



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Áreas de conocimiento: Ingeniería de Proceso de Fabricación

TRABAJO FIN DE GRADO

**Estudio del mecanizado de piezas de ABS obtenidas mediante FFF
para mejorar la calidad superficial.**

Grado en

Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Autor: Sofía Ros Calafat

Tutor: Sergio Martín Béjar

Cotutor: Fermín Bañón García

MÁLAGA, junio de 2.025



RESUMEN

Este trabajo tiene como finalidad analizar estrategias de mejora en la calidad superficial de piezas obtenidas mediante Fabricación Aditiva, concretamente mediante el proceso de Fabricación por Filamento Fundido, sin necesidad de modificar el espesor de capa. Para ello, se han diseñado probetas de ABS con forma de paralelepípedo, impresas bajo condiciones uniformes, sobre las que se han aplicado diferentes técnicas de postprocesado: fresado, mecanizado por chorro abrasivo y pulido químico mediante vapores de acetona. En cada proceso se han variado parámetros específicos: la velocidad de corte y de avance en el fresado, la presión del chorro en el mecanizado abrasivo y el tiempo de exposición en el pulido químico, con el fin de analizar su efecto sobre la rugosidad superficial resultante.

El estudio incluye un análisis macroscópico de las superficies, a través del cual se han podido observar características como la continuidad del material o la orientación de las trayectorias. Además, se ha obtenido cuantitativamente el valor de los parámetros de la rugosidad superficial S_a , S_z y S_k . Estos valores se han comparado con los obtenidos de la probeta impresa para comprobar si existe alguna mejora. En adición, en las operaciones de fresado se han registrado las temperaturas y posteriormente se ha analizado su efecto sobre la calidad superficial de las probetas.

Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en la calidad superficial de las probetas tras los distintos postprocesados en la mayoría de los casos logrando una reducción de los parámetros S_a , S_z y S_k . Al comparar las distintas técnicas empleadas, el mecanizado por chorro abrasivo ha sido el que ha ofrecido mejores resultados en términos de reducción de rugosidad. Además de la mejora superficial, cabe destacar que estas técnicas permiten obtener mejores calidades superficiales en tiempos reducidos favoreciendo la productividad y menores costes de fabricación.

Palabras clave:

Fabricación aditiva, FFF, fresado, mecanizado por chorro abrasivo, pulido químico, rugosidad.



ABSTRACT

This work aims to analyze strategies for improving the surface quality of parts manufactured using Additive Manufacturing, specifically through the Fused Filament Fabrication (FFF) process, without the need to modify the layer thickness. To this end, ABS specimens with a parallelepiped shape were designed and printed under uniform conditions and subsequently subjected to different post-processing techniques: milling, abrasive jet machining, and chemical polishing using acetone vapors. In each process, specific parameters were varied: cutting speed and feed rate in milling, jet pressure in abrasive machining, and exposure time in chemical polishing, in order to analyze their effect on the resulting surface roughness.

The study includes a macroscopic analysis of the surfaces, through which characteristics such as material continuity and the orientation of the deposition paths were observed. In addition, the surface roughness parameters S_a , S_z , and S_k were quantitatively measured. These values were compared with those obtained from the as-printed specimen to assess whether any improvement occurred. Furthermore, during the milling operations, temperatures were recorded and later analyzed to evaluate their influence on the surface quality of the specimens.

The results show a significant improvement in the surface quality of the specimens after the various post-processing operations, with a reduction in the S_a , S_z , and S_k parameters in most cases. Among the techniques employed, abrasive jet machining provided the best results in terms of roughness reduction. In addition to the surface improvement, it is worth noting that these techniques allow for better surface finishes in reduced processing times, thereby enhancing productivity and lowering manufacturing costs.

Keywords:

Additive manufacturing, FFF, milling, abrasive jet machining, chemical polishing, roughness.



Índice:

1. Introducción.....	17
2. Objetivos.....	21
3. Antecedentes.....	25
3.1. Fabricación aditiva	27
3.1.1. Aplicaciones de la fabricación aditiva	27
3.1.2. Clasificación de las técnicas de fabricación aditiva	27
3.1.3. Ventajas y desventajas.....	32
3.1.4. Material.....	33
3.2. Calidad superficial.....	34
3.2.1. Metrología.....	35
3.2.2. Calidad superficial en fabricación aditiva	37
3.2.3. Proceso de postprocesado mecánico	40
3.2.4. Proceso de postprocesado químico.....	43
3.3. Estado del arte	45
4. Metodología	49
4.1. Diseño de las probetas.....	51
4.2. Fabricación de las probetas	52
4.2.1. Material.....	52
4.2.2. Condiciones de impresión.....	53
4.3. Postprocesado de las probetas.....	55
4.3.1. Fresado.....	55
4.3.2. Mecanizado por chorro abrasivo	60
4.3.3. Pulido químico	62
4.4. Monitorización	64
4.4.1. Online.....	64
4.4.2. Offline.....	65
5. Resultados	71
5.1. Análisis de la superficie de la pieza impresa de 0,3 mm de altura de capa	74
5.1.1. Resultados macrogeométricos obtenidos del microscopio	74



5.1.2.	Resultados microgeométricos obtenidos de la Alicona	75
5.2.	Análisis de la superficie de la pieza impresa de 0,1 mm de altura de capa	77
5.3.	Resultados obtenidos de la operación de fresado	78
5.3.1.	Análisis de la temperatura registrada durante el fresado.....	78
5.3.2.	Análisis superficial tras la operación de fresado	80
5.4.	Análisis superficial tras mecanizado por chorro abrasivo	94
5.3.1.	Resultados macrogeométricos obtenidos del microscopio	94
5.3.2.	Resultados microgeométricos obtenidos de la Alicona	95
5.5.	Análisis superficial tras pulido por vapores de acetona	97
5.5.1.	Resultados microgeométricos obtenidos de la Alicona	97
5.6.	Comparativa de los resultados obtenidos	99
6.	Conclusiones.....	103
7.	Referencias	109

Índice de figuras:

Figura 1. Impresión SLA y DPL. [4]	28
Figura 2. Tecnología de Inyección de material. [6].....	28
Figura 3. Fusión por lecho de polvo. [9]	29
Figura 4. Fabricación aditiva por inyección de aglutinante. [12].....	30
Figura 5. Fabricación aditiva por laminado de hojas. [14].....	30
Figura 6. Fabricación aditiva de deposición de energía focalizada. [16]	31
Figura 7. Fabricación aditiva por FFF. [18].....	32
Figura 8. Tipos de materiales en la fabricación aditiva. [23]	33
Figura 9. Unidades básicas de medida. [28]	35
Figura 10. Categorías de las tolerancias geométricas. [33]	36
Figura 11. Métodos de mejora de la superficie final. [46].....	39
Figura 12. Tipos de fresado. [53]	41
Figura 13. Dirección de los movimientos de la fresadora. [55]	41
Figura 14. Tipos de fresa. [58].....	42
Figura 15. Diagrama de flujo de la metodología.....	51
Figura 16. Probeta diseñada en "SolidWorks"	51
Figura 17. Impresora RAISE 3D Pro2.....	52
Figura 18. Proceso de impresión.	52
Figura 19. Bobina de filamento de ABS.	53
Figura 20. Laminación probetas en el IdeaMaker.	54
Figura 21. Pegamento 3DLAC PLUS.	54
Figura 22. Fresadora Lagun L650.	55
Figura 23. Herramienta empleada para el mecanizado.	57
Figura 24. Herramienta colocada en el soporte.	57
Figura 25. Mordaza de fresadora.....	58
Figura 26. Palpador de fresadora.....	58
Figura 27. Código CNC en oposición.	59
Figura 28. Código CNC fresado empañe del 100%.	59
Figura 29. Estación de mecanizado por chorro abrasivo.....	60
Figura 30. Regulador de presión.	60
Figura 31. Caja de control eléctrico.	60
Figura 32. Interior de la cabina.	61
Figura 33. Microesferas de vidrio. [83].....	61
Figura 34. Colocación para el proceso de mecanizado por chorro abrasivo.....	62
Figura 35. Recipiente de cristal.....	62
Figura 36. Soportes metálicos.[85]	63
Figura 37. Acetona.	63
Figura 38. Cámara termográfica FLIR. [86]	64
Figura 39. Microscopio y cámara de la marca Zeiss. [87], [88].....	65

Figura 40. Imagen obtenida del microscopio.	66
Figura 41. Alicona modelo infinite focus SL. [89]	66
Figura 42. Posición de la probeta para toma de datos.	67
Figura 43. Imágenes tomadas por la Alicona.	67
Figura 44. Orientación pieza impresa.	74
Figura 45. Imágenes de la superficie XY de la probeta impresa a 8x y 50x.	74
Figura 46. Imágenes de la superficie XZ de la probeta impresa a 8x y 50x.	75
Figura 47. Imágenes de la superficie y la rugosidad de la probeta impresa.	76
Figura 48. Imágenes de la superficie y la rugosidad de la probeta sin mecanizar.	76
Figura 49. Representación de la temperatura media registrada durante el fresado con empañe del 50%.	78
Figura 50. Representación de la temperatura media registrada durante el fresado con empañe del 75%.	79
Figura 51. Representación de la temperatura media registrada durante el fresado con empañe del 100%.	79
Figura 52. Imágenes del microscopio de la probeta mecanizada con un empañe del 50% a 8x y 25x.	80
Figura 53. Imágenes del microscopio de la probeta mecanizada con un empañe del 75% a 8x y 25x.	80
Figura 54. Imágenes del microscopio de la probeta mecanizada con un empañe del 100% a 8x y 25x.	80
Figura 55. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.	81
Figura 56. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.	81
Figura 57. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 100% con respecto a las velocidades.	82
Figura 58. Representación de la altura máxima ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.	83
Figura 59. Representación de la altura máxima ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.	83
Figura 60. Representación de la altura máxima ante el empañe del 100% con respecto a las velocidades.	84
Figura 61. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.	85
Figura 62. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.	85
Figura 63. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 100% con respecto a las velocidades.	86
Figura 64. Representación de Sa de la cara lateral incluyendo la probeta impresa.	87

Figura 65. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.	87
Figura 66. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.	88
Figura 67. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 100% en oposición con respecto a las velocidades.	88
Figura 68. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 100% en concordancia con respecto a las velocidades.	89
Figura 69. Representación de la altura máxima ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.	90
Figura 70. Representación de la altura máxima ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.	90
Figura 71. Representación de la altura máxima ante el empañe del 100% en oposición con respecto a las velocidades.	91
Figura 72. Representación de la altura máxima ante el empañe del 100% en concordancia con respecto a las velocidades.	91
Figura 73. Representación de S_k de la cara lateral incluyendo la probeta impresa.	92
Figura 74. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.	92
Figura 75. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.	93
Figura 76. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 100% en oposición con respecto a las velocidades.	93
Figura 77. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 100% en concordancia con respecto a las velocidades.	94
Figura 78. Imagen del microscopio de la probeta sometida a chorro abrasivo a 6 bares.	94
Figura 79. Imagen del microscopio de la probeta sometida a chorro abrasivo a 7 bares.	95
Figura 80. Imagen del microscopio de la probeta sometida a chorro abrasivo a 8 bares.	95
Figura 81. S_a en función de la presión.	96
Figura 82. S_z en función de la presión.	96
Figura 83. S_k en función de la presión.	97
Figura 84. Altura media aritmética en función de las horas de exposición.	98
Figura 85. Altura máxima en función de las horas de exposición.	98
Figura 86. Profundidad de la rugosidad del núcleo en función de las horas de exposición. ..	98
Figura 87. Comparativa macrogeométrica.	99



Índice de tablas:

Tabla 1. Condiciones de impresión.....	53
Tabla 2. Parámetros de corte.....	56
Tabla 3. Parámetros cámara termográfica.....	65
Tabla 4. Valores parámetros de rugosidad cara plana de la probeta impresa de 0,3 mm de altura de capa.	76
Tabla 5. Valores parámetros de rugosidad cara lateral de la probeta de 0,3 mm de altura de capa.....	77
Tabla 6. Valores parámetros de rugosidad cara plana de la probeta impresa de 0,1 mm de altura de capa.	77



1. Introducción

La Fabricación Aditiva se ha consolidado como una tecnología emergente de gran relevancia en los distintos sectores industriales. A diferencia de los métodos convencionales basados en la eliminación o deformación del material, este tipo de fabricación permite generar piezas tridimensionales a partir de la acumulación sucesiva de capas de material, posibilitando la producción de geometrías complejas de forma eficiente.

Destacan los procesos basados en la extrusión de material, como la Fabricación por Filamento Fundido (FFF), debido a su versatilidad, simplicidad operativa y reducidos costes de implementación. Permiten desarrollar prototipos y piezas funcionales personalizadas con rapidez, esto facilita la adaptación a necesidades específicas y acelera los ciclos de desarrollo.

Sin embargo, el acabado superficial de las piezas fabricadas mediante FFF representa una de las principales limitaciones de esta tecnología. La textura de la superficie puede afectar negativamente tanto a la estética como al rendimiento funcional de la pieza, especialmente en aplicaciones donde la fricción, el contacto o la precisión geométrica son relevantes junto con los tiempos prolongados de fabricación que pueden comprometer la eficiencia de la producción en entornos industriales con altas demandas.

En este sentido, el postprocesado mecánico mediante fresado se presenta como una alternativa efectiva para mejorar el acabado superficial de las piezas impresas. Este proceso, ampliamente utilizado en la industria, permite obtener superficies más uniformes y con mejores tolerancias dimensionales. No obstante, el mecanizado de piezas aditivas presenta desafíos particulares debido a la anisotropía del material y a las posibles deformaciones asociadas a las fuerzas de corte y al calor generado durante el proceso.

Junto con el fresado, otra técnica de interés para el postprocesado de piezas fabricadas por FFF es el mecanizado por chorro abrasivo. Este proceso consiste en proyectar un flujo de partículas abrasivas a alta velocidad sobre la superficie de la pieza, permitiendo eliminar irregularidades sin contacto directo. Su carácter no invasivo lo hace especialmente útil para tratar materiales poliméricos o piezas con detalles delicados, logrando acabados superficiales más uniformes sin comprometer la geometría global de la pieza.

Adicionalmente, se considera el uso del pulido químico mediante vapores de acetona, una técnica que actúa sobre la superficie de las piezas suavizando las estrías propias del proceso de extrusión. Esta metodología permite una mejora del aspecto superficial sin necesidad de contacto mecánico, lo que evita daños estructurales y puede ser especialmente eficaz en piezas con geometrías complejas o de difícil acceso.

Considerando todos estos aspectos, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar de manera comparativa el efecto de distintas operaciones de postprocesado la calidad superficial y los tiempos de fabricación de piezas obtenidas mediante FFF. Se analizarán la rugosidad, así como la influencia de variables específicas de cada proceso, con el fin de obtener buenos acabados superficiales y bajos tiempos de fabricación.



2. Objetivos



El objetivo principal de este trabajo es, mejorar la calidad superficial de probetas fabricadas mediante la técnica de Fabricación Aditiva por Filamento Fundido (FFF), sin necesidad de modificar la altura de capa. Para ello, se aplicarán y compararán distintas técnicas de postprocesado, evaluando su eficacia y su impacto en la rugosidad superficial y tiempos de fabricación.

Con el fin de lograr este objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Aplicar procesos de fresado, mecanizado por chorro abrasivo y pulido químico mediante vapores de acetona sobre las probetas impresas.
- Analizar la influencia de los parámetros de corte sobre la calidad superficial en el caso del fresado.
- Registrar y analizar la temperatura generada durante el fresado para estudiar su relación con la calidad superficial final.
- Estudiar el efecto de la presión del chorro sobre la rugosidad en el proceso de AJM.
- Evaluar la influencia del tiempo de exposición sobre la superficie resultante en el pulido químico.
- Comparar los resultados obtenidos entre los distintos procesos de postprocesado para determinar cuál de ellos ofrece los mejores resultados en cuanto a reducción de rugosidad.



3. Antecedentes

3.1. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva, o impresión 3D, es una tecnología que permite la creación de objetos tridimensionales a partir de modelos digitales mediante la adición sucesiva de material. Esta metodología ha revolucionado múltiples sectores debido a su capacidad para producir geometrías complejas, personalizar productos y optimizar procesos de fabricación [1].

3.1.1. Aplicaciones de la fabricación aditiva

La fabricación aditiva ha revolucionado varios sectores debido a su versatilidad y capacidad para obtener objetos de geometrías complejas de manera precisa y eficiente. A continuación, se destacan algunas aplicaciones en ámbitos distintos.

- Medicina: la impresión 3D se utiliza en este campo con el fin de crear modelos anatómicos de alta precisión a partir de imágenes médicas. De esta forma se facilitan las cirugías ya que se tiene un modelo físico con el que trabajar y planificar dichas operaciones. Además, mediante esta tecnología se pueden fabricar prótesis adaptadas a las necesidades de cada paciente.
- Industria aeroespacial: mediante la fabricación aditiva se pueden producir piezas aeronáuticas incluso si la geometría requerida es compleja. Se obtienen por tanto piezas eficientes y ofreciendo una reducción de peso en las aeronaves.
- Arquitectura y construcción: gracias a la fabricación aditiva es posible que los arquitectos construyan modelos de sus diseños, obteniendo maquetas que facilitan la visualización y comunicación de proyectos arquitectónicos.
- Educación: la posibilidad de obtener geometrías complejas mediante la impresión 3D permite crear modelos tangibles que ayudan en la enseñanza de conceptos en el ámbito educativo para facilitar dicha actividad.

3.1.2. Clasificación de las técnicas de fabricación aditiva

La norma UNE-EN ISO/ASRM 52900:2022 clasifica y define las diferentes técnicas de fabricación aditiva en siete categorías, basándose en la forma de aplicación de los procesos durante la creación de piezas.

En primer lugar, encontramos la fotopolimerización en tanque, comúnmente conocida como estereolitografía (SLA). Este método de fabricación aditiva se basa en el curado selectivo de un fotopolímero líquido contenido en una cuba, mediante la exposición a una fuente de luz que activa su polimerización [2]. Entre sus principales ventajas destacan la alta precisión y la excelente calidad del acabado superficial, aunque es un proceso con un coste relativamente elevado. Los materiales empleados para este método de producción suelen ser resinas poliméricas fotocurables y, en algunos casos, composites cerámicos.

A lo largo de los años, esta metodología ha aumentado apareciendo nuevas tecnologías. Comercialmente, las principales tecnologías que se emplean son la fotopolimerización en tanque son la estereolitografía (SLA) y el procesamiento de luz digital (DLP), aunque también existen la producción de interfaz líquida continua (CLIP) o la polimerización en suelo sólido (SGC) [3].

La diferencia fundamental entre la SLA y el DLP radica en el método utilizado para curar el material (Figura 1). Mientras que la SLA utiliza un láser que traza y solidifica el fotopolímero de forma selectiva, punto por punto, el DLP recurre a un proyector digital que cura áreas completas del fotopolímero de manera simultánea. Esta distinción influye directamente en la velocidad del proceso y en ciertos aspectos de la resolución y calidad de las piezas fabricadas.

