



universidad
de león



Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Fin de Máster

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS PARA FUNDICIÓN
INDIRECTA MEDIANTE LA TÉCNICA DE FABRICACIÓN
ADITIVA DE EXTRUSIÓN DE MATERIAL

OPTIMISATION OF PARAMETERS FOR INDIRECT
CASTING USING THE ADDITIVE MANUFACTURING
TECHNIQUE OF MATERIAL EXTRUSION

Autor: Sofía Peláez Peláez
Tutor: Pablo Rodríguez González
Cotutor: Joaquín Barreiro García

(Julio, 2022)

UNIVERSIDAD DE LEÓN
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y
Aeroespacial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
Trabajo de Fin de Máster

ALUMNO: Sofía Peláez Peláez

TUTOR: Pablo Rodríguez González / Joaquín Barreiro García

TÍTULO: Optimización de parámetros para fundición indirecta mediante la técnica de fabricación aditiva de extrusión de material

TITLE: Optimisation of parameters for indirect casting using the additive manufacturing technique of material extrusion

CONVOCATORIA: Julio, 2022

RESUMEN:

La fabricación aditiva ha supuesto una gran revolución en la industria permitiendo la manufactura de piezas complejas que de otra forma sería inviable. Sin embargo, todavía debe superar ciertas restricciones, como sucede en la rama de fabricación aditiva con materiales metálicos con el tamaño de las piezas y la posibilidad de utilizar un mayor abanico de materiales metálicos y aleaciones. Por otro lado, las técnicas tradicionales, como la fundición, no pueden afrontar las nuevas demandas donde se exige un desarrollo de productos cada vez más personalizados hacia el usuario final con la máxima calidad y precisión utilizando el menor tiempo posible. Por ello, surge como alternativa la combinación de fabricación aditiva con técnicas tradicionales para exceder las limitaciones que presentan por separado.

En este proyecto, se ha considerado la combinación de la técnica de extrusión de material de fabricación por filamento fundido (FFF) con la técnica de fundición indirecta, donde el patrón desechable se ha realizado en PLA con la técnica de FFF, y mediante un estudio experimental secuencial planificado a través de Diseño de Experimento, se optimizó los parámetros de FFF para obtener una pieza final metálica con la mayor calidad dimensional, mayor calidad superficial y generación mínima de residuos. Para ello se analizó la influencia de los parámetros de altura de capa, densidad de relleno, número de capas iniciales y finales, espesor de pared y la aplicación de postproceso, llegando a la conclusión de que los parámetros que más afectan a la calidad dimensional es la acción de la densidad de relleno con el espesor de pared, el parámetro que más afecta a la rugosidad es la aplicación del postproceso, mientras que para la minimización de residuo finalmente no afecta ninguno de los parámetros.

ABSTRACT:

Additive manufacturing has been a major revolution in industry, enabling the manufacture of complex parts that would otherwise be unfeasible. However, it still

must overcome certain restrictions, as is the case in additive manufacturing with metallic materials with the size of the parts and the possibility of using a wider range of metallic materials and alloys. On the other hand, traditional techniques, such as casting, cannot cope with the new demands for the development of increasingly customised products for the end user with the highest quality and precision in the shortest possible time. For this reason, the combination of additive manufacturing with traditional techniques has emerged as an alternative to exceed the limitations that they present separately.

In this project, the combination of the extrusion technique of fused filament fabrication (FFF) with the indirect casting technique has been considered, where the expendable pattern has been made in PLA with the FFF technique, and by means of a sequential experimental study planned through Design of Experiment, the FFF parameters were optimised to obtain a final metallic part with the highest dimensional quality, greater surface quality and minimum waste generation. To this purpose, the influence of the parameters of layer height, filler density, number of initial and final layers, wall thickness and the application of post-processing were analysed, reaching the conclusion that the parameters that most affect the dimensional quality is the action of the filler density with the wall thickness, the parameter that most affects the roughness is the application of post-processing, while for the minimisation of residue, none of the parameters is affected in the end.

Palabras clave: Fabricación aditiva, Fundición indirecta, DoE, FFF, calidad dimensional, calidad superficial, minimización residuos.

Firma del alumno:

VºBº Tutor/es:

Índice de contenido

Índice de contenido	4
Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	11
Abreviaturas y acrónimos	12
1 Introducción.....	13
2 Estado del arte.....	16
2.1 FABRICACIÓN ADITIVA	16
2.1.1 PROCESOS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA	19
2.2 FUNDICIÓN.....	27
2.2.1 FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA.....	28
2.3 COMBINACIÓN DE LA FABRICACIÓN ADITIVA CON TÉCNICAS CONVENCIONALES DE FUNDICIÓN CON PATRONES DESECHABLES	30
3 Materiales y métodos.....	32
3.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO	34
3.2 DISEÑO DEL PATRÓN	44
3.3 FABRICACIÓN DEL PATRÓN MEDIANTE TÉCNICA FFF.....	45
3.4 FABRICACIÓN DEL MOLDE DE REVESTIMIENTO	52
3.4.1 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UTILLAJE	53
3.4.2 REVESTIMIENTO.....	56
3.5 ANÁLISIS Y MEDICIONES.....	60
3.5.1 MEDICIÓN DE MASA.....	61
3.5.2 MEDICIÓN DIMENSIONAL	62
3.5.3 ANÁLISIS DE RUGOSIDAD.....	64
3.5.4 ANÁLISIS DE RESIDUOS.....	67
3.6 FUNDICIÓN.....	70
4 Resultados.....	73
4.1 CALIDAD DIMENSIONAL	73
4.2 CALIDAD SUPERFICIAL	83
4.3 MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS	89
4.4 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS.....	91

5	Conclusiones	96
6	Futuras líneas de investigación	100
	Agradecimientos.....	101
	Referencias	102
	Anexos	105
	ANEXO A. PLANO PROBETA DE FABRICACIÓN FFF	106
	ANEXO B. TABLAS DE DATOS	108
	ANEXO C. PROCESADO DE LAS IMÁGENES OBTENIDAS EN EL MICROSCOPIO PARA LA OBTENCIÓN DEL % DE RESIDUOS EN CADA PIEZA.	112

Índice de figuras

Figura 2.1. Diagrama de bloques del procedimiento de fabricación aditiva general. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 2.2. Principios de procesos FA de un paso y procesos FA de múltiples pasos. Fuente: [1].	18
Figura 2.3. Diagrama esquemático de dos principios alternativos para la fotopolimerización. Fuente: [4].	19
Figura 2.4. Diagrama esquemático de proyección de material. Fuente: [4].	20
Figura 2.5. Diagrama esquemático de proyección de aglutinante. Fuente: [4].	21
Figura 2.6. Diagrama esquemático de dos tipos de fusión de lecho de polvo. Fuente: [4].	22
Figura 2.7. Diagrama esquemático de la extrusión de material. Fuente: [4].	24
Figura 2.8. Diagrama esquemático de la deposición de energía focalizada. Fuente: [4].	25
Figura 2.9. Diagrama esquemático del laminado de hojas. Fuente: [4].	26
Figura 2.10. Figuras esquemáticas de varios procesos de fundición. Fuente: [7].	27
Figura 2.11. Diagrama de los procesos de fundición a la cera perdida. Fuente: [7].	29
Figura 3.1. Flujoograma de la metodología. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 3.2. Efecto escalera producido en la fabricación mediante FFF [20].	35
Figura 3.3. Comparación entre la misma pieza fabricada con una altura de capa de 0,35 mm con postproceso en baño de vapor, fabricada con una altura de capa de 0,1mm sin postproceso e fabricada con una altura de capa de 0,35 mm sin postproceso. Fuente: [21].	37
Figura 3.4. Piezas fabricadas mediante FFF con diversas alturas de capa. Fuente: [23].	39
Figura 3.5. Relación Shell-core o espesor de pared. Fuente: [25].	40
Figura 3.6. Densidad de relleno. Fuente: [27].	41
Figura 3.7. Esquema simplificado de las variables de interés y sus relaciones con los factores controlables y sus niveles que se aplican en el DOE. Fuente: elaboración propia.	42

Figura 3.8. Vistas probeta de fabricación utilizando el software CAD CATIA V5. Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 3.9. a) Esquema general de una impresora FFF. b) Detalle de un extrusor típico. Fuente: [30].	45
Figura 3.10. Matriz de impresión. Fuente: elaboración propia.....	47
Figura 3.11. Posición de las probetas de fabricación en la cama de impresión siguiendo la estrategia definida. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 3.12. Simulación de fabricación en el software de laminado Ultimaker Cura. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 3.13. Ultimaker S2+. Equipo del grupo de investigación TAFI de la ULE. Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 3.14. Material utilizado: filamento PLA negro Ultimaker de diámetro 2,85 mm y peso 750 g. Fuente: elaboración propia.....	50
Figura 3.15.a) Detalle de fabricación de una serie de probetas utilizando la estrategia implementada en la impresora Ultimaker 2+. b) Detalle de la probeta fabricada. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 3.16. Probetas fabricadas con su respectiva etiqueta. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 3.17. Secuencia de aplicación del postproceso: baño de vapor con diclorometano. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 3.18. a) Soporte individual. b) Soporte para 4 moldes de revestimiento. Fuente: Elaboración Propia.....	54
Figura 3.19. Proceso de fabricación de la bandeja y bandeja final. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 3.20. Cubilete inicial, diseñado con la intencionalidad de facilitar las mediciones posteriores. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 3.21. Pieza de revestimiento en el horno, utilizando abrazaderas como estructura para evitar ruptura térmica durante el tratamiento térmico sobre el soporte individual y bandeja. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 3.22. Curva de calentamiento. Fuente: [28].....	58
Figura 3.23. Detalle de prueba de corte de un molde de revestimiento. Fuente: Elaboración propia.....	59

Figura 3.24. Metodología de fabricación del molde de revestimiento. Fuente: Elaboración Propia.....	60
Figura 3.25. Fases de análisis y mediciones realizadas en cada fase. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 3.26. Balanza de precisión COBOS. Equipo del grupo de investigación TAFI. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 3.27. Micrómetro de exteriores. Equipo del grupo de investigación TAFi de la ULE. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 3.28. Medidas realizadas con micrómetros. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 3.29. Identificación de las caras de las probetas. Fuente: Elaboración propia...	63
Figura 3.30. Micrómetro de interiores. Equipo del grupo de investigación TAFi de la ULE. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 3.31. Rugosímetro Surfest SJ-500 Mitutoyo. Equipo del grupo de investigación TAFI de la ULE. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 3.32. Parámetros perfil Rugosidad según norma UNE EN ISO 4287:1999.Fuente:[33].....	66
Figura 3.33. a) Medición de rugosidad de las probetas fabricadas en FFF, con y sin postproceso. b) Medición de rugosidad del molde de revestimiento. c) Detalle de medición de rugosidad del molde. Fuente: Elaboración Propia.	67
Figura 3.34. a) Cara del molde de revestimiento sobre la que se realiza el análisis de residuos. b) Microscopio Leica Z16 APO. Equipo del grupo de investigación TAFI de la ULE. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 3.35. Metodología de análisis de residuos utilizando el software de procesamiento ImageJ. Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 3.36. Diagrama de fases Cu-Zn. Fuente: [36].	70
Figura 3.37. Fundidora de Inducción Agatronic R. Equipo del grupo de investigación TAFI de la ULE. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 3.38. Curva de temperatura correspondiente a la fundición. Fuente: Elaboración propia.....	72
Figura 4.1. Resultados dimensionales de las probetas fabricadas mediante FFF en valores medios ordenados de menor a mayor. Fuente: Elaboración propia.	74

Figura 4.2. Comparación de los resultados dimensionales en valor medio antes y después de la aplicación del proceso del diclorometano, ordenados de menor a mayor incremento de dimensiones. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 4.3. Resultados dimensionales en valor medio de los moldes de revestimiento, en comparación con la probeta FFF y el diseño CAD, ordenados de menor a mayor error respecto al molde de revestimiento con la probeta FFF. Fuente: Elaboración propia..	76
Figura 4.4. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Calidad dimensional cara 1-3, utilizando $\alpha= 0,05$. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 4.5. Gráfica de efectos sobre la calidad dimensional cara 1-3. Fuente: Elaboración propia.....	79
Figura 4.6. Gráfica de interacción para calidad dimensional cara 1-3. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 4.7. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Calidad dimensional cara 2-4, utilizando $\alpha= 0,05$. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 4.8. Gráfica de efectos sobre la calidad dimensional cara 2-4. Fuente: Elaboración propia.....	82
Figura 4.9. Gráfica de interacción para calidad dimensional cara 2-4. Fuente: Elaboración propia.....	83
Figura 4.10. Parámetros Ra, Rt y Rz de las probetas FFF, ordenadas de menor a mayor Ra. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 4.11. Comparación entre los valores de Ra para las probetas de FFF y los moldes de revestimiento, ordenados de menor a mayor Ra del molde de revestimiento. Fuente: Elaboración propia.....	85
Figura 4.12. Comparación entre los valores de Rt para las probetas de FFF y los moldes de revestimiento, ordenados de menor a mayor Rt del molde de revestimiento. Fuente: Elaboración propia.....	85
Figura 4.13. Comparación entre los valores de Rz para las probetas de FFF y los moldes de revestimiento, ordenados de menor a mayor Rz del molde de revestimiento. Fuente: Elaboración propia.....	86
Figura 4.14. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Rz, utilizando $\alpha= 0,05$. Fuente: Elaboración propia.	87
Figura 4.15. Gráfica de efectos sobre Rz. Fuente: Elaboración propia.	88

Figura 4.16. Gráfica de interacción para Rz. Fuente: Elaboración propia..... 88

Figura 4.17. Masa probetas FFF (sin aplicación del postproceso) ordenadas de menor a mayor. Fuente: Elaboración propia..... 89

Figura 4.18. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para % Residuos, utilizando $\alpha= 0,05$. Fuente: Elaboración propia. 91

Figura 4.19. Combinación de parámetros óptimos para calidad dimensional. Fuente: Elaboración propia..... 93

Figura 4.20. Combinación de parámetros óptimos para calidad superficial. Fuente: Elaboración propia..... 94

Figura 4.21. Combinación de parámetros óptimos para calidad dimensional y calidad superficial. Fuente: Elaboración propia..... 95

Índice de tablas

Tabla 3.1. Niveles del Factor Postprocesado. Fuente: Elaboración propia.....	37
Tabla 3.2. Niveles del Factor Capas iniciales y finales. Fuente: Elaboración propia.	38
Tabla 3.3. Niveles del Factor Altura de Capa. Fuente: Elaboración propia.....	39
Tabla 3.4. Niveles del Factor Espesor de Pared. Fuente: Elaboración propia.....	40
Tabla 3.5. Niveles del Factor Densidad de Relleno. Fuente: Elaboración Propia.....	41
Tabla 3.6. Pruebas, obtenidas del DOE, con las diferentes variaciones de los factores que afectan a las variables de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	43
Tabla 3.7. Tiempo, material y coste de fabricación siguiendo la estrategia diseñada. Fuente: Elaboración propia.	49
Tabla 3.8. Propiedades físicas y químicas de PLA. Fuente: [31].....	50
Tabla 3.9. Propiedades químicas del latón 67/33. Fuente: [37].	71
Tabla 3.10. Temperaturas de colada del latón. Fuente:[38].....	71
Tabla 4.1. Porcentaje de residuos obtenidos por cada probeta. Fuente: Elaboración propia.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.2. Configuración de parámetros optimizados para piezas que requieran gran calidad dimensional. Fuente: Elaboración propia.....	92
Tabla 4.3. Configuración de parámetros optimizados para piezas que requieran gran calidad superficial. Fuente: Elaboración propia.	93
Tabla 4.4. Configuración de parámetros optimizados para piezas que requieran gran calidad dimensional y superficial. Fuente: Elaboración propia.....	94

Abreviaturas y acrónimos

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CFF	<i>Continuous Fiber Fabrication</i>
DCM	<i>Diclorometano</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
DOE	<i>Design Of Experiments</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
FA	<i>Fabricación Aditiva</i>
FFF	<i>Fabricación por Filamento Fundido</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
PLA	<i>Ácido poliláctico</i>
Ra	<i>Rugosidad media</i>
Rt	<i>Altura máxima pico-valle</i>
Rz	<i>Profundidad media de rugosidad</i>
SLA	<i>Estereolitografía</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>

1 Introducción

Desde sus comienzos, la fabricación aditiva (FA) ha supuesto una revolución importante en la industria puesto que ha supuesto un cambio en la forma de producción, ofreciendo grandes ventajas como una fabricación rápida, ya que se reducen los procesos intermedios necesarios en técnicas de fabricación tradicionales lo que supone a su vez la eliminación de las restricciones debido a los utillajes de fijación, una mayor flexibilidad en la personalización de los productos y geometrías “imposibles” para otros métodos de fabricación, ya que se pueden obtener piezas más ligeras pero resistentes (optimización topológica), piezas con canales con formas libres, cavidades internas, paredes finas o incluso con estructuras reticuladas, y la reducción de desecho de materiales, ya que sólo se añade el material necesario de la pieza.

Sin embargo, estas técnicas de fabricación todavía afrontan grandes limitaciones como gama de materiales reducidos, tamaños de construcción restringidos en función de las cámaras de fabricación, tasas bajas de fabricación sobre todo en producción de series medias-grandes y en algunas tecnologías tanto la inversión como el coste de material es muy elevada.

Es por ello, que surge la necesidad de combinar tecnologías de fabricación aditiva con tecnologías tradicionales para optimizar el desarrollo de los productos y la fabricación.

En este trabajo, se ha considerado la unión de la fabricación aditiva con la técnica de extrusión de material de fabricación por filamento fundido (FFF) con la técnica de fundición conocida como fundición indirecta o a la cera perdida, donde tradicionalmente, un patrón desechable de cera es recubierto con un revestimiento refractario, para posteriormente ser licuado y calcinado, y en el hueco producido y echar el material fundido obteniendo la pieza metálica deseada. La combinación de estas dos técnicas solventa dos de las limitaciones principales de fabricación aditiva directa con metal con técnicas de fusión de lecho de polvo como fusión por láser selectivo (SLM), sinterizado directo de metal por láser (DMLS) y fusión por haz de electrones (EBM) o de deposición de energía focalizada: el tamaño de las piezas y la posibilidad de seleccionar cualquier aleación.

Por otro lado, a pesar de que hay diversas tecnologías de fabricación aditiva que nos permiten fabricar patrones desechables de fundición con materiales específicos, como puede ser el caso de las tecnologías basadas en la fotopolimerización en tanque con resinas calcinables o en la inyección de cera, en este caso, el patrón desechable o maestro se ha decidido fabricar mediante FFF utilizando como material el ácido poliláctico (PLA) ya que es un material que resulta fácil de fabricar y además es barato, lo que nos permite obtener geometrías que presenten mucha complejidad y personalización que con la fundición a la cera perdida tradicional no hubiera sido posible a la par de ser un proceso económico y sencillo, con máquinas y materiales muy accesibles.

El objetivo principal de este proyecto, considerando lo expuesto previamente, es realizar un estudio de cómo afectan los diversos parámetros de la fabricación aditiva mediante técnica de extrusión de material y su postproceso en la técnica de fundición indirecta, para así poder optimizarlos y obtener piezas metálicas con la mayor calidad dimensional, la mayor calidad superficial y el menor residuo plástico posible.

Para la consecución de dicho objetivo, se ha realizado un trabajo secuencial donde se ha comenzado por el estudio del estado del arte para una mayor comprensión de la teoría de fabricación aditiva, de la fabricación a través de procesos de fundición y la combinación de ambas. A continuación, a partir de las variables de interés definidas que se quieren estudiar para su optimización, se diseña el experimento definiendo los diferentes parámetros de análisis, se realiza un diseño de probeta-patrón para poder realizar las mediciones de las variables de interés y se procede a realizar los moldes de revestimiento y las mediciones necesarias. Tras realizar el análisis, finalmente, se elabora la fundición con los parámetros más optimizados.

En base al objetivo general del proyecto, también se abarcan los siguientes objetivos específicos:

- 1) Profundizar en las tecnologías y procesos de fabricación aditiva, en los procesos de fundición, en especial de fundición indirecta, y la combinación de ambos.
- 2) Comprender y aplicar la metodología de Diseño de Experimentos (DoE), así como diferentes factores estadísticos para comprender los análisis.

- 3) Fabricación de las probetas y moldes de revestimiento para poder realizar los análisis necesarios.
- 4) Observar cómo influyen los parámetros de impresión en la pieza final y seleccionar la mejor configuración.

Para llevar a cabo estos objetivos, este trabajo se ha dividido teniendo en cuenta la estructura siguiente:

1. Introducción
2. Estado del arte
3. Materiales y métodos.
4. Resultados.
5. Conclusiones
6. Líneas futuras de investigación.

El capítulo 2 es un capítulo principalmente de investigación donde se ha profundizado en los conceptos de fabricación aditiva, los de fundición y los últimos estudios que hay en relación de la combinación de ambas tecnologías. En el capítulo 3 se describe la metodología aplicada, así como los equipos y materiales empleados. El capítulo 4 muestra los resultados obtenidos tras realizar las mediciones y analizar dichos datos. Finalmente, el capítulo 5 abarca las conclusiones que se obtienen a partir del anterior capítulo, mientras que el capítulo 6 propone futuras líneas de investigación que han surgido a partir de este proyecto.

2 Estado del arte

2.1 FABRICACIÓN ADITIVA

La aparición de la tecnología de fabricación aditiva ha supuesto una revolución importante en la industria puesto que permite la manufactura de piezas complejas que con otros procesos no sería posible.

La fabricación aditiva, abreviada como FA, es definida por la norma ISO/ASTM 52900:2017 como *“el proceso de unión de materiales para fabricar piezas a partir de los datos de un modelo 3D, generalmente capa a capa, en oposición a métodos de fabricación mediante eliminación de material y de conformado”*.

Es decir, la fabricación aditiva aplica el principio de construcción de geometrías 3D físicas mediante la adición de material. Estas piezas producidas pueden utilizarse tanto como prototipo como de pieza de producción final y sus propiedades fundamentales vienen determinadas [1] por:

- a) El tipo de material (polímero, metal, cerámico o compuesto).
- b) El principio aplicado para la “adición” del material (fusión, sinterización, etc.).
- c) La materia prima que se utiliza para añadir el material (líquido, polvo, ...).
- d) La forma de reunir el material, es decir, la arquitectura de la máquina.

Para la producción de las piezas deseadas, hay diversos procesos desarrollados para la fabricación aditiva, agrupados en siete categorías básicas en función de las partes fundamentales de funcionamiento de las máquinas de los cuales se especifica más en el apartado 2.1.1.

Asimismo, el procedimiento de fabricación aditiva generalizado es común a todos los procesos FA. Este procedimiento sigue al menos seis etapas básicas para obtener el producto.

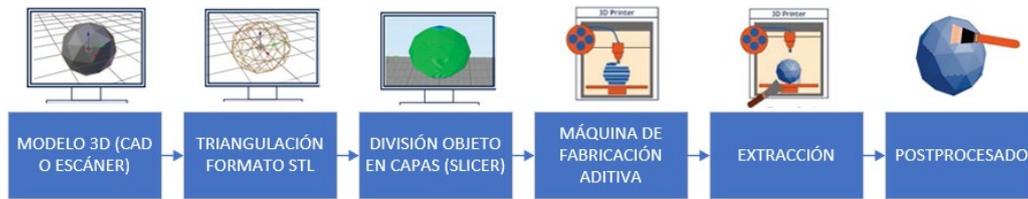


Figura 2.1. Diagrama de bloques del procedimiento de fabricación aditiva general.
Fuente: Elaboración propia.

El primer paso es la creación de un modelo tridimensional. Este paso se realiza mediante el uso de programas de diseño asistido por ordenador (CAD) o utilizando el concepto de ingeniería inversa, a través de la generación del modelo 3D utilizando una nube de puntos o una malla en un espacio tridimensional obtenida a través de un escáner.

El modelo, a continuación, es simplificado en una representación triangulada de la superficie en el formato *.STL*. Este formato describe la geometría de la superficie del objeto 3D (sin tener en cuenta otros atributos como color o textura).

Posteriormente, se procede a realizar la división del archivo de datos en capas individuales en el proceso que se conoce como rebanado o *slicing*, y para la correcta fabricación de la pieza se debe realizar la modificación de diversos factores como altura de capa, forma de relleno y su densidad, la necesidad de soportes e incluso el camino que debe seguir la máquina para rellenar cada capa.

El archivo generado será enviado al sistema de fabricación aditiva para ejecutar su fabricación. Una vez fabricada la pieza es necesario extraerla. En función de la técnica empleada la complejidad de este paso puede variar.

La pieza producida una vez extraída puede requerir de un postproceso tales como lijado, lavado en agua o diferentes disolventes, pintado, vaporizado, etc. El objetivo de estas tareas es conseguir alguna propiedad deseada [2].

A pesar de todo, es raro que un producto acabado pueda ser fabricado enteramente mediante un único proceso, por ello, como se indica en el “*anexo A – Principios básicos de la norma ISO/ASTM 52900:2017*”, se puede distinguir entre dos categorías de procesos de fabricación aditiva: (i) procesos de un paso y (ii) procesos de múltiples pasos. La principal diferencia implica que, en los procesos de pasos múltiples, la pieza

obtiene la geometría deseada aplicando el principio de adhesión y, en pasos posteriores, obtiene las propiedades deseadas, mientras que en los procesos de un solo paso se obtiene geometría y aplicaciones en el mismo proceso.

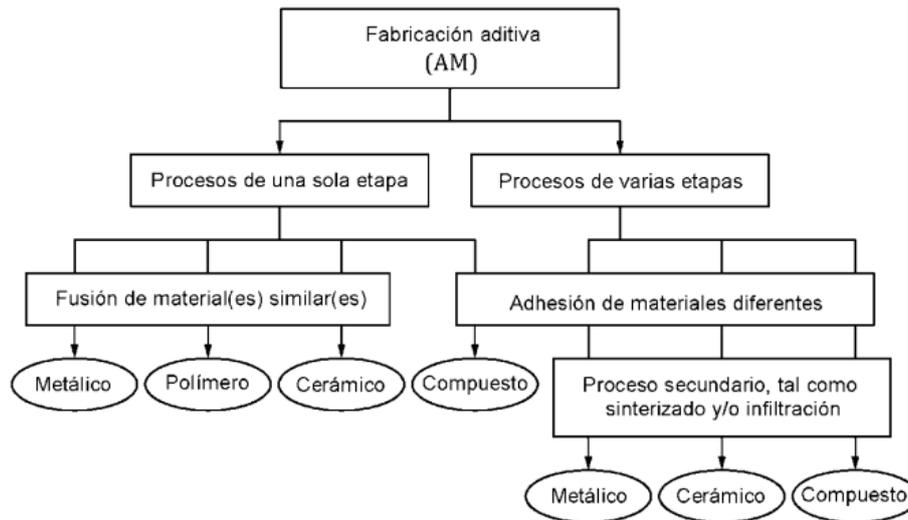


Figura 2.2. Principios de procesos FA de un paso y procesos FA de múltiples pasos.
Fuente: [1].

El desarrollo continuo en la FA de materiales y métodos ha supuesto su adaptación en diversos sectores frente a las técnicas tradicionales puesto que se le atribuyen varias ventajas como:

- Fabricación de geometrías complejas con gran precisión.
- Optimización del material empleado.
- Flexibilidad en el diseño y personalización.

A pesar de las ventajas, existen algunas limitaciones [3]:

- La formación de huecos entre las capas subsiguientes de materiales da lugar a una porosidad adicional durante el proceso de fabricación, que puede reducir el rendimiento mecánico debido a la reducción de la unión interfacial entre las capas.

- Comportamiento anisotrópico que implica un comportamiento mecánico diferente bajo tensión o compresión vertical en comparación con el de la dirección horizontal.
- Divergencia desde el diseño hasta la ejecución, puesto que la transferencia de CAD a una pieza impresa suele dar lugar a imprecisiones y defectos, especialmente en las superficies curvas, debido al concepto de teselación de CAD.
- El acabado superficial y la necesidad de utilizar procesos posteriores para su mejora.

2.1.1 PROCESOS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

Como se mencionó previamente, existen siete categorías básicas donde se agrupan los diferentes procesos desarrollados para la fabricación aditiva según la Norma ISO 17296-2:2017 “Visión general de categorías de procesos y materias primas” [4].

1) Fotopolimerización en tanque o cuba

Según la Norma ISO 17296-1, se define como “el proceso de fabricación aditiva en el que el fotopolímero líquido se cura selectivamente en una cuba mediante polimerización activada por la luz”.

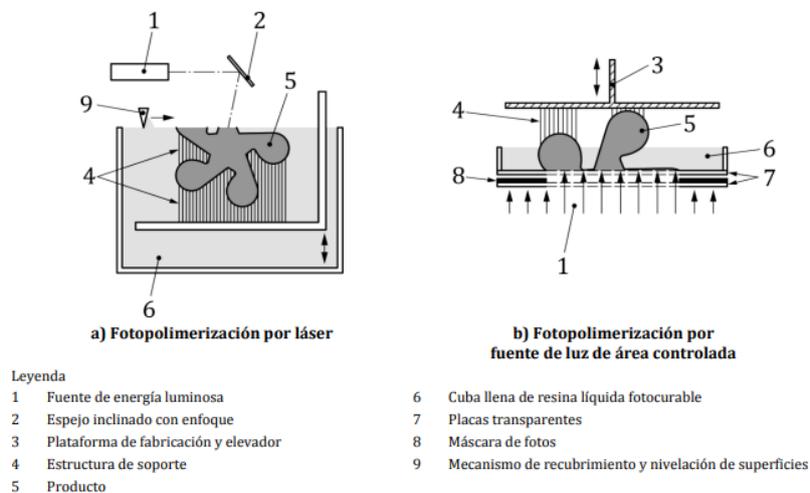


Figura 2.3. Diagrama esquemático de dos principios alternativos para la fotopolimerización. Fuente: [4].

La materia prima para este proceso son resinas monoméricas, en líquido o pasta, que se solidifica a la exposición de radiación ultravioleta proveniente de láseres o lámparas.

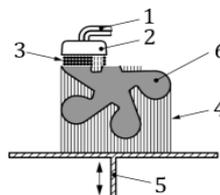
Este tipo de proceso necesita de procesado secundario tal como limpieza, eliminación del material de soporte y post-curado mediante una mayor exposición ultravioleta, para mejorar su consistencia.

En función de la fuente de energía se distinguen tres métodos:

- I. Estereolitografía, SLA, es un método de fotopolimerización utilizando un láser. Por lo general, el láser no brilla directamente sobre la resina, sino que es dirigido por un galvanómetro de espejo.
- II. Fotopolimerización DLP (*Digital Light Processing*), método donde el curado se realiza empleando un proyector digital de luz. Con este método se consigue la ventaja de proyectar la capa completa del dibujo en un único paso, aunque carece de la precisión conseguida con el láser.
- III. Fotopolimerización LCD (*Liquid Crystal Display*), método donde el curado se realiza mediante pantallas LCD ultravioletas, donde una serie de LEDs brillan a través de la pantalla. En este método no es necesario ningún dispositivo para dirigir la luz y las impresoras de este tipo son la solución más económica puesto que los componentes utilizados son más baratos. Como desventaja, es el método menos preciso.

2) Proyección de material

Según la Norma ISO 17296-1, se define como “el proceso de fabricación aditiva en el cual se depositan selectivamente gotas del material de fabricación”.



Leyenda

- 1 Sistema de suministro de materia prima para el material de fabricación y el soporte (opcional dependiendo del proceso específico)
- 2 Aparato dispensador (fuente de radiación luminosa o térmica)
- 3 Gotas de material de fabricación
- 4 Estructura de soporte
- 5 Plataforma de fabricación y elevador
- 6 Producto

Figura 2.4. Diagrama esquemático de proyección de material. Fuente: [4].

La materia prima para este proceso son fotopolímero líquido o cera fundida, con o sin relleno.

Es un proceso donde se inyectan múltiples pequeñas gotas del material, el cual se va a unir mediante una reacción química o adhesión por solidificación de material fundido, utilizando una fuente de radiación luminosa en el caso de la unión mediante reacción química.

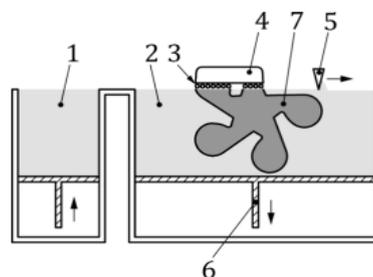
Las ventajas que ofrece este tipo de procesos son las siguientes:

- Se pueden inyectar distintos materiales y de múltiples colores, lo que implica que se pueda obtener materiales con distinta rigidez en una misma pieza. E incluso puede facilitar la eliminación de soportes si se proyectan como materiales solubles en algún disolvente.
- No se necesita temperaturas altas, lo que implica que no se producen problemas de deformación de la pieza por calor.

Por otro lado, su principal problema es que las piezas generadas tienen baja resistencia mecánica y se degradan bajo ciertas circunstancias de luz, es por ello por lo que necesita de un post-curado mediante una mayor exposición a la radiación además de una limpieza y eliminación del material de soporte.

3) Proyección de aglutinante

Según la Norma ISO 17296-1, se define como *“el proceso de fabricación aditiva en el que un agente líquido aglutinante se deposita selectivamente para unir materiales en polvo”*.



Leyenda

- 1 Sistema de alimentación de polvo
- 2 Material en polvo distribuido en un lecho de polvo
- 3 Agente líquido aglutinante
- 4 Aparato dispensador que incluye la conexión al sistema de alimentación del aglutinante
- 5 Dispositivo de extensión de polvo
- 6 Plataforma de fabricación y elevador
- 7 Producto

Figura 2.5. Diagrama esquemático de proyección de aglutinante. Fuente: [4].

En este proceso se dispone como material de fabricación polvos, mezclas de polvo o materiales en forma de partículas (normalmente plásticos, arenas o cristales, pero también existe con algunos metales) y además un agente adhesivo o aglutinante en estado líquido. La unión del material se realiza mediante una reacción química y/o térmica.

El procesado secundario consiste en la limpieza de polvos sobrantes en la extracción de la pieza además de una impregnación o infiltración de material líquido adecuado en función del material en polvo y de la aplicación prevista. Los materiales poliméricos se utilizan ceras, epoxis y otros adhesivos, mientras que los metales y cerámicos se fijan mediante sinterizado e infiltración con un material fundido.

A pesar de la realización del procesado secundario, las piezas fabricadas son menos resistentes mecánicamente, tienen un alto grado de porosidad y peor acabado que otros procesos de fabricación aditiva. Sin embargo, es un proceso que no necesita soportes y no genera problemas de deformación por calor.

4) Fusión de lecho de polvo

Según la Norma ISO 17296-1, se define como “el proceso de fabricación aditiva en el cual la energía térmica funde selectivamente ciertas zonas de un lecho en polvo”.

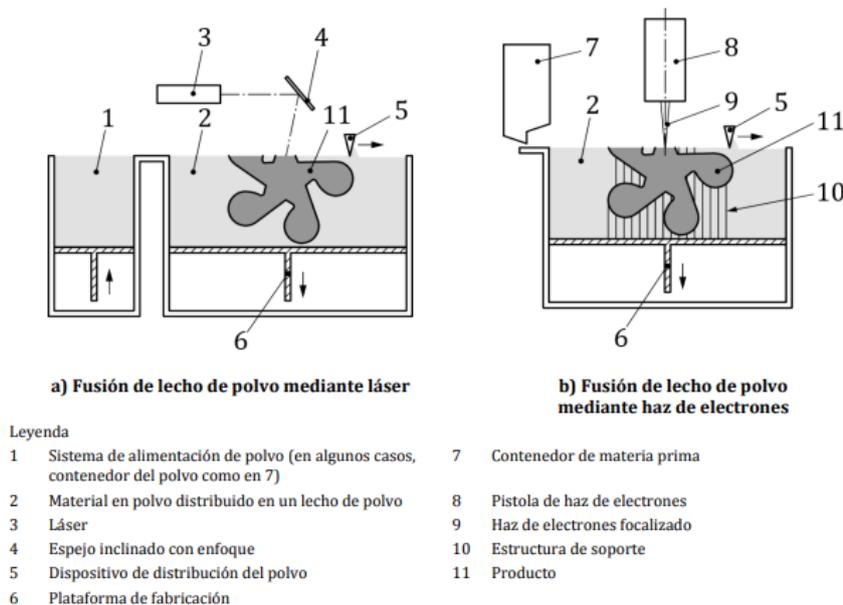


Figura 2.6. Diagrama esquemático de dos tipos de fusión de lecho de polvo. Fuente: [4].

