- Prusa, J. (2022). *Manual de impresión – Manual de usuario para impresoras 3D*. Prusa Research A.S.



- Rodríguez, J. A. (2001). *Sistemas de prototipado rápido* [Tesis de Grado]. Universidad de Vigo.
- Rojas-Lozano, J., Díaz-Rodríguez, P., Barreiro, P., López-Senraa, E., Rodríguez-Valencia, C., López-Álvarez, M., y Serra, J. (2019). Desarrollo de nuevos filamentos para impresión 3D basados en cerámicas bioinspiradas. *Materiales Compuestos*, 3(4), 65-69.
- SonoSwiss (2024). *Limpiadores ultrasónicos*. SonoSwiss. <https://sono.swiss>
- Torreblanca, D. (2016). Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva. Ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos. *ICONOFACTO*, 12(18), 118-143.
- Véle, V., Safka, J., Sobotka, J., Macháček, J., & Ackermann M. (2022). Alumina Manufactured by Fused Filament Fabrication: A Comprehensive Study of Mechanical Properties and Porosity. *Polymers*, 14(991). <http://dx.doi.org/10.3390/polym14050991>
- Zahera, M. (2012). *La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos* [Sesión de conferencia]. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia, España. <https://bit.ly/49FzfJ2>
- Zetamix (s.f.). *Alumina Zetamix Filament*. Zetamix. <https://bit.ly/3XQKkn8>
- Zetamix (s.f.). *Design guide for alumina*. Zetamix. <https://bit.ly/3XQKkn8>