



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil y Fabricación

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Estudio y Evaluación de la influencia
de la Alta Velocidad de impresión en
procesos de fabricación aditiva FFF
sobre defectos Macros y
Microgeométicos**

Autor: D. ÁLVARO FERNÁNDEZ GUERRA

Tutor: DR. FERMÍN BAÑÓN GARCÍA

Cotutor: DR. SERGIO MARTÍN BÉJAR

Grado en Ingeniería Mecánica

1 DE OCTUBRE DE 2025



Agradecimientos

Quisiera expresar mi agradecimiento a todas las personas que, de una forma u otra, han hecho posible la realización de este proyecto.

En primer lugar, a mi tutor, Fermín, por su disposición, sus orientaciones claras y su apoyo constante a lo largo del proceso. Su acompañamiento ha sido clave para poder desarrollar este trabajo con rigor y confianza.

A mi familia, por su constante respaldo a lo largo de toda mi formación. Su apoyo, tanto en lo académico como en lo personal, ha sido esencial para mantenerme enfocado y motivado.

A mis amigos y compañeros, por compartir este camino, por las conversaciones, el ánimo y las pausas necesarias que han hecho más llevadero el proceso.

Y de forma muy especial, a mi pareja, por su paciencia, su comprensión y su cercanía en los momentos más exigentes. Su apoyo ha sido un gran pilar durante esta etapa y le agradezco profundamente haber estado ahí, incluso en los días más complicados.

Gracias a todos por haber contribuido, de una forma u otra, a que este proyecto saliera adelante.



Resumen

La Fabricación Aditiva ha evolucionado rápidamente, integrándose en la industria y facilitando el acceso a tecnologías como la impresión 3D. El diseño CAD ha sido clave en este avance, permitiendo la creación de geometrías complejas aplicables a múltiples sectores.

Entre las tecnologías destacadas, la FDM/FFF es la más popular por su facilidad de uso y bajo coste. Utiliza filamentos termoplásticos, como el PLA, para fabricar piezas capa por capa, donde la calidad superficial depende de la altura de capa y los parámetros de impresión.

Uno de los desafíos en fabricación aditiva es optimizar los tiempos de producción sin comprometer la calidad. La velocidad de impresión influye en la precisión y adhesión de las capas, por lo que es clave determinar la velocidad óptima.

Este TFG analiza la impresión a alta velocidad en FFF con una Bambu Lab X1 Carbon y sistema AMS. Se evaluarán probetas cilíndricas y cúbicas, variando la velocidad (60-500 mm/s) y la temperatura (215-235 °C). La calidad superficial y los defectos geométricos se estudiarán con tecnología de medición avanzada.

Palabras Clave

- Fabricación de deposición de material
- Ciclo de fabricación reducido
- Control de parámetros
- Optimización de procesos
- Eficiencia productiva



Abstract

Additive Manufacturing has rapidly evolved, integrating into the industry and making technologies like 3D printing more accessible. CAD design has played a key role in this advancement, enabling the creation of complex geometries applicable to various sectors.

Among the prominent technologies, FDM/FFF is the most popular due to its ease of use and low cost. It utilizes thermoplastic filaments, such as PLA, to manufacture parts layer by layer, where surface quality depends on layer height and printing parameters.

One of the challenges in additive manufacturing is optimizing production times without compromising quality. Printing speed affects precision and layer adhesion, making it crucial to determine the optimal speed.

This thesis analyzes high-speed printing in FFF using a Bambu Lab X1 Carbon with an AMS system. Cylindrical and cubic specimens will be evaluated, varying speed (60-500 mm/s) and temperature (215-235 °C). Surface quality and geometric defects will be assessed using advanced measurement technology.

Keywords

- Material deposition manufacturing
- Reduced manufacturing cycle
- Parameter control
- Process optimization
- Productive efficiency



Glosario

ABS - Acrilonitrilo Butadieno Estireno
AMS - Automated Material System
CAD - Computer Aided Design
CLIP - Continous Liquid Interfase Production
CNC - Computer Numerical Control
DLP - Procesamiento digital de luz
DMLS - Sinterizado Directo de Metal por Láser
FFF - Fused Filament Fabrication
ISO - International Organization for Standardization
LCD - Liquid Crystal Display
MJF - Multijet Fusion
PA - Poliamidas
PBF - Powder Bed Fusion
PEEK - Polietereetercetona
PET-G - Tereftalato de polietileno glicolizado
PLA - Ácido Poliláctico
PP - Polipropileno
PVA - Alcohol polivinílico
Ra - Valor promedio de rugosidad
Rq - Raíz cuadrada media de las desviaciones
Rz - Rugosidad de la superficie
Sa - Promedio de la altura de la superficie
Sdr - Spatial Deviation Ratio
SLA - Estereolitografía
SLM - Fusión selectiva por láser
SLS - Sinterizado selectivo por láser
TPU - Poliuretano Termoplástico
Ultem - Polietierimida
UV - Ultravioleta



Índice

1. Introducción	1
1.1. Justificación del tema elegido	1
1.2. Objetivos del estudio	1
1.3. Impacto esperado en la investigación y la industria	2
2. Aproximación al estado del arte	2
2.1. Contexto de la Fabricación Aditiva	2
2.2. Principales tecnologías de fabricación aditiva	2
2.2.1. SLA	2
2.2.2. DLP	3
2.2.3. FFF	4
2.2.4. DMLS	4
2.2.5. SLS	5
2.2.6. SLM	6
2.2.7. MJF	6
2.2.8. CLIP	7
2.3. Enfoque en la tecnología FFF	8
2.4. Descripción del proceso	8
2.5. Aplicaciones prácticas	9
2.6. Ventajas y desventajas	10
2.7. Sectores de interés	12
2.8. Tipos de materiales y sus propiedades	16
2.8.1. PLA	16
2.8.2. ABS	16
2.8.3. PET-G	16
2.8.4. TPU	16
2.8.5. PVA	16
2.8.6. PP	17
2.8.7. PA	17
2.8.8. Materiales Compuestos	17
2.9. Enfoque en el PLA	18
2.10. Principales parámetros tecnológicos	19
2.11. Importancia de la velocidad de impresión	21
2.12. Calidad superficial	22
2.13. Normativa relacionada	26
2.14. Defectos de forma y su relevancia en la calidad geométrica de piezas	27
2.15. Defectos de forma y parámetros característicos	31
2.16. Relación entre la velocidad de impresión y la calidad superficial	32
2.17. Defectos geométricos asociados a parámetros tecnológicos	37
2.18. Análisis y estudios bibliográficos sobre alta velocidad en procesos FFF	37
3. Metodología del Estudio	41
3.1. Impresora 3D Utilizada	41
3.2. Instrumentación Medición utilizada	42
3.3. Software de Medición utilizado	43
3.4. Software de Laminación utilizado	44
3.5. Dimensionamiento de las probetas	45



3.6. Configuración variables del Laminador	46
3.7. Impresión de las probetas	47
3.8. Análisis de defectos macrogeométricos	47
3.9. Análisis defectos microgeométricos	49
4. Resultados y discusiones	51
4.1. Resultados obtenidos defectos microgeométricos	51
4.1.1. Inspección visual	51
4.1.2. Estudio gráfico de la dispersión y evolución de los datos	62
4.1.3. Estudio gráfico de la dispersión y evolución de los datos	74
5. Conclusiones y líneas futuras	84
5.1. Conclusiones y discusiones	84
5.2. Futuras líneas de investigación	85
6. Anexos	86
6.1. Parámetros defectos microgeométricos	86
7. Bibliografía	89



Índice de figuras

1.	Proceso SLA [3].	3
2.	Proceso DLP [5].	3
3.	Proceso FFF [7].	4
4.	Proceso DMLS [9].	5
5.	Proceso SLS [11].	5
6.	Proceso SLM [13].	6
7.	Proceso MFL [15].	7
8.	Proceso CLIP [17].	7
9.	Tecnología FFF [20].	9
10.	Aplicación práctica Tecnología FFF [21].	10
11.	Piezas impresas en 3D [23].	13
12.	Los componentes impresos en 3D de alto rendimiento [23].	13
13.	Usos impresión 3D en automoción [24].	15
14.	Aplicación dental de la tecnología FFF [25].	15
15.	Comparativa distintos filamentos del mercado [27].	17
16.	Defecto de forma ondulación [45].	27
17.	Defecto de forma falta de redondez [46].	27
18.	Defecto de forma planitud [47].	28
19.	Defecto de forma cilindridad [48].	28
20.	Defecto de forma rectitud [48].	29
21.	Resumen de tolerancias de forma [52].	31
22.	Probeta tipo mancuerna para ensayo de tracción [54].	33
23.	Parámetros de impresión recomendados por el fabricante de PLA [54].	33
24.	Dimensiones de la probeta para ensayos de tracción [54].	34
25.	Efecto de la velocidad frente a la rugosidad superficial [55].	35
26.	Efecto de la velocidad frente a porcentaje de error [55].	35
27.	Diferencias en las mediciones de los artefactos lineales respecto a las dimensiones nominales [57].	40
28.	Gráfico de radar para la impresora 3D de alta velocidad y la impresora 3D de baja velocidad (Flashforge Creator 3) [57].	40
29.	Impresora 3D utilizada [58].	42
30.	Alicona InfiniteFocus SL [59].	42
31.	RONDCOM NEX [60].	43
32.	Software medición utilizado [61].	44
33.	Software laminación utilizado [63].	44
34.	Dimensiones de las Probetas.	45
35.	Probetas en Software Laminador.	46
36.	Parámetros Modificados.	46
37.	Probetas Impresas.	47
38.	Evaluación defectos de forma de una de las probetas.	47
39.	Ejemplo de resultados obtenidos en el análisis.	48
40.	Microscopio confocal digital.	50
41.	Ejemplo de superficie digitalizada.	50
42.	Comparación para una Velocidad de 60 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	51



43.	Comparación para una Velocidad de 100 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	51
44.	Comparación para una Velocidad de 150 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	52
45.	Comparación para una Velocidad de 200 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	52
46.	Comparación para una Velocidad de 250 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	52
47.	Comparación para una Velocidad de 300 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	52
48.	Comparación para una Velocidad de 350 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	53
49.	Comparación para una Velocidad de 400 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	53
50.	Comparación para una Velocidad de 450 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	53
51.	Comparación para una Velocidad de 500 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	53
52.	Comparación para una Velocidad de 60 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	55
53.	Comparación para una Velocidad de 100 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	55
54.	Comparación para una Velocidad de 150 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	55
55.	Comparación para una Velocidad de 200 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	56
56.	Comparación para una Velocidad de 250 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	56
57.	Comparación para una Velocidad de 300 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	56
58.	Comparación para una Velocidad de 350 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	56
59.	Comparación para una Velocidad de 400 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	57
60.	Comparación para una Velocidad de 450 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	57
61.	Comparación para una Velocidad de 500 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	57
62.	Comparación para una Velocidad de 60 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	59
63.	Comparación para una Velocidad de 100 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	59
64.	Comparación para una Velocidad de 150 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	59
65.	Comparación para una Velocidad de 200 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	60
66.	Comparación para una Velocidad de 250 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	60



67.	Comparación para una Velocidad de 300 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	60
68.	Comparación para una Velocidad de 350 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	60
69.	Comparación para una Velocidad de 400 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	61
70.	Comparación para una Velocidad de 450 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	61
71.	Comparación para una Velocidad de 500 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.	61
72.	Evolución del parámetro Sa para superficie cilíndrica.	63
73.	Evolución del parámetro Sa para superficie cuadrada.	63
74.	Evolución del parámetro Sz para superficie cilíndrica.	64
75.	Evolución del parámetro Sz para superficie cuadrada.	64
76.	Evolución del parámetro Sk para superficie cilíndrica.	65
77.	Evolución del parámetro Sk para superficie cuadrada.	65
78.	Evolución del parámetro Vvc para superficie cilíndrica.	66
79.	Evolución del parámetro Vvc para superficie cuadrada.	66
80.	Evolución del parámetro Sa para superficie cilíndrica.	67
81.	Evolución del parámetro Sa para superficie cuadrada.	67
82.	Evolución del parámetro Sz para superficie cilíndrica.	68
83.	Evolución del parámetro Sz para superficie cuadrada.	68
84.	Evolución del parámetro Sk para superficie cilíndrica.	69
85.	Evolución del parámetro Sk para superficie cuadrada.	69
86.	Evolución del parámetro Vvc para superficie cilíndrica.	70
87.	Evolución del parámetro Vvc para superficie cuadrada.	70
88.	Evolución del parámetro Sa para superficie cilíndrica.	71
89.	Evolución del parámetro Sa para superficie cuadrada.	71
90.	Evolución del parámetro Sz para superficie cilíndrica.	72
91.	Evolución del parámetro Sz para superficie cuadrada.	72
92.	Evolución del parámetro Sk para superficie cilíndrica.	73
93.	Evolución del parámetro Sk para superficie cuadrada.	73
94.	Evolución del parámetro Vvc para superficie cilíndrica.	74
95.	Evolución del parámetro Vvc para superficie cuadrada.	74
96.	Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.	75
97.	Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.	75
98.	Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.	76
99.	Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.	76
100.	Evolución del defecto cilíndricidad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.	77
101.	Evolución del defecto cilíndricidad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.	77
102.	Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.	78



103. Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.	78
104. Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.	79
105. Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.	79
106. Evolución del defecto cilindridad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.	80
107. Evolución del defecto cilindridad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.	80
108. Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.	81
109. Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.	81
110. Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.	82
111. Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.	82
112. Evolución del defecto cilindridad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.	83
113. Evolución del defecto cilindridad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior	83



Índice de tablas

1.	Ventajas y limitaciones de la fabricación aditiva (AM) [1].	11
2.	Propiedades del Material PLA [29].	19
3.	Resumen parámetros tecnológicos [30].	20
4.	Tabla de categorías de R_a y sus longitudes de corte correspondientes [40]. . .	23
5.	Normas relacionadas con ISO 4287/4288.	26
6.	Configuración de parámetros para cada orden de ejecución según el diseño experimental Taguchi L9 [55]	36
7.	Tiempo de impresión y rugosidad superficial (R_a) en la parte superior y lateral para cada orden de ejecución [55].	36
8.	Especificaciones de la impresora [57].	38
9.	Configuración para cada impresora [57].	39
10.	Valores medios de las mediciones en ambas impresoras. [57].	39
11.	Valores de diámetros a bajas y altas velocidades [57].	39
12.	Especificaciones de la Impresora 3D [58].	41
13.	Intervalos de Velocidad y Temperatura.	45
14.	Parámetros superficiales para 215 °C.	86
15.	Parámetros superficiales para 225 °C.	87
16.	Parámetros superficiales para 235 °C.	88

1. Introducción

1.1. Justificación del tema elegido

La fabricación aditiva, en particular la tecnología de modelado por deposición fundida (FFF), ha ganado una notable popularidad en los últimos años debido a su capacidad para fabricar piezas funcionales de forma rápida y económica. Sin embargo, una de sus principales limitaciones sigue siendo la calidad superficial de las piezas impresas, la cual puede afectar directamente la funcionalidad, la precisión dimensional y la estética del producto final.

En este contexto, el presente Trabajo de Fin de Grado se justifica por la necesidad de optimizar los parámetros de impresión FFF, específicamente la velocidad de impresión, sin comprometer significativamente la calidad superficial de las piezas. A medida que se incrementa la velocidad, se reduce el tiempo de fabricación, lo cual es altamente deseable para aplicaciones industriales. No obstante, este aumento puede generar defectos superficiales que afecten la viabilidad del proceso para determinadas aplicaciones exigentes.

Además, el estudio se enriquece mediante el uso de tecnología de medición avanzada como el sistema Alicona, que permite realizar una caracterización precisa y objetiva de la rugosidad superficial, superando los métodos tradicionales de inspección visual o medición con rugosímetros de contacto.

Otro aspecto clave que motiva esta investigación es el análisis sobre cómo la geometría de las probetas influye en la calidad superficial cuando se imprimen a diferentes velocidades. Este enfoque permite aportar información relevante y poco explorada en la literatura técnica, abriendo la puerta a estrategias de diseño más inteligentes para manufactura aditiva.

En definitiva, este proyecto aporta valor al sector de la impresión 3D al generar conocimiento útil para equilibrar velocidad de producción y calidad superficial, algo de gran interés tanto en entornos industriales como académicos, donde la eficiencia y la calidad son parámetros clave.

1.2. Objetivos del estudio

El presente trabajo tiene como objetivo principal analizar el impacto de la impresión a alta velocidad en la calidad superficial de piezas fabricadas mediante la tecnología FFF. Para ello, se evaluará la variación de la rugosidad superficial en función de diferentes velocidades y temperaturas de impresión, con distintas geometrías de las probetas. De este objetivo general se derivan los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar el efecto de la velocidad de impresión sobre la calidad superficial de piezas impresas en 3D mediante FFF, considerando distintas configuraciones de impresión.
2. Comparar la rugosidad superficial de probetas con diferentes geometrías y evaluar cómo influye la velocidad en cada caso.
3. Establecer una relación entre velocidad de impresión y calidad superficial, identificando los límites en los que la velocidad compromete la calidad de la pieza.
4. Proponer recomendaciones para optimizar la impresión a alta velocidad sin sacrificar significativamente la calidad superficial.

1.3. Impacto esperado en la investigación y la industria

En esta investigación sobre la Alta Velocidad en impresión 3D FFF y su impacto en la calidad superficial puede tener repercusiones significativas en la investigación y la industria. En el ámbito académico, contribuirá al conocimiento sobre la optimización de parámetros de impresión, la metrología con tecnología Alicona y la posible estandarización del proceso.

En la industria, permitirá reducir tiempos de fabricación sin comprometer la calidad, beneficiando sectores como la automoción y la aeronáutica, además de optimizar el post-procesado y fomentar el desarrollo de nuevos materiales y estrategias de impresión adaptadas a altas velocidades.

2. Aproximación al estado del arte

2.1. Contexto de la Fabricación Aditiva

La tecnología conocida como Fabricación Aditiva o Additive Manufacturing (AM), como se conoce internacionalmente, consiste, básicamente, en manipular material a escala micrométrica y depositarlo de forma muy precisa para construir un sólido.

Aunque novedosas, son muy diversas las tecnologías que permiten fabricar piezas por este principio, y van a suponer ser una nueva revolución industrial. La posibilidad de prescindir de utillajes, de reproducir cualquier geometría que el ser humano pueda imaginar (y dibujar), la inmediatez en la respuesta a la demanda cambiante del consumidor, y otra serie de ventajas que se explican más adelante, hacen del AM una auténtica pieza angular del futuro industrial en los países más desarrollados [1].

2.2. Principales tecnologías de fabricación aditiva

En la actualidad, existen diversas tecnologías de fabricación, cada una desarrollada para satisfacer distintos requisitos funcionales, de precisión, velocidad y tipo de material.

Estas tecnologías abarcan tanto procesos sustractivos tradicionales como métodos avanzados de fabricación aditiva, permitiendo una amplia versatilidad en la producción de componentes para sectores como la ingeniería, la medicina, la automoción y la industria aeroespacial.

2.2.1. SLA

Se basa en el principio de fotopolimerización selectiva de resinas sensibles a los rayos UV. Mediante el paso de un láser, la resina se va solidificando capa a capa, obteniendo piezas con resoluciones bastante altas (**Figura 1**). Con este tipo de tecnología se pueden obtener resoluciones de capa desde los 25 hasta los 100 micrómetros. A diferencia de otros métodos de fabricación, las piezas obtenidas mediante este proceso requieren un post-procesamiento para finalizar su fabricación [2].

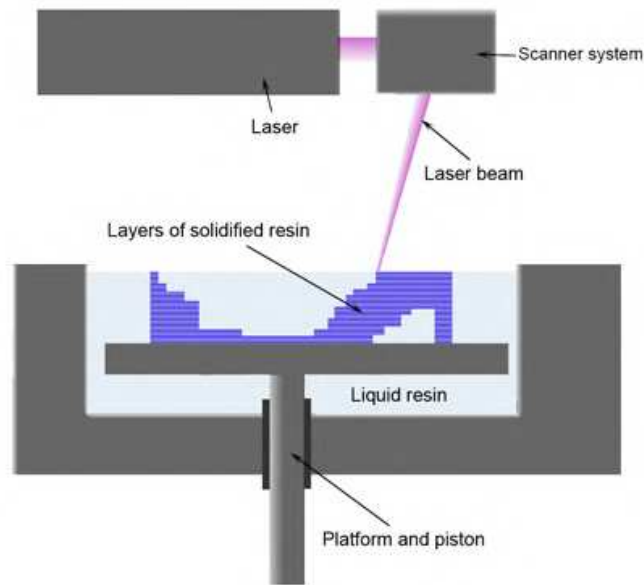


Figura 1: Proceso SLA [3].

2.2.2. DLP

Es una tecnología de impresión 3D utilizada para producir de forma rápida piezas de fotorolímico. Es muy similar a la SLA con una diferencia significativa: mientras que las máquinas de SLA utilizan un láser que traza una capa, una máquina de DLP utiliza una fuente de luz proyectada para curar toda la capa a la vez. La pieza se forma capa a capa (**Figura 2**).

La impresión DLP puede utilizarse para imprimir artículos con diseños de resina extremadamente intrincados, como juguetes, moldes de joyería, moldes dentales, estatuillas y otros objetos con detalles finos. Al curar toda la capa a la vez, es mucho más rápida que la SLA [4].

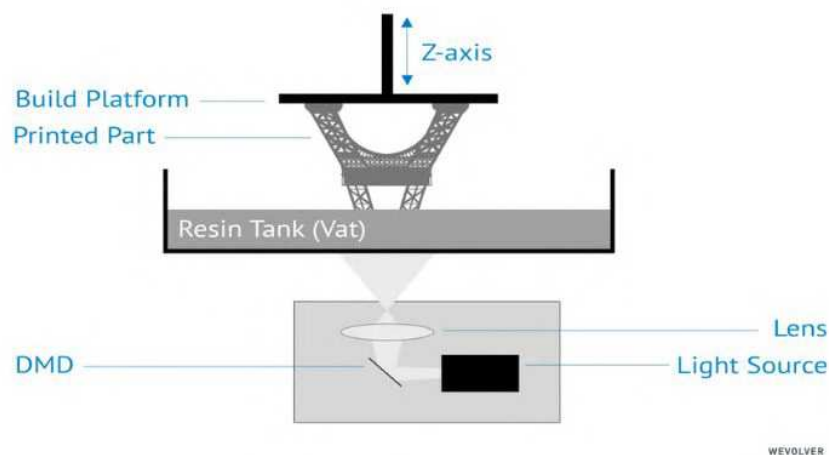


Figura 2: Proceso DLP [5].

2.2.3. FFF

Es un proceso de fabricación utilizado para el modelado de prototipos y la producción a pequeña escala [6].

Se utiliza una técnica aditiva, depositando el material en capas, para conformar la pieza. Un filamento plástico o metálico que inicialmente se almacena en rollos, es introducido en una boquilla. La boquilla se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material y puede desplazarse en tres ejes controlada electrónicamente. La boquilla normalmente la mueven motores a pasos o servomotores. La pieza es construida con finos hilos del material que solidifican inmediatamente después de salir de la boquilla. **(Figura 3)**.

La técnica consiste en termoplásticos de producción para fabricar piezas resistentes, duraderas y dimensionalmente estables con mayor precisión y repetibilidad que cualquier otra tecnología de impresión 3D [6].

Las impresoras 3D que utilizan la tecnología FFF crean piezas capa por capa de abajo a arriba calentando y extruyendo el filamento termoplástico.

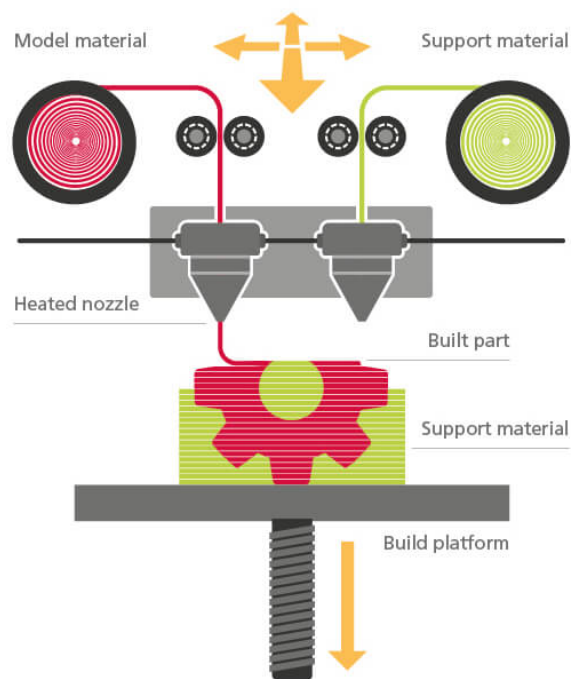


Figura 3: Proceso FFF [7].

2.2.4. DMLS

La sinterización directa de metales por láser (DMLS por sus siglas en inglés) pertenece a la categoría de fusión de lechos de polvo (PBF) de la impresión 3D y es similar a la tecnología SLS. En el DMLS, sin embargo, se utilizan polvos metálicos en lugar de polvos de plástico para crear piezas metálicas que pueden utilizarse tanto para prototipos funcionales como para piezas de producción **(Figura 4)**.

La tecnología de sinterización directa de metales por láser es similar a la tecnología de fusión selectiva por láser (SLM), pero la diferencia entre ambos procesos es la temperatura utilizada para la fusión del polvo metálico. La SLM, como su nombre indica, calienta el polvo metálico hasta que se funde completamente en un líquido.

El DMLS no funde el polvo metálico, sino que sinteriza las partículas lo suficiente como para que sus superficies se suelden. De todos modos, ambos términos (SLM y DMLS) suelen utilizarse indistintamente en la industria de la impresión 3D [8].

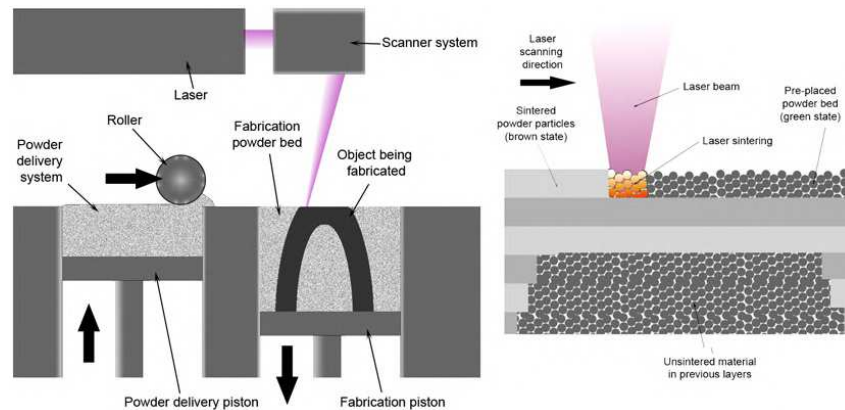


Figura 4: Proceso DMLS [9].

2.2.5. SLS

Es un proceso que utiliza un láser de alta potencia para fusionar y solidificar capas sucesivas de polvo de material. Esta técnica permite crear objetos tridimensionales de manera precisa y eficiente, capa por capa, sin que sea necesaria la utilización de ningún tipo de molde.

Utiliza un lecho de material, como polímeros, metales o cerámicas, que se distribuye uniformemente sobre la plataforma de construcción de la impresora 3D SLS [10].

Un láser de alta potencia se dirige hacia áreas específicas del polvo, fundiéndolo y fusionándolo para crear la primera capa del objeto. Luego, la plataforma desciende ligeramente y se aplica una nueva capa de polvo, repitiendo el proceso hasta completar el objeto deseado capa por capa (**Figura 5**).

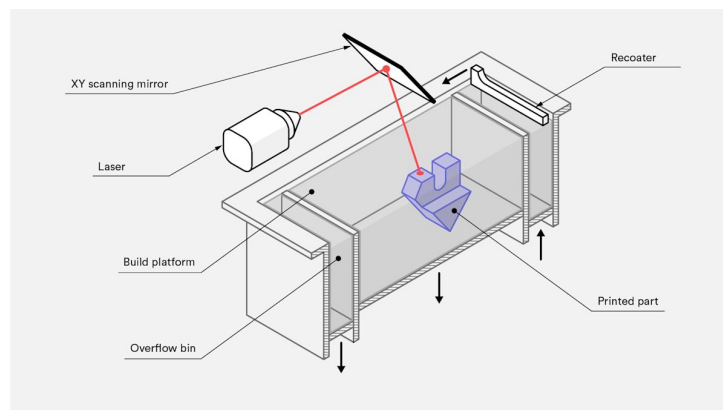


Figura 5: Proceso SLS [11].

2.2.6. SLM

A diferencia de DMLS, SLM derrite completamente el polvo y, por lo tanto, necesita alcanzar una temperatura más alta que esta otra técnica de impresión 3D de metal. La cámara de construcción se llena con un gas inerte (ya sea argón o nitrógeno a niveles de oxígeno inferiores a 500 partes por millón) para crear las condiciones perfectas para la fusión.

El proceso de fusión completa permite que el metal forme un bloque homogéneo con buena resistencia. Se adapta perfectamente a metales puros como titanio o aluminio. Debido a que necesitamos la temperatura más alta para fundir completamente el material, el tiempo de enfriamiento será más largo que para DMLS (**Figura 6**).

El proceso selectivo de fusión por láser utiliza soportes para reforzar ángulos pequeños y resacas de las piezas, pero también para pegar el diseño a la bandeja de trabajo. El soporte se eliminará manualmente después de enfriar. Varias técnicas de acabado, como el fresado, el tratamiento térmico o el recorrido, se utilizan comúnmente después de la impresión para lograr los requisitos funcionales de la pieza. [12].

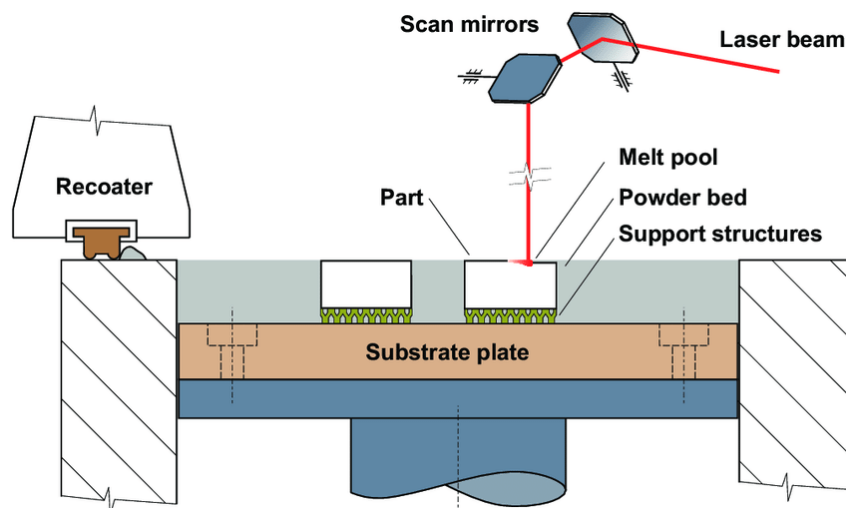


Figura 6: Proceso SLM [13].

2.2.7. MJF

Es una de las tecnologías de impresión 3D más utilizadas para imprimir piezas de gran precisión y duración. En comparación con sus homólogos de fusión de lecho de polvo, como el sinterizado selectivo por láser (SLS), las impresiones con MJF son más rentables a escala (**Figura 7**).

Las piezas impresas con MJF se utilizan ampliamente tanto para prototipos como para uso final. [14].

La MJF es una de las tecnologías de impresión 3D más populares aplicadas para la creación de prototipos, para la producción de pequeños lotes y, gracias a su eficaz escalabilidad, también para la producción de series de tamaño medio. Tiene un conjunto de ventajas que la convierten en una tecnología de impresión 3D única.

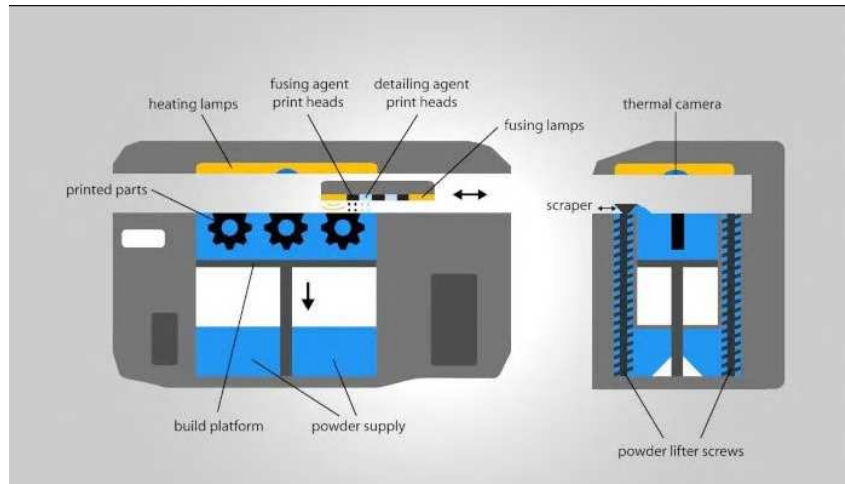


Figura 7: Proceso MFL [15].

2.2.8. CLIP

Este proceso utiliza resina líquida como materia prima, un láser ultravioleta que solidifica la resina fotosensible con su incidencia y oxígeno que acelera drásticamente el proceso de solidificación.

Aunque aparentemente esta técnica es muy similar a la SLA o estereolitografía, lo cierto es que existen diferencias fundamentales entre ellas que hacen a la nueva CLIP (Continuous Liquid Interface Production) entre 25 y 100 veces más rápida que la estereolitografía (Figura 8).

La luz ultravioleta provoca la fotopolimerización, a la vez que el oxígeno la inhibe. El cuidadoso equilibrio de esta interacción de luz y oxígeno hace que los objetos puedan ir creándose de forma continua a partir de la resina. Esto, además de rapidez en el proceso, proporciona unas mejores propiedades de los objetos impresos, ya que, al no ser impresos por capas, las piezas son lisas estéticamente y muy sólidas en su estructura. [16].

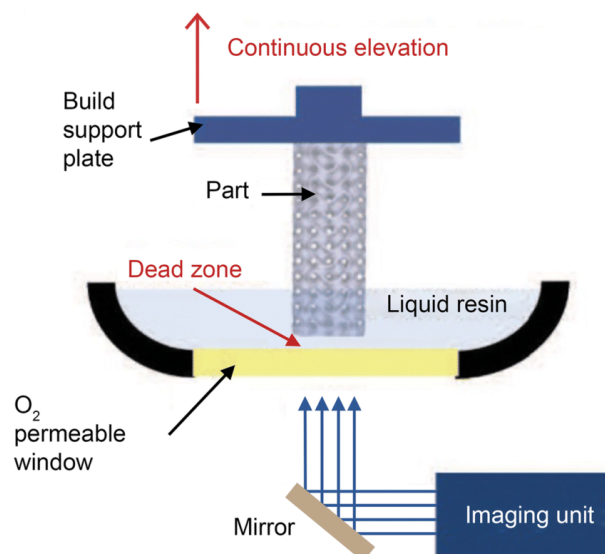


Figura 8: Proceso CLIP [17].