Este proceso utiliza diversos polvos como polímeros termoplásticos, metales puros o aleaciones metálicas y cerámicas estructurales o industriales como materia prima. Cualquiera de los materiales en polvo podría utilizarse con, o sin, rellenos y aglutinantes dependiendo del proceso específico. La unión de los polvos se realiza mediante una reacción química producida por energía térmica, generalmente transferida por láser, haz de electrones y/o lámparas de infrarrojos.

En este proceso se puede hacer varias distinciones de técnica en función de la fuente de activación y en función del material utilizado:

- a. Sinterizado por Láser Selectivo (SLS): fusión de materiales no metálicos en polvo utilizando un láser.
- b. Fusión por Láser Selectivo (SLM): técnica similar a SLS, con materiales metálicos. En esta técnica, el polvo metálico es fundido por completo.
- c. Sinterizado Directo de Metal por Láser (DMLS): técnica similar a SLM, cuya diferencia es que emplea aleaciones para realizar la unión de partículas que se funden entre sí.
- d. Fusión por Haz de Electrones (EBM): en esta técnica se utiliza un haz de electrones como fuente de energía térmica para fusionar las partículas metálicas. Los electrones se emiten por un filamento de tungsteno al vacío y los proyecta acelerados sobre la capa de polvo metálico depositado en la placa de impresión. Los electrones se concentran y deflactan con precisión mediante campos magnéticos.

Las piezas fabricadas obtenidas en estos procesos obtienen una alta resistencia y se le puede atribuir una alta complejidad en el diseño.

No obstante, debido a las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso de impresión se pueden producir deformaciones por el calor. Por otro lado, es necesario un procesado secundario para la eliminación del polvo suelto, y, si procede, del material de soporte. Además, es necesario diversas operaciones para mejorar el acabado superficial, la precisión dimensional y las propiedades del material.

5) Extrusión de material

Según la Norma ISO 17296-1, se define como “*el proceso de fabricación aditiva en el cual el material se dispensa selectivamente a través de una boquilla o un orificio*”.

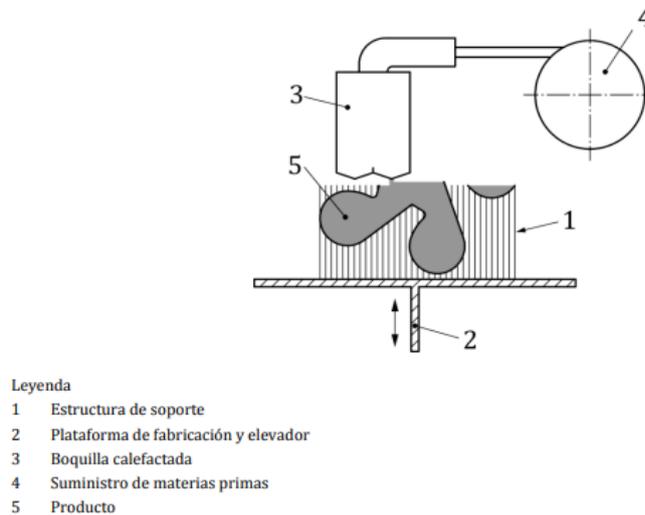


Figura 2.7. Diagrama esquemático de la extrusión de material. Fuente: [4].

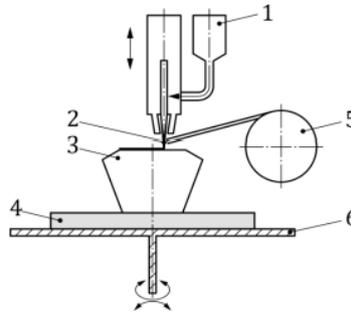
Este proceso utiliza filamentos o pasta, generalmente termoplásticos y cerámicas estructurales que se unen mediante una reacción química o térmica. Esta reacción se genera mediante calor, ultrasonidos o reacción química entre componentes.

Dentro de este proceso se distinguen diversas técnicas como:

- a. Fabricación por Filamento Fundido (FFF): técnica que utiliza un filamento de plástico.
- b. Modelado por Deposición Fundida con Fibra Continua (CFF): variante que dispone de dos boquillas de extrusión, donde una de ellas funciona como un proceso de extrusión típico depositando un filamento de plástico que forma la cubierta exterior y la matriz interna de la pieza, mientras que la segunda boquilla deposita una hebra continua de fibra compuesta. Esta técnica aumenta la resistencia de la pieza fabricada.
- c. Extrusión por Jeringuilla: técnica que utiliza una jeringa motorizada en lugar de extrusor. Se utiliza con materiales cremosos o viscosos.

6) Deposición de energía focalizada

Según la Norma ISO 17296-1, se define como “el proceso de fabricación aditiva en el cual se utiliza energía térmica focalizada para unir materiales mediante fusión, a medida que se depositan”.



Leyenda

- 1 Tolva de polvo
- 2 Haz de energía focalizado, por ejemplo: láser, haz de electrones o arco de plasma
- 3 Producto
- 4 Sustrato
- 5 Bobina de hilo (filamento)
- 6 Plataforma de fabricación

NOTA 1 Mediante el movimiento de la boquilla y la plataforma de fabricación se consigue una función multiaxial (generalmente 3-6 ejes).

NOTA 2 Sistemas de alimentación de material alternativos, por ejemplo: polvo alimentado a través del haz de energía, polvo o filamento aportado al punto donde se focaliza la energía.

Figura 2.8. Diagrama esquemático de la deposición de energía focalizada. Fuente: [4].

La materia prima se trata de polvo o filamento normalmente metálico. En algunas aplicaciones se pueden añadir partículas cerámicas al material base. El polvo o filamento se une mediante reacción química de fusión y solidificación. Para ello, la fuente de activación puede ser mediante láser, haz de electrones o mediante arco de plasma.

Para la mejora del acabado superficial es necesario de un procesado secundario como, por ejemplo, mecanizado, chorreado con arena, refundición láser, rectificado o pulido y para la mejora de las propiedades del material se le puede aplicar tratamientos térmicos.

7) Laminado de hojas

Según la Norma ISO 17296-1, se define como “el proceso de fabricación aditiva en el cual el material en forma de láminas u hojas se une para formar un objeto”.

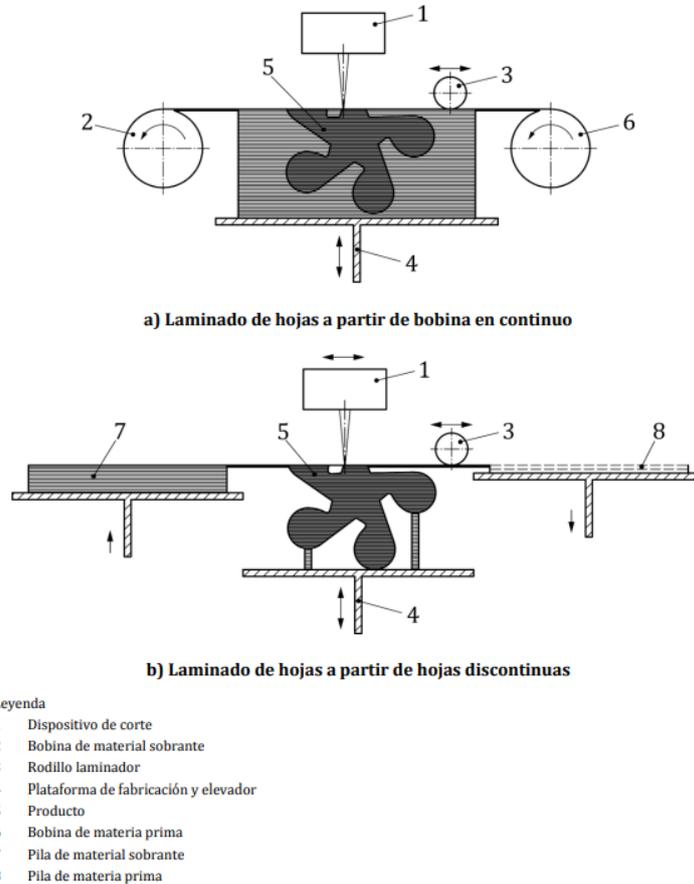


Figura 2.9. Diagrama esquemático del laminado de hojas. Fuente: [4].

En este proceso el material usado se encuentra en forma de láminas, generalmente es papel, lámina metálica, polímeros o laminas compuestas por material metálico o polvo cerámico que se unen entre sí por un aglutinante. El mecanismo de unión es mediante una reacción térmica o reacción química o ultrasonidos.

Este tipo de proceso necesita de procesamiento secundario tal como la eliminación de residuos y, opcionalmente, sinterizado, infiltración, tratamiento térmico, arenado o mecanizado, para mejorar el acabado superficial, puesto que en general su nivel de precisión es bajo y sus terminados son más toscos que otros procesos.

2.2 FUNDICIÓN

El proceso de fundición consiste en que un material fundido, generalmente metal, es vertido en una cavidad del molde donde se solidifica y adopta la forma de la pieza final. A continuación, el material se enfría y el calor se extrae generalmente a través del molde, hasta que se solidifique en la forma deseada.

Los procesos de fundición se pueden clasificar en diferentes grupos en función de si el molde o patrón pueden reutilizarse (es permanente) o son de un solo uso[5], [6].

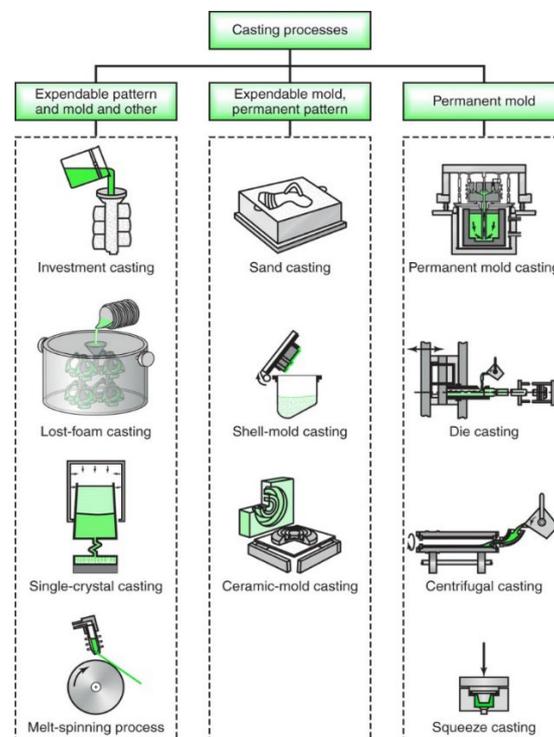


Figura 2.10. Figuras esquemáticas de varios procesos de fundición. Fuente: [7].

En los procesos de moldes fungibles, los moldes se destruyen para extraer la pieza fundida, por ello, los materiales típicos para la fabricación de moldes son la arena, el yeso y la cerámica mezclados con un agente adhesivo. Por otro lado, en los procesos de moldes permanentes, puesto que el molde se reutiliza, se debe diseñar para permitir un fácil desmontaje de la pieza fundida. Los materiales utilizados para estos moldes suelen ser metales que conservan su resistencia a altas temperaturas.

En la sección 2.2.1 “Fundición a la cera perdida”, se explicará con detalle la fundición a la cera perdida debido a su gran relevancia en el proyecto.

De forma general, los procesos de fundición:

- Pueden producir piezas con formas complejas, cavidades internas y/o secciones huecas.
- Se pueden realizar piezas de diferentes tamaños.
- Se puede trabajar con materiales difíciles de trabajar con otros procesos.

2.2.1 FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA

El proceso de fundición a la cera perdida (también conocida como moldeo a la cera perdida, fundición a presión o fundición de precisión) es un proceso de fundición donde se utiliza un molde para generar un patrón de cera con la forma de la pieza deseada. Si el volumen de producción es lo suficientemente grande, se fijan varios patrones de cera a un “árbol” que contiene las guías, las compuertas y otros elementos que alimentarán y distribuirán el metal fundido. El patrón con cera es sumergido en una fina lechada cerámica que contiene sílice coloidal y alúmina. El molde se seca y se calienta en un horno para licuar la cera. Entonces, la cavidad del molde es llenada con el metal fundido y se deja solidificar. Para facilitar el llenado, el metal fundido se vierte en el molde mientras está todavía caliente (para ello se mete en el horno una segunda vez para su curación en un periodo de 12- 24 horas). Cuando la pieza se ha enfriado, se destruye el molde y se extrae la pieza.

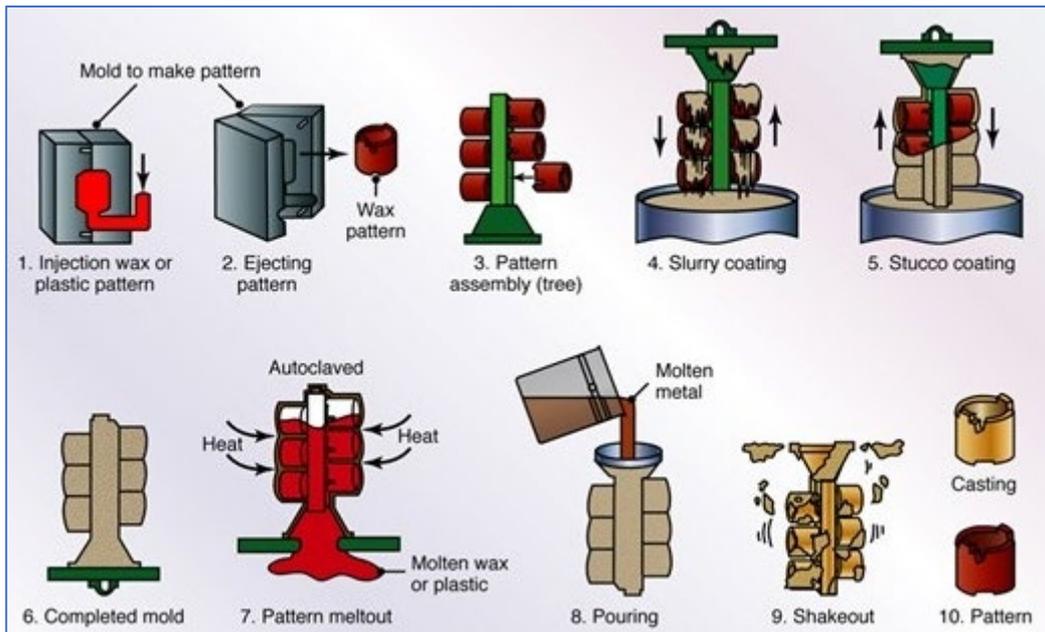


Figura 2.11. Diagrama de los procesos de fundición a la cera perdida. Fuente: [7].

Esta técnica es utilizada para la fabricación de armas, joyas y arte desde la antigüedad desarrollado de manera independiente por sumerios, indios, chinos, mesoamericanos e incas. En la segunda guerra mundial, supone una solución para la necesidad de componentes precisos con geometría compleja y el incremento de su demanda. En la actualidad, las aplicaciones donde se utiliza este proceso van desde ámbitos como la ingeniería de fabricación, ingeniería aeroespacial, defensa militar, medicina, joyería, etc.[8].

Este tipo de fundición se utiliza generalmente para fabricar piezas de formas complejas que requieren de un mejor acabado superficial, tolerancias más estrictas y paredes más finas, además con la ventaja de que se puede fundir casi cualquier metal. Sin embargo, es un proceso caro porque se requiere una gran cantidad de trabajo manual para preparar el patrón de cera y los moldes de recubrimiento [7], que suelen ser una mezcla de material refractario basado en sílice.

2.3 COMBINACIÓN DE LA FABRICACIÓN ADITIVA CON TÉCNICAS CONVENCIONALES DE FUNDICIÓN CON PATRONES DESECHABLES

En la actualidad, las demandas del cliente en cuanto a productos han aumentado en términos de calidad, forma y tiempo de fabricación, lo que implica que las industrias se dirijan hacia la fabricación de productos personalizados para el usuario final. Esto exige un cambio de estrategia hacia el desarrollo de productos que puedan fabricarse en el menor tiempo a pesar de su complejidad y sin comprometer la calidad y precisión.

Para la fabricación de piezas metálicas complejas y personalizadas sin comprometer la calidad y precisión se puede afrontar de dos maneras: mediante fabricación aditiva con técnicas metálicas (fabricación aditiva con metales directo) o mediante la combinación de fabricación aditiva con procesos tradicionales, en donde las técnicas de fabricación aditiva se utilicen para la fabricación de patrones con materiales no metálicos y posteriormente mediante procesos de fabricación tradicionales tales como la fundición o inyección, fabricar la pieza final deseada (fabricación aditiva con metales indirectamente).

Los métodos tradicionales de fundición a la cera perdida no se pueden considerar como una solución para la nueva demanda puesto que, además de las desventajas como que el volumen de producción debe ser alto puesto que las herramientas para producir los patrones de cera son de coste elevado, con lo cual dificulta la personalización del producto, y el tiempo de fabricación, que en comparación con la fabricación aditiva, es mayor, presentan otros inconvenientes como que económicamente se trata de un proceso más caro puesto que se requiere una gran cantidad de trabajo manual en la preparación del patrón de cera [9] y, asimismo, la calidad de la pieza final se le atribuye a los parámetros del proceso de inyección de la cera, como el tiempo de enfriamiento, la presión de inyección, la temperatura de la masa fundida, la velocidad de inyección, el tiempo de llenado y la temperatura del molde, variables que son muy difíciles de controlar [8], además de que los canales de llenado están generalmente muy sobredimensionados porque se construyen para mantener la resistencia del conjunto de cera en lugar de diseñarse para controlar el flujo durante el llenado [10].

Por otro lado, los métodos directos de fabricación aditiva para piezas de metal como SLM y EBM, previamente explicados en la sección 2.1.1 “*Fundición a la cera perdida*”, tienen una gran capacidad para fabricar piezas complejas que son difíciles o incluso imposible de fabricar mediante técnicas de fabricación convencionales. Sin embargo, estos métodos presentan ciertas desventajas [11]:

- La elección de los materiales es limitada.
- Alto estrés térmico debido a la alta energía de la fuente local.
- Mal acabado superficial.
- Propiedades anisotrópicas.
- Alto coste debido a los materiales y a la fabricación con haces de alta potencia.

Al combinar ambas tecnologías, el proceso de fabricación del patrón mediante FA simplifica en tiempos y en coste según [9] entre un 19,29 y 93,229 % respectivamente en comparación del proceso tradicional, además de que se eliminan las instalaciones de diversas máquinas herramientas necesarias en los procesos de fabricación de los patrones así como se produce un ahorro energético en producción de unidades del 70,07%. Asimismo, las emisiones de CO₂ se han reducido en un 71,8% mediante este proceso de fundición asistido por FA.

De la misma forma, las desventajas de las tecnologías aditivas directas de fabricación en metal desaparecen, lo cual se valora profundamente en el campo de la medicina[12], en el ámbito industrial para el desarrollo de matrices celulares metálicas y paredes finas [11], [13], [14].

Sin embargo, hay que tener en cuenta otros factores como los efectos de los parámetros de las propiedades de los patrones, así como su procesado posterior o previo para la mejora de las características superficiales [15][16], apreciado en el ámbito artístico.

Para la fabricación del patrón, la fabricación aditiva de metales indirecta se centra en la impresión 3D de materiales no metálicos como polímeros, fotopolímeros, cerámicas, ceras, resinas y composites [8], [11], [15]–[19].

3 Materiales y métodos

La investigación será de carácter experimental mediante un proceso metódico y sistemático de tratamientos secuenciales, donde cada factor de estudio será variado a diferentes niveles para determinar cómo afecta a la optimización del molde.

Es por ello, por lo que en este capítulo se explicará de forma detallada la metodología llevada a cabo para este estudio, que, de forma resumida, se representa en la Figura 3.1.

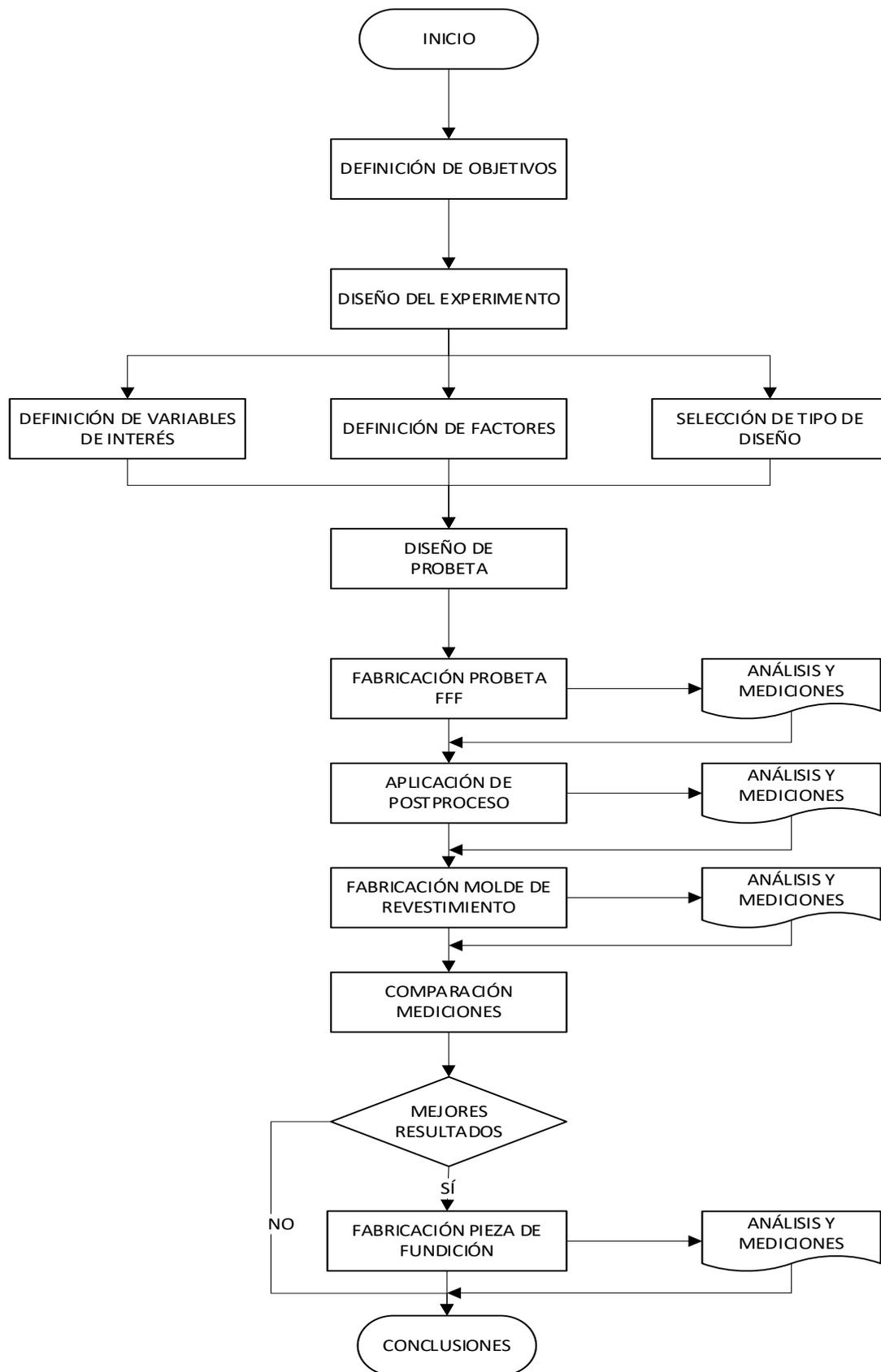


Figura 3.1. Flujograma de la metodología. Fuente: Elaboración propia.

3.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Para llevar a cabo este estudio, se aplica la metodología *Diseño de Experimentos* (DOE) con el fin de obtener modelos estadísticos que estudien factores que influyen en la variable de interés y, si existe influencia, cuantificarla.

De forma general, para una correcta planificación de un diseño de experimento se deben ejecutar las siguientes etapas:

- 1) Definir los objetos del experimento: desarrollar preguntas concretas fundamentales que debe dar respuesta el experimento.
- 2) Identificar todas las fuentes de variación: se deben identificar los factores que puedan generar variabilidad en la respuesta.
- 3) Elegir una regla de asignación de las unidades experimentales a las condiciones de estudio.
- 4) Especificar las medidas que se realizarán, el procedimiento experimental y anticiparse a posibles dificultades.
- 5) Ejecutar un experimento piloto para visualizar el comportamiento que va a tener el experimento y ver cómo se comporta con algunos factores y de esta forma evitar imprevistos futuros.
- 6) Especificar el modelo donde se indique la relación que existe entre la variable respuesta y las fuentes de variación principales identificadas previamente.
- 7) Esquematizar los pasos del análisis estadístico, donde se debe incluir estimaciones que hay que calcular, contrastes que hay que realizar, intervalos de confianza y diagnóstico y crítica del grado de ajuste del modelo a la realidad.
- 8) Determinar el tamaño muestral.
- 9) Revisar las decisiones anteriores y modificar si es necesario los pasos previos.

En consecuencia, a los pasos previamente indicados, para comenzar con el diseño del experimento, se define el objetivo como la optimización del molde de sacrificio fabricado a través de una máquina de fabricación por filamento fundido (FFF) para su utilización en fabricación de piezas metálicas mediante fundición.

Para conseguir este objetivo se tienen en cuenta tres variables de interés imprescindibles:

- **Calidad superficial**

La calidad superficial de las piezas fabricadas en FFF viene determinado por el efecto escalera y el perfil del filamento. El filamento utilizado para las probetas del experimento proviene de la misma bobina, como se explicará más adelante, con la finalidad de reducir la variabilidad del experimento.

La técnica de fabricación aditiva FFF deposita el material fundido con un grosor de capa L , lo cual implica que en la superficie se produzca un efecto “escalera” característico. La calidad de la superficie depende del ángulo θ que se forma entre la dirección de deposición y el vector normal en la superficie [20].

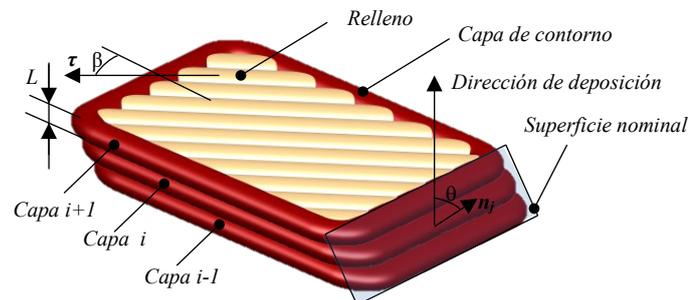


Figura 3.2. Efecto escalera producido en la fabricación mediante FFF [20].

El control de esta variable de interés se realizará midiendo la rugosidad de la superficie a través de los parámetros R_a (rugosidad media), R_t (altura máxima pico-valle) y R_z (profundidad media de rugosidad) siguiendo la normativa “UNE-EN ISO 4287:1999 – Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial.” Para ello, se utiliza el rugosímetro SURFTEST SJ-500/SV-2100 de Mitutoyo.

- **Calidad dimensional**

La calidad de las piezas fabricadas se caracteriza por la precisión de sus dimensiones, forma geométrica y calidad de las superficies.

La calidad dimensional en fabricación aditiva se mide como las desviaciones en las dimensiones reales con respecto a las dimensiones que proceden del diseño teórico (referencia al CAD). Cuánto más pequeña sea la diferencia entre las dimensiones implica una mayor calidad dimensional. Además, en este caso también se van a tener en cuenta el error que se pueda producir entre la impresión y el molde revestido por la acción térmica en el proceso de eliminación del PLA.

También se requiere, en este proyecto, controlar las desviaciones que se pueden producir entre el molde de revestimiento y la pieza fabricada con la técnica FFF y la pieza fabricada a través de fundición con respecto a las dimensiones originales.

El control de esta variable se realizará utilizando micrómetros para determinar las dimensiones y las desviaciones producidas.

- **Residuo plástico**

Debido a la *licuación* del modelo fabricado a través de la técnica FFF, un residuo plástico será previsiblemente generado. Este residuo va a variar en función del material utilizado para su impresión.

El control de esta variable se hará mediante inspección visual a través del software de procesamiento de imagen digital *ImageJ*, que analizará las fotos que se obtengan del microscopio para obtener el porcentaje de residuo por área de la cara analizada.

El comportamiento frente a factores que afectan directamente a las variables de interés es lo que se desea analizar. Dichos factores son:

Aplicación de postprocesado

Como se menciona previamente, las técnicas FFF permiten la impresión de modelos con un nivel de acabado dependiente del efecto escalera y perfil del filamento. Para conseguir la reducción e incluso eliminación de la rugosidad superficial es necesario aplicar un tratamiento posterior.



Figura 3.3. Comparación entre la misma pieza fabricada con una altura de capa de 0,35 mm con postproceso en baño de vapor, fabricada con una altura de capa de 0,1mm sin postproceso e fabricada con una altura de capa de 0,35 mm sin postproceso. Fuente: [21].

Existen diversas técnicas de postprocesado de piezas impresas en 3D con técnicas FFF como pueden ser imprimir y lijar para un posterior pintado, utilizar tratamientos químicos mediante procesos de inmersión, aplicación superficial, mediante un pincel o brocha, o en forma de vapor o utilizando resinas epoxi.

Los tratamientos químicos de acabado post-impresión se aplican en piezas 3D FFF para mejorar sus acabados superficiales. Al aplicar estos tratamientos las propiedades de las piezas podrán verse alteradas.

Los productos químicos que se utilizan para el “alisado” en PLA son muy diversos como el tetrahidrofurano (THF), acetato de etilo ($\text{CH}_3\text{-COO-CH}_2\text{-CH}_3$), butanona (MEK), diclorometano (DCM), cloroformo (CHCl_3), etc. [22].

Debido a la disponibilidad del diclorometano, es el método seleccionado para este estudio. Se aplicará en forma de baño de vapor durante 24 segundos. En este caso, no se está comprobando que método de postproceso es mejor, sino en que afecta su aplicación o no en la rugosidad de la pieza final, por ello este factor consta de dos niveles.

Tabla 3.1. Niveles del Factor Postprocesado. Fuente: Elaboración propia.

FACTOR	NIVEL BAJO	NIVEL ALTO
POSTPROCESADO	NO	SÍ

Este factor afecta directamente al acabado superficial y a la calidad geométrica, puesto que el diclorometano es un proceso muy agresivo para el PLA y si se le aplica en exceso puede modificar sus dimensiones, además de a la minimización de residuos puesto que, por lo expuesto previamente, si las dimensiones se modifican implican una disminución consecuente y que se debe cuantificar del material utilizado, así como de su posterior minimización de residuos.

Capas iniciales y finales (número de capas)

Este parámetro define el número de capas iniciales y finales impresas, siendo las capas iniciales son las que se imprimen directamente en la placa y las finales las últimas capas que se imprimen sobre la pieza. Se puede reducir este valor para mejorar la velocidad de impresión y reducir el material.

El valor por defecto en el software de laminado utilizado (*Ultimaker Cura*) son 5 capas, por ello se ha definido ese valor como el nivel alto y el nivel bajo se ha decidido 2. Aunque las capas iniciales y finales se pueden definir con diferentes valores entre ellas, en este caso, ambas mantendrán el mismo valor para reducir variabilidad en el estudio.

Tabla 3.2. Niveles del Factor Capas iniciales y finales. Fuente: Elaboración propia.

FACTOR	NIVEL BAJO	NIVEL ALTO
POSTPROCESADO	2	5

Este factor afecta principalmente a la minimización de residuos, ya que menor número de capas implica menor uso del material y a su vez menos residuos generados.

Altura de capa (mm)

La altura de capa es el parámetro que define el grosor de cada capa. Este parámetro está ligado directamente a la calidad de la pieza, puesto a menor altura de capa implica una mayor calidad, pero conlleva un aumento del tiempo de impresión.

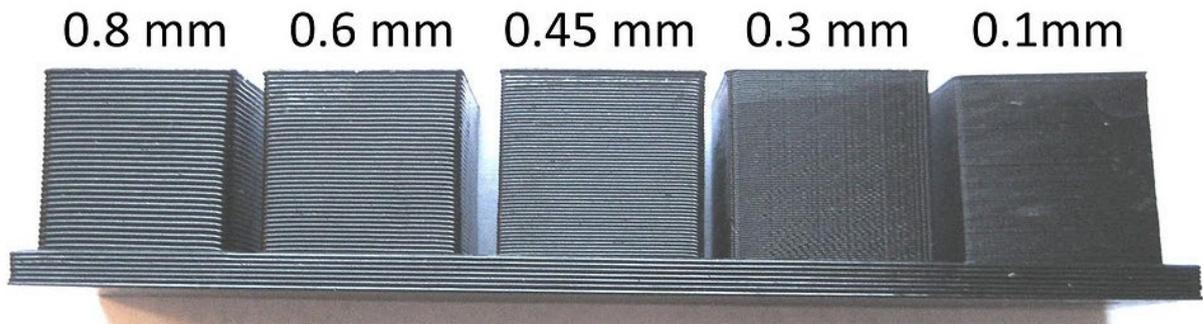


Figura 3.4. Piezas fabricadas mediante FFF con diversas alturas de capa. Fuente: [23].

La selección de la capa de altura implica:

- La altura máxima debe ser menor del 80 % del diámetro de la boquilla del *nozzle*.
- No hay límite inferior, pero con alturas inferiores de 0,05 mm aparecen factores desaconsejables tales como aumento del tiempo de impresión, deformación de las capas y falta de resolución del extrusor [24]. Puesto que se ha realizado previas impresiones exitosas con altura de capa de 0,06 mm, este va a ser el límite inferior seleccionado.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, utilizando una boquilla o *nozzle* de 0,4 mm, los niveles serán los siguientes:

Tabla 3.3. Niveles del Factor Altura de Capa. Fuente: Elaboración propia.

FACTOR	NIVEL BAJO	NIVEL ALTO
ALTURA DE CAPA (mm)	0,06	0,1

Este factor tiene un efecto directo en el acabado superficial de la pieza y en la calidad geométrica de la pieza en el eje Z.

Espesor de pared o Relación "Shell-core" (mm)

Los "*shells*" o carcasas son el número de capas en el perímetro de una impresión. El aumento del grosor de estas implica que la impresión sea más robusta sin tener que aumentar la cantidad de material utilizado en el relleno.

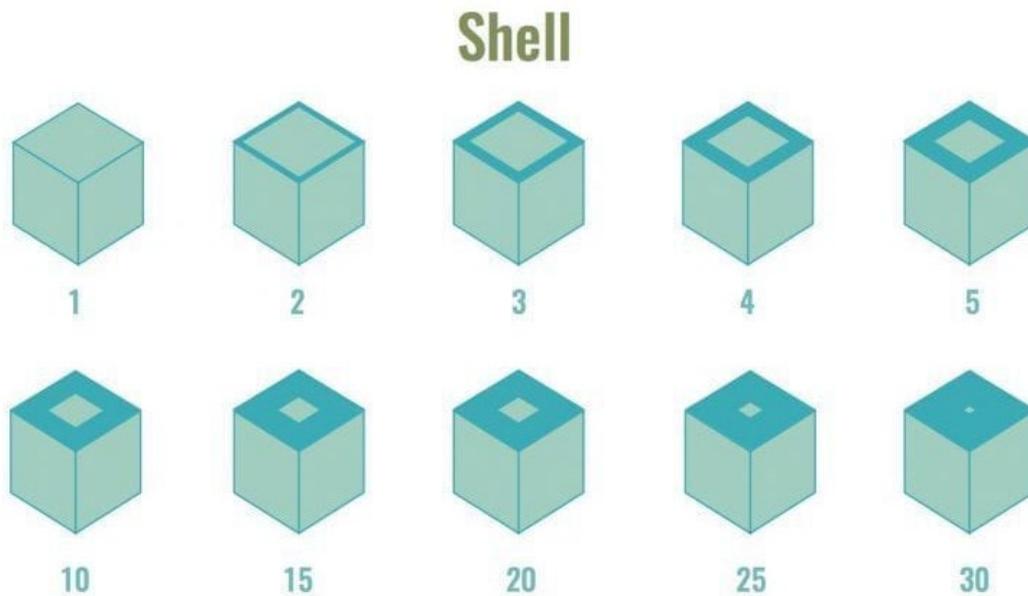


Figura 3.5. Relación Shell-core o espesor de pared. Fuente: [25].

El espesor de pared debe ser lo suficientemente grueso para soportar la pieza, por ello se recomienda un espesor mínimo de 1 mm [26], sin embargo, el espesor mínimo posible es el del tamaño de nuestra boquilla. Además, el aumento de espesor implica un aumento en la cantidad de tiempo, material y coste necesario para la fabricación de la pieza. Es por ello, que, teniendo en cuenta que la boquilla de fabricación utilizada es de 0,4 mm, se define como nivel bajo 0,4 y como nivel alto el doble.