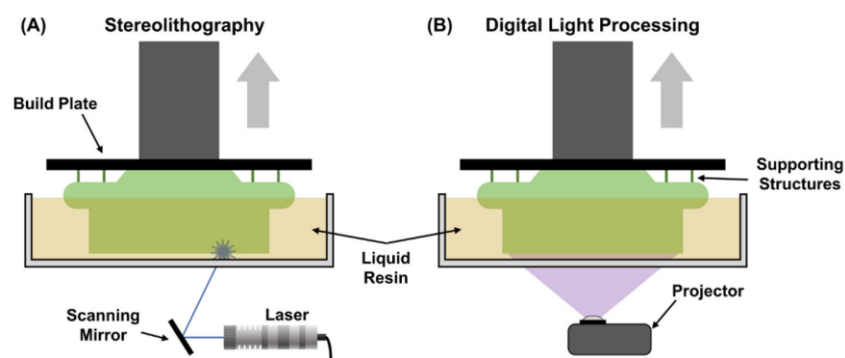


Figura 1. Impresión SLA y DLP. [4]

En segundo lugar, se encuentra el proceso de fabricación aditiva conocido como inyección de material (MJT) (Figura 2). Este método presenta un funcionamiento similar al de una impresora de tinta convencional, ya que consiste en la deposición selectiva de pequeñas gotas de material sobre una bandeja de construcción, capa por capa, hasta formar la pieza deseada [5]. Los materiales comúnmente empleados en esta tecnología son polímeros y resinas fotocurables, que se solidifican mediante la exposición a la luz. Esta técnica permite obtener piezas con una amplia variedad de propiedades físicas y mecánicas.

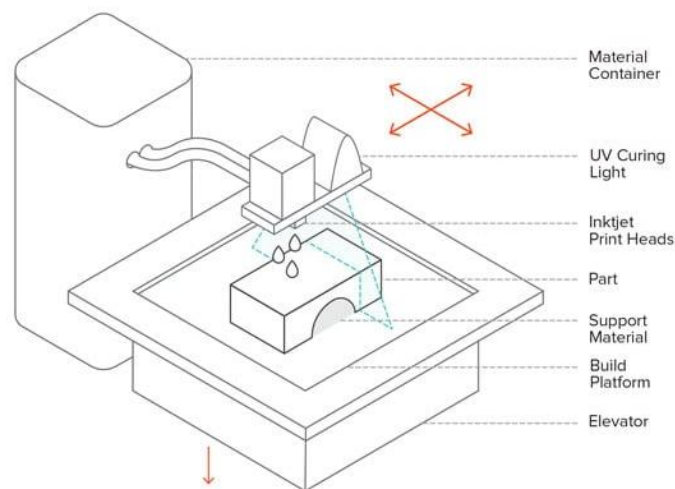


Figura 2. Tecnología de Inyección de material. [6]

Este proceso permite la fabricación de una gran diversidad de geometrías con un acabado altamente preciso. Una de sus principales ventajas es la posibilidad de producir una única pieza combinando distintos materiales y colores, lo que amplía notablemente sus aplicaciones. En cuanto al postprocesado, este se limita generalmente a la eliminación del material de soporte [7], lo que simplifica la etapa final del proceso. Debido a estas características, la tecnología de inyección de material se emplea con frecuencia en la creación de prototipos y encuentra aplicaciones en sectores tan variados como la joyería, el diseño industrial e incluso la medicina.

Otra de las categorías incluidas en esta clasificación es la fusión de lecho de polvo (Figura 3), esta tecnología es de las más avanzadas y, por tanto, de las más aplicadas. El proceso consiste en aplicar calor de forma selectiva directamente sobre una capa de polvo, fundiendo áreas específicas mediante una fuente térmica, como un láser de alta potencia o un haz de electrones [8]. Este proceso consta de sus propias categorías, en estas se encuentran la fusión selectiva por láser (SLM) y la sinterización selectiva por láser (SLS).

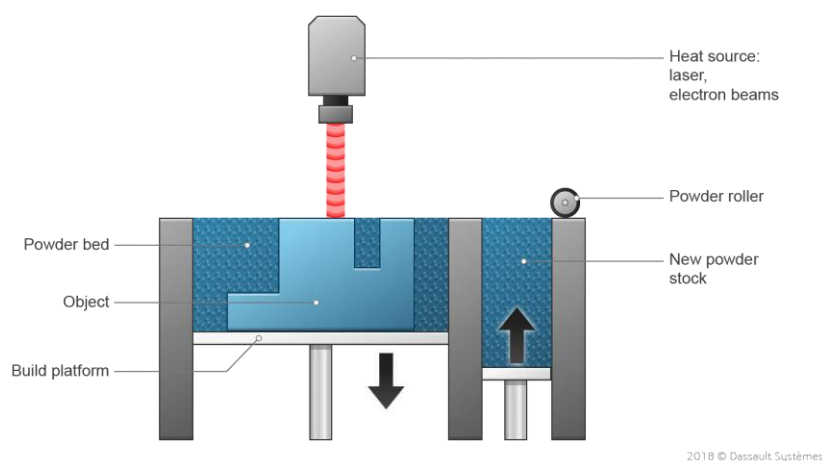


Figura 3. Fusión por lecho de polvo. [9]

Los materiales empleados suelen ser metales o polímeros presentados en forma de partículas finas. Al ser fundidas, estas partículas se unen para formar estructuras sólidas y complejas con un alto nivel de detalle y precisión [10]. Esta tecnología permite, por tanto, producir geometrías complejas, además, su compatibilidad con una amplia gama de materiales lo convierten en una opción muy versátil para diversas aplicaciones industriales.

Aunque las piezas obtenidas mediante esta técnica presentan propiedades mecánicas comparables a las de los métodos de fabricación convencionales, el proceso puede ser relativamente lento y requiere un consumo energético elevado.

La proyección de aglutinante (Figura 4) constituye otra de las categorías contempladas en esta clasificación de procesos de fabricación aditiva. Este método consiste en la inyección selectiva de un agente aglutinante líquido sobre un lecho de polvo, lo que implica la utilización de dos materiales distintos, permitiendo así la adhesión y formación progresiva de capas [11].

Se utiliza principalmente con materiales como cerámicas, composites, polímeros o arenas, excluyendo generalmente los metales. Una de sus principales ventajas es la rapidez del proceso, así como la posibilidad de fabricar piezas con una gran variedad de materiales y colores. Estas características la convierten en una tecnología especialmente adecuada para la producción en serie o a gran escala.

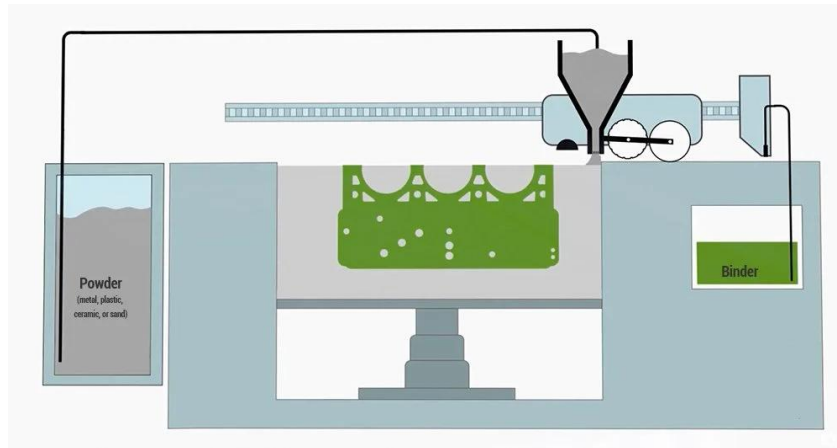


Figura 4. Fabricación aditiva por inyección de aglutinante. [12]

El laminado de hojas (SHL) es otra técnica de fabricación aditiva que se basa en la unión sucesiva de finas láminas de material para construir una pieza tridimensional (Figura 5), y es uno de los tipos de fabricación aditiva más antiguos. Estas láminas, que suelen ser de papel o plástico, se recortan previamente con la forma deseada y se adhieren entre sí mediante un adhesivo especializado. Una vez ensambladas, se aplica un sellador para asegurar la fijación de la pieza [13]. Además, es posible incorporar color al objeto final mediante la aplicación de tinta durante el proceso de fabricación. Esta tecnología destaca por su bajo coste, velocidad de producción y reducido impacto ambiental. No obstante, la resolución y precisión del acabado superficial son limitadas, lo que restringe su uso principalmente a la creación de prototipos visuales y modelos a color.

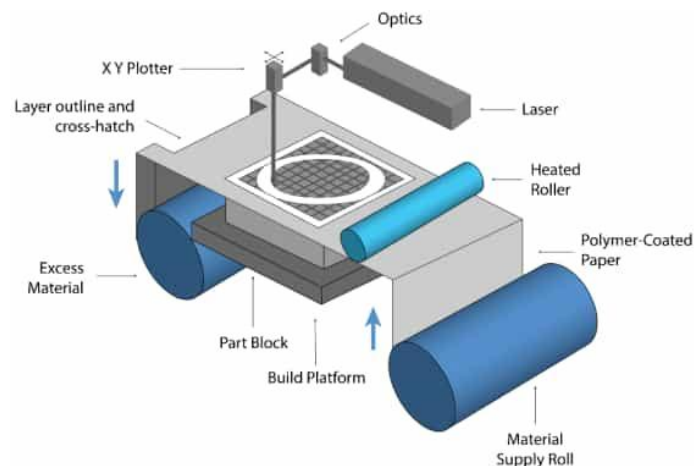


Figura 5. Fabricación aditiva por laminado de hojas. [14]

Otra técnica de fabricación aditiva es la deposición de energía focalizada (Figura 6), un proceso de fabricación aditiva en el que se emplea una fuente de energía, como un láser o un haz de electrones, para fundir de forma selectiva el material que se va depositando, capa por capa, permitiendo una construcción precisa de la pieza [11]. Este método se utiliza principalmente para obtener nuevos componentes mecánicos o reparar los ya existentes mediante materiales en forma de polvo o alambre. La deposición de energía focalizada es una técnica altamente versátil, ya que no solo se emplea para crear componentes desde cero, sino también para reparar piezas existentes o añadir material a zonas específicas como se ha comentado anteriormente [15]. Aunque ofrece una gran flexibilidad, este proceso generalmente requiere etapas de postprocesado para alcanzar las propiedades mecánicas y estéticas deseadas en las piezas fabricadas.

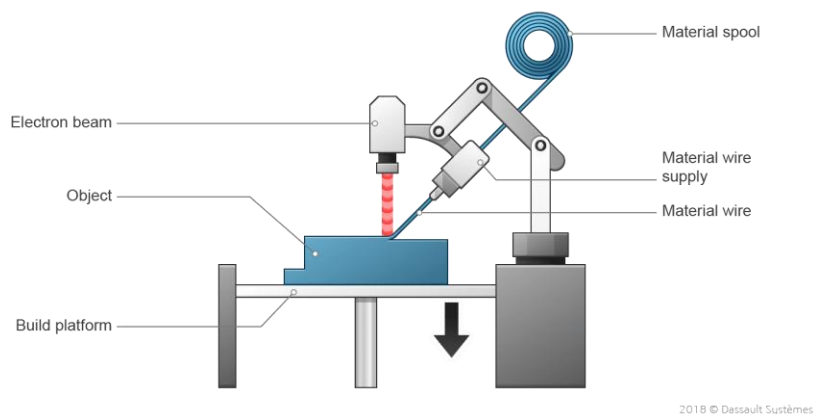


Figura 6. Fabricación aditiva de deposición de energía focalizada. [16]

Finalmente, se encuentra la categoría de extrusión de material, también conocida como fabricación con filamento fundido (FFF). Los materiales comúnmente empleados en esta tecnología son termoplásticos, aunque, en la actualidad, se emplean una gran variedad, desde metales hasta hormigón. Este proceso fue comercializado por Stratasys, quien le dio el nombre de Modelado por deposición fundida (FDM) [6].

Este proceso de fabricación aditiva consiste en la extrusión de material a través de un cabezal de impresión, el cual se deposita de manera controlada sobre una plataforma de fabricación (Figura 7). En este método, el material, generalmente en forma de filamento, se funde mediante un cabezal extrusor, hasta alcanzar un estado semilíquido, y se va depositando capa por capa sobre la base, siguiendo parámetros definidos previamente [17]. A medida que cada capa se deposita, se enfría y solidifica, uniendo las capas sucesivas para formar la pieza final con la geometría deseada. En caso de ser necesario, el material de soporte puede ser retirado una vez que el proceso de impresión ha concluido.

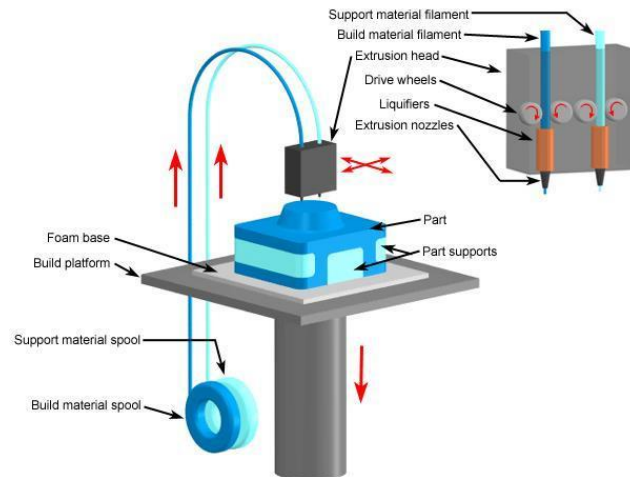


Figura 7. Fabricación aditiva por FFF. [18]

La calidad superficial de las piezas fabricadas mediante extrusión de material depende tanto del tipo de filamento utilizado como de los parámetros establecidos durante el proceso de impresión. Por lo general, las piezas obtenidas presentan un acabado rugoso y muestran líneas de unión visibles entre capas. Debido a esto, es habitual emplear técnicas de postprocesado, como lijado o pulido, para mejorar la apariencia y suavizar la superficie de las piezas.

3.1.3. Ventajas y desventajas

En este apartado se exponen los aspectos favorables y desfavorables fundamentales de la fabricación aditiva, empezando por las ventajas y finalizando por las limitaciones [19], [20], [21], [22].

La fabricación aditiva ofrece numerosas ventajas en comparación con otros procesos de fabricación. De entre todas se destaca la capacidad de obtener geometrías complejas. En el apartado anterior se ha visto como, a pesar de existir diferentes tipos de impresión 3D, en todas es posible obtener piezas con geometrías difíciles, lo que supone en muchas ocasiones la razón por la cual se escoge este método de producción. Además, durante la creación de las piezas, el desperdicio de material es menor que en el resto de los procesos, por lo que existe un ahorro de material, lo que supone también una ventaja de esta tecnología.

Las tecnologías empleadas en cada una de las categorías de la fabricación aditiva son fácilmente accesibles y manejables, el usuario puede empleando modelos CAD obtenidos a través de internet sin necesidad de que el usuario tenga conocimiento de modelado 3D. Debido a estas cualidades numerosas personas puedan emplear dicho proceso de fabricación incluso desde sus casas en algunos casos. Esto se debe a que, una vez lanzado el programa en la impresora, es rara vez necesaria la intervención humana minimizándose los errores debido a este factor.

Aunque existen diversas ventajas, la fabricación aditiva tiene sus inconvenientes. Una de las principales desventajas y objeto de estudio de este trabajo y muchos otros es el tiempo de fabricación. La capacidad de fabricación en masa es necesaria en muchas ocasiones, y esta tecnología tiene una capacidad limitada en comparación con otros procesos. Otra de las desventajas a destacar, que está relacionada con la anterior, es el acabado superficial que ofrece la impresión 3D. Sendas desventajas están directamente relacionadas, a mayor tiempo de producción mejor calidad superficial y viceversa.

Como se ha comentado anteriormente, la fabricación aditiva permite obtener geometrías complejas, pero el tamaño de las piezas a fabricar está limitado a las dimensiones de la cámara de impresión.

En cuanto a los materiales compatibles con este proceso, existen limitaciones. A pesar de que, a medida que va avanzando la tecnología, nuevos materiales van entrando en uso. En adición, al obtener una pieza mediante este método, las cualidades mecánicas de los materiales pueden haber variado.

3.1.4. Material

Los materiales empleados en la fabricación aditiva dependen de la tecnología a emplear ya que, aunque todavía no todos los materiales son aptos existe un gran rango de ellos. En la Figura 8 se muestran la variedad existente.

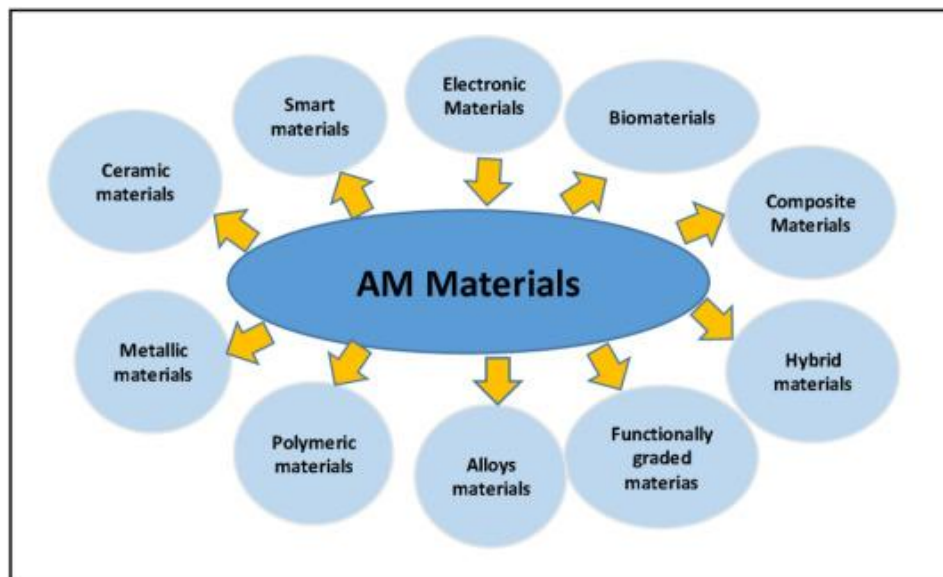


Figura 8. Tipos de materiales en la fabricación aditiva. [23]

En este trabajo se han obtenido las probetas por medio de la fabricación con filamento fundido, por ello, en este apartado se comentarán los materiales más empleados en este tipo de proceso.

Actualmente el tipo de material más usado para este tipo de método son los materiales termoplásticos. En el mercado, los dos materiales que destacan son el ácido poliláctico (PLA) y el acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) [24]. A continuación, se describen algunos de ellos [25].

- PLA: es el material más usado en la fabricación por filamento fundido. Esto se debe a su facilidad de uso, es menos propenso a la deformación y no necesita obligatoriamente un lecho calentado. Es un material termoplástico biodegradable que proviene de materiales como almidón de maíz o la caña de azúcar. El PLA es económico además de estar disponible en múltiples colores.
- ABS: como se ha comentado al inicio es otro de los materiales más empleados. Se usa normalmente para piezas que deben ser más resistentes y duraderas, debido a que es más fuerte. Al igual que el PLA es un material asequible y fácil de emplear, pero se diferencia de este ya que es más propenso a la deformación conocida como “warping”. Este fenómeno ocurre al contraerse el material debido al enfriamiento de este lo que lleva al levantamiento de los bordes de la pieza impresa, acentuándose dicho fenómeno en piezas de mayor superficie.
- HIPS: el poliestireno de alto impacto (HIPS) es un polímero termoplástico que en algunas ocasiones es la opción más económica del ABS. Es un material fácil de imprimir, a pesar de necesitar una impresora de doble extrusor, con bajo índice de contracción, a diferencia del ABS. Presenta buenas propiedades mecánicas y una gran resistencia al impacto.
- Nailon: el filamento de nailon proviene de un material sintético resistente, flexible y ligero, la poliamida. Este material se emplea para piezas como engranajes u otras piezas mecánicas que requieren una buena resistencia y un desgaste bajo. Además, presenta resistencia al calor, la humedad y productos químicos.
- PETG: es una modificación del polietileno. Este material presenta una gran resistencia química y durabilidad. Es fácil de imprimir y presenta buena adherencia entre las capas. A diferencia de otros materiales es menos económico.