2.3. Enfoque en la tecnología FFF

La tecnología de impresión 3D basada en Fabricación por Filamento Fundido (FFF, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una de las metodologías más accesibles y versátiles en la fabricación aditiva. Su funcionamiento se basa en la extrusión de un filamento termoplástico fundido que se deposita capa por capa hasta conformar una pieza tridimensional. Esta tecnología ha sido ampliamente adoptada en sectores industriales gracias a su bajo coste operativo, facilidad de uso y capacidad para fabricar geometrías complejas sin necesidad de utillaje específico.

En el ámbito aeroespacial y de defensa, la tecnología FFF permite el desarrollo rápido de prototipos funcionales, así como la fabricación de piezas personalizadas y ligeras para satélites, aeronaves no tripuladas y componentes internos de vehículos espaciales. Dada su capacidad para trabajar con materiales técnicos como el nylon, el policarbonato o los compuestos con fibra de carbono, se ha convertido en una solución viable para aplicaciones donde la resistencia mecánica y la reducción de peso son fundamentales [18].

Asimismo, sectores como el médico se benefician de la personalización que ofrece FFF, fabricando férulas, prótesis y modelos anatómicos adaptados a cada paciente. En la industria automotriz, se emplea para la producción de utillajes, piezas de repuesto y prototipos, acortando significativamente los ciclos de desarrollo.

Por tanto, la tecnología FFF no solo representa una alternativa económica a los procesos de fabricación tradicionales, sino que también abre nuevas posibilidades en el diseño y producción de piezas con alto grado de personalización y funcionalidad, adaptadas a las necesidades específicas de cada sector [18].

2.4. Descripción del proceso

La técnica de impresión 3D por FFF consiste en la deposición capa por capa de material polimérico fundido, una encima de otra, hasta completar la pieza diseñada. Es decir, consiste en la utilización de un filamento polimérico, que se encuentra en una bobina, y se funde a medida que va pasando por el extrusor, cuando alcanza el punto de fusión. El extrusor se desplaza en los ejes X e Y con el fin de ir dando forma a cada una de las capas que se van formando. A su vez, la cama se mueve en el eje Z, descendiendo un nivel cada vez que se ha formado una nueva capa [19].

Más concretamente, el extrusor es la pieza donde se produce el calentamiento del filamento hasta la temperatura de fusión para poder formar la pieza diseñada, proceso también denominado de extrusión. Esta parte de la impresora 3D consta a su vez de una serie de componentes, como el motor de extrusión, encargado de proporcionar la potencia para arrastrar el filamento y fundirlo para poder depositarlo capa a capa en la cama, es decir, el lugar de la impresora 3D donde la pieza se deposita (**Figura 9**).

Además, la impresora 3D consta de una polea y una palanca, que, gracias a sus dientes, presionan el filamento y lo arrastran hasta la punta del extrusor (o hot-end en inglés). Así mismo, el sistema dispone de un ventilador, que permite refrigerar el extrusor, y del tubo de Fibonacci, que se encuentra en la entrada del extrusor e impide que se produzcan roturas en el filamento. Por último, en la salida, como se ha comentado, se encuentra el hot-end, que es la pieza encargada de fundir el material polimérico para poder extruirlo.

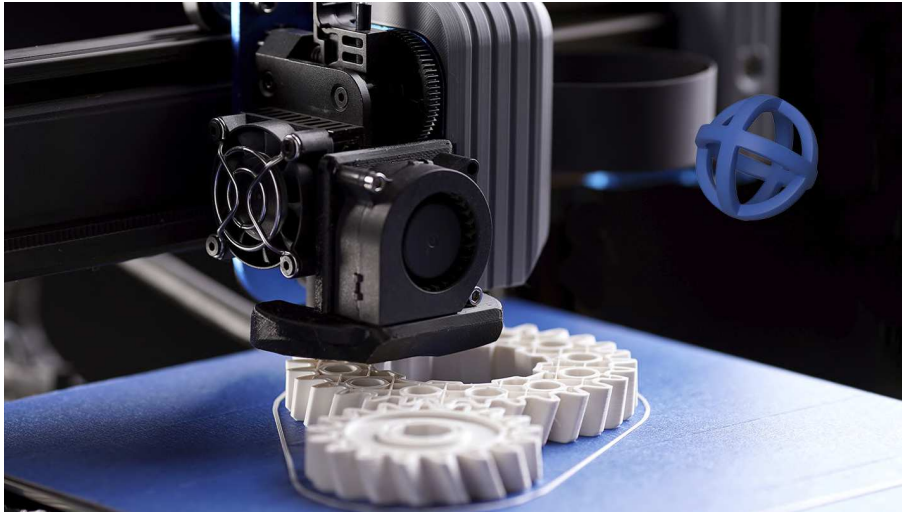


Figura 9: Tecnología FFF [20].

El extrusor se encuentra colocado en un carro que permite que se mueva en las direcciones X e Y. De esta manera, a medida que va generándose la pieza, el extrusor se mueve para ir dando forma al diseño. La otra gran parte importante de la impresora es la base de impresión o cama, que consta de un cristal grueso que sirve de soporte para la impresión y suele ser de forma cuadrada o rectangular [19].

Existen dos tipos de bases de impresión: frías o calientes. Las bases de impresión calientes, también denominadas camas calientes, están calefactadas para poder alcanzar cierta temperatura con el fin de que la diferencia entre el hot-end y la cama de impresión no sea tan grande cuando el material fundido caiga sobre ella.

De esta manera, se puede evitar que se produzcan imperfecciones como las roturas en la pieza impresa por el cambio de temperatura, o el conocido como warping en inglés, que se produce cuando la primera capa de una pieza se deforma y se despegar de la cama de impresión. El warping suele producirse sobre todo en las piezas grandes porque hay diferencias térmicas más significativas que hacen que las piezas acaben despegándose por las esquinas [19].

2.5. Aplicaciones prácticas

Esta tecnología tiene numerosas aplicaciones prácticas en diversos campos debido a su versatilidad, bajo costo y facilidad de uso. En el diseño y fabricación, permite la creación de prototipos rápidos, herramientas personalizadas, plantillas de ensamblaje y piezas finales, especialmente en producciones de bajo volumen o para sustituir componentes obsoletos.

En educación, se utiliza para fabricar modelos anatómicos, geométricos y arquitectónicos, además de fomentar habilidades técnicas en diseño 3D. En medicina, facilita la producción de prótesis personalizadas, guías quirúrgicas y modelos anatómicos para planificación. En industrias como la automotriz y aeroespacial, se emplea para fabricar piezas ligeras y resistentes o herramientas específicas para reparación (**Figura 10**).



Figura 10: Aplicación práctica Tecnología FFF [21].

También destaca en arte, diseño y moda, permitiendo la creación de piezas únicas, así como en electrónica, para carcasas personalizadas y prototipos de circuitos.

En arquitectura, es ideal para maquetas y componentes estructurales, mientras que en el hogar y el bricolaje, permite reparar objetos y personalizar artículos decorativos o funcionales. Gracias a la variedad de materiales disponibles, desde plásticos básicos hasta compuestos avanzados, el FFF es una herramienta clave tanto para principiantes como para expertos.

2.6. Ventajas y desventajas

La aparición de la fabricación aditiva brinda nuevas posibilidades a diferentes sectores, ayudando a mejorar y optimizar procesos, y resolviendo problemas a los que la manufactura tradicional no ha sabido dar respuesta (**Tabla 1**). Dicho esto, algunas de las ventajas más destacables de esta tecnología tan innovadora son las siguientes [22]:

- Time-to-Market

La fabricación aditiva permite que los proyectos se desarrollen más rápido que nunca. La posibilidad de imprimir un diseño en 3D el mismo día en que se crea permite reducir un proceso de desarrollo que podría haber supuesto semanas [22].

- Versatilidad

Una impresora 3D puede realizar infinidad de productos diferentes, mientras que hasta ahora muchos de ellos se realizan a través de máquinas específicas y exclusivas para un solo producto o pieza.

- Prototipado rápido y flexibilidad

La creación de prototipos es un elemento esencial de la mayoría de los procesos de diseño e ingeniería, y en general, hacerlo utilizando métodos tradicionales requiere casi los mismos procesos, costos, herramientas y configuración que el producto final, haciendo de los prototipos una apuesta difícil para muchas empresas. La aparición de la impresión 3D permite solucionar este problema [22].

- Reducción de los costes

La fabricación aditiva permite reducir los costes de diferentes modos, ya sea por el casi inexistente desperdicio del material utilizado, por la disminución de los costes de logística y almacenamiento, por el ahorro en mano de obra, etc.

- Personalización

Se puede fabricar casi cualquier producto de forma exclusiva, sin la necesidad de reconfigurar los procesos de producción para obtener un producto personalizado. Este sector tiene un amplio margen de mejora, pues aún puede avanzar mucho en cuanto a tiempo de impresión, precisión o costes, por lo que a lo largo de los años las ventajas serán aún mayores [22]. Sin embargo, pese a ser una tecnología útil y positiva, presenta ciertos inconvenientes, tales como:

- Disminución de puestos de trabajo en la manufactura

Debido a la elaboración propia de los productos. No obstante, al mismo tiempo se crearán nuevos empleos y formas de negocio.

- Vulneración de los derechos de autor

Los objetos con copyright pueden tener numerosas réplicas debido a la facilidad para copiar casi cualquier cosa.

- Menor variedad de materiales con respecto a los procesos convencionales

Este proceso de fabricación limita la posibilidad de emplear una amplia variedad de materiales distintos [22].

Ventajas	Limitaciones
Complejidad geométrica	Tecnologías AM en desarrollo
Libertad creativa	Procesos periféricos y auxiliares
Adaptación al mercado	Desconocimiento de los diseñadores
Acceso a nuevos nichos de mercado	Coste de la materia prima
Mecanismos integrados	Acabado superficial
Productos aligerados	Velocidad de fabricación
Reducción del <i>time to market</i>	Repetibilidad del proceso
Reducción de costes de procesos	Tamaño limitado de piezas
Procesos híbridos	Coste de la maquinaria

Tabla 1: Ventajas y limitaciones de la fabricación aditiva (AM) [1].

2.7. Sectores de interés

La impresión en 3D ha sido comúnmente utilizada para el “prototipado rápido”. La creación de prototipos es un elemento esencial de la mayoría de los procesos de diseño e ingeniería, y en general, hacerlo utilizando métodos tradicionales requiere casi los mismos procesos, costos, herramientas y configuración que el producto final, haciendo de los prototipos una apuesta difícil para muchas empresas [22].

La impresión 3D comenzó principalmente solucionando este problema, y aunque aún sigue siendo la aplicación más extendida para estas tecnologías, son cada vez más las industrias que están apostando por ellas aprovechando sus ventajas para diferentes usos. Algunas de las industrias que apuestan por la fabricación aditiva son:

- **Aeroespacial y Defensa**

La fabricación aditiva está revolucionando el sector aeroespacial al permitir la producción eficiente de piezas complejas, ligeras y funcionales, tanto para prototipado como para uso final, estas son las principales aplicaciones actuales:

1. **Prototipado rápido para ensayos funcionales de cohetes:** La empresa Gravity Industries utiliza impresión 3D para fabricar y probar iteraciones de sus trajes voladores. Esta tecnología permite crear prototipos funcionales en días, lo cual reduce drásticamente los tiempos y costos del ciclo de desarrollo. Las piezas impresas soportan pruebas reales y son esenciales para el ajuste y evolución del diseño.
2. **Producción de piezas complejas para cohetes:** Empresas como Masten Space Systems emplean impresión 3D para fabricar componentes críticos como motores de cohete. Esto les permite fabricar piezas con geometrías imposibles de conseguir mediante métodos tradicionales, optimizando el rendimiento térmico y estructural. Además, reduce la cantidad de ensamblajes necesarios, mejorando la fiabilidad del sistema.
3. **Herramientas y accesorios personalizados:** Las herramientas impresas en 3D (como guías de perforación, útiles de montaje y fijaciones) se utilizan para facilitar la fabricación de piezas aeroespaciales. Estas herramientas personalizadas se producen rápidamente y a bajo coste, y permiten adaptar el proceso a las necesidades específicas de cada tarea, aumentando la eficiencia y seguridad en planta [23].
4. **Piezas de uso final y recambios personalizados:** La fabricación aditiva permite imprimir componentes de uso final con materiales técnicos que cumplen requisitos mecánicos, térmicos y químicos. Esto es útil especialmente para piezas de bajo volumen o en fases de mantenimiento, donde la disponibilidad inmediata es clave. También permite crear geometrías optimizadas para reducir peso sin sacrificar resistencia.
5. **Reducción de tiempo y costes:** Al eliminar la necesidad de moldes, mecanizado intensivo o logística de aprovisionamiento, la impresión 3D reduce notablemente el coste por pieza y acelera la entrega. Esta agilidad es especialmente valiosa en sectores donde el tiempo de desarrollo es crítico y los volúmenes de producción son bajos o personalizados (**Figura 11**).



Figura 11: Piezas impresas en 3D [23].

6. **Educación y formación técnica:** Instituciones como la Academia Naval de EE.UU. utilizan la impresión 3D como herramienta de enseñanza. Los estudiantes pueden diseñar y fabricar prototipos reales para entender conceptos de ingeniería mecánica, aerodinámica y estructuras, fomentando así un aprendizaje práctico y una mejor preparación para la industria aeroespacial [23].
7. **Pruebas en túneles de viento:** Los modelos reducidos usados en túneles de viento se pueden imprimir en 3D con gran precisión. Esto permite validar el comportamiento aerodinámico de alas, fuselajes o componentes externos a un coste bajo y con gran rapidez, favoreciendo múltiples iteraciones en la fase de diseño (**Figura 12**).



Figura 12: Los componentes impresos en 3D de alto rendimiento [23].

8. **Componentes electrónicos personalizados:** La impresión 3D se emplea en la fabricación de carcasas, soportes o estructuras para albergar sistemas electrónicos en aeronaves o satélites. Estos componentes pueden diseñarse a medida para optimizar el espacio y la distribución de cargas, siendo además ligeros y resistentes [23].

9. **Diseños innovadores y optimización topológica:** Una de las mayores ventajas de la impresión 3D es la libertad de diseño. Se pueden crear estructuras complejas como celosías, canales internos de refrigeración o soportes optimizados topológicamente, lo que permite reducir el peso total de la aeronave y mejorar su rendimiento sin comprometer la resistencia estructural [23].

■ **Automoción**

Prodrive, empresa británica especializada en ingeniería avanzada y automovilismo de alto rendimiento, ha incorporado la tecnología de impresión 3D FFF (Fused Filament Fabrication) en su proceso de fabricación. Esta tecnología ha permitido a la compañía transformar radicalmente su flujo de trabajo para el desarrollo de vehículos de competición, ofreciendo mayor rapidez, flexibilidad y reducción de costes [24].

Una de las aplicaciones más destacadas es el desarrollo del vehículo **Prodrive Hunter**, un todoterreno de alto rendimiento diseñado para participar en competiciones como el Rally Dakar. Este vehículo fue desarrollado en colaboración con el equipo Bahrain Raid Xtreme y logró el segundo puesto en el Dakar 2023, conducido por el piloto Sébastien Loeb. Diversos componentes del Hunter fueron impresos directamente mediante FFF, incluyendo conductos de aire, soportes estructurales y partes del habitáculo (**Figura 13**).

Gracias al uso de impresoras 3D de la empresa BCN3D, Prodrive ha podido:

- Fabricar herramientas y utillajes personalizados en plazos significativamente reducidos.
- Producir piezas finales directamente funcionales, aptas para soportar las exigencias de las carreras.
- Validar diseños mediante prototipos rápidos y realizar iteraciones sin necesidad de recurrir a procesos de mecanizado tradicionales.

Para garantizar el rendimiento de los componentes, Prodrive emplea materiales técnicos como **nylon con fibra de carbono**, que ofrecen una alta relación rigidez-peso y resistencia térmica. Las impresoras utilizadas cuentan con la tecnología **IDEX (Independent Dual Extruder)**, lo que permite imprimir con múltiples materiales en una misma pieza o realizar soportes solubles que facilitan geometrías complejas [24].

El uso de FFF ha permitido a Prodrive:

- Reducir el tiempo de desarrollo y validación de componentes.
- Optimizar el diseño para funcionalidad y peso, sin limitaciones geométricas impuestas por técnicas tradicionales.
- Disminuir los costes en la producción de pequeñas series, ideales para el entorno competitivo del motorsport.

Este caso ejemplifica cómo la impresión 3D por deposición de filamento fundido está siendo adoptada por empresas líderes para lograr ventajas competitivas en sectores donde la velocidad, la personalización y la innovación tecnológica son cruciales [24].



Figura 13: Usos impresión 3D en automoción [24].

■ Médico y Dental

Aunque otras tecnologías como SLA y DLP predominan en el ámbito dental debido a su alta precisión, la FFF presenta ventajas importantes en costes y simplicidad, especialmente para dispositivos no sometidos a cargas [25].

- **Guías quirúrgicas para implantes:** Se desarrollaron guías personalizadas para la colocación de implantes dentales mediante FFF, mostrando su viabilidad en procedimientos quirúrgicos.
- **Placas de registro de mordida:** Se utilizó un filamento sensible a la temperatura para fabricar placas de registro de mordida, simplificando el flujo clínico (**Figura 14**).
- **Cubetas de impresión multimaterial:** Combinando filamentos de grado médico, se imprimieron cubetas que optimizan la toma de impresiones en pacientes edéntulos, mejorando precisión y confort [25].

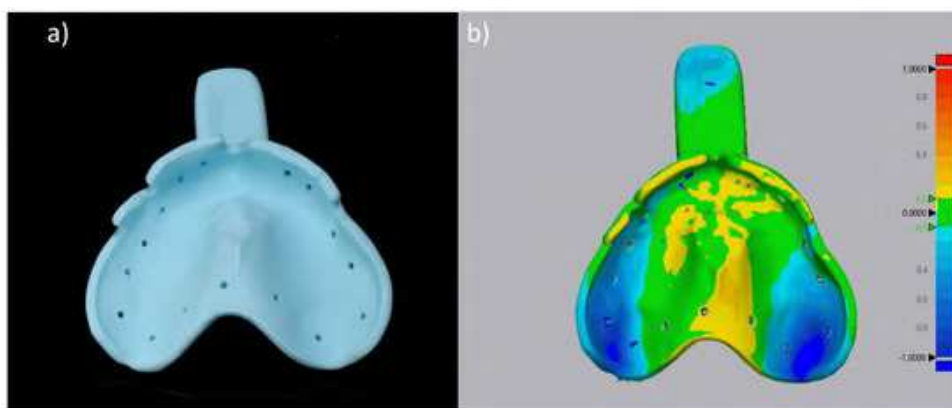


Figura 14: Aplicación dental de la tecnología FFF [25].

2.8. Tipos de materiales y sus propiedades

En la actualidad, el mercado dispone de una amplia gama de materiales, cuyas propiedades físicas, mecánicas y térmicas varían según su composición, permitiendo su selección en función de los requisitos específicos de cada aplicación [26].

2.8.1. PLA

El ácido poliláctico o más comúnmente conocido como PLA, es el material para impresora 3D más utilizado debido a lo sencillo que es imprimirlo. Este plástico se fabrica a partir de almidones vegetales, teniendo la propiedad de ser biodegradable y poder fundirse a bajas temperaturas.

2.8.2. ABS

Este plástico es altamente utilizado en todos los niveles profesionales por sus propiedades físicas, siendo de los materiales para impresoras 3D más resistentes por su alta resistencia al impacto y muy buena tolerancia a las altas temperaturas. En cuanto a la resistencia química, el ABS se ve afectado ante varios disolventes y ácidos, ya que permite pulir la superficie de la pieza con un baño de vapor de acetona, confiriéndole un acabado suave y brillante [26].

2.8.3. PET-G

Es otro material muy utilizado en el mundo de la impresión y podría decirse que es un intermedio entre el PLA y el ABS. Este plástico posee una buena resistencia mecánica (algo menor a la del ABS) pero una buena resistencia química, además de ser fácil de imprimir.

2.8.4. TPU

Es uno de los materiales flexibles más conocidos en el mundo de la impresión 3D. Es resistente a la fricción y al desgaste, lo que lo hace un material interesante para hacer recubrimientos o protecciones [26].

Puedes encontrar el TPU en distintos grados de dureza, siendo los más rígidos los más sencillos de imprimir. En consecuencia, el mejor consejo a la hora de imprimir este material es imprimir a poca velocidad, ya que evitará que el filamento se deforme y atasque.

2.8.5. PVA

Con la aparición del sistema de impresión multimaterial para impresora 3D, surgieron los materiales de soporte. El PVA es un material de soporte soluble, ideal para imprimir piezas con geometrías complejas que dificulten la extracción de estructuras de soportes impresas con el mismo material. Es soluble en agua y permite obtener un mejor acabado superficial en la superficie de contacto del soporte [26].

2.8.6. PP

Es un filamento ampliamente utilizado en el sector industrial para la fabricación de piezas funcionales debido a su resistencia al impacto, a la abrasión, pero sobre todo por su excelente resistencia a los químicos. Además, este material es muy ligero y relativamente flexible, por lo que puede utilizarse para crear elementos de protección que estén en contacto con la piel, como el interior de cascos y soportes para pantallas de protección facial [26].

2.8.7. PA

Son materiales caracterizados por su capacidad de trabajar de forma continua a temperaturas de hasta 120°C. Poseen alta resistencia mecánica, lo cual los hace ideales para formar parte de mecanismos, conectores, carcasas protectoras, entre otros.

2.8.8. Materiales Compuestos

Algunos materiales nacen de la mezcla de varios polímeros para obtener mejores propiedades físicas, como lo es el Tough PLA, que es el resultado de la unión de PLA y ABS, confiriéndole mayor resistencia al impacto que el PLA pero conservando su facilidad para ser impreso (**Figura 15**). Muchos de estos materiales tienen como base el PLA, y se puede encontrar mezclado con partículas de madera, arcillas y metales, aumentando la gama de materiales que puedes imprimir en 3D [26].

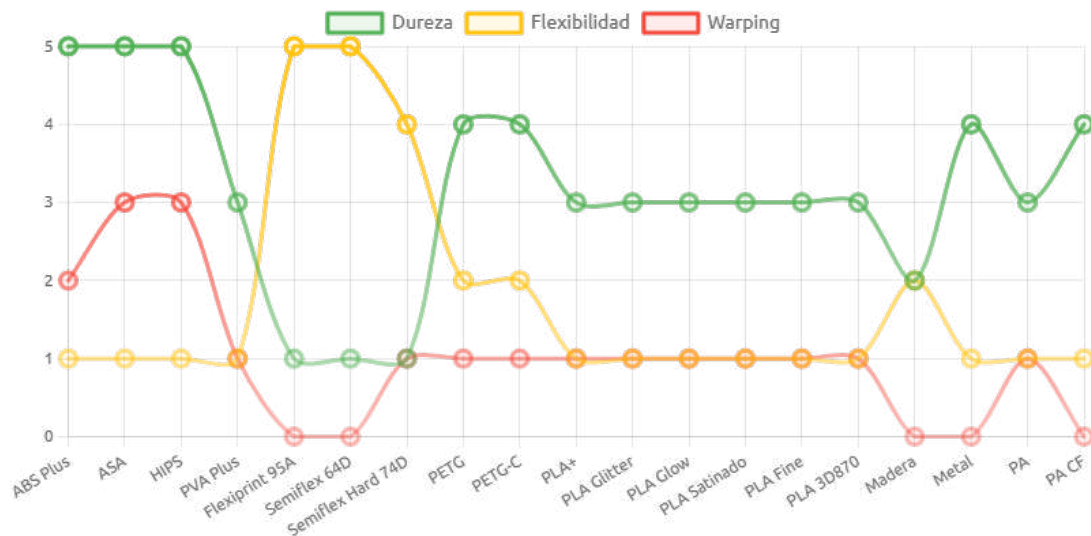


Figura 15: Comparativa distintos filamentos del mercado [27].

2.9. Enfoque en el PLA

El material que se ha empleado para el desarrollo de este proyecto es el PLA, que a su vez es uno de los materiales más populares para impresión 3D con FFF (**Tabla 2**).

El PLA o Ácido Poliláctico es un termoplástico constituido por moléculas de ácido láctico y es el polímero biodegradable más popular en la industria. Se trata de un polímero muy versátil, que se obtiene utilizando un 100% de recursos renovables como son el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón. Dado que es un polímero proveniente de compuestos derivados de la fijación natural de CO₂, las emisiones netas de esta sustancia al ambiente cuando combustionan son cero. Además, proviene de recursos virtualmente inagotables [22].

El PLA es el material preferido para las personas que dan sus primeros pasos dentro de la industria de la impresión, ya que resulta fácil imprimir con él. Tiene una temperatura de fusión de 180 °C, algo relativamente bajo en comparación con los filamentos de otros materiales, lo que permite imprimir PLA sin necesidad de utilizar una cama de impresión calefactada ni de disponer de cámara cerrada.

Se trata de un material consistente, fácil de usar y disponible en una amplia variedad de colores, lo que lo hace adecuado para la impresión 3D FFF. Además, no desprende olores desagradables como otros materiales, por lo que es ideal para uso doméstico. Es muy rígido y bastante fuerte, pero muy frágil [22].

El filamento **Hyper PLA** es una variante del PLA estándar diseñada para ofrecer una mayor fluidez y una rápida solidificación durante la impresión 3D. Esto permite imprimir a velocidades superiores a las tradicionales, manteniendo una buena adhesión entre capas y una calidad adecuada en la pieza final [28]. Sus características principales son:

- **Alta fluidez:** Facilita una extrusión más eficiente, permitiendo velocidades de impresión de hasta 600 mm/s en impresoras compatibles.
- **Rápido enfriamiento:** Contribuye a una solidificación rápida, reduciendo deformaciones y mejorando la calidad superficial.
- **Buena adhesión entre capas:** Mantiene la resistencia mecánica incluso a altas velocidades.
- **Compatibilidad:** Ideal para impresoras que operan entre 50 y 100 mm/s, como las series Creality K1, Kingroon KP3S Pro V2, entre otras.

El Hyper PLA es una excelente opción para quienes buscan mejorar la eficiencia en sus impresiones 3D sin sacrificar calidad. Su formulación avanzada permite una impresión más rápida y precisa, ideal para proyectos con tiempos de producción reducidos [28].

Propiedad	Valor
Resistencia Tensil Máx.	60 - 70 MPa
Rigidez	2.7 - 3.5 GPa
Temperatura Máx. Servicio	50 - 60°C
Durabilidad	Moderada
Densidad	1.24 g/cm ³
Temperatura Extrusor	180 - 220°C
Temperatura Cama	50 - 60°C
Estabilidad y Resistencia	Biodegradable, sensible a humedad y propenso a fatiga
Facilidad de Impresión	Excelente
Calidad Cosmética	Muy Buena

Tabla 2: Propiedades del Material PLA [29].

2.10. Principales parámetros tecnológicos

A la hora de utilizar una impresora de FFF, resulta fundamental ajustar correctamente los parámetros de impresión, de cara a evitar problemas y errores a la hora de imprimir una pieza, logrando una impresión exitosa y de buena calidad. Además de los ajustes de la propia impresora, como pueden ser la velocidad de impresión, la orientación de la pieza o el diámetro de la boquilla, es importante controlar también los parámetros del software de impresión 3D utilizado (**Tabla 3**). Así, vamos a definir a continuación algunos de los más importantes [22]:

- Altura de capa o resolución

Depende de las características de cada equipo y puede ajustarse libremente o a través de valores preestablecidos. Mientras más pequeña sea la medida de la capa, mayor será la resolución vertical de la impresión, afectando directamente al tiempo de fabricación [22].

- Espesor de pared

Se refiere, tal y como su nombre indica, al espesor que tendrán las paredes del objeto impreso. Hay que tener en cuenta que normalmente no se imprimen objetos completamente sólidos, sino que se imprime una especie de caparazón con una estructura interna. Así, este parámetro controlará el espesor que tendrán estas caras externas de la pieza.

- Capa sólida inferior y superior

Se refiere al espesor que tendrán las caras horizontales del modelo en su parte superior e inferior. Esta opción varía con la rigidez de dichas caras.

- Densidad del relleno

Se refiere al relleno que se utilizará como estructura interna. La impresora crea una retícula que dará fortaleza a la pieza, pero este parámetro permite dejar espacios vacíos al interior del objeto, ahorrando material y disminuyendo tanto el peso de la pieza como los tiempos de impresión. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el porcentaje de relleno tiene efectos en la resistencia final de la pieza pese a que su apariencia exterior no se vea afectada [22].

- Tipo de relleno

Los rellenos forman una parte importante del proceso de creación de una pieza. Aunque el relleno rectangular o rectilíneo es el más utilizado actualmente, ya que suele venir por defecto configurado en los softwares de impresión 3D, hay otros tipos como el relleno triangular o el de panel de abeja. Cabe destacar que, dependiendo del tipo de relleno, el tiempo de impresión puede variar considerablemente.

- Tipo y emplazamiento de soportes

En casos en los que se requieren soportes para la impresión de una pieza, es necesario definir el tipo de soporte a utilizar. Además, dependiendo de la pieza a realizar, convendrá poner soportes en todos lados o sólo desde la base [22].

- Temperatura del extrusor

Todos los fabricantes de filamentos facilitan un rango de temperaturas entre las cuales su impresión es óptima. Normalmente, esta temperatura ideal se debe ir ajustando mediante pruebas hasta obtener el mejor acabado y adherencia, ya que puede variar significativamente en función del tipo de extrusor que utilicemos.

- Temperatura de la cama de impresión

Normalmente, el mismo fabricante suele indicar los valores recomendados, pero se debe determinar el valor mediante pruebas para obtener una adherencia óptima.

- Velocidad de impresión

Este es uno de los principales parámetros que afecta directamente al acabado de las piezas. Así, a mayor velocidad, se obtendrá un peor acabado [22].

Parámetro	Descripción	Rango típico
Temperatura del extrusor	Temperatura para fundir el filamento	180°C – 260°C
Temperatura de la cama caliente	Mejora adhesión y evita deformaciones	40°C – 110°C
Velocidad de impresión	Velocidad del extrusor durante impresión	20 – 150 mm/s
Altura de capa	Espesor de cada capa	0.05 – 0.3 mm
Ancho de línea / grosor	Grosor del filamento extruido	0.4 mm
Diámetro de boquilla	Diámetro de la apertura de salida	0.2, 0.4, 0.6, 0.8 mm
Retracción	Distancia y velocidad para evitar hilos no deseados	1–6 mm, 20–100 mm/s
Relleno (infill)	Porcentaje de densidad interna	10 % – 100 %
Velocidad primera capa	Velocidad inicial más lenta para adhesión	10 – 30 mm/s
Altura primera capa	Altura ligeramente mayor para mejor adhesión	0.2 – 0.3 mm
Velocidad de desplazamiento	Velocidad en movimientos sin extrusión	150 – 300 mm/s

Tabla 3: Resumen parámetros tecnológicos [30].

2.11. Importancia de la velocidad de impresión

Uno de los principales parámetros que afecta directamente al acabado de las piezas realizadas con impresoras 3D FFF es la velocidad de impresión. Así, a mayor velocidad de impresión, peor acabado obtendremos y cuanto menor sea esta, mejor acabado. Por tanto, se puede afirmar que la calidad del acabado es directamente proporcional al tiempo de impresión. Si bien es cierto que hay excepciones a la regla anterior, como por ejemplo al realizar piezas pequeñas y con capas de poca área, ya que aún reduciendo mucho la velocidad de extrusión, no se consigue un buen acabado o incluso falla la impresión.

Pero además, la velocidad de impresión (medida en mm/s) afecta a la temperatura de extrusión debido a que cuanto mayor sea la velocidad de impresión, mayor temperatura de extrusión necesitaremos. Todos los fabricantes de filamentos facilitan un rango de temperaturas entre las cuales su impresión es óptima.

Normalmente, esta temperatura ideal se debe ir ajustando mediante pruebas hasta obtener el mejor acabado y adherencia, ya que puede variar significativamente en función de qué extrusor utilicemos [31]. En la impresión 3D FDM con PLA, los rangos de velocidad típicos históricamente se han situado entre 40 y 60 mm/s, especialmente en impresoras de escritorio convencionales como las Prusa MK3 o Ultimaker S3. Estos valores han sido considerados óptimos para equilibrar calidad superficial, precisión dimensional y fiabilidad del proceso [32, 33].

Sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías, incluyendo extrusores de alto caudal, firmware avanzado (como Klipper) y técnicas de compensación de vibraciones como Input Shaping y Pressure Advance, ha permitido alcanzar velocidades significativamente mayores. Impresoras modernas como la Bambu Lab X1C, Creality K1 y configuraciones personalizadas como la Voron 2.4 permiten imprimir a velocidades de entre 200 y 600 mm/s, manteniendo una calidad superficial aceptable [34, 35, 36].

Este aumento de velocidad representa una reducción del tiempo de producción de hasta un 70–80 %, siempre que el sistema esté bien ajustado y cuente con una gestión térmica y de flujo adecuada. Por ejemplo, una pieza que antes tomaba 10 horas a 50 mm/s podría completarse en menos de 3 horas a 250 mm/s, especialmente si se emplean hotends como el E3D Revo HF o el Rapido High Flow [37].

Las tecnologías como Input Shaping permiten mitigar defectos por resonancia a altas velocidades, optimizando el rendimiento sin sacrificar la precisión [38, 39]. Esto ha impulsado un cambio en los estándares industriales y abre nuevas posibilidades en la fabricación rápida de prototipos o producción de bajo volumen.

2.12. Calidad superficial

La calidad superficial de las piezas impresas en 3D no es la misma para todos los procesos y todas las materias primas. Varía mucho en función de la tecnología de impresión 3D empleada, la calidad de la impresora y el material de fabricación.

El diseño de la pieza que se va a imprimir y la posición y orientación de la pieza durante la fabricación también influyen en la calidad de la superficie. Antes de elegir un proceso de fabricación aditiva, hay que tener en cuenta la rugosidad (medida en la mayoría de los casos en R_a) de las piezas impresas en 3D. En el caso de las tecnologías que utilizan estructuras de soporte, como el modelado por deposición fundida (FFF), hay que tener especial cuidado, ya que hay un punto de contacto entre las estructuras de soporte y la pieza real que tiene una calidad de superficie totalmente diferente.