Tabla 3.4. Niveles del Factor Espesor de Pared. Fuente: Elaboración propia.

FACTOR	NIVEL BAJO	NIVEL ALTO
ESPESOR DE PARED (mm)	0,4	0,8

Este factor afecta directamente a la variable de minimización de residuos ya que con un menor espesor implica menor material de forma que se generarían menos residuos.

Densidad de relleno (%)

Este parámetro define con valores en porcentaje la cantidad de material de la que está constituido la parte interna de la pieza. El rango contempla desde 0 % (pieza hueca) hasta el 100 % (pieza maciza). La modificación de este parámetro afecta a la resistencia

de la pieza, peso, tiempo de impresión y coste, además de la cantidad de material final utilizado.

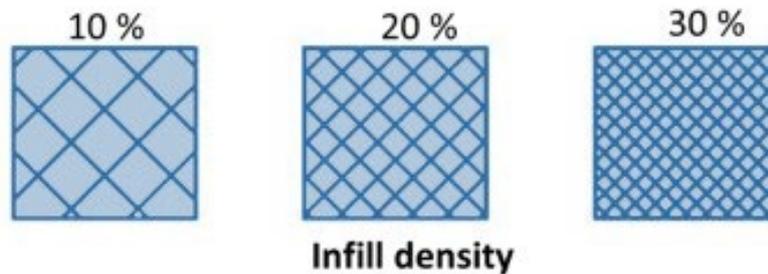


Figura 3.6. Densidad de relleno. Fuente: [27].

El valor estándar utilizado es de 20 %. Al aumentar el porcentaje de relleno se aumenta la resistencia de la pieza, aunque implica a su vez un aumento del material utilizado, peso y coste. En este estudio se pretende obtener una pieza con el menor material posible sin que afecte a su estructura externa, la resistencia de la pieza es indiferente, por ello, los niveles de este factor deben ser como máximo del 20%. En consecuencia, se ha definido el nivel alto al 20% y el nivel bajo una cuarta parte.

Tabla 3.5. Niveles del Factor Densidad de Relleno. Fuente: Elaboración Propia.

FACTOR	NIVEL BAJO	NIVEL ALTO
DENSIDAD DE RELLENO (%)	5	20

Este parámetro está muy relacionado con el patrón de relleno, ya que para cada patrón ofrece unos límites de densidades de relleno en la fabricación. Sin embargo, en el presente estudio no afecta la variación del tipo de patrón, con lo que se utilizará para toda la experimentación el patrón de relleno tipo “grid” ya que es el que viene por defecto en el software de impresión 3D, ofrece buena resistencia en cualquier dirección y su velocidad de impresión es alta.

Este factor afecta directamente a la variable de minimización de residuos puesto que menos relleno, dentro de lo posible para no afectar a la pieza, implica una mayor facilidad en la minimización de residuos.

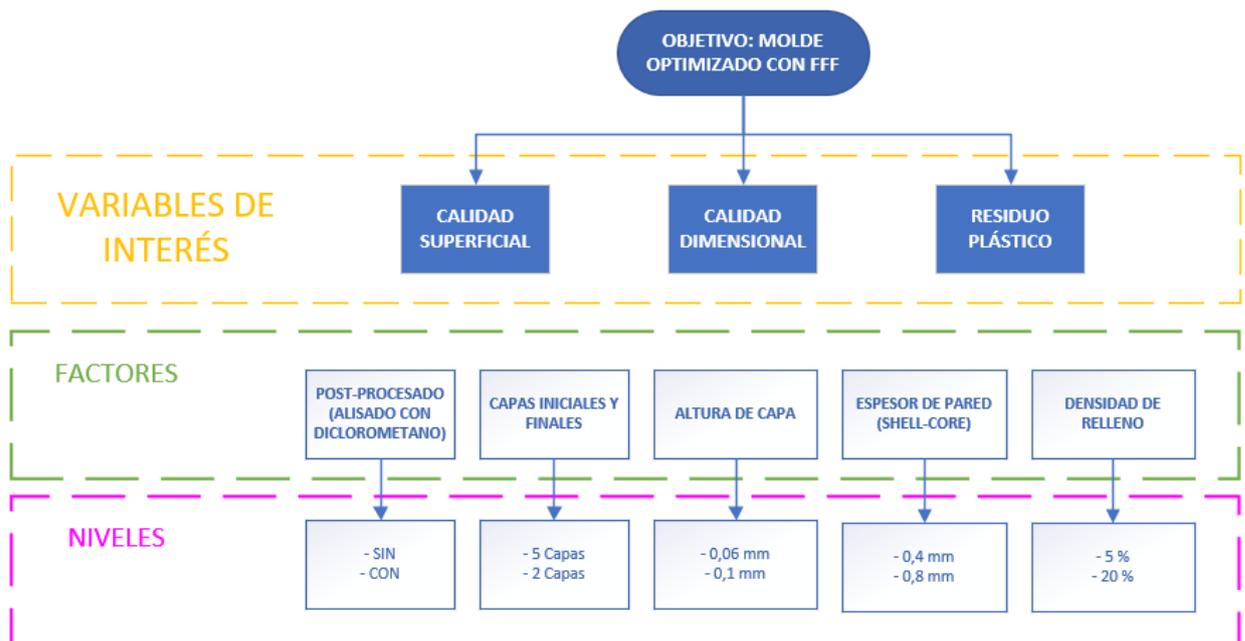


Figura 3.7. Esquema simplificado de las variables de interés y sus relaciones con los factores controlables y sus niveles que se aplican en el DOE. Fuente: elaboración propia.

Además de los factores controlables mencionados previamente, existen factores no controlables que pueden afectar a la medición como:

- Temperatura ambiental (°C)
- Humedad relativa del aire (%)

Estas variables varían de acuerdo con las condiciones ambientales del lugar donde se ejecute el experimento. En este experimento, estas variables no se tendrán en cuenta, pero pueden ser variables interesantes de comprobar en líneas futuras.

El tratamiento térmico para la eliminación del molde no se considera factor, puesto que se ha definido por experiencia previa en diversos trabajos [13], [28], y como se menciona previamente, el material tampoco se considera un factor puesto que se va a imprimir desde la misma bobina.

El análisis DOE se lleva a cabo a través de *Minitab Statistical Software*, un programa que examina datos para encontrar y predecir patrones y descubrir relaciones entre las variables.

MiniTab ofrece cinco tipos de diseño [29]:

- Diseños de exploración: diseños de cribado y de Plackett-Burman definitivos.
- Diseños factoriales: diseños completos de 2 niveles, diseños fraccionados de 2 niveles, diseños de parcelas divididas, diseños de Plackett-Burman y diseño factorial completo donde cada factor puede tener diferentes niveles.
- Diseños de superficie de respuesta: diseños compuestos centrales y diseños de Box-Behnken.
- Diseños de mezcla: diseños centroides simplex, diseños reticulares simplex y diseños de vértices extremos.
- Diseños de Taguchi: diseños de 2 niveles, diseños de 3 niveles, diseños de 4 niveles, diseños de 5 niveles y diseños de niveles mixtos.

Considerando que el experimento tiene factores con 2 niveles, y no se van a tener en cuenta los factores no controlables, la mejor opción es realizar un diseño factorial fraccionado de resolución V para un mejor ajuste a los tiempos. Como consecuencia, se obtienen 16 combinaciones a realizar como se muestran en la Tabla 3.6:

Tabla 3.6. Pruebas, obtenidas del DOE, con las diferentes variaciones de los factores que afectan a las variables de estudio. Fuente: Elaboración propia.

TAG	POSTPROCESO ¹	ALTURA DE CAPA (MM)	ESPESOR DE PARED (MM)	NÚMERO DE CAPAS	DENSIDAD DE RELLENO (%)
F1	X	0,06	0,4	2	5
F2		0,06	0,4	2	20
F3		0,06	0,4	5	5
F4	X	0,06	0,4	5	20
F5		0,06	0,8	2	5
F6	X	0,06	0,8	2	20
F7	X	0,06	0,8	5	5
F8		0,06	0,8	5	20
F9		0,1	0,4	2	5
F10	X	0,1	0,4	2	20
F11	X	0,1	0,4	5	5
F12		0,1	0,4	5	20
F13	X	0,1	0,8	2	5
F14		0,1	0,8	2	20
F15		0,1	0,8	5	5
F16	X	0,1	0,8	5	20

¹ Nota: Las X indican las pruebas a las que se le aplica el postproceso.

3.2 DISEÑO DEL PATRÓN

Debido a la novedad de la investigación, no existe normativa respecto a la probeta de estudio. Es por ello, que se ha propuesto un diseño cúbico de 30 mm de lado, teniendo en cuenta que el objetivo del estudio es optimizar los diferentes parámetros del modelo desechable fabricado mediante técnica FFF expuestos en el apartado 3.1 *“Diseño del experimento”* para obtener una pieza metálica de la mayor calidad.

Asimismo, se añade en una de las caras de la probeta un cono truncado considerando su futura utilidad en el proceso de fundición. Basado en la base de goma utilizada en los cilindros disponibles, la circunferencia superior debe tener un diámetro de 10 mm, y a partir de esa circunferencia se obtiene la altura del cono truncado mediante el teorema de Tales suponiendo que la altura del cono sin seccionar hubiera sido 30 mm.

Este diseño se ha realizado teniendo en cuenta las futuras mediciones que se desean realizar, ya que la normativa de rugosidad, como se especificará en más detalle en el apartado 3.5.3. *“Análisis de rugosidad”*, indica que es necesario tener una longitud de más de 12,5 mm, así como su funcionalidad para la fundición y la necesidad de facilitar la aplicación del postproceso y realizarlo con mayor funcionalidad.

El modelado 3D de la probeta se ha realizado a través del software de diseño CAD *CATIA V5* y se ha exportado en formato .stl para su posterior importación en el software de laminado como se explica en la sección 3.3. *“Fabricación del patrón mediante técnica FFF”*.

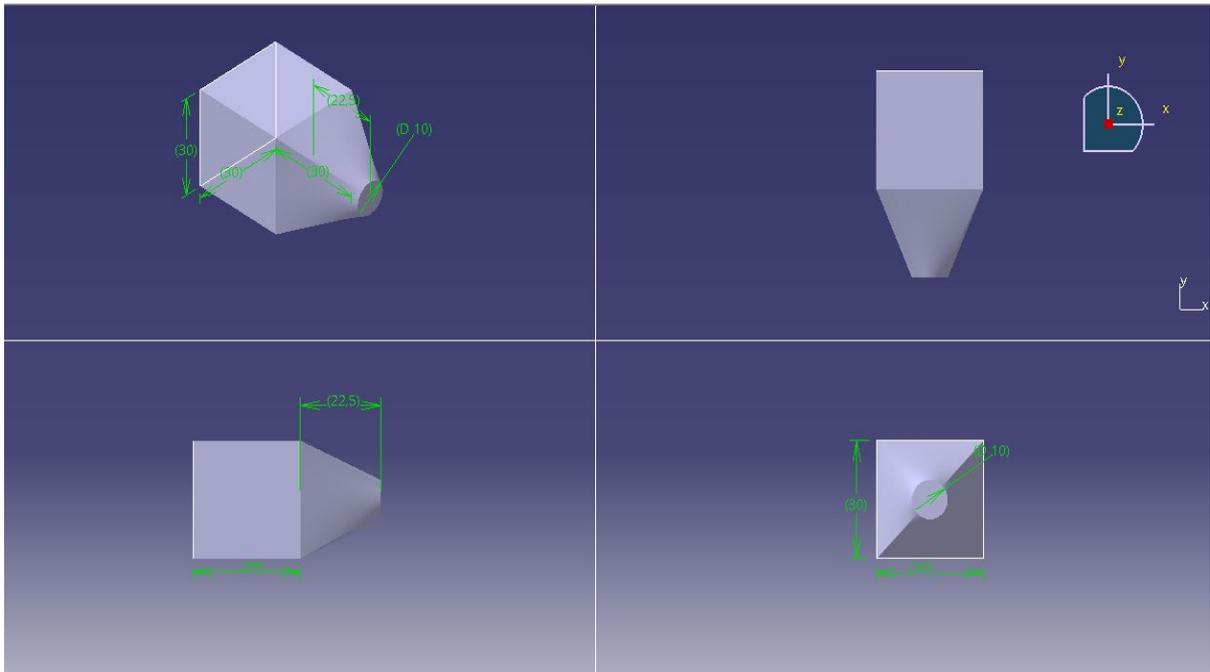


Figura 3.8. Vistas probeta de fabricación utilizando el software CAD CATIA V5. Fuente: Elaboración propia.

3.3 FABRICACIÓN DEL PATRÓN MEDIANTE TÉCNICA FFF

La técnica seleccionada para la fabricación del molde desechable es la Fabricación por Filamento Fundido (FFF) perteneciente a la categoría de extrusión de material según la norma ISO 17269. Esta técnica utiliza un filamento continuo de un material termoplástico, donde un cabezal controlado mediante temperatura extruye de forma precisa capa a capa sobre una plataforma.

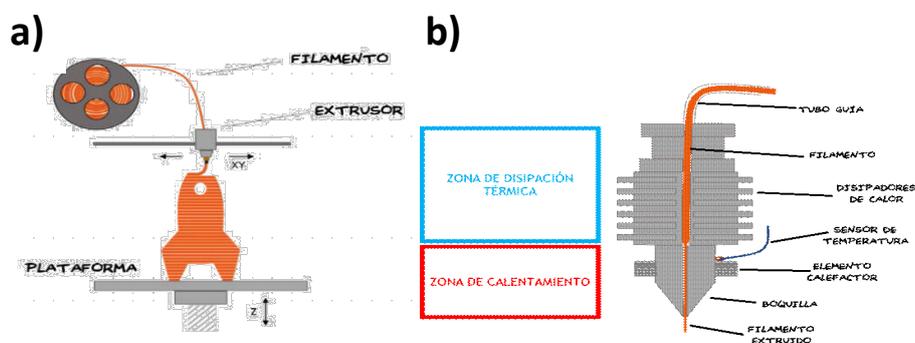


Figura 3.9. a) Esquema general de una impresora FFF. b) Detalle de un extrusor típico. Fuente: [30].

En el diagrama, se observa el funcionamiento general de esta técnica: el filamento de la bobina es empujado por un motor paso a paso hasta su salida por la boquilla del extrusor. En el extrusor, el material es calentado hasta fundirlo y es depositado a través de la boquilla del extrusor en una plataforma. El extrusor tiene la capacidad de moverse en los ejes X e Y, mientras que el movimiento Z es definido por la plataforma, la cual una vez impresa la capa se mueve ligeramente hacia abajo para que se imprima la siguiente capa. En otras impresoras, se puede dar el caso donde la plataforma es fija y el extrusor se mueva en los tres ejes.

Esta técnica ha revolucionado el sector industrial pues que ofrece las siguientes ventajas:

- Reducción de tiempos de producción: por ejemplo, en el tiempo de fabricación de prototipos industriales.
- Gran versatilidad: a diferencia de otras técnicas de fabricación tradicionales, se pueden fabricar piezas de diversos tamaños, formas e incluso diferentes materiales.
- Ahorro de costes: puesto que es la técnica aditiva más económica.
- Tecnología ecológica: además de su uso del PLA, termoplástico biodegradable, como su material más empleado, se considera como tecnología ecológica gracias a su condición de tecnología de fabricación aditiva, donde se usa el material necesario para la fabricación reduciendo residuos que se puedan generar en el proceso de producción.
- Gran facilidad de impresión y no requiere de grandes conocimientos técnicos para su uso.

El primer paso en la fabricación FFF del molde es la modificación de los parámetros de impresión y su transformación de archivo tridimensional en formato STL a código G (*GCode*) para su lectura en la impresora. Para ello, se utiliza el programa de laminado de código abierto *Ultimaker Cura v4.7*.

Para la fabricación de las probetas con las diferentes combinaciones obtenidas a partir del DOE, se implementa la siguiente estrategia: cada serie de fabricación va a constar de

8 probetas dispuestas como una matriz de 2x4, donde se define los dos niveles de la densidad de relleno, los dos niveles del número de capas iniciales y finales y los dos niveles de espesor de pared como se observa en la Figura 3.10.

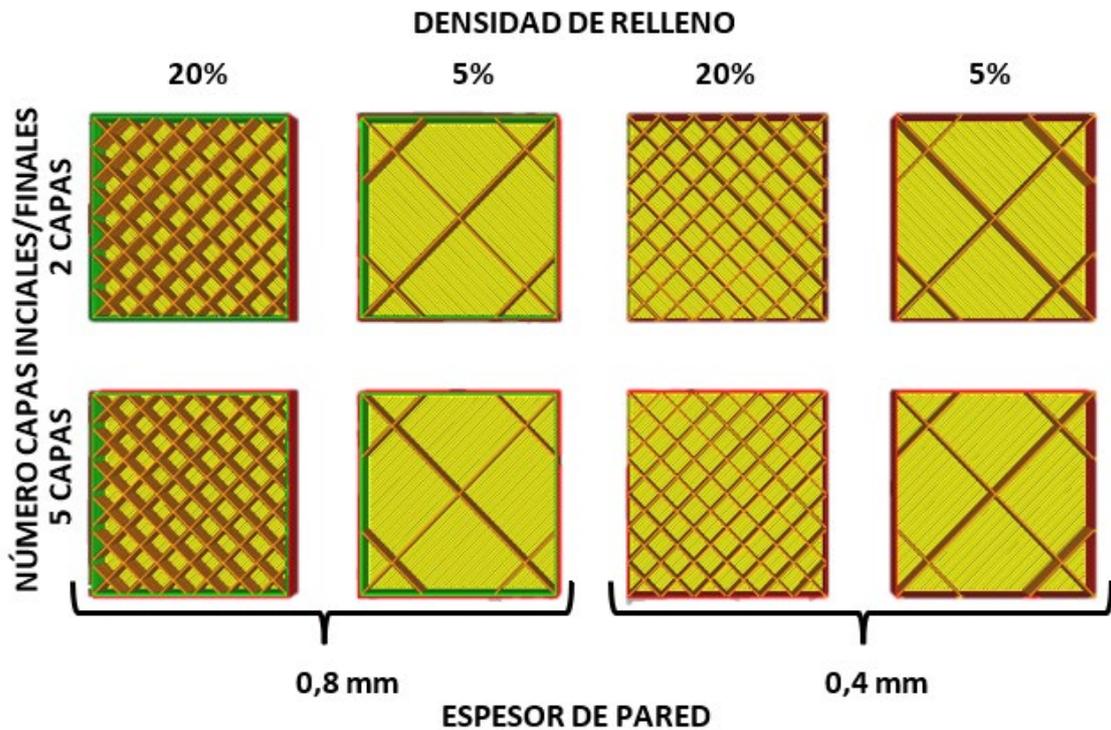


Figura 3.10. Matriz de impresión. Fuente: elaboración propia.

Para conseguir todas las combinaciones, se fabrican dos series, con la matriz de impresión especificada, donde se modifica la altura de capa con los valores predefinidos. Finalmente, como el factor de postproceso no es un parámetro de fabricación, no se tiene en cuenta en la matriz de impresión, pero sí se considerará a posteriori.

La posición de las probetas en la cama de impresión, teniendo en cuenta la matriz previamente descrita, será como se indica en la Figura 3.11:

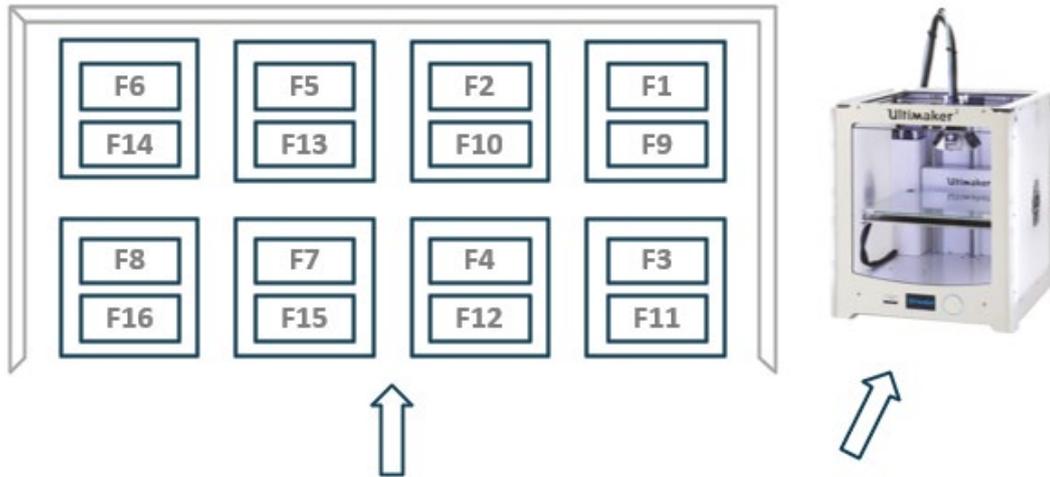


Figura 3.11. Posición de las probetas de fabricación en la cama de impresión siguiendo la estrategia definida. Fuente: Elaboración propia.

Para evitar el efecto de “warping”, las probetas están adheridas a la cama de impresión con la opción de “brim”, de tal forma que se creará una primera capa alrededor de la pieza a modo balsa.

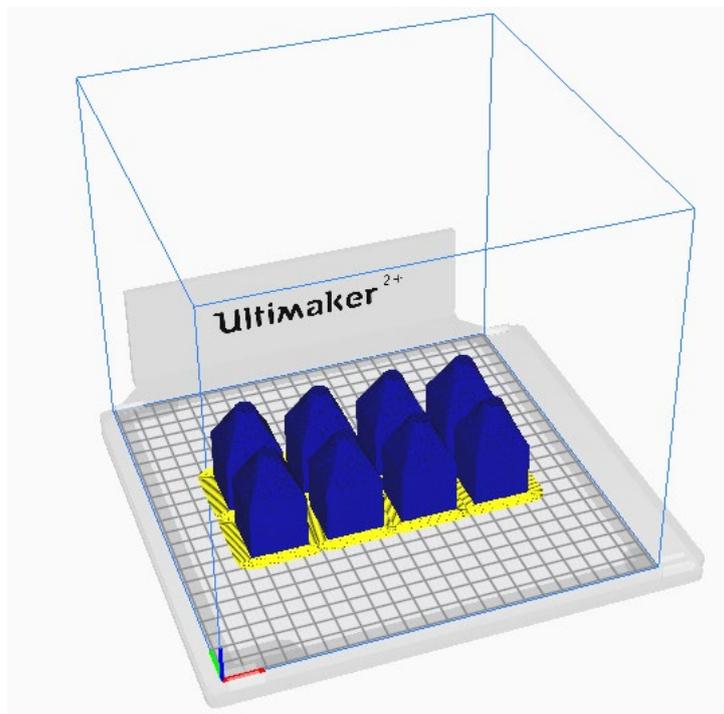


Figura 3.12. Simulación de fabricación en el software de laminado Ultimaker Cura. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo la estrategia, se obtienen los siguientes tiempos y costes de fabricación, además del material necesario, especificados en la Tabla 3.7, resultando en un tiempo total de 36 horas y 4 minutos y un precio total de fabricación de 9,74 €.

Tabla 3.7. Tiempo, material y coste de fabricación siguiendo la estrategia diseñada.
Fuente: Elaboración propia.

SERIE	ALTURA DE CAPA (mm)	TIEMPO	MATERIAL (g)	COSTE (€)
1	0,06	22 h 16 min	75	4,84
2	0,1	13 h 48 min	76	4,9
TOTAL		36 h 04 min	151	9,74

Para la fabricación de las probetas, se ha empleado la impresora **Ultimaker 2+** que consta de extrusión única con boquilla intercambiable y doble ventilador de refrigeración para filamentos de diámetro de 2,85 mm. Su volumen de fabricación es 223 x 223 x 305 mm. El movimiento en el eje Z se realiza a través de la plataforma móvil. La resolución de la capa para un nozzle de 0,4 mm varía entre 200 – 20 micras.

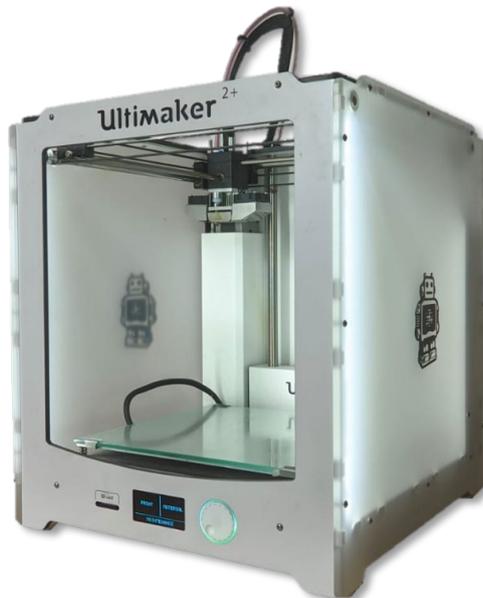


Figura 3.13. Ultimaker S2+. Equipo del grupo de investigación TAFI de la ULE. Fuente: Elaboración propia.

El material seleccionado para la fabricación es ácido poliáctico (PLA), un material termoplástico compuesto de materias primas ricas en almidón. Se selecciona este material puesto que gracias a su baja temperatura de fusión es ideal para fundición de precisión e insertos de moldes. Se ha utilizado la misma bobina para todas las probetas para evitar una mayor variabilidad en el proceso, como se menciona previamente, seleccionando el color negro para evitar que la pigmentación del resto de colores pueda ser considerado un factor.



Figura 3.14. Material utilizado: filamento PLA negro Ultimaker de diámetro 2,85 mm y peso 750 g. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.8. Propiedades físicas y químicas de PLA. Fuente: [31].

PROPIEDAD		UNIDAD
Temperatura de ignición	388	°C
Descomposición térmica	250	°C
Intervalo de fusión	145-160	°C
Densidad	1,24	g/cm ³
Solubilidad en agua	Insoluble	
Solubilidad en otros disolventes	Admite suavizado con THF, CH ₃ COOCH ₂ CH ₃ , MEK, DCM, CHCl ₃	

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Figura 3.15 y la Figura 3.16, se pueden observar detalles de la fabricación de las probetas siguiendo la estrategia implementada, así como su resultado final.

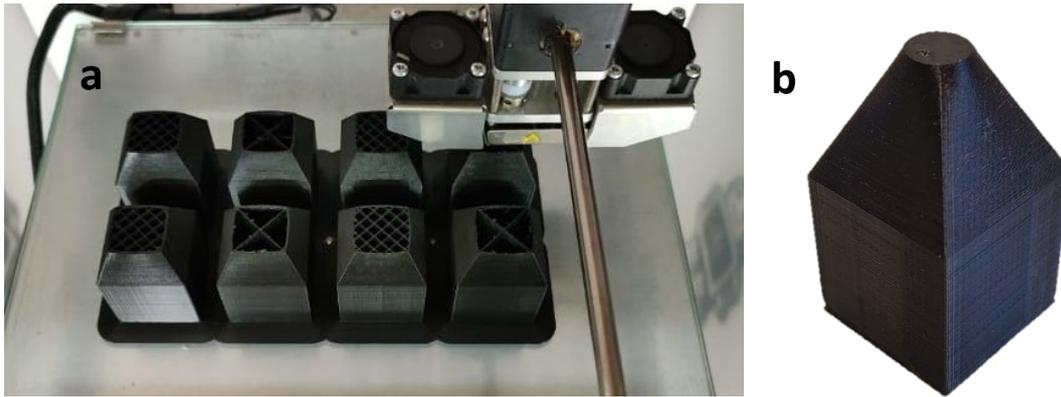


Figura 3.15.a) Detalle de fabricación de una serie de probetas utilizando la estrategia implementada en la impresora Ultimaker 2+. b) Detalle de la probeta fabricada.
Fuente: Elaboración propia.

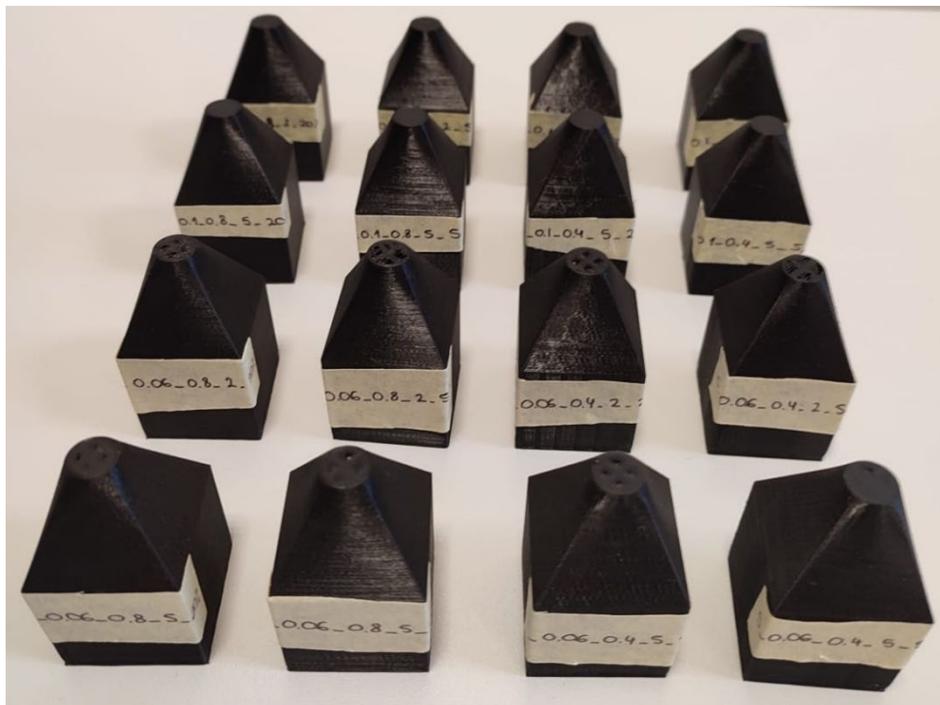


Figura 3.16. Probetas fabricadas con su respectiva etiqueta. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, a las probetas correspondientes, se les aplicó el postratamiento de “suavizado” o “alisado” con diclorometano. Este postproceso consiste en un tratamiento químico por inmersión en una atmósfera de vapor, también conocido como “*Vapor Smoothing*”, donde el disolvente, en este caso el diclorometano, se evapora mediante calentamiento consiguiendo así la atmósfera de vapor.

El diclorometano, también denominado cloruro de metileno, es un líquido volátil e incoloro que presenta un olor característico que en contacto con superficies calientes o con llamas, se descompone formando humos tóxicos y corrosivos. Reacciona atacando a algunas formas de plástico como el PLA [32].

Para realizar el alisado mediante “*Vapor Smoothing*”, se realizará una fase previa de lijado de la pieza para su posterior aplicación del diclorometano. Su aplicación será a través de un baño de vapor, donde se sumergió cada pieza durante 24 segundos. La secuencia de la aplicación es como se indica en la Figura 3.17.

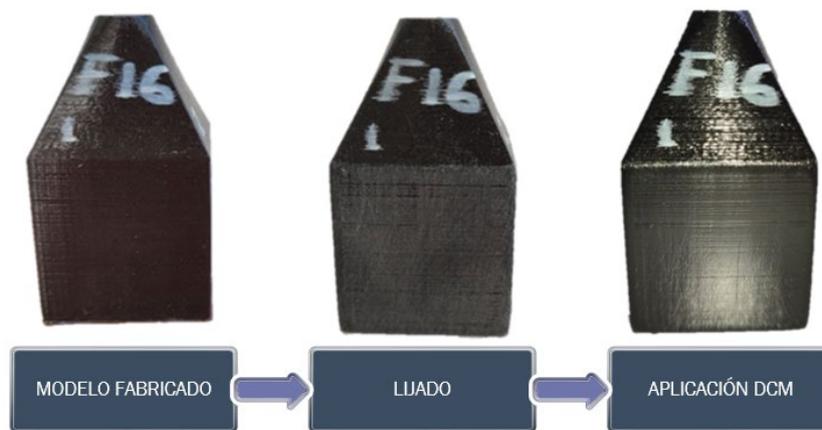


Figura 3.17. Secuencia de aplicación del postproceso: baño de vapor con diclorometano. Fuente: Elaboración propia.

3.4 FABRICACIÓN DEL MOLDE DE REVESTIMIENTO

En la fabricación del molde de revestimiento ha sido necesario inicialmente diseñar y elaborar los utillajes necesarios para realizar la mezcla e introducción en el horno, también teniendo en cuenta el futuro uso de fundición de estos. Por eso, este apartado se divide en dos secciones: 3.4.1 “*Diseño y Fabricación de Utillaje*”, donde se describe todo el proceso realizado para obtener el utillaje necesitado y 3.4.2 “*Revestimiento*”, donde se describe los cálculos, materiales y metodología para obtener el molde de revestimiento.

3.4.1 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UTILLAJE

Previamente a la realización del molde, se diseñó el cubilete donde se debe verter la mezcla, así como el soporte y la bandeja que se debe introducir en el horno. El diseño de dichos utillajes se realizó teniendo en cuenta las limitaciones de dimensiones del horno utilizado.

El horno utilizado es el modelo 12 PR/400 de la serie 8B de Hobersal, ya que permite alcanzar una temperatura máxima de hasta 1200 °C y se pueden programar curvas de temperatura. Las dimensiones interiores del horno, que son las dimensiones limitantes, son: 200 mm de alto, 280 mm de ancho y 390 mm de fondo.

Teniendo en cuenta estas dimensiones, en primer lugar, se diseñan los soportes sobre los que se situarán los cubiletes en el horno para el drenaje del PLA. Se ha optado por hacer dos soportes, uno individual para pruebas iniciales y otro con cuatro agujeros que permite realizar cuatro moldes a la vez, para agilizar los tiempos. Ambos soportes son fundamentalmente chapas de acero de 2 mm de espesor soldadas a cuatro patas de altura de 80 mm, ya que como mínimo debe haber 50 mm para permitir una convención adecuada del aire.

El soporte individual consta de una chapa de 175 mm de largo y 100 mm de ancho donde, en el centro de la chapa, se dispone de un agujero de 30 mm de diámetro sobre el que se situará el cubilete.

El segundo soporte trata de una chapa cuadrangular de 220 mm de lado donde se han realizado cuatro agujeros de 30 mm de diámetro de forma equidistante y dejando la suficiente separación entre los cubiletes.

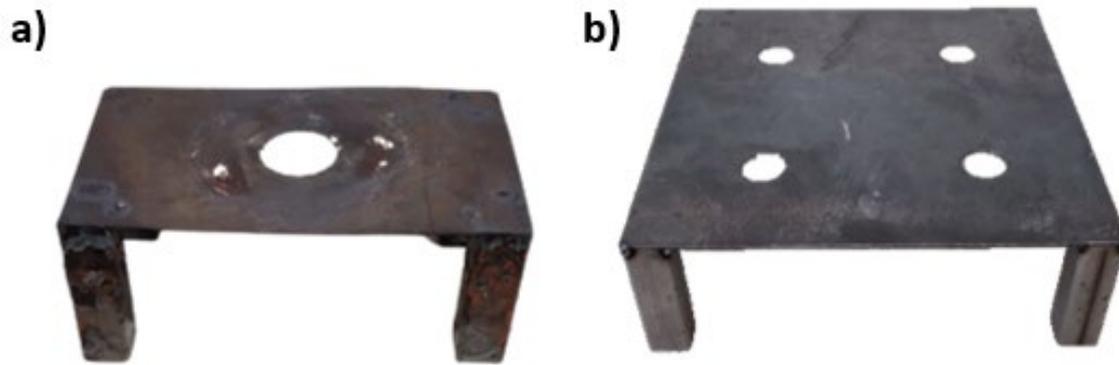


Figura 3.18. a) Soporte individual. b) Soporte para 4 moldes de revestimiento. Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se diseña una bandeja, de 120 x 230 mm con un pliegue de 20 mm, necesaria para recoger los residuos que pudieran caer, a partir de una chapa de acero de 1,25 mm de espesor utilizando la cortadora láser E201B y la plegadora de chapa manual Metallkraft FSBM 1270-20 HS2 del “FabLab Unileon”.



Figura 3.19. Proceso de fabricación de la bandeja y bandeja final. Fuente: Elaboración propia.

Se utilizaron dichas dimensiones teniendo en cuenta su uso para el soporte individual. Para el soporte de 4, se fabricó otra bandeja idéntica de tal forma que cubren toda la superficie de los soportes.