3.2. Calidad superficial

El acabado superficial de las piezas y su precisión dimensional son requisitos indispensables, en algunos casos, a la hora de obtener piezas por medio de la fabricación aditiva. Es importante que exista un buen acabado superficial en casos como las uniones.

La primera propiedad se emplea para hacer referencia a las características tanto visibles como táctiles de la superficie de la pieza, como el brillo, la uniformidad o su textura [26]. La calidad superficial se relaciona también con defectos microgeométricos.

3.2.1. Metrología

En el campo de la fabricación es necesario determinar las mediciones e incertidumbres de las piezas fabricadas y sobre todo en tipos de fabricación donde la forma se ve alterada durante la producción, como sería el caso de la impresión 3D. Por esta razón surge la necesidad de contar con un sistema uniforme para todos los usuarios, de manera que, en caso de colaboración entre diferentes empresas o personas, las piezas tengan medidas estándar que sean comprendidas de igual forma por todos. Esto evita errores en su uso o la pérdida de tiempo al tener que repetir la medición.

Para ello existe la metrología, que se define como *“la ciencia que tiene por objeto el estudio de las propiedades medibles, las escalas de medida, los sistemas de unidades, los métodos y técnicas de medición, así como la evolución de lo anterior, la valoración de la calidad de las mediciones y su mejora constante, facilitando el progreso científico, el desarrollo tecnológico, el bienestar social y la calidad de vida”* [27].

Como se establece en la definición anterior, la metrología se encarga también de establecer las unidades de medida y reproducirlas. Actualmente, en España, el sistema es el SI, sistema que ha sido adoptado internacionalmente en la Unión Europea y otros países. En la Figura 9 se observan las siete unidades básicas de medida y, a partir de ellas, se obtienen las derivadas.

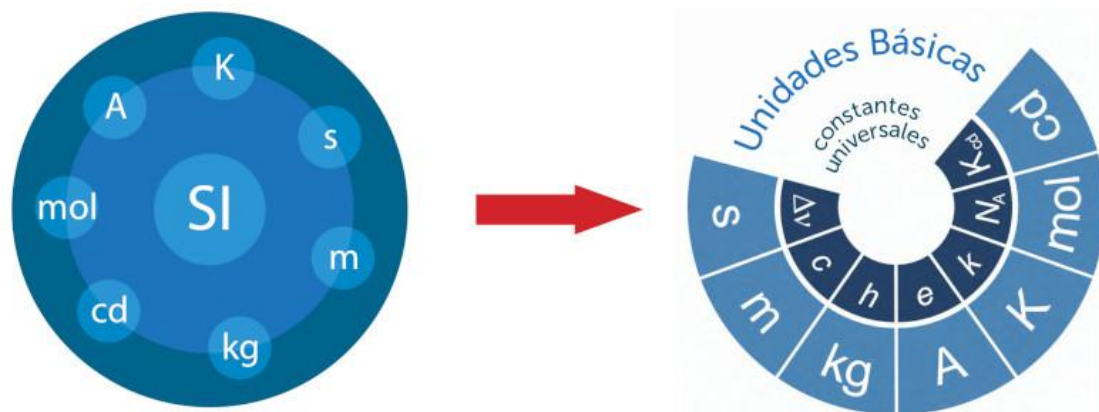


Figura 9. Unidades básicas de medida. [28]

En el ámbito de la fabricación, la metrología se encarga de medir la geometría de las piezas, lo que incluye la determinación de tolerancias macrogeométricas como microgeométricas. Esta tarea específica le corresponde a la metrología dimensional.

- Tolerancia macrogeométrica

Las tolerancias macrogeométricas se definen como la diferencia máxima que se permite entre el valor nominal y el valor real o efectivo en cuanto a las características químicas y físicas de un material, producto o pieza [29].

- Dimensionales: se definen las tolerancias dimensionales como la cantidad total que es permitido variar, en el proceso de fabricación, la dimensión específica en el plano de referencia según la cota nominal [30]. Se establecen dichos límites con el fin de cumplir los requisitos establecidos en la fase de diseño [31].
- Geométricas: las tolerancias geométricas se emplean para controlar en las piezas el tamaño, forma, perfil, orientación, localización... [32]. Su uso permite un funcionamiento satisfactorio y la capacidad de intercambiabilidad en las piezas. Existen 4 categorías en las que se dividen las tolerancias. En la Figura 10 se observa dicha clasificación.

TOLERANCIAS	CARACTERÍSTICAS	SIMBOLO
Forma	Rectitud	—
	Planitud	
	Redondez	
	Cilindricidad	
	Perfil de una línea	
	Perfil de una superficie	
Orientación	Paralelismo	//
	Perpendicularidad	⊥
	Angularidad	∠
Localización	Posición	⊕
	Concentricidad y Coaxialidad	⊙
	Simetría	≡
Alabeo	Circular	
	Total	

Figura 10. Categorías de las tolerancias geométricas. [33]

- Tolerancia microgeométrica

Las tolerancias microgeométricas vienen determinadas por la rugosidad superficial, dicho concepto hace referencia a las irregularidades que aparecen en la superficie de un material como resultado del proceso de fabricación. La rugosidad superficial tiene parámetros asociados, estos son valores numéricos que expresan las irregularidades de la superficie [34].

- Rugosidad media aritmética (R_a): se trata de la rugosidad promedio, teniendo en cuenta picos y valles, de la longitud medida.
- Altura media de pico a valle (R_z): es el promedio de los 5 picos más altos y los 5 valles más profundos, es decir los 5 puntos más altos y bajos, a lo largo de la longitud de nuestro determinado.
- Profundidad de la rugosidad del núcleo del perfil (R_k): altura del tramo central del perfil bidimensional, medida a partir de la curva de soporte de material (Abbott-Firestone).

A continuación, se mencionan también los parámetros de superficie [35].

- Altura media aritmética (S_a): es la extensión de R_a a una superficie. Se emplea normalmente, para evaluar la rugosidad superficial, expresa la diferencia de altura de cada punto con respecto a la media aritmética de la superficie en valor absoluto.
- Altura máxima (S_z): es definida como la suma del valor de altura de pico y el valor de profundidad de valle más grandes del área definida.
- Profundidad de la rugosidad del núcleo de la superficie (S_k): es la altura del intervalo central que contiene aproximadamente el 40% más representativo del perfil funcional de la superficie calculada a partir de la curva de Abbott- Firestone.

3.2.2. Calidad superficial en fabricación aditiva

La calidad superficial de las piezas obtenidas mediante la fabricación por filamento fundido (FFF) es un factor clave en la funcionalidad y estética de las piezas impresas en 3D. Sin embargo, debido al desarrollo capa por capa del proceso, la superficie de las piezas impresas presenta limitaciones.

- Factores que afectan la calidad superficial en FFF

La **altura de capa** es uno de los factores más influyentes en la calidad superficial de las piezas realizadas por medio de FFF. Cuanto menor sea la altura de la capa, más suaves serán las transiciones entre las capas [36], lo que dará como resultado una superficie más lisa. Por tanto, ante una altura menor de capa se obtienen mejores resultados, pero el tiempo de impresión aumenta significativamente [37].

El tipo de **material** influye en la calidad superficial debido a la diferencia del filamento. Elementos realizados mediante filamento de PLA tienden a tener superficies más suaves y detalles más finos [38] debido a su buena adherencia entre capas y a su capacidad de enfriarse rápidamente. Mientras que, otros materiales, como el ABS, tienden a deformarse durante el enfriamiento, ya que este se produce de forma desigual [39], lo que puede generar irregularidades en la superficie. Además, filamentos compuestos, como los formados por fibra de carbono, pueden llegar a generar una superficie más rugosa [40].

La **velocidad de impresión** afecta directamente sobre el tiempo que tiene el material para depositarse y enfriarse adecuadamente, teniendo una gran influencia en el acabado de la pieza. Una velocidad de impresión más lenta permite una deposición más precisa y enfriamiento adecuado, lo que resulta en una mejor calidad superficial [41]. Una velocidad alta puede aumentar la generación de ondulaciones o irregularidades debido a la vibración de la impresora o la falta de enfriamiento lo que conlleva un peor acabado superficial.

La **geometría de la pieza** puede implicar un acabado superficial peor debido a una mayor complejidad geométrica. Las zonas curvas o inclinadas tienden a mostrar las marcas de las capas con más claridad [42], mientras que las superficies horizontales o verticales presentan un mejor acabado. Los ángulos y voladizos pueden generar imperfecciones o requerir estructuras de soporte, deteriorando dicho acabado una vez retiradas.

La **dirección de impresión** durante la impresión afecta en el acabado. En función de la orientación de la pieza durante la impresión afecta la suavidad de las superficies, generando orientaciones inclinadas mayor rugosidad debido a la dificultad de la impresora para mantener la deposición uniforme [43]. La orientación óptima varía según la geometría de la pieza, debiéndose considerar cuidadosamente para minimizar las marcas visibles de las capas.

- Mejora de la calidad superficial

En muchos casos, es necesario mejorar la calidad superficial de las piezas impresas en 3D para cumplir con los requisitos de diseño, como tolerancias dimensionales [44], el ajuste de ensamblaje o la resistencia al desgaste. Las irregularidades en la superficie pueden afectar el rendimiento de las piezas, especialmente en aplicaciones donde la precisión es crítica, como en la fabricación de componentes mecánicos o dispositivos médicos. Para alcanzar estas especificaciones, es común ajustar los parámetros de impresión, como reducir la altura de capa y la velocidad de impresión, lo que incrementa el tiempo de fabricación, pero mejora significativamente la resolución y suavidad de la superficie.

Sin embargo, a veces, los ajustes de impresión no son suficientes o son demasiado costosos en términos de tiempo, por lo que se recurre a operaciones de postprocesado [45]. Éstas incluyen técnicas como el suavizado químico, el mecanizado o el alisado térmico, que permiten mejorar el acabado superficial intentando no comprometer las propiedades mecánicas o la integridad estructural de las piezas sin aumentar excesivamente el tiempo de producción.

En la Figura 11 se muestran métodos de mejora de la calidad superficial de las piezas. Se observa que los métodos de postprocesado se dividen en cuatro grupos.

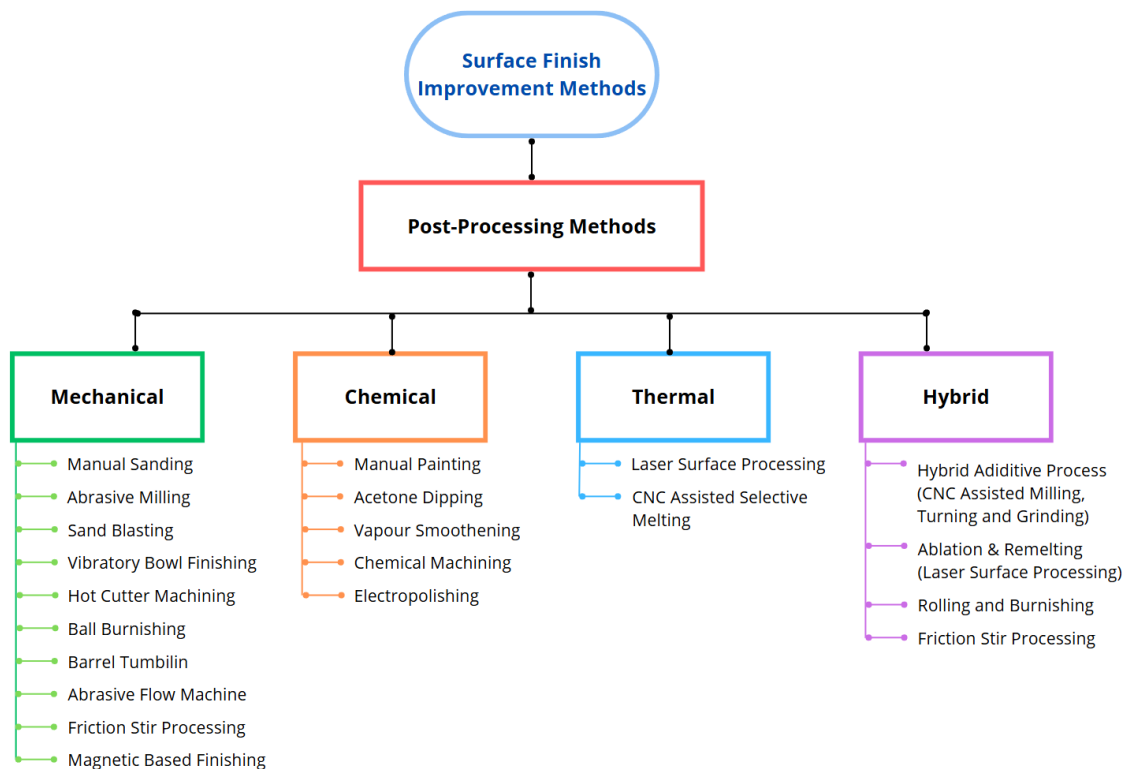


Figura 11. Métodos de mejora de la superficie final. [46]

- **Mecánico:** este proceso es común cuando se requieren tolerancias más estrictas o superficies lisas que la tecnología de fabricación aditiva no puede lograr directamente [47] o que para ello requeriría un tiempo de impresión elevado. Las técnicas de mecanizado pueden incluir fresado, torneado, rectificado o granallado.
- **Químico:** este proceso implica el uso de disolventes o productos químicos que suavizan la superficie de la pieza mejorando el acabado superficial [48]. Es una técnica no abrasiva que actúa sobre la capa externa de las piezas sin necesidad de retirar el material de manera mecánica[49].
- **Térmico:** es un proceso que utiliza el calor para mejorar las propiedades superficiales, estructurales y mecánicas de las piezas. A través de la aplicación de calor, se busca suavizar las capas, reducir tensiones internas o modificar las propiedades del material [50].
- **Híbrido:** se combinan técnicas mecánicas, térmicas y químicas con el objetivo de mejorar las propiedades superficiales [51], mecánicas y estructurales de las piezas. Estas técnicas buscan superar las limitaciones de los métodos tradicionales de postprocesado, logrando un acabado superficial superior y optimizando las propiedades funcionales de las piezas impresas.

3.2.3. Proceso de postprocesado mecánico

El postprocesado mecánico permite eliminar marcas de capa, ajustar tolerancias y optimizar el acabado, lo que resulta en piezas más precisas y con una mejor estética. Aunque puede ser más laborioso y requerir herramientas específicas, el postprocesado mecánico es fundamental, en algunos casos, para cumplir con los estándares de calidad en aplicaciones donde se exigen altas especificaciones.

Ventajas

1. **Mejora del acabado superficial:** el mecanizado permite eliminar las capas visibles en las superficies de las piezas impresas, que son características del proceso de FFF, dejando una superficie mucho más lisa.
2. **Mayor precisión dimensional:** aunque exista un avance en cuanto a la precisión de las impresoras 3D de FFF, el mecanizado puede corregir imperfecciones o desalineaciones en piezas que necesitan una exactitud dimensional más alta.
3. **Remoción de material en áreas específicas:** el mecanizado permite trabajar solo en áreas específicas de la pieza, mejorando detalles o eliminando imperfecciones que pueden haberse generado durante la impresión.
4. **Compatibilidad con diversos materiales:** el proceso de mecanizado es aplicable a la mayoría de los materiales utilizados en FFF, como PLA, ABS, PETG, y filamentos compuestos, ajustando los parámetros de corte según el material.

Desventajas

1. **Baja resistencia al calor:** algunos materiales como el PLA tienen un punto de fusión bajo, lo que puede generar deformaciones si se emplean altas velocidades en el mecanizado o si las herramientas generan demasiado calor.
2. **Estructuras internas:** las piezas obtenidas por FFF a menudo contienen estructuras internas con rellenos, lo que puede generar complicaciones durante el mecanizado si se perforan o si el material no es homogéneo.

Técnicas

Entre las técnicas de mecanizado se incluyen procesos como el torneado, el fresado, el lijado o el granallado. Al realizar un mecanizado, es posible obtener un acabado más uniforme y cumplir con estrictas tolerancias requeridas en aplicaciones industriales, convirtiendo las piezas impresas en componentes funcionales. A continuación, se desarrollan dos de estas técnicas.

3.2.3.1. Fresado

Las operaciones de fresado incluyen una variedad de procesos que permiten crear diferentes tipos de formas y acabados en la pieza de trabajo. Cada una de estas operaciones tiene un propósito específico en el mecanizado y se elige en función de las características geométricas y el acabado requerido [52]. En la Figura 12 se muestran las diferentes operaciones de fresado.

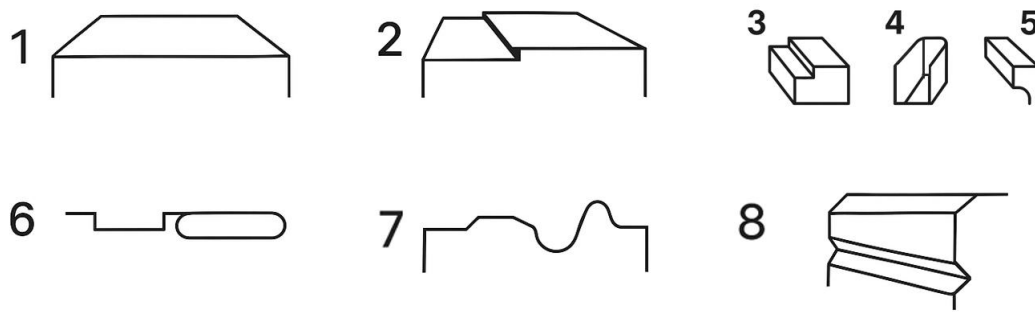


Figura 12. Tipos de fresado. [53]

1. Planeado: mecanizado de una superficie plana en la pieza: Se obtienen lisas y planas en piezas brutas o para preparar la pieza para operaciones adicionales.
2. Planeado en escuadra: Similar al plano, en este caso se generan caras en ángulo recto, superficies planas a 90 grados entre sí.
3. Escuadrado: se utiliza para dar forma a las esquinas de la pieza, logrando superficies planas y esquinas en ángulo recto.
4. Ranurado: mecanizado de ranuras o canales en la pieza, pudiendo ser de diferentes formas.
5. Canteado: consiste en mecanizar los bordes o cantos de la pieza eliminando rebabas y dando una terminación definida.
6. Alojamiento o vacíos: creación de cavidades o huecos en la pieza.
7. Copiados: en esta operación se reproduce un perfil o forma compleja en la pieza, a menudo siguiendo un patrón o plantilla.
8. Chaflanes: mecanizado de bordes en ángulo para crear biseles o chaflanes en aristas de la pieza [54].

- La máquina fresadora

La fresadora es una máquina herramienta encargada de realizar un mecanizado, donde la evacuación de la viruta se realiza mediante el movimiento rotativo de la herramienta. Por tanto, el movimiento principal de esta máquina es de rotación mientras que el movimiento de avance consiste en el desplazamiento lineal de la pieza (). Esta máquina se puede dividir en tres grandes grupos en función de la posición del eje: horizontales, verticales, o bien, mixtas.