La rugosidad superficial de un material se mide básicamente en términos de valores R_a y R_z . En sus términos más sencillos, R_a , se refiere a la rugosidad media de una superficie, mientras que R_z es la diferencia entre el «pico» más alto y el «valle» más bajo de la superficie. Los valores R suelen medirse en μm [40].

En términos sencillos, se puede decir que R_a es la desviación del plano ideal de la superficie, medida normalmente en micropulgadas o micrómetros (μm). Cuanto mayor sea el valor R_a , más rugosa será la superficie. La principal norma que regula la rugosidad superficial es la UNE-EN ISO 25178-2:2023, que mide la rugosidad superficial en términos de valores R_a y R_z .

La norma **UNE-EN ISO 4288:1998**, equivalente a la ISO 4288:1996, establece las reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial mediante el método del perfil. Aunque esta norma fue anulada en 2023 y sustituida por la UNE-EN ISO 21920-3:2023, sigue siendo relevante para comprender los fundamentos de la medición de rugosidad superficial.

La norma ISO 4288 establece las reglas y procedimientos para la evaluación de la rugosidad superficial en materiales mecanizados y fabricados por diferentes procesos.

- Definición del Método de Medición

-Especifica cómo medir los parámetros de rugosidad (R_a , R_z , R_q , etc).

-Define la selección de longitud de evaluación, longitud de muestreo y filtros adecuados para obtener mediciones representativas.

- Criterios de Evaluación

-Método de la regla 16 %: Si el 16 % o más de los valores individuales medidos superan la tolerancia establecida, la superficie no cumple con el requisito.

-Método de la longitud de evaluación: La rugosidad se mide en varias longitudes de muestreo y se obtiene un valor promedio.

- Selección de Parámetros y Filtros

-La norma especifica qué filtros de corte (*cut-off*) deben utilizarse para eliminar componentes de forma o ruido en las mediciones. (**Tabla 4**)

Es un parámetro fundamental en la medición de la rugosidad superficial según la norma **ISO 4288**. Consiste en la longitud de onda límite utilizada en el filtro aplicado al perfil medido para separar las irregularidades superficiales (rugosidad) de las formas mayores, como la ondulación (*waviness*) y la forma general de la pieza.

Permite eliminar las componentes de forma y ondulación del perfil para analizar exclusivamente la rugosidad que afecta la funcionalidad o estética de la superficie.

Según la norma ISO 4288, los valores típicos de *cut-off* recomendados en función de la rugosidad media aritmética (R_a) son:

Categoría de R_a (μm)	Longitud de corte (<i>cut-off</i>) (mm)
$R_a \leq 0,1$	0.08
$0,1 < R_a \leq 2,0$	0.25
$2,0 < R_a \leq 10,0$	0.8
$10 < R_a \leq 50$	2.5

Tabla 4: Tabla de categorías de R_a y sus longitudes de corte correspondientes [40].

La longitud de evaluación típica es un múltiplo del *cut-off*, usualmente cinco veces su valor. Por ejemplo, para un *cut-off* de 0.8 mm, la longitud de evaluación recomendada es de 4 mm. Esto garantiza que la medición sea estadísticamente representativa.

-Relaciona la longitud de muestreo con la rugosidad esperada, estableciendo criterios para mediciones coherentes.

- Aplicabilidad

-Se usa en procesos de fabricación donde la calidad superficial es crítica, como mecanizado, rectificado y fabricación aditiva.

-Complementa normas como ISO 4287 (que define los parámetros) y ISO 2517 8 (que amplía el análisis a superficies en 3D) [40].

La norma **UNE-EN ISO 4287:1999**, equivalente a la ISO 4287:1997, establece los términos, definiciones y parámetros para la evaluación de la textura superficial mediante el método del perfil. Aunque ha sido sustituida por la UNE-EN ISO 21920-2:2023, sigue siendo clave para la comprensión de los parámetros clásicos de rugosidad.

- **R_a** (rugosidad media aritmética): Promedio aritmético de las desviaciones absolutas del perfil respecto a la línea media dentro de una longitud de evaluación.
- **R_q** (rugosidad cuadrática media): Raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las desviaciones del perfil respecto a la línea media.
- **R_z** (altura máxima del perfil): Promedio de las cinco alturas máximas del perfil dentro de la longitud de evaluación.
- **R_t** (altura total del perfil): Diferencia entre el pico más alto y el valle más profundo dentro de la longitud de evaluación.
- **R_p** (altura máxima del pico): Altura del pico más alto desde la línea media dentro de la longitud de evaluación.
- **R_v** (profundidad máxima del valle): Profundidad del valle más profundo desde la línea media dentro de la longitud de evaluación.
- **R_{sk}** (asimetría del perfil): Medida de la asimetría de la distribución de alturas del perfil. Valores positivos indican predominancia de picos; negativos, de valles.
- **R_{ku}** (curtosis del perfil): Indica la agudeza de la distribución de alturas del perfil. Valores mayores a 3 sugieren picos agudos; menores a 3, picos aplanados.
- **R_{Sm}** (paso medio de rugosidad): Distancia media entre elementos del perfil (picos y valles) dentro de la longitud de evaluación.
- **R_{Pc}** (conteo de picos): Número de picos por unidad de longitud del perfil.
- **R_{dq}** (pendiente cuadrática media): Raíz cuadrada de la media de las pendientes del perfil, proporcionando una medida de la complejidad de la superficie.
- **R_{mr(c)}** (relación de material a una profundidad c): Porcentaje de material presente a una determinada profundidad desde la cima del perfil, útil para evaluar la capacidad de carga de la superficie.
- **R_{dc}** (altura entre dos relaciones de material): Diferencia de altura entre dos porcentajes específicos de material, proporcionando información sobre la distribución del material en la superficie.

Estos parámetros permiten una caracterización detallada de la textura superficial, esencial en aplicaciones donde la funcionalidad de la superficie es crítica, como en componentes mecánicos, sellos y superficies de contacto.

Para mediciones precisas, es fundamental seleccionar adecuadamente la longitud de muestreo (λ_c) y la longitud de evaluación, así como aplicar los filtros adecuados para separar la rugosidad de la ondulación y la forma [41].

La norma **ISO 25178-2:2012** establece los términos, definiciones y parámetros fundamentales para la caracterización de la textura superficial mediante métodos tridimensionales (superficie areal). Supone una evolución respecto a los enfoques clásicos basados en perfil (como la ISO 4287), al permitir un análisis más completo y representativo de la superficie medida. Esta norma es la base para la evaluación moderna de rugosidad en superficies 3D, especialmente cuando se utilizan técnicas de medición óptica como la interferometría o la fotometría [42].

Los parámetros de rugosidad superficial tridimensional permiten caracterizar la textura de una superficie sobre un área, a diferencia de los parámetros 2D que se limitan a un perfil. Según la norma ISO 25178, los principales parámetros son:

- **Sa** – *Rugosidad media aritmética*: Promedio de los valores absolutos de las desviaciones respecto a la superficie media. Es el equivalente 3D de *Ra*.
- **Sq** – *Rugosidad cuadrática media (RMS)*: Raíz cuadrada del promedio de las desviaciones al cuadrado respecto a la superficie media. Es más sensible a picos y valles que *Sa*.
- **Sz** – *Altura máxima*: Diferencia entre el pico más alto (*Sp*) y el valle más profundo (*Sv*) de la superficie medida.
- **Sp** – *Altura máxima de los picos*: Distancia desde el plano medio hasta el punto más alto.
- **Sv** – *Profundidad máxima de los valles*: Distancia desde el plano medio hasta el punto más bajo.
- **Sk** – *Altura del núcleo*: Representa la altura promedio de las superficies más altas.
- **Ssk** – *Coefficiente de asimetría (Skewness)*: Indica si predominan los picos ($Ssk > 0$) o los valles ($Ssk < 0$).
- **Sku** – *Curtosis*: Describe la agudeza de la distribución de alturas. $Sku = 3$ representa una distribución normal.
- **Sal** – *Longitud de autocorrelación*: Describe la textura espacial dominante o periodicidad.
- **Str** – *Relación de textura isotrópica*: Mide la isotropía de la superficie. $Str \approx 1$ implica textura sin direccionalidad preferente.
- **Sdr** – *Relación de desarrollo de la superficie*: Expresa el aumento porcentual del área real respecto a una superficie plana proyectada.
- **Vvc** – *Volumen de valles cerrados*: mide el volumen interno de huecos, cavidades o depresiones encerradas dentro de la pieza, que no tienen salida al exterior.

Los parámetros que se registraron para posteriormente analizar los resultados obtenidos fueron Sa, Sz, Sk y Vvc, para cada uno de los diferentes intervalos de velocidad y temperatura, más adelante desarrollados.

2.13. Normativa relacionada

Las normas ISO 4287 e ISO 4288 constituyen la base del sistema de especificación geométrica de productos (GPS) en lo que respecta a la caracterización de la rugosidad superficial mediante perfiles.

Sin embargo, para una comprensión y aplicación completa de estos estándares en entornos industriales y metrológicos, es fundamental considerar el conjunto de normas complementarias que abordan aspectos como la instrumentación, los métodos de filtrado, los parámetros funcionales o las representaciones gráficas en los dibujos técnicos.

En la siguiente tabla se recopilan las principales normas internacionales que guardan una relación directa con la ISO 4287 e ISO 4288, ya sea como ampliación de sus conceptos, base matemática, evolución tecnológica o soporte en la trazabilidad y verificación de los resultados obtenidos (**Tabla 5.**).

Norma	Título	Relación con ISO 4287/4288
ISO 1302:2002	<i>Indicación del estado superficial en los dibujos técnicos</i>	Establece cómo representar parámetros como R_a o R_z en planos de fabricación.
ISO 25178 (múltiples partes)	<i>Textura superficial — Método areal (3D)</i>	Expande el análisis de rugosidad al dominio tridimensional. Considerada evolución moderna de ISO 4287.
ISO 13565-1/-2/-3	<i>Método de perfil — Superficies con propiedades funcionales estratificadas</i>	Añade parámetros funcionales como R_k , R_{pk} y R_{vk} , especialmente útiles en piezas de contacto y deslizamiento.
ISO 16610 (varias partes)	<i>Filtrado de perfiles y superficies — Métodos matemáticos</i>	Describe filtros como el gaussiano usados para separar rugosidad, ondulación y forma. Base matemática para ISO 4288.
ISO 3274:1996	<i>Instrumentos de medición de rugosidad — Características del palpador</i>	Define requisitos técnicos de los palpadores usados en perfilómetros.
ISO 5436-1:2000	<i>Patrones de calibración para medición de rugosidad</i>	Establece las características de los patrones de referencia utilizados para calibrar equipos.
ISO 8785:1998	<i>Defectos de superficie — Terminología y parámetros</i>	Proporciona términos y definiciones para irregularidades no funcionales de la superficie.

Tabla 5: Normas relacionadas con ISO 4287/4288.

2.14. Defectos de forma y su relevancia en la calidad geométrica de piezas

Los defectos de forma son imperfecciones geométricas que afectan a la forma global de una superficie, independientemente de pequeñas rugosidades o irregularidades superficiales locales. Estos defectos son especialmente relevantes en ingeniería mecánica, metrología y control de calidad, ya que pueden comprometer el funcionamiento, ensamblaje o la estética de una pieza [43, 44].

Entre los principales tipos de defectos de forma se encuentran:

- **Ondulación (waviness):** variaciones periódicas de la superficie con una longitud de onda mayor que la rugosidad. Puede deberse a vibraciones de la máquina, desalineación o desgaste de herramientas (**Figura 16**).

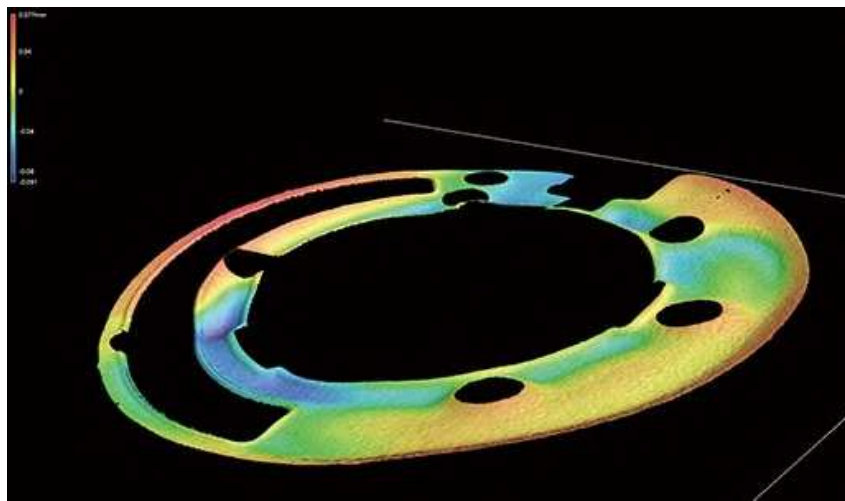


Figura 16: Defecto de forma ondulación [45].

- **Falta de redondez (out-of-roundness):** ocurre en piezas que deberían ser perfectamente circulares, como ejes o agujeros, y puede generar problemas de ensamblaje o rotación irregular (**Figura 17**).

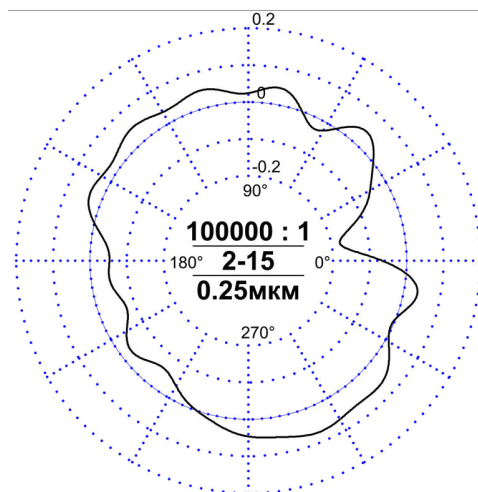


Figura 17: Defecto de forma falta de redondez [46].

- **Falta de planitud (flatness deviation):** desviación de una superficie respecto a un plano ideal, lo cual es crítico en superficies de apoyo o montaje (**Figura 18**).

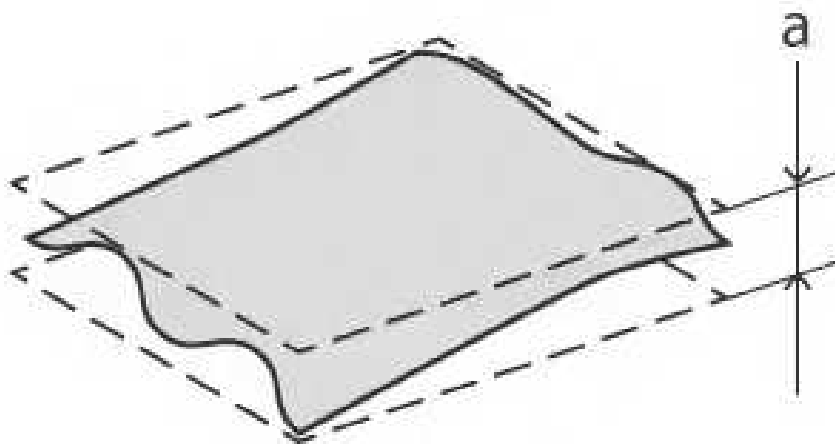


Figura 18: Defecto de forma planitud [47].

- **Conicidad o falta de cilindridad (taper or out-of-cylindricity):** en piezas cilíndricas, indica que el diámetro varía a lo largo del eje, lo que puede dificultar la estanqueidad o el deslizamiento adecuado (**Figura 19**).

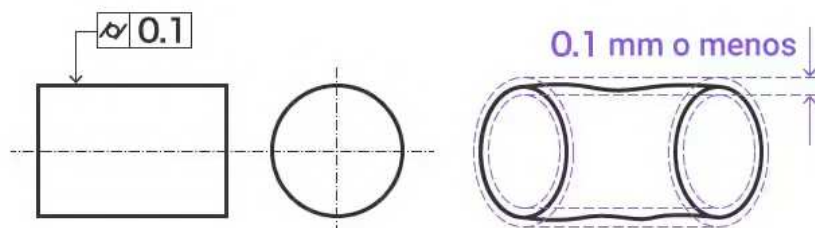


Figura 19: Defecto de forma cilindridad [48].

- **Falta de rectitud (straightness error):** desviación respecto a una línea recta ideal, afectando elementos como guías lineales, ejes y varillas (**Figura 20**).

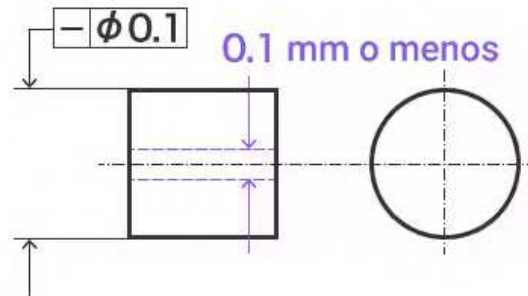


Figura 20: Defecto de forma rectitud [48].

- **Errores angulares:** incluyen la falta de paralelismo o perpendicularidad entre superficies que deberían mantener un ángulo constante, causando desalineaciones o esfuerzos no deseados.

Estos defectos pueden originarse por múltiples causas, entre ellas: desgaste de herramientas, desalineación del sistema de fabricación, tensiones residuales en los materiales, errores en la programación CNC o en el sistema de coordenadas, y deformaciones térmicas o mecánicas posteriores al proceso.

Para su evaluación, se utilizan instrumentos de alta precisión como máquinas de medición por coordenadas (CMM), sistemas ópticos de medición, medidores de forma o escáneres láser 3D, en conformidad con normas como la ISO 1101 [44].

La norma **ISO 1101** es un estándar internacional perteneciente al sistema GPS (*Geometrical Product Specification*), el cual define un lenguaje técnico unificado para la especificación de características geométricas en productos industriales. Su objetivo principal es garantizar la **intercambiabilidad funcional de piezas** mediante la adecuada definición de tolerancias en planos técnicos.

ISO 1101 permite establecer tolerancias relacionadas con la **forma**, la **orientación**, la **localización (posición)** y la **oscilación (run-out)** de superficies o ejes, utilizando una notación gráfica estandarizada mediante un *cuadro de tolerancia* que acompaña a la característica geométrica en el plano [44].

Tolerancias de forma

Las tolerancias de forma controlan exclusivamente la geometría de una única superficie o elemento, sin referencia a otros elementos [44]. Los principales tipos son (**Figura 21**):

Rectitud (Straightness): Rectitud es una condición donde un elemento de una superficie, o línea mediana derivada, es una línea recta. Una tolerancia de rectitud especifica una zona de tolerancia dentro de la cual el elemento considerado de una superficie o línea mediana derivada debe yacer. Una tolerancia de rectitud es aplicada en la vista donde los elementos a ser controlados son representados por una línea recta [49].

- **Zona mínima (Minimum Zone):** Distancia mínima entre dos líneas paralelas que contienen el perfil completo.
- **Desviación total (Total Deviation):** Máxima distancia entre los puntos extremos del perfil respecto a una línea de referencia [50].
- **P, V:** Desviaciones máximas positiva y negativa respecto a la línea de referencia.
- **P-P:** Diferencia entre el valor máximo y el mínimo del perfil (pico a pico).

Planitud (Flatness): La planitud es la condición de una superficie que tiene todos los elementos en un plano. Una tolerancia de planitud especifica una zona de tolerancia definida por dos planos paralelos dentro de los cuales debe situarse la superficie [49].

Circularidad (Roundness): La circularidad es una condición de una superficie donde presenta:

a). para una característica distinta de una esfera, todos los puntos de la superficie intersecados por cualquier plano perpendicular a un eje son equidistantes a ese eje.

b). para una esfera, todos los puntos de la superficie intersecados por cualquier plano que pasa a través de un centro común están equidistantes de ese centro [49].

- **E:** Error total de forma, calculado como la distancia entre dos círculos concéntricos mínimos que encierran el perfil (zona mínima).
- **P, V:** Desviaciones máxima positiva (peak) y negativa (valley), respecto al círculo de referencia [51].
- **P-P:** Diferencia pico a pico, es decir, $p - v$.

Cilindricidad (Cylindricity): La cilindricidad es la condición de una superficie de revolución dentro de la cual todos los puntos de la superficie están equidistantes de un eje común. La zona de tolerancia es dos cilindros concéntricos dentro de los cuales la superficie debe estar [49].

- **E:** Sinónimo de P-P. Error total de forma (cilindricidad).
- **P, V:** Máxima diferencia entre diámetros en diferentes alturas del cilindro [51].
- **P-P:** Diferencia entre la envolvente exterior e interior: cilindro mínimo y máximo que envuelven la superficie.

Estas tolerancias no requieren referencia a un sistema de coordenadas o datum, ya que dependen únicamente del propio elemento evaluado [44].




SÍMBOLO	TOLERANCIA DE FORMA	FORMA COMÚN DE ZONA DE TOLERANCIA	2D / 3D
	RECTITUD	2 LINEAS PARALELAS 	2D
	PLANITUD	2 PLANOS PARALELOS 	3D
	CIRCULARIDAD	2 CIRCULOS CONCENTRICOS 	2D
	CILINDRICIDAD	2 CILINDROS CONCENTRICOS 	3D
	PLANITUD - PLANO MEDIO	2 PLANOS PARALELOS 	3D
	RECTITUD - EJE	CILINDRICO 	3D

Figura 21: Resumen de tolerancias de forma [52].

2.15. Defectos de forma y parámetros característicos

Los defectos de forma representan desviaciones de una geometría ideal, independientemente del tamaño, orientación o posición. Estos defectos se cuantifican mediante parámetros estandarizados según normativa ISO y se detectan con instrumentos de medición por contacto o sin contacto [44].

Tolerancias de orientación

Las tolerancias de orientación controlan el ángulo relativo entre una característica y un sistema de referencia (datum). No definen la posición, sino la inclinación respecto a otras superficies o ejes [44].

- **Paralelismo (Parallelism)**: controla la orientación paralela respecto a un plano o eje de referencia. Un valor típico sería 0,03 mm respecto a un datum A.
- **Perpendicularidad (Perpendicularity)**: limita la desviación angular respecto a una línea o plano perpendicular ideal. Es habitual especificar tolerancias entre 0,02 y 0,1 mm.
- **Inclinación (Angularity)**: permite especificar la inclinación deseada (por ejemplo, 45°) entre dos elementos. El valor de tolerancia define una zona angular dentro de la cual debe estar contenida la superficie o eje. Ejemplo: 0,05 mm a 45° respecto a un datum.

Estas tolerancias **sí requieren un datum de referencia**, ya que se definen en relación a otro elemento geométrico [44].

La correcta aplicación de estas tolerancias, conforme a la norma ISO 1101, permite un control geométrico preciso en procesos de fabricación y verificación, asegurando que las piezas cumplan con los requisitos funcionales establecidos en su diseño [44].

2.16. Relación entre la velocidad de impresión y la calidad superficial

La velocidad de impresión es la velocidad a la que el extrusor se mueve a lo largo de los ejes X, Y y Z mientras deposita el filamento. Por lo general, se mide en milímetros por segundo (mm/s) y se puede ajustar en el software de corte o en la pantalla LCD de la impresora. La velocidad de impresión afecta la cantidad de tiempo y material necesarios para completar una impresión, así como la forma en que las capas se adhieren y enfrían [53].

Uno de los efectos más visibles de la velocidad de impresión es en la calidad de la superficie de sus modelos. En general, las velocidades de impresión más bajas tienden a producir superficies más suaves y detalladas, mientras que las velocidades de impresión más altas pueden dar como resultado superficies más ásperas y desiguales [53].

Esto se debe a que las velocidades de impresión más bajas permiten más tiempo para que el filamento se derrita, fluya y se adhiera a la capa anterior, creando una superficie uniforme y consistente. Las velocidades de impresión más altas, por otro lado, pueden causar más supuración, encordado y subextrusión, lo que lleva a huecos, manchas y defectos en la superficie [53].

Como puede ver, la velocidad de impresión tiene un efecto significativo en la calidad y el acabado de sus modelos impresos en 3D, pero también tiene algunas compensaciones. Las velocidades de impresión más bajas pueden mejorar la calidad de la superficie, la exactitud dimensional y la precisión, pero también aumentan el tiempo de impresión y el riesgo de obstrucciones y atascos [53].

Las velocidades de impresión más altas pueden reducir el tiempo de impresión y el consumo de material, pero también degradan la calidad de la superficie, la exactitud dimensional y la precisión. Por lo tanto, encontrar la velocidad de impresión óptima para su proyecto depende de sus prioridades, preferencias y capacidades de la impresora [53].

Estudio de la influencia de los parámetros de impresión 3D por FDM (modelo por deposición fundida) en las propiedades del PLA (ácido poliláctico)

En el estudio realizado [54], se evaluó el efecto de la velocidad de deposición en impresiones 3D sobre las propiedades mecánicas del PLA. Se fabricaron probetas normalizadas mediante tecnología FDM utilizando velocidades de 20, 36, 60 y 90 mm/s, manteniendo constantes otros parámetros como la temperatura del extrusor (205 °C), la cama caliente (70 °C) y la altura de capa (0,2 mm).

Los ensayos de tracción revelaron que una mayor velocidad de impresión conlleva una disminución en la resistencia mecánica de las piezas. A velocidades más altas, se observó una peor adhesión entre capas, presencia de porosidades y una mayor probabilidad de fallos prematuros. En contraste, las probetas impresas a 36 mm/s presentaron mayor resistencia a la tracción y mejor cohesión interlaminar. Los autores concluyen que, para aplicaciones que requieran buenas propiedades mecánicas, es preferible trabajar con velocidades bajas, mientras que las velocidades altas pueden ser útiles en situaciones donde el tiempo de impresión sea prioritario y la resistencia estructural no sea crítica [54].

El trabajo analiza de forma sistemática cómo los distintos parámetros de impresión 3D mediante tecnología FDM afectan a las propiedades mecánicas del PLA [54]. Donde se ha fabricado una probeta tipo mancuerna (**Figura 22**).

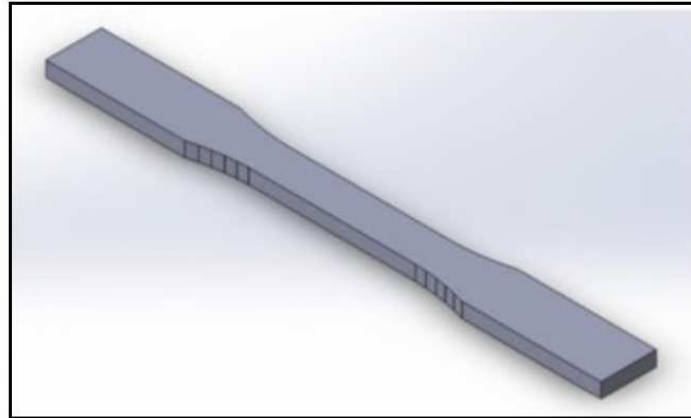


Figura 22: Probeta tipo mancuerna para ensayo de tracción [54].

Se estudian variables como la temperatura del extrusor, altura de capa, tipo de relleno y, particularmente, la velocidad de impresión, considerando sus efectos sobre la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y el alargamiento a rotura (**Figura 23**).

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura de extrusión	205	°C
Temperatura de la cama caliente	70	°C
Altura de capa	0,2	Mm
Perímetros internos	7	UNI
Perímetros externos	15	UNI
Tipo de patrón	Rectilinear 45°	
Densidad	100	%
Velocidad de impresión	60	mm/s

Figura 23: Parámetros de impresión recomendados por el fabricante de PLA [54].

Respecto a la velocidad de impresión, el autor concluye que existe una relación inversamente proporcional entre esta y la resistencia mecánica: al aumentar la velocidad, la adhesión entre capas se ve comprometida, generando estructuras más frágiles. Además, se señala que la velocidad también influye en el grado de cristalinidad del PLA, afectando así su rigidez y comportamiento térmico (**Figura 24**). En definitiva, el estudio destaca la importancia de una correcta parametrización del proceso de impresión para lograr piezas con un balance adecuado entre calidad superficial, resistencia estructural y tiempos de fabricación [54].

MUESTRAS PARA ENSAYOS DE TRACCION	
DIMENSION	Medida en (mm)
Anchura W de sección estrecha.	13
L-Longitud de la sección estrecha	57
Anchura total WO.	19
LO-longitud total.	165
G-longitud calibrada	50
D-distancia entre las empuñaduras	115
R-Radio del filete	76

Figura 24: Dimensiones de la probeta para ensayos de tracción [54].

Effects of Process Parameters on Surface Roughness, Dimensional Accuracy and Printing Time in 3D Printing

Este estudio investiga cómo los parámetros del proceso, específicamente la **altura de capa**, la **densidad de relleno** y la **velocidad de impresión**, afectan a la **rugosidad superficial**, la **precisión dimensional** y el **tiempo de impresión** en la tecnología de impresión 3D por deposición de material fundido (FDM), utilizando PLA como material de impresión y una impresora Ultimaker (**Figura 25**).

Para reducir el número de ensayos necesarios, se utilizó un diseño experimental **Taguchi L9**, considerando tres niveles para cada uno de los tres parámetros.

Las mediciones de rugosidad se realizaron con un rugosímetro Mitutoyo SJ-301 [55].

Relación entre velocidad de impresión y rugosidad superficial

- A velocidades bajas (50 mm/s) y con una altura de capa pequeña (0,06 mm), se obtuvo la menor rugosidad superficial.
- A mayores velocidades (100–150 mm/s), la rugosidad aumentó, especialmente con capas finas (**Tabla 6**).
- Para alturas de capa mayores (0,10–0,20 mm), el efecto de la velocidad sobre la rugosidad fue menos pronunciado (**Tabla 7**).

Conclusión clave: A mayor velocidad de impresión, mayor rugosidad, especialmente cuando la altura de capa es pequeña (**Figura 26**).

Parámetros óptimos para baja rugosidad

- Altura de capa: **0,06 mm**.
- Densidad de relleno: **50 %**.
- Velocidad de impresión: **50 mm/s**.

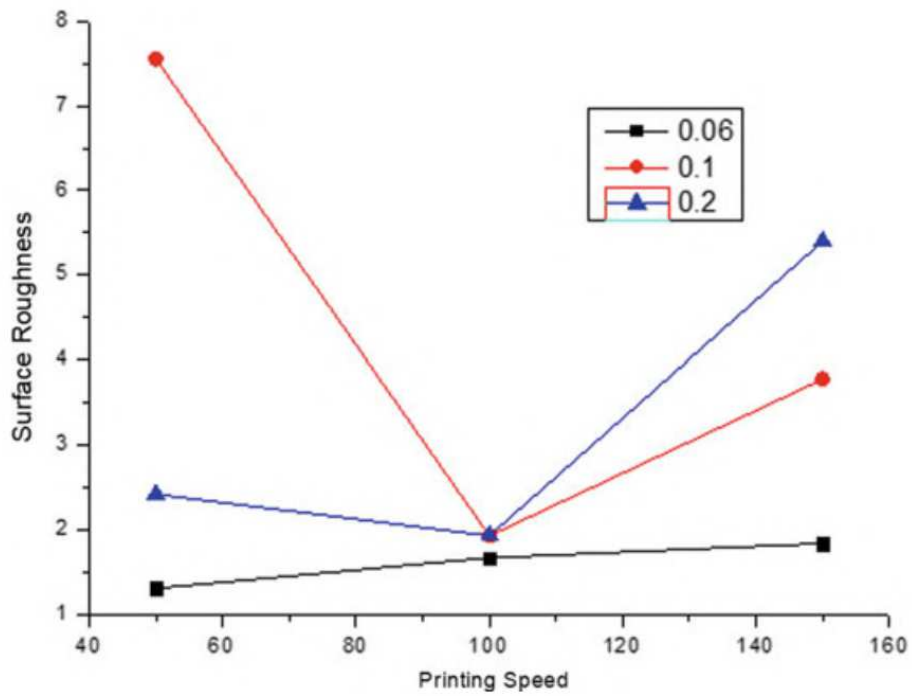


Figura 25: Efecto de la velocidad frente a la rugosidad superficial [55].

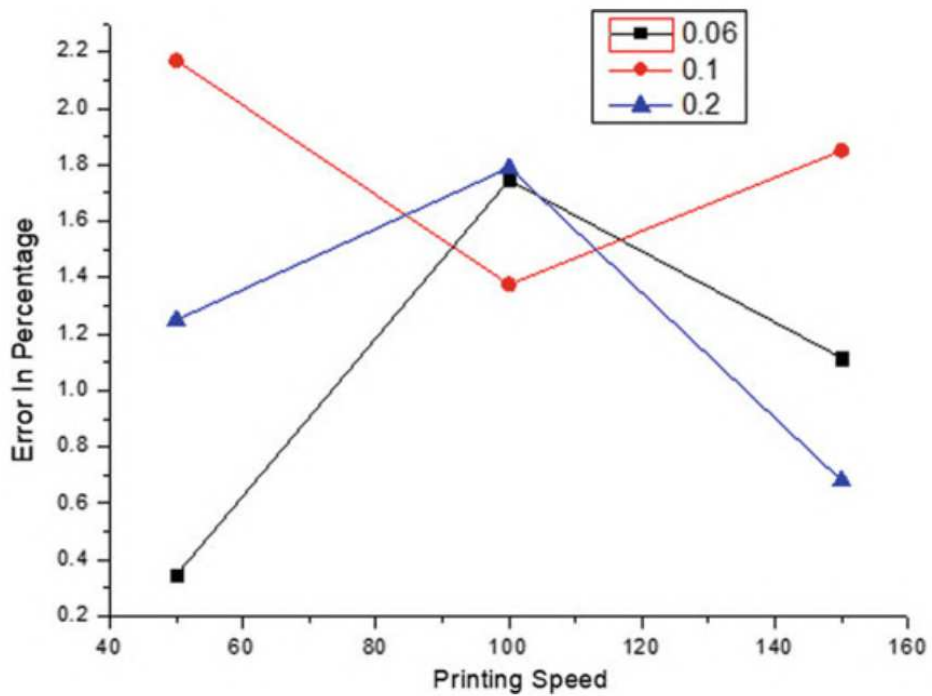


Figura 26: Efecto de la velocidad frente a porcentaje de error [55].