Por último, teniendo en cuenta la altura del soporte y las dimensiones del horno, se diseñó el cubilete, además de considerar que la probeta fabricada en FFF debe ir situada en el centro del cubilete. El cubilete diseñado es de forma cilíndrica, ya que permite una mejor distribución de las tensiones y evitar así que se concentren en las aristas como pasaría en un prisma, además se le perforan agujero para ayudar con la evaporación del agua. El diámetro de cubilete es de 90 mm, para que haya 30 mm de distancia entre la probeta de PLA y las paredes de forma uniforme, y con una altura de 93 mm. Además, debido a la necesidad de realizar las mediciones del molde de revestimiento se cortó en dos partes y la unión se realizó añadiendo el mecanismo tornillo-tuerca.



Figura 3.20. Cubilete inicial, diseñado con la intencionalidad de facilitar las mediciones posteriores. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, debido a dificultades que aparecieron en el proceso de desmoldeo, necesario para realizar las mediciones, finalmente se optó por utilizar los cubiletes sólo para el vertido del revestimiento, y la técnica utilizada para la introducción al horno serían unas abrazaderas.



Figura 3.21. Pieza de revestimiento en el horno, utilizando abrazaderas como estructura para evitar ruptura térmica durante el tratamiento térmico sobre el soporte individual y bandeja. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 REVESTIMIENTO

Una vez fabricadas las probetas de FFF se procede a fabricar el molde de revestimiento. Dicho molde se realiza con el investimento para microfusión *ULTRA-VEST* de *Ransom & Randolph*. Este investimento está indicado para aleaciones con temperatura de fusión de hasta 1205 °C. Su composición química incluye agentes retardadores del fraguado y afinadores de grano que generan superficies lisas y homogéneas.

Para realizar la mezcla, se debe determinar la cantidad correcta de agua y de polvo a utilizar. Para ello, se siguen las instrucciones facilitadas por el fabricante del revestimiento.

En primer lugar, se calcula el volumen del cubilete y el de la pieza y se restan para obtener el volumen que debe rellenar la mezcla. El volumen del cubilete cilíndrico especificado en 3.4.1. “*Diseño de utillaje*” es 591,64 cm³ y el volumen de la probeta, obtenido a través del software de diseño CATIA, es de 36,36 cm³. Entonces, el volumen que es necesario rellenar con el revestimiento es de 555,28 cm³.

Una vez obtenido el volumen, se procede a calcular, siguiendo las ecuaciones que indica el fabricante [28] para piezas de fundición grandes, el peso del polvo (3.1) y el volumen del agua (3.2):

$$[\text{Volumen (cm}^3) \times 1,25 \text{ gr}]/1000 = 555,28 \times 1,25/1000 = 0,6941 \text{ kg de polvo} \quad (3.1)$$

$$\text{Volumen} \times 0,488 \text{ ml} = 555,28 \times 0,488 = 270,97 \text{ ml de agua} \quad (3.2)$$

Una vez obtenidos el volumen del agua y el peso del polvo, se procede a realizar la mezcla del revestimiento, añadiendo el polvo sobre el agua. Cuando se consigue la mezcla, esta se vierte en el cubilete, previamente ensamblado con la probeta y se le aplica vacío. Durante esta aplicación se le somete a vibraciones o golpes suaves para eliminar las burbujas de aire existentes en la zona de contacto entre la probeta y el revestimiento. Una vez terminado este proceso, se termina de llenar el cubilete hasta la parte superior del borde metálico con el revestimiento sobrante. Todos estos pasos se deben realizar en un tiempo máximo de 8,5 minutos.

A continuación, se debe dejar que el revestimiento se asiente durante 2 horas sin alterarlo, de tal forma que el molde adquiere la máxima resistencia. Cuando transcurren las 2 horas de fraguado, se retiran las rebabas y se colocan en el horno con la parte del cilindro de 10 mm de diámetro del cono truncado de la probeta FFF, que se encuentra expuesto después de haber sido recubierto, hacia abajo en el centro de la circunferencia del soporte, para facilitar una buena evacuación del PLA cuando comience a licuarse.

Puesto que la curva de calentamiento ha sido definida por varios autores [13], [28] no ha sido objeto de este trabajo su optimización. Sin embargo, para su selección se ha hecho varias pruebas previas con los parámetros de las probetas más críticas en cuanto a residuo plástico para comprobar cómo se realizaba la licuación de la probeta. Finalmente, se ha decidido usar la curva de calentamiento propuesta por el fabricante del material de revestimiento, ya que es una curva, que, si bien es cierto, está pensada para piezas patrón de cera, su principal función es obtener el mejor revestimiento posible.

Esta curva de calentamiento, en primer lugar, elimina la humedad del cilindro. Seguidamente, licua el PLA y a continuación se calcinará, endureciendo el revestimiento para que después de un descenso a la temperatura de fundición, pueda introducirse el metal fundido en el interior del mismo. Para poder medir el molde de revestimiento, la etapa de enfriamiento es hasta que el molde obtiene la temperatura ambiente para evitar que sufra estrés térmico que pueda generar fracturas. La curva de calentamiento utilizada se muestra en Figura 3.22.

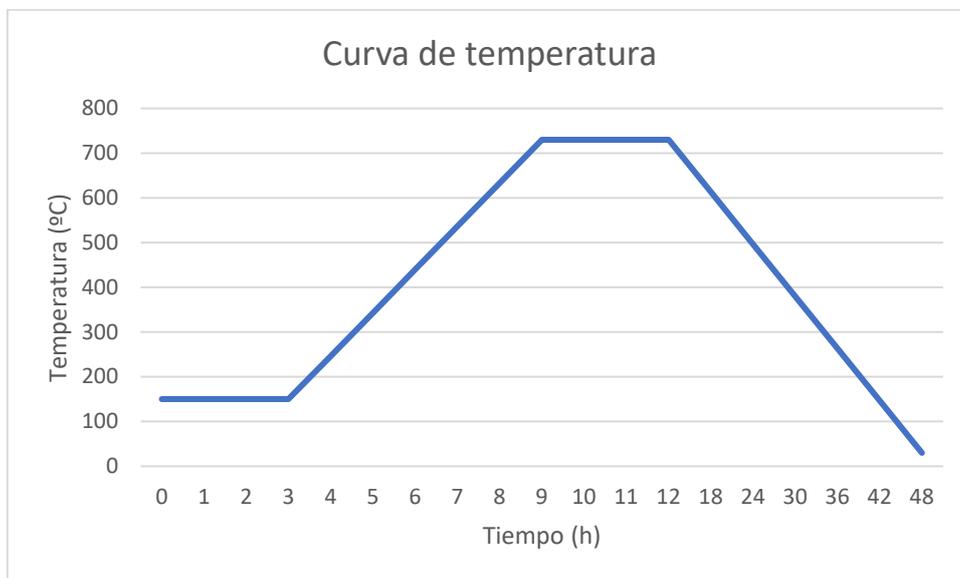


Figura 3.22. Curva de calentamiento y enfriamiento. Fuente: [28].

Una vez finalizada la curva de calentamiento y el enfriamiento de la pieza, se procede a cortar el molde para poder realizar las diversas mediciones necesarias del proyecto. Para cortar el molde se utiliza una sierra de cinta de marca Sabi.



Figura 3.23. Detalle de prueba de corte de un molde de revestimiento. Fuente: Elaboración propia.

Para obtener la probeta cúbica, el corte, cómo se puede observar en la Figura 3.23, teniendo como origen la base de 10 mm de diámetro del tronco de cono, debe realizarse a la distancia de la altura del cono considerando el espesor de la sierra, el cuál es de 1 mm.

Finalmente, se obtiene el hueco de la probeta, en el molde de revestimiento, listo para poder realizar las mediciones pertinentes explicadas en detalle en el apartado 3.5.

La metodología seguida se resume en la Figura 3.24.

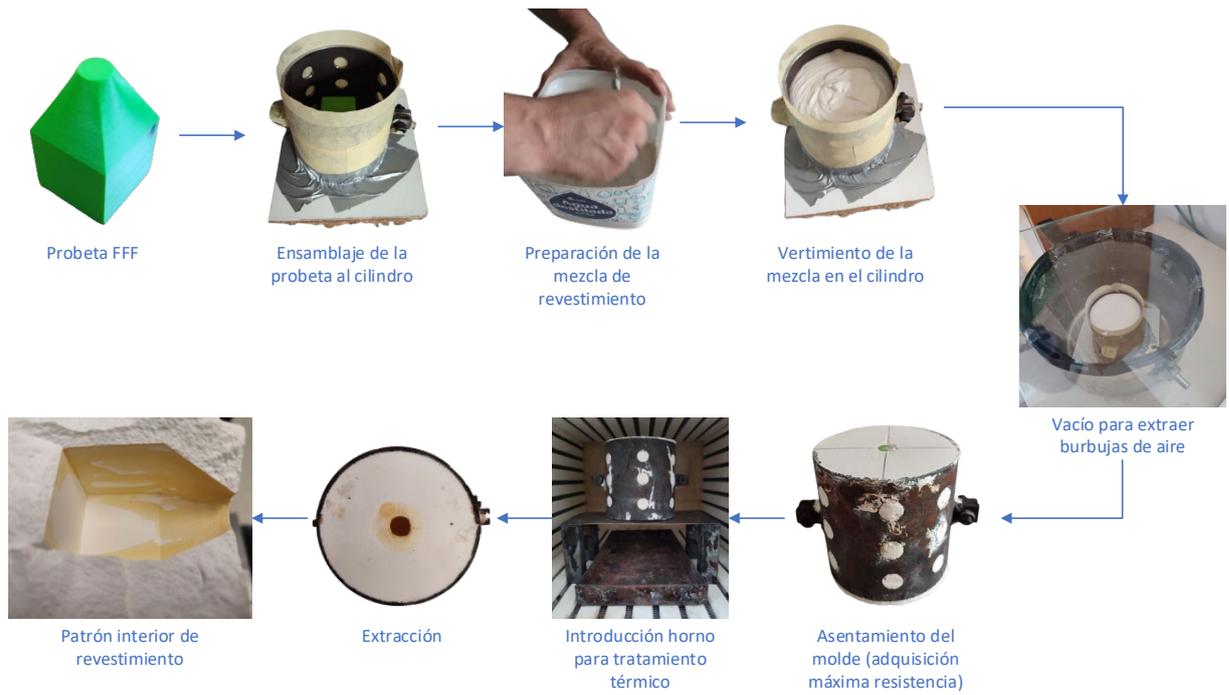


Figura 3.24. Metodología de fabricación del molde de revestimiento. Fuente: Elaboración Propia.

3.5 ANÁLISIS Y MEDICIONES

A lo largo del proyecto, se han realizado diversos análisis y mediciones en cada fase de fabricación de la probeta con el objeto de observar su influencia en las variables de interés, así como establecer un control en dichas fases.

Las fases y las mediciones que se han realizado en cada fase se pueden observar en la Figura 3.25.

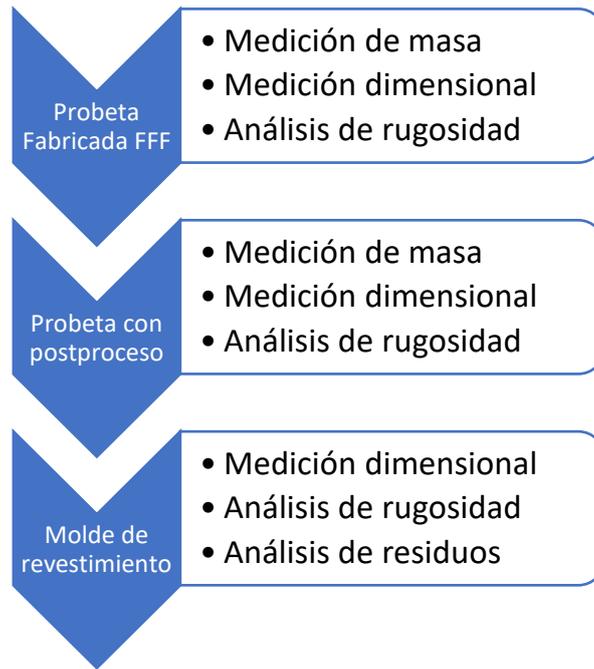


Figura 3.25. Fases de análisis y mediciones realizadas en cada fase. Fuente: Elaboración propia.

3.5.1 MEDICIÓN DE MASA

El equipo utilizado para la medición de masa es una balanza de precisión COBOS de la serie *CB Complet*. Esta medición se realiza en la fase de la probeta fabricada en FFF y tras la aplicación del postproceso.



Figura 3.26. Balanza de precisión COBOS. Equipo del grupo de investigación TAFI. Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de este análisis es la comprobación de la posible relación de los residuos que se pueden generar con la masa de cada probeta. También cuantificar la modificación de la masa de las probetas tras la aplicación del postproceso.

Para reducir el error de medición, cada probeta se ha medido cuatro veces.

3.5.2 MEDICIÓN DIMENSIONAL

Para el control de la calidad dimensional, se han medido la longitud entre las caras laterales contrarias del cubo. La longitud entre las caras de las bases no se tiene en cuenta puesto que para poder realizar las mediciones de los moldes de revestimiento se ha optado cortar el molde en la cara unida al tronco de cono, perdiendo así esa dimensión.

Para las mediciones en las fases de la probeta de FFF y tras la aplicación del postproceso, se ha utilizado un micrómetro de exterior marca Mitutoyo de escala entre 25 y 50 mm con un rango de precisión de 0,01 mm.



Figura 3.27. Micrómetro de exteriores. Equipo del grupo de investigación TAFi de la ULE. Fuente: Elaboración propia.

Cada longitud se ha medido cinco veces, en diferentes puntos de la cara de la pieza como muestra la Figura 3.28.

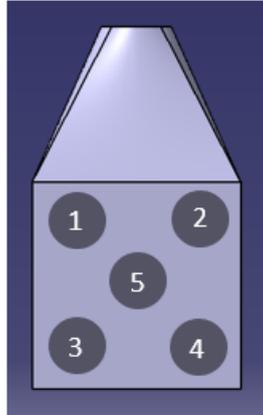


Figura 3.28. Medidas realizadas con micrómetros. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que las medidas se hacen entre las caras laterales, es necesario identificarlas. Se han identificado de forma que la cara 1 es la cara visible cuando se fabrican las probetas en FFF, y el resto de cara se han identificado siguiendo sentido antihorario como se observa en Figura 3.29. Esta identificación se mantiene en el molde de revestimiento para que se pueda comparar.

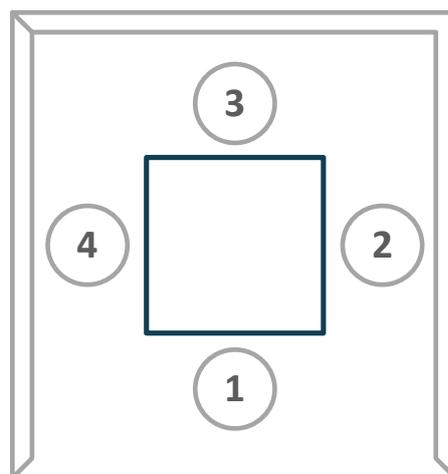


Figura 3.29. Identificación de las caras de las probetas. Fuente: Elaboración propia.

En el molde de revestimiento fue necesario utilizar un micrómetro de interiores Moore & Wright de escala 25-50 mm con un rango de precisión de 0,01 mm. También se han realizado cinco mediciones para minimizar el error de medida que se pudiese dar.



Figura 3.30. Micrómetro de interiores. Equipo del grupo de investigación TAFi de la ULE. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar, que puesto el material de revestimiento es bastante frágil, las mediciones en este se hicieron con sumo cuidado.

3.5.3 ANÁLISIS DE RUGOSIDAD

Para el análisis de rugosidad, se ha utilizado el rugosímetro *Surfest SJ-500* de Mitutoyo con una punta de radio 5 μm y ángulo de 90°.



Figura 3.31. Rugosímetro SurfTest SJ-500 Mitutoyo. Equipo del grupo de investigación TAFI de la ULE. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo la norma UNE EN ISO 4287, se ha utilizado el perfil de rugosidad (perfil-R), que es aquel que se obtiene del filtrado electrónico de paso alto del perfil principal (perfil-P) con una longitud de onda de corte λ_c , de tal forma que se eliminan los componentes más largos de longitud de onda.

Para cuantificar, definir y medir la rugosidad se emplean los siguientes parámetros:

- Longitud de evaluación (l_n): longitud de evaluación, que se divide en cinco longitudes de muestreo (l_r). En este caso, la longitud de evaluación es l_n 12,5 mm lo que supone una longitud de muestreo l_r de 2,5mm.
- Rugosidad media (R_a): media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones de perfil respecto a la línea media del perfil de rugosidad.
- Altura total del perfil de rugosidad (R_t): es la desviación máxima entre pico (Z_p) y valle (Z_v) en una longitud de evaluación l_n .

$$R_t = Z_p - Z_v \quad (3.3)$$

- Profundidad media de rugosidad (R_z): valor medio de los cinco valores R_{z_i} de las cinco longitudes de muestreo l_r y dentro de la longitud de evaluación l_n .

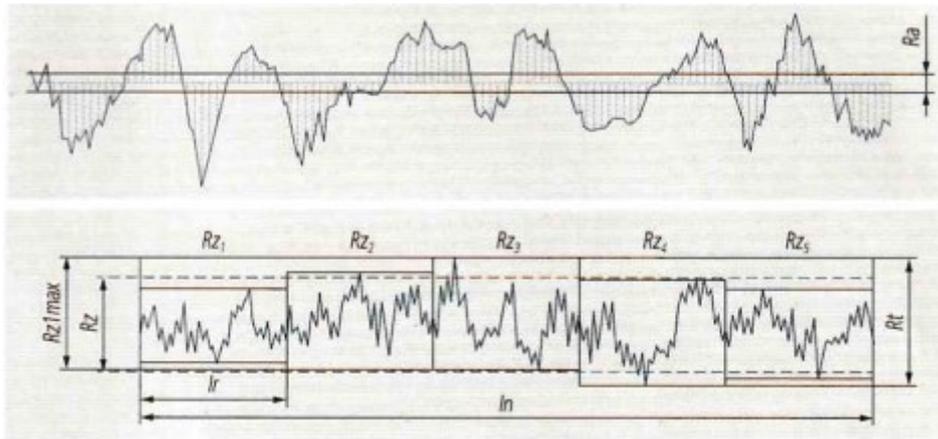


Figura 3.32. Parámetros perfil Rugosidad según norma UNE EN ISO 4287:1999. Fuente:[33]

Las medidas se han llevado a cabo en las caras de las probetas de forma perpendicular a la dirección de la fabricación de estas. En cada cara, se han realizado 3 mediciones con el fin de reducir al mínimo el error que se pueda generar. Cada probeta supone un total de 12 mediciones.

Esta medición se ha realizado en todas las fases del proyecto.

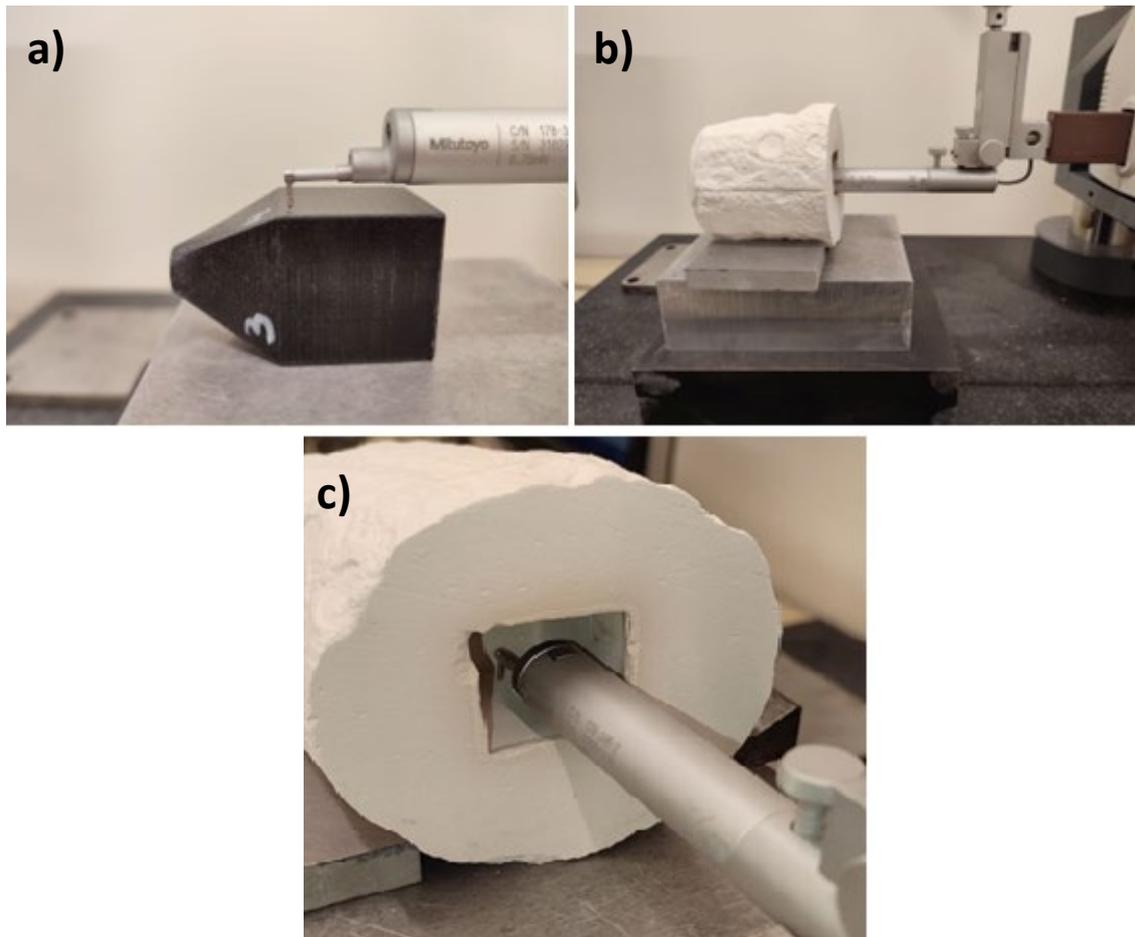


Figura 3.33. a) Medición de rugosidad de las probetas fabricadas en FFF, con y sin postproceso. b) Medición de rugosidad del molde de revestimiento. c) Detalle de medición de rugosidad del molde. Fuente: Elaboración Propia.

3.5.4 ANÁLISIS DE RESIDUOS

El análisis de residuos se ha realizado mediante inspección visual, de modo que, se realiza una fotografía a microscopio de la cara inferior de todas las probetas y a continuación se trata dicha imagen con un software de procesamiento de imagen.

El microscopio utilizado es un estereomicroscopio óptico Leica Z16 APO que es un sistema de zoom apocromático que permite un análisis con alto contraste, alta resolución y alta riqueza en nivel de detalle.

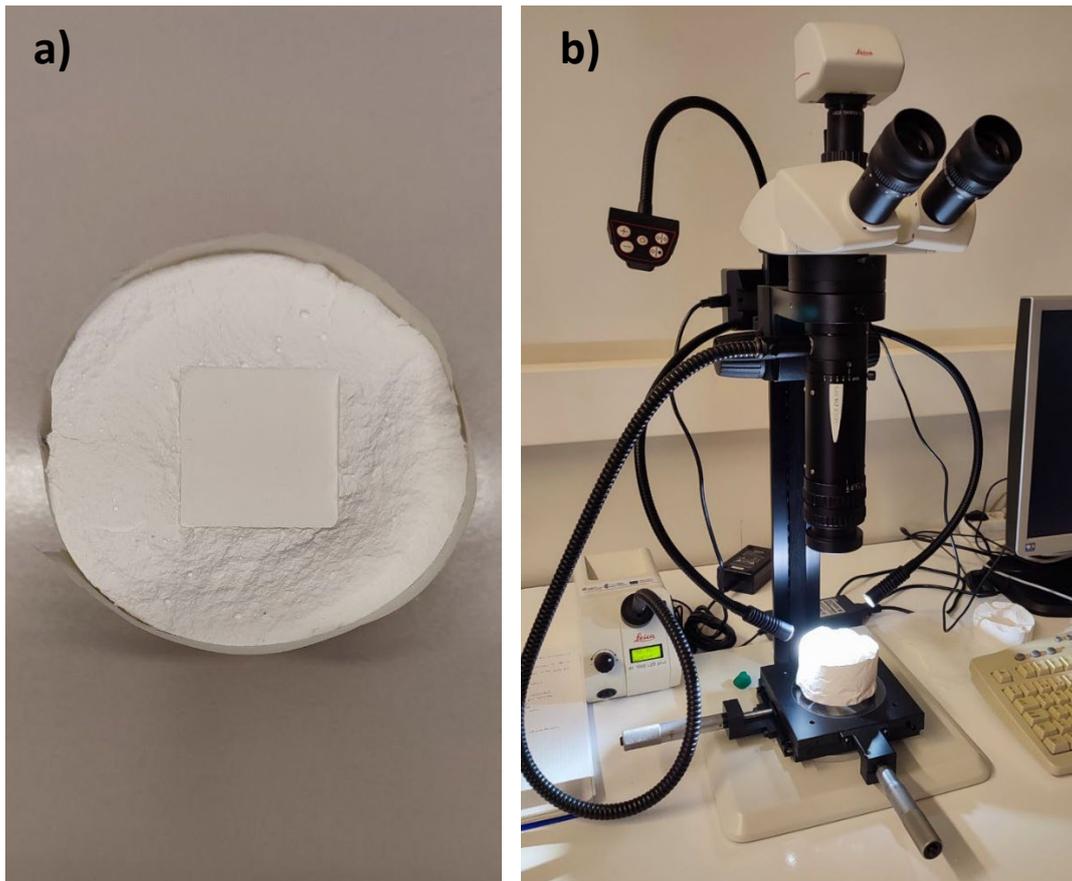


Figura 3.34. a) Cara del molde de revestimiento sobre la que se realiza el análisis de residuos. b) Microscopio Leica Z16 APO. Equipo del grupo de investigación TAFI de la ULE. Fuente: Elaboración propia.

La imagen obtenida a través del microscopio, como se menciona previamente, se analiza a través del software de procesamiento de imagen digital *ImageJ* (*Image Processing and Analysis in Java*). En este caso, con el programa realizamos la cuantificación del área “manchada” por los residuos restantes. Para ello, se establece un umbral (*Threshold*) en el valor máximo y se analiza el área contigua alrededor del máximo por encima del umbral. Para aceptar un máximo, esta área no debe contener ningún punto con un valor superior al máximo. Solo se acepta un máximo dentro de esta área [34].



Figura 3.35. Metodología de análisis de residuos utilizando el software de procesamiento ImageJ. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el propio programa proporciona el porcentaje de partículas que hay en la imagen en función del todo el área que analiza. Ese porcentaje es el porcentaje de residuos que quedan en la cara de la probeta.

Como se menciona en el apartado 3.5.1 “*Medición de masa*”, se va a realizar la comprobación para descubrir si hay relación entre la masa de las probetas y la cantidad de residuo.

3.6 FUNDICIÓN

Tras realizar las mediciones y los análisis oportunos, que se han explicado en detalle en la sección 3.5 “Análisis y mediciones”, se procede a realizar el proceso de fundición con las mejores configuraciones obtenidas.

El proceso de fundición es la continuación tras haber creado el modelo de revestimiento, donde, se vierte un metal fundido en la cavidad producida al licuarse el patrón desechable mientras el molde está todavía caliente. Se deja enfriar la pieza, y una vez enfriado, se destruye el molde y se extrae la pieza.

La fundición se realizará con latón, que es una aleación compuesta principalmente de cobre y cinc. En función del porcentaje de cinc, se pueden distinguir tres familias de latón, como se puede observar en la Figura 3.36: latón α , cuando hay contenido en cinc inferior al 40 %, latón β , con contenido en cinc entre el 47 y 55 %, y latón γ , con un porcentaje de cinc superior al 60 % [35].

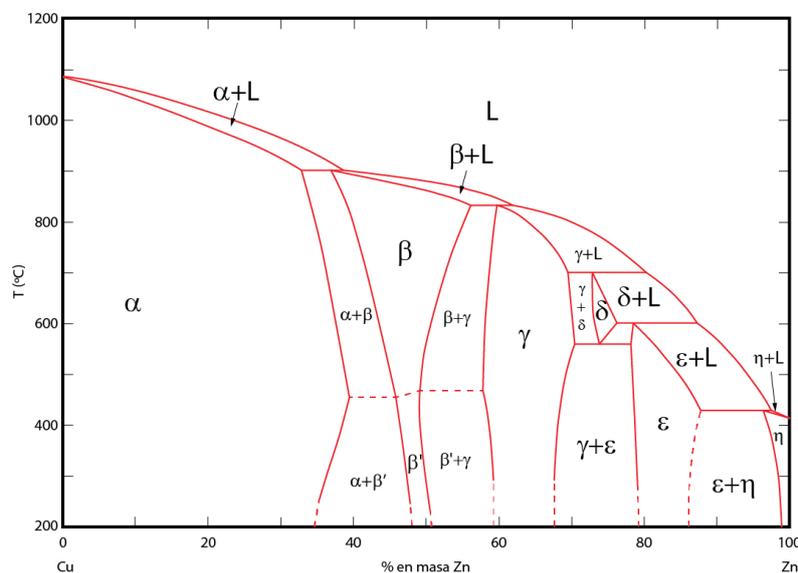


Figura 3.36. Diagrama de fases Cu-Zn. Fuente: [36].

El latón tiene un bajo punto de fusión en comparación con el hierro, el acero o la mayoría de los metales preciosos, lo cual lo hace ideal para fundición. En este proyecto, se ha usado un latón 67/33, por lo que consiste en un latón α , que contiene las propiedades

químicas indicadas en la Tabla 3.9. Las temperaturas necesarias para realizar la colada vienen indicadas en la Tabla 3.10.

Tabla 3.9. Propiedades químicas del latón 67/33. Fuente: [37].

DENOMINACIÓN	Aleaciones ASTM/UNS	Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Fe (%)	OTROS (%)
Latón 67/33	C26800	64 – 68,5	≥30	≤0,15	≤0,05	≤0,15

Tabla 3.10. Temperaturas de colada del latón. Fuente:[38].

	Temperatura de vertido de metal (°C)	Temperatura de fundición del matraz (°C)
Latón	950-1050	580-650

Para la fundición de dicho metal, se utiliza la Fundidora de Inducción *Agatronic R*, una máquina de microfusión al vacío que incorpora un horno de fundición por inducción de media frecuencia. Además, se va a aplicar el fundente *Flux metales* de *Ferdex*, para mejorar la calidad de la fundición.



Figura 3.37. Fundidora de Inducción *Agatronic R*. Equipo del grupo de investigación TAFI de la ULE. Fuente: Elaboración propia.

Como el proceso de fundición se va a realizar sin necesidad de realizar mediciones en el molde de revestimiento hay dos modificaciones importantes en la metodología con respecto a lo indicado en el apartado 3.4. “Fabricación del molde de revestimiento”:

- Puesto que en este paso no es necesario realizar el corte para obtener la medición como pasaba en el apartado anterior (3.4), se realiza con un cubilete “cerrado”. Para la eliminación del revestimiento tras realizar la fundición se utiliza agua, puesto que es un elemento muy soluble.
- Por otro lado, la curva de enfriamiento es distinta. En el apartado 3.4, era necesario, para evitar que el molde de revestimiento sufriera estrés térmico, que el enfriamiento llegara a temperaturas ambientales para poder sacarlo del horno. Sin embargo, en el proceso de fundición, tras mantener la temperatura a 730°C durante 3 horas, a continuación, se debe evitar someter a la matriz a una tensión excesiva, por ello, se debe reducir aproximadamente un tercio de la temperatura de fundición de la aleación [39] y mantener durante 2 horas antes de la fundición.

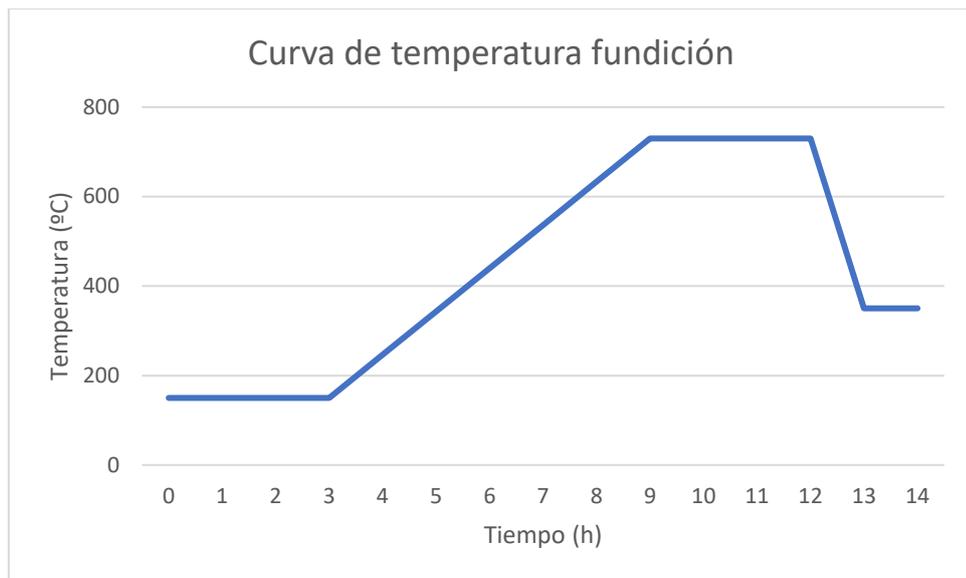


Figura 3.38. Curva de temperatura correspondiente a la fundición. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, una vez extraída la pieza suele ser necesarios postprocesos de rectificación o pulido para conseguir el resultado deseado.

4 Resultados

En esta sección se exponen los resultados obtenidos tras la realización de las mediciones y los análisis de estos.

4.1 CALIDAD DIMENSIONAL

Los resultados obtenidos en la primera fase de medición dimensional indican que las probetas con menor densidad de relleno y espesor de pared, independientemente del número de capas iniciales y finales, así como la altura de capa o posición en la cama de impresión (Figura 3.11) son las que obtienen mayor error con respecto al modelo diseñado en el CAD, como se puede observar en los gráficos de la Figura 4.1:

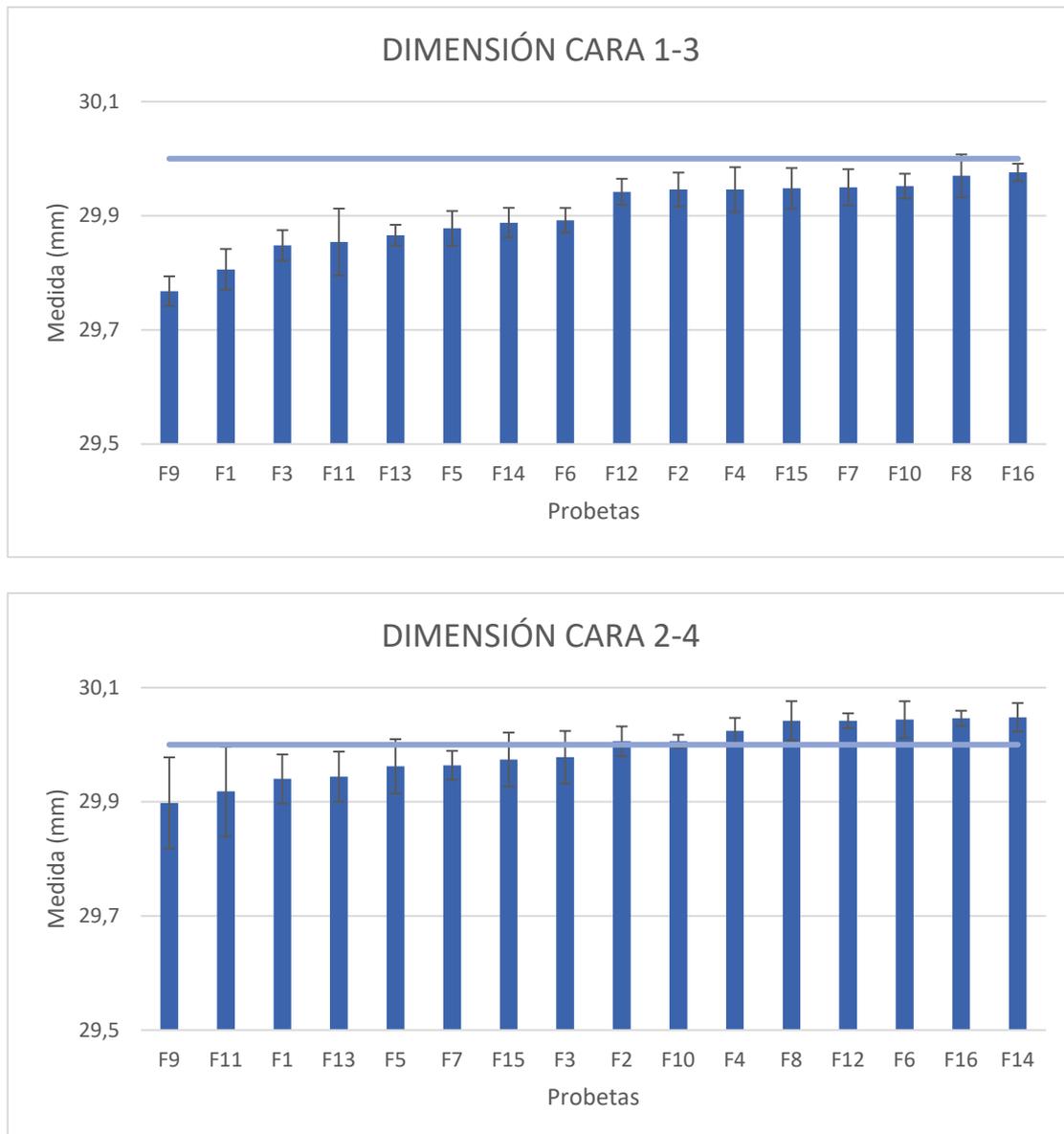


Figura 4.1. Resultados dimensionales de las probetas fabricadas mediante FFF en valores medios ordenados de menor a mayor. Fuente: Elaboración propia.