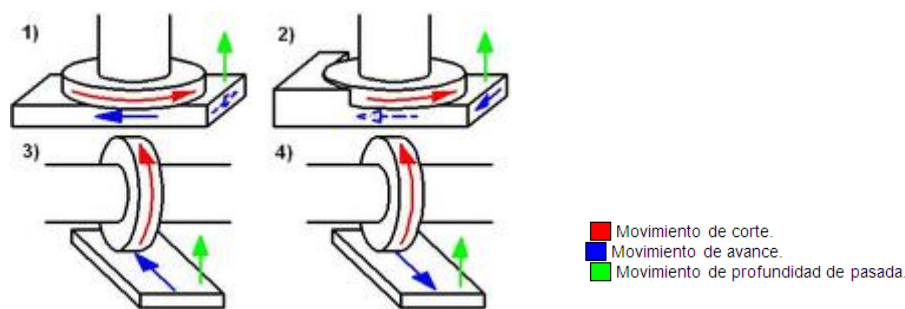


Figura 13. Dirección de los movimientos de la fresadora. [55]

- Herramienta de corte

Una fresa elimina de manera constante el material de la pieza en bruto en forma de viruta. La fresa corta por el perímetro debido a que presenta filo principal y secundario, lo que permite que corte en diferentes direcciones simultáneamente [56].

Aunque lo común es realizar operaciones de fresado sobre piezas de materiales metálicos, en la actualidad, debido al avance de las tecnologías, se han desarrollado fresas para mecanizado de polímeros [57] con el fin de fabricar tanto fresas como brocas que se adapten perfectamente al tipo de polímero que se vaya a mecanizar.

A la hora de elegir una herramienta para un proceso de mecanizado será necesario conocer el material de la pieza a mecanizar y el tipo de operación. Lo primero influirá en aspectos como el ángulo de la herramienta mientras que el segundo determinará la geometría de esta (Figura 14).



Figura 14. Tipos de fresa. [58]

3.2.3.2. Mecanizado por chorro abrasivo

Este proceso consiste en proyectar partículas abrasivas, como arena o perla de vidrio, sobre la superficie de una pieza impresa para eliminar impurezas, reducir la rugosidad superficial y mejorar la estética general del componente [59].

- **Mejora la calidad superficial:** este método ayuda a suavizar la superficie de la pieza, eliminando marcas de capa y otros defectos visibles.
- **Uniformidad:** proporciona un acabado uniforme en geometrías complejas, ya que las partículas abrasivas pueden alcanzar áreas difíciles.
- **Aumento de la resistencia:** puede mejorar la resistencia a la fatiga y a la corrosión de la pieza, dependiendo del material y del tipo de granallado utilizado.

En el proceso de mecanizado por chorro abrasivo se utilizan diferentes tipos de partículas abrasivas, cada una con características específicas que las hacen adecuadas para distintos tipos de materiales y aplicaciones. La selección de la partícula adecuada depende del material de la pieza a tratar, el acabado deseado y la aplicación específica. Algunas de las partículas usadas son las siguientes:

- Arenas naturales: compuestas principalmente de sílice, estas arenas son las más tradicionales y ampliamente utilizadas. Son adecuadas para el desbarbado y limpieza de superficies metálicas y no metálicas.
- Perlas de vidrio: esferas de vidrio que son menos abrasivas que la arena. Usadas para acabados más suaves y menos agresivos, ideales para componentes que requieren un acabado más delicado.
- Granos de Carburo de silicio: un abrasivo duro con una alta capacidad de corte. Utilizado en materiales difíciles de mecanizar, como algunos plásticos y cerámicas.
- Perlas de cerámica: hechas de cerámica, estas perlas son utilizadas para aplicaciones de acabado que requieren menos agresividad. A menudo se emplean en el tratamiento de componentes plásticos y en acabados finales.

3.2.4. Proceso de postprocesado químico

El postprocesado químico funciona mediante la aplicación de solventes o vapores que reaccionan con la superficie del polímero, disolviendo una pequeña capa de material y suavizándolo al redistribuirlo antes de que vuelva a solidificarse. Este proceso es particularmente eficaz en materiales termoplásticos como ABS o ASA, que reaccionan bien a ciertos solventes [60].

Ventajas

1. **Mejora del acabado superficial:** el principal objetivo del postprocesado químico es eliminar la rugosidad generada por la impresión por capas, logrando superficies lisas y homogéneas que se asemejan a las piezas inyectadas.
2. **Preservación de detalles geométricos:** a diferencia de los métodos mecánicos, el postprocesado químico suaviza la superficie sin perder muchos detalles geométricos [61], lo que es beneficioso para piezas con geometrías complejas o delicadas.
3. **Proceso automatizado:** puede realizarse mediante técnicas como el alisado por vapor, donde la pieza se expone a vapor de solvente en un ambiente controlado, lo que permite procesar múltiples piezas a la vez [62] y es menos laborioso que el mecanizado.
4. **Adaptación a geometrías complejas:** como el solvente actúa de manera uniforme en la superficie, es ideal para postprocesar piezas con geometrías intrincadas, cavidades o detalles difíciles de alcanzar con herramientas mecánicas [63].

Desventajas

1. **Limitaciones de material:** no todos los materiales impresos mediante FFF son adecuados para el postprocesado químico. El ABS, ASA y HIPS son los más compatibles, mientras que materiales como PLA, PETG o nylon no reaccionan bien a los solventes convencionales [64].
2. **Posibles deformaciones:** si el proceso no se controla adecuadamente, se puede afectar la geometría de la pieza [65], especialmente en zonas finas o delicadas, donde el material puede disolverse de forma excesiva.
3. **Consideraciones de seguridad:** los solventes utilizados, como la acetona o el cloruro de metileno, pueden ser peligrosos para la salud si no se manejan correctamente. Se deben tomar precauciones al trabajar en entornos bien ventilados y con equipos de protección adecuados [66].

Técnicas

Existen tres técnicas principales de postprocesado químico que se emplean para mejorar la calidad superficial el alisado por vapor, el baño químico [67] y la aplicación directa de solvente [68]. Estas técnicas se explican a continuación.

1. **Alisado por vapor:** esta es la técnica más utilizada para piezas impresas en 3D. Consiste en exponer la pieza a vapores de un solvente controlado en una cámara sellada. El vapor disuelve la superficie del material y, una vez evaporado, la superficie se endurece de nuevo, dejando un acabado liso. Es común para ABS y acetona.
2. **Baño químico:** en esta técnica, la pieza se sumerge brevemente en un solvente líquido, lo que provoca un alisado rápido. Sin embargo, es más difícil de controlar y puede ocasionar deformaciones al gestionar adecuadamente el tiempo de inmersión.
3. **Aplicación directa de solvente:** en este método, el solvente se aplica manualmente con un pincel o un paño sobre la superficie de la pieza. Aunque este método es menos uniforme, puede ser útil para piezas pequeñas o áreas específicas que necesitan acabado superficial.

- Acetona

La acetona es un solvente orgánico altamente volátil y efectivo, utilizado comúnmente para el postprocesado químico de piezas impresas en 3D, especialmente de materiales como el ABS y ASA como se ha comentado anteriormente. Dependiendo de cómo se aplica, la acetona puede actuar en su estado líquido o como vapor.

El vapor de acetona ofrece un mayor control y precisión sobre el suavizado de la superficie, lo que lo convierte en la opción preferida para geometrías más complejas o detalladas [69]. En adición, el suavizado por vapor tiende a producir un acabado más uniforme en toda la pieza. Además, el método de vapor tiende a ser más seguro en términos de aplicación, ya que la pieza no está directamente sumergida en el solvente.

3.3. Estado del arte

En este apartado se presentarán los estudios y artículos previos que se han utilizado como base para iniciar la investigación. Estos se centran en el postprocesado de piezas obtenidas por fabricación aditiva, en concreto, en los procesos de mecanizado, en específico el fresado y el granallado y en el uso de procesos químicos. Sobre este último, también se destacan artículos en cuanto a su influencia sobre la hidrofobia.

Con el fin de mejorar el acabado superficial de piezas de ABS y PLA obtenidas por FFF existen varios estudios que emplean el mecanizado para alcanzar dicho fin. El artículo escrito por U. M. Dilberoglu et al. [70] se centra en el proceso de fresado aplicado a dichas piezas con el fin de identificar las variables clave que contribuyen a la obtención de superficies lisas y establecer tendencias relacionadas con parámetros específicos.

Los resultados muestran como existe una mejora en la calidad superficial de las piezas tratadas. Ante un avance menor se obtiene una mejor calidad superficial. Además, el uso de refrigerantes o lubricantes se ha demostrado que ayuda a controlar la temperatura mejorando la evacuación de virutas.

Para lograr mejores calidades superficiales en las piezas es fundamental optimizar el proceso de mecanizado. Esto conllevará a una mejora en la rugosidad superficial y una mayor eficiencia en el proceso de mecanizado. Los parámetros óptimos en el caso del torneado de piezas de ABS obtenidas por FFF [71] son velocidad de corte 200 m/min, velocidad de avance 0.8 mm/rev y profundidad de corte 1.5 mm. En estas condiciones se obtuvo una rugosidad superficial de 0.69 μm .

El acabado superficial depende también de la orientación del filamento durante la impresión de las piezas causando una morfología anisotrópica [72]. Esto supone una limitación significativa demostrando que, con el fin de cumplir los requisitos de diseño, es indispensable llevar a cabo algún tipo de operación de acabado. En el caso de este estudio se realizó una operación de fresado de la que se obtuvieron mejoras en cuanto a la superficie de las piezas de ABS.

Sobre materiales poliméricos también se han realizado operaciones de taladrado realizando estudios sobre el desgaste de la herramienta [73] o bien sobre la mejora de este proceso optimizando los parámetros de corte [74]. Del primer estudio se obtiene que los parámetros más influyentes son la velocidad de avance y el ángulo de la punta del taladro. Ante una mayor velocidad de avance y un menor ángulo de la punta se reduce el desgaste.

En el segundo artículo se analizan cómo los parámetros de corte afectan sobre las propiedades mecánicas y la precisión de los agujeros sobre materiales compuestos con fibra de vidrio y carbono. Los hallazgos de este estudio indican que tanto la velocidad de corte como la de avance afectan directamente a la calidad del mecanizado, a mayor velocidad de avance, peor calidad superficial, lo contrario sucede con la velocidad de corte. Por otro lado, frente a diferentes tipos de materiales se obtuvieron resultados parecidos, siendo este parámetro menos influyente.

Con el fin de estudiar la maquinabilidad de los compuestos reforzados con fibras de carbono también se llevan a cabo operaciones de mecanizado [75]. En este estudio se concluye que la fibra afecta sobre esta propiedad, de forma que en función de la orientación de las fibras varía la viruta y, por ende, la apariencia de la superficie. En cuanto a la rugosidad se obtiene que una mayor velocidad de avance puede resultar en una superficie más rugosa, mientras que un radio de corte más pequeño puede mejorar la suavidad de la superficie.

En su estudio L. Riva et al. [76] investigan el proceso de acabado superficial de piezas de ABS fabricadas mediante FFF utilizando un baño de acetona fría. Concluyen que, tras la inmersión de las piezas en acetona, es posible reducir la rugosidad de la superficie en un 97% empleando tiempos de tratamiento de 60 segundos. Consiguieron alcanzar un acabado superficial de aproximadamente 1 μm .

Del estudio anterior también destacan la estabilidad del proceso de postprocesado de las piezas. Tras 60 segundos de tratamiento el proceso se vuelve estable y repetible, pudiéndose controlar efectivamente la calidad del acabado.

Al tratar piezas obtenidas por fabricación aditiva se estudió la influencia de la orientación de impresión en cuanto a resultados finales. Demostrando que existe una variación en el acabado superficial en función de la orientación de impresión.

La acetona empleada para el estudio fue tanto nueva como reutilizada, no encontrando diferencias significativas en los resultados ante el uso de ambas. Esto sugiere que el proceso es económicamente viable y sostenible desde un punto de vista industrial.

Otro estudio sobre la mejora superficial mediante la acetona es el llevado a cabo por A. Colpani [77]. En este caso las piezas no son sometidas a un baño de acetona, sino que el tratamiento es realizado mediante vapores fríos de acetona. En su investigación exponen a las piezas de dos formas ante el vapor. Además, elaboro un mapa del proceso con el fin de correlacionar la rugosidad inicial de la pieza, el acabado superficial alcanzable y el tiempo de tratamiento.

Al igual que en el estudio anterior se obtienen mejoras en la superficie en esta ocasión se logra una disminución de hasta el 98% en la rugosidad inicial de las piezas sometidas al tratamiento.

En la investigación realizada por A. Colpani, se utilizan dos configuraciones distintas para el tratamiento de las piezas. En ambas configuraciones las piezas con forma de paralelepípedo se colocan con su cara de mayor área paralelo al suelo, la diferencia reside en la orientación de la cara de menor área que, en la configuración a la que han llamado "Backward" (al revés), se coloca en perpendicular a la zona de exposición mientras que la segunda configuración llamada "Facing" (de frente), se coloca dicha cara de forma paralela.

Los resultados obtenidos muestran como la primera configuración muestra mejores resultados en cuanto a rugosidad final y uniformidad, mientras que la segunda presenta una reducción de la rugosidad de forma gradual durante el tiempo de tratamiento, en concreto cuando la rugosidad inicial era mayor.

Otro estudio en el que se emplea el vapor de acetona como postprocesado de piezas de ABS es el realizado por F. B. J. Aguilar [78]. En este caso se analizan también las propiedades mecánicas además del acabado superficial. Mediante el tratamiento con vapor de acetona mejora de forma significativa tanto las propiedades mecánicas como las estéticas, se observaron mejoras en la suavidad de la superficie, la rigidez y la resistencia a tracción, existe igualmente un aumento en el brillo de las piezas.

Tanto el fresado de las piezas como el baño de acetona resultan efectivos a la hora de mejorar la calidad superficial. Ante la aplicación de ambas técnicas de postprocesado se obtienen mejores resultados con el tratamiento químico [79].

Aunque el tratamiento con acetona es capaz de ofrecer beneficios en términos de reducción de la absorción de agua a ciertas concentraciones [80], también puede comprometer la estabilidad y propiedades mecánicas del ABS. Del estudio realizado variando la concentración de acetona se obtiene que, al emplear soluciones con una concentración como del 80% la acetona afecta en la geometría, conlleva a una disminución en la estabilidad dimensional que puede deberse a la disolución parcial de la superficie de las piezas.

El mecanizado por chorro abrasivo es otro proceso aplicable a las piezas con el fin de mejorar la calidad superficial. En el artículo desarrollado por A. p. Valerga puerta et al. [81] se comenta como mediante este método es posible lograr mejoras significativas en la rugosidad superficial para el caso de piezas de PLA con un chorro de arena. Los resultados obtenidos son mejoras de hasta el 77% en la rugosidad aritmética media (Ra) y del 70% en la altura total del perfil (Rt) sin efectos adversos en las piezas tratadas.

De los resultados también se destaca la mejora de la rugosidad a medida que disminuye la presión y aumenta el tiempo de exposición. Además, se observa una tendencia cuadrática en la relación entre Ra y el tiempo de exposición.

En comparación con otros métodos se comenta que, aunque otros métodos de postprocesamiento pueden ofrecer mejoras mayores, como en el caso de tratamiento químico, el chorro de arena es más seguro, menos costoso y tiene un menor impacto ambiental.

En el estudio realizado por Shipway p. y Weston D. [82] se estudia el aumento de la temperatura en los polímeros al ser sometidos a mecanizados por chorro abrasivo debido a su baja conductividad térmica, lo que conlleva una diferencia considerable entre la superficie y el interior del material. En el caso de los metales, no se muestra un aumento tan significativo lo que podría suponer un menor efecto del proceso.

En cuanto a la calidad del acabado superficial después del chorro de partículas se destaca la dependencia de la velocidad de impacto, del tipo de material de las piezas y de la naturaleza de las partículas.



4. Metodología

En este apartado se desarrolla la metodología seguida en este trabajo de fin de grado. La metodología consta de 4 pasos estructurados a seguir con el fin de conseguir los objetivos nombrados en apartados anteriores. En la Figura 15 se observa el diagrama de flujo de la metodología empleada.

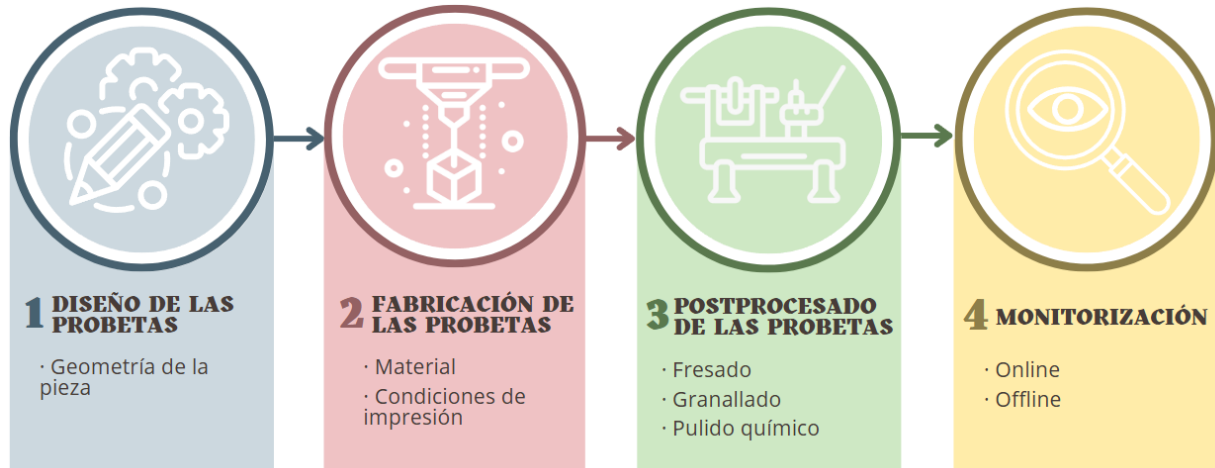


Figura 15. Diagrama de flujo de la metodología.

A continuación, se desarrollarán los cuatro pasos de la metodología con mayor detalle en subapartados.

4.1. Diseño de las probetas

El primer paso de la metodología es diseñar la probeta. Inicialmente se definen los parámetros geométricos, a pieza tendrá forma de paralelepípedo cuya base cuadrada será de 27 mm de longitud y la altura de 10 mm. Se emplea el mismo tamaño de probeta para los tres tipos de postprocesado.

El software empleado para el diseño es SolidWorks. Una vez realizado el modelo de la probeta se genera un archivo .stl, el cual será utilizado para llevar a cabo la impresión. En la Figura 16 se muestra una imagen del modelo de la probeta.