Run order	Layer height (mm)	Infilled density (%)	Printing speed (mm/s)
1	0.06	20	50
2	0.06	50	100
3	0.06	100	150
4	0.10	20	100
5	0.10	50	150
6	0.10	100	50
7	0.20	20	150
8	0.20	50	50
9	0.20	100	100

Tabla 6: Configuración de parámetros para cada orden de ejecución según el diseño experimental Taguchi L9 [55]

Run order	Printing time (min)	Surface roughness Ra (μm)	
		Top	Side
1	101	1.31	3.695
2	71	1.67	5.28
3	141	1.84	5.545
4	36	1.93	6.9
5	35	3.78	6.765
6	172	7.55	14.94
7	16	5.4	13.635
8	38	2.42	13.255
9	52	1.93	13.1

Tabla 7: Tiempo de impresión y rugosidad superficial (Ra) en la parte superior y lateral para cada orden de ejecución [55].

Conclusiones generales

El principal objetivo de este trabajo es investigar el rendimiento de impresión de la impresora 3D Ultimaker. Todas las pruebas experimentales y la planificación se llevaron a cabo utilizando la técnica de diseño de experimentos (DOE) de Taguchi. En total, se realizaron 9 ejecuciones en esta investigación experimental. Las siguientes conclusiones se obtienen en función del desempeño de las características de mecanizado estudiadas en el presente trabajo, a saber: tiempo de impresión, rugosidad superficial y precisión dimensional [55].

Cuando la velocidad se incrementa hasta el límite de 75 mm/s, manteniendo constante la altura de capa y la densidad de relleno, se observa una relación directamente proporcional con la rugosidad superficial del modelo. Además, se produjo un incremento rápido en el error al aumentar la altura de capa de 0,10 a 0,20 mm [55].

2.17. Defectos geométricos asociados a parámetros tecnológicos

Otro aspecto de la calidad de impresión que está influenciado por la velocidad de impresión es la precisión dimensional, que es qué tan cerca su impresión coincide con las dimensiones de su modelo digital. La precisión dimensional puede verse afectada por varios factores, como el tamaño de la boquilla, la altura de la capa y el multiplicador de extrusión, pero la velocidad de impresión también juega un papel importante.

En general, las velocidades de impresión más altas pueden reducir la precisión dimensional, mientras que las velocidades de impresión más bajas pueden mejorarla. Esto se debe a que las velocidades de impresión más altas pueden causar una mayor expansión térmica y contracción del filamento, lo que resulta en deformación, rizado y contracción de la impresión. Las velocidades de impresión más bajas, por otro lado, pueden reducir estos efectos al permitir más tiempo para que el filamento se enfríe y se solidifique [53].

La precisión es otro factor que se relaciona con la calidad de impresión y se refiere a qué tan bien su impresión reproduce los detalles finos y las características de su modelo digital. La precisión puede verse afectada por la resolución y la precisión de los componentes mecánicos de la impresora, como los motores paso a paso, las correas y las poleas, pero la velocidad de impresión también tiene un impacto. En general, las velocidades de impresión más bajas pueden aumentar la precisión, mientras que las velocidades de impresión más altas pueden disminuirla.

Esto se debe a que las velocidades de impresión más bajas pueden reducir las vibraciones y la inercia de las piezas móviles de la impresora, lo que resulta en movimientos más precisos y estables. Las velocidades de impresión más altas, por otro lado, pueden aumentar las vibraciones y la inercia de las piezas móviles de la impresora, lo que resulta en más errores y desviaciones [53].

2.18. Análisis y estudios bibliográficos sobre alta velocidad en procesos FFF

En un nuevo estudio, investigadores de la Universidad de Rutgers han esbozado lo que, según ellos, es un proceso de impresión 3D FFF mucho más rápido y preciso. El método se denomina Fabricación de Filamento Fundido Multiplexado (MF3) y consiste en un único pórtico y una serie de boquillas pequeñas en lugar de una única boquilla de gran tamaño utilizada tradicionalmente en FFF.

Gracias a ello, los autores afirman que han podido imprimir piezas grandes y complejas en 3D a una fracción del coste de otros métodos de impresión 3D. Además, el método destaca por permitirles no sólo reducir significativamente el tiempo de impresión, sino también aumentar tanto la resolución de impresión como el tamaño de las piezas [56].

Desarrollo de una impresora 3D FFF de alta velocidad

El presente trabajo describe el diseño, desarrollo y validación de una impresora 3D basada en la tecnología de Fused Filament Fabrication (FFF) con capacidades de impresión a alta velocidad, desarrollada por el Laboratorio de Tecnología de Fabricación de la Universidad Técnica Nacional de Atenas (NTUA) (**Figura 27**).

El objetivo principal es aumentar la velocidad de impresión en más de un 500 % en comparación con impresoras FFF convencionales, sin comprometer la calidad ni la resistencia mecánica de las piezas producidas [57].

Diseño mecánico y electrónico

Se utilizó una cinemática Core-XY para optimizar el movimiento del cabezal de impresión, logrando aceleraciones de hasta 25 000 mm/s² y velocidades de hasta 320 mm/s. El sistema emplea una placa BigTreeTech Octopus Pro con una fuente de alimentación de 48 V y drivers TMC configurados para operar en modo *spreadCycle*, maximizando precisión y torque (**Tabla 8**).

Kinematics (type)	Core-XY
Max Flow-rate [mm³/s]	17
Max Printing Speed [mm/s]	260–320
Max Travel Speed [mm/s]	600–1200
Max Acceleration [mm²/s]	25000
Max Deceleration [mm²/s]	25000
Printing volume [L×W×H mm³]	320 mm × 320 mm × 350 mm
Voltage [V]	48

Tabla 8: Especificaciones de la impresora [57].

Firmware y control

El firmware utilizado fue *Klipper*, que transfiere el procesamiento intensivo de comandos a un computador anfitrión, permitiendo movimientos más suaves y rápidos. Se emplearon herramientas como *Input Shaper* para mitigar vibraciones y artefactos resonantes (**Figura 28**).

Validación experimental

Para validar el desempeño, se comparó la nueva impresora con la Flashforge Creator 3 usando artefactos de prueba definidos en la norma ISO/ASTM 52902-2021. Las mediciones se realizaron con calibre digital, evaluando precisión dimensional y tiempo de impresión (**Tabla 9**).

	High Speed 3D Printer	Flashforge Creator 3
Printing Speed (mm/s)	260	60
Travel Speed (mm/s)	760	80
Acceleration (mm/s ²)	25000	500
Layer height (mm)	0.18	0.18
Nozzle Temperature (°C)	240	230
Bed Temperature (°C)	100	100
Slicer Software	Prusa Slicer	Flashprint
Infill Density	15 %	15 %
Infill pattern	Triangles	Triangles

Tabla 9: Configuración para cada impresora [57].

Resultados

La impresora de alta velocidad completó las piezas en un 80–83 % menos de tiempo que la impresora convencional, con una ligera pérdida de precisión dimensional (alrededor de 0.1–0.3 mm) (Tabla 10).

Las superficies superiores presentaron defectos menores, mitigables con técnicas de calibración como el *ironing* y adhesión mediante *raft* (Tabla 11).

	Nominal Dimension	HS Mean Values	LS Mean Values
Protrusion Spacing	5	4.86	4.97
	7.5	7.42	7.48
	10	9.91	9.89
	12.5	12.42	12.45
Protrusion thickness	2.5	2.68	2.63
	5	5.12	5.08
	5	5.13	5.04
	5	5.12	5.07
	2.5	2.64	2.60

Tabla 10: Valores medios de las mediciones en ambas impresoras. [57].

	Nominal Dimension	High Speed Mean Values	Low Speed Mean Values
Diameters	50	49.69	49.81
	47	46.86	46.74
	30	29.35	29.58
	16	15.07	14.66
	14	13.84	13.73

Tabla 11: Valores de diámetros a bajas y altas velocidades [57].

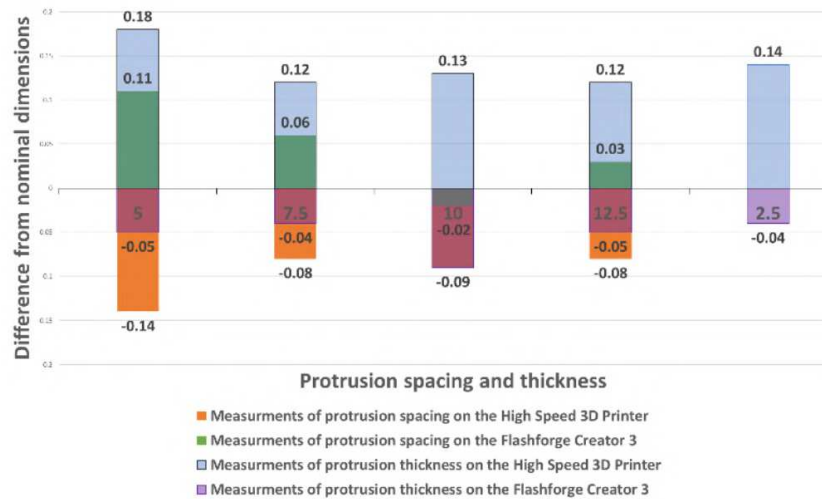


Figura 27: Diferencias en las mediciones de los artefactos lineales respecto a las dimensiones nominales [57].



Figura 28: Gráfico de radar para la impresora 3D de alta velocidad y la impresora 3D de baja velocidad (Flashforge Creator 3) [57].

Conclusión

La impresora FFF desarrollada ofrece una solución prometedora para la impresión 3D rápida en aplicaciones donde el tiempo es crítico. Aunque aún requiere ajustes para aplicaciones de alta precisión, su potencial en manufactura ágil es significativo, sentando las bases para futuras mejoras y adopción industrial.

3. Metodología del Estudio

3.1. Impresora 3D Utilizada

Para la realización de este proyecto se ha utilizado un filamento comercial de PLA de la marca Smart Materials 3D, de color rojo y con un diámetro de 1,75 milímetros.

Además, se ha empleado la impresora 3D BambuLab X1 Carbon, cedida por el Departamento de Ingeniería Civil y Fabricación de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga (**Figura 29**).

A continuación, se presentan sus especificaciones técnicas (**Tabla 12**):

Especificación	Detalle
Tecnología	FFF (Modelado por Deposición Fundida)
Volumen de impresión	256 x 256 x 256 mm
Número de extrusores	1 (compatible con AMS para multicolor)
Diámetro de filamento	1.75 mm
Temperatura máx. del hotend	300 °C
Temperatura máx. de la cama	120 °C
Velocidad máx. de impresión	Hasta 500 mm/s
Aceleración máxima	20,000 mm/s ²
Materiales compatibles	PLA, ABS, PETG, ASA, PC, TPU, PA, CF...
Nivelación de cama	Automática con sensor LiDAR
Sistema de enfriamiento	Ventiladores dobles y gestión térmica
Pantalla	Táctil a color de 5 pulgadas
Sensores integrados	LiDAR, detección de filamento, cámara HD
Sistema de guiado	Ejes con rodamientos lineales
Conectividad	WiFi, Bluetooth, Tarjeta SD
Software compatible	Bambu Studio, Cura, PrusaSlicer
Peso de la impresora	14.9 kg
Dimensiones	389 x 389 x 457 mm
Consumo de energía	300 W máx.

Tabla 12: Especificaciones de la Impresora 3D [58].



Figura 29: Impresora 3D utilizada [58].

3.2. Instrumentación Medición utilizada

Para el análisis de la calidad superficial se utiliza Alicona InfiniteFocus SL es un sistema de metrología óptica basado en la variación focal, diseñado para realizar mediciones de alta precisión en superficies 3D sin contacto. Proporciona información detallada sobre la geometría y calidad superficial de piezas fabricadas en diversos materiales, permitiendo medir parámetros como Ra, Rz, Sa, Sz y Sdr con resolución nanométrica [59].

Su capacidad para capturar perfiles en 2D y reconstrucciones en 3D lo hace ideal para el análisis de rugosidad en impresión 3D, facilitando la optimización de parámetros como velocidad y temperatura de impresión (**Figura 30**).



Figura 30: Alicona InfiniteFocus SL [59].

La serie RONDCOM NEX de ACCRETECH es una línea de equipos de medición de formas con alta precisión (error de rotación de 20 nm). Incluye un palpador CNC patentado, un eje R de cerámica para mayor rigidez y una mesa giratoria con cojinetes de aire (**Figura 31**). Modelos como NEX 100, 200 y 300 ofrecen alineación automática y programación CNC. Además, cuenta con opciones para automatizar procesos, reduciendo tiempos de medición y mejorando la eficiencia en control de calidad [60].



Figura 31: RONDCOM NEX [60].

3.3. Software de Medición utilizado

ACCTee es un software de análisis integrado de ACCRETECH para la medición de superficies, contornos y formas (**Figura 32**). Su interfaz intuitiva permite realizar mediciones y análisis en un solo documento. Ofrece funciones automáticas, reanálisis, ejecución CNC y soporte multilingüe. Se integra con equipos de ACCRETECH para mejorar la eficiencia en entornos industriales [61].

Alicona MeasureSuite es un software de metrología óptica basado en la tecnología Focus-Variation, diseñado para medir con alta precisión la rugosidad y geometría de superficies en 3D. Permite evaluar la calidad superficial según estándares como ISO 4287 e ISO 25178, medir dimensiones como ángulos, radios y distancias, y comparar mediciones con modelos CAD para verificar tolerancias.

Su capacidad de análisis detallado lo hace ideal para estudiar la influencia de la velocidad en impresión 3D FFF, permitiendo cuantificar defectos superficiales y correlacionar parámetros de impresión con el acabado final [62].



Figura 32: Software medición utilizado [61].

3.4. Software de Laminación utilizado

Se ha utilizado el programa Bambu Studio. Es un software de laminación de código abierto, de última generación y rico en funciones (**Figura 33**). Contiene flujos de trabajo basados en proyectos, algoritmos de corte optimizados sistemáticamente y una interfaz gráfica fácil de usar, lo que les proporciona a los usuarios una experiencia de impresión increíblemente fluida [63].

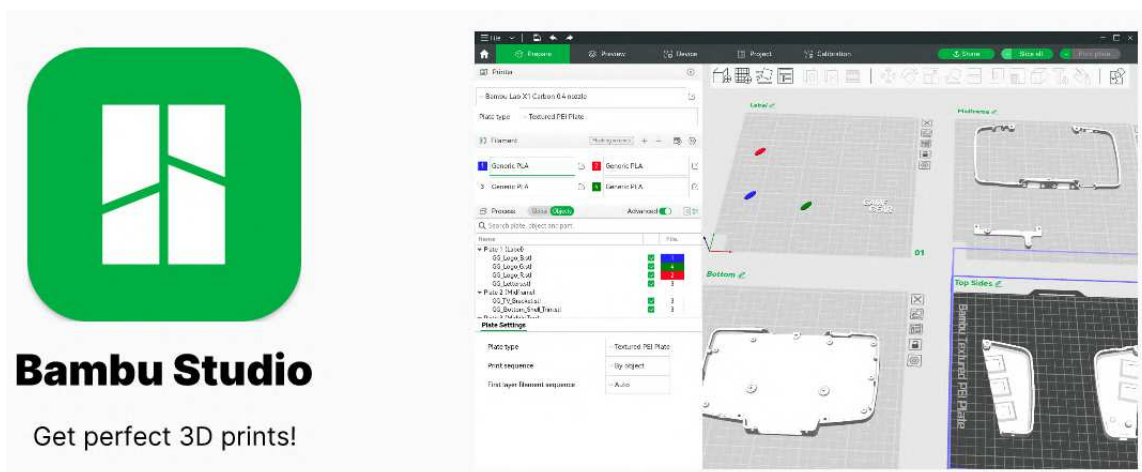


Figura 33: Software laminación utilizado [63].

3.5. Dimensionamiento de las probetas

El procedimiento seguido para cada una de las probetas impresas es el siguiente:

- Dimensiones de las probetas.

En este proyecto se analizarán un total de 60 probetas: 30 con una geometría de sección rectangular hueca y 30 con una geometría de sección cilíndrica hueca (**Figura 34**). Cada pareja se imprimirá con las siguientes medidas expuestas (**Figura 35**).

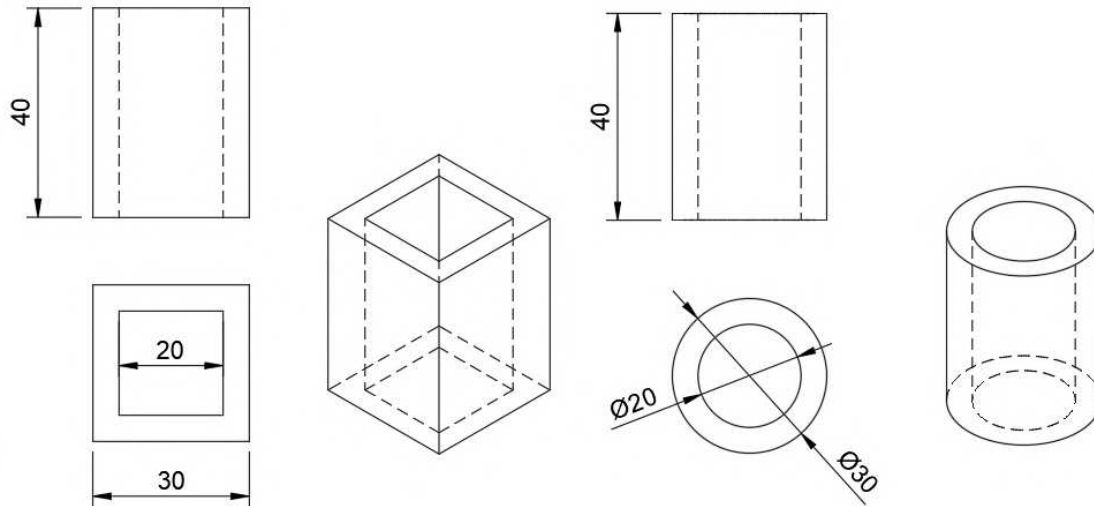


Figura 34: Dimensiones de las Probetas.

- Variables que se van a analizar.

La temperatura y la velocidad de impresión se incrementarán progresivamente hasta alcanzar los valores máximos recomendados por el fabricante. En la siguiente tabla se detallan los intervalos establecidos para cada pareja (**Tabla 13**).

Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V [mm/s]	60	100	150	200	250	300	350	400	450	500
T [°C]	215									
Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V [mm/s]	60	100	150	200	250	300	350	400	450	500
T [°C]	225									
Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V [mm/s]	60	100	150	200	250	300	350	400	450	500
T [°C]	235									

Tabla 13: Intervalos de Velocidad y Temperatura.

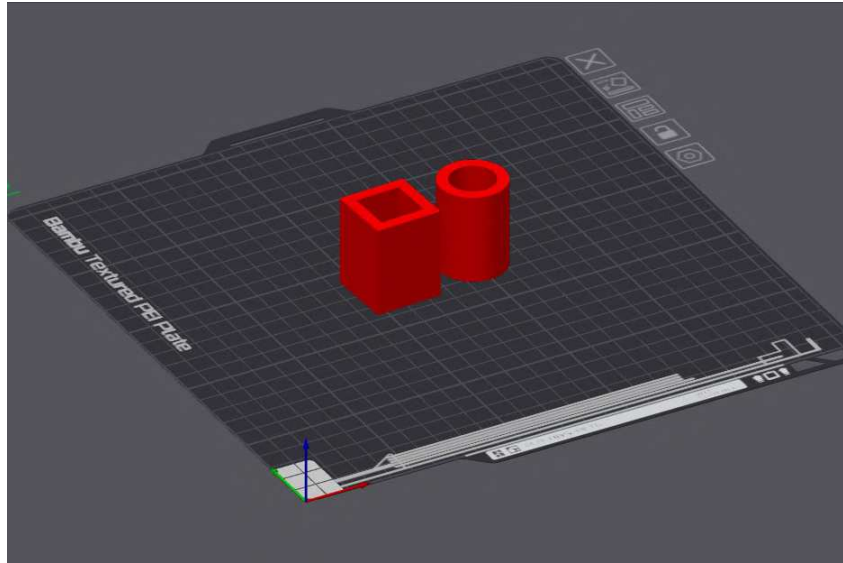


Figura 35: Probetas en Software Laminador.

3.6. Configuración variables del Laminador

En algunos casos, se ha ajustado el porcentaje de relleno y el flujo volumétrico máximo para alcanzar la velocidad de impresión deseada. Esto se debe a que el software de laminación, cuando el relleno es inferior al 100 %, limita la velocidad máxima alcanzable (Figura 36).

Por ello, se han modificado estos parámetros con el fin de lograr las velocidades propuestas.

Relleno poco denso	
Densidad de relleno	15 %
Patrón de relleno disperso	Rejilla
Longitud del anclaje de relleno disperso	400 mm or %
Longitud máxima del anclaje de relleno disperso	20 mm or %

Velocidad de otras capas	
Pared exterior	200 mm/s
Pared interior	300 mm/s
Perímetros pequeños	50% mm/s o en %
Umbral perimétrico pequeño	0 mm
Relleno poco denso	270 mm/s
Relleno sólido interno	250 mm/s
Superficie superior	200 mm/s
Disminución de velocidad de voladizo	<input checked="" type="checkbox"/>
	0 mm/s (10%, 25%)
	50 mm/s (25%, 50%)
	30 mm/s (50%, 75%)
	10 mm/s (75%, 100%)
over 100% wall (not bridge)	50 mm/s
Puente	50 mm/s
Relleno de huecos	250 mm/s

Filamento	Enfriando	Anulaciones de configuración	Avanzado	Notes
Color predeterminado				
Diámetro	1,75	mm		
Proporción de flujo	0,98			
Densidad	1,26	g/cm³		
Shrinkage	100	%		
Precio	24,99	dinero/kg		
Temperatura de ablandamiento	45			
Temperatura recomendada de la boquilla	Min	190 °C	Max	240 °C

Temperatura de impresión	
Boquilla	Capa inicial: 220 °C, Otras capas: 220 °C
Bambu Cool Plate SuperTack	Capa inicial: 45 °C, Otras capas: 45 °C
Placa fría	Capa inicial: 35 °C, Otras capas: 35 °C
Placa de ingeniería	Capa inicial: 0 °C, Otras capas: 0 °C
Placa lisa PEI / Placa alta temperatura	Capa inicial: 55 °C, Otras capas: 55 °C
Placa PEI texturizada	Capa inicial: 55 °C, Otras capas: 55 °C

Limitación de la velocidad volumétrica	
Velocidad volumétrica máxima	21 mm/s

Figura 36: Parámetros Modificados.

3.7. Impresión de las probetas

Una vez ajustados los parámetros de impresión y verificada su correcta configuración, se procede a la fabricación de cada tanda de parejas de probetas. Durante este proceso, se monitorean variables clave como la temperatura del extrusor y la cama de impresión, la velocidad de deposición del material y la adhesión de las primeras capas, asegurando así la repetibilidad y calidad de las piezas (**Figura 37**).

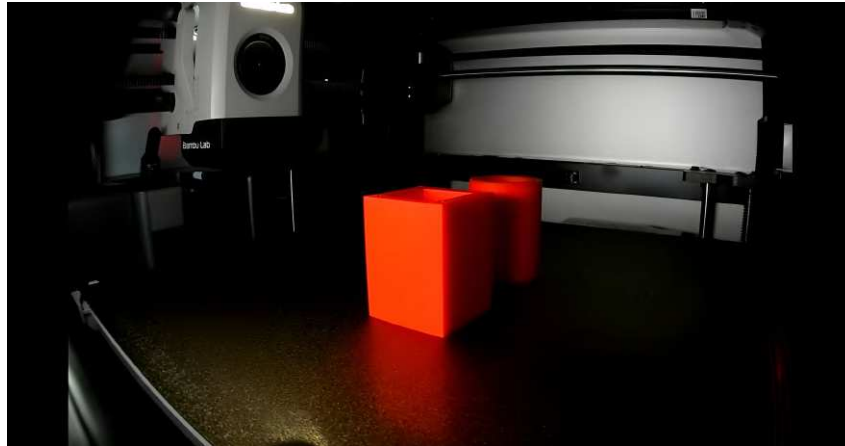


Figura 37: Probetas Impresas.

3.8. Análisis de defectos macrogeométricos

Se analizará la calidad superficial de las probetas mediante el instrumento de metrología RONDCOM NEX de ACCRETECH. Se evaluarán en detalle el redondeo, la rectitud y la cilíndricidad de todas las superficies, tanto exteriores como interiores, de cada probeta de sección cilíndrica impresa (**Figura 38**).



Figura 38: Evaluación defectos de forma de una de las probetas.

El procedimiento seguido para la caracterización de los defectos de forma mediante el sistema se estructuró en las siguientes etapas:

1. **Preparación previa:** Nos aseguramos de que el equipo esté conectado y encendido correctamente. Este instrumento trabaja con aire a presión, se debe tener en cuenta al encender la medidora de forma. La sala debe estar climatizada y sin vibraciones externas. Comprobamos que el sistema esté limpio, calibrado y sin errores en el software.
2. **Colocación de la pieza:** Limpiamos la superficie de la muestra para eliminar polvo, grasa o residuos. Colocamos la pieza sobre la mesa rotatoria del equipo. Utilizamos un mandril, plato magnético o fijación mecánica dependiendo de la geometría. Nos aseguramos de que la pieza esté bien centrada y nivelada.
3. **Calibración del instrumento:** Antes de poner en marcha el análisis, se ha llevado a cabo el centrado y nivelado de la máquina, así como el ajuste de las coordenadas, estableciendo el origen en el eje Z y definiendo el radio de la probeta.
4. **Configuración en el software (ACCTee):** Seleccionamos el modo de medición. Definimos los parámetros de medición (velocidad de rotación, número de rotaciones, longitud del trazo).

El palpador recorre el perímetro de la probeta y se posiciona en cada una de las alturas previamente definidas en la configuración del programa, comenzando desde la base. La altura a la que se debe situar el palpador varía en función del tipo de desviación que se desea medir (**Figura 39**).

Por ejemplo, para evaluar la redondez y la cilindridad, se realizan mediciones en seis alturas diferentes a lo largo de la longitud de la probeta, separadas entre sí por 5 mm (0, 5, 10, 15, 20, 25 mm). En cambio, para la rectitud, se requieren mediciones en cuatro puntos (0, 90, 180, 270 °). De este modo, se obtienen los resultados correspondientes a redondez, rectitud y cilindridad.

5. **Ejecutar la medición:** Bajamos el palpador cuidadosamente sobre la superficie. Monitoreamos la medición para verificar que no haya errores de contacto o vibración.

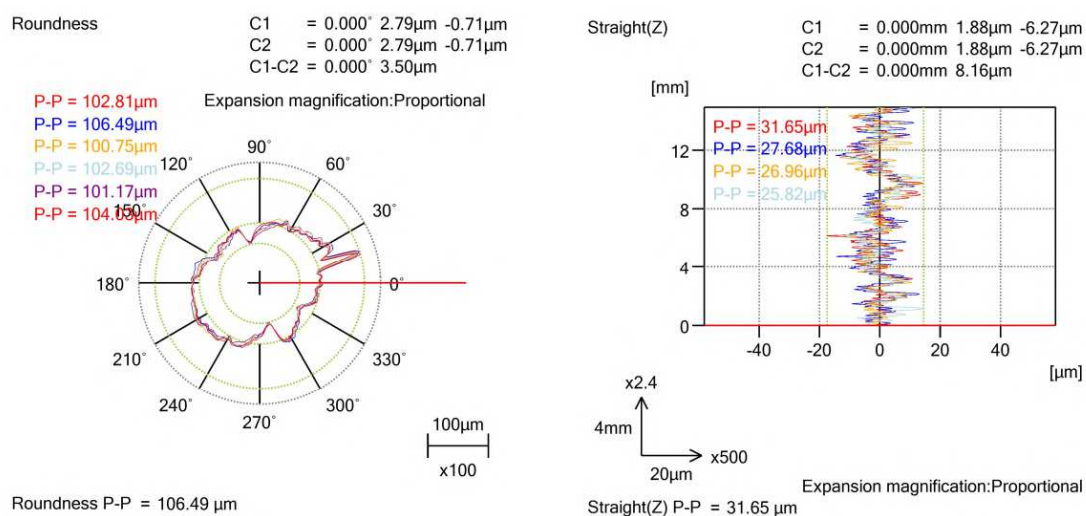


Figura 39: Ejemplo de resultados obtenidos en el análisis.

3.9. Análisis defectos microgeométricos

Para evaluar las dimensiones y características superficiales de las piezas texturizadas, se ha utilizado el sistema de medición Alicona InfiniteFocus SL. Este equipo emplea tecnología de enfoque automático para capturar imágenes tridimensionales de alta resolución, lo que permite realizar mediciones precisas de rugosidad, altura de las texturas y otros parámetros superficiales relevantes.

La muestra se colocó sobre la plataforma de medición y se realizó una breve calibración del sistema. A continuación, se ajustaron los parámetros de adquisición.

Se prestó especial atención a evitar cualquier desplazamiento de la muestra durante la captura de datos, con el fin de minimizar posibles interferencias (**Figura 40**).

Mediante tecnología de enfoque automático, se escaneó la superficie con un haz de luz para capturar datos detallados de una zona específica. Esta técnica permitió generar imágenes tridimensionales de alta resolución, fundamentales para el análisis dimensional y superficial posterior.

El procedimiento seguido para la caracterización superficial mediante el sistema Alicona se estructuró en las siguientes etapas:

1. **Preparación de la muestra:** La muestra se colocó cuidadosamente sobre la plataforma del equipo, apoyada en un bloque patrón para garantizar su estabilidad. Posteriormente, se realizó una breve calibración y se ajustaron los parámetros del sistema según las condiciones de medición.

Se prestó especial atención a evitar cualquier desplazamiento de la muestra durante el proceso de adquisición, minimizando así posibles interferencias en los datos.

2. **Captura de imágenes tridimensionales:** Mediante la tecnología de enfoque automático del sistema, se escaneó la superficie de interés utilizando un haz de luz, lo que permitió obtener imágenes tridimensionales de alta resolución.

Esta técnica posibilitó la reconstrucción precisa de la topografía de la muestra en el área seleccionada.

3. **Análisis de los datos:** Una vez completada la adquisición, se procedió al análisis de las imágenes 3D para extraer parámetros cuantitativos de rugosidad y altura.

En primer lugar, se realizó una nivelación de la superficie, eliminando curvaturas o defectos de forma, con el fin de asegurar la precisión de los resultados.

A continuación, se llevaron a cabo las mediciones de textura superficial, obteniendo los valores necesarios para los apartados *Surface Texture* y *Bearing Area Curve*, de acuerdo con las normativas correspondientes.



Figura 40: Microscopio confocal digital.

Se analizaron las imágenes capturadas con el objetivo de obtener mediciones precisas de la rugosidad y la altura de las texturas. Para ello, se llevó a cabo una medición del perfil de rugosidad, previa eliminación de posibles defectos de forma o curvatura. Posteriormente, se realizó el análisis de la textura superficial, extrayendo los valores necesarios (**Figura 41**).

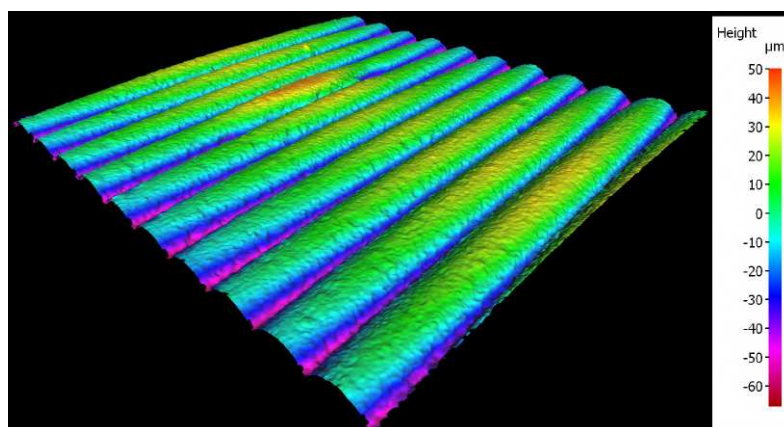


Figura 41: Ejemplo de superficie digitalizada.

4. Resultados y discusiones

4.1. Resultados obtenidos defectos microgeométricos

Después de recopilar todos los datos obtenidos a través del sistema de medición Alicona, se procedió a realizar un análisis visual detallado de los resultados.

Este análisis se llevó a cabo para cada una de las combinaciones de temperatura y velocidad consideradas en el estudio.

4.1.1. Inspección visual

El objetivo principal de esta etapa fue identificar patrones, irregularidades o comportamientos relevantes en la superficie medida, que pudieran estar asociados a las condiciones de operación impuestas.

Esta observación preliminar nos permitió obtener una comprensión inicial del efecto que tienen estas variables sobre las características de la superficie analizada, lo cual servirá de base para análisis cuantitativos posteriores.