También de la Figura 4.1, se puede deducir que las dimensiones de las caras 2-4 son superiores que la cara 1-3. Esto es posible que se hay visto influenciado por la dirección de fabricación (ver Figura 3.29).

Tras la aplicación del tratamiento de alisado con lija y diclorometano, se cuantificó que las probetas reducen entre el 0,05% y el 0,4%, lo que supone como máximo una reducción del orden de 0,1 mm, como se observa en la Figura 4.2.

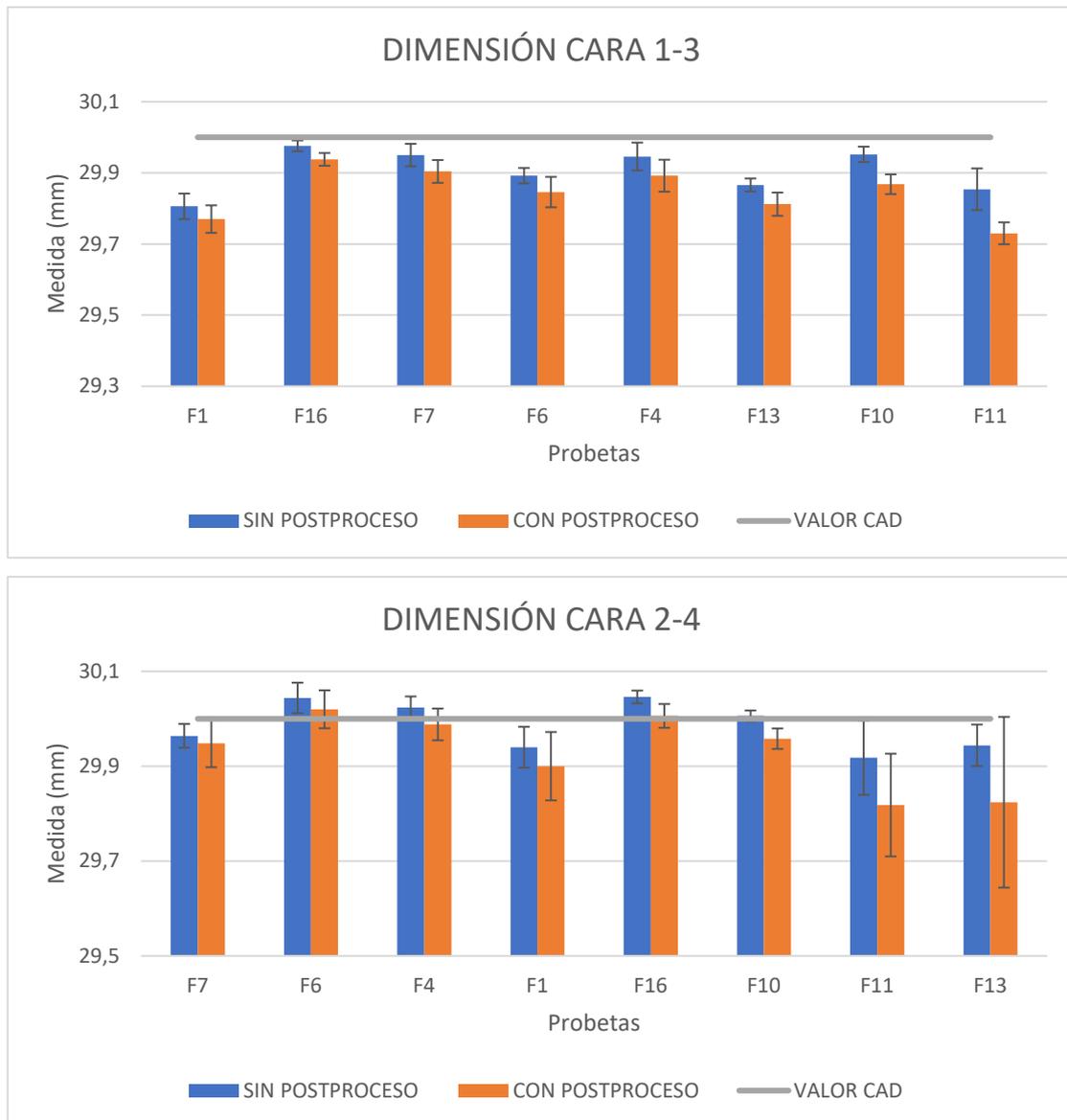


Figura 4.2. Comparación de los resultados dimensionales en valor medio antes y después de la aplicación del proceso del diclorometano, ordenados de menor a mayor incremento de dimensiones. Fuente: Elaboración propia.

En la fase de medición de los moldes de revestimiento, se observó que los valores aumentan con respecto al CAD entre el rango de 0,05-1,13 % en la cara 1-3 y entre el rango 0,21-0,38 % de la cara 2-4, implicando de esta forma que, debido al tratamiento del calor, los huecos de las probetas se dilatan.

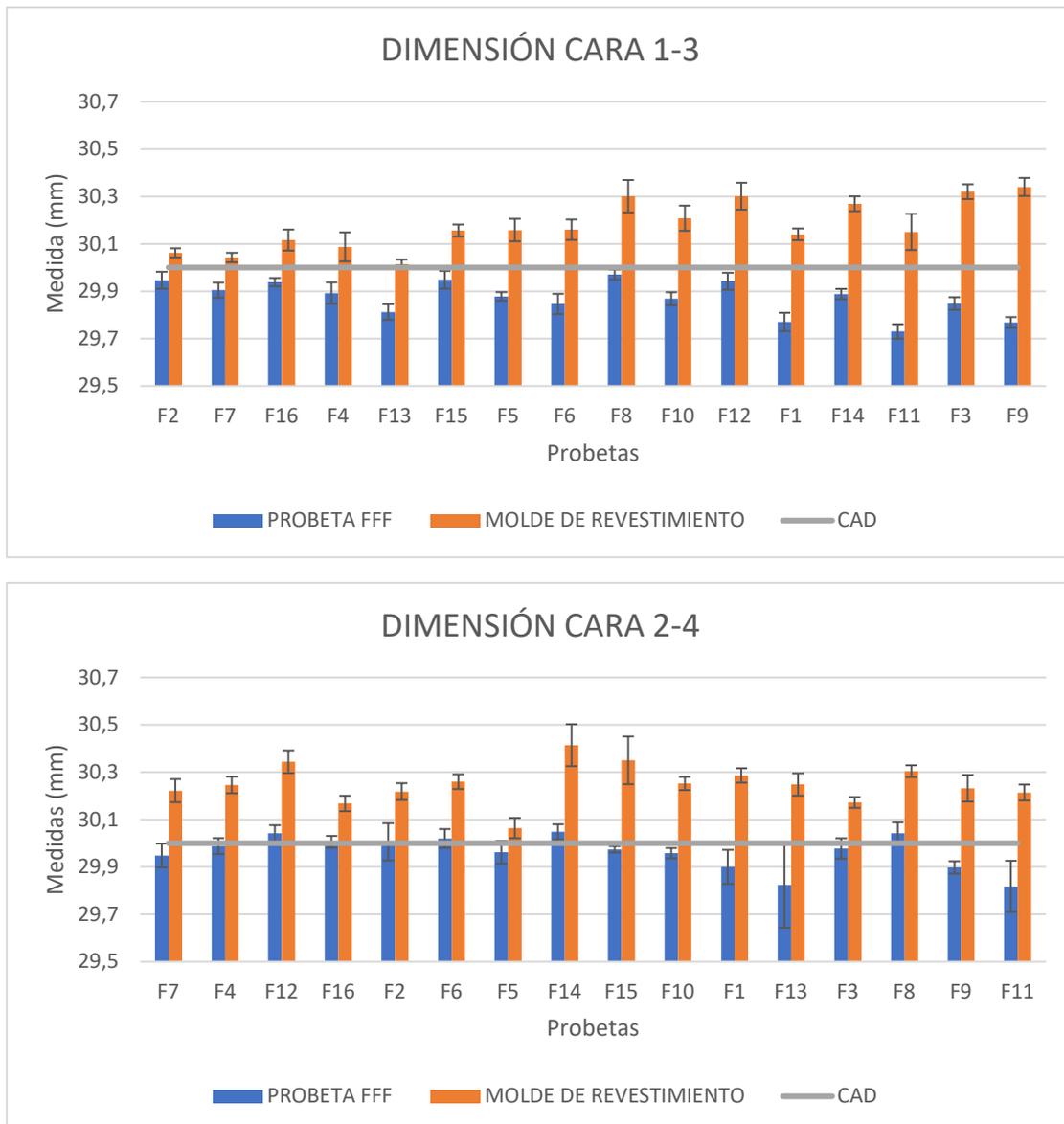


Figura 4.3. Resultados dimensionales en valor medio de los moldes de revestimiento, en comparación con la probeta FFF y el diseño CAD, ordenados de menor a mayor error respecto al molde de revestimiento con la probeta FFF. Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que las dimensiones entre las caras 2-4 comprenden mayor error dimensional con respecto al CAD, se observó que esto es debido a la propagación del error de fabricación ya notificado en las dimensiones de las probetas de FFF y no debido a una dilatación heterogénea en el molde de revestimiento. De hecho, al comprobar los errores que se producían entre las probetas FFF con el molde de revestimiento en sus respectivas caras, se observó que el error era aproximadamente el mismo tanto en las dimensiones de las caras 1-3 (entre 0,39 - 1,92 %) como el de las caras 2-4 (entre 0,39 –

1,57 %), probándose así que la dilatación sufrida en el molde de revestimiento es uniforme con cierta tolerancia en todas las direcciones.

Una vez obtenidos todos los datos se procede a realizar el estudio de la influencia de los parámetros para su posterior optimización a través del análisis del diseño factorial que ofrece *Minitab Statistical Software*.

La respuesta o variable de interés que se va a analizar es el menor error entre las probetas de FFF y el molde de revestimiento, ya que obteniendo las probetas donde este error sea mínimo, solo habría que tener en cuenta, a la hora de diseñar, el error de la fabricación FFF con respecto del CAD.

Comenzando por la calidad dimensional respecto las caras 1-3, para este análisis se utilizó un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, lo que implica que un resultado estadístico significativo tiene menos de un 5 % de probabilidad de que ocurra producto de la casualidad. Debido al que modelo inicial se saturó, para ganar mayor grado de libertad se eliminaron los siguientes términos:

- POSTPROCESO*ALTURA DE CAPA;
- POSTPROCESO*ESPESOR DE PARED;
- ALTURA DE CAPA*DENSIDAD DE RELLENO;
- NÚMERO DE CAPAS INICIAL/FINAL*DENSIDAD DE RELLENO.

Tras la reducción del modelo se obtuvo la ecuación 4.1 de regresión para la definición del modelo:

$$\begin{aligned} \text{Calidad dimensional cara 1-3} = & \\ & 0,879 - 0,879 \text{ ESPESOR DE PARED} - 0,03372 \text{ DENSIDAD DE RELLENO} \\ & + 0,0500 \text{ ESPESOR DE PARED} * \text{DENSIDAD DE RELLENO} \end{aligned} \quad (4.1)$$

El modelo tiene un $R^2 = 59,96$ %. Este parámetro indica el porcentaje, entre 0 y 100 % de variación de la variable respuesta que explica su relación con variables predictoras. Cuanto mayor sea el valor R^2 , mejor se ajusta el modelo.

A partir del modelo, se procede a obtener los resultados de las influencias de los parámetros. En primer lugar, a partir del diagrama de Pareto que se contempla en la

Figura 4.4, se determinan los términos que más contribuyen en la variabilidad de la respuesta. El efecto que más contribuye es la interacción de dos factores ESPESOR DE PARED*DENSIDAD DE RELLENO (CE).

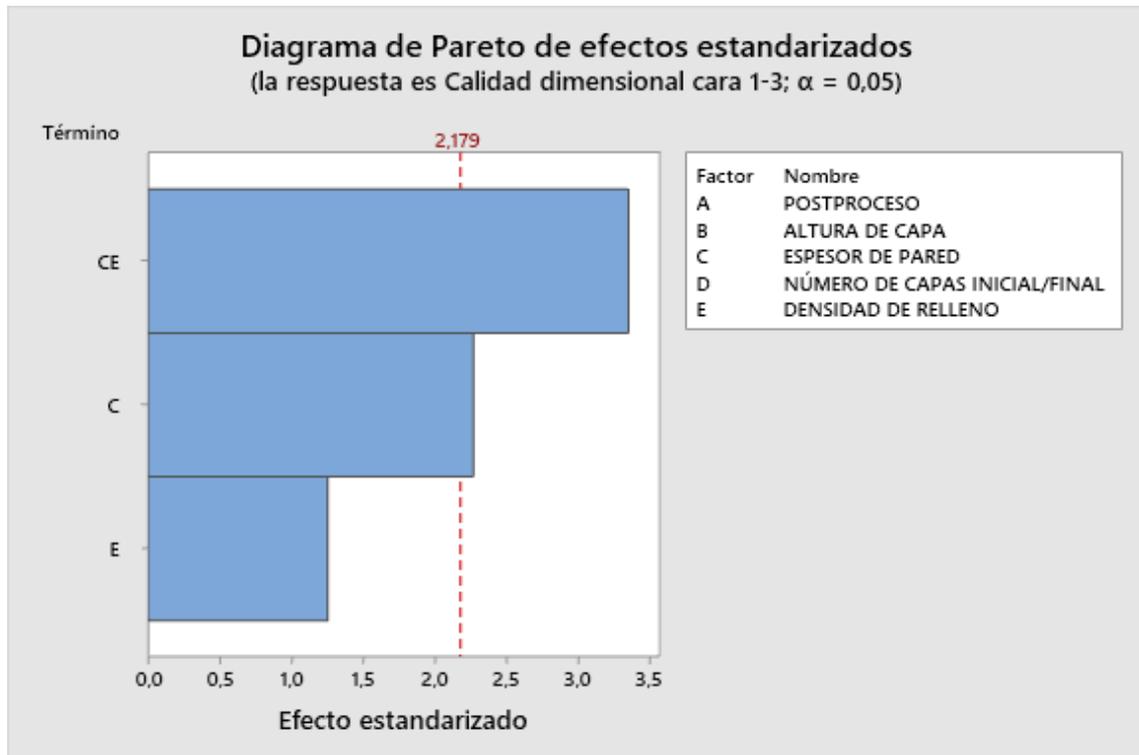


Figura 4.4. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Calidad dimensional cara 1-3, utilizando $\alpha = 0,05$. Fuente: Elaboración propia.

También a partir del diagrama de Pareto, se puede determinar cuáles términos tienen efectos estadísticamente significativos en la respuesta. En este caso, los efectos que al modificarse estarán asociados con un cambio en la respuesta son ESPESOR DE PARED*DENSIDAD DE RELLENO (CE) y ESPESOR DE PARED, ya que sobrepasan la línea de referencia, lo cual implican que su valor p es inferior al nivel de significancia de 0,05. Por otro lado, la variable de DENSIDAD DE RELLENO no es estadísticamente significativo.

De forma más específica, se puede observar la variación de la respuesta en la gráfica de efectos para cada parámetro en función de los niveles.

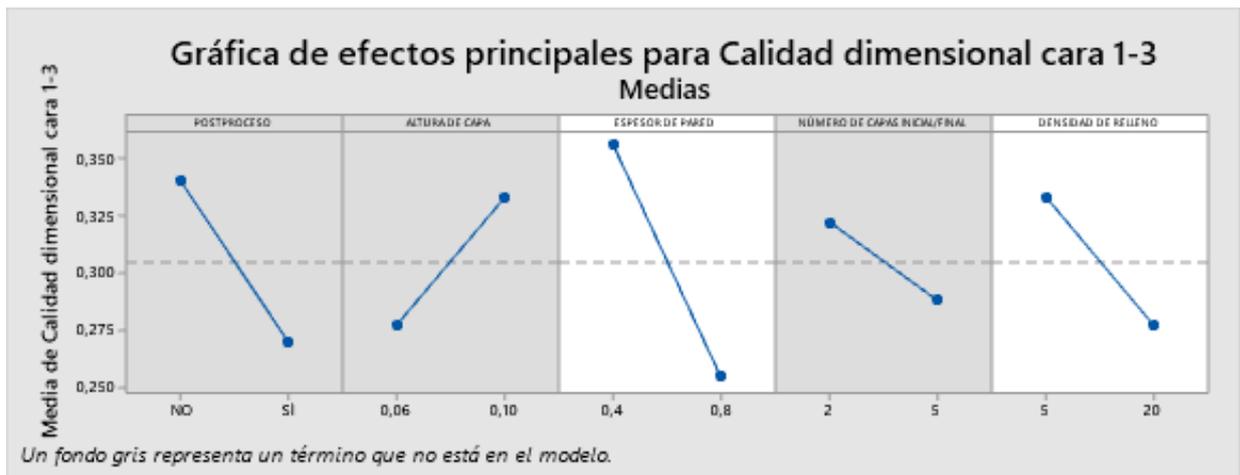


Figura 4.5. Gráfica de efectos sobre la calidad dimensional cara 1-3. Fuente: Elaboración propia.

En función de las pendientes de las rectas que define cada parámetro se observa como varia el error entre la probeta fabricada en FFF y el molde de revestimiento en función de los diversos niveles, y se obtiene que a menor espesor de pared mayor es el error y que a menor densidad de relleno mayor es el error. El resto de los parámetros no se han tenido en cuenta en este modelo ya que no afectan mucho para el nivel de significancia establecido.

También es muy interesante la gráfica de interacciones, donde se muestra cómo afecta la variación cuando surgen interacciones con los parámetros. En este caso, debido a la saturación del modelo, la única interacción contemplada es la del ESPESOR DE PARED* DENSIDAD DE RELLENO, como indicaba previamente la gráfica de Pareto. En la Figura 4.6, se puede ver que si la densidad está en el valor bajo mientras el espesor de pared es nivel bajo, es cuando mayor error dimensional hay. Por el contrario, si la densidad está en valor bajo, pero el espesor está en valor alto, se produce el menor error dimensional.

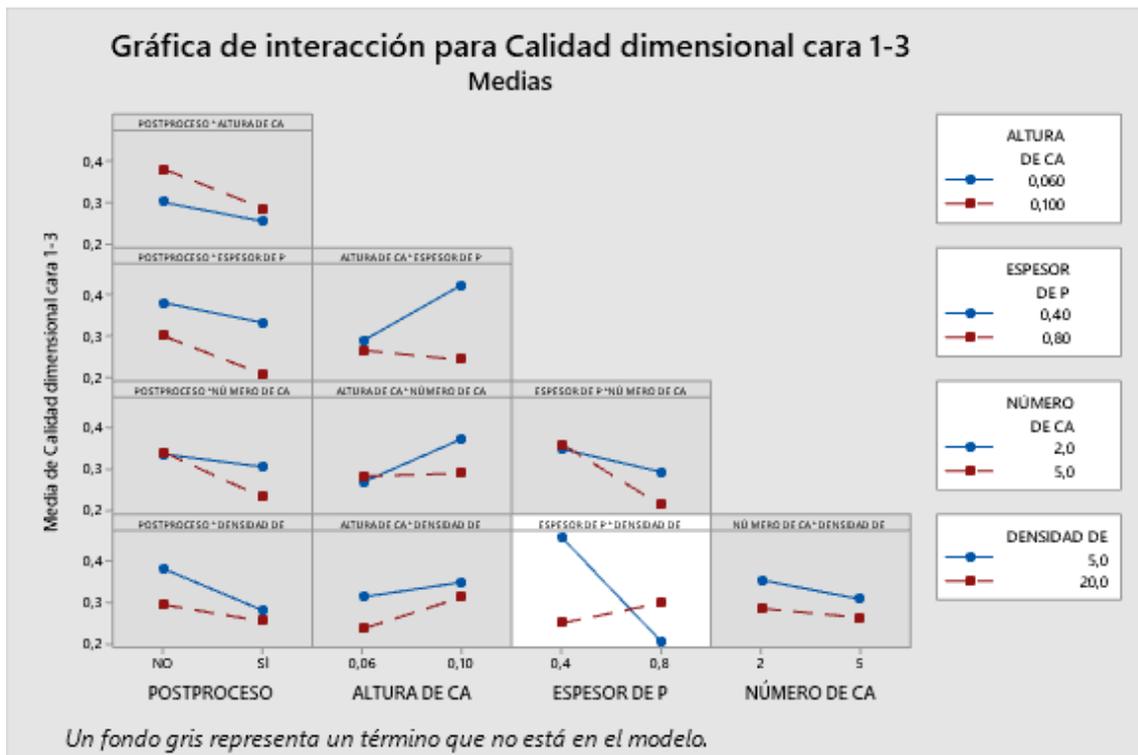


Figura 4.6. Gráfica de interacción para calidad dimensional cara 1-3. Fuente: Elaboración propia.

De forma análoga, para las dimensiones entre las caras 2-4 se obtuvo el siguiente modelo a partir de nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Al igual que el modelo anterior, se eliminaron algunos términos con el fin de obtener los suficientes grados de libertad:

- POSTPROCESO*DENSIDAD DE RELLENO;
- ALTURA DE CAPA*NÚMERO DE CAPAS INICIAL/FINAL;
- ESPESOR DE PARED*NÚMERO DE CAPAS INICIAL/FINAL;
- NÚMERO DE CAPAS INICIAL/FINAL*DENSIDAD DE RELLENO.

Consiguiendo en este modelo un R^2 de 88,04 % y la ecuación de regresión (4.2).

$$\begin{aligned}
 \text{Calidad dimensional cara 2-4} = & \\
 & 0,360 - 0,1449 \text{ POSTPROCESO} + 4,02 \text{ ALTURA DE CAPA} \\
 & - 0,558 \text{ ESPESOR DE PARED} - 0,00677 \text{ DENSIDAD DE RELLENO}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

- + 1,631 POSTPROCESO*ALTURA DE CAPA
- 0,2225 ALTURA DE CAPA*DENSIDAD DE RELLENO
- + 0,03275 ESPESOR DE PARED*DENSIDAD DE RELLENO

A partir del modelo, se obtiene el diagrama de Pareto, Figura 4.7, donde se observa que el efecto que más contribuye es la interacción de los factores ESPESOR DE PARED*DENSIDAD DE RELLENO (CE), al igual que en la respuesta sobre las caras 1-3.

Por otra parte, a diferencia que el modelo de la calidad dimensional entre las caras 2-4, se observa que más factores tienen efectos estadísticamente significativos, además del ESPESOR DE PARED*DENSIDAD DE RELLENO (CE), se encuentran la DENSIDAD DE RELLENO (E), la ALTURA DE CAPA*DENSIDAD DE RELLENO (BE), el POSTPROCESO*ALTURA DE CAPA (AB) y el ESPESOR DE PARED (C). Mientras que la ALTURA DE CAPA (B) y el POSPROCESO (A) por si solos no generan un cambio estadísticamente significativo.

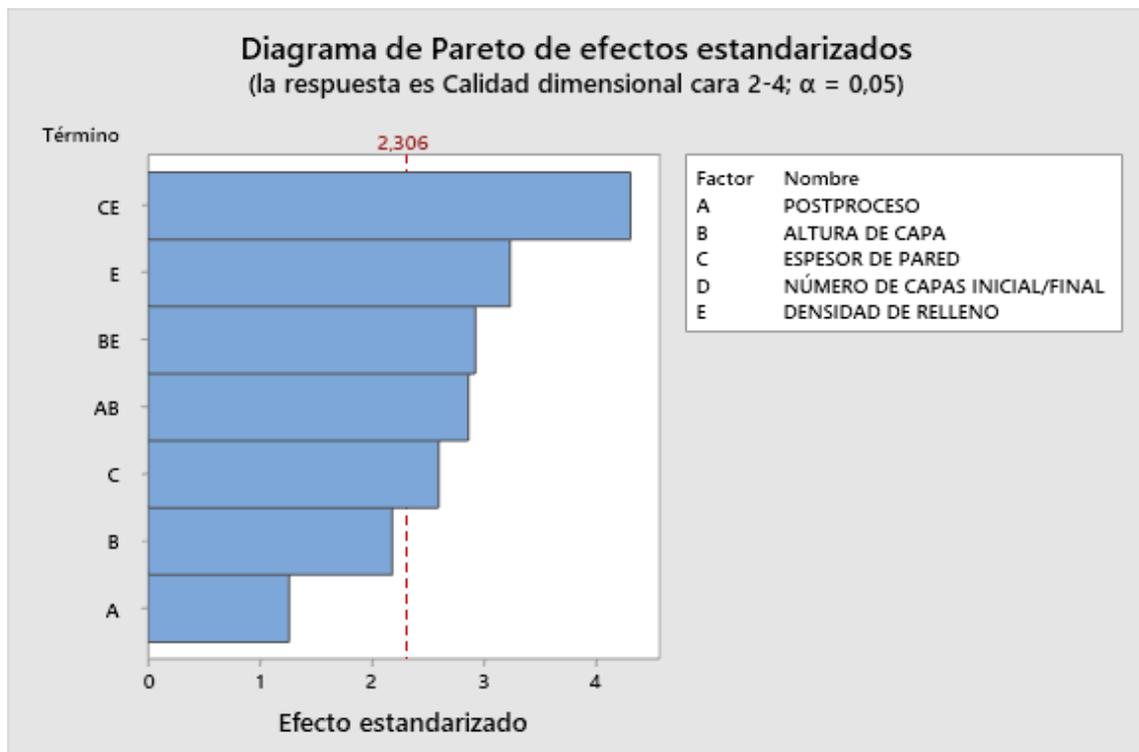


Figura 4.7. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Calidad dimensional cara 2-4, utilizando $\alpha= 0,05$. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 4.8, se observa la variación de la respuesta en la gráfica de efectos para cada parámetro en función de los niveles, en este caso el único parámetro que no se encuentra en el modelo es el de NÚMERO DE CAPAS INICIAL/FINAL. El resto de los parámetros se puede ver que tienen pendientes bastante pronunciadas.

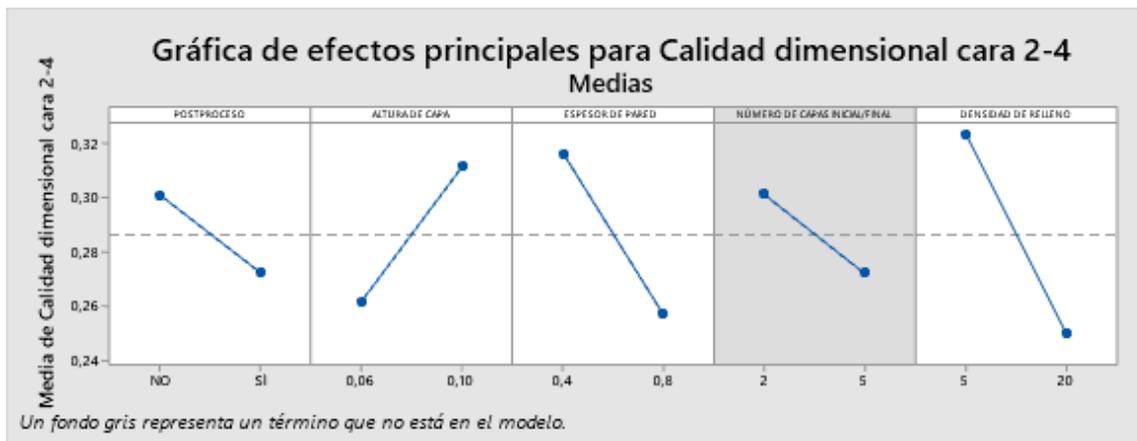


Figura 4.8. Gráfica de efectos sobre la calidad dimensional cara 2-4. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la gráfica de interacciones, Figura 4.9, en este caso se pueden apreciar más que en el modelo para la calidad dimensional entre las caras 1-3.

En primer lugar, se observa como interactúan la ALTURA DE CAPA con el POSTPROCESO, minimizando el error cuando la altura de capa es de 0,06 y se aplica posproceso.

Otra interacción que se produce de forma significativa es la de ALTURA DE CAPA con la DENSIDAD DE RELLENO, donde se puede apreciar que para alturas de capa de 0,06 el error es independiente de la densidad de relleno, sin embargo, para altura de capa de 0,10 cuando se le aplica una densidad de relleno de 5 % implica un error dimensional bastante alto, mientras que, al aplicarle el nivel alto de densidad de relleno, supone el menor error entre esta interacción.

Por último, la interacción entre el ESPESOR DE PARED y la DENSIDAD DE RELLENO, el cual era el mayor efecto estadísticamente significativo, se observa que cuando el espesor de pared es de 0,8 el error no varía mucho, mientras que, para el nivel bajo de 0,4, a una densidad de relleno del 5% supone el error más alto.

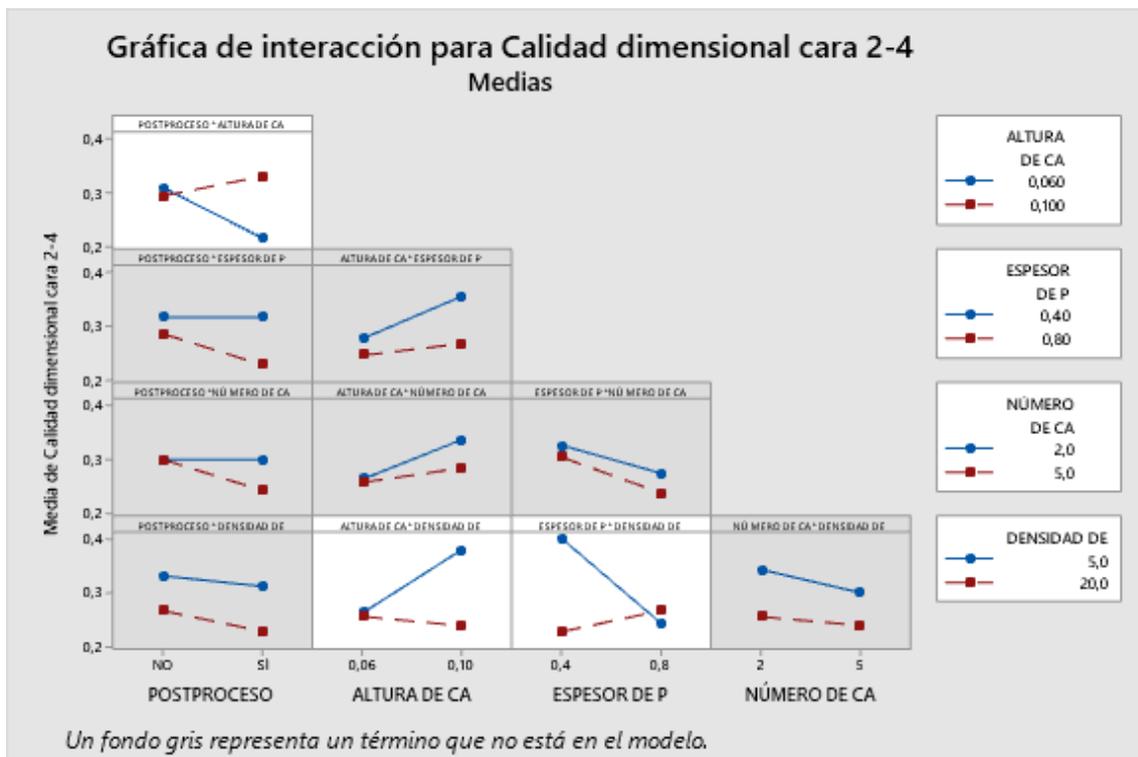


Figura 4.9. Gráfica de interacción para calidad dimensional cara 2-4. Fuente: Elaboración propia.

4.2 CALIDAD SUPERFICIAL

La calidad superficial de las probetas fabricadas en FFF queda bien diferenciada, según lo previsto, en función de dos parámetros: la altura de capa y la aplicación de post proceso.

Las probetas con una altura de capa de 0,1 mm presentan más rugosidad frente a las de 0,06 mm. Por otro lado, hay una gran diferencia entre las probetas a las que se le ha aplicado el postproceso y aquellas a las que no. Las variaciones entre las probetas a las que se le ha aplicado el postproceso se pueden entender como errores humanos que hayan podido suceder al realizar el postproceso (el lijado y el *vapor smoothing* de DCM se realizó de forma manual por lo que implica que se deben asumir errores de no uniformidad en todas las probetas).

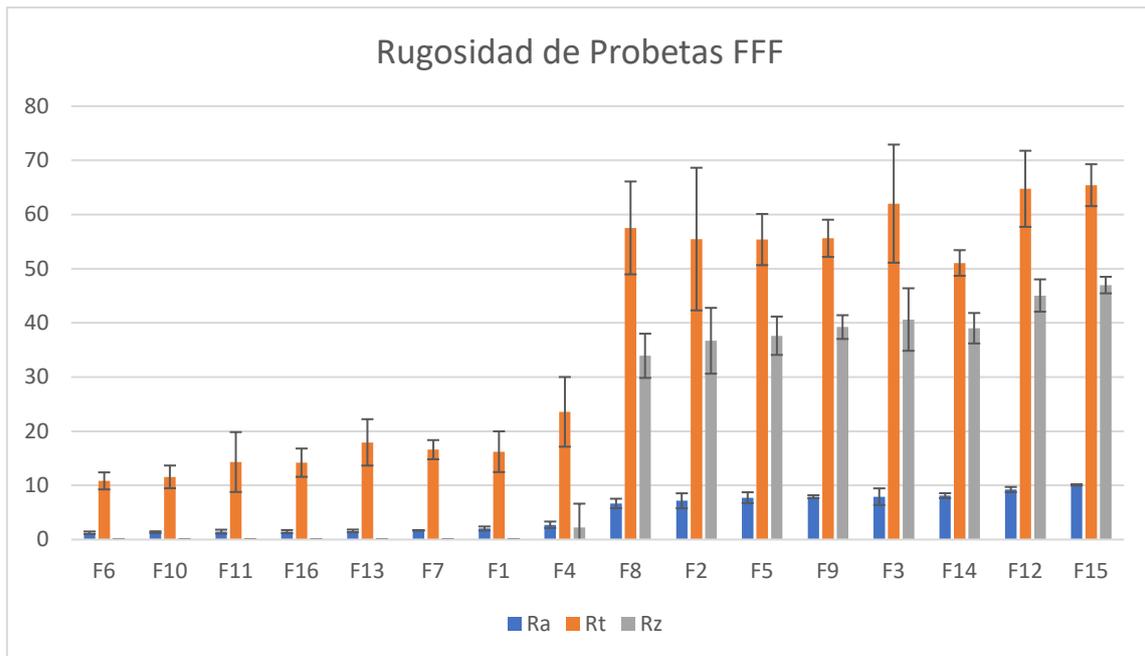


Figura 4.10. Parámetros Ra, Rt y Rz de las probetas FFF, ordenadas de menor a mayor Ra. Fuente: Elaboración propia.

En los resultados en el molde de revestimiento se puede observar, en los valores de Ra, Rt y Rz, que para las probetas a las que no se les ha aplicado el postproceso, dichos valores, se reducen. Mientras que sucede lo contrario en las probetas donde se han aplicado el diclorometano, todos los valores de Ra, Rt y Rz, aumentan en comparación con la probeta de FFF.