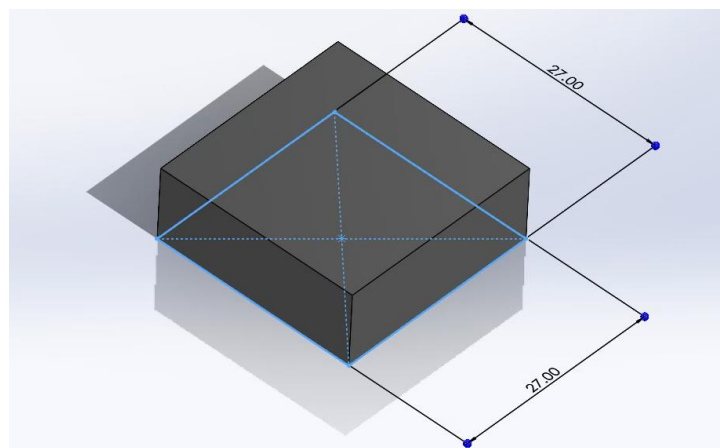


Figura 16. Probeta diseñada en "SolidWorks"

4.2. Fabricación de las probetas

En segundo lugar, se procede a la fabricación de las probetas mediante fabricación aditiva por extrusión de material. Para ello se utiliza el equipo de la marca Raise 3D modelo Pro2 (Figura 17), localizada en el taller 25 perteneciente al Área de ingeniería de los procesos de Fabricación de la universidad de Málaga.



Figura 17. Impresora RAISE 3D Pro2.

Para empezar la impresión es necesario un archivo que determine los pasos necesarios a seguir por la impresora. El software “IdeaMaker”, proporcionado por el fabricante del equipo, es el encargado de crear el código de impresión y el laminado a partir del archivo .stl. Además, el software permite conocer el tiempo de impresión y la cantidad de material necesario. En la Figura 18 se muestra una imagen del proceso de impresión.

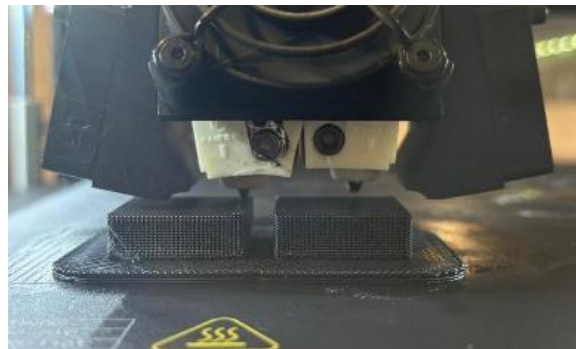


Figura 18. Proceso de impresión.

4.2.1. Material

Las probetas de este trabajo serán del polímero ABS. Este material proviene en forma de filamento de 1.75mm de diámetro enrollado en una bobina. El material disponible en dicha bobina es 1 kilogramo, excluyendo el soporte de plástico y la bolsa que la contiene. En adición, e dicha bobina aparecen los parámetros de impresión recomendados este material.



Figura 19. Bobina de filamento de ABS.

4.2.2. Condiciones de impresión

Siguiendo los parámetros recomendados por el fabricante del material se establecen las condiciones de impresión para las probetas. Dichos parámetros vienen recogidos en la Tabla 1. La orientación de las piezas como se puede ver en la es posicionando el lado cuadrado sobre la cama de impresión dando una mayor superficie de apoyo y, por tanto, facilitando la impresión.

Tabla 1. Condiciones de impresión.

Condiciones de impresión	
Parámetro	Valor
Temperatura de extrusión	210 °C
Temperatura de la cama	80 °C
Velocidad de extrusión	50 mm/s
Altura de capa	0,3 mm
Flujo de relleno	100%
Densidad de relleno	100%
Patrón de relleno	Líneas
Soporte	Ninguno
Plataforma	Balsa

La altura de capa se ha establecido en 0,3 mm, un valor que, si bien proporciona una menor calidad superficial respecto a capas más finas, permite reducir significativamente el tiempo de impresión. De este modo, se busca que las operaciones de postprocesado mejoren la calidad superficial obtenida, alcanzando niveles de rugosidad comparables a los de una impresión con menor altura de capa, peor en un tiempo total de fabricación más reducido.

Para contextualizar, una probeta impresa con una altura de capa de 0,1 mm y bajo las mismas condiciones requiere un tiempo de 1 hora, 21 minutos y 6 segundos. En cambio, la probeta con altura de capa de 0,3 mm se imprime en tan solo 33 minutos y 6 segundos. Esta diferencia evidencia el potencial del postprocesado como estrategia para optimizar la productividad alcanzando calidades superficiales parecidas.

Como se ha comentado anteriormente, con la ayuda del software “IdeaMaker”, el archivo .stl y las condiciones de impresión anteriores se realiza el laminado de la pieza además del código de impresión. Obteniéndose un archivo gcode compatible con la impresora la cual ejecutará los pasos dando como resultado las probetas. El material necesario para realizar una probeta en estas condiciones es 10 gramos y el tiempo es, como se ha comentado anteriormente, de 33 minutos y 6 segundos. En la Figura 20 se observa una imagen del laminado de cuatro probetas mediante dicho software.

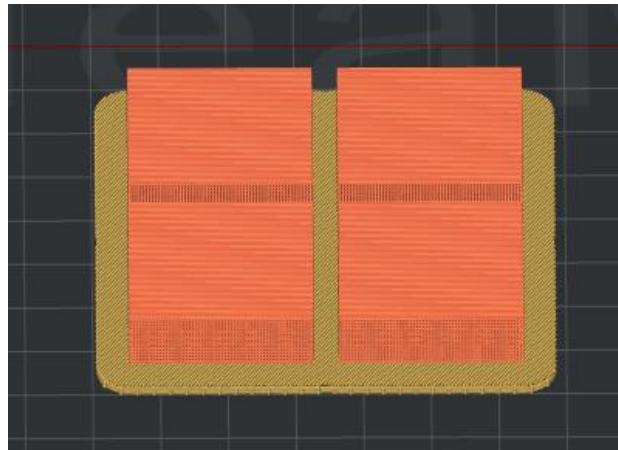


Figura 20. Laminación probetas en el IdeaMaker.

Con el fin de obtener una buena geometría en las piezas se ha hecho uso del pegamento para la fijación de filamento a la cama de impresión *3DLAC PLUS* (Figura 21), con ello se pretende evitar el warping, fenómeno mencionado anteriormente en este trabajo de fin de grado.



Figura 21. Pegamento 3DLAC PLUS.

4.3. Postprocesado de las probetas

Como se observa en la Figura 15, se realizarán tres postprocesados para este trabajo de Fin de Grado. Estos son dos procesos mecánicos el fresado y el granallado y, finalmente el pulido químico con vapores de acetona.

4.3.1. Fresado

El primer proceso de mejora superficial que se llevó a cabo fue el fresado, realizado mediante un equipo de control numérico computacional (CNC). Inicialmente se decide estudiar el efecto del empañe, la velocidad de corte y la velocidad de avance, además de realizar el proceso en concordancia y en oposición. La fresadora empleada se trata de la Lagun L 650 (Figura 22), en la que se encuentra, en el lado derecho, el centro de control donde se establece el código de la operación, además de los botones necesarios para un correcto funcionamiento incluyendo uno de color rojo que permite parar el proceso en caso de emergencia. La zona de trabajo se encuentra en el interior y está dividida en dos partes, a la izquierda se encuentra el carrusel para las herramientas mientras que en el centro la mesa de trabajo y el cabezal.



Figura 22. Fresadora Lagun L650.

Antes de comenzar con la operación de mecanizado, realizada mediante la fresadora, se realiza la puesta a punto, por lo que se eligen los parámetros de corte, se introduce el código en el equipo y se colocan tanto la pieza como la cámara termográfica para realizar la monitorización online.

Parámetros de corte

Se establecen los parámetros de corte definitivos para cada operación, lo que permite determinar con precisión el número de probetas necesarias para realizar el mecanizado y bajo qué condiciones específicas se llevará a cabo el proceso.

Las variables consideradas, tal y como se ha comentado anteriormente, son: el porcentaje de empañe, la velocidad de corte, la velocidad de avance y el sentido de la herramienta. Esta última variable es relevante ya que determinará si el mecanizado se hace en concordancia o en oposición, lo que puede influir notablemente en el acabado superficial de la pieza mecanizada.

El empañe será del 50%, 75% y del 100%. La velocidad de corte tomará los valores de 8000 rev/min, 9000 rev/min y 10000 rev/min. Finalmente, la velocidad de avance será de 0,10 mm/rev, 0,15 mm/rev y 0,20 mm/rev. En cuanto al sentido de la herramienta, se decide que se mecanice en oposición para empañes del 50% y 75%, mientras que, para el caso del empañe del 100% se realizará en ambos sentidos ya que un lado de la pieza estará en concordancia y el otro en oposición. En la Tabla 2 se muestran las 27 operaciones a realizar.

Tabla 2. Parámetros de corte.

Parámetros de mecanizado				
Operación	Empañe (%)	Velocidad de corte (rev/min)	Velocidad de avance (mm/rev)	Sentido
1	50	8000	0,10	Oposición
2	50	8000	0,15	Oposición
3	50	8000	0,20	Oposición
4	50	9000	0,10	Oposición
5	50	9000	0,15	Oposición
6	50	9000	0,20	Oposición
7	50	10000	0,10	Oposición
8	50	10000	0,15	Oposición
9	50	10000	0,20	Oposición
10	75	8000	0,10	Oposición
11	75	8000	0,15	Oposición
12	75	8000	0,20	Oposición
13	75	9000	0,10	Oposición
14	75	9000	0,15	Oposición
15	75	9000	0,20	Oposición
16	75	10000	0,10	Oposición
17	75	10000	0,15	Oposición
18	75	10000	0,20	Oposición
19	100	8000	0,10	Ambas
20	100	8000	0,15	Ambas
21	100	8000	0,20	Ambas
22	100	9000	0,10	Ambas
23	100	9000	0,15	Ambas
24	100	9000	0,20	Ambas
25	100	10000	0,10	Ambas
26	100	10000	0,15	Ambas
27	100	10000	0,20	Ambas

Con el fin de reducir el gasto de decide que en la misma pieza se mecanizará por un lado a empañe 50% y por el otro a 75%, mientras que en el caso del empañe del 100% se hará una ranura y en una pasada se obtendrán resultados en concordancia y oposición, como se ha comentado anteriormente. Por tanto, se necesitarán un total de 18 probetas.

Inicialmente se decide realizar los mecanizados en concordancia, finalmente, como se explicará en apartados posteriores, estos procesos no se llevaron a cabo debido a la delaminación de la pieza al mecanizarla en dicho sentido.

Colocación de la herramienta

La herramienta empleada en este trabajo de fin de grado es la “FRESA 2L/ DIN 327 HSS Ø 12 mm” del fabricante Bluemaster Celesa. Se trata de una fresa de dos labios de 12 mm de diámetro donde se distinguen dos partes. En la Figura 23 se observa la herramienta a la derecha y su envase de plástico a la izquierda.



Figura 23. Herramienta empleada para el mecanizado.

Como se observa en la imagen anterior, la herramienta está dividida en dos partes bien diferenciadas, por un lado, la zona de corte, donde están los dos labios, y el mango, que consta de un plano Weldon, con el fin de que la herramienta esté correctamente sujeta al soporte como sería el caso de la Figura 24.



Figura 24. Herramienta colocada en el soporte.

Colocación de la probeta

Un paso muy importante en el proceso es la colocación de la probeta. Para ello se hace uso de una mordaza (Figura 25), de forma que se coloca la pieza entre la mordaza fija y la mordaza móvil con la ayuda de la manivela. Es importante que la pieza quede bien sujeta, pero sin aplicar fuerza de más, lo que afectaría en la forma de la pieza debido a la posible deformación y, por tanto, afectaría en los resultados y en el proceso de mecanizado.



Figura 25. Mordaza de fresadora.

Una vez sujeta, se emplea un palpador (Figura 26), colocado en el carrusel de la fresa, para determinar el cero de la pieza. Paso muy importante ya que el código CNC tomará como punto de referencia dicho punto.



Figura 26. Palpador de fresadora.

Proceso

Una vez realizada la puesta a punto se procede a realizar el mecanizado. Para ello es necesario el código de control numérico. Se crearán dos códigos principales a los que se les variarán los parámetros de corte tras cada proceso, para realizar las operaciones enumeradas anteriormente en la Tabla 2.

En primer lugar, se realizan las operaciones en oposición para empañes del 50% y 75%. Empezando por las velocidades anteriores y aumentando tras cada proceso la velocidad de avance y una vez llegado a la velocidad de avance máxima elegida, se aumenta la velocidad de corte y empezando con la velocidad de avance mínima, repitiendo así el proceso con el fin de realizar todas las operaciones. En la Figura 27 se observa el código para el primer mecanizado en oposición.

```
1 G90 G95 G97
2 S8000 F0.1
3 T14D1
4 M06
5 M03
6 G0Z50
7 X-12 Y40
8 Z5
9 G1 Z-3
10 G1 G42 X6 Y35
11 G1 Y-15
12 X18
13 Y40
14 G0 Z100
15 X-80 Y380
16 M30
```

Figura 27. Código CNC en oposición.

Finalmente, se realizan las operaciones de fresado con un empañe del 100%. Como se ha mencionado anteriormente, no es necesario realizar las operaciones en concordancia y en oposición ya que, la herramienta en cada uno de los lados irá en una dirección distinta. En la Figura 28 se observa el código CNC empleado para realizar el primer mecanizado con un empañe del 100%.

```
1 G90 G95 G97
2 S8000 F0.1
3 T14D1
4 M06
5 M03
6 G0Z50
7 X-15 Y-15
8 Z5
9 G1 Z-3
10 G1 X13.5
11 Y42
12 G0Z100
13 X-80 Y380
14 M30
```

Figura 28. Código CNC fresado empañe del 100%.

Una vez obtenidas las 18 probetas mecanizadas se analizaron y se obtuvieron resultados de su acabado superficial.

4.3.2. Mecanizado por chorro abrasivo

La segunda operación de postprocesado empleada sobre las probetas es el mecanizado por chorro abrasivo. Este proceso se lleva a cabo en la estación de mecanizado por chorro abrasivo situada en el taller 25 perteneciente al Área de ingeniería de los procesos de Fabricación de la universidad de Málaga. En la Figura 29 se observa una imagen de dicha estación.



Figura 29. Estación de mecanizado por chorro abrasivo.

Como se puede apreciar en la imagen, la estación consiste en una cabina, donde se realizan las operaciones. Dicha cabina está sobre unas patas que permiten el desplazamiento de esta, además de una mejor visibilidad del interior. A cada uno de los lados de la cabina se encuentran el regulador de presión y la caja de control eléctrico.



Figura 30. Regulador de presión.



Figura 31. Caja de control eléctrico.

El regulador de presión será empleado durante los ensayos para controlar la presión del aire en cada una de las operaciones. Por otro lado, la caja de control eléctrico nos permite dar corriente a la estación, encender la luz del interior de la cabina y tener conocimiento de que se cumplen las medidas de seguridad.

En el interior de la cabina (Figura 32) se observan los guantes de seguridad y la pistola de aire comprimido con boquilla cerámica de 5 mm de diámetro. A dicha pistola van conectadas dos mangueras, una corresponde con la del aire comprimido y la otra va conectada al tanque donde se encuentra el material.



Figura 32. Interior de la cabina.

En la imagen se observa como en el interior de la cabina se encuentra una rejilla metálica que hace de soporte, además, tiene esta geometría ya que, el depósito de material se encuentra debajo de esta, en la zona inferior de la cabina. Por tanto, se reduce el desperdicio de material.

Proceso

En primer lugar, se establecen las condiciones y los parámetros del proceso. El material abrasivo empleado en esta operación de postprocesado son las esferas de vidrio. La elección de este material se debe a que es menos abrasivo que el chorro de arena, permitiéndonos alcanzar mejores resultados en la superficie de las piezas a tratar.



Figura 33. Microesferas de vidrio. [83]

Se decide realizar 9 ensayos variando únicamente la presión del aire. Se escogen tres presiones del aire y se realizan tres ensayos para cada una de ellas. Las presiones escogidas son 6 bar, 7 bar y 8 bar. Además de determinar la presión se establecieron otros parámetros como la distancia de la pistola a la pieza o el ángulo que forma la pistola con la horizontal y el tiempo de duración del ensayo. La distancia determinada es de 2 cm, mientras que el ángulo formado entre la pistola y la horizontal se establece en 30°. Por otra parte, el tiempo de duración será de 30 segundos por ensayo. En la se puede observar la colocación de los elementos justo antes de comenzar la operación.



Figura 34. Colocación para el proceso de mecanizado por chorro abrasivo.

4.3.3. Pulido químico

El tercer postprocesado es el pulido químico con vapores de acetona [84]. Este proceso consiste en someter a las probetas a los vapores de la acetona con el fin de mejorar su calidad superficial. Para ello, se necesitan los siguientes elementos:

- Recipiente de cristal: se trata del recipiente en el que se llevará a cabo el proceso (Figura 35). Este elemento permite observar su interior por lo que facilita el proceso ya que se puede observar su estado en cualquier momento.



Figura 35. Recipiente de cristal.

- Soporte metálico: las probetas serán colocadas en el interior del recipiente, pero para que estas no estén en contacto directo con la acetona se hace uso de los soportes metálicos (Figura 36).



Figura 36. Soportes metálicos.[85]

- Acetona: el producto químico empleado en el proceso es la acetona, específicamente la acetona pura de la marca MPL (Figura 37).



Figura 37. Acetona.

El proceso consiste en verter 200 ml de acetona dentro del recipiente de cristal y posteriormente añadir las probetas, se introducirán tres probetas en cada ensayo. Con el fin de que las probetas no estén en contacto directo con el producto químico, se hace uso de soportes metálicos sobre los cuales se colocarán las probetas, como se ha comentado con anterioridad. Una vez estén las probetas dentro, se cierra el recipiente de cristal. Durante el proceso la tapa del recipiente se levantaba debido a los vapores por ello se decidió asegurar la tapa con cinta americana.

El tiempo del proceso es de una, dos y tres horas de exposición. Una vez finalizado el tiempo se procede a retirar las probetas con cuidado ya que el vapor de la acetona es tóxico. Las probetas se dejan secando hasta que lo estén completamente. Una vez secas se procede a la monitorización de las nueve probetas.

4.4. Monitorización

El cuarto paso de la metodología consiste en monitorizar cada uno de los procesos de forma que se obtienen resultados de cada uno de ellos. De las tres operaciones de postprocesado, únicamente en la operación de fresado se realiza monitorización online además de offline.

4.4.1. Online

El parámetro medido durante la operación de fresado se trata de la temperatura. Para ello se ha empleado la cámara termográfica de la marca FLIR modelo A6570 MWIR (Figura 38). Para la colocación de ésta se ha hecho uso de un trípode que se colocó a 2 metros de la estación de fresado.



Figura 38. Cámara termográfica FLIR. [86]

La cámara termográfica se utiliza mediante el software FLIR ReasearchIR Max. Mediante este software se determinan ciertos parámetros para obtener de forma precisa las medidas de temperatura. Gracias a él se puede realizar un buen enfoque de la cámara, lo que nos permitirá captar mejor el proceso.

El siguiente paso consiste en configurar los parámetros específicos por lo que se selecciona que el rango de trabajo se encontrará entre los 20° y los 120°. Existe la posibilidad de añadir un filtro a la cámara cuando las temperaturas a registrar superan los 300°, por lo que en este caso no será necesario. La cámara se configura también con la opción “superframing” lo que supone las imágenes que serán tomadas por segundo, al seleccionar una frecuencia de 15 Hz se impone que estas se tomen cada 15 segundos.

En adición a los parámetros anteriores, es necesario determinar algunos adicionales expuestos en la Tabla 3 como la emisividad del material, o bien, la distancia de la cámara a la fresadora.