- Para una temperatura de 215 °C:

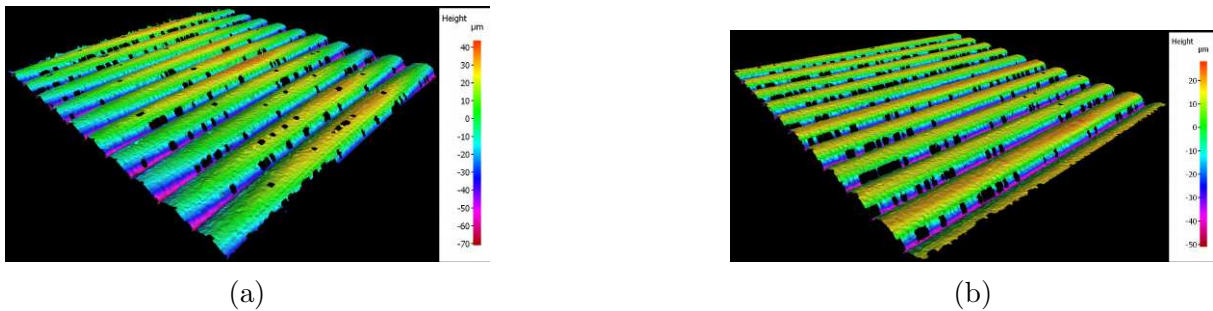


Figura 42: Comparación para una Velocidad de 60 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

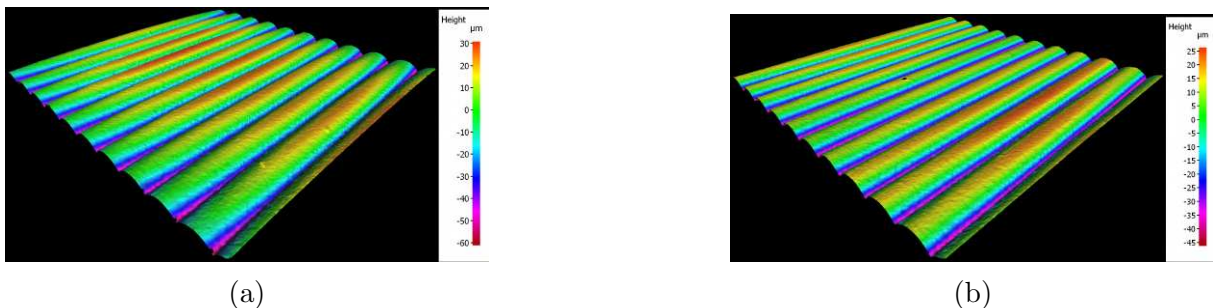
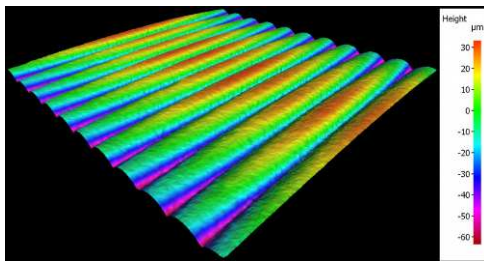
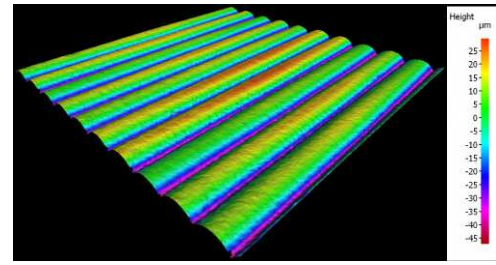


Figura 43: Comparación para una Velocidad de 100 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

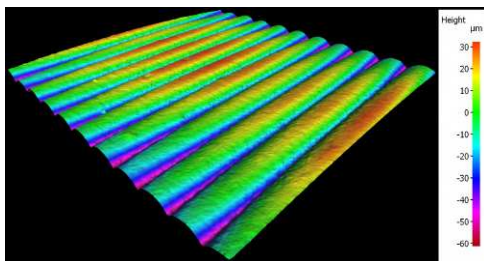


(a)

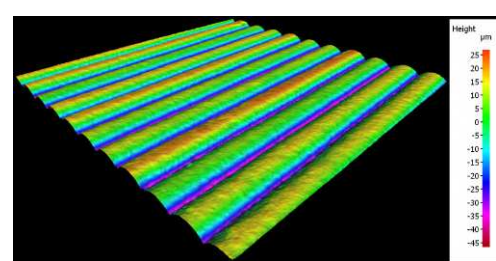


(b)

Figura 44: Comparación para una Velocidad de 150 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

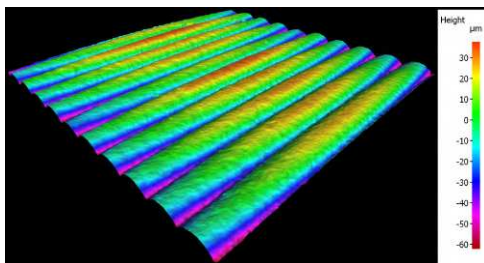


(a)

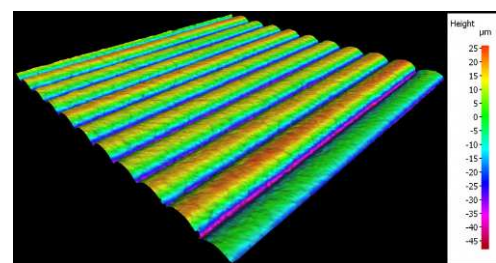


(b)

Figura 45: Comparación para una Velocidad de 200 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

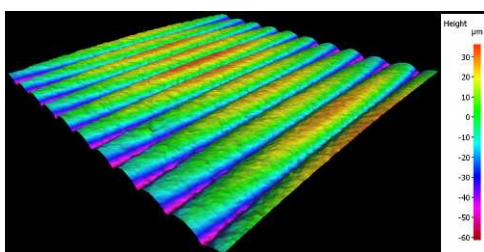


(a)

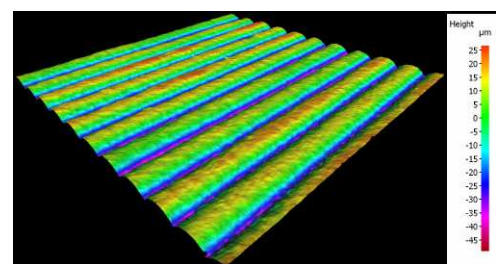


(b)

Figura 46: Comparación para una Velocidad de 250 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

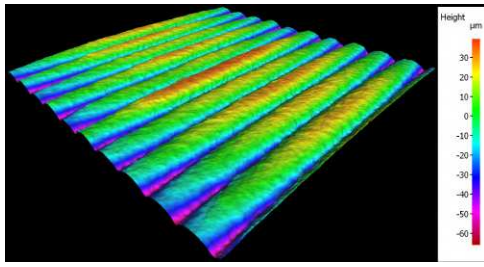


(a)

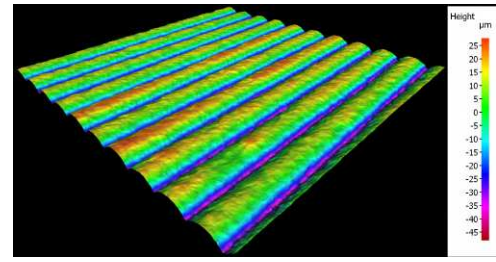


(b)

Figura 47: Comparación para una Velocidad de 300 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

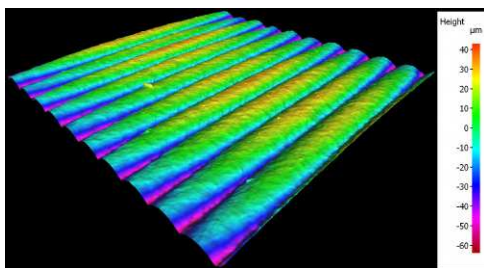


(a)

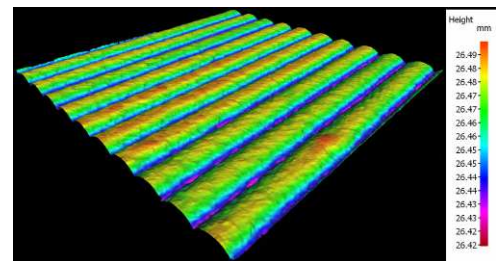


(b)

Figura 48: Comparación para una Velocidad de 350 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

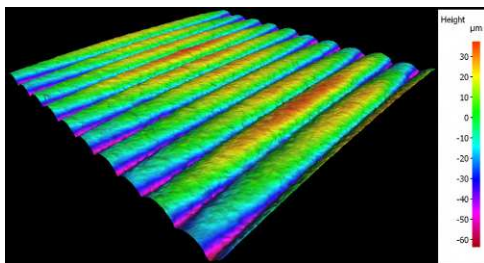


(a)

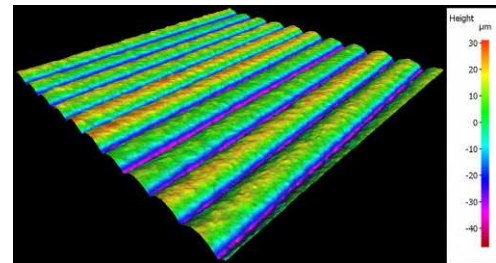


(b)

Figura 49: Comparación para una Velocidad de 400 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

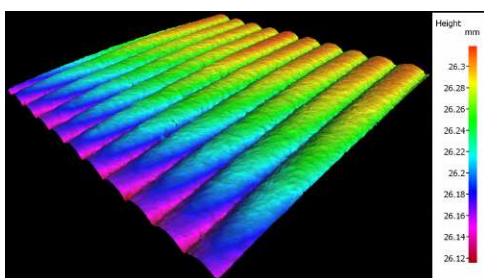


(a)

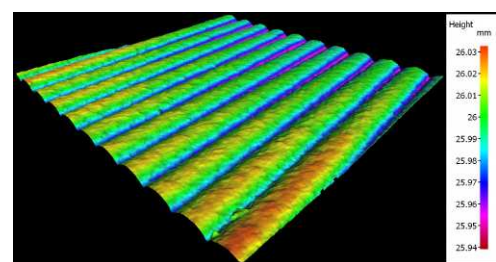


(b)

Figura 50: Comparación para una Velocidad de 450 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.



(a)



(b)

Figura 51: Comparación para una Velocidad de 500 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

- Conclusiones para $T = 215^{\circ}\text{C}$

Durante la evaluación de las probetas de sección circular y cuadrada a una temperatura de 215°C , se analizó el efecto de diferentes velocidades de impresión (entre 60 mm/s y 500 mm/s) sobre la calidad superficial.

En los primeros casos (**Figura 42**), a bajas velocidades como 60 mm/s, ambas geometrías presentaron una superficie con alta rugosidad y patrones poco definidos. Sin embargo, a partir de los 100 mm/s se observó una mejora notable en la calidad (**Figura 43**), especialmente en la probeta de sección cuadrada, la cual mostró mayor uniformidad y definición.

La mejor calidad superficial se alcanzó a velocidades de entre 100 y 150 mm/s, donde tanto la geometría circular como la cuadrada presentaron superficies limpias (**Figura 44**), con líneas bien definidas y una deposición regular del material. Este rango puede considerarse como el óptimo para imprimir a 215°C .

A medida que la velocidad aumentó más allá de los 200 mm/s, comenzaron a aparecer irregularidades (**Figura 45**). Esto puede deberse a que se necesita un mayor tiempo de enfriamiento del filamento, debido al colapso de capas aún blandas. A 250 mm/s, las superficies mostraron una pérdida progresiva de homogeneidad (**Figura 46**). La sección circular resultó más sensible a estas condiciones, exhibiendo mayores defectos de deposición y distorsiones en los patrones, afectado especialmente por las curvas internas o pequeños radios. Por otro lado, la sección cuadrada logró mantener una calidad aceptable hasta aproximadamente 300 mm/s (**Figura 47**).

Velocidades superiores a 350 mm/s reflejaron una clara degradación de la calidad superficial, con líneas cada vez más distorsionadas en ambas geometrías (**Figura 48**). Finalmente, a 500 mm/s, tanto la probeta circular como la cuadrada presentaron superficies deficientes, con pérdida total de la definición de capa, rugosidad elevada y posibles defectos asociados a una deposición inestable del material (**Figura 51**).

En conclusión, se identifica que el rango entre **100 y 150 mm/s** representa las condiciones más favorables para obtener una buena calidad superficial a 215°C . La geometría de sección cuadrada mostró un mejor comportamiento general frente a variaciones de velocidad, mientras que la sección circular resultó más susceptible a defectos conforme aumentaba la velocidad de impresión.

- Para una temperatura de 225 °C:

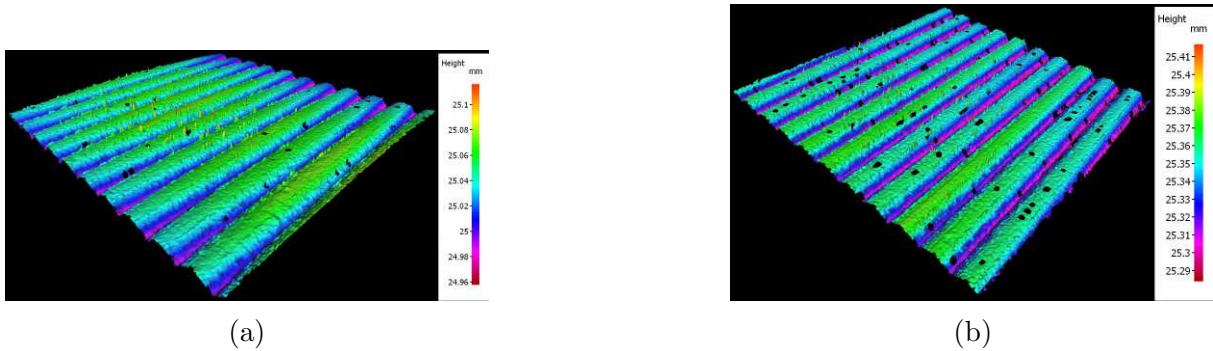


Figura 52: Comparación para una Velocidad de 60 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

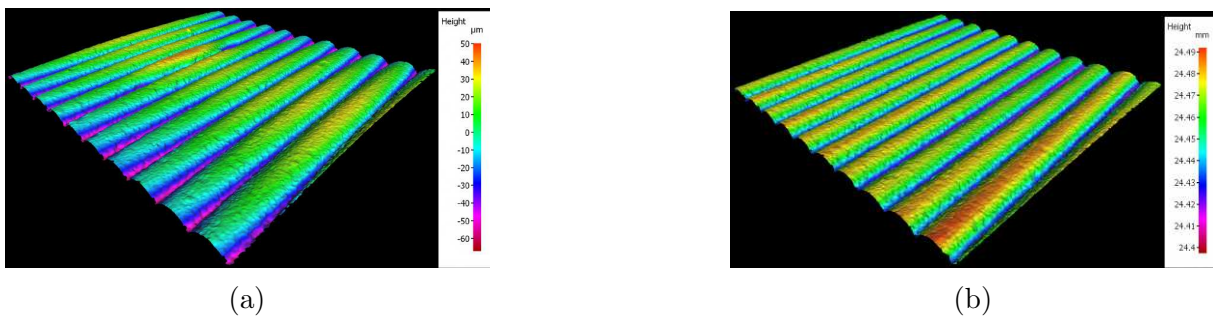


Figura 53: Comparación para una Velocidad de 100 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

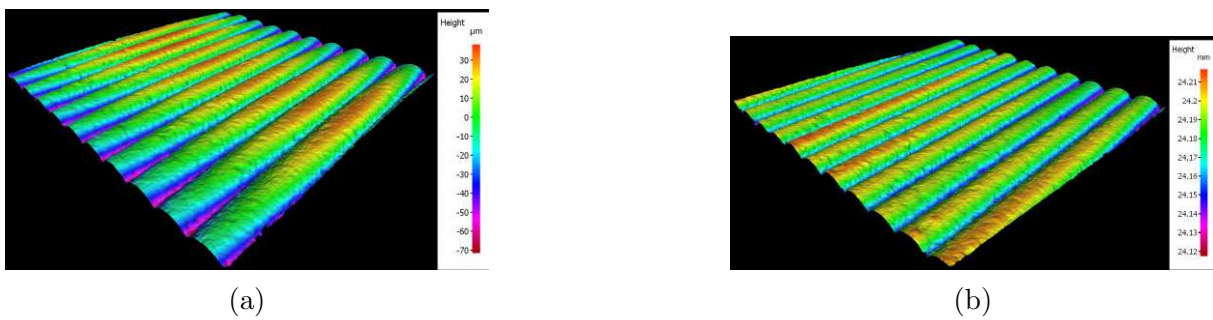
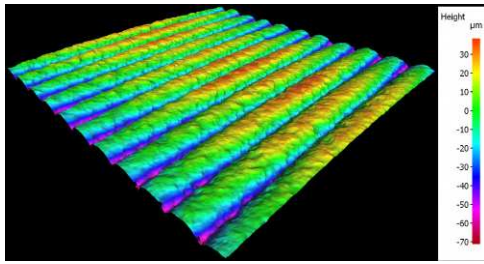
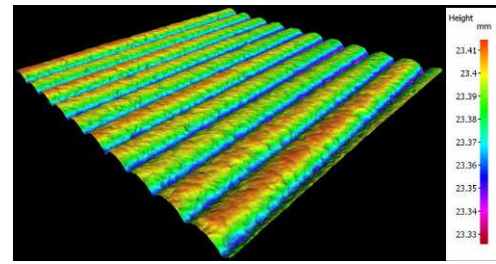


Figura 54: Comparación para una Velocidad de 150 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

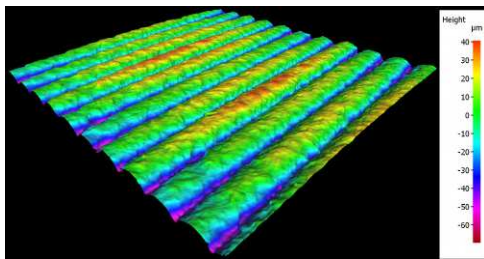


(a)

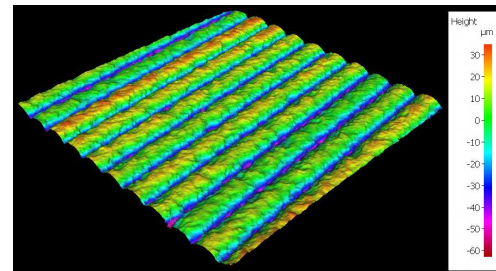


(b)

Figura 55: Comparación para una Velocidad de 200 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

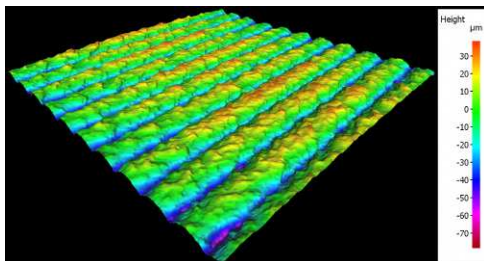


(a)

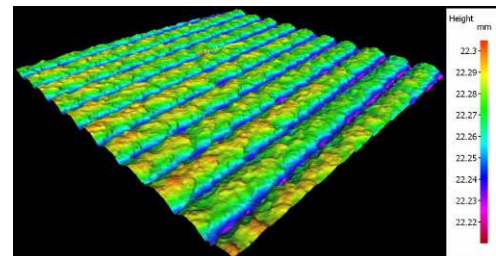


(b)

Figura 56: Comparación para una Velocidad de 250 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

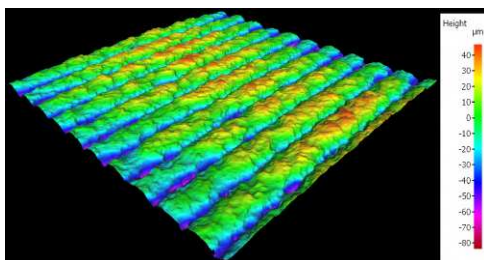


(a)

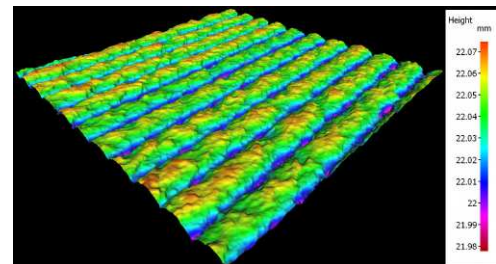


(b)

Figura 57: Comparación para una Velocidad de 300 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

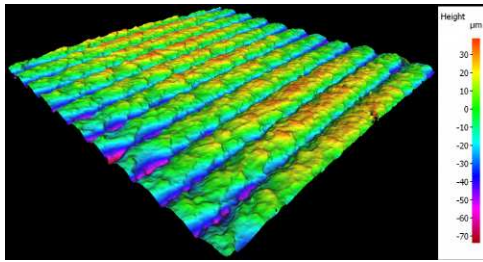


(a)

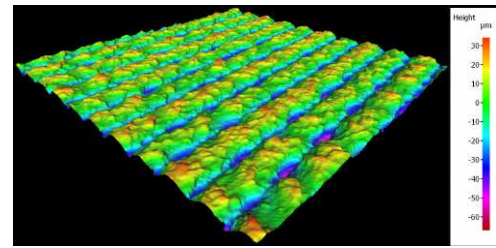


(b)

Figura 58: Comparación para una Velocidad de 350 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

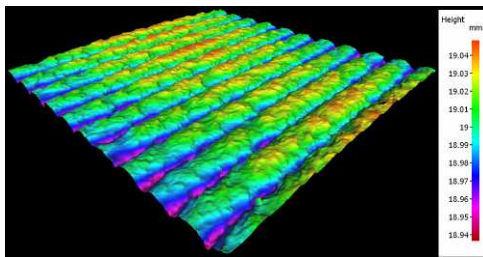


(a)

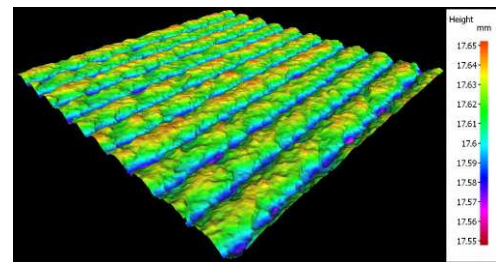


(b)

Figura 59: Comparación para una Velocidad de 400 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

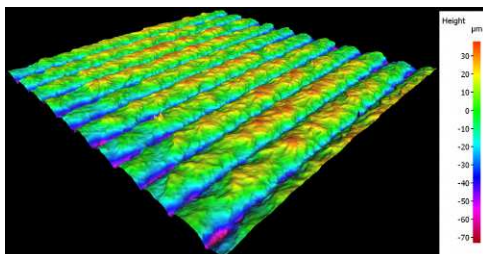


(a)

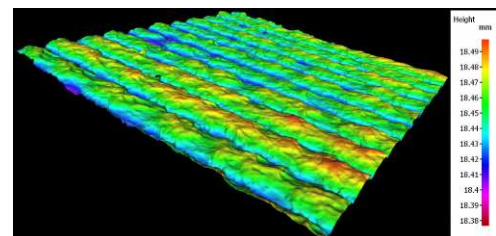


(b)

Figura 60: Comparación para una Velocidad de 450 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.



(a)



(b)

Figura 61: Comparación para una Velocidad de 500 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

- Conclusiones para $T = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$

A una temperatura de $225\text{ }^{\circ}\text{C}$, se analizó el comportamiento superficial de probetas con secciones circular y cuadrada a distintas velocidades de impresión, desde 60 mm/s hasta 500 mm/s .

En velocidades bajas (60 y 100 mm/s), ambas geometrías presentan superficies irregulares (**Figura 52**). La sección circular muestra mayor rugosidad y variaciones de altura, mientras que la sección cuadrada presenta una deposición más estable pero con ciertos defectos en la homogeneidad.

A velocidades medias (150 a 300 mm/s), se observa una mejora significativa en la calidad superficial (**Figura 57**). Las líneas de deposición son más uniformes y la rugosidad disminuye. La sección cuadrada mantiene una mejor estabilidad dimensional, mientras que la circular, aunque mejora, continúa mostrando leves ondulaciones. Un factor a tener en cuenta que las aceleraciones y desaceleraciones generan vibraciones que afectan la precisión geométrica.

En el rango de 350 a 400 mm/s , comienza a notarse un ligero deterioro en la calidad, especialmente en la sección circular, donde las irregularidades y las variaciones de altura se hacen más evidentes (**Figura 59**). La sección cuadrada sigue comportándose de forma más controlada, aunque también comienza a evidenciar cierta pérdida de definición en las capas.

Finalmente, a velocidades elevadas de 450 y 500 mm/s , ambas geometrías sufren una disminución notable en la calidad superficial (**Figura 61**). La rugosidad aumenta considerablemente, se pierden los patrones uniformes y aparecen defectos más marcados, sobre todo en la sección circular. La probeta cuadrada, aunque afectada, conserva una mejor definición en comparación.

En resumen, para una temperatura de $225\text{ }^{\circ}\text{C}$, las velocidades óptimas se encuentran entre 150 y 300 mm/s , siendo la sección cuadrada la que ofrece una mayor estabilidad y calidad superficial en un rango amplio de velocidades. A velocidades superiores a 400 mm/s , ambas geometrías presentan una pérdida considerable en la calidad de impresión.

- Para una temperatura de 235°C:

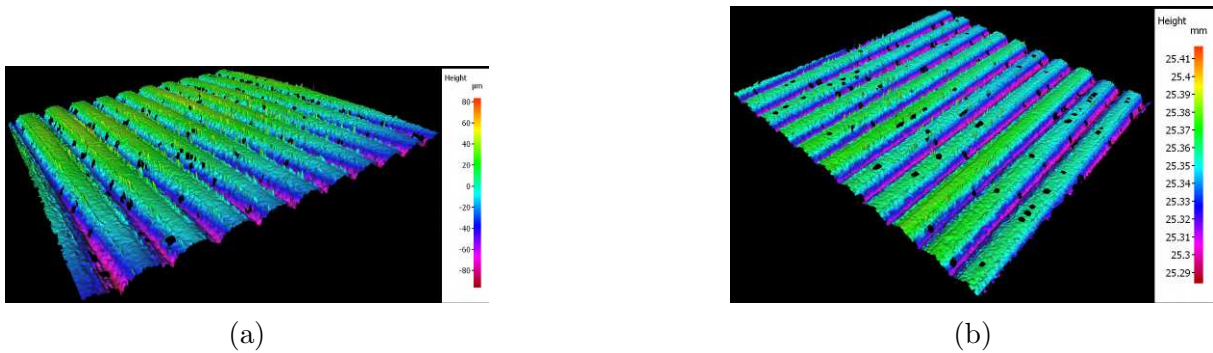


Figura 62: Comparación para una Velocidad de 60 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

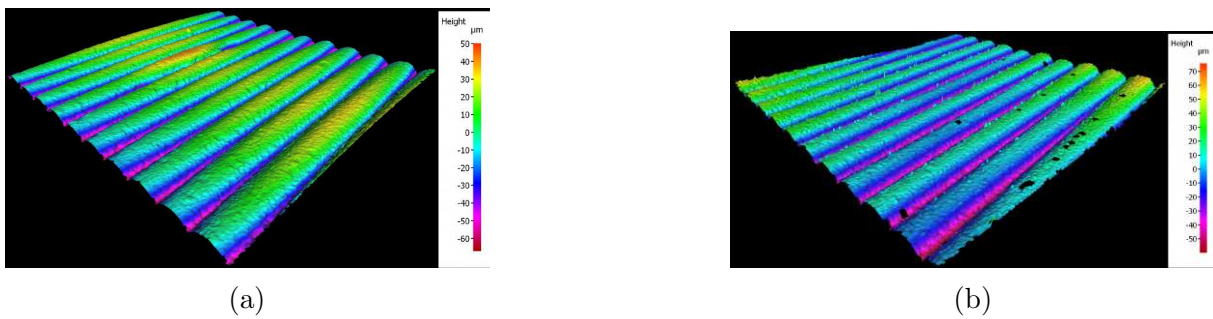


Figura 63: Comparación para una Velocidad de 100 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

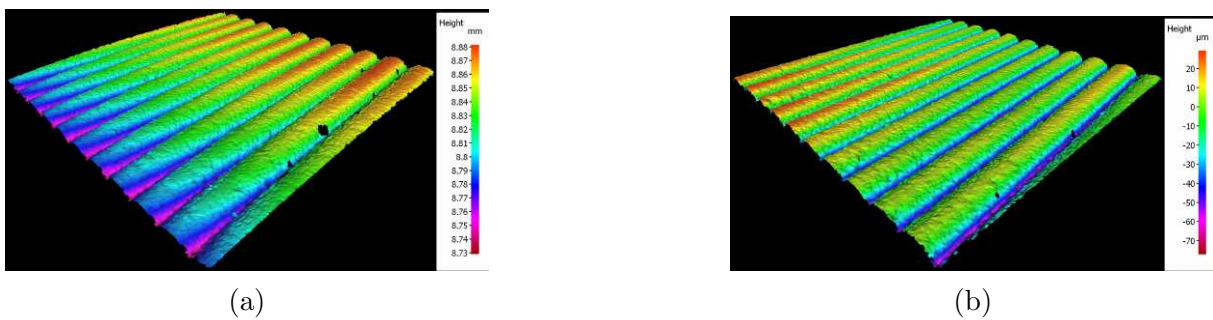
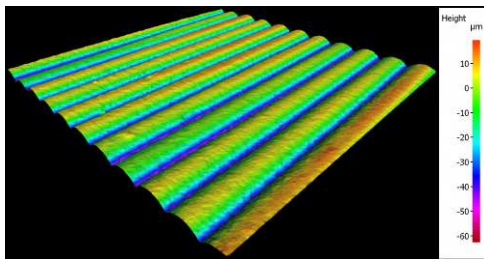
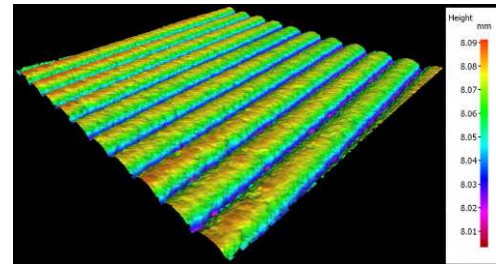


Figura 64: Comparación para una Velocidad de 150 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

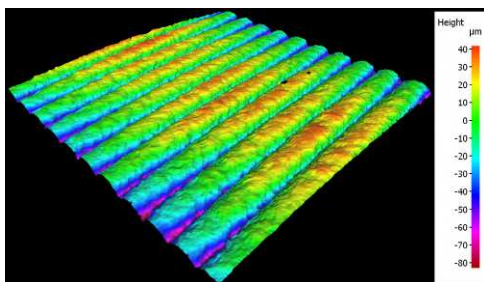


(a)

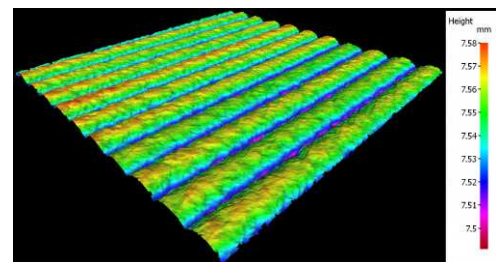


(b)

Figura 65: Comparación para una Velocidad de 200 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

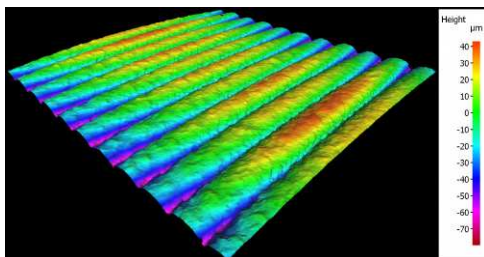


(a)

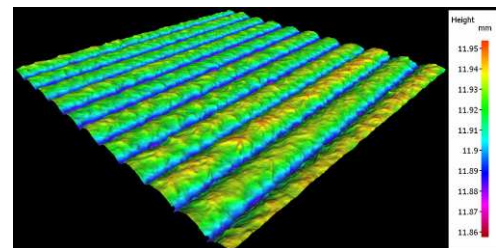


(b)

Figura 66: Comparación para una Velocidad de 250 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

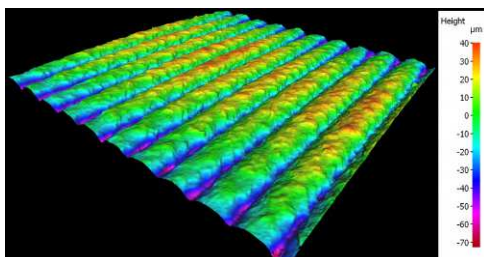


(a)

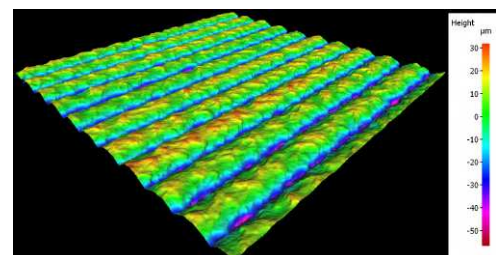


(b)

Figura 67: Comparación para una Velocidad de 300 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

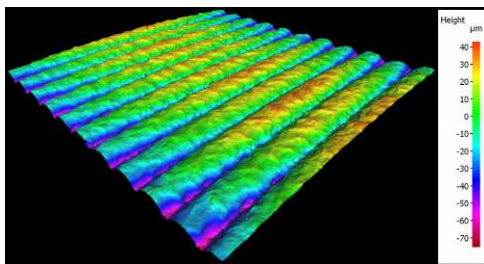


(a)

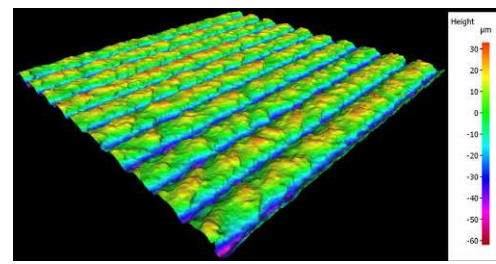


(b)

Figura 68: Comparación para una Velocidad de 350 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

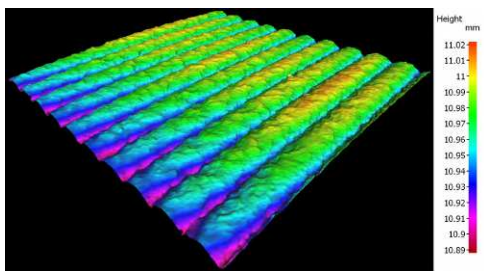


(a)

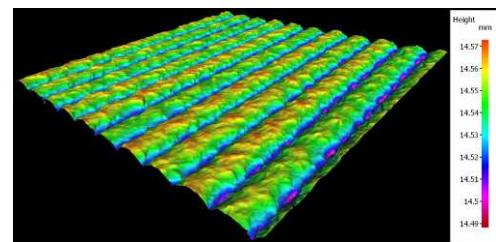


(b)

Figura 69: Comparación para una Velocidad de 400 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

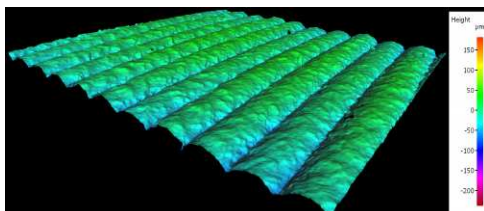


(a)

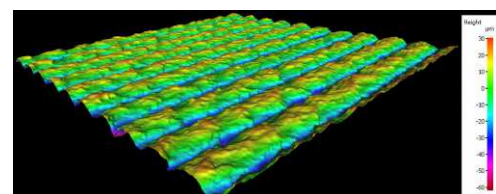


(b)

Figura 70: Comparación para una Velocidad de 450 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.



(a)



(b)

Figura 71: Comparación para una Velocidad de 500 mm/s. (a) Probeta sección cilíndrica. (b) Probeta sección cuadrada.

- Conclusiones para $T = 235\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A 60 mm/s, tanto la sección circular como la cuadrada presentan una superficie altamente definida. La distribución del material es uniforme y las crestas son claras y regulares. En este caso, la geometría cuadrada tiende a tener una ligera ventaja en precisión topográfica.

A 100 mm/s y 150 mm/s, ambas secciones mantienen una buena calidad superficial (**Figura 63**). La sección circular muestra una continuidad óptima en las crestas, mientras que la cuadrada conserva líneas marcadas con mínimas alteraciones.

A 200 mm/s, se evidencian los primeros signos de inestabilidad. La sección circular presenta pequeñas ondulaciones en la superficie, aunque aún mantiene su uniformidad general (**Figura 64**). La sección cuadrada empieza a mostrar una variación más notoria en la altura de las crestas, pero sin pérdida total de su patrón.