Sin embargo, a pesar de lo dicho, los moldes que obtienen los mejores resultados en rugosidad son aquellos a los que se les ha aplicado el postproceso de alisado.

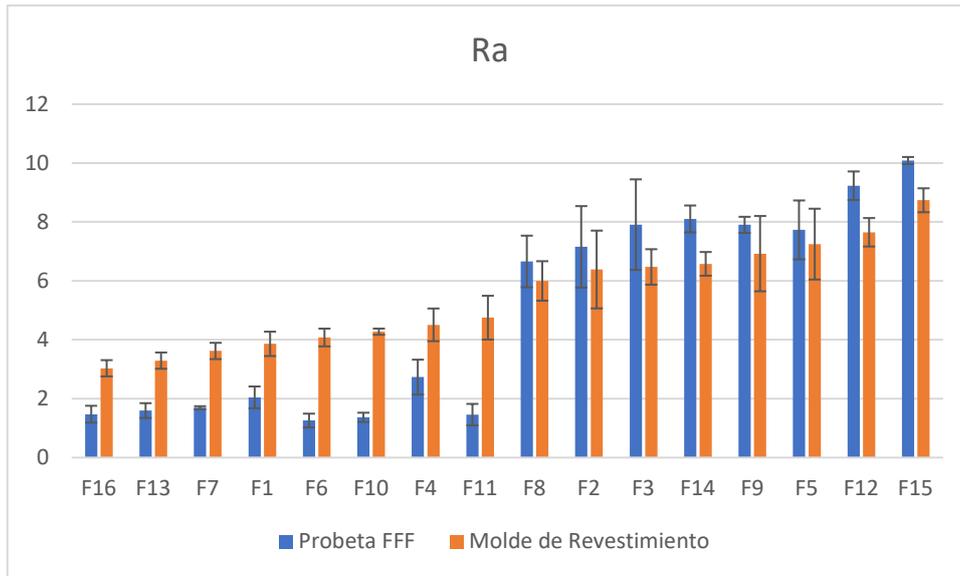


Figura 4.11. Comparación entre los valores de Ra para las probetas de FFF y los moldes de revestimiento, ordenados de menor a mayor Ra del molde de revestimiento.
Fuente: Elaboración propia.

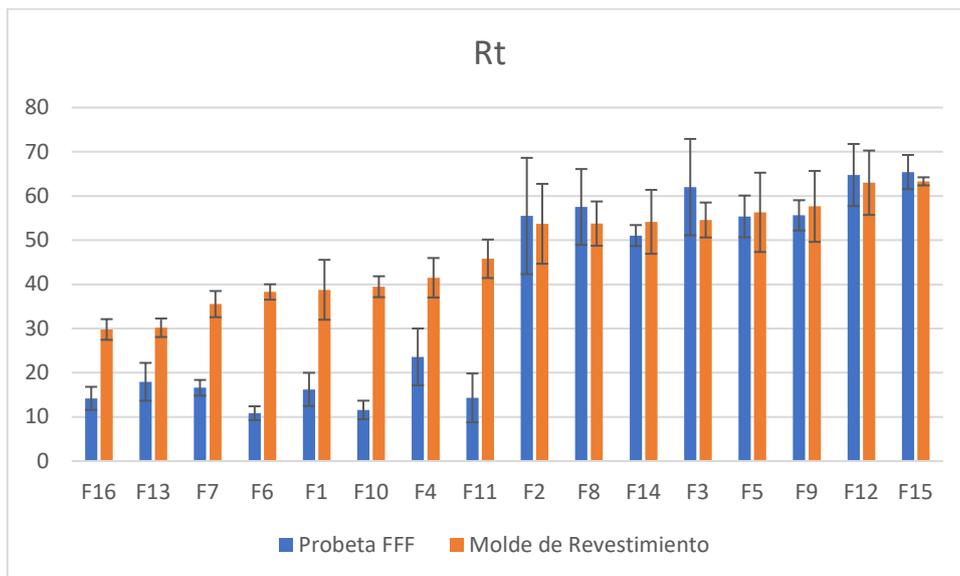


Figura 4.12. Comparación entre los valores de Rt para las probetas de FFF y los moldes de revestimiento, ordenados de menor a mayor Rt del molde de revestimiento.
Fuente: Elaboración propia.

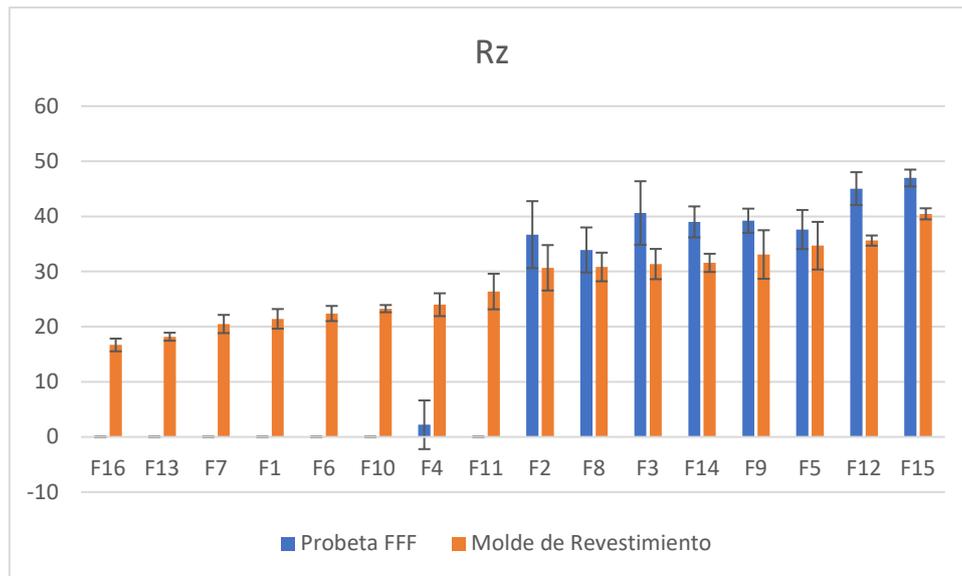


Figura 4.13. Comparación entre los valores de Rz para las probetas de FFF y los moldes de revestimiento, ordenados de menor a mayor Rz del molde de revestimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Como se pueden ver en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13, el molde que obtiene los mejores resultados en cuanto a rugosidad corresponde a la configuración de la probeta F16. Sin embargo, es interesante analizar qué factores afectarán. Para ello, se realiza el análisis utilizando como respuesta el Rz, ya que es un valor medio de cinco valores pico-valle en cada longitud de muestreo, como se ha indicado en el apartado 3.5.3 “Análisis de rugosidad”, lo cual lo hace el factor más aceptable ya que el Ra al ser una media, es necesario el dato de desviación, mientras que el Rt, al ser la desviación pico valle más alta, puede adulterar los datos en el caso de que haya analizado una grieta que pudiera haber surgido por la aplicación del tratamiento térmico.

Se realiza el análisis del diseño factorial con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. En este caso, sin necesidad de reducir el modelo, obteniendo un modelo de $R^2=100\%$, se observa que el parámetro más significativo estadísticamente es el POSTPROCESO (A).

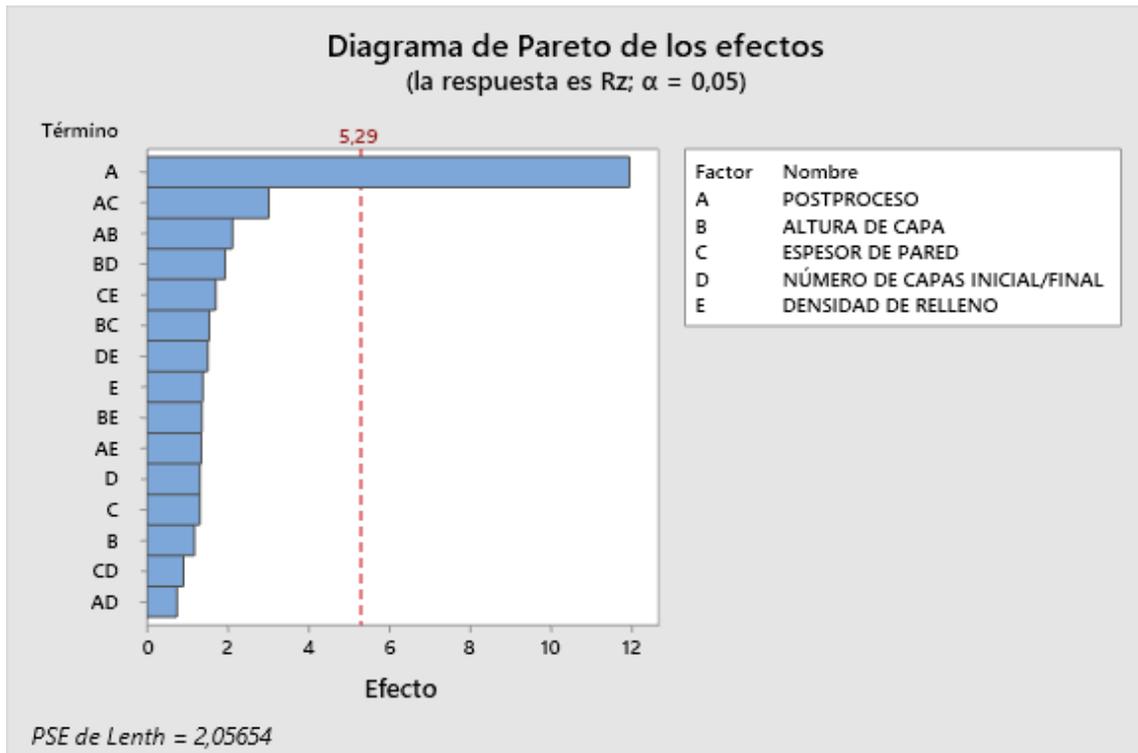


Figura 4.14. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Rz, utilizando $\alpha = 0,05$.
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la gráfica de efectos sobre Rz, los parámetros de ALTURA DE CAPA, ESPESOR DE PARED, NÚMERO DE CAPAS INICIAL/FINAL y DENSIDAD DE RELLENO tienen una pendiente casi horizontal, indicando que no hay mucha diferencia en la respuesta, que en este caso es Rz, aunque variemos sus niveles. A diferencia del parámetro de POSTPROCESADO, que claramente indica que su uso disminuye enormemente el Rz en la salida.

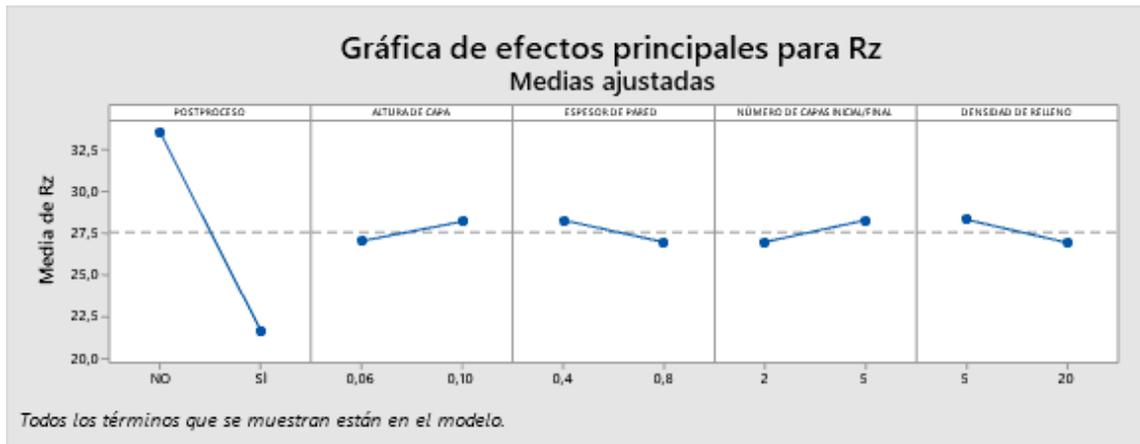


Figura 4.15. Gráfica de efectos sobre Rz. Fuente: Elaboración propia.

Si analizamos la gráfica de interacción para Rz, se contempla que cualquier término cuando interactúa con el POSTPROCESO, la salida tiende a reducir el Rz cuando se aplica DCM, mientras que el Rz aumenta si no se le aplica este.

Por otro lado, el resto de las interacciones, tienen pendientes bastante horizontales, lo que no supone gran cambio en Rz si modificamos sus niveles.

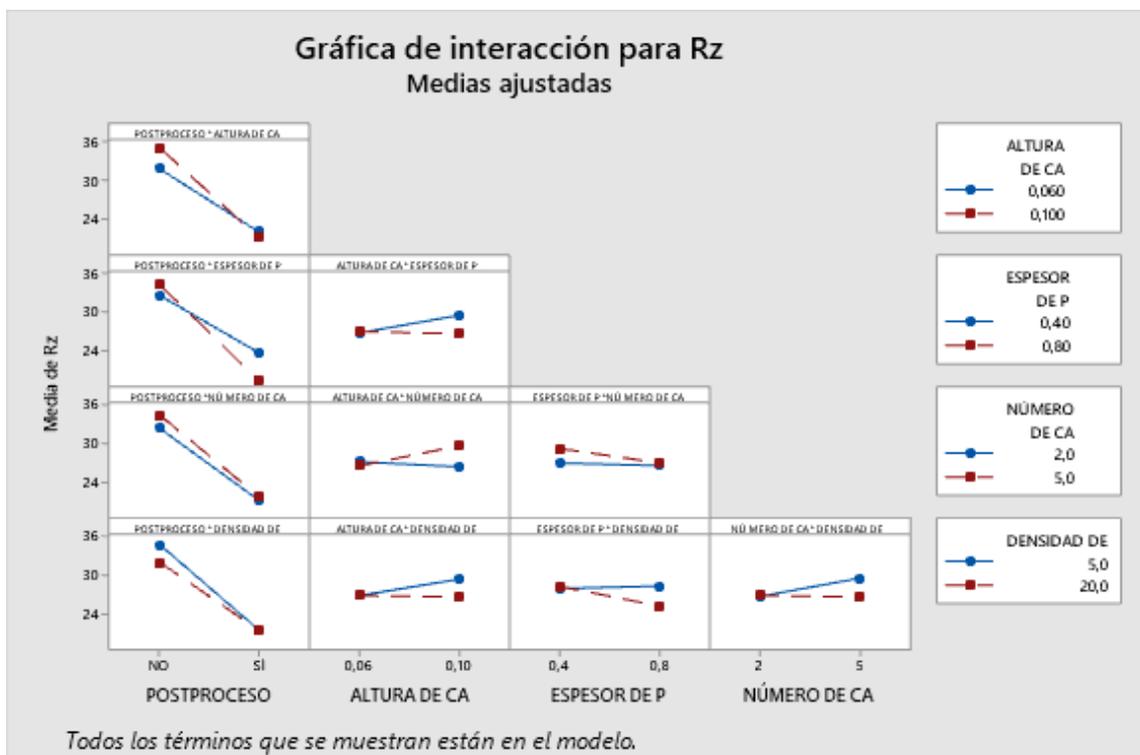


Figura 4.16. Gráfica de interacción para Rz. Fuente: Elaboración propia.

4.3 MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS

Uno de los objetivos de la minimización de residuos era comprobar si en función del material utilizado en cada probeta se obtenían mayor cantidad de residuo plástico licuado en el horno. Por ello, inicialmente se obtuvo la masa de todas las probetas, donde se observó que el parámetro que determina la masa de las probetas es la densidad de relleno como se puede ver en la gráfica de la Figura 4.17.

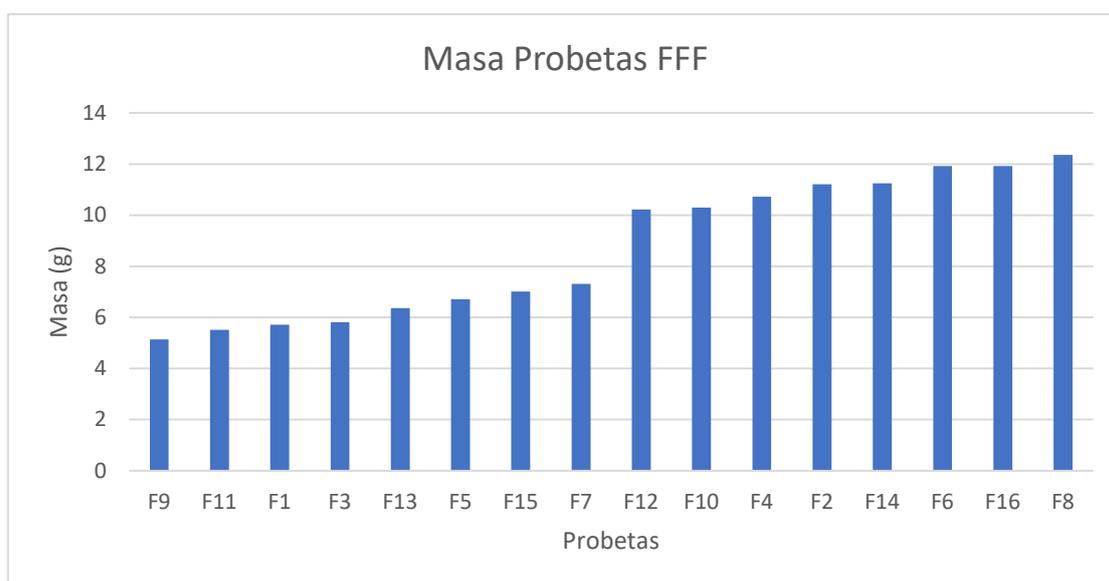


Figura 4.17. Masa probetas FFF (sin aplicación del postproceso) ordenadas de menor a mayor. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, tras la aplicación del postproceso se cuantificó que las probetas pierden entre un 1-2 % de la masa inicial, obteniendo finalmente que la probeta con la menor masa es F9 y la de mayor F8.

Una vez finalizado el tratamiento térmico, se observó que todo el PLA se había licuado sin dejar residuo físico, es decir, el residuo que en este proyecto se trata, y que se analizó a través del software *ImageJ* para obtener el porcentaje de área ocupado por las partículas de dichos residuos, consiste en restos que ha absorbido el propio molde, con lo cual no afectará en la fundición.

Tras realizar el procesamiento de las fotos obtenidas del microscopio, que se puede observar en el “Anexo C. Procesado de las imágenes obtenidas en el microscopio para la obtención del % de residuos en cada pieza”, se obtienen los siguientes porcentajes de residuo de la Figura 4.18.

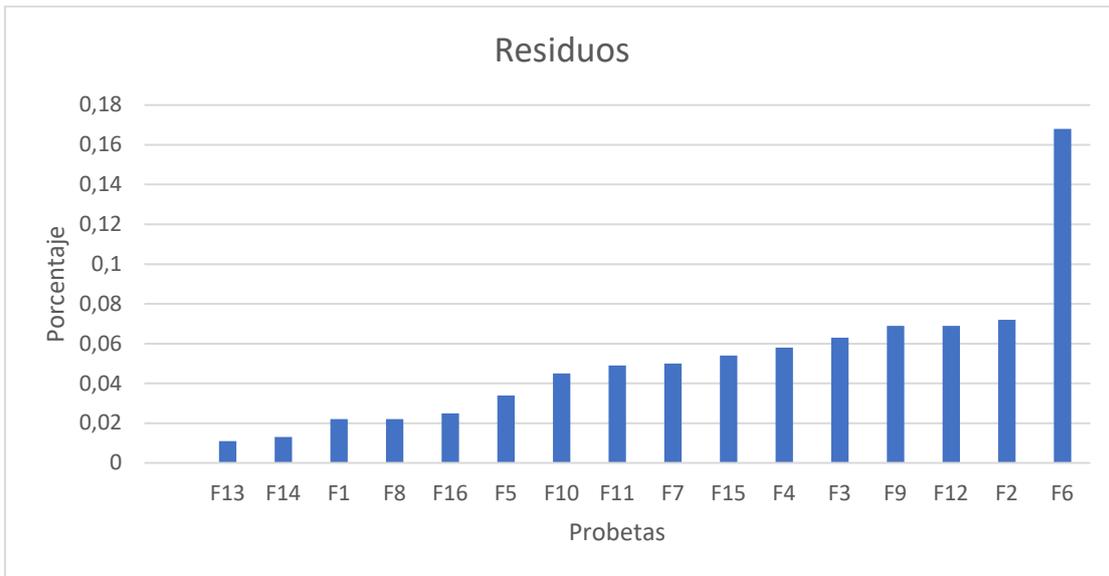


Figura 4.18. Porcentaje de residuos obtenidos por cada probeta ordenado de menor a mayor. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que la probeta con la menor masa es F9 y la de mayor masa es F8, en principio no se observa ninguna relación entre parámetros para esta salida. Esto se confirma tras realizar el análisis factorial y obtener un diagrama de Pareto donde se observa bien que no hay ningún valor que afecte al % de residuos de forma estadísticamente significativa como se ve en la Figura 4.19.

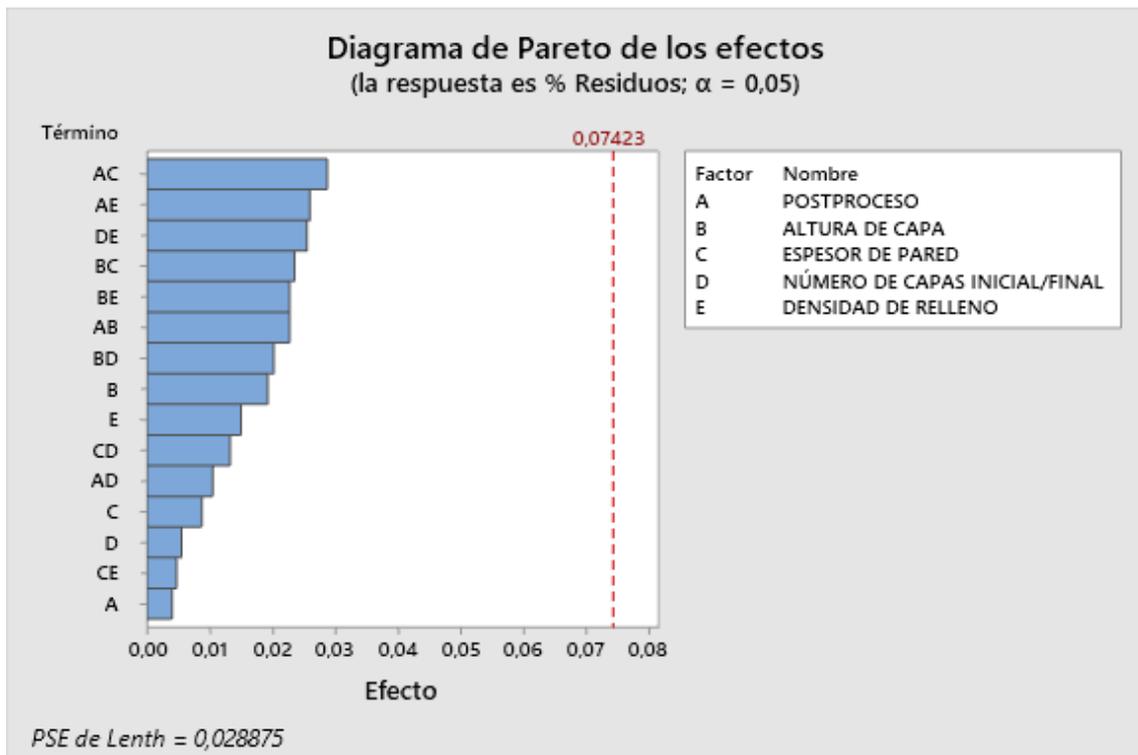


Figura 4.19. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para % Residuos, utilizando $\alpha = 0,05$. Fuente: Elaboración propia.

4.4 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS

Finalmente, tras realizar todas las mediciones y análisis factoriales, se procede a buscar la respuesta óptima utilizando el optimizador de respuesta del software de *Minitab Statistical Software*. Por ello, se ha realizado la optimización para tres casos:

a) Piezas de alta calidad dimensional

En los análisis de calidad dimensional, se ha analizado con respecto al valor absoluto de la diferencia entre las dimensiones obtenidas con las probetas FFF y con las dimensiones del molde de revestimiento, y a pesar de sus diferencias, se ha observado que, en ambos, el parámetro más influyente es ESPESOR DE PARED*DENSIDAD DE RELLENO (CE).

Para piezas que se deseen fabricar con alta calidad dimensional, se deben buscar los parámetros que minimicen el error. El optimizador de respuesta del software de *Minitab Statistical Software* indica que la solución optimizada, minimizando el error tanto en las dimensiones entre caras 1-3 así como las de cara 2-4 los siguientes factores:

Tabla 4.1. Configuración de parámetros optimizados para piezas que requieran gran calidad dimensional. Fuente: Elaboración propia.

Postproceso	Altura de capa	Espesor de pared	Densidad de relleno	Deseabilidad compuesta
SÍ	0,06	0,8	5	0,8920

Esta configuración corresponde con la configuración de la probeta F7, la cual tienen un error relativo de las dimensiones del molde de revestimiento con respecto las dimensiones de la probeta de FFF entre las caras 1-3 del 0,46 % mientras que en las dimensiones entre las caras 2-4 del 0,39 %, lo que supone una diferencia del orden de 0,1 mm aproximadamente en toda la pieza.

Además, se ha obtenido una Deseabilidad Compuesta de 0,8920. La deseabilidad compuesta evalúa la manera que la configuración optimiza un conjunto de respuestas, entre un rango de 0 a 1, siendo el 1 la situación ideal.

Todo lo comentado se resume en la gráfica de la Figura 4.20.

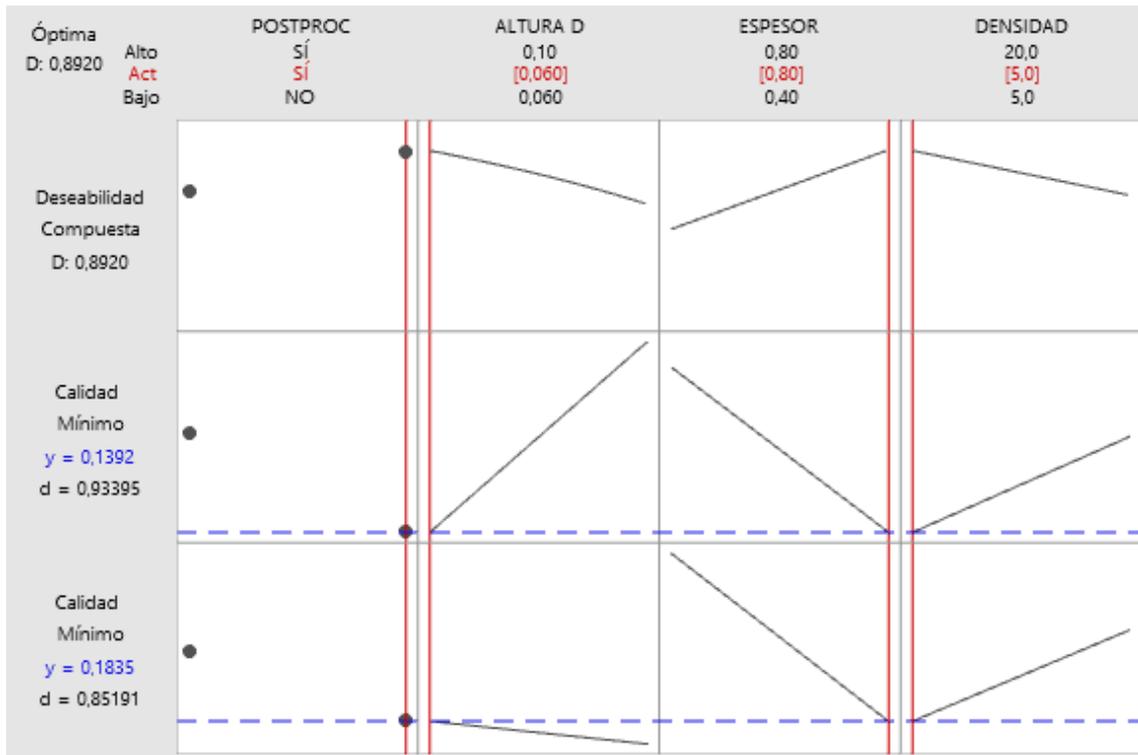


Figura 4.20. Combinación de parámetros óptimos para calidad dimensional. Fuente: Elaboración propia.

b) Piezas de alta calidad superficial

Si lo que se busca es una calidad superficial alta, se debe tener en cuenta que el principal factor que afecta a la rugosidad es el POSTPROCESADO. La optimización consistirá en minimizar el Rz. La solución que presenta el *Minitab Statistical Software* con respecto al Rz más inferior es la utilización de la configuración de la probeta de la que se obtiene la menor rugosidad, es decir F16, de esta forma se obtiene que:

Tabla 4.2. Configuración de parámetros optimizados para piezas que requieran gran calidad superficial. Fuente: Elaboración propia.

Postproceso	Altura de capa	Espesor de pared	Densidad de relleno	Deseabilidad compuesta
SÍ	0,1	0,8	20	1

En la Figura 4.21, además de lo comentado, se puede observar como el parámetro de número de capas inicial/final, no afecta en la rugosidad, pero se selecciona el nivel bajo, siguiendo la configuración de F16, como se menciona previamente.

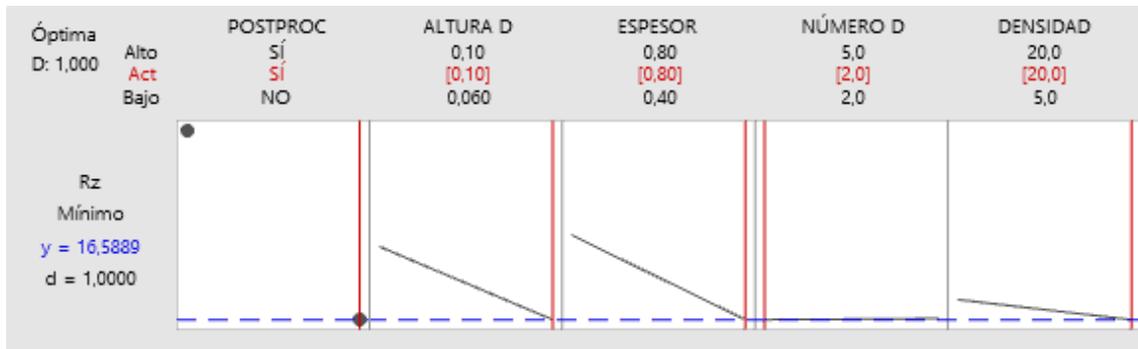


Figura 4.21. Combinación de parámetros óptimos para calidad superficial. Fuente: Elaboración propia.

c) Piezas de alta calidad dimensional y superficial

Si finalmente se quiere conseguir que la pieza de fundición esté optimizada al máximo con respecto a la calidad dimensional y a la superficial, a través de *Minitab Statistical Software*, se obtiene la siguiente combinación, con una deseabilidad compuesta de 0,8402.

Tabla 4.3. Configuración de parámetros optimizados para piezas que requieran gran calidad dimensional y superficial. Fuente: Elaboración propia.

Postproceso	Altura de capa	Espesor de pared	Densidad de relleno	Deseabilidad compuesta
SÍ	0,06	0,8	5	0,8402

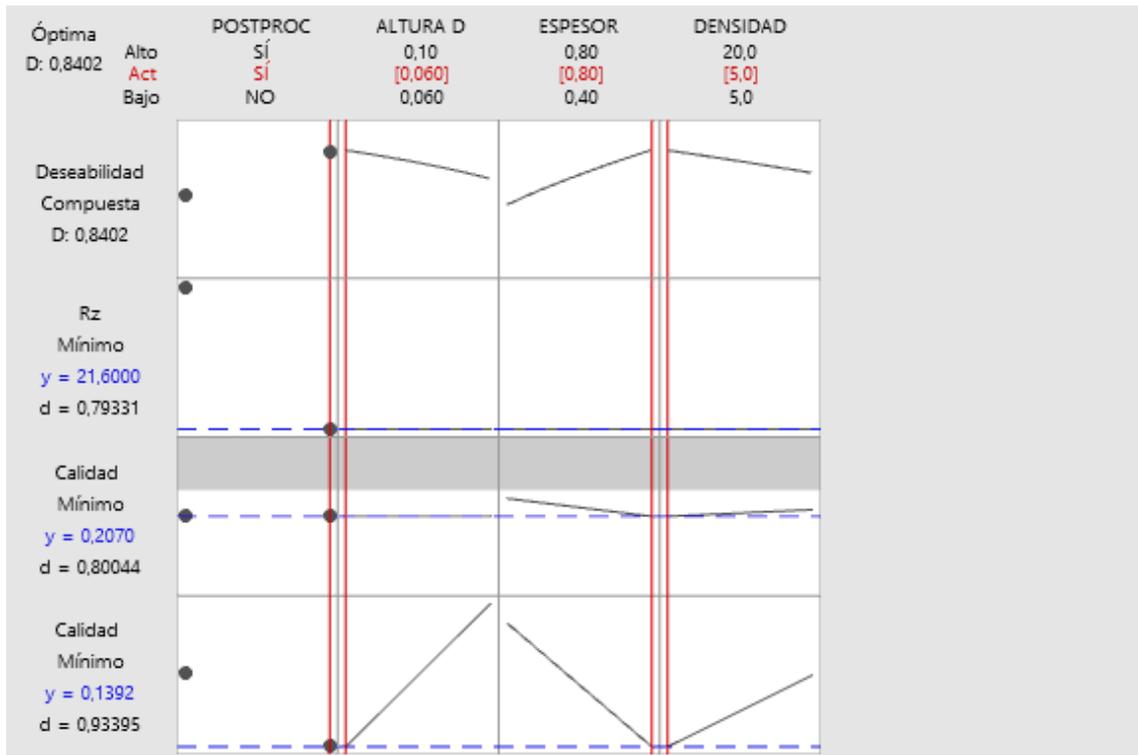


Figura 4.22. Combinación de parámetros óptimos para calidad dimensional y calidad superficial. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la minimización de residuos, por lo visto previamente en el apartado 4.3 “Minimización de residuos”, no vienen determinados por un parámetro y , además, independientemente de la configuración, los residuos son mínimos utilizando este filamento.

5 Conclusiones

Este proyecto de carácter experimental-teórico se ha desarrollado con el objetivo de estudiar la influencia de los parámetros de la tecnología de fabricación aditiva por filamento (FFF) sobre la técnica de fundición indirecta y, de esta forma, poder conseguir piezas metálicas a través de fundición indirecta con la mayor calidad dimensional, mayor calidad superficial y el menor residuo plástico superando las limitaciones que restringen la fabricación en los dos procesos por separado.

Para llevar a cabo este estudio se diseñó una probeta que facilitara los análisis y mediciones a realizar, ya que no hay probeta normalizada para este estudio debido a su novedad.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos tras realizar todas las mediciones y análisis en las diferentes fases del proyecto se alcanzan las siguientes conclusiones:

- Las dimensiones en las probetas de FFF principalmente dependen de la densidad de relleno y espesor de pared, siendo las probetas que menor error producen con el diseño CAD aquellas que tienen el nivel más alto de ambos factores independientemente del resto de factores, así como de su posición en la cama de impresión. Lo cual revela que a la hora de diseñar piezas o prototipos que requieran de gran calidad dimensional en este tipo de tecnología, es necesario tener en cuenta estos dos parámetros. También se ha observado que la dirección de fabricación influye en las dimensiones, ya que en general, las dimensiones obtenidas entre las caras 2-4 correspondiente al eje X son superiores a las dimensiones obtenidas entre las caras 1-3 que corresponden al eje Y, conclusión que se debe tener en cuenta en el diseño de la pieza.
- La aplicación de postproceso no supone una gran variación en cuanto a las dimensiones (del orden de 0,1 mm), mientras que, si supone una amplia diferencia en cuanto calidad superficial, ya que las probetas donde no se le aplicó era posible distinguir dicha rugosidad de forma visual debido al “efecto escalera” tan característico de la fabricación mediante filamento fundido.