Tabla 3. Parámetros cámara termográfica.

Condiciones cámara termográfica	
Parámetro	Valor
Emisividad	0,9
Distancia de la cámara a la fresadora	2,5 metros
Temperatura reflejada	20 °C
Temperatura emitida	20 °C
Humedad relativa	30%

Tras la configuración del dispositivo se procede a la toma de datos. Del proceso se obtiene un vídeo realizado por la cámara dónde se observan las temperaturas alcanzadas diferenciándose en función del color. Por otra parte, se obtiene una gráfica de datos con los valores tomados, en este caso se pretende trabajar con los valores máximos de cada fotograma para analizarlos posteriormente.

4.4.2. Offline

Tras las operaciones de postprocesado se deciden realizar las mediciones macro y microgeométricas. El proceso seguido se detalla en los siguientes apartados.

4.4.2.1. Mediciones macrogeométricas

Inicialmente se deciden tomar las mediciones macrogeométricas, estas se realizan mediante el microscopio estereoscópico de la marca Zeiss el cual también incorpora una cámara de la misma marca modelo Axiocam 208 color (Figura 39) que permite obtener conectarse al ordenador y obtener imágenes.



Figura 39. Microscopio y cámara de la marca Zeiss. [87], [88]

Para tomar las fotografías se dispone la probeta en la base, después se determina el aumento con el que se van a tomar las imágenes, en el caso de este trabajo se ha escogido el zoom de 25x y 8x. Con la ayuda del software de la misma marca que los dispositivos se consigue una mejor resolución de las superficies a nivel macrogeométrico. En la Figura 40 se muestra un ejemplo de una imagen tomada por el dispositivo.

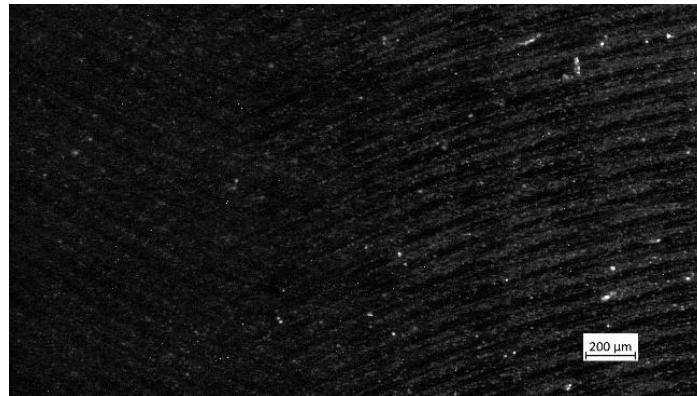


Figura 40. Imagen obtenida del microscopio.

4.4.2.2. Mediciones microgeométricas

La rugosidad superficial constituye un parámetro clave en el presente trabajo de fin de grado. Para su evaluación, se empleó el microscopio modelo InfiniteFocus SL de la marca Alicona (Figura 41) junto con el software de la misma marca.



Figura 41. Alicona modelo infinite focus SL. [89]

El microscopio nos permite obtener los parámetros microgeométricos de zonas específicas de las superficies de las probetas. Principalmente se emplea para tomar muestras de 2 mm², aunque es posible realizar las mediciones sobre tramos mayores.

El primer paso supone colocar las probetas sobre la base de la Alicona, en este caso se ha hecho uso de un bloque para facilitar el proceso, sobre todo en los casos en los que era necesario medir la rugosidad en los planos perpendiculares. En la se observan los posicionamientos de las probetas.

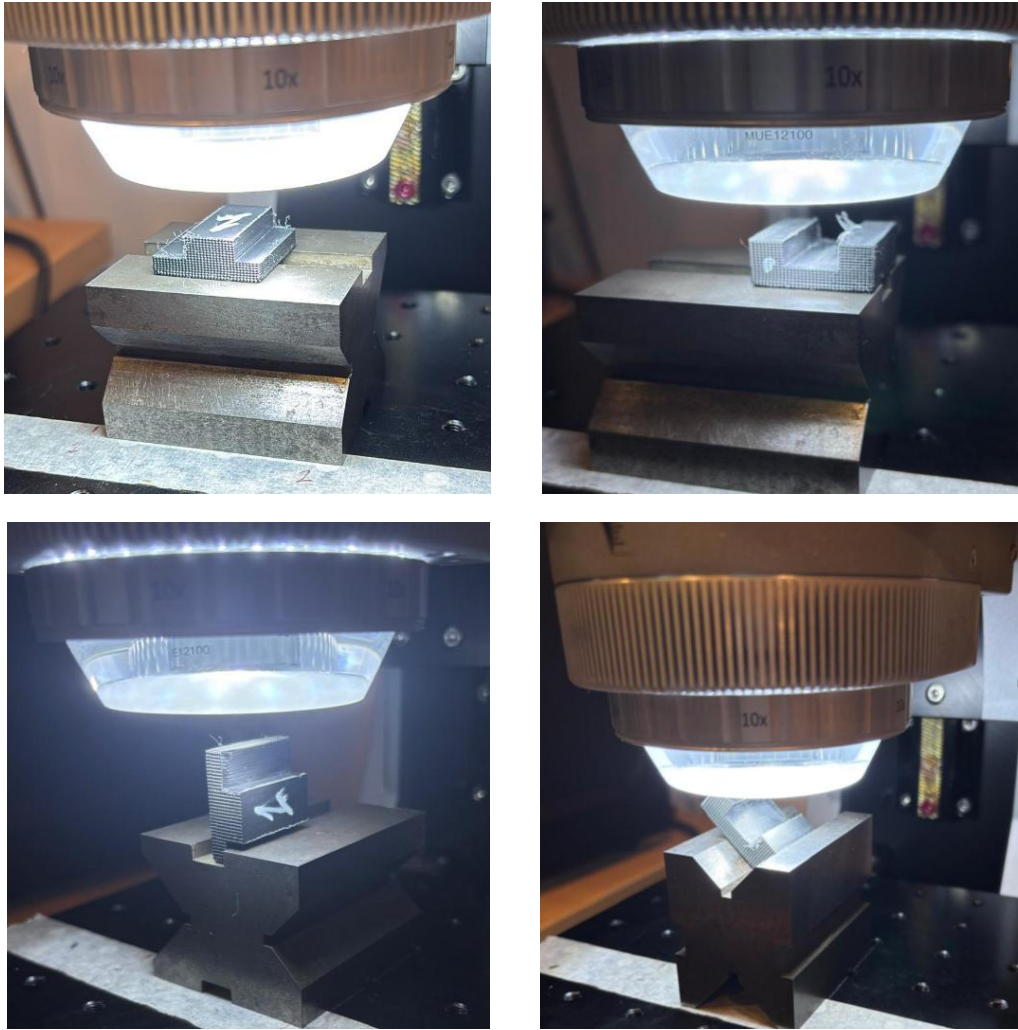


Figura 42. Posición de la probeta para toma de datos.

Una vez posicionada la probeta se procede a realizar la captura, como se ha comentado con anterioridad se pueden tomar capturas de diferentes tamaños. Se ha decidido tomar capturas de 2 mm^2 en tres zonas de los laterales mecanizados mientras que en la zona plana se ha tomado una superficie mayor de $2 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (Figura 43).

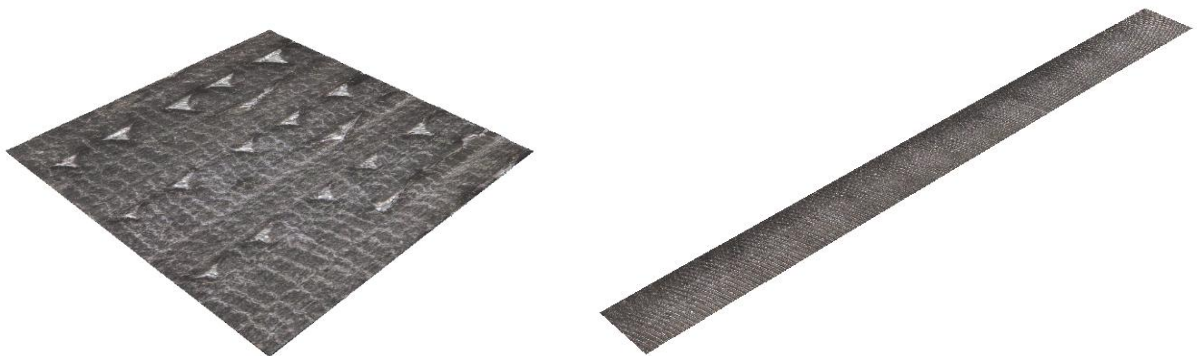


Figura 43. Imágenes tomadas por la Alicona.



Tras tomar las capturas, para poder realizar las mediciones de las rugosidades es esencial eliminar la forma. Excepto en el caso de la medida de las paredes de las probetas mecanizadas con un 100% de empañe, este paso se hace por asegurarse de obtener una medida veraz a pesar de que la superficie medida ya es plana.

Una vez eliminada la forma se procede a la medición. El software obtiene dichas medidas siguiendo la norma ISO 21920-2:2021 [90]. Los datos deseados se obtienen tras filtrar la imagen, en forma de tabla, donde se disponen diversos parámetros de los que, para este trabajo de fin de grado, se decide centrarse en las medidas de S_a , S_z y S_k .



5. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras la fabricación y el postprocesado de probetas con forma de paralelepípedo impresas mediante fabricación por filamento fundido empleando filamento de ABS. Las probetas fueron diseñadas con el objetivo de analizar el efecto de diferentes métodos de postprocesado sobre la calidad superficial y viabilidad final de las piezas.

El tamaño de las probetas está condicionado por los parámetros de corte del proceso de fresado, en específico del empañe. Como se ha comentado en apartados anteriores, se han realizado procesos empleando empañe del 50%, del 75% y del 100%. Con tal de reducir el gasto de material y reducir el tiempo de creación de las probetas, se decidió realizar el fresado a empañe 50% y 75% en la misma probeta. Esto conlleva que, al tener la herramienta un diámetro de 12 mm, se necesitará, como mínimo 6 mm para el primer proceso y 9 para el segundo, siendo un total de 15 mm. Finalmente, se estableció una base de 27 mm para permitir también el análisis de las superficies laterales de la probeta.

El procedimiento experimental se inició con la impresión 3D bajo condiciones uniformes y, a continuación, se aplicaron tres métodos de postprocesado: el fresado, el mecanizado por chorro abrasivo y el pulido químico mediante exposición a vapores de acetona. Cada técnica se implementó con parámetros específicos y controlados para evaluar su impacto de forma comparativa.

Durante el fresado, se observó que los procesos con empañes de 50% y 75% realizados en concordancia provocaron la delaminación de las capas de las probetas, lo que hizo inviable su uso para la mejora de la calidad superficial. En consecuencia, no se obtuvieron resultados válidos para las operaciones en concordancia. Por el contrario, este comportamiento no se mostró en el caso de mayor empañe o en oposición.

En el caso del mecanizado por chorro abrasivo, las probetas mantuvieron su integridad y se observaron cambios en el acabado superficial sin comprometer la geometría de las piezas.

Por último, en el pulido químico mediante vapores de acetona se llevaron a cabo exposiciones de 1, 2 y 3 horas. Los mejores resultados fueron obtenidos tras una hora de exposición y, al prolongar dicho tiempo, el valor de la altura media aritmética aumentaba.

Se han realizado mediciones tanto en las caras superiores como en las caras laterales de las probetas impresas, ya que el proceso de fresado afecta a ambas superficies. Aunque el objetivo principal del estudio es analizar únicamente la cara superior, se decidió ampliar el análisis, en ese caso, para obtener una visión más completa del efecto del fresado.

En conjunto, los resultados permiten establecer una comparación cualitativa entre los métodos aplicados evidenciando limitaciones en algunas de las operaciones de postprocesado.

5.1. Análisis de la superficie de la pieza impresa de 0,3 mm de altura de capa

Con el fin de tener como referencia la probeta sin operación de postprocesado se ha decidido obtener las imágenes características macrogeométricas y los parámetros microgeométricos de dicha probeta. En la Figura 44 se observa la orientación de la probeta con el fin de determinar las caras seleccionadas para el análisis superficial.

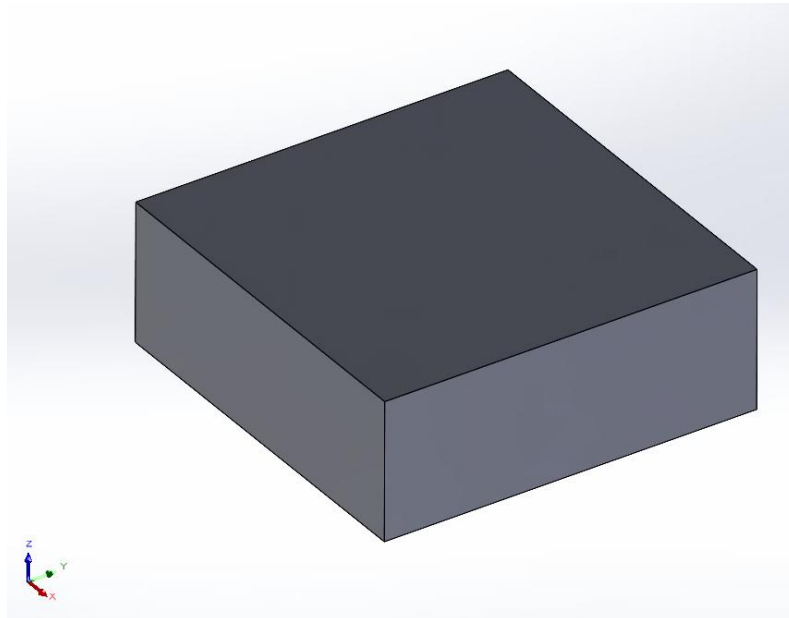


Figura 44. Orientación pieza impresa.

En la figura anterior se observa la orientación de la pieza. Las caras a estudiar serán la cara del plano XY y de las caras laterales, al ser todas iguales, se escoge la cara del plano XZ.

5.1.1. Resultados macrogeométricos obtenidos del microscopio

Se ha analizado las superficies de la cara del plano XY y la cara lateral del plano XZ.

Cara del plano XY

Mediante el microscopio del taller se han tomado las imágenes de la Figura 45 con el fin de poder realizar una comparación con el resto de las imágenes obtenidas de las probetas sometidas a operaciones tras su impresión.

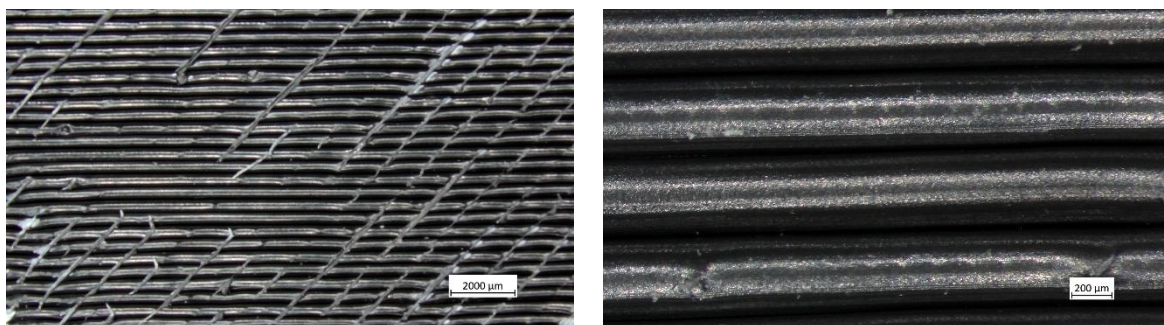


Figura 45. Imágenes de la superficie XY de la probeta impresa a 8x y 50x.

En ambas imágenes se observa un patrón rectilíneo que corresponde con las trayectorias de extrusión, son estrías paralelas que se generan por el movimiento de la boquilla del extrusor a lo largo del plano XY. El ancho de las líneas coincide con el diámetro del extrusor utilizado, que es de 0,4 mm. Se aprecia una buena continuidad del material depositado, sin presencia de huecos visibles entre las capas. Además, no se observan defectos superficiales aparentes en las imágenes.

Cara lateral plano XZ

En la Figura 46 se observan las imágenes tomadas por el microscopio correspondientes a la cara XZ de la pieza impresa.

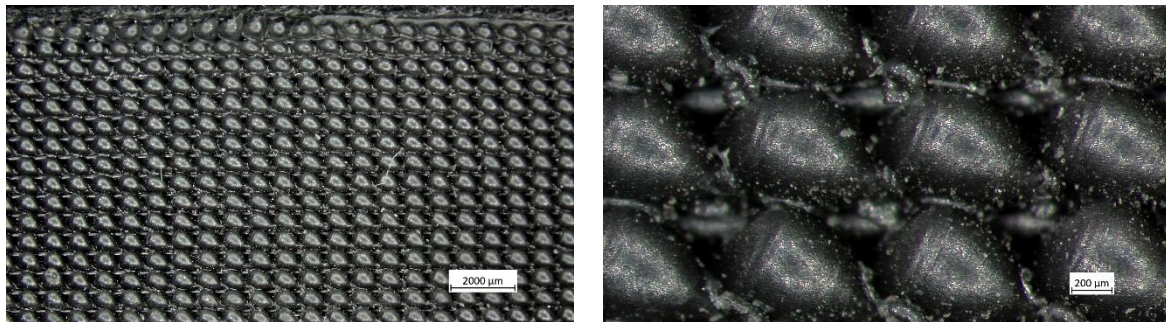


Figura 46. Imágenes de la superficie XZ de la probeta impresa a 8x y 50x.

En este par de imágenes se observa los cordones de extrusión que forman un patrón claro debido a la superposición de capas y al relleno rectilíneo que se comentaba en la Figura 45. La altura de cada cordón es de 0,3 mm ya que se corresponde con la altura de capa definida en el laminado, mientras que su anchura refleja el diámetro del extrusor utilizado, que es de 0,4 mm, como se ha comentado en el apartado anterior.

5.1.2. Resultados microgeométricos obtenidos de la Alicona

Mediante la Alicona, se han analizado las superficies de la cara del plano XY y la cara lateral del plano XZ, al igual que en el estudio macrogeométrico.

Cara del plano XY

De la probeta impresa se han obtenido, gracias a la Alicona, imágenes de su superficie y rugosidad (Figura 47).

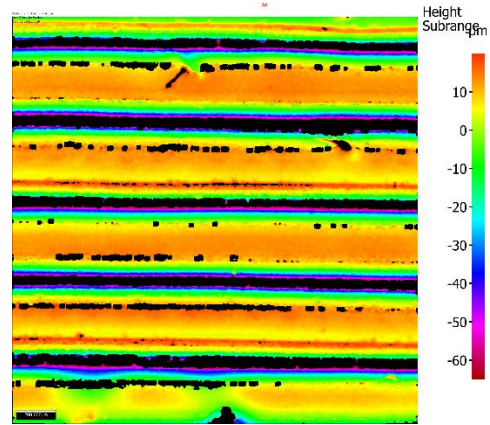


Figura 47. Imágenes de la superficie y la rugosidad de la probeta impresa.

En estas imágenes también son visibles las líneas de trayectoria mencionadas anteriormente.

En adición se han obtenido los valores de Sa, Sz y Sk, que se muestran en la Tabla 4. Dichos valores se usarán posteriormente para comprobar si las operaciones de postprocesado han sido mejorados o no.