A 250 mm/s y 300 mm/s, las diferencias se amplifican. En la sección circular, las irregularidades se hacen más evidentes, con crestas deformadas y variaciones de altura pronunciadas (**Figura 67**). La sección cuadrada resiste un poco mejor este efecto, pero también comienza a mostrar zonas con distribución desigual del material. Cuando la temperatura es demasiado alta, el filamento se funde más de lo necesario, lo que puede provocar una pérdida de precisión dimensional por goteo o fluidez excesiva.

A 350 mm/s y 400 mm/s, ambas geometrías revelan una marcada pérdida de definición superficial (**Figura 69**). En la sección circular, las líneas se difuminan y se interrumpen. En la sección cuadrada, las crestas se tornan irregulares y menos compactas.

A una velocidad de 450 mm/s, la calidad superficial se deteriora notablemente (**Figura 70**). La probeta circular presenta crestas con alturas irregulares y una apariencia ondulada. La cuadrada mantiene un patrón más estructurado, aunque también muestra signos de inestabilidad.

Finalmente, a 500 mm/s, ambas geometrías exhiben un patrón superficial altamente irregular (**Figura 71**). En la sección circular, las crestas se tornan imprecisas y discontinuas, evidenciando una mala cohesión del material depositado. La sección cuadrada pierde también uniformidad, con una topografía más errática y menor precisión.

4.1.2. Estudio gráfico de la dispersión y evolución de los datos

A continuación, se muestra cómo varían las principales variables de interés en nuestro estudio para cada una de las velocidades evaluadas, junto con sus respectivas temperaturas de impresión. Véanse los datos de las tablas en el apartado de **Anexos**. Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, se muestran las gráficas correspondientes a cada parámetro evaluado.

Análisis comparativo de parámetros superficiales a 215 °C.

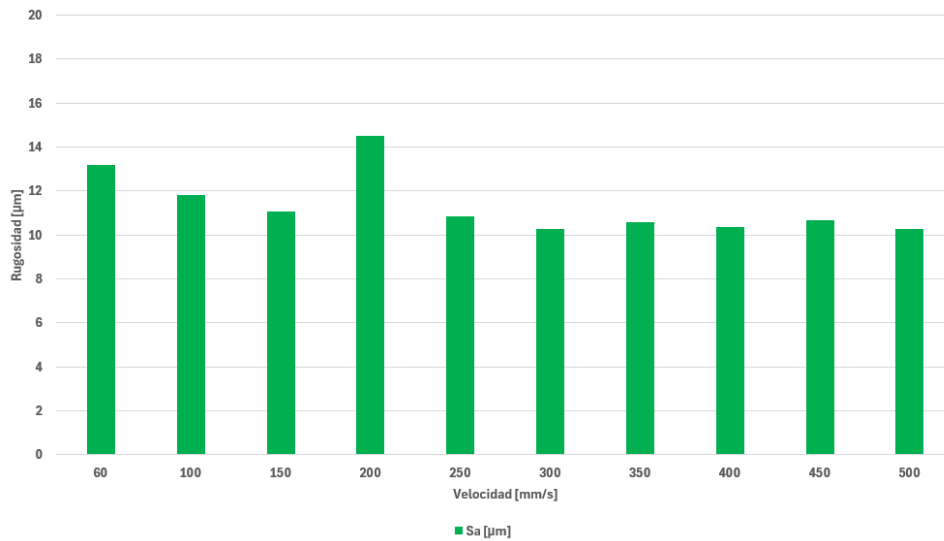


Figura 72: Evolución del parámetro Sa para superficie cilíndrica.

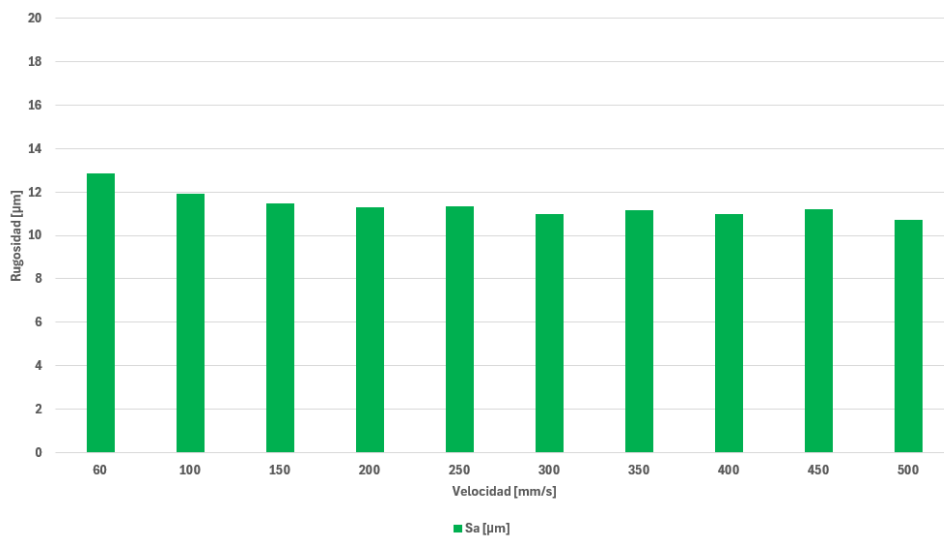


Figura 73: Evolución del parámetro Sa para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Sa

La superficie cuadrada (**Figura 73**) tiende a tener una mejor calidad superficial (menor Sa) y más estable frente a la velocidad de impresión que la superficie cilíndrica (**Figura 72**), que es más vulnerable a las variaciones en el proceso debido a su complejidad geométrica. Esto sugiere que, para impresiones de alta velocidad, las formas rectas ofrecen mayor control y previsibilidad en términos de acabado superficial.

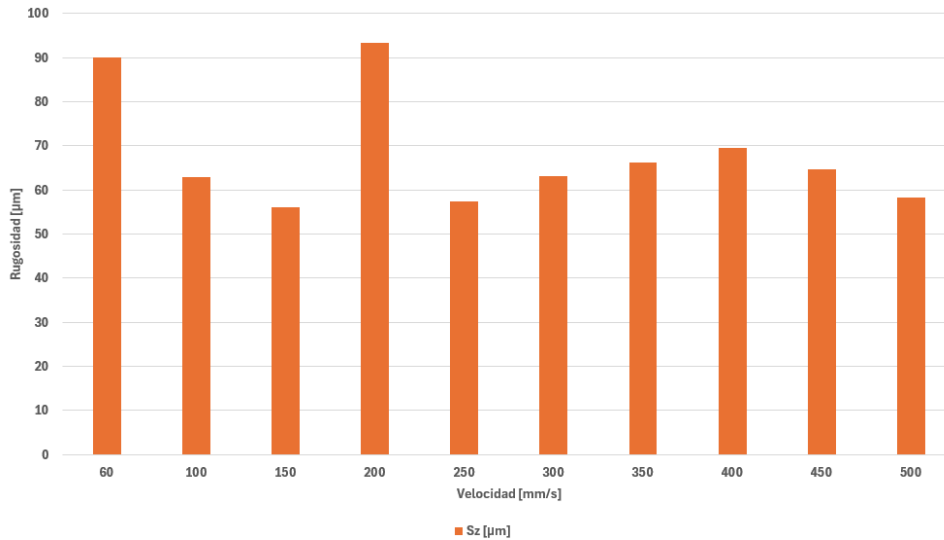


Figura 74: Evolución del parámetro Sz para superficie cilíndrica.

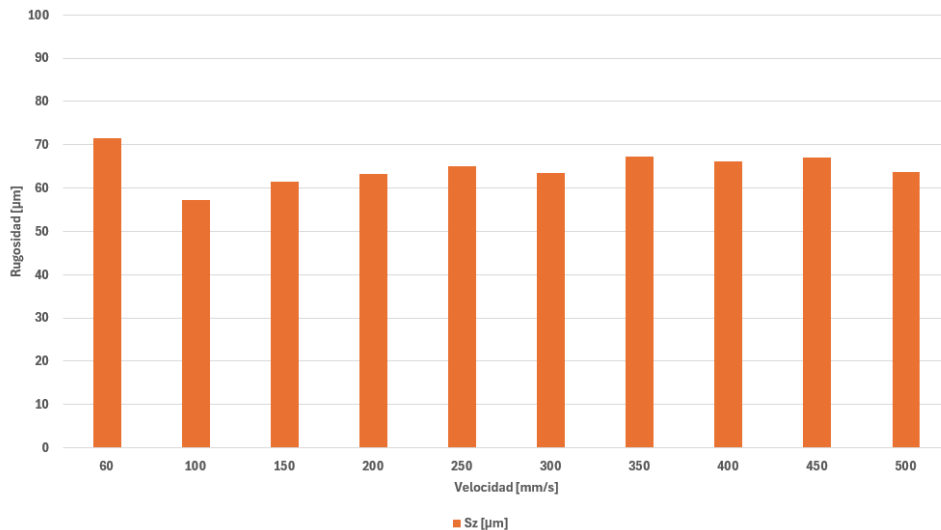


Figura 75: Evolución del parámetro Sz para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Sz

La superficie cuadrada (**Figura 75**) tiene un comportamiento mucho más estable y predecible en términos de Sz, lo que indica un mejor control de calidad superficial. La superficie cilíndrica (**Figura 74**), al estar más afectada por la geometría y las dinámicas del movimiento del cabezal, presenta mayor dispersión y valores más altos de Sz, con puntos críticos que podrían indicar problemas puntuales de impresión. A velocidades intermedias (200 mm/s), la geometría cilíndrica es particularmente vulnerable, mostrando el peor rendimiento superficial.

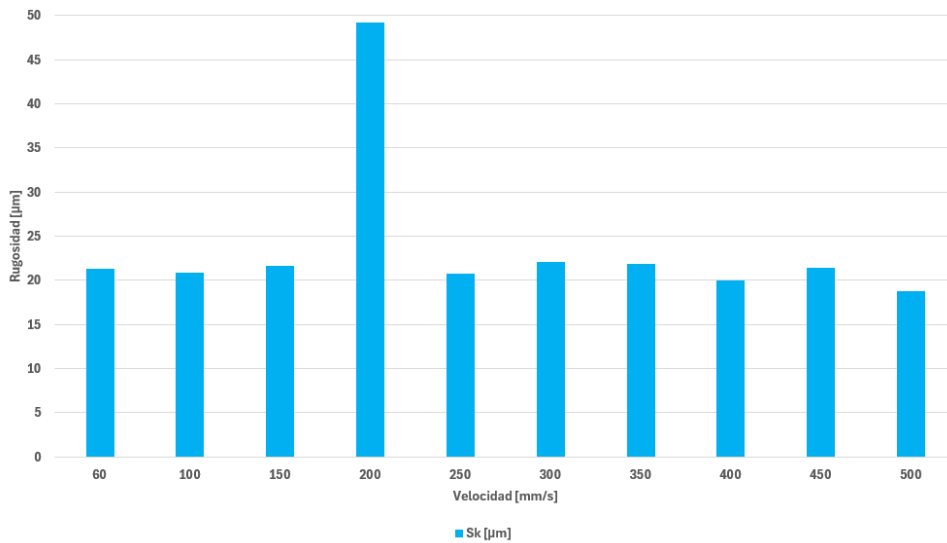


Figura 76: Evolución del parámetro Sk para superficie cilíndrica.

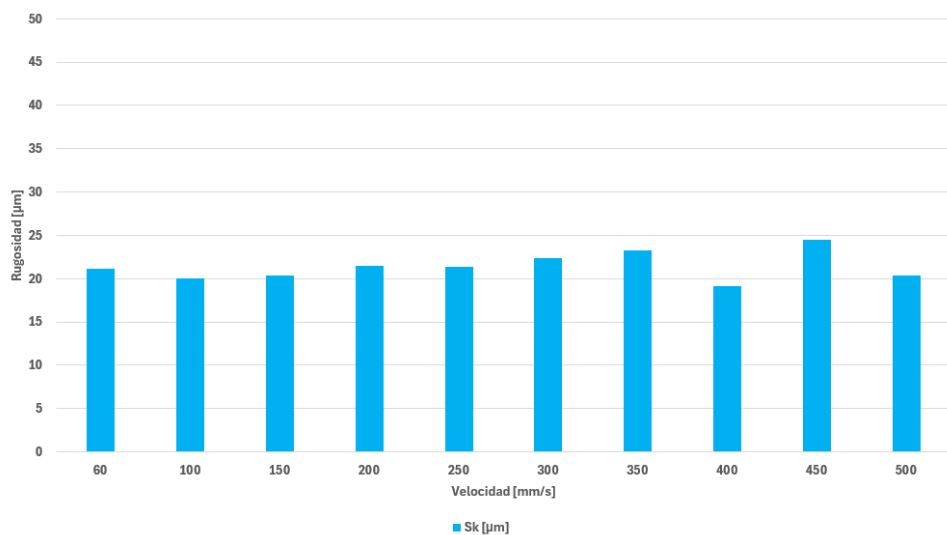


Figura 77: Evolución del parámetro Sk para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Sk

La superficie cuadrada (**Figura 77**) presenta mejores características funcionales en términos del parámetro Sk, ya que mantiene una profundidad de núcleo constante, independientemente de la velocidad. En contraste, la superficie cilíndrica (**Figura 76**) muestra un comportamiento errático, sobre todo a 200 mm/s, lo que compromete su fiabilidad en aplicaciones funcionales. Estos resultados refuerzan que, en impresión FDM de alta velocidad, la geometría rectilínea permite mayor control del proceso y genera superficies con mejores propiedades funcionales.

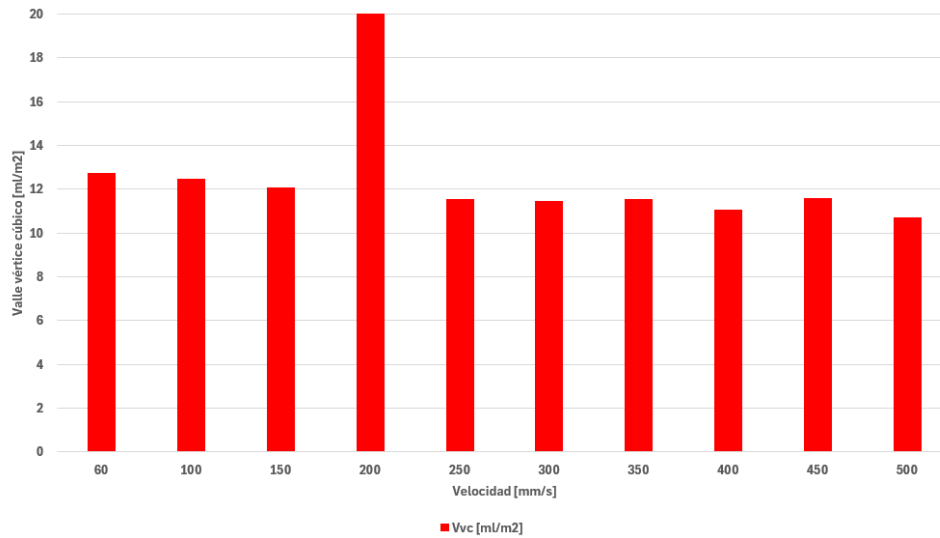


Figura 78: Evolución del parámetro Vvc para superficie cilíndrica.

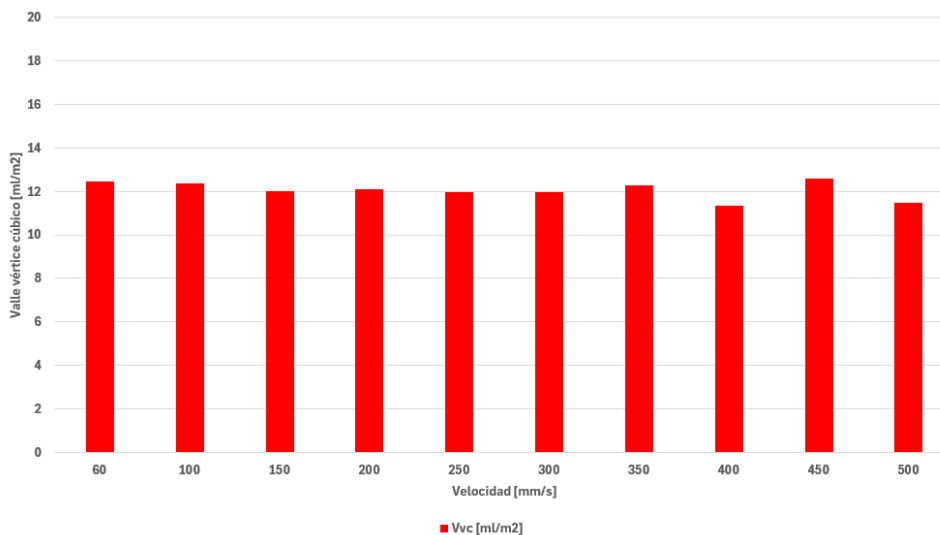


Figura 79: Evolución del parámetro Vvc para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Vvc

La superficie cuadrada (**Figura 79**) se comporta de forma mucho más consistente respecto al volumen funcional de soporte (V_{vc}), lo que indica mayor estabilidad geométrica y de deposición. La superficie cilíndrica (**Figura 78**) presenta una disrupción evidente a 200 mm/s, coherente con los picos también observados en los parámetros S_k y S_z . Esto sugiere una región crítica del proceso que puede estar relacionada con cambios en dinámica del filamento o resonancia estructural.

Análisis comparativo de parámetros superficiales a 225 °C

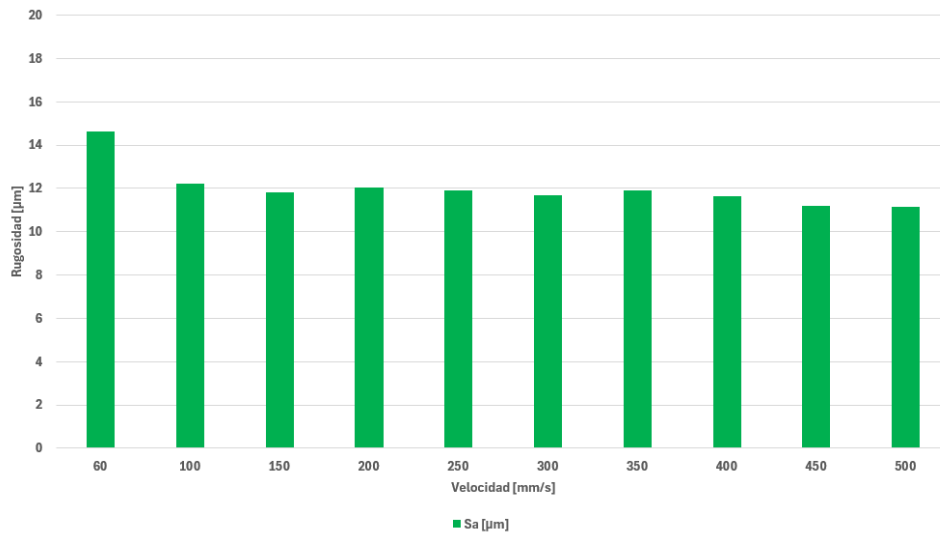


Figura 80: Evolución del parámetro Sa para superficie cilíndrica.

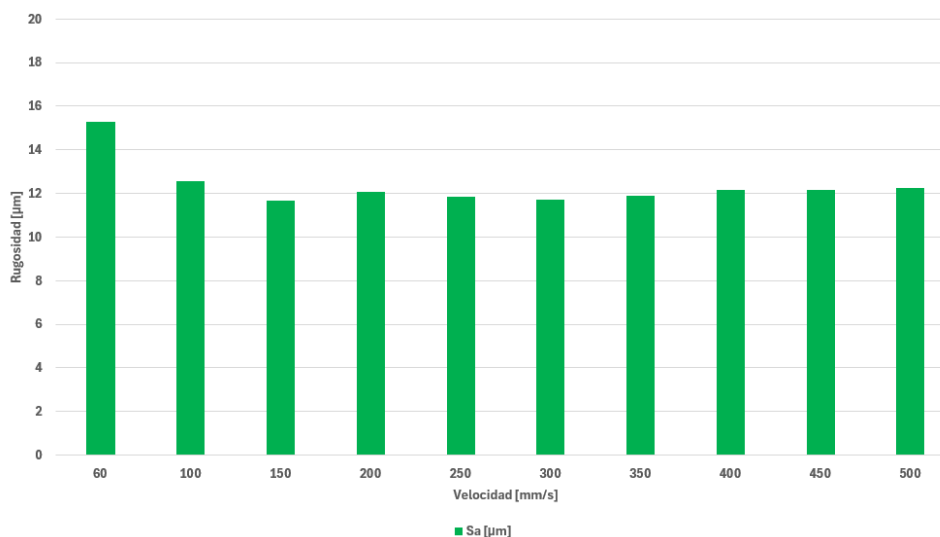


Figura 81: Evolución del parámetro Sa para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Sa

Ambos tipos de superficies presentan una reducción inicial de la rugosidad media (Sa) con el incremento de velocidad, indicando una optimización del proceso en el rango de 150 a 300 mm/s (**Figura 81**). La superficie cilíndrica (**Figura 80**) muestra valores ligeramente inferiores en régimen estacionario (mayor o igual a 150 mm/s), lo que sugiere una mayor homogeneidad en la deposición del filamento. A pesar de esto, las diferencias no son excesivamente pronunciadas, por lo que en términos de Sa, ambos tipos de superficies presentan un comportamiento aceptable a velocidades medias-altas.

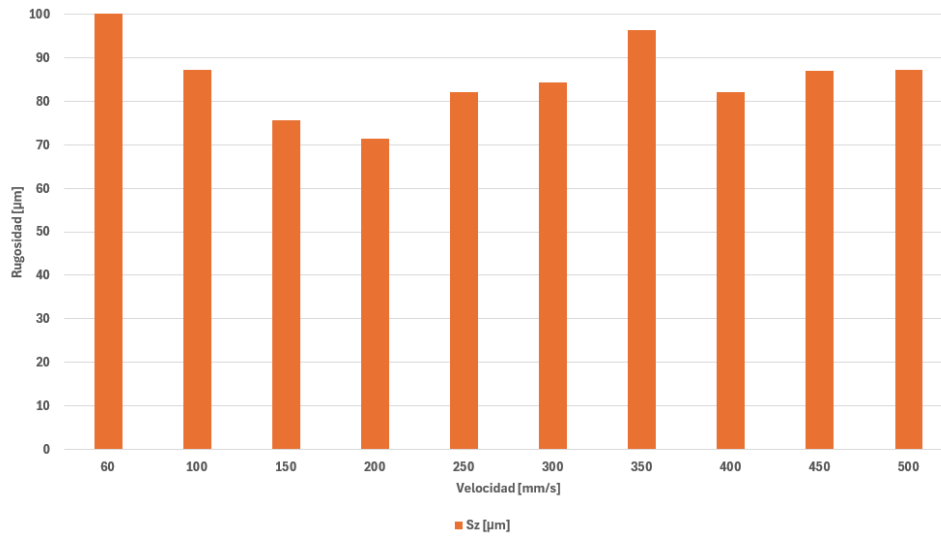


Figura 82: Evolución del parámetro Sz para superficie cilíndrica.

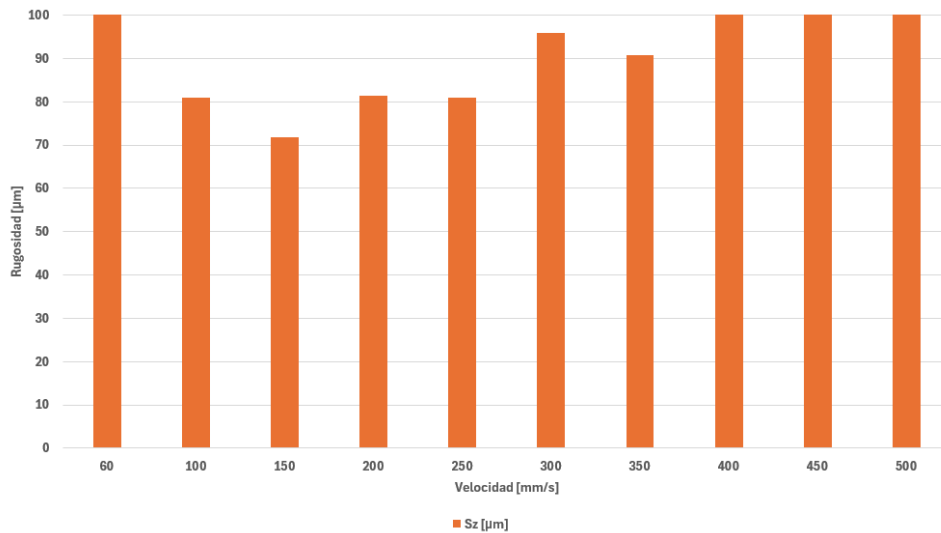


Figura 83: Evolución del parámetro Sz para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Sz

El comportamiento del parámetro Sz evidencia una clara ventana de operación óptima en torno a 150–250 mm/s, donde se alcanzan mínimos en la altura máxima total para ambas geometrías (**Figura 82**). A partir de 300 mm/s, la calidad de superficie comienza a deteriorarse en términos de defectos puntuales, especialmente en la superficie cuadrada (**Figura 83**). La superficie cilíndrica muestra una mejor estabilidad global, con menor dispersión de Sz en el rango de velocidades altas, lo que puede ser atribuido a una deposición más continua y fluida en geometrías curvas.

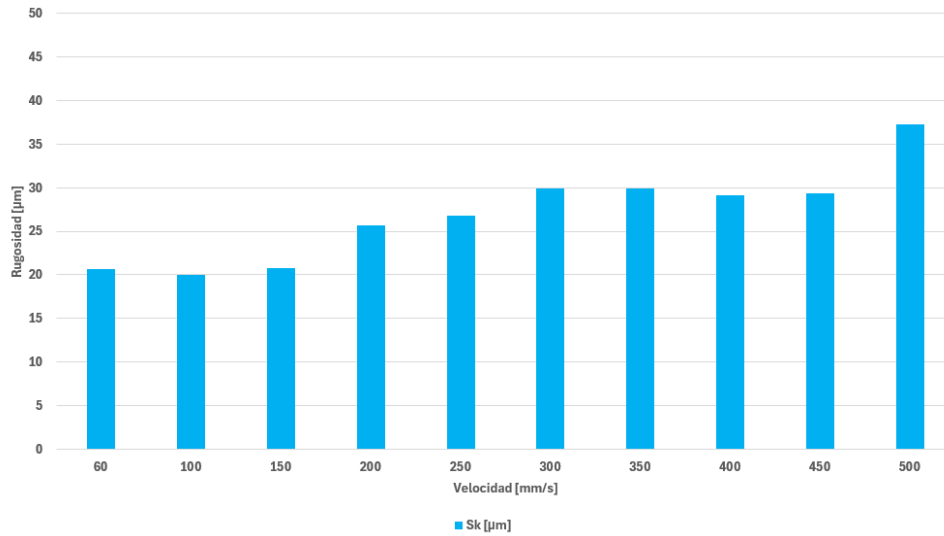


Figura 84: Evolución del parámetro Sk para superficie cilíndrica.

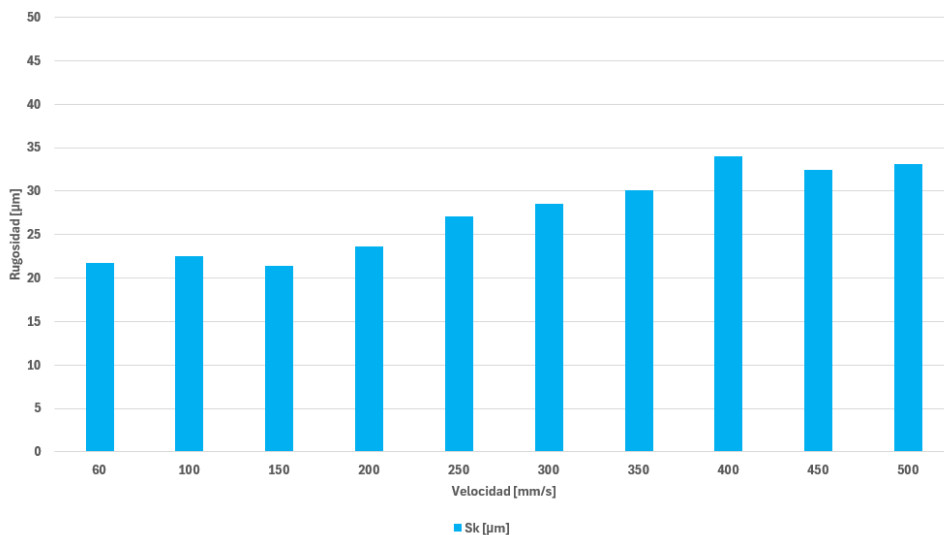


Figura 85: Evolución del parámetro Sk para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Sk

El parámetro Sk evidencia que la superficie cuadrada (**Figura 85**) es más sensible a la variación de velocidad, mostrando incrementos más acusados en su zona funcional. En cambio, la superficie cilíndrica (**Figura 84**) mantiene un comportamiento más progresivo y controlado, lo que puede ser ventajoso para aplicaciones donde la uniformidad de contacto es crítica. Este análisis refuerza la idea de que la geometría de la pieza influye directamente en el desarrollo de la textura superficial durante la impresión FDM, especialmente a altas velocidades.

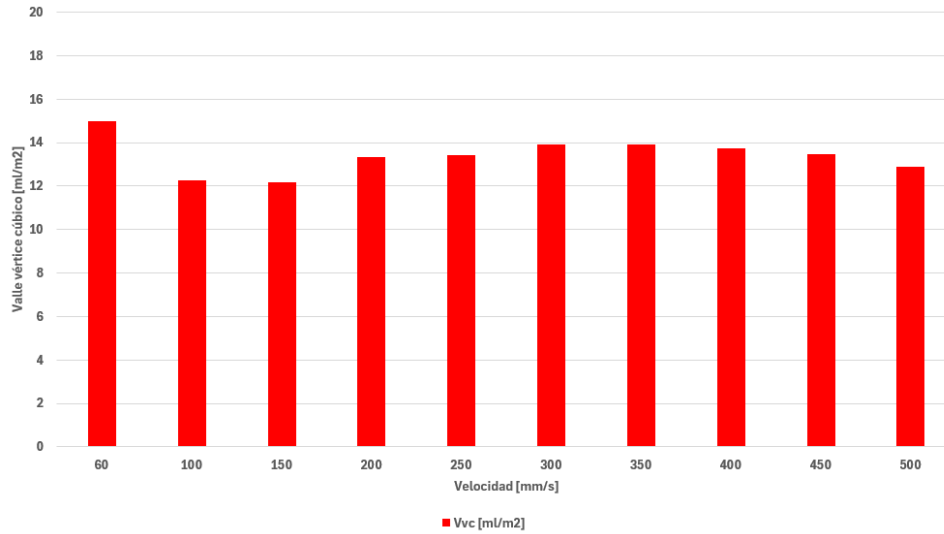


Figura 86: Evolución del parámetro Vvc para superficie cilíndrica.

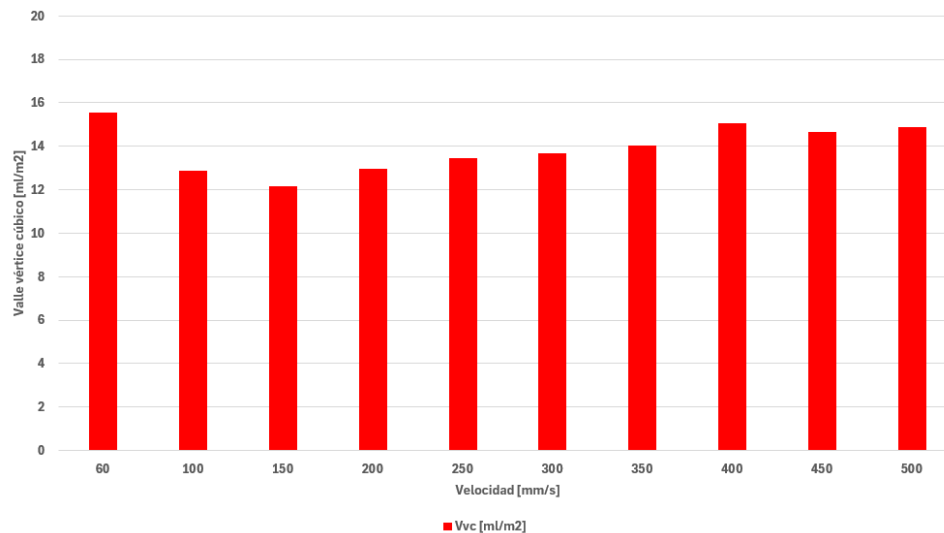


Figura 87: Evolución del parámetro Vvc para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Vvc

El parámetro Vvc muestra que ambas superficies responden de manera similar al incremento de velocidad, aunque la cuadrada (**Figura 87**) tiende a alcanzar valores más altos en el rango superior de velocidades. Esto podría atribuirse a diferencias geométricas en la dispersión del material fundido durante el proceso FDM, donde las aristas de la superficie cuadrada facilitan una acumulación ligeramente mayor en la zona funcional. En términos de diseño funcional, la elección entre una superficie cilíndrica o cuadrada dependerá de si se prioriza la estabilidad dimensional (cilíndrica) (**Figura 86**) o la capacidad de retención de fluido (cuadrada).

Análisis comparativo de parámetros superficiales a 235 °C

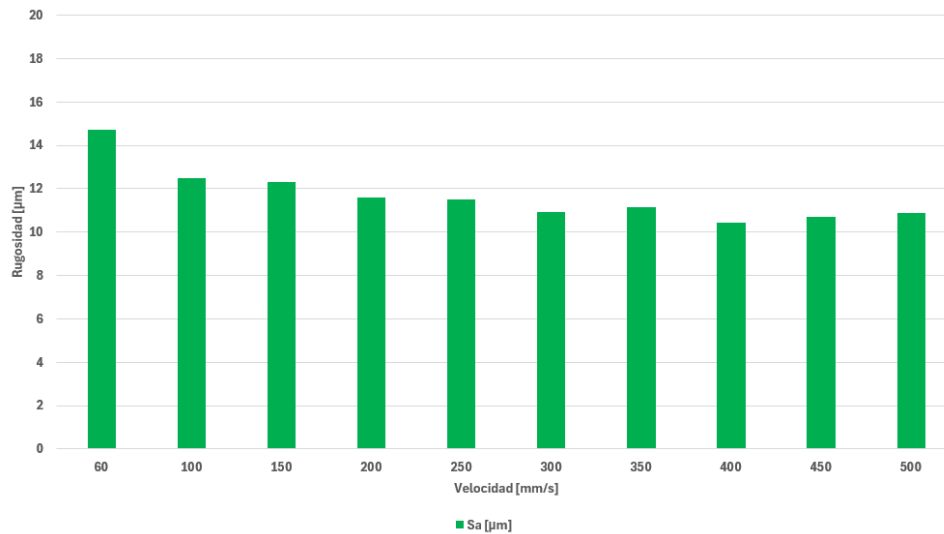


Figura 88: Evolución del parámetro Sa para superficie cilíndrica.