- Tras realizar las mediciones dimensionales en el molde de revestimiento se pudo observar que estas se dilataban debido a la acción del calor, pero que el porcentaje de dilatación era aproximadamente el mismo en las diferentes direcciones, implicando que la dilatación se realizaba de forma uniforme en el molde en función de los parámetros utilizados.
- Tras realizar el análisis de influencia de variables, se obtuvo que el principal factor que afecta en las dimensiones es la acción del espesor de pared junto a la densidad de relleno, lo cual, también era el principal factor en las probetas de FFF. Esto significa que los moldes de revestimiento consiguieron plasmar de forma adecuada las dimensiones de las probetas de FFF, a pesar de la dilatación sufrida por el tratamiento térmico.
- Por otro lado, en cuanto a las dimensiones de rugosidad en el molde de revestimiento, se puede apreciar que a pesar de que los valores de Ra, Rz y Rt aumentan para las probetas con postproceso y disminuyen para las probetas sin postproceso, siguen siendo valores más bajos en las pruebas con las probetas en las que se aplicó el diclorometano implicando así que para el único factor significativo que afecta a la calidad superficial es la aplicación del postproceso de diclorometano en las probetas.
- En cuanto a la minimización de residuos, se concluyó que no depende de ninguno de los factores descritos, ya que debido al tratamiento térmico que es necesario para la obtención del molde de revestimiento, el PLA se licua de tal forma que no quedan residuos físicos, sino que restos que han sido absorbidos por el investimento. Esto implica que el residuo no va a suponer un problema a la hora de fundición. Con lo cual, se obtuvo que los residuos no dependen de la masa como se esperaba inicialmente.
- Teniendo en cuenta lo anterior, se obtienen tres configuraciones adecuadas en función de la aplicación final que se le desee aplicar a la pieza:
 - Las piezas que requieran una alta calidad dimensional deben tener la siguiente configuración:

Postproceso	Altura de capa	Espesor de pared	Densidad de relleno
SÍ	0,06	0,8	5

- Las piezas que requieran una alta calidad superficial deben tener la siguiente configuración:

Postproceso	Altura de capa	Espesor de pared	Densidad de relleno
SÍ	0,1	0,8	20

- Las piezas que requieran de la combinación de una alta calidad dimensional y alta calidad superficial deben tener la siguiente configuración:

Postproceso	Altura de capa	Espesor de pared	Densidad de relleno
SÍ	0,06	0,8	5

- También es importante destacar que el parámetro de número de capas iniciales/finales no influye en ninguna de las variables de interés por lo que a la hora de fabricar se dejará en su valor por defecto.

Finalmente, a partir de las conclusiones extraídas, se puede definir la siguiente regla de diseño para conseguir la mayor calidad de piezas fabricadas a base de fundición indirecta utilizando patrones desechables en PLA:

- Cuando se realice el diseño en el software CAD es para las configuraciones que requieran alta calidad dimensional es necesario reducir las dimensiones 0,1mm. En esta reducción está contemplada el uso de postproceso de alisamiento con diclorometano, así como el aumento por dilatación que va a sufrir el molde de revestimiento. Con las configuraciones obtenidas no es necesario compensar las dimensiones del eje Y, ya que es la configuración más regular que se ha obtenido.

En definitiva, mediante este estudio se ha conseguido analizar la influencia de los parámetros de fabricación mediante filamento fundido sobre los moldes de revestimiento para su posterior consecución de la pieza de fundición más óptima en cuanto a calidad dimensional, calidad superficial y minimización de residuos siguiendo esta técnica mediante la planificación por medio del Diseño de Experimentos, llegando a la conclusión que los parámetros que más afectan a la calidad dimensional es la acción

de la densidad de relleno con el espesor de pared, el parámetro que más afecta a la rugosidad es la aplicación del postproceso, mientras que para la minimización de residuo finalmente no afecta ninguno de los parámetros.

6 Futuras líneas de investigación

En este proyecto se ha avanzado en la obtención de las mejores configuraciones en función de la respuesta deseada para la fabricación mediante fundición indirecta utilizando patrones fabricados a través de extrusión de material, sin embargo, en el desarrollo del mismo han surgido ideas y preguntas que abren líneas de investigación.

Debido a la limitación de tiempo, hay diversos factores que no se han estudiado que resultarían interesantes ver cómo afectan a la fundición:

- La pigmentación del filamento de PLA, como factor controlable, puesto que, al tener diferentes composiciones de elementos en función del color, puede afectar al porcentaje de los residuos que se impregnan en el molde.
- La temperatura y humedad, como factores no controlables, para ver y cuantificar su influencia sobre la fabricación de las probetas. En esta vía, el diseño de experimento debe ser un diseño Taguchi.

Por otro lado, sería interesante realizar análisis de calidad geométrica como, por ejemplo, planitud, cilindricidad, perpendicularidad, coaxialidad, etc., diseñando para ello diferentes patrones que lo permita y también para obtener requisitos de tamaños y casos límites.

Agradecimientos

Quisiera, en este escrito, transmitir mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que me han ayudado a lo largo de esta etapa académica que ya llega a su fin.

En primer lugar, me gustaría comenzar agradeciendo la paciencia, esfuerzo y gran dedicación de mi tutor Pablo Rodríguez González, así como la confianza que ha depositado en mi para ofrecerme la oportunidad de embarcarme en este proyecto tan interesante y emocionante.

También me gustaría darle las gracias a Joaquín Barreiro García, por todo el apoyo y ayuda que me ha brindado, no sólo en este proyecto, sino en toda la etapa, guiándome hacia el camino de la investigación y la fabricación.

Por otro lado, me gustaría adjuntar mis agradecimientos al grupo de investigación TAFI, el cual me ha cedido todos los equipos que he necesitado, así como a mis compañeros de la Unidad de Fabricación e Inspección 3D de la Universidad de León, que me han apoyado de forma muy asertiva.

Además, me gustaría agradecer a todos los profesores que me han inspirado e incentivado a seguir por la rama de investigación, en especial a Carlos Fernández López por todo el cariño y ayuda que siempre me ha dado, y a todas mis amistades por los ánimos y el apoyo ofrecido.

Me gustaría hacer una mención especial a toda la ayuda y apoyo que me ha brindado de forma incondicional Manuel Morales Román, con gran paciencia y dedicación, siendo un soporte fundamental.

Finalmente, me gustaría agradecer a mi familia, particularmente a mis padres, José Antonio Peláez González y Faustina Peláez Aller, y a mi hermano, Santiago Peláez Peláez, por su gran apoyo absoluto y emocional, ya que sin ellos nada de esto habría sido posible.

Referencias

- [1] A. International, «Standard Terminology for Additive Manufacturing—General Principles—Terminology», *Iso/Astm 5900:2017*. 2017.
- [2] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, y R. C. Advincula, «Mechanical characterization of 3D-printed polymers», *Addit. Manuf.*, vol. 20, pp. 44-67, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
- [3] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, y D. Hui, «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges», *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, pp. 172-196, jun. 2018, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2018.02.012.
- [4] AENOR, «UNE-EN ISO 17296-2 Fabricación aditiva Principios generales Parte 2: Visión general de categorías de procesos y de materias primas», pp. 3-6, 2017.
- [5] A. P. Mouritz, *Introduction to aerospace materials*. Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [6] P. Scallan, «Material evaluation and process selection», *Process Plan.*, pp. 109-170, 2003, doi: 10.1016/B978-075065129-5/50005-2.
- [7] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, Sixth Edit. 2010.
- [8] S. Pattnaik, D. B. Karunakar, y P. K. Jha, «Developments in investment casting process - A review», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, n.º 11, pp. 2332-2348, nov. 2012, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2012.06.003.
- [9] C. Prakash, S. Singh, H. Kopperi, S. Ramakrihna, y S. V. Mohan, «Comparative job production based life cycle assessment of conventional and additive manufacturing assisted investment casting of aluminium: A case study», *J. Clean. Prod.*, vol. 289, p. 125164, mar. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.125164.
- [10] J. Campbell, *Complete casting handbook. Metal casting processes, metallurgy, techniques and design.*, Second Edi. 2015.
- [11] J. Mun, B. G. Yun, J. Ju, y B. M. Chang, «Indirect additive manufacturing based casting of a periodic 3D cellular metal - Flow simulation of molten aluminum alloy», *J. Manuf. Process.*, vol. 17, pp. 28-40, ene. 2015, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2014.11.001.
- [12] D. Singh, R. Singh, y K. S. Boparai, «Development and surface improvement of FDM pattern based investment casting of biomedical implants: A state of art review», *J. Manuf. Process.*, vol. 31, pp. 80-95, ene. 2018, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2017.10.026.
- [13] V. H. Carneiro, S. D. Rawson, H. Puga, J. Meireles, y P. J. Withers, «Additive manufacturing assisted investment casting: A low-cost method to fabricate periodic metallic cellular lattices», *Addit. Manuf.*, vol. 33, p. 101085, may 2020, doi: 10.1016/J.ADDMA.2020.101085.
- [14] S. Körber, R. Völkl, y U. Glatzel, «3D printed polymer positive models for the investment casting of extremely thin-walled single crystals», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 293, p. 117095, jul. 2021, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2021.117095.

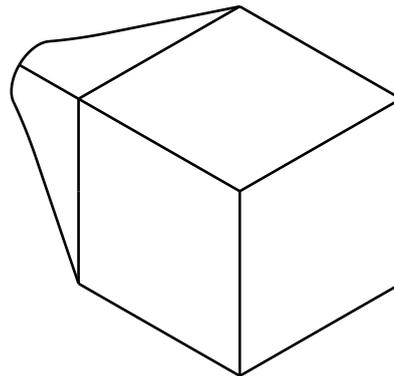
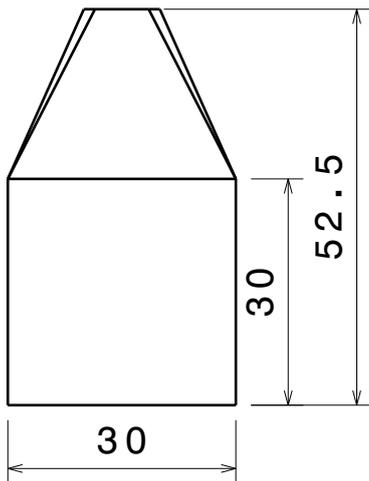
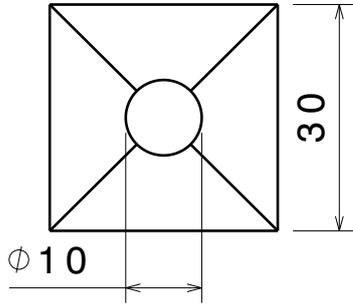
- [15] M. D. Díaz-Alemán, C. Meier, I. Pérez-Conesa, y J. L. Saorín, «Fundición artística de objetos complejos impresos en 3D con PLA (ácido poliláctico) como alternativa al modelo de cera TT - Artistic casting of complex 3D printed objects with PLA as an alternative to the wax model», *Arte, Individuo y Soc.*, vol. 31, n.º 3, pp. 543-566, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/fundición-artística-de-objetos-complejos-impresos/docview/2274459862/se-2?accountid=25704>.
- [16] J. Chohan, R. Singh, y K. Boparai, «Post-processing of ABS Replicas with Vapour Smoothing for Investment Casting Applications», *Proc. Natl. Acad. Sci. India Sect. A Phys. Sci.*, 2020, doi: 10.1007/s40010-020-00669-x.
- [17] J. Wang, S. R. Sama, P. C. Lynch, y G. Manogharan, «Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Patterns for Rapid Investment Casting», *Procedia Manuf.*, vol. 34, pp. 683-694, ene. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.06.224.
- [18] J. Montero, P. Vitale, S. Weber, M. Bleckmann, y K. Paetzold, «Indirect Additive Manufacturing of resin components using polyvinyl alcohol sacrificial moulds», *Procedia CIRP*, vol. 91, pp. 388-395, ene. 2020, doi: 10.1016/J.PROCIR.2020.02.191.
- [19] N. Singh, R. Singh, I. P. S. Ahuja, I. Farina, y F. Fraternali, «Metal matrix composite from recycled materials by using additive manufacturing assisted investment casting», *Compos. Struct.*, vol. 207, pp. 129-135, ene. 2019, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.09.072.
- [20] L. Di Angelo, P. Di Stefano, y A. Marzola, «Surface quality prediction in FDM additive manufacturing», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 93, n.º 9, pp. 3655-3662, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0763-6.
- [21] Bitfab, «¿Cómo alisar PLA? 4 técnicas y trucos». <https://bitfab.io/es/blog/alisar-pla/> (accedido may 13, 2022).
- [22] DIMA 3D y M. Ramírez, «Tratamientos superficiales post-impresión 3D (III). Tratamientos químicos (I).», jun. 25, 2015. <http://www.dima3d.com/tratamientos-superficiales-post-impresion-iii-tratamientos-quimicos-i/> (accedido may 13, 2022).
- [23] 3D WORKS, «Altura de Capas y Resolución en la Impresión 3D». <https://www.3dworks.cl/post/altura-de-capas> (accedido may 13, 2022).
- [24] DIMA 3D y S. Ureta, «Consejos de impresión en 3D con tecnología FFF (2ª parte)», feb. 09, 2015. <http://www.dima3d.com/consejos-de-impresion-en-3d-con-tecnologia-fff-2a-parte/> (accedido may 13, 2022).
- [25] My Crazy Good Life, «3D Printing Infill vs Shell ». <https://mycrazygoodlife.com/3d-printing-infill-vs-shell/> (accedido may 13, 2022).
- [26] Formlabs, «El grosor mínimo de pared para la impresión 3D». <https://formlabs.com/es/blog/grosor-minimo-pared-impresion-3d/> (accedido may 26, 2022).
- [27] V. Shanmugam *et al.*, «Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials», *Int. J. Fatigue*, vol. 143, p. 106007, feb. 2021, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2020.106007.
- [28] Ransom & Randolph, «Ultra - Vest[®] investment volume».
- [29] Minitab, «Diseño de un experimento». <https://support.minitab.com/es->

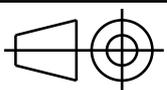
- mx/minitab/18/getting-started/designing-an-experiment/ (accedido may 26, 2022).
- [30] G. Martín Bozas, *Introducción a la Fabricación Aditiva (Cómo y Porqué de la Impresión 3D)*. 2018.
- [31] Ultimaker, «Ultimaker PLA». <https://ultimaker.com/es/materials/pla> (accedido jul. 13, 2022).
- [32] European Chemicals Agency, «Substance Infocard: Dichloromethane». p. 2022, 2022.
- [33] AENOR, «UNE-EN ISO 4287:1999 Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial. (ISO 4287:1997+Technical Corrigendum 1).», 1999.
- [34] «ImageJ, Image Processing and Analysis in Java». <https://imagej.nih.gov/ij/docs/menus/process.html> (accedido jul. 12, 2022).
- [35] J. F. Shackelfor, *Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros*, Sexta Edic. Madrid, 2005.
- [36] Universidad Complutense Madrid, «X8 | Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico». <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/x8> (accedido jul. 13, 2022).
- [37] «Coppermetal». <https://www.coppermetal.com.br/es/laton/> (accedido jul. 13, 2022).
- [38] GIRBAU BARCELONA, «Guía de temperatura de colada». <https://girbaubcn.es/es/content/12-guia-de-temperatura-de-colada> (accedido jul. 13, 2022).
- [39] «How Important is Temperature when you are Die Casting? - A&B Die Casting Projects». <https://www.abdiecasting.com/how-important-is-temperature-when-you-are-die-casting/> (accedido jul. 13, 2022).

Anexos

ANEXO A. PLANO PROBETA DE FABRICACIÓN FFF

El siguiente plano define las dimensiones utilizadas en las probetas de fabricación descritas en la sección 3.2. *“Diseño del patrón”*.



DESIGNED BY: Sofía Peláez Peláez	OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS PARA FUNDICIÓN INDIRECTA MEDIANTE LA TÉCNICA DE FABRICACIÓN ADITIVA DE EXTRUSIÓN DE MATERIAL	I	-
DATE: 27/05/2022		H	-
CHECKED BY:	UNIVERSIDAD DE LEÓN	G	-
DATE:		F	-
SIZE A4 	DRAWING NAME PROBETA FABRICACIÓN FFF	E	-
SCALE 1:1		D	-
	NUMBER 1	C	-
		B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.		A	-

ANEXO B. TABLAS DE DATOS

En este anexo se adjunta los datos obtenidos de todas las mediciones que han sido realizadas para su posterior análisis.

MASA

TAG	MASA CAD	ANTES DE POSTPROCESO				ERROR	DESPUES DE POSTPROCESO				ERRORES		% Residuos
		MASA	Masa media	MASA	Masa media		MASA	Masa media	ΔMASA	% Variacion			
F1	5	5,717	5,717	5,718	5,717	0,71733333	5,624	5,624	5,626	5,62466667	0,093	2%	0,022
F2	12	11,212	11,212	11,212	11,212	0,788							0,072
F3	6	5,817	5,814	5,815	5,815	0,18466667							0,063
F4	12	10,718	10,72	10,718	10,719	1,28133333	10,597	10,596	10,597	10,5966667	0,122	1%	0,058
F5	7	6,708	6,707	6,708	6,708	0,29233333							0,034
F6	13	11,916	11,916	11,917	11,917	1,08366667	11,818	11,818	11,818	11,818	0,098	1%	0,168
F7	8	7,318	7,318	7,319	7,318	0,68166667	7,211	7,21	7,211	7,21066667	0,108	1%	0,05
F8	13	12,36	12,361	12,361	12,361	0,63933333							0,022
F9	5	5,144	5,144	5,146	5,145	0,14466667							0,069
F10	11	10,293	10,293	10,294	10,293	0,70666667	10,233	10,233	10,232	10,2326667	0,061	1%	0,045
F11	5	5,477	5,578	5,477	5,511	0,51066667	5,383	5,382	5,384	5,383	0,128	2%	0,049
F12	11	10,216	10,217	10,218	10,217	0,783							0,069
F13	7	6,363	6,362	6,362	6,362	0,63766667	6,303	6,302	6,301	6,302	0,060	1%	0,011
F14	13	11,252	11,252	11,252	11,252	1,748							0,013
F15	7	7,006	7,007	7,006	7,006	0,00633333							0,054
F16	13	11,917	11,917	11,917	11,917	1,08266667	11,841	11,842	11,842	11,8416667	0,076	1%	0,025
TOTAL					139,47								

DIMENSIONES

PROBETA FFF																		
TAG	Cara 1-3					Cara 2-4					Media		Desviación Típica		ERROR CON EL CAD		ERROR RELATIVO CAD	
	Cara 1-3	Cara 2-4	Cara 1-3	Cara 2-4	Cara 1-3	Cara 2-4	Cara 1-3	Cara 2-4										
F1	29,83	29,83	29,75	29,79	29,83	29,94	29,97	29,94	29,98	29,87	29,806	0,03577709	0,04301163	0,194	0,06	0,65%	0,20%	
F2	29,96	29,98	29,91	29,92	29,96	30,02	30,04	29,98	29,98	30,01	29,946	30,006	0,02966479	0,02607681	0,054	0,006	0,18%	0,02%
F3	29,88	29,86	29,82	29,86	29,82	30,02	30,02	29,98	29,96	29,91	29,848	29,978	0,02683282	0,04604346	0,152	0,022	0,51%	0,07%
F4	29,98	29,97	29,92	29,89	29,97	30,05	30,04	30	30	30,03	29,946	30,024	0,03911521	0,02302173	0,054	0,024	0,18%	0,08%
F5	29,91	29,89	29,89	29,83	29,87	29,99	30,02	29,93	29,97	29,9	29,878	29,962	0,0303315	0,04764452	0,122	0,038	0,41%	0,13%
F6	29,91	29,91	29,88	29,86	29,9	30,06	30,08	30,01	30,01	30,06	29,892	30,044	0,02167948	0,03209361	0,108	0,044	0,36%	0,15%
F7	29,95	29,99	29,91	29,97	29,93	30	29,97	29,96	29,93	29,96	29,95	29,964	0,03162278	0,0250998	0,05	0,036	0,17%	0,12%
F8	29,99	30,01	29,93	29,93	29,99	30,08	30,05	30,03	29,99	30,06	29,97	30,042	0,03741657	0,03420526	0,03	0,042	0,10%	0,14%
F9	29,76	29,79	29,75	29,74	29,8	29,9	29,97	29,89	29,96	29,77	29,768	29,898	0,02588436	0,07981228	0,232	0,102	0,77%	0,34%
F10	29,96	29,98	29,92	29,95	29,95	30,01	30,02	29,99	30	30,01	29,952	30,006	0,02167948	0,01140175	0,048	0,006	0,16%	0,02%
F11	29,87	29,91	29,84	29,89	29,76	29,99	29,96	29,95	29,9	29,79	29,854	29,918	0,0585662	0,07854935	0,146	0,082	0,49%	0,27%
F12	29,97	29,95	29,93	29,91	29,95	30,06	30,04	30,03	30,03	30,05	29,942	30,042	0,02280351	0,0130384	0,058	0,042	0,19%	0,14%
F13	29,89	29,87	29,87	29,84	29,86	29,96	29,98	29,94	29,97	29,87	29,866	29,944	0,0181659	0,04393177	0,134	0,056	0,45%	0,19%
F14	29,92	29,9	29,88	29,85	29,89	30,05	30,08	30,01	30,05	30,05	29,888	30,048	0,02588436	0,0248998	0,112	0,048	0,37%	0,16%
F15	29,94	29,98	29,92	29,99	29,91	30,03	29,98	29,99	29,97	29,9	29,948	29,974	0,03563706	0,04722288	0,052	0,026	0,17%	0,09%
F16	29,98	30	29,96	29,97	29,97	30,06	30,04	30,06	30,03	30,04	29,976	30,046	0,01516575	0,01341641	0,024	0,046	0,08%	0,15%

PROBETA FFF TRAS APLICACIÓN DE POSTPROCESO																						
TAG	Cara 1-3					Cara 2-4					Media		Desviación Típica		ERROR CAD		ERROR RELATIVO CAD		ERROR PROBETA FABRICADO		ERROR RELATIVO FFF	
	Cara 1-3	Cara 2-4	Cara 1-3	Cara 2-4	Cara 1-3	Cara 2-4	Cara 1-3	Cara 2-4	Cara 1-3	Cara 2-4												
F1	29,8	29,81	29,72	29,74	29,78	29,95	29,97	29,85	29,93	29,8	29,77	29,9	0,03872983	0,07211103	0,23	0,1	0,77%	0,33%	0,036	0,04	0,12%	0,13%
F4	29,93	29,93	29,86	29,83	29,91	30,03	30,01	29,96	29,95	29,99	29,892	29,988	0,04494441	0,0334664	0,108	0,012	0,36%	0,04%	0,054	0,036	0,18%	0,12%
F6	29,89	29,87	29,83	29,78	29,86	30,04	30,06	29,96	30	30,04	29,846	30,02	0,0427785	0,04	0,154	0,02	0,51%	0,07%	0,046	0,024	0,15%	0,08%
F7	29,93	29,93	29,86	29,92	29,88	30,02	29,96	29,96	29,9	29,9	29,904	29,948	0,03209361	0,0501996	0,096	0,052	0,32%	0,17%	0,046	0,016	0,15%	0,05%
F10	29,89	29,9	29,83	29,86	29,86	29,98	29,98	29,93	29,95	29,95	29,868	29,958	0,02774887	0,02167948	0,132	0,042	0,44%	0,14%	0,084	0,048	0,28%	0,16%
F11	29,75	29,72	29,77	29,72	29,69	29,91	29,82	29,9	29,82	29,64	29,73	29,818	0,03082207	0,10825895	0,27	0,182	0,90%	0,61%	0,124	0,1	0,41%	0,33%
F13	29,84	29,81	29,85	29,78	29,78	29,92	29,51	29,9	29,95	29,84	29,812	29,824	0,03271085	0,18008331	0,188	0,176	0,63%	0,59%	0,054	0,12	0,18%	0,40%
F16	29,95	29,96	29,92	29,92	29,94	30,04	30	30,01	29,97	30,01	29,938	30,006	0,01788854	0,0250998	0,062	0,006	0,21%	0,02%	0,038	0,04	0,13%	0,13%

MOLDE REVESTIMIENTO																						
TAG	Cara 1-3					Cara 2-4					Media		Desviación Típica		ERROR ABS CAD		ERROR RELATIVO CAD		ERROR ABS PROBETA FFF		ERROR RELATIVO FFF	
	Cara 1-3	Cara 2-4	Cara 1-3	Cara 2-4	Cara 1-3	Cara 2-4	Cara 1-3	Cara 2-4	Cara 1-3	Cara 2-4												
F1	30,04	30,04	30,09	30,04	30,08	30,15	30,27	30,2	30,26	30,23	30,14	30,222	0,0248998	0,04868265	0,14	0,222	0,47%	0,74%	0,37	0,322	1,24%	1,08%
F2	30,09	30,04	30,05	30,07	30,06	30,27	30,25	30,24	30,19	30,28	30,062	30,246	0,01923538	0,03507136	0,062	0,246	0,21%	0,82%	0,116	0,24	0,39%	0,80%
F3	30,32	30,33	30,29	30,25	30,29	30,34	30,29	30,41	30,37	30,31	30,32	30,344	0,03130495	0,04774935	0,32	0,344	1,07%	1,15%	0,472	0,366	1,58%	1,22%
F4	29,98	30	29,92	30,06	30,07	30,17	30,14	30,14	30,22	30,17	30,087	30,168	0,0614817	0,03271085	0,087	0,168	0,29%	0,56%	0,195	0,18	0,65%	0,60%
F5	30,1	30,05	30,17	30,06	30,11	30,25	30,24	30,17	30,24	30,19	30,158	30,218	0,04764452	0,03563706	0,158	0,218	0,53%	0,73%	0,256	0,256	0,94%	0,85%
F6	30,07	30,07	30,02	30,015	30,12	30,3	30,27	30,22	30,27	30,24	30,1595	30,26	0,04306971	0,03082207	0,1595	0,26	0,53%	0,87%	0,3135	0,24	1,05%	0,80%
F7	30,04	30,04	30	30	30,02	30,04	30,02	30,05	30,08	30,13	30,042	30,064	0,02	0,0427785	0,042	0,064	0,14%	0,21%	0,138	0,116	0,46%	0,39%
F8	30,26	30,12	30,13	30,26	30,17	30,42	30,55	30,42	30,37	30,31	30,301	30,414	0,0683374	0,08848729	0,301	0,414	1,00%	1,38%	0,331	0,372	1,10%	1,24%
F9	30,32	30,35	30,34	30,27	30,37	30,47	30,45	30,28	30,27	30,28	30,34	30,35	0,03807887	0,10074721	0,34	0,35	1,13%	1,17%	0,572	0,452	1,92%	1,51%
F10	30,09	30,13	30,18	30,2	30,22	30,22	30,25	30,23	30,28	30,28	30,208	30,252	0,05319774	0,02774887	0,208	0,252	0,69%	0,84%	0,34	0,294	1,14%	0,98%
F11	30,12	30,07	29,97	29,95	29,96	30,27	30,24	30,31	30,31	30,3	30,15	30,286	0,07635444	0,0304959	0,15	0,286	0,50%	0,95%	0,42	0,468	1,41%	1,57%
F12	30,45	30,33	30,31	30,32	30,36	30,24	30,17	30,29	30,27	30,27	30,301	30,248	0,05683309	0,04711688	0,301	0,248	1,00%	0,83%	0,359	0,206	1,20%	0,69%
F13	29,88	29,87	29,85	29,83	29,85	30,18	30,14	30,16	30,18	30,2	30,014	30,172	0,01949359	0,02280351	0,014	0,172	0,05%	0,57%	0,202	0,348	0,68%	1,17%
F14	30,26	30,2	30,2	30,26	30,25	30,26	30,31	30,32	30,31	30,32	30,269	30,304	0,03130495	0,0250998	0,269	0,304	0,90%	1,01%	0,381	0,256	1,27%	0,85%
F15	30,1	30,1	30,04	30,09	30,07	30,32	30,18	30,19	30,25	30,22	30,156	30,232	0,0254951	0,05630275	0,156	0,232	0,52%	0,77%	0,208	0,258	0,69%	0,86%
F16	29,98	29,99	30	30,03	30,09	30,19	30,24	30,25	30,22	30,17	30,116	30,214	0,04438468	0,03361547	0,116	0,214						

RUGOSIDAD

PROBETA FFF

Ra

CARAS	1					2					3					4					Media	Desviación
TAG	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Media	Desviación
F1	3,1981	1,503	1,6543	2,11846667	0,93804532	2,2627	2,3949	2,8193	2,4923	0,23743906	1,9285	1,8464	2,1414	1,9721	0,15225626	1,4344	1,4239	1,9376	1,598633333	0,293600687	2,045375	0,369698837
F2	7,2502	7,5463	7,4327	7,40973333	0,14938006	7,6485	7,6932	8,3434	7,89503333	0,31756787	9,6731	6,414	8,4588	8,18196667	1,6470916	5,372	4,7754	5,264	5,137133333	0,317890317	7,155966667	1,383110153
F3	8,9238	6,3995	7,5719	7,63173333	1,26321322	5,4278	6,2535	7,1349	6,27206667	0,6970443	7,2509	8,1486	7,8505	7,75	0,45721058	10,721	9,7134	9,5426	9,986033333	0,625984635	7,909958333	1,53793935
F4	2,0048	3,8907	3,2039	3,03313333	0,95447663	2,7506	2,3237	1,9946	2,3563	0,30949536	0,8598	1,5535	3,9786	2,13063333	1,637541	3,0719	3,7518	3,4089	3,410866667	0,339954267	2,732733333	0,592826968
F5	8,0918	8,1748	8,257	8,17453333	0,08260032	8,9839	8,9663	8,5077	8,8193	0,2204516	7,269	7,3796	7,666	7,4382	0,20488465	6,9236	6,5991	5,9505	6,491066667	0,495463726	7,730775	1,000713915
F6	1,0571	1,1037	1,3722	1,17766667	0,17007441	1,3523	1,368	1,0354	1,2519	0,15322274	1,7099	1,2099	1,8166	1,5788	0,32390065	0,9604	1,0027	1,1078	1,023633333	0,075896926	1,258	0,234044888
F7	1,4405	2,0244	1,5721	1,679	0,30627685	1,6263	1,9792	1,4234	1,6763	0,22964235	1,6722	1,9529	1,3133	1,64613333	0,32059576	2,1594	1,8801	1,2661	1,768533333	0,456980922	1,692491667	0,052838197
F8	6,5615	6,7082	7,2907	6,85346667	0,38569413	5,2718	5,6135	5,6202	5,50183333	0,16268113	8,0308	6,7392	8,0883	7,61943333	0,76284638	6,8157	6,9706	6,2154	6,667233333	0,398890365	6,660491667	0,875469979
F9	7,3874	8,2316	6,9884	7,5358	0,63474678	6,707	6,902	9,9465	7,85183333	1,48329084	8,5354	8,0934	7,6872	8,10533333	0,4242259	8,6027	7,0857	8,6651	8,117833333	0,89439804	7,9027	0,273584628
F10	1,0854	1,5209	1,5946	1,4003	0,27518981	1,6124	1,4604	1,3901	1,48763333	0,09277415	1,0914	1,0695	1,2445	1,13513333	0,09534518	1,2157	0,9578	2,15	1,441166667	0,627265194	1,366058333	0,158030155
F11	1,9921	1,745	1,6222	1,78643333	0,18839863	1,0754	1,0814	0,9784	1,04506667	0,04720405	1,3108	1,1389	1,3396	1,2631	0,10852	1,6403	1,2562	2,332	1,742833333	0,545179992	1,459358333	0,364001396
F12	9,4163	9,1775	9,3797	9,3245	0,12861431	7,8634	7,9704	9,8709	8,56823333	0,92215963	9,4668	9,9978	8,4352	9,29993333	0,79455211	9,2612	10,2539	9,6846	9,732333333	0,49813374	9,231475	0,484764935
F13	1,0022	1,3084	1,8045	1,3717	0,40487836	1,5357	1,4146	1,9605	1,63693333	0,23407669	1,2745	1,1319	1,9134	1,43993333	0,4161871	1,7251	1,6357	2,394	1,9351	0,403528078	1,595916667	0,252541491
F14	8,0289	8,2819	8,0945	8,1351	0,13129554	7,4822	7,6115	7,5476	7,5471	0,05278769	8,4737	8,6524	8,8617	8,6626	0,194201	7,8162	8,0382	8,3592	8,0712	0,273	8,104	0,456148594
F15	10,1447	10,1877	10,1723	10,1682333	0,02178654	10,1454	10,1516	9,9102	10,0690667	0,11236421	9,225	10,1968	10,3502	9,924	0,61019148	9,8126	10,5185	10,2261	10,18573333	0,354677041	10,08675833	0,120052067
F16	1,8916	1,462	1,1609	1,50483333	0,36722833	1,9087	1,8599	1,6637	1,81076667	0,105883	1,5475	2,0129	0,8373	1,4659	0,59203274	0,8365	1,4476	1,0564	1,1135	0,309525621	1,47375	0,285416708

Rt

CARAS	1					2					3					4					Media	Desviación
TAG	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Media	Desviación
F1	38,9605	9,8546	14,3843	21,0664667	15,6613175	17,1966	14,6025	18,5602	16,7864333	2,01047876	16,185	13,6868	14,8659	14,9125667	1,24975363	10,6339	9,8406	15,8306	12,1017	3,253590729	16,21679167	3,762925347
F2	59,7412	59,4172	57,9143	59,0242333	0,97478613	51,177	52,9006	55,4122	53,1632667	2,12978287	79,552	54,2944	78,1779	70,6747667	14,2024416	37,3086	35,3817	44,3464	39,01223333	4,718923227	55,468625	13,16556871
F3	74,1911	47,1419	57,9669	59,7666333	13,6141135	38,201	51,5071	53,7141	47,8074	8,39225256	66,2842	72,8422	63,4719	67,5327667	4,80830735	84,1679	64,485	72,9322	10,13340699	62,00975	10,90171156	6,432507195
F4	26,4187	34,9691	34,669	32,0189333	4,85226494	22,6486	16,8721	18,3445	19,2884	3,00169926	6,6067	14,7929	32,3117	17,9037667	13,1318268	23,629	26,595	25,0444	25,08946667	1,483513483	23,57514167	6,432507195
F5	59,0516	57,5042	61,2575	59,2711	1,88625301	58,9481	58,9331	61,0302	59,6371333	1,20645443	49,2371	49,7651	56,4101	51,8041	3,99763968	54,5539	48,2897	49,5869	50,81016667	3,306408386	55,380625	4,72349727
F6	10,2089	10,6491	12,7556	11,2045333	1,36117591	13,7943	10,7956	10,2098	11,5999	1,92284527	13,5574	9,3827	13,047	11,9957	2,27726893	8,5999	8,6803	8,2947	8,524966667	0,203428349	10,831275	1,57109833
F7	13,3761	16,9497	13,4698	14,5985333	2,03670897	15,6983	20,7821	18,1863	18,2222333	2,54209048	17,0666	20,0477	16,6933	17,9358667	1,838401	18,6292	17,5801	10,641	15,61676667	4,340949567	16,59335	1,769050636
F8	61,3292	65,7577	71,7258	66,2709	5,21726495	42,8334	56,779	55,1133	51,5752333	7,61623204	70,024	52,4076	67,6867	63,3727667	9,56775328	49,4895	51,21	45,9685	48,8893333	2,671793514	57,52705833	8,57635484
F9	49,927	58,4748	47,5559	51,9859	5,74324788	52,1734	56,3345	71,9732	60,1603667	10,4396342	57,5932	54,1638	55,9698	55,9089333	1,71551003	55,7155	49,1235	58,3456	54,39486667	4,75077219	55,61251667	3,435395292
F10	12,757	14,208	14,9071	13,9573667	1,09674304	16,433	11,5773	10,0772	12,6958333	3,32225616	10,1301	9,44	9,5134	9,6945	0,37902165	9,5073	7,828	12,4327	9,922666667	2,330281662	11,56759167	2,097475026
F11	27,4144	19,5671	20,4147	22,4654	4,30686164	9,0646	8,8022	16,8038	11,5568667	4,54587126	9,8834	8,2672	13,0634	10,4046667	2,44021983	11,474	10,0694	16,8775	12,80696667	3,594461921	14,308475	5,525728328
F12	68,1583	72,7424	72,2659	71,055333	2,52036382	47,2221	53,5052	64,8201	55,1824667	8,9180894	71,3309	72,3778	62,6178	68,7755	5,35835347	60,3362	71,5209	60,0693	63,97546667	6,535899482	64,74724167	7,026188308
F13	8,2498	13,5655	13,6622	11,8258333	3,09731311	20,196	14,0917	28,0636	20,7837667	7,00446998	24,5948	15,5482	14,23	18,1243333	5,64221738	20,5829	13,1188	29,3683	21,02333333	8,133698341	17,93931667	4,282170954
F14	50,1147	52,3945	50,0534	50,8542	1,33429101	52,2409	47,6282	47,313	49,0607	2,75863948	53,1764	53,3508	56,7705	54,4325667	2,02658655	49,8223	47,7997	52,009	49,877	2,105183054	51,05616667	2,367360607
F15	72,1402	70,2547	66,4414	69,6121	2,90323637	59,9426	59,3486	63,4446	60,9119333	2,21337058	60,206	66,5686	64,3834	63,7193333	3,23286376	66,9293	68,9867	66,3847	67,43356667	1,372339117	65,41923333	3,866224815
F16	23,1343	14,2514	11,3843	16,2566667	6,12629136	14,6458	16,7023	17,7231	16,3570667	1,5674289	12,9975	19,0714	7,5362	13,2017	5,77031048	8,941	12,8267	11,0673	10,945	1,945734846	14,19010833	2,612409545