Tabla 4. Valores parámetros de rugosidad cara plana de la probeta impresa de 0,3 mm de altura de capa.

Probeta sin mecanizar	
Parámetro	Valor (μm)
Sa	14,492
Sz	406,66
Sk	20,017

Cara lateral plano XZ

Al igual que para la cara del plano XY, para la lateral se han obtenido imágenes y parámetros de la rugosidad de la pieza sin mecanizar.

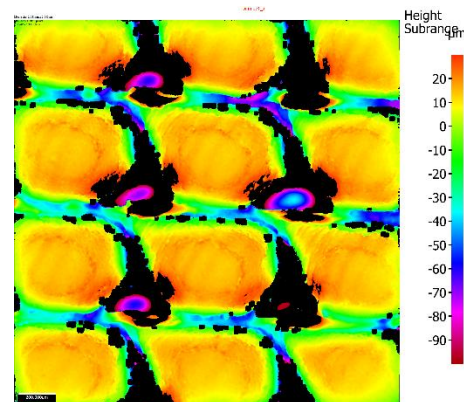


Figura 48. Imágenes de la superficie y la rugosidad de la probeta sin mecanizar.

A continuación, en la Tabla 5 se muestran los parámetros medidos del lateral de la pieza.

Tabla 5. Valores parámetros de rugosidad cara lateral de la probeta de 0,3 mm de altura de capa.

Probeta sin mecanizar	
Parámetro	Valor (μm)
Sa	21,397
Sz	362,238
Sk	17,985

Una vez obtenidos los valores de los parámetros de rugosidad para ambas caras observamos que son valores elevados. Los acabados ofrecidos por operaciones de CNC el valor de la rugosidad Ra varía entre 0,1 μm y 6,3 μm [91]. Además, en la industria aeronáutica el límite superior típico se sitúa en Ra=1,6 μm [92]. Los valores de Sa y Ra, aunque provienen de una superficie tridimensional o un perfil bidimensional respectivamente, representan en ambos el valor medio aritmético de las desviaciones respecto a una superficie ideal. Por ello, es posible establecer comparaciones generales entre sendos parámetros.

Con el objetivo de reducir los valores elevados de rugosidad obtenidos inicialmente, se procede a analizar el efecto de las distintas operaciones de postprocesado aplicadas a las probetas. Este análisis permitirá evaluar qué técnicas son más eficaces para mejorar la calidad superficial de las piezas fabricadas mediante FFF.

5.2. Análisis de la superficie de la pieza impresa de 0,1 mm de altura de capa

En la se muestran los valores de los parámetros de rugosidad de la cara XY de una pieza impresa con un espesor de capa de 0,1 mm. Estos datos provienen del Trabajo de Fin de Grado: Influencia de la aplicación de acetona como post operación en la mojabilidad del ABS en piezas obtenidas por fabricación aditiva por FFF [84].

Tabla 6. Valores parámetros de rugosidad cara plana de la probeta impresa de 0,1 mm de altura de capa.

Probeta impresa (altura de capa 0,1 mm)	
Parámetro	Valor (μm)
Sa	7,907
Sz	348,252
Sk	17,316

Se observa como los valores de esta probeta mejoran en comparación con los obtenidos de la probeta impresa bajo las mismas condiciones, pero con un espesor de capa de 0,3 mm.

5.3. Resultados obtenidos de la operación de fresado

Los resultados correspondientes a los empañes del 50 % y 75 % se han obtenido únicamente para el caso de mecanizado en oposición. Tal como se ha indicado anteriormente, durante las operaciones realizadas en concordancia, las probetas se fracturaron debido a una separación entre capas, lo que imposibilitó la continuación del proceso. Este fallo estructural puede atribuirse a las fuerzas de corte generadas en dicha configuración, ya que en el mecanizado en concordancia la herramienta tiende a arrastrar el material con mayor agresividad, favoreciendo la apertura entre capas en piezas fabricadas por FFF, que presentan anisotropía y menor resistencia en la dirección perpendicular a las capas.

5.3.1. Análisis de la temperatura registrada durante el fresado

Los datos se han obtenido mediante la cámara termográfica y con la ayuda del software FLIR ResearchIR Max se han obtenido tablas de datos que al interpretarse y ordenarse se han plasmado en forma de gráficas para facilitar su estudio.

A continuación, se muestran tres gráficas (Figura 49, Figura 50 y Figura 51) donde se representan las temperaturas máximas obtenidas a lo largo de las operaciones de fresado en función del empañe y de las velocidades de corte y avance. Como se ha comentado anteriormente, no se han podido realizar correctamente las operaciones en concordancia por ello solo se muestran los datos de las operaciones en oposición para las operaciones de 50% y 75% de empañe.

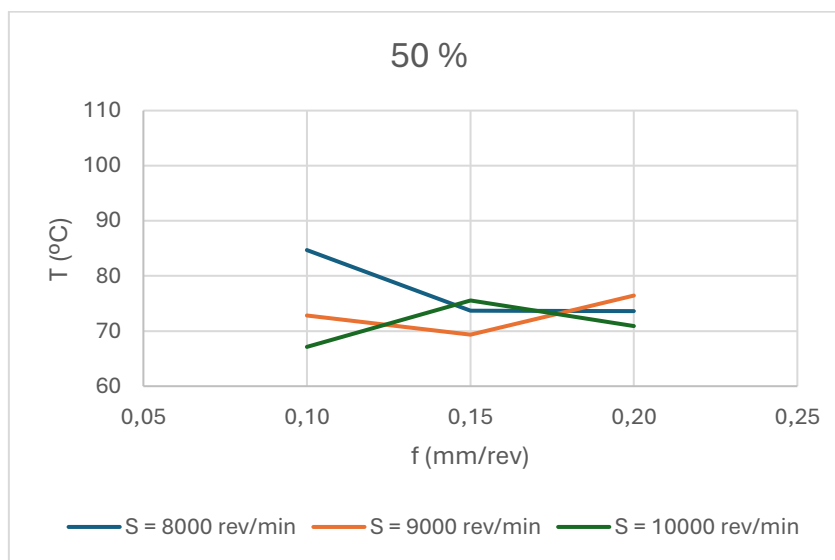


Figura 49. Representación de la temperatura media registrada durante el fresado con empañe del 50%.

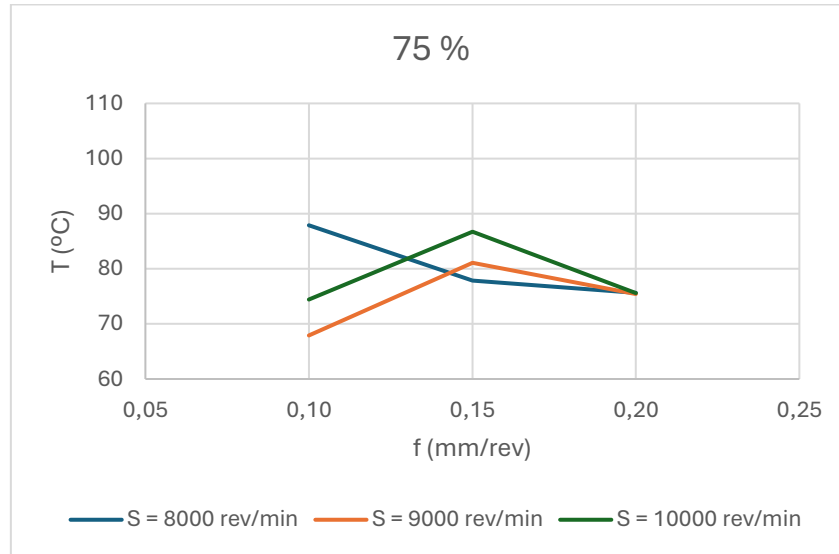


Figura 50. Representación de la temperatura media registrada durante el fresado con empañe del 75%

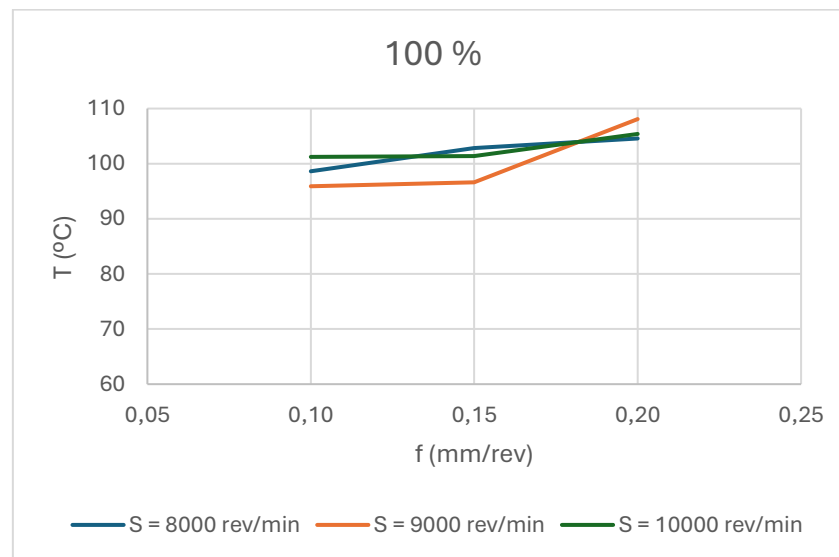


Figura 51. Representación de la temperatura media registrada durante el fresado con empañe del 100%.

A partir de las gráficas obtenidas para los tres niveles de empañe (50%, 75% y 100%), se puede observar que no existe una tendencia clara ni uniforme con relación a la velocidad de avance y la temperatura, ni tampoco en función de la velocidad de corte. Es difícil asociar el comportamiento de la temperatura a alguno de estos parámetros.

En cuanto a la influencia del empañe, sí se aprecia una tendencia clara, a medida que el empañe aumenta, las temperaturas alcanzadas durante el mecanizado son notablemente más altas. En el caso del 100% de empañe, las temperaturas aumentan los 90°C para todos los valores de velocidad de avance y corte, mientras que en los casos del 50% y 75% de empañe, los valores se mantienen por debajo de ese umbral. Esto puede deberse a que, un mayor empañe implica una mayor fricción y un contacto más prolongado de la herramienta con el material, lo que favorece una mayor acumulación térmica.

5.3.2. Análisis superficial tras la operación de fresado

Tras analizar los valores de la temperatura se ha realizado un análisis de la superficie de las piezas sometidas a la operación de fresado, a nivel macro y microgeométrico.

5.3.2.1. Resultados macrogeométricos obtenidos del microscopio

En el caso de las piezas sometidas a fresado, se ha decidido tomar una imagen representativa para cada uno de los diferentes empañes, estas imágenes se muestran en la Figura 52, Figura 53 y Figura 54.

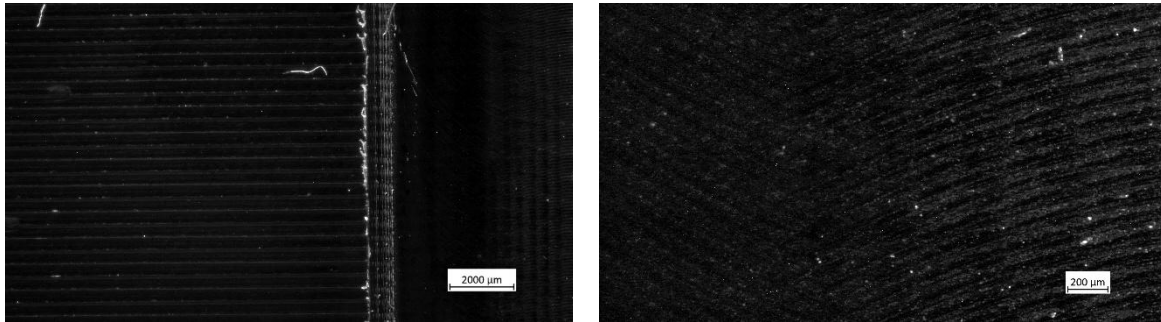


Figura 52. Imágenes del microscopio de la probeta mecanizada con un empañe del 50% a 8x y 25x.

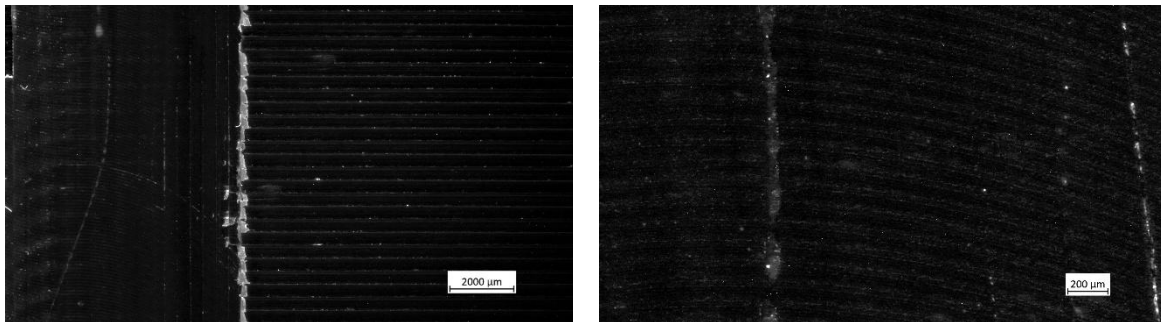


Figura 53. Imágenes del microscopio de la probeta mecanizada con un empañe del 75% a 8x y 25x.

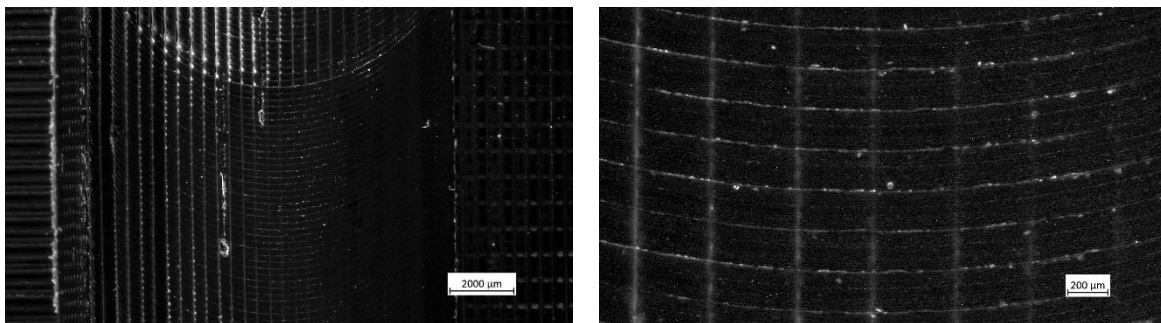


Figura 54. Imágenes del microscopio de la probeta mecanizada con un empañe del 100% a 8x y 25x.

En las imágenes, sobre todo en las del mayor aumento, se observa que para los tres casos existe un patrón circular que se debe al paso de la herramienta sobre la superficie. En el caso del empañe del 100% este aspecto se observa con claridad también en la imagen con zoom de 8x.

Se observan arañazos en las superficies de las probetas con los empañes mayores. Estos arañazos se pueden deber a l daño provocado por la viruta al intentar evacuar.

5.3.2.2. Resultados microgeométricos

El proceso de mecanizado afecta a las caras laterales además de a la cara plana de las probetas.

Cara del plano XY

De los datos obtenidos de la Alicona se generan tres gráficas que contienen los valores medidos mediante el microscopio. A continuación, se comentarán la Figura 55, la Figura 56 y la Figura 57.

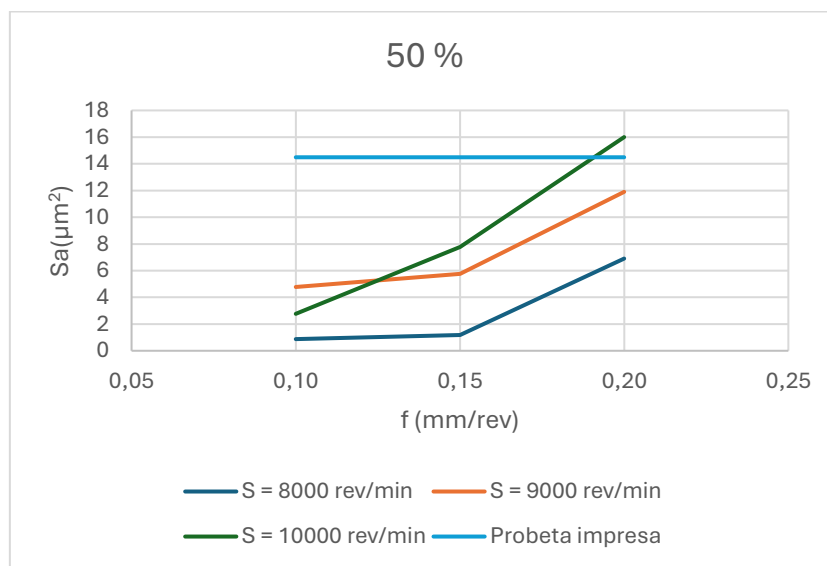


Figura 55. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.

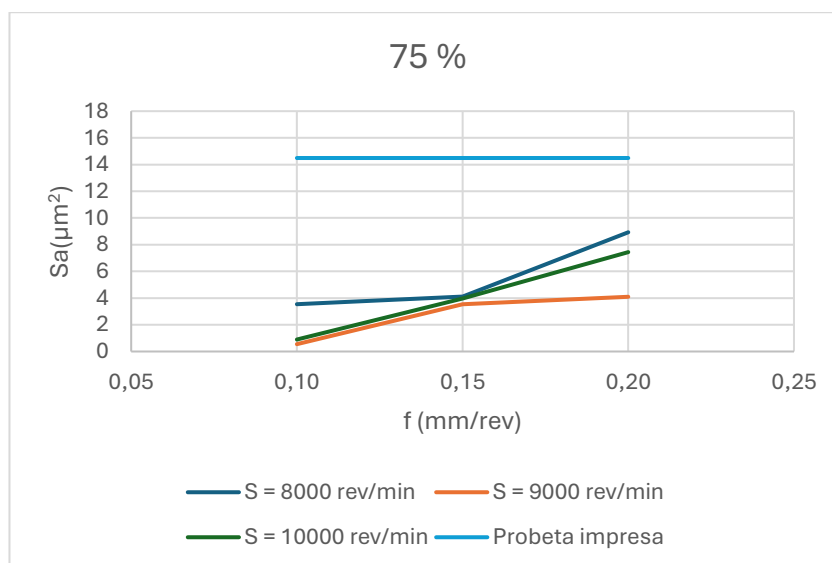


Figura 56. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.

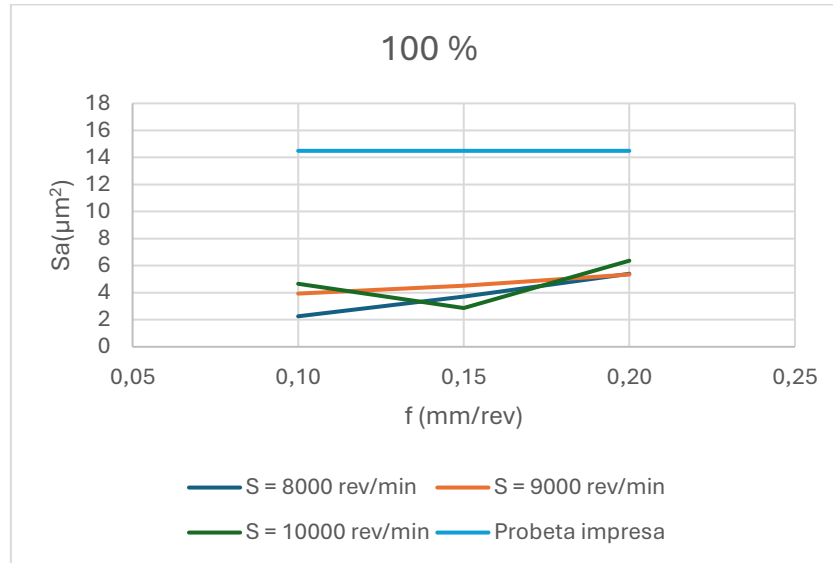


Figura 57. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 100% con respecto a las velocidades.