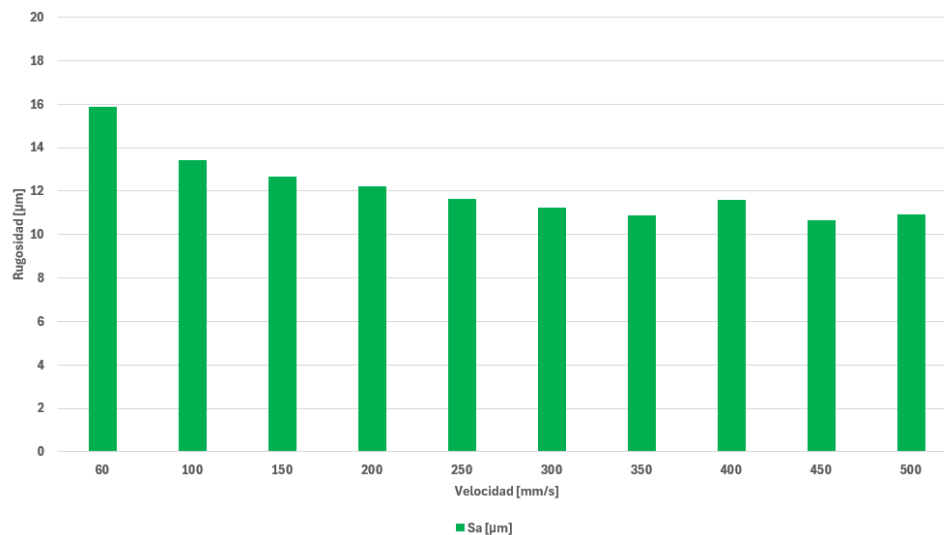


Figura 89: Evolución del parámetro Sa para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Sa

Ambas superficies muestran un comportamiento similar ante el incremento de velocidad, con una mejora progresiva de la calidad superficial (menor Sa). La superficie cilíndrica (**Figura 88**) ofrece una rugosidad promedio marginalmente menor que la cuadrada (**Figura 89**), lo cual podría representar una ventaja en aplicaciones donde se requiera suavidad de contacto o facilidad de limpieza. A partir de 300 mm/s, los valores de Sa se estabilizan en ambas geometrías, lo que sugiere que hay un umbral de velocidad a partir del cual no se obtienen mejoras adicionales significativas en rugosidad superficial.

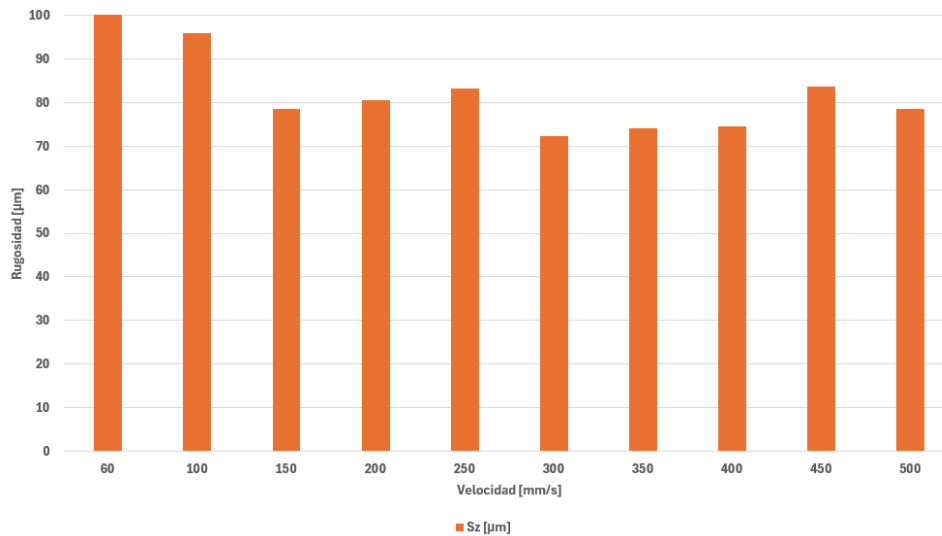


Figura 90: Evolución del parámetro Sz para superficie cilíndrica.

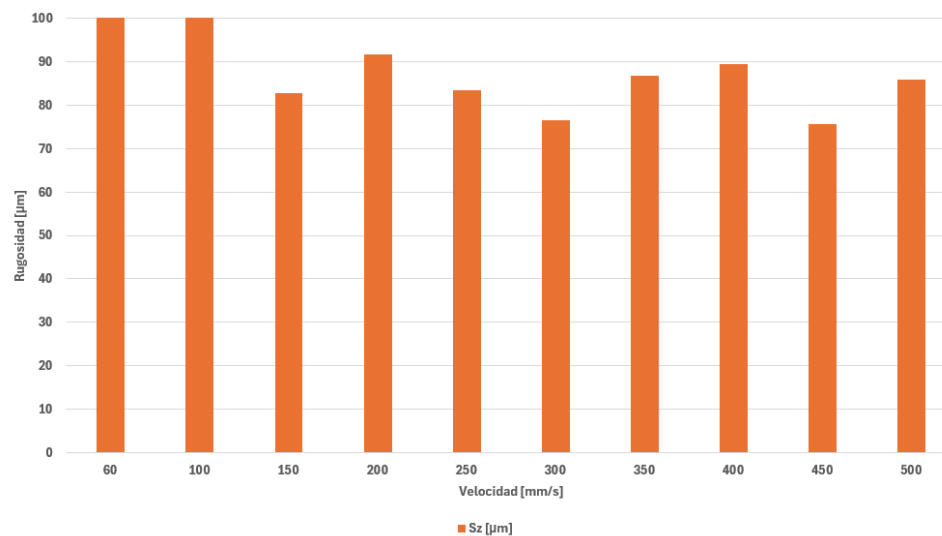


Figura 91: Evolución del parámetro Sz para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Sz

La superficie cilíndrica proporciona una mejor estabilidad en términos de altura total de rugosidad (Sz), especialmente a velocidades de impresión superiores a 250mm/s. La superficie cuadrada (**Figura 91**) muestra un comportamiento más oscilante, indicando mayor sensibilidad a parámetros de impresión o a variaciones locales en la deposición. En aplicaciones funcionales donde la altura máxima de rugosidad sea crítica (por ejemplo, sellado o deslizamiento), la superficie cilíndrica (**Figura 90**) resulta más adecuada.

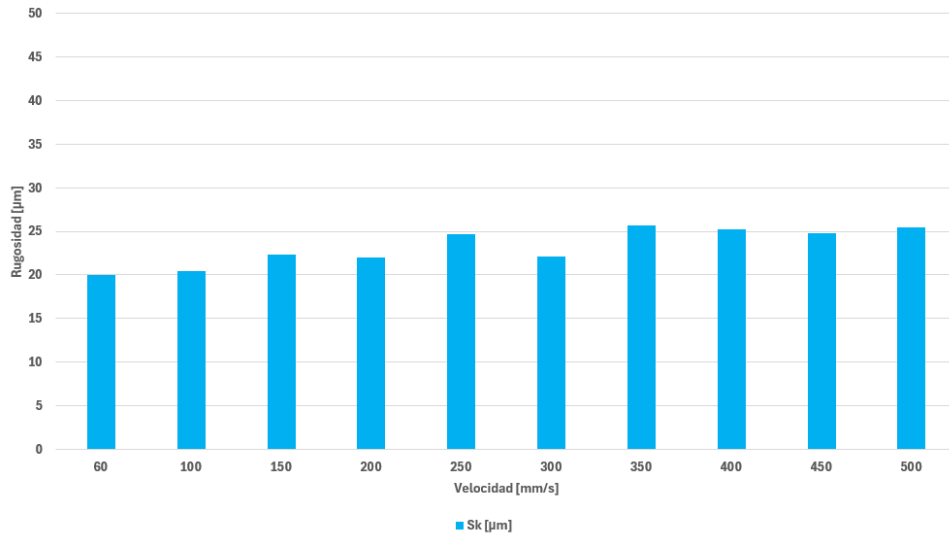


Figura 92: Evolución del parámetro Sk para superficie cilíndrica.

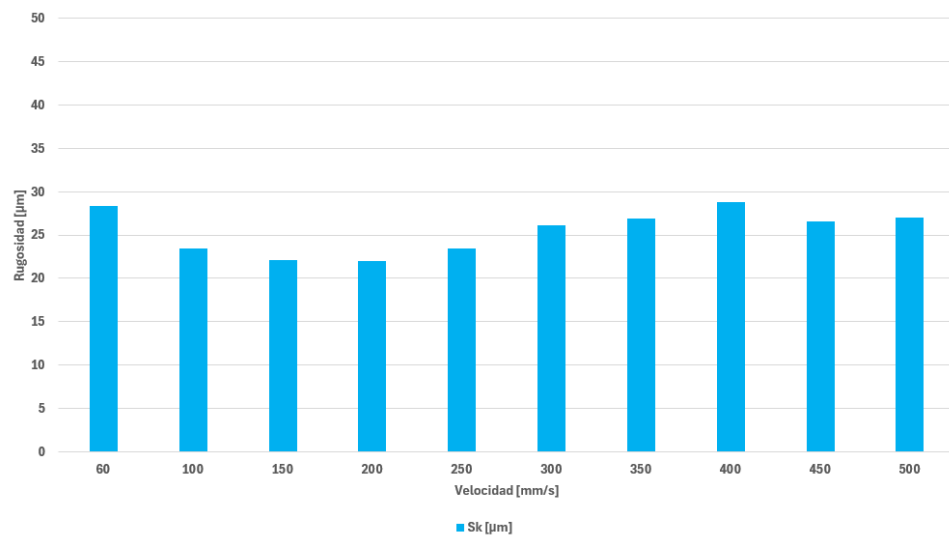


Figura 93: Evolución del parámetro Sk para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Sk

Sk aumenta con la velocidad de impresión en ambas geometrías, pero de forma más acentuada en la superficie cuadrada (**Figura 93**). La superficie cilíndrica (**Figura 92**) mantiene valores más bajos y estables, lo cual puede favorecer un comportamiento funcional más predecible. La superficie cuadrada presenta un mayor rango de variación, lo cual sugiere una sensibilidad más alta al parámetro de velocidad y mayor profundidad funcional, aunque a costa de posible inestabilidad superficial.

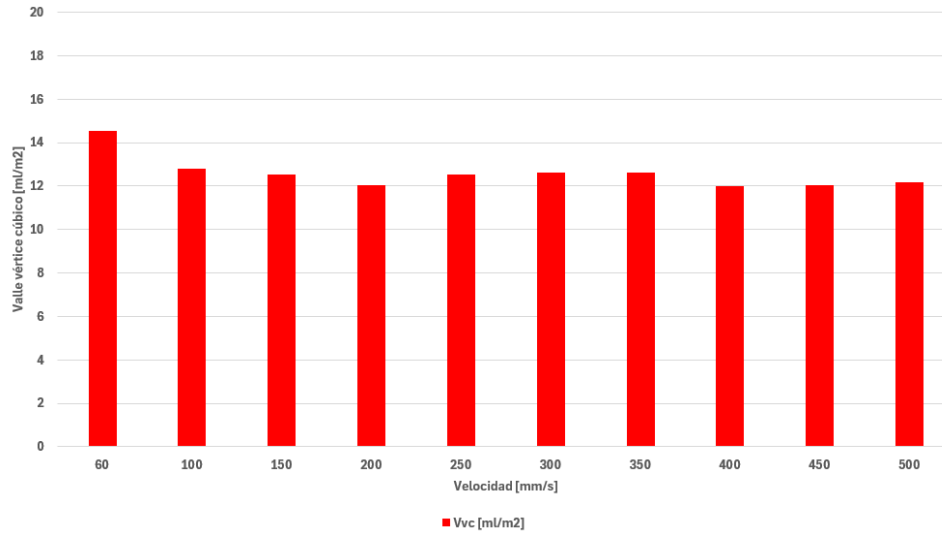


Figura 94: Evolución del parámetro Vvc para superficie cilíndrica.

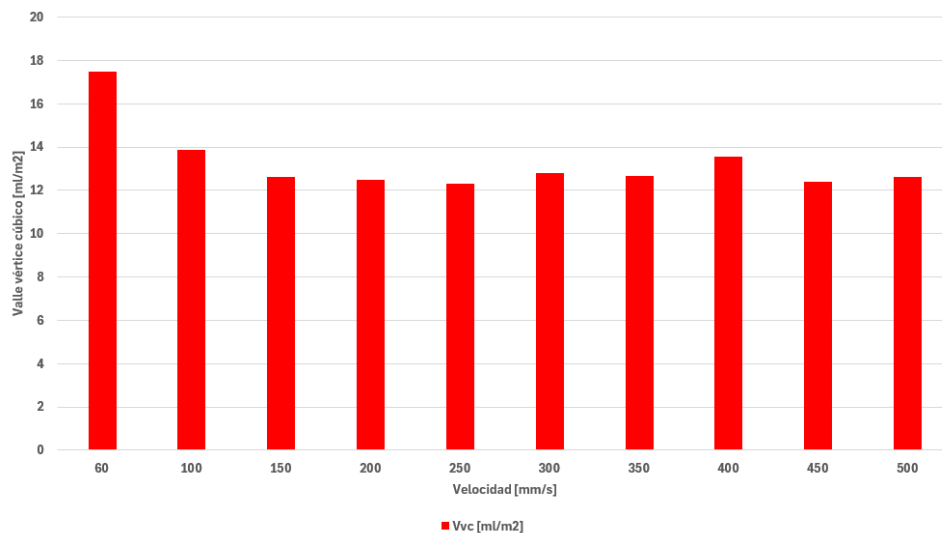


Figura 95: Evolución del parámetro Vvc para superficie cuadrada.

Conclusiones para parámetro Vvc

Vvc decrece con el incremento de velocidad en ambos casos hasta estabilizarse. La superficie cuadrada (**Figura 95**) parte con mayor volumen funcional, pero converge con la cilíndrica a velocidades intermedias-altas. La superficie cilíndrica (**Figura 94**) se muestra más constante a lo largo del rango de velocidades, lo cual puede implicar una mejor previsibilidad funcional.

4.1.3. Estudio gráfico de la dispersión y evolución de los datos

Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, se muestran las gráficas correspondientes a cada parámetro evaluado.

Influencia de la velocidad a una temperatura de 215 °C sobre la redondez.

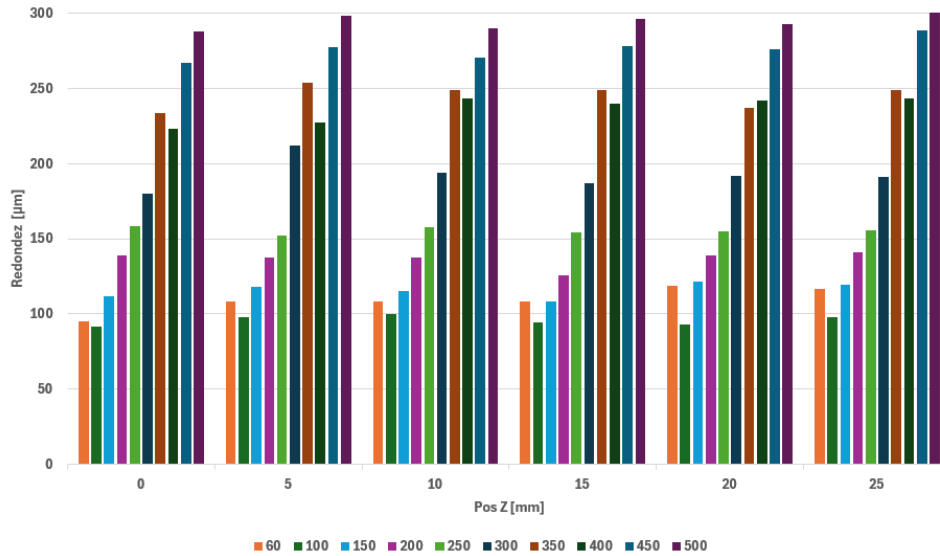


Figura 96: Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.

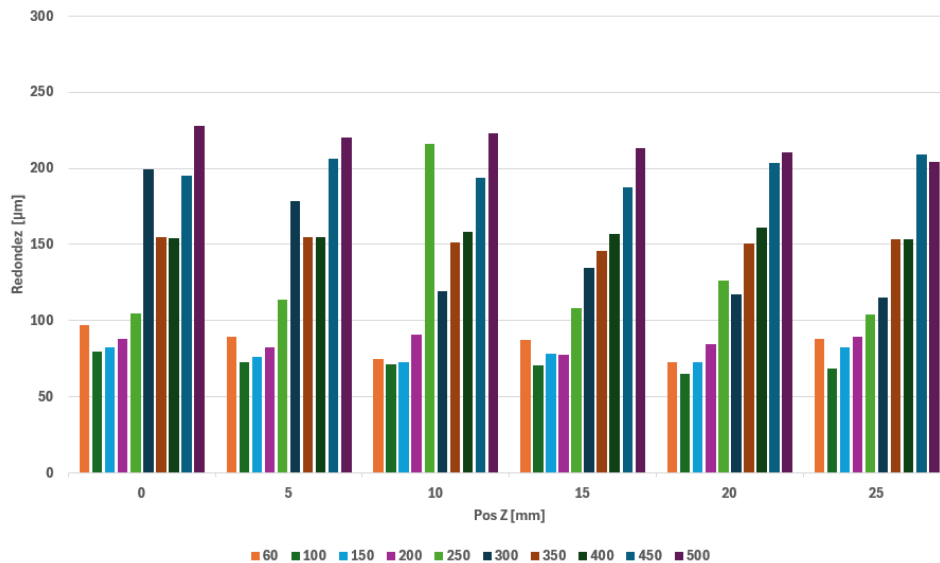


Figura 97: Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.

Conclusiones para defecto redondez

El perfil exterior (**Figura 96**) es más sensible al incremento de la velocidad de impresión, con defectos de redondez más altos especialmente en la parte superior de la muestra. El perfil interior (**Figura 97**) presenta un comportamiento más estable, aunque también empeora con la velocidad, pero con valores más contenidos. Las velocidades de impresión bajas (60–150 mm/s) ofrecen la mejor precisión geométrica en términos de redondez para ambas geometrías.

Influencia de la velocidad a una temperatura de 215 °C sobre la rectitud.

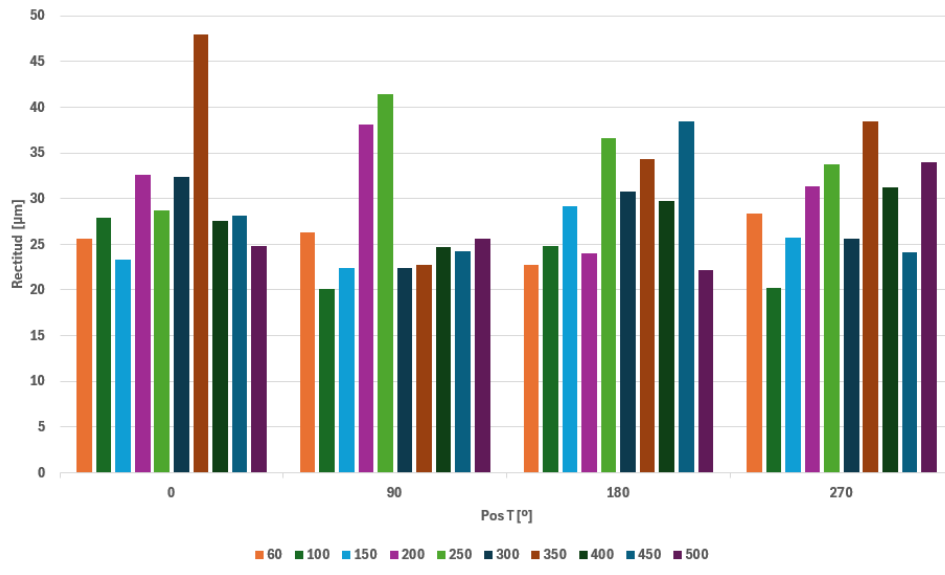


Figura 98: Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.

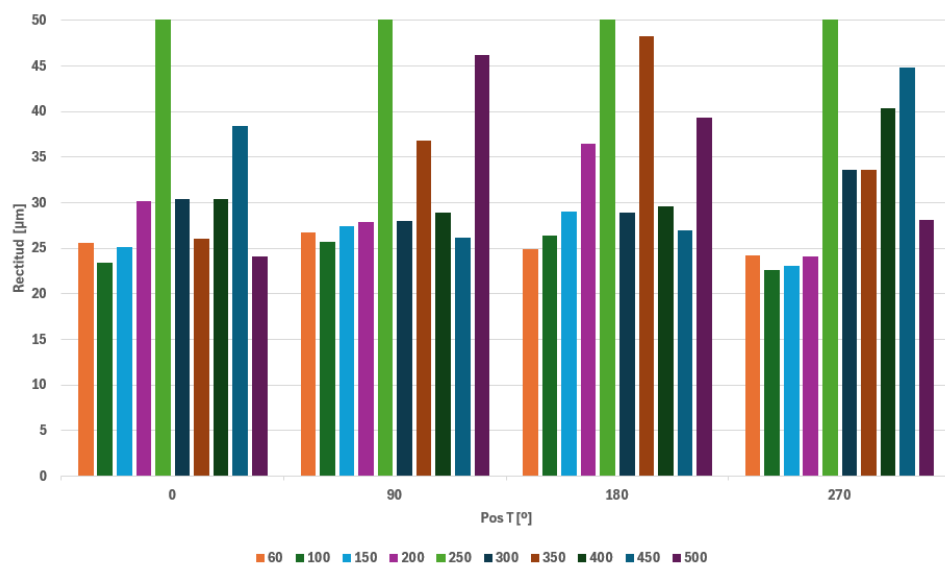


Figura 99: Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.

Conclusiones para defecto rectitud.

Las velocidades bajas (60–150 mm/s) producen los defectos de rectitud más bajos en ambos perfiles. La velocidad de 250 mm/s representa un punto crítico, generando los mayores defectos en ambos casos (**Figura 98**). El perfil interior (**Figura 99**) tiende a ser más inestable con respecto a la rectitud que el exterior, posiblemente debido a la dificultad de enfriamiento y precisión en regiones confinadas. A nivel angular, los defectos tienden a ser más pronunciados en el inicio de cada contorno (0° y 270°), lo que puede reflejar acumulaciones por cambios de dirección o por el punto de arranque del perímetro.

Influencia de la velocidad a una temperatura de 215 °C sobre la cilindridad.

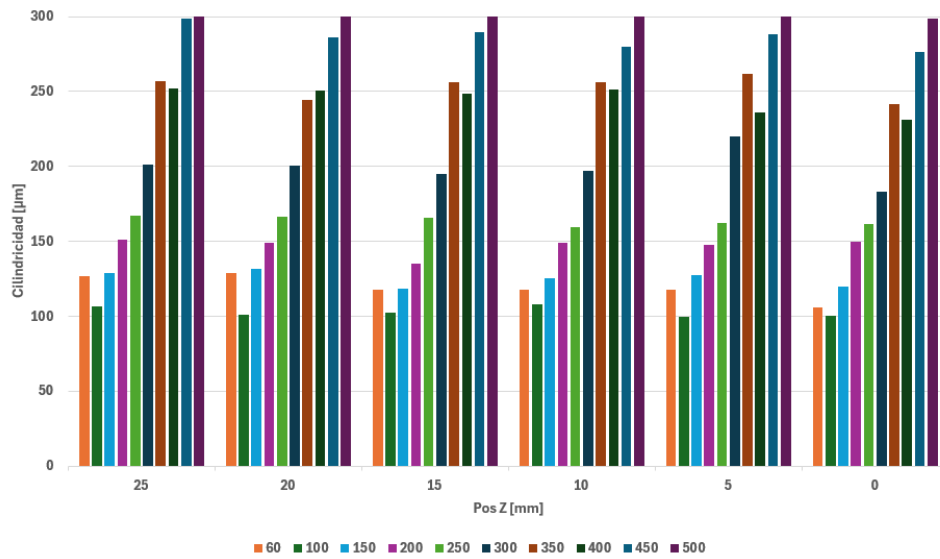


Figura 100: Evolución del defecto cilindridad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.

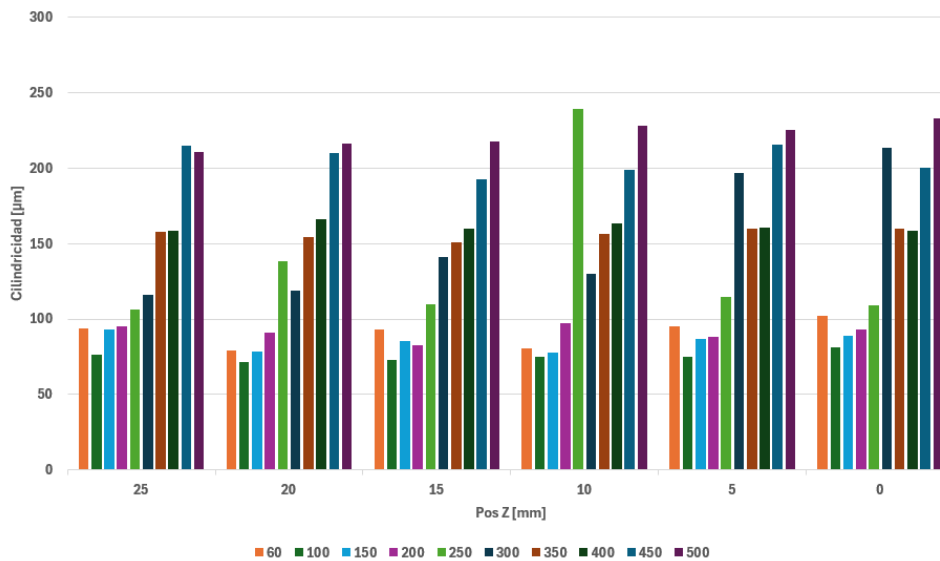


Figura 101: Evolución del defecto cilindridad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.

Conclusiones para defecto cilindridad

La velocidad de 250 mm/s sigue siendo un punto de alerta por los defectos que genera, tanto en cilindridad como en otros parámetros anteriores. El perfil interior (**Figura 101**) presenta más variabilidad e impredecibilidad en los resultados, lo que puede estar asociado a dificultades en el enfriamiento. Para minimizar el defecto de cilindridad, se recomiendan velocidades bajas (60–150 mm/s) que mantienen los valores más consistentes y bajos. El comportamiento más regular en el perfil exterior (**Figura 100**) puede deberse a una mejor disipación térmica y accesibilidad durante el proceso de fabricación.

Influencia de la velocidad a una temperatura de 225 °C sobre la redondez.

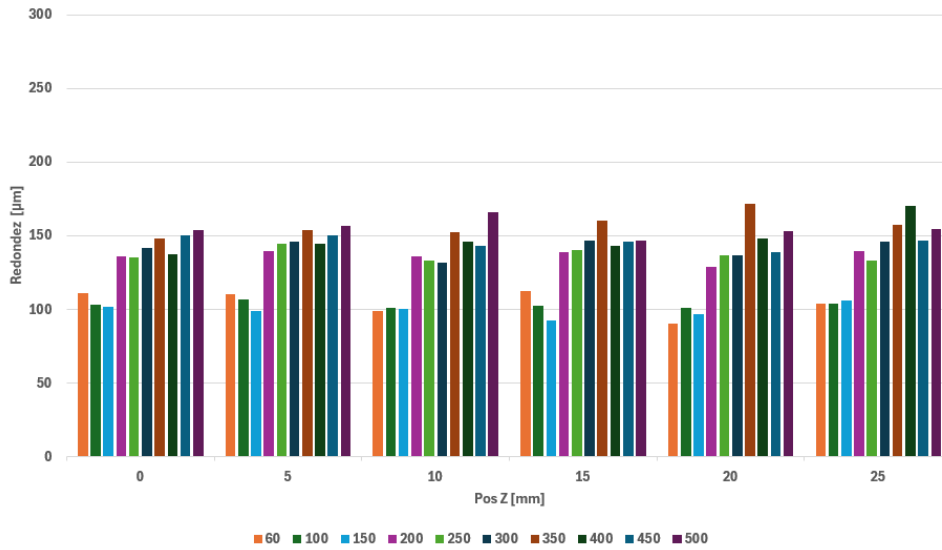


Figura 102: Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.

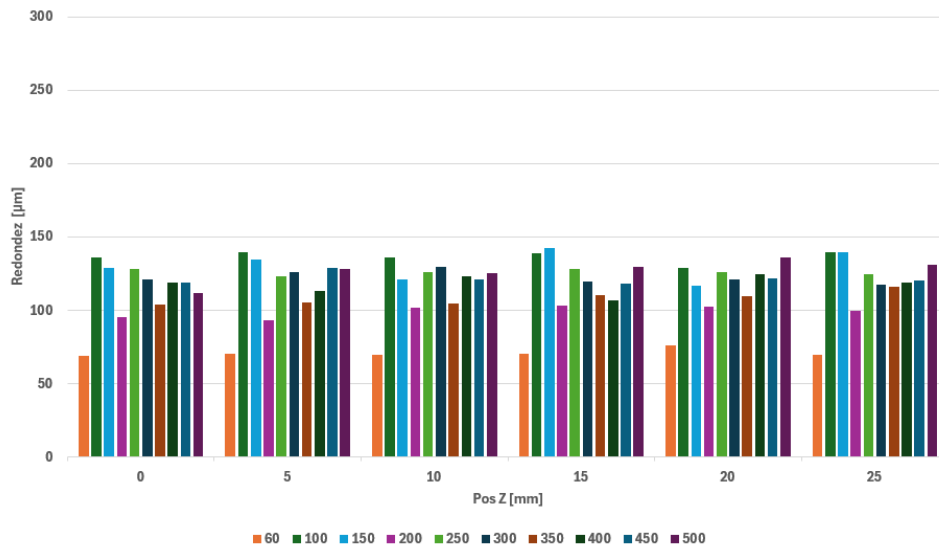


Figura 103: Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.

Conclusiones para defecto redondez

Las velocidades más bajas (60 y 100 mm/s) continúan mostrando los mejores resultados, con menor dispersión y valores más bajos del defecto (**Figura 102**). El perfil interior (**Figura 103**) sigue mostrando mayor sensibilidad a variaciones en velocidad, lo que podría estar relacionado con condiciones de impresión menos favorables (como enfriamiento o acceso del cabezal). En comparación con la redondez evaluada en las gráficas anteriores, los resultados en estas nuevas gráficas muestran una mejora generalizada, con menores valores máximos.

Influencia de la velocidad a una temperatura de 225 °C sobre la rectitud.

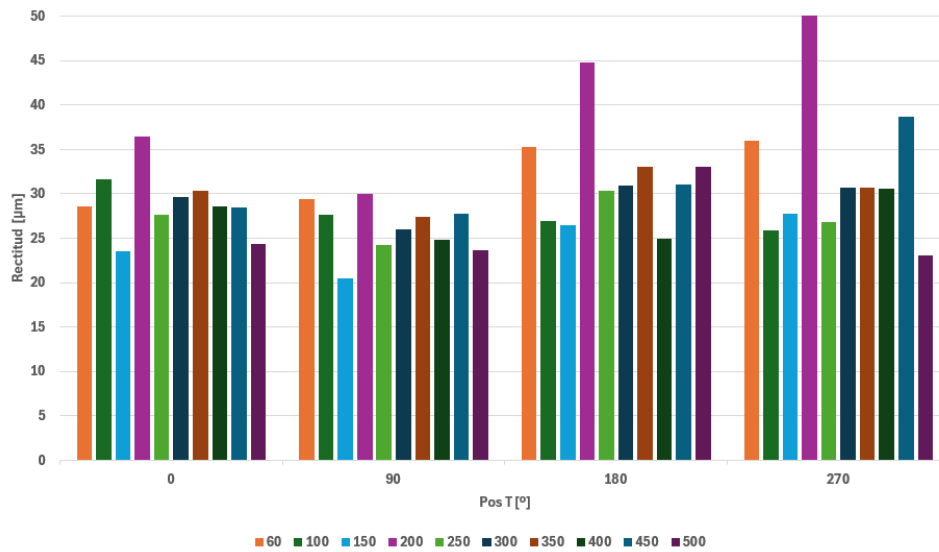


Figura 104: Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.

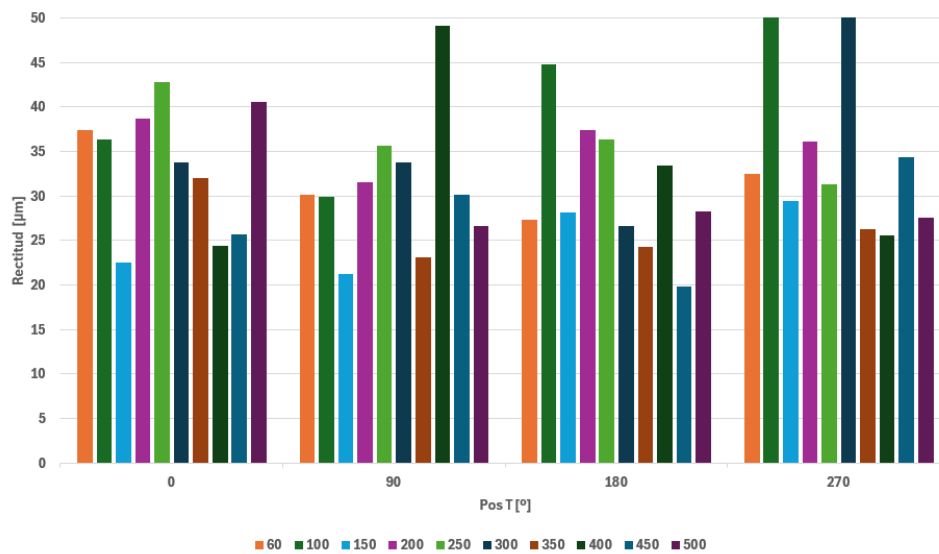


Figura 105: Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.

Conclusiones para defecto rectitud

El perfil exterior (**Figura 104**) sigue mostrando mejor comportamiento dimensional, también para el parámetro de rectitud. Las velocidades intermedias-bajas (100–150 mm/s) parecen ofrecer el mejor equilibrio entre tiempo de impresión y precisión geométrica. Velocidades altas (mayor de 350 mm/s) generan picos frecuentes, especialmente en las posiciones angulares críticas (180° y 270°), lo que puede deberse a inestabilidad del proceso en esas zonas (**Figura 105**).