Rz

CARAS	1					2					3					4					Media	Desviación
TAG	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Media	Desviación
F1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F2	36,7511	37,1915	37,4538	37,1321333	0,35509171	38,2594	37,8056	41,1108	39,0586	1,7916828	48,9935	34,3972	43,8132	42,4013	7,39987092	28,9154	26,2696	29,3749	28,18663333	1,676021379	36,69466667	6,075410908
F3	44,8747	36,0951	41,323	40,7642667	4,4163878	29,5778	34,9736	36,9355	33,8289667	3,81006252	37,3586	40,7593	41,7062	39,9413667	2,28629999	51,0866	46,5912	46,0871	47,92163333	2,752506077	40,61405833	5,770996388
F4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,4318	12,0712	8,834333333	7,741265541	2,208583333	4,417166667
F5	38,1393	37,2047	38,8831	38,0757	0,84100556	40,6367	41,926	40,3342	40,9656333	0,84534293	38,0118	38,4092	40,0077	38,8095667	1,05646784	34,6802	33,0834	30,1531	32,6389	2,296049605	37,62245	3,541531069
F6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F8	35,4669	35,2134	38,6177	36,4326667	1,89653462	27,6905	28,7562	28,6991	28,3819333	0,59947906	37,9864	34,8622	39,6059	37,4848333	2,41129618	34,2627	3					

F8	6,325	5,7393	6,253	6,10576667	0,3194047	5,4694	5,0768	5,1209	5,22236667	0,1756043	7,4728	6,7698	6,2702	6,8376	0,60416001	5,3872	5,7896	6,3043	5,82703333	0,459694511	5,998191667	0,670168719
F9	5,2812	6,6475	6,84	6,25623333	0,8498715	10,4336	7,4841	7,0012	8,3063	1,51709197	6,51	8,7096	7,698	7,6392	1,10097826	5,5084	5,7029	5,2812	5,4975	0,2110612	6,924808333	1,278420417
F10	4,1956	4,4204	3,9654	4,1938	0,22750534	4,4831	4,5416	4,0644	4,36303333	0,2125119	4,2648	3,7291	4,5382	4,17736667	0,4115752	4,332	4,4039	4,3735	4,3698	0,03609252	4,276	0,104655969
F11	4,2681	4,562	4,1042	4,31143333	0,23195591	3,8258	3,954	4,1556	3,97846667	0,13574725	5,259	5,7915	5,7941	5,61486667	0,30819232	5,3037	5,0664	4,9288	5,09963333	0,189646628	4,7511	0,743379083
F12	8,3451	7,3741	8,0879	7,9357	0,50307443	7,7217	6,9899	7,0733	7,26163333	0,32709315	7,9462	6,1648	7,5536	7,22153333	0,93597419	7,7045	7,7495	9,0957	8,18323333	0,790539571	7,650525	0,483174754
F13	2,9636	3,1014	2,9698	3,0116	0,07783084	3,4392	3,0785	3,1095	3,20906667	0,16322023	3,4093	3,1351	3,2863	3,2769	0,13734147	3,2862	4,1166	3,6113	3,671366667	0,418445986	3,292233333	0,276676079
F14	6,9743	6,6804	7,6183	7,091	0,47971686	6,6191	6,5701	6,5139	6,5677	0,04298124	6,5045	6,7968	6,3448	6,5487	0,22921874	6,965	5,5679	5,7879	6,106933333	0,751204901	6,578583333	0,402507152
F15	8,559	8,0479	7,935	8,18063333	0,33250204	8,5287	8,7876	8,7605	8,69226667	0,11618704	8,8001	9,2003	9,2133	9,07123333	0,2348983	9,057	8,9431	9,0201	9,006733333	0,058114571	8,737716667	0,406616476
F16	3,0371	3,1064	3,0579	3,06713333	0,0355607	3,1645	3,3914	3,3726	3,3095	0,10281735	2,8116	2,6416	2,4983	2,6505	0,1568395	3,0762	3,0343	3,207	3,105833333	0,090082869	3,033241667	0,276422409

Rt																						
CARAS	1					2					3					4					Media	Desviación
TAG	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Media	Desviación
F1	35,5953	32,814	26,8153	31,7415333	4,4871749	33,2009	37,4416	32,5458	34,3961	2,65774184	39,524	58,4682	39,9471	45,9797667	10,8173693	41,6205	37,9081	49,3231	42,95056667	5,82257368	38,76699167	6,782039559
F2	53,7628	60,1457	52,6654	55,5246333	4,03940151	46,3256	41,5194	40,1309	42,6586333	3,25068708	60,8953	61,863	70,8437	64,534	5,48574028	51,2731	51,7052	53,3067	52,095	1,071373077	53,70306667	9,040512671
F3	49,3894	57,7976	60,9677	56,0515667	5,98337129	54,3776	65,9978	48,3289	56,2347667	8,97966079	52,7263	50,98	68,1834	57,2965667	9,46861901	43,6724	56,3356	46,0563	48,6881	6,729334067	54,56775	3,958003747
F4	46,1352	39,2553	46,8024	44,0643	4,17805573	31,5772	30,8003	42,9701	35,1158667	6,81304846	39,7641	42,3154	43,1415	41,7403333	1,76060613	44,3416	43,6734	47,1177	45,04423333	1,826491397	41,49118333	4,470340479
F5	68,1965	63,8317	59,8685	63,9655667	4,16561355	57,6026	58,5716	62,0819	59,4187	2,35673841	55,5771	57,9921	61,8627	58,4773	3,17076586	42,1387	39,8226	48,0015	43,32093333	4,215668161	56,295625	8,975595287
F6	44,2612	36,0927	38,8033	39,7190667	4,16053717	51,6913	31,3371	35,034	39,3541333	10,8430175	43,2646	39,6807	31,565	38,1701	5,99429682	46,0141	31,8217	29,7259	35,8539	8,861170489	38,2743	1,743806617
F7	35,0385	33,6842	32,1852	33,6359667	1,42726139	33,3981	29,943	37,9332	33,7581	4,00724644	32,9176	32,8249	38,7059	34,8161333	3,3689556	30,2202	43,9399	45,5449	39,90166667	8,422713569	35,52796667	2,963559257
F8	56,0074	41,5194	53,4714	50,3327333	7,73718019	40,5331	47,2498	58,0191	48,6006667	8,82092283	64,894	58,8384	51,9049	58,5457667	6,4994927	51,0208	63,7142	57,8181	57,5177	6,352029676	53,74921667	5,012926092
F9	42,8253	60,9526	59,5884	54,4554333	10,0950612	68,3323	55,1305	70,1359	64,5329	8,19250191	50,1381	62,4252	78,8424	63,8019	14,4015863	52,2193	48,244	42,8253	47,76286667	4,715445468	57,638275	8,024551864
F10	37,9607	46,159	42,1338	42,0845	4,09937234	38,2008	37,2863	40,5677	38,6849333	1,69342414	36,7199	32,0079	41,0258	36,5845333	4,51047372	39,1677	44,9886	37,3536	40,5033	3,988881644	39,46431667	2,369629893
F11	38,7316	39,2405	40,7388	39,5703	1,04345052	47,0965	45,5488	46,0149	46,2200667	0,79398605	42,013	54,1901	47,2177	47,8069333	6,10989673	57,9135	47,0234	43,6667	49,53453333	7,447964186	45,78295833	4,357330109
F12	63,4379	72,1295	68,5512	68,0395333	4,3683326	76,7845	61,2963	65,8552	67,9786667	7,95945462	58,2908	46,1642	53,2505	52,5685	6,09199884	68,1595	59,1955	62,8939	63,4163	4,50477528	63,00075	7,284081129
F13	30,7602	36,5302	30,2965	32,5289667	3,47291744	33,4079	29,7977	28,5359	30,5805	2,5285723	30,879	25,3154	26,1158	27,4367333	3,00783309	31,9323	30,5741	27,9366	30,17346667	2,031696007	30,17346667	2,097969762
F14	53,1533	57,454	53,6747	54,7606667	2,34701892	52,2721	79,6121	60,2643	64,0495	14,0575497	46,6854	52,9199	50,9098	50,1717	3,18211271	60,8501	39,9342	42,0713	47,61853333	11,50858664	54,1501	7,230950645
F15	64,1682	62,5371	65,1798	63,9617	1,33339698	60,3765	67,2892	62,972	63,5459	3,49190152	60,1292	63,6643	67,5904	63,7946333	3,73230712	60,5572	64,8563	60,484	61,96583333	2,503485115	63,31701667	0,916845727
F16	27,0265	37,4462	31,773	32,0819	5,21671366	27,7378	28,4508	38,0628	31,4171333	5,76634688	35,4958	25,1732	20,9289	27,1993	7,49182587	27,6872	24,8321	32,7529	28,42406667	4,011483207	29,7806	2,343609425

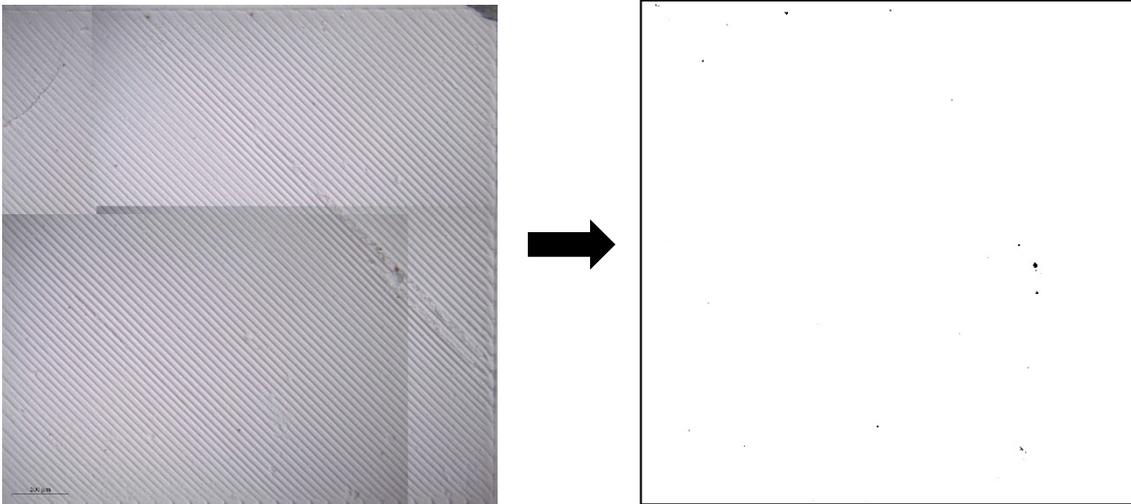
Rz																						
CARAS	1					2					3					4					Media	Desviación
TAG	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación	Media	Desviación
F1	19,3865	19,8837	17,2513	18,8405	1,39855977	20,6938	22,3832	22,0675	21,7148333	0,89821959	23,0267	23,5177	21,9373	22,8272333	0,80886108	21,4314	22,3804	23,1007	22,30416667	0,837256988	21,42168333	1,779774514
F2	29,5873	28,99	27,6359	28,7377333	0,99985966	26,3636	26,5922	24,8082	25,9213333	0,97075427	34,6761	33,636	36,7791	35,0304	1,60122321	35,5329	32,3328	31,2573	33,041	2,224038954	30,68261667	4,119772729
F3	30,4539	33,2813	29,3265	31,0205667	2,03738658	39,7095	38,036	27,4194	35,0549667	6,66532515	32,4292	31,0611	29,3816	30,9573	1,52644924	27,1257	31,4485	26,6585	28,4109	2,640990208	31,36093333	2,746352021
F4	25,8871	23,3013	25,7455	24,9779667	1,45376098	20,4207	21,0392	22,1001	21,1866667	0,84935617	24,7763	22,1931	24,4634	23,8109333	1,40979258	27,5593	25,2502	25,1328	25,98076667	1,368309652	23,98908333	2,068007845
F5	38,8635	38,4803	38,5638	38,6358667	0,20150872	35,1078	36,7986	36,257	36,0544667	0,86340371	36,0054	33,8515	36,7723	35,5430667	1,51429265	28,8478	26,1215	30,6268	28,53203333	2,269187842	34,69135833	4,323574981
F6	24,681	22,2507	22,7028	23,2115	1,2925445	26,7335	23,2055	20,8889	23,6093	2,94314935	22,4372	22,7149	21,4809	22,211	0,6473514	21,4071	20,3263	19,8391	20,52416667	0,802508201	22,38899167	1,375369732
F7	20,2354	20,1409	19,8374	20,0712333	0,2079449	19,377	18,3978	18,2795	18,6847667	0,60240266	21,1382	20,3746	20,0829	20,5319	0,54495136	20,3502	23,0584	24,5929	22,66716667	2,148237292	20,48876667	1,650862111
F8	31,7781	29,4264	29,3271	30,1772	1,38730881	27,1386	27,3588	28,816	27,7711333	0,91155459	35,8279	34,3098	31,9447	34,0274667	1,95693501	30,3508	31,3516	32,326	31,3428	0,987629404	30,82965	2,599331296
F9	26,9713	32,7443	31,7832	30,4996	3,09315437	47,4914	32,1426	33,0293	37,5544333	8,61707834	32,1315	39,3763	36,5652	36,0243333	3,6525586	28,9478	28,9657	26,9713	28,29493333	1,146335031	33,09325	4,406217931
F10	23,095	22,6777	22,1344	22,6357	0,4816753	23,0269	23,4859	22,4538	22,9888667	0,51710009	23,7286	21,8365	24,3138	23,2929667	1,29483054	23,6357	25,2421	23,6292	24,169	0,929337544	23,27163333	0,655766787
F11	25,1388	25,5684	22,7568	24,488	1,51457226	22,4287	21,9223	24,7563	23,0357667	1,51138561	28,9396	30,9435	30,6509	30,178	1,08241841	29,7642	27,4957	26,172	27,81063333	1,816689974	26,3781	3,226714629
F12	35,2849	31,9051	38,3139	35,1679667	3,20599975	37,745	34,0797	35,0566	35,6271	1,89808027	37,3611	30,1335	36,8518	34,7821333	4,03388033	36,965	35,9894	37,7679	36,90743333	0,890646396	35,62115833	0,924460981
F13	17,3533	17,8675	17,2786	17,4998	0,32062048	18,8155	17,0027	18,3135	18,0439	0,93598829	18,2282	17,4647	18,1984	17,9637667	0,43246117	18,1008	20,5731	18,9437	19,20586667	1,256827491	18,17833333	0,725796898
F14	31,9111	30,6376	34,0674	32,2053667	1,733732	32,8964	34,8044	32,2064	33,3024	1,3457444	29,5809	33,6617	30,9657	31,4027667	2,07521146	32,3736	28,2257	27,5766	29,39196667	2,602486446	31,575625	1,650915926
F15	40,6644	38,8696	37,933	39,1556667	1,38798851	40,263																

ANEXO C. PROCESADO DE LAS IMÁGENES OBTENIDAS EN EL MICROSCOPIO PARA LA OBTENCIÓN DEL % DE RESIDUOS EN CADA PIEZA.

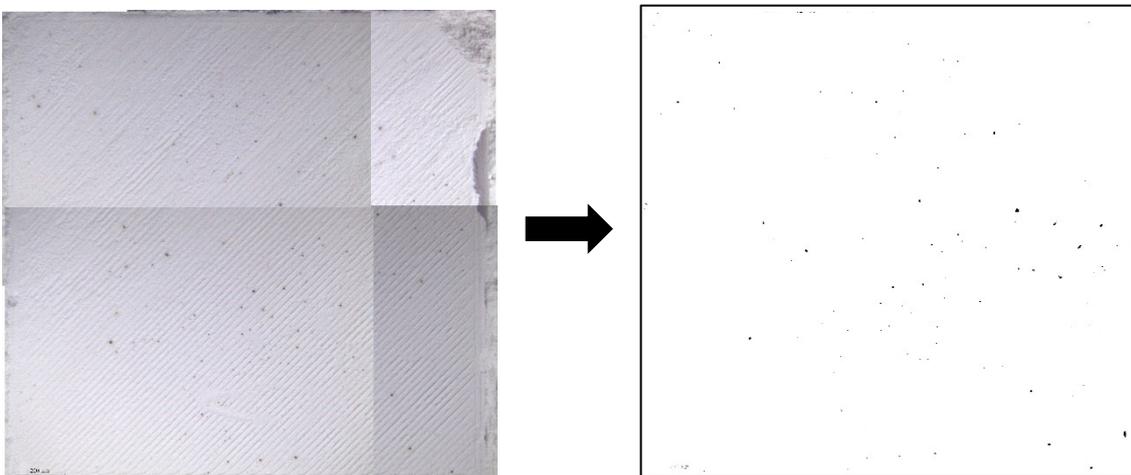
Como se menciona en el apartado 3.5.4 “Análisis de residuos”, el análisis de residuos se realizó a través de inspección visual obteniendo fotos en el microscopio para su posterior procesado.

Para realizarlo, se tuvo que realizar cuatro fotografías por pieza, que luego se juntaron a formato collage para su posterior procesado en el software *ImageJ*. Las imágenes y el procesado que se obtuvieron son los siguientes:

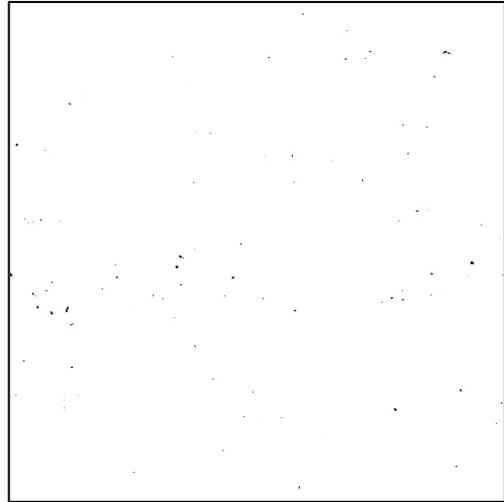
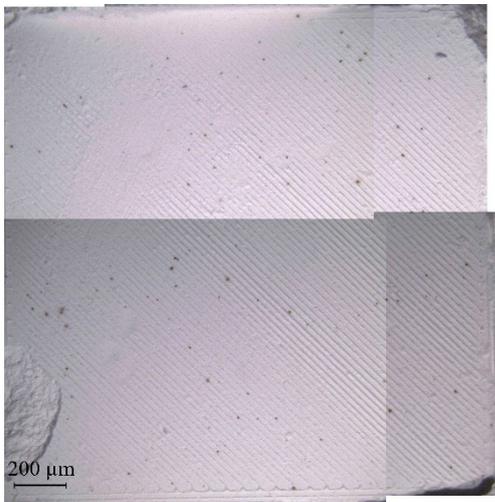
➤ PROBETA F1



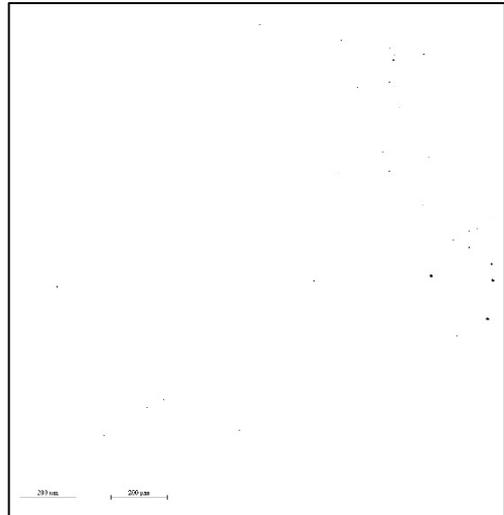
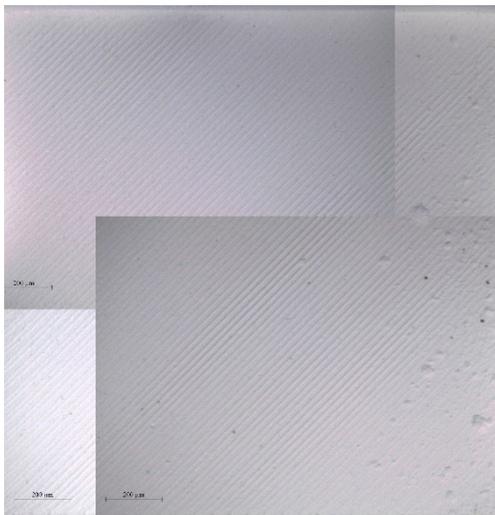
➤ PROBETA F2



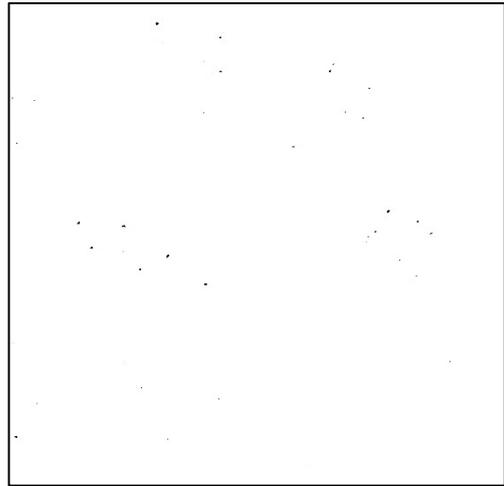
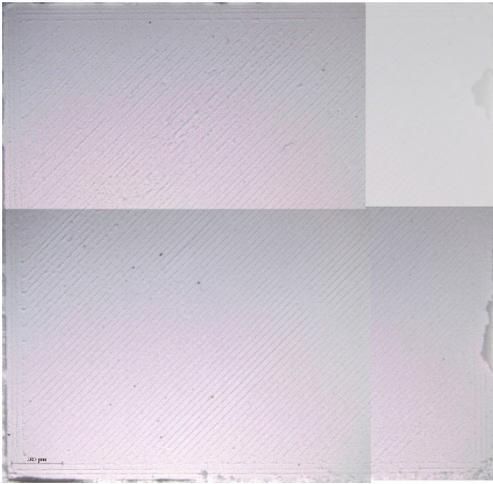
➤ PROBETA F3



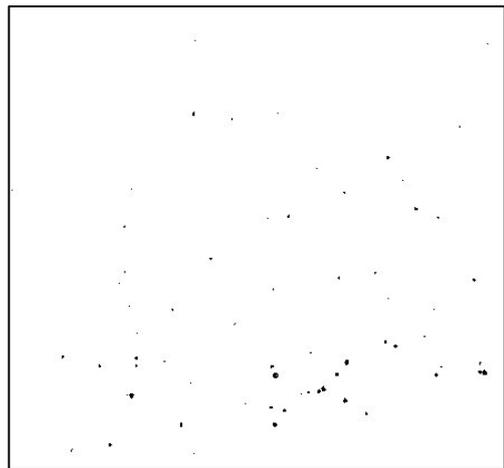
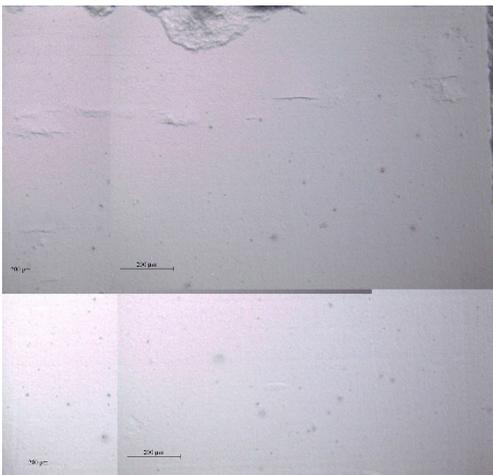
➤ PROBETA F4



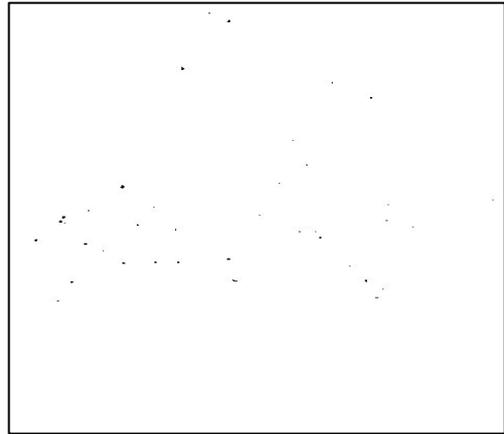
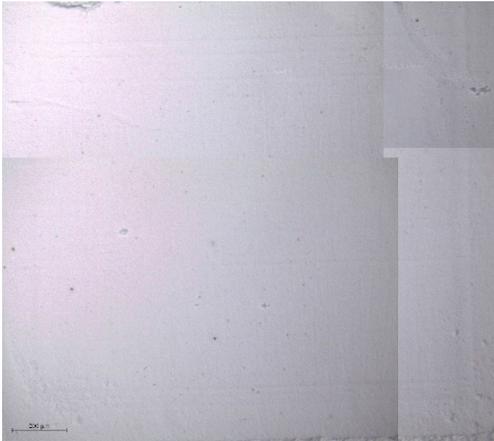
➤ PROBETA F5



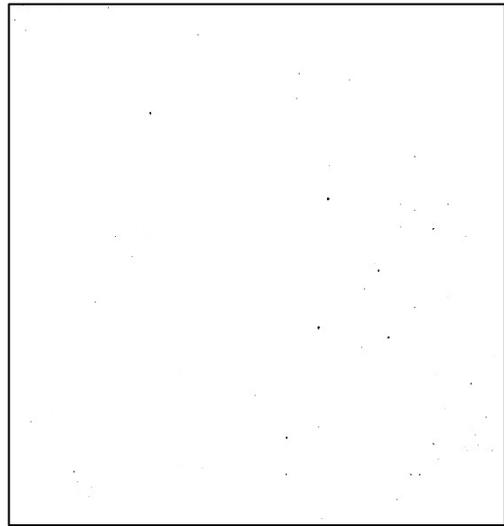
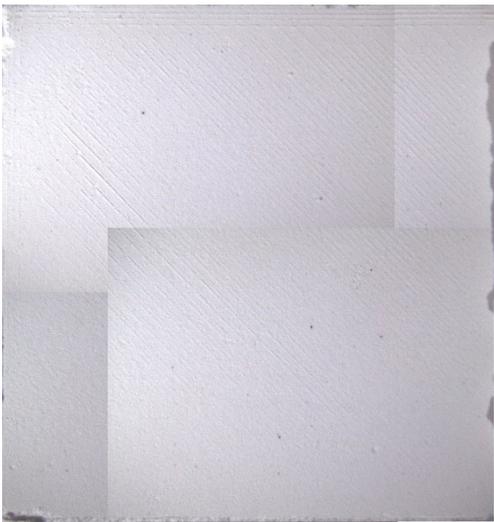
➤ PROBETA F6



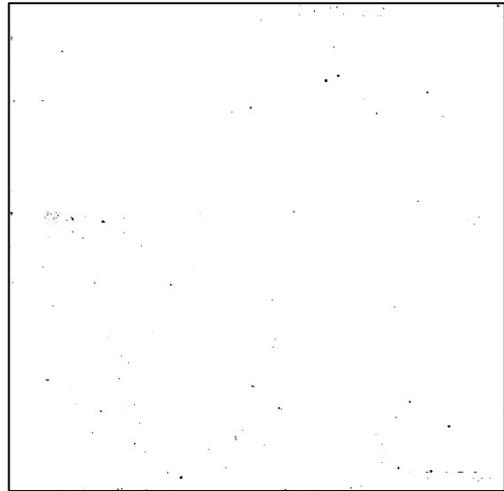
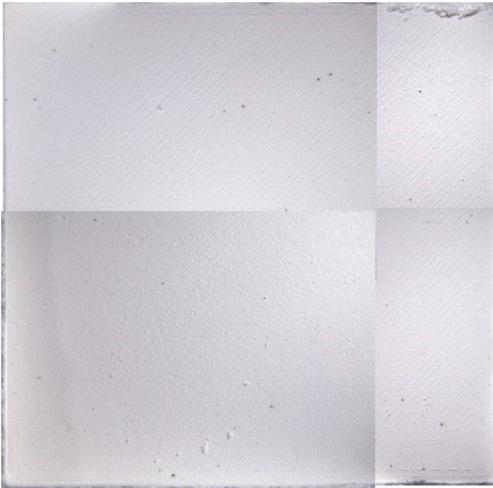
➤ PROBETA F7



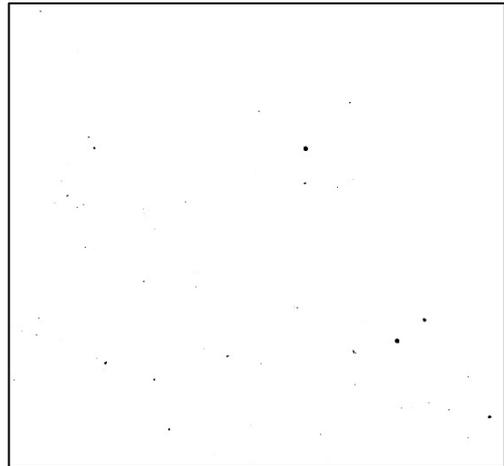
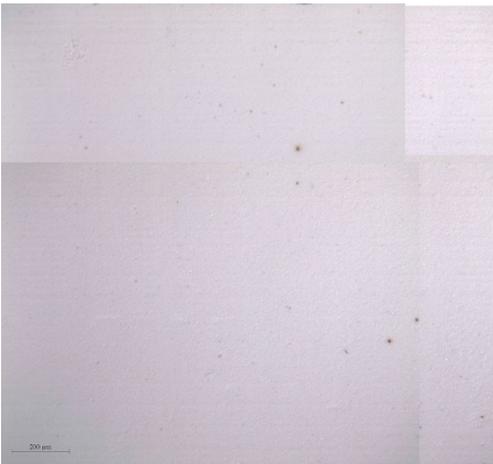
➤ PROBETA F8



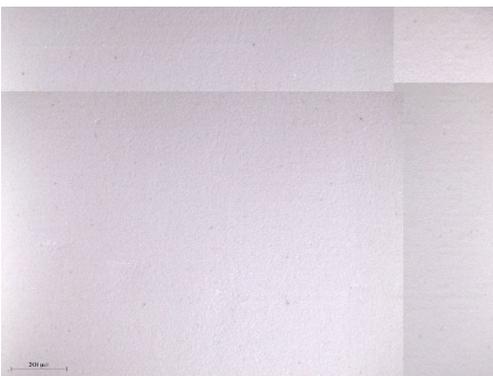
➤ PROBETA F9



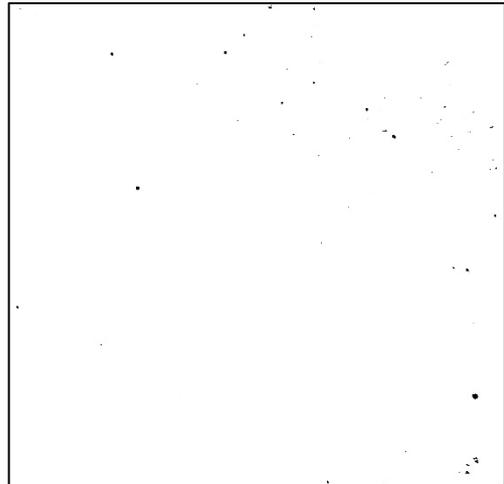
➤ PROBETA F10



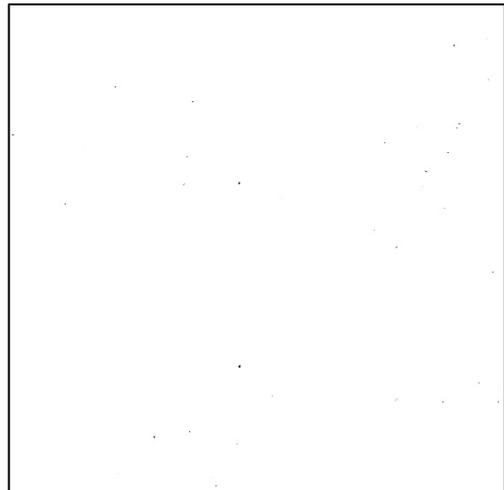
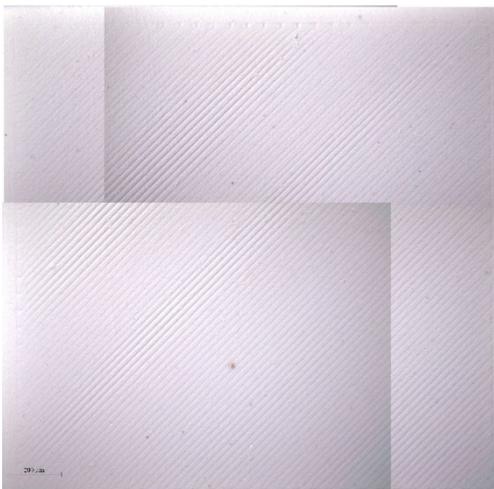
➤ PROBETA F11



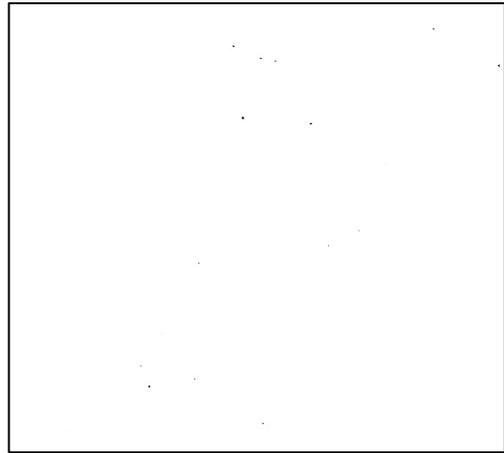
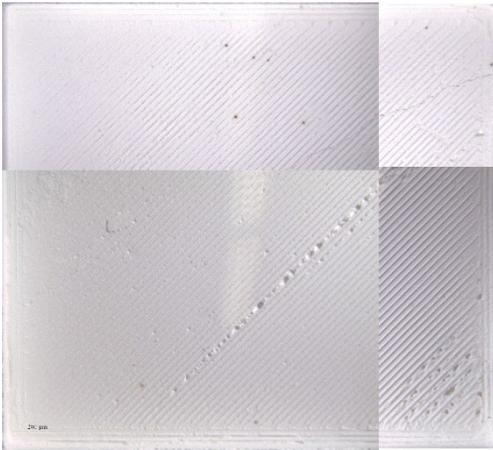
➤ PROBETA F12



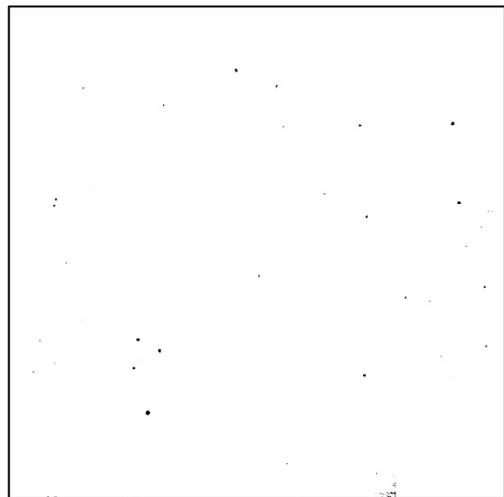
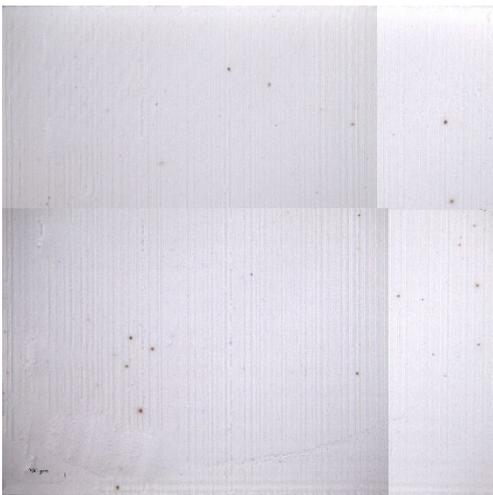
➤ PROBETA F13



➤ PROBETA F14



➤ PROBETA F15



➤ PROBETA F16