Influencia de la velocidad a una temperatura de 225 °C sobre la cilindridad.

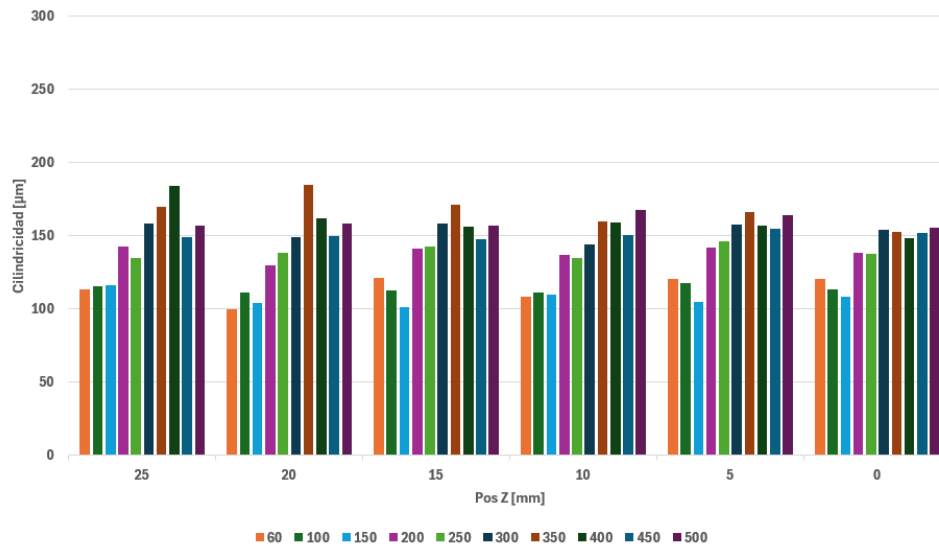


Figura 106: Evolución del defecto cilindridad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.

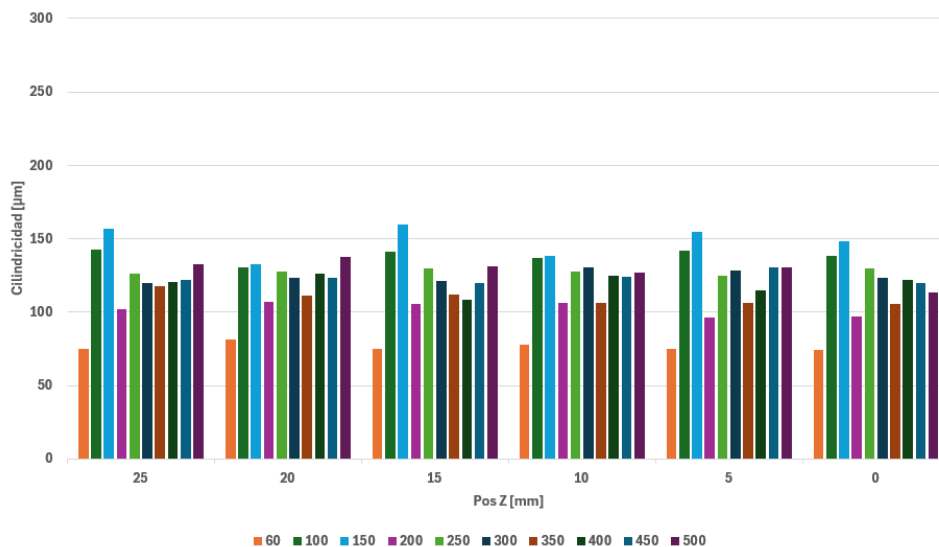


Figura 107: Evolución del defecto cilindridad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.

Conclusiones para defecto cilindridad

El perfil exterior (**Figura 106**) nuevamente se comporta mejor que el interior (**Figura 107**), con menor dispersión y mayor uniformidad. Las velocidades bajas (60–150 mm/s) ofrecen los mejores resultados en términos de cilindridad. Las velocidades altas (300–500 mm/s) tienden a generar inestabilidad y mayores defectos, sobre todo en el perfil interior.

Influencia de la velocidad a una temperatura de 35 °C sobre la redondez.

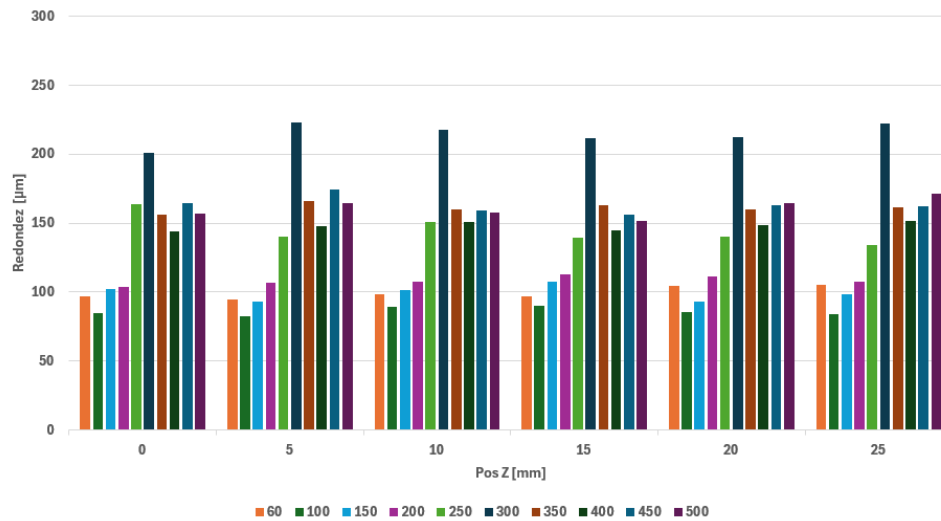


Figura 108: Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.

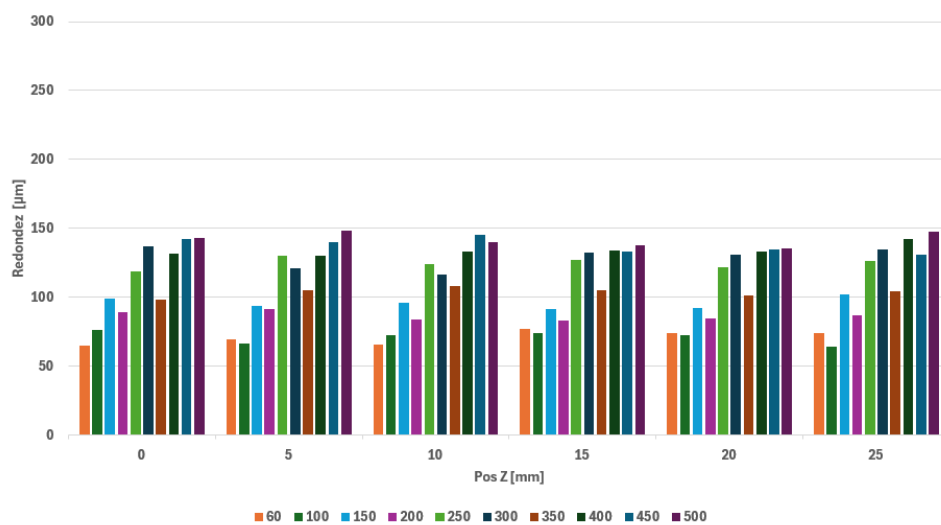


Figura 109: Evolución del defecto redondez a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.

Conclusiones para defecto redondez

Para la redondez, el perfil interior (**Figura 109**) muestra un comportamiento significativamente más favorable que el exterior, especialmente en cuanto a estabilidad y dispersión. Las velocidades bajas (60–150 mm/s) ofrecen la mejor redondez para ambos perfiles. A 500 mm/s, el perfil exterior (**Figura 108**) presenta los mayores defectos, por lo tanto debe evitarse si la redondez es crítica en la aplicación.

Influencia de la velocidad a una temperatura de 235 °C sobre la rectitud.

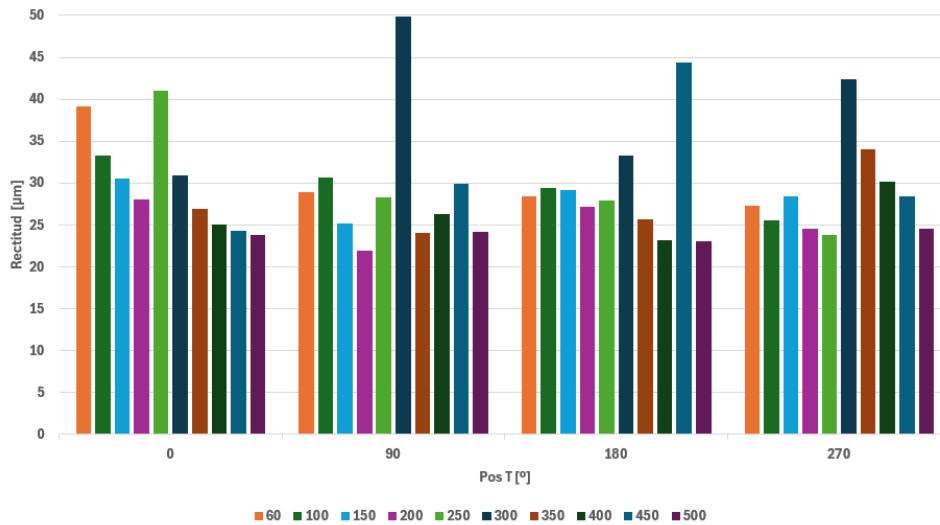


Figura 110: Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.

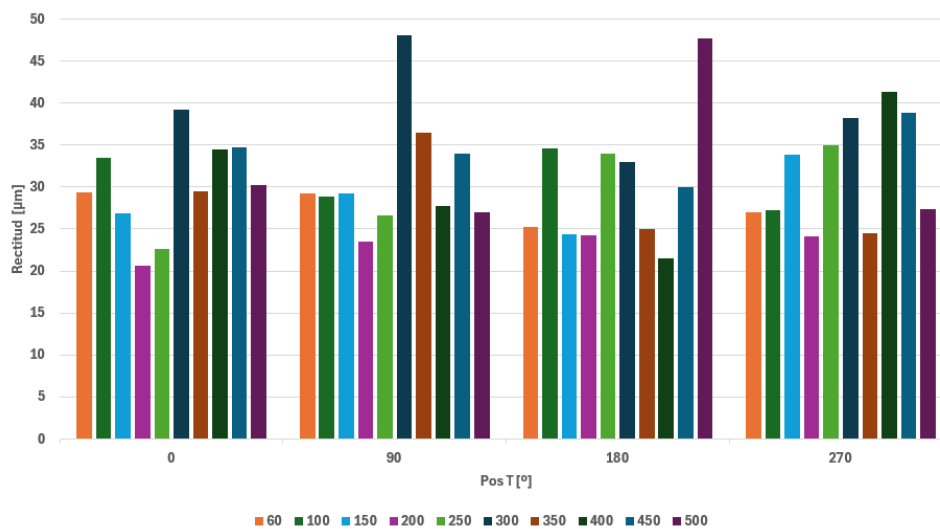


Figura 111: Evolución del defecto rectitud a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior.

Conclusiones para defecto rectitud

La rectitud muestra un comportamiento algo menos dependiente de la velocidad que otras métricas, pero los picos en 90° y 270° sugieren deformaciones asociadas con la orientación angular (**Figura 110**). Las velocidades altas (450–500 mm/s) tienden a generar los mayores defectos en ambos perfiles. Las velocidades medias (150–350 mm/s) parecen ser un compromiso óptimo en términos de rectitud (**Figura 111**).

Influencia de la velocidad a una temperatura de 235 °C sobre la cilindridad.

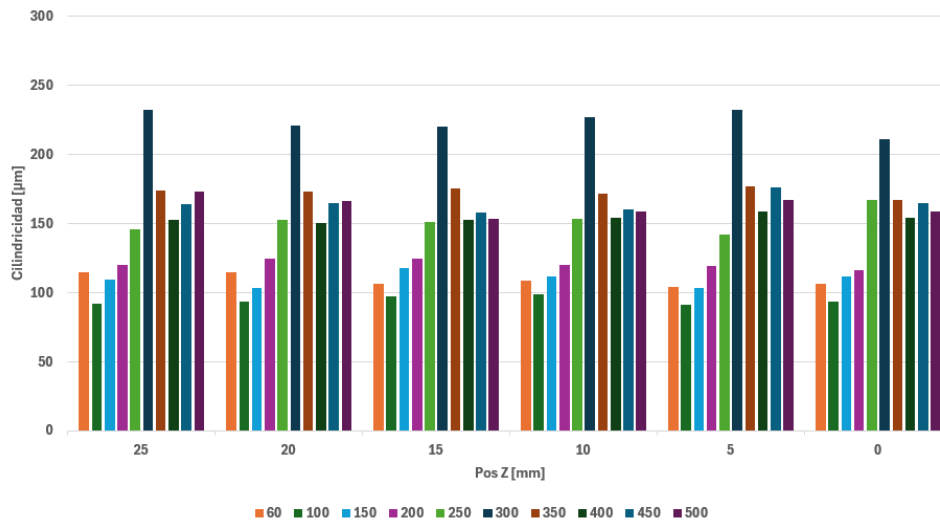


Figura 112: Evolución del defecto cilindridad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil exterior.

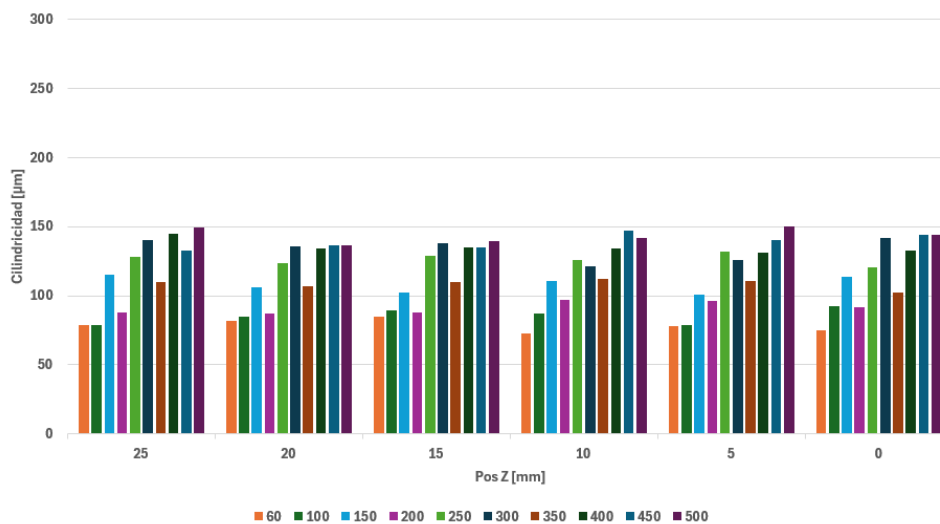


Figura 113: Evolución del defecto cilindridad a lo largo de la longitud de una muestra para perfil interior

Conclusiones para defecto cilindridad

Las velocidades de 500 mm/s provocan un aumento importante del defecto de cilindridad, siendo más grave en el perfil exterior (**Figura 112**). La cilindridad muestra mejor desempeño con velocidades intermedias (200–350 mm/s) en ambos perfiles. El perfil interior (**Figura 113**) es menos susceptible a defectos extremos que el exterior, posiblemente debido a diferencias en el enfriamiento.

5. Conclusiones y líneas futuras

5.1. Conclusiones y discusiones

De los resultados anteriores, se extraen las siguientes conclusiones:

Para defectos microscópicos

- **Para Sa:** Se observa una disminución general de la rugosidad conforme aumenta la velocidad de impresión. A partir de los 300 mm/s, el valor de Sa tiende a estabilizarse. Además, la superficie cuadrada presenta valores de rugosidad más bajos en comparación con la superficie cilíndrica.
- **Para Sz:** Los valores más bajos de rugosidad se obtienen a velocidades intermedias. En cuanto a la influencia de la temperatura, en la superficie cuadrada los valores se mantienen más estables a temperaturas bajas, mientras que en la superficie cilíndrica ocurre lo contrario, mostrando mayor variabilidad.
- **Para Sk:** Este parámetro se mantiene relativamente constante en los extremos de temperatura. Sin embargo, a una temperatura de 225 °C, se aprecia un incremento progresivo de la rugosidad con la velocidad. Además, se detecta un pico notable a 200 mm/s para una temperatura de 215 °C, posiblemente relacionado con cambios en la dinámica del flujo del filamento.
- **Para Vvc:** A 215 °C, el comportamiento de Vvc es similar al observado en Sk. Disminuye inicialmente con el aumento de velocidad hasta alcanzar aproximadamente 200 mm/s, donde comienza a estabilizarse.

Para defectos macroscópicos

- **Para Redondez:** La redondez se ve fuertemente influenciada por la velocidad de impresión, especialmente en el perfil exterior, que presenta mayores defectos a altas velocidades. El perfil interior muestra un comportamiento más estable, aunque también se degrada con el incremento de velocidad.

Las velocidades bajas (60–150 mm/s), en particular 60 y 100 mm/s, ofrecen los mejores resultados con menor dispersión. A 500 mm/s los defectos se intensifican notablemente, por lo que, si la redondez es un factor crítico, se recomienda evitar velocidades altas y optar por valores bajos.

- **Para Rectitud:** La rectitud se ve afectada por la velocidad de impresión, aunque en menor medida que otros parámetros. Las mejores prestaciones se obtienen a velocidades bajas (60–150 mm/s), mientras que a 250 mm/s se registra el mayor defecto. El perfil interior resulta más inestable, posiblemente por condiciones térmicas desfavorables. Los errores tienden a concentrarse en ángulos específicos, vinculados a cambios de dirección.

El perfil exterior presenta mayor consistencia, y las velocidades intermedias-bajas (100–150 mm/s) ofrecen un buen equilibrio entre precisión y tiempo de fabricación. Las velocidades medias (150–350 mm/s) pueden ser una alternativa viable cuando se busca un compromiso entre calidad y productividad.

- **Para Cilindricidad:** La cilindricidad se ve fuertemente afectada por la velocidad de impresión, destacando 250 mm/s como un punto crítico por sus altos defectos. El perfil interior presenta mayor variabilidad, mientras que el exterior muestra un comportamiento más estable y uniforme.

Las velocidades bajas (60–150 mm/s) proporcionan los mejores resultados en ambos perfiles. Aunque las velocidades intermedias (200–350 mm/s) pueden ser un buen compromiso entre calidad y productividad, las velocidades altas (especialmente 500 mm/s) generan defectos significativos, sobre todo en el perfil exterior, por lo que deben evitarse si se requiere alta precisión en cilindricidad.

5.2. Futuras líneas de investigación

Una posible línea de investigación futura consiste en el estudio e implementación de perfiles de velocidad adaptativos en procesos de impresión 3D FFF de alta velocidad. Este enfoque plantea modificar dinámicamente los parámetros de velocidad durante la fabricación en función de la geometría local de la pieza, con el objetivo de mantener una alta calidad superficial y precisión dimensional sin comprometer significativamente el tiempo de impresión.

A diferencia de los métodos tradicionales que emplean una velocidad constante a lo largo de toda la impresión, esta estrategia adaptativa permitiría, por ejemplo, reducir la velocidad en zonas con alta curvatura, detalles finos o cambios bruscos de dirección, y aumentarla en regiones planas o de baja complejidad geométrica. La hipótesis principal es que este control localizado puede reducir defectos como vibraciones, ghosting o mala adherencia entre capas, que se acentúan a altas velocidades.

El desarrollo de esta línea incluiría:

- La selección de geometrías de prueba con variabilidad morfológica significativa.
- La implementación de perfiles de velocidad mediante el uso de slicers avanzados (como PrusaSlicer o OrcaSlicer) o la edición manual del código G.
- La fabricación de las piezas con velocidades base superiores a 200 mm/s.
- La caracterización de la calidad superficial mediante técnicas de metrología óptica, como la microscopía 3D (por ejemplo, sistemas Alicona).
- La comparación con piezas fabricadas con perfiles de velocidad constantes, evaluando métricas como la rugosidad superficial, precisión dimensional y tiempos de impresión.

Este enfoque abre la puerta al desarrollo de sistemas más inteligentes de control de impresión, y podría ampliarse en el futuro mediante la incorporación de técnicas de inteligencia artificial que optimicen automáticamente el perfil de velocidad en función del modelo 3D. Asimismo, ofrece una vía de colaboración con desarrolladores de firmware y slicers para integrar algoritmos de control adaptativo directamente en las herramientas de laminado.

6. Anexos

6.1. Parámetros defectos microgeométricos

T 215 °C	V [mm/s]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sk [μm]	Vvc [ml/m ²]
Base Cilíndrica	60	13.204	90.109	21.365	12.764
	100	11.801	62.998	20.831	12.497
	150	11.087	56.116	21.683	12.087
	200	14.533	93.332	49.190	20.042
	250	10.859	57.480	20.764	11.554
	300	10.299	63.160	22.040	11.452
	350	10.583	66.142	21.887	11.544
	400	10.346	69.472	20.039	11.084
	450	10.676	64.587	21.420	11.601
	500	10.263	58.247	18.730	10.736
Base Cuadrada	60	12.861	71.421	21.183	12.445
	100	11.932	57.165	19.990	12.348
	150	11.478	61.382	20.404	12.029
	200	11.305	63.154	21.472	12.099
	250	11.362	65.046	21.380	11.984
	300	10.993	63.423	22.426	11.946
	350	11.156	67.272	23.252	12.293
	400	10.981	66.241	19.117	11.340
	450	11.203	67.123	24.515	12.593
	500	10.719	63.712	20.362	11.465

Tabla 14: Parámetros superficiales para 215 °C.

T 225 °C	V [mm/s]	Sa [µm]	Sz [µm]	Sk [µm]	Vvc [ml/m ²]
Base Cilíndrica	60	14.628	114.334	20.712	14.991
	100	12.209	87.334	19.946	12.279
	150	11.801	75.704	20.796	12.187
	200	12.036	71.440	25.722	13.321
	250	11.924	82.235	26.843	13.408
	300	11.692	84.474	29.934	13.928
	350	11.920	96.404	29.945	13.919
	400	11.625	82.180	29.173	13.749
	450	11.188	87.146	29.340	13.454
	500	11.143	87.251	37.305	12.875
Base Cuadrada	60	15.290	115.903	21.705	15.533
	100	12.549	80.868	22.486	12.853
	150	11.676	71.836	21.428	12.153
	200	12.058	81.429	23.664	12.961
	250	11.863	80.900	27.051	13.434
	300	11.704	95.805	28.528	13.659
	350	11.880	90.831	30.138	14.040
	400	12.147	103.880	33.979	15.065
	450	12.162	318.493	32.406	14.674
	500	12.229	100.98	33.121	14.862

Tabla 15: Parámetros superficiales para 225 °C.

T 235 °C	V [mm/s]	Sa [µm]	Sz [µm]	Sk [µm]	Vvc [ml/m ²]
Base Cilíndrica	60	14.713	113.339	20.003	14.519
	100	12.501	95.959	20.404	12.789
	150	12.302	78.466	22.371	12.545
	200	11.612	80.625	21.963	12.027
	250	11.520	83.300	24.640	12.539
	300	10.909	72.434	22.115	12.625
	350	11.145	74.148	25.735	12.622
	400	10.419	74.644	25.248	12.001
	450	10.711	83.804	24.800	12.061
	500	10.897	78.497	25.462	12.195
Base Cuadrada	60	15.861	118.421	28.386	17.476
	100	13.442	101.265	23.484	13.867
	150	12.645	82.883	22.112	12.632
	200	12.212	91.820	22.037	12.471
	250	11.628	83.456	23.454	12.325
	300	11.249	76.490	26.156	12.808
	350	10.877	86.807	26.929	12.684
	400	11.582	89.463	28.843	13.554
	450	10.645	75.684	26.543	12.393
	500	10.914	86.016	27.031	12.617

Tabla 16: Parámetros superficiales para 235 °C.



7. Bibliografía

- [1] Zahera, M. (2012). *La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos*. Valencia.
- [2] Peso García, N. (2020). *Diseño de una impresora 3D de media y alta temperatura*. Madrid.
- [3] Estereolitografía (2024). *Tecnología para la manufactura aditiva*. <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Estereolitograf%C3%ADa#>
- [4] Procesamiento digital de luz. (2022). *principales tecnologías de impresión 3D disponibles en la actualidad*. <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-dlp-piezas-caucho-mejoradas-171020222/>
- [5] Markforged. (2025). *What is Digital Light Processing (DLP)?*. <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-digital-light-processing-dlp>
- [6] todo-3D.com. (2025). *FDM-FFF o modelado por deposición fundida*. <https://todo-3d.com/fdm-fff-modelado-deposicion-fundida/?v=7ee12bda8e7f>
- [7] Fused Deposition Modelling. (2025). *Es el proceso de impresión 3D más accesible*. <https://rapidfab.ricoh-europe.com/es/tecnologias/fdm/>
- [8] Xometry. (2023). *Impresión 3D por sinterización directa de metales (DMLS): Visión general de la tecnología*. <https://xometry.pro/es/articulos/impresion-3d-dmls-tecnologia/>
- [9] Wikipedia. (2025). *Sinterización directa por láser de metal*. https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizaci%C3%B3n_directa_por_l%C3%A1ser_de_metal
- [10] INGENIA. (2025). *Sinterizado Selectivo por Láser (SLS)*. <https://ingenia-sm.com/sinterizado-laser-sls/>
- [11] Selective Laser Sintering. (2025). *proceso de fabricación aditiva*. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>
- [12] Sculpteo. (2025). *Impresión 3D con tecnología SLM*. <https://www.sculpteo.com/es/materiales/slm-materiales/>

- [13] Selective Laser Melting. (2021). *Influence of Selective Laser Melting Technology Process Parameters on Porosity and Hardness of AISI H13 Tool Steel*. https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-SLM-technology_fig1_355293108
- [14] Xometry. (2023). *Impresión 3D Multi Jet Fusion (MJF): Visión general de la tecnología*. <https://xometry.pro/es/articulos/impresion-3d-mjf-tecnologia/>
- [15] Multi Jet Fusion. (2021). *Todo lo que necesita saber sobre la impresión 3D con MJF*. <https://descubrearduino.com/jet-fusion/>
- [16] Impresoras3D.com. (2016). *CLIP, una nueva tecnología de impresión 3D hasta 100 veces más rápida*. <https://www.impresoras3d.com/clip-una-nueva-tecnologia-de-impresion-3d-hasta-100-veces-mas-rapida/>
- [17] Continuous Liquid Interface Production. (2020). *Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications*. https://www.researchgate.net/figure/Continuous-liquid-interface-production-schematic-22_fig7_342539019
- [18] Rapid Direct. (2023). *Las 6 principales industrias utilizan la impresión 3D: una amplia gama de aplicaciones industriales*. <https://www.rapiddirect.com/es/blog/what-industries-use-3d-printing/>
- [19] Cano Vicent, A. & Serrano Aroca, Á. (2021). *Impresión 3D por modelado por deposición fundida: Manejo, funcionamiento y aplicaciones biomédicas*. Valencia.
- [20] Impression 3D FFF. (2024). *Introduction à l'impression 3D FDM*. <https://www.f3df.com/formations/impresion-3d-fdm/>
- [21] Impresión 3D. (2024). *Impresión 3D, qué es, usos, tipos e impacto ambiental*. <https://www.channelpartner.es/negocio/impresion-3d-que-es-usos-tipos-e-impacto-ambiental/>
- [22] Delgado Ayala, F. (2021). *Caracterización de filamento de PLA reciclado para impresión 3D*. Tenerife.
- [23] Formlabs. (2022). *9 aplicaciones de la impresión 3D en el sector aeroespacial*. <https://formlabs.com/es/blog/additive-manufacturing-3d-printing-in-aerospace/>



- [24] BCN3D Technologies. (2023). *FFF 3D Printing technology provides Prodrive with a huge range of possibilities to transform the manufacturing and production process for the actual racing cars they produce*. <https://www.bcn3d.com/fff-3d-printing-technology-provides-prodrive-with-a-huge-range-of-possibilities-to-transform-the-manufacturing-and-production-process-for-the-actual-racing-cars-they-produce/>
- [25] Lüchtenborg, J., Burkhardt, F., Nold, J., Rothlauf, S., Wesemann, C., Pieralli, S., Wemken, G., Witkowski, S., & Spies, B. C.. (2021). *Implementation of Fused Filament Fabrication in Dentistry*. <https://doi.org/10.3390/app11146444>
- [26] BCN3D. (2021). *Material para impresora 3D: Descubre los más utilizados en FDM*. <https://www.bcn3d.com/es/material-para-impresora-3d-fdm>
- [27] Guía de Filamentos. (2025). *Información práctica sobre los distintos materiales que puedes utilizar con tu impresora 3D*. <https://www.leon-3d.es/guia-de-filamentos/?srsltid=AfmB0oohfQl1a0qXC3-fsAJUQfCpzRcppbWZY8eC3CkiTIm3b2o0mt1>
- [28] P3D. (2025). *¿Qué es el filamento de alta velocidad?*. <https://p3d.mx/es/blogs/how-to-3d-print/high-speed-hyper-pla-filaments>
- [29] Todo sobre Filamento PLA. (2025). *En el corazón de la impresión 3D, el PLA, emerge como una opción destacada*. https://www.mastoner.com/blog/pla-para-impresion-3d/?srsltid=AfmB0oor0n8m1F0WpGqiWAqEtfBONeLx-6UHo_C0aPt0yVbYJmLbPJ_G
- [30] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing (2nd ed.)*.
- [31] filament2print. (2015). *Dudas habituales sobre temperatura y velocidad de impresión de PLA y ABS*. <https://filament2print.com/es/blog/dudas-temperatura-velocidad-impresion-3D>
- [32] Prusa Research. (2025). *PLA Material Guide*. https://help.prusa3d.com/article/PLA_1868
- [33] Ultimaker. (2025). *PLA Material Guide*. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360013400520-PLA-printing-material>



- [34] Bambu Lab. (2025). *X1-Carbon 3D Printer*. <https://www.bambulab.com/en/x1>
- [35] Creality. (2025). *K1 3D Printer*. <https://www.creality.com/products/k1-3d-printer>
- [36] TeamFDM. (1015). *Voron 2.4 Build Guides and Community Resources*. <https://www.teamfdm.com>
- [37] E3D. (2025). *Revo High Flow*. <https://e3d-online.com/products/revo-high-flow>
- [38] Klipper. (2025). *Resonance Compensation*. https://www.klipper3d.org/Resonance_Compensation.html
- [39] Prusa Research. (2025). *Original Prusa MK4 Release*. https://blog.prusa3d.com/original-prusa-mk4-release_70712
- [40] AENOR. (1998). *UNE-EN ISO 4288. Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial*.
- [41] AENOR. (1999). *UNE-EN ISO 4287. Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial*.
- [42] UNE-EN ISO 25178-2:2023. (2023). *Calidad superficial: Área. Parte 2: Términos, definiciones y parámetros de calidad superficial*.
- [43] Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology*.
- [44] AENOR. (2017). *UNE-EN ISO 1101:2017. Tolerancia geométrica. Tolerancias de forma, orientación, localización y alabeo*.
- [45] Keyence. (2025). *Técnicas para medir la deformación y la ondulación y obtener mejores resultados*. <https://www.keyence.com.mx/ss/products/microscope/measurement-solutions/surface-waviness.jsp>



- [46] Wikipedia. (2010). *Redondez*. <https://es.wikipedia.org/wiki/Redondez#/media/Archivo:Roundness.png>
- [47] Keyence. (2025). *Un método de medición instantánea y de alta precisión de la planicidad*. <https://www.keyence.com.mx/ss/products/microscope/measurement-solutions/surface-waviness.jsp>
- [48] Keyence. (2025). *Tolerancia de forma (desviación de forma)*. <https://www.keyence.com.mx/ss/products/microscope/measurement-solutions/surface-waviness.jsp>
- [49] WIX. (2018). *Tolerancias de forma*. <https://rafaelguerreroonz.wixsite.com/misitio/tolerancias-de-forma>
- [50] ISO 12780-1:2011 / ISO 12780-2:2011. (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Straightness*.
- [51] ISO 12181-1:2011 / ISO 12181-2:2011. (2011). *Geometrical product specifications (GPS) — Roundness*.
- [52] Scott Neumann y Al Neumann. (2009). *Tolerancias de Forma, GeoTol Pro, A Practical Guide to Geometric Tolerancing*.
- [53] Comunidad LinkedIn. (2025). *¿Cómo afectan los diferentes parámetros de velocidad de impresión a la calidad de la superficie y al acabado de los modelos impresos en 3D?* <https://www.linkedin.com/advice/3/how-do-different-print-speed-parameters-affect-surface?>
- [54] Holger Cagua, César Peña, Bladimir Ramon. (2018). *Efecto de la Velocidad de Deposición en Impresiones 3D Sobre las Propiedades Mecánicas del Poliacido Láctico (PLA)*. https://www.researchgate.net/publication/335662574_Efecto_de_la_Velocidad_de_Deposicion_en_Impresiones_3D_Sobre_las_Propiedades_Mecanicas_del_Poliacido_Lactico
- [55] Jain, R., Nauriyal, S., Gupta, V., & Khas, K. S. (2020). *Effects of process parameters on surface roughness, dimensional accuracy and printing time in 3D printing*.
- [56] 3DNative. (2025). *Proceso más rápido y preciso*. <https://www.3dnatives.com/es/mf3-proceso-de-impresion-mas-rapido-y-preciso-100820222/>



- [57] Ioannis Christodoulou & Vasiliki Alexopoulou & Angelos P. Markopoulos. (2023). *Study and Development of a High-Speed Fused Filament Fabrication 3D Printer*.
- [58] Impresoras3D. (2025). *Bambu Lab X1 Carbon*. <https://www.impresoras3d.com/producto/bambu-lab-x1-carbon-combo-impresora-3d/>
- [59] Alicona InfiniteFocus SL. (2025). *The ultimate non-contact metrology device for surface characterisation and surface roughness*. <https://www.optimaxonline.com/product/alicona-infinitefocus-sl/>
- [60] Zeiss. (2025). *Soluciones de acabado y rugosidad de superficies de ZEISS*. <https://www.zeiss.es/metrologia/sistemas/microscopia-industrial/soluciones-de-acabado-y-rugosidad-de-superficies.html>
- [61] ACCTee. (2025). *Integrated analysis software for surface measuring instruments*. <https://www.accretech.eu/en/surface-measuring-systems/acctee-integrated-analysis-software-accretech/>
- [62] Alicona. (2025). *Optical 3D metrology and surface roughness measurement*. <https://www.alicon.com/>
- [63] Bambu Studio. (2025). *Software de corte de código abierto, de última generación y rico en funciones*. <https://bambulab.com/es/download/studio>