En las gráficas se ha representado la altura media aritmética de la probeta sin mecanizar para facilitar la comparación. En primer lugar, se observa como esta operación de postprocesado mejora la calidad superficial con respecto a la probeta sin mecanizar.

En cuanto a la influencia de los parámetros de corte se observa cómo, a diferencia de lo que ocurría con la temperatura, a medida que aumenta el porcentaje de empañe, se disminuye el valor de la altura media aritmética en general.

Sobre las velocidades, observamos que mientras la velocidad de corte no muestra una tendencia clara, la velocidad de avance se puede decir que afecta ligeramente. Con el aumento de la velocidad de avance se percibe un pequeño aumento del parámetro medido.

Los valores obtenidos presentan mejores resultados que los procedentes de la probeta con un menor espesor de capa cuando el mecanizado se realizó a una velocidad de avance de 0,1 mm/rev y 0,15 mm/rev para el caso de empañes del 50% y 75%, y, en todos los casos, para el empañe del 100%.

A continuación, se muestran los resultados de la altura máxima representados en la Figura 58, Figura 59 y Figura 60.

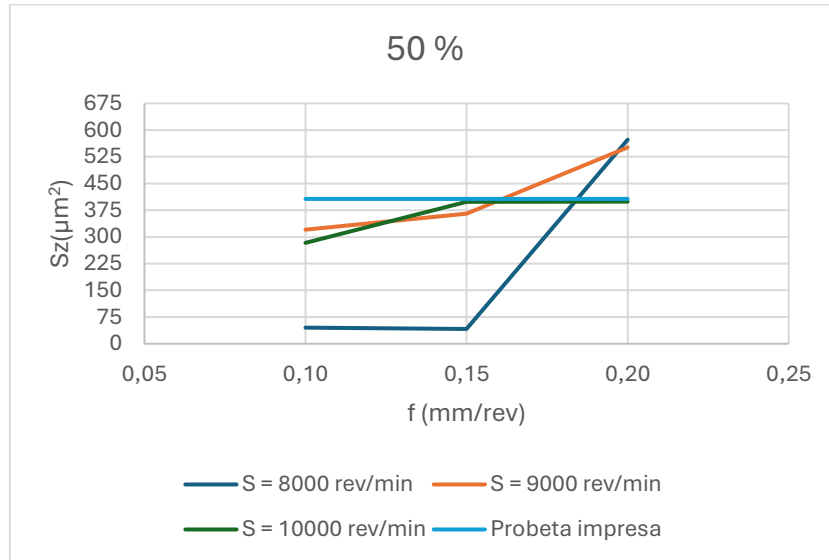


Figura 58. Representación de la altura máxima ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.

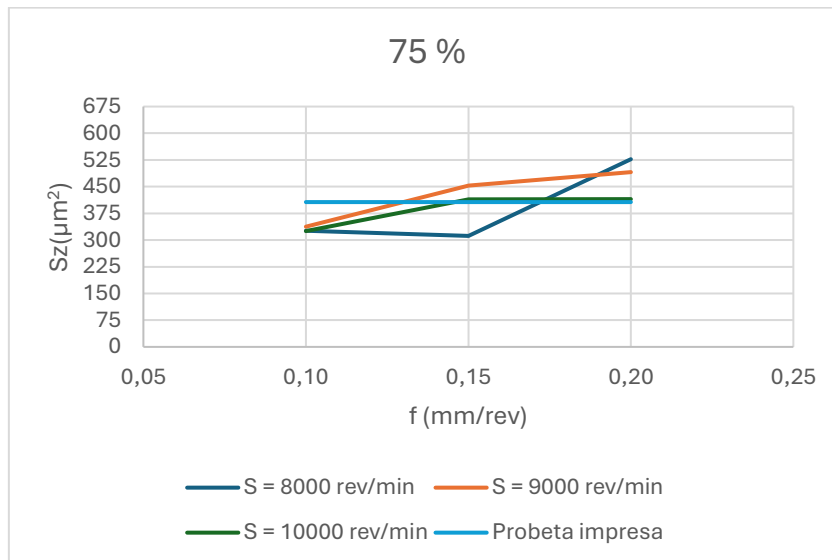


Figura 59. Representación de la altura máxima ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.

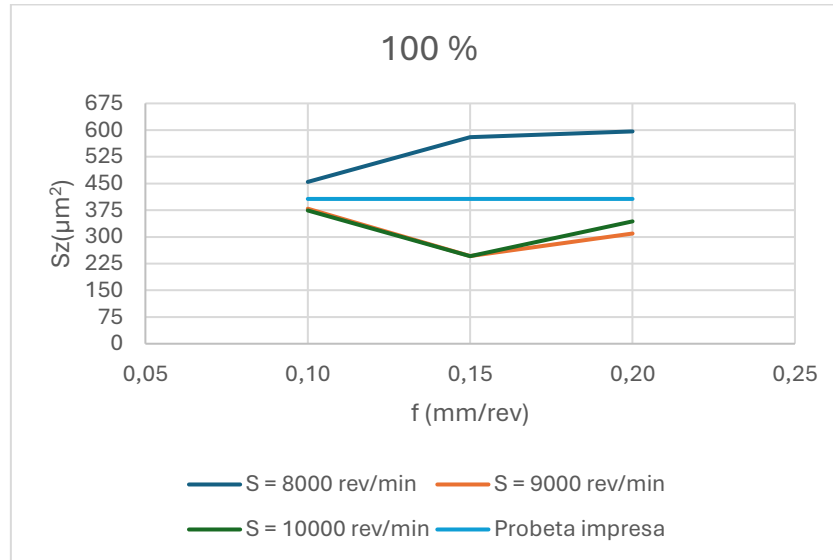


Figura 60. Representación de la altura máxima ante el empañe del 100% con respecto a las velocidades.

En el caso de la altura máxima, se observa cómo no existe una mejora clara en comparación con el valor obtenido de la probeta impresa.

Se observa una ligera influencia de la velocidad de corte, a diferencia de en el caso de la altura media aritmética. En este caso, a mayor velocidad de corte, menores valores de Sz se obtienen. En cuanto a la velocidad de avance, se observa también una leve influencia, al aumentar dicho valor, lo hacen también los valores de la altura máxima.

De la influencia del porcentaje de empañe no se puede afirmar su influencia sobre este parámetro.

Al comparar los resultados con los obtenidos de la probeta impresa con un espesor de capa de 0,1 mm, se aprecia que en algunos casos los valores de rugosidad mejoran, mientras que en otros empeoran. Por tanto, tal como se ha mencionado previamente, no puede establecerse una mejora clara.

En la Figura 61, Figura 62 y Figura 63, se muestran los valores obtenidos mediante la Alicona de la profundidad de la rugosidad del núcleo de la superficie.

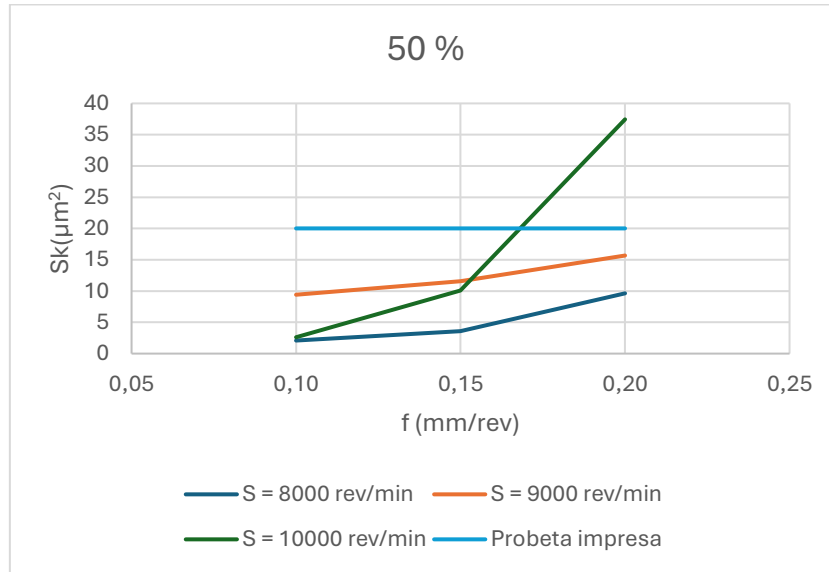


Figura 61. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.

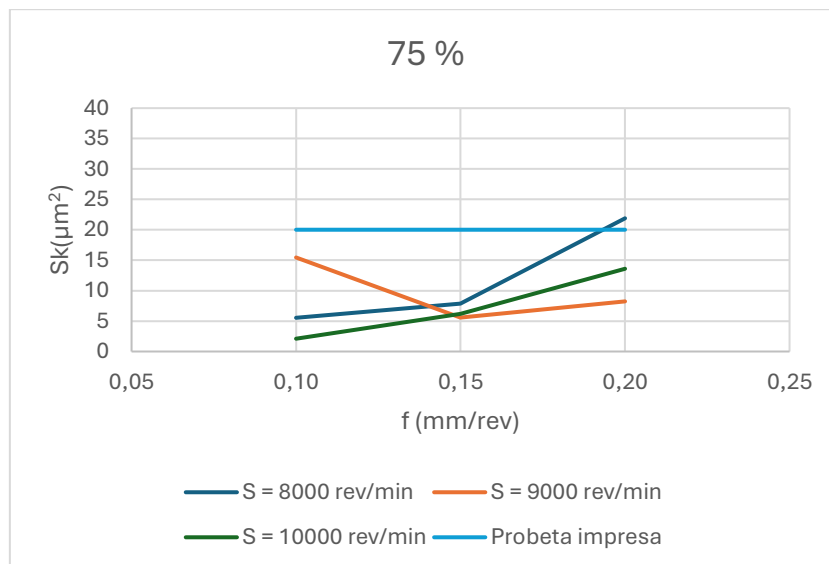


Figura 62. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.

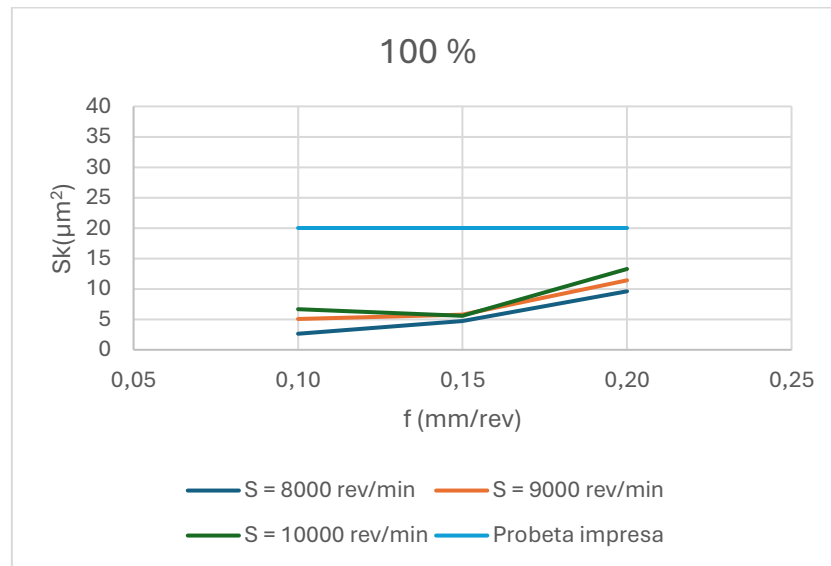


Figura 63. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 100% con respecto a las velocidades.

Tras la operación de fresado, se observa como existe una mejoría en la profundidad de la rugosidad del núcleo de la superficie. Se destaca como, en función del porcentaje de empañe, se obtiene una notable reducción del valor de la Sk.

A diferencia del caso anterior, donde la altura máxima dependía de la velocidad de corte y de la velocidad de avance mínimamente, para la Sk, la velocidad de corte no influye mientras que sí lo hace la velocidad de avance. Al igual que anteriormente, al aumentar dicha velocidad, también lo hace el valor estudiado.

Se puede afirmar que en general, los resultados obtenidos son mejores tras el fresado que los obtenidos de la pieza impresa con menor altura de capa.

Cara lateral plano XZ

Se procede a observar en la Figura 64 si existe una mejora de la altura media aritmética debido a la operación de postprocesado.

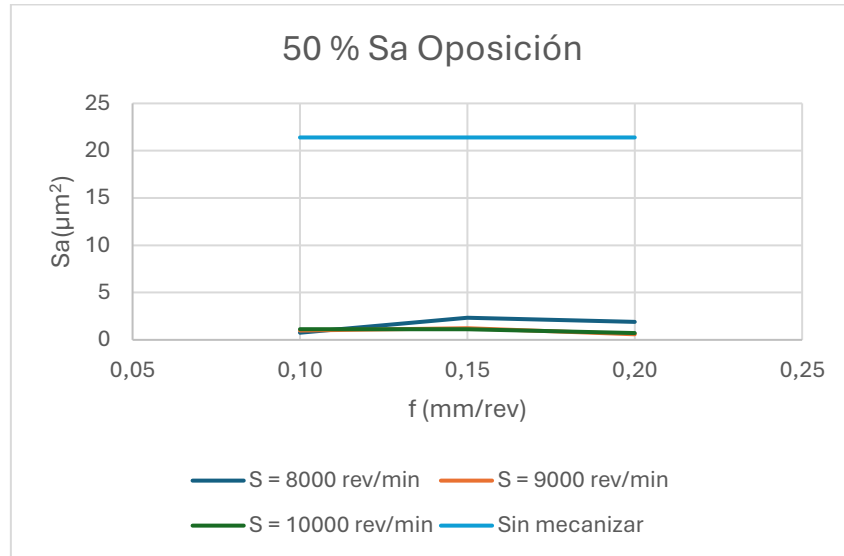


Figura 64. Representación de Sa de la cara lateral incluyendo la probeta impresa.

Al igual que lo sucedido con la cara posicionada en el plano XY, para el caso de la cara lateral, altura media aritmética se reduce un 90%. Por lo que, en este caso, la operación de postprocesado muestra resultados muy efectivos.

Con el fin de interpretar con mayor precisión los datos se procede a realizar el resto de las gráficas sin la medida de la pieza sin mecanizar. (Figura 65, Figura 66, Figura 67 y Figura 68)

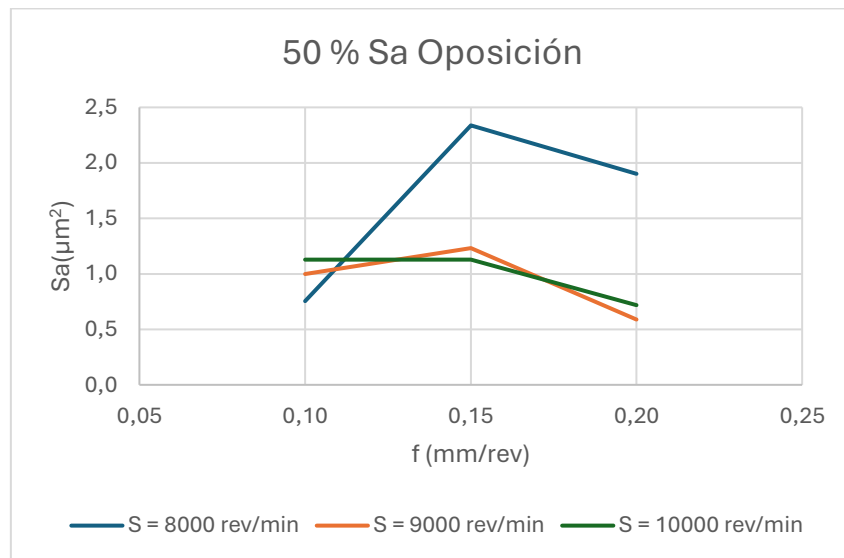


Figura 65. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.

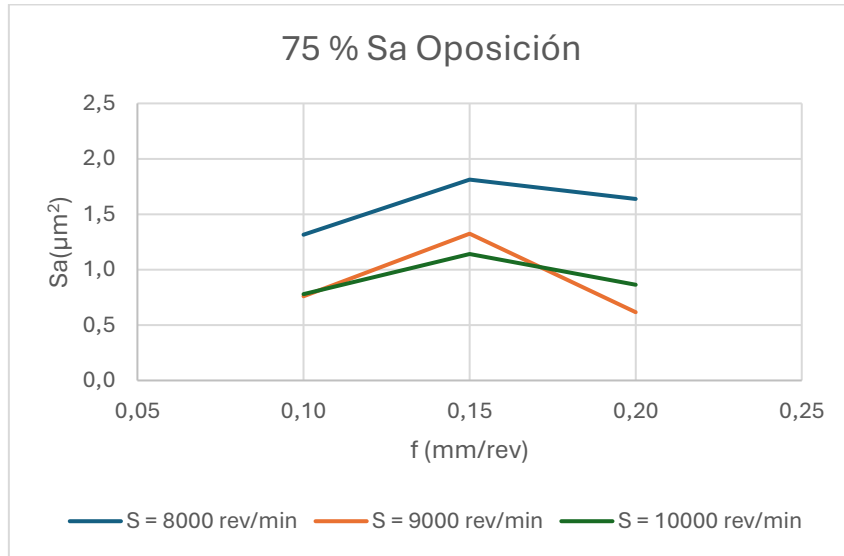


Figura 66. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.

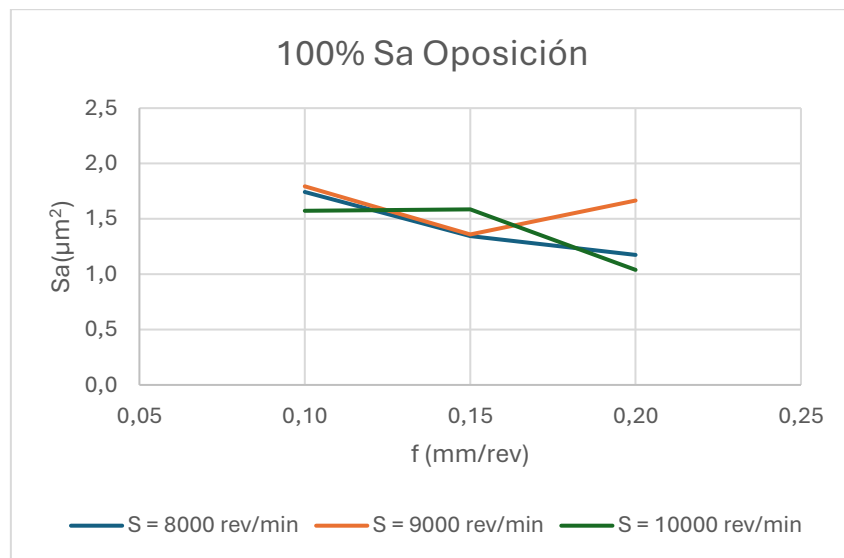


Figura 67. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 100% en oposición con respecto a las velocidades.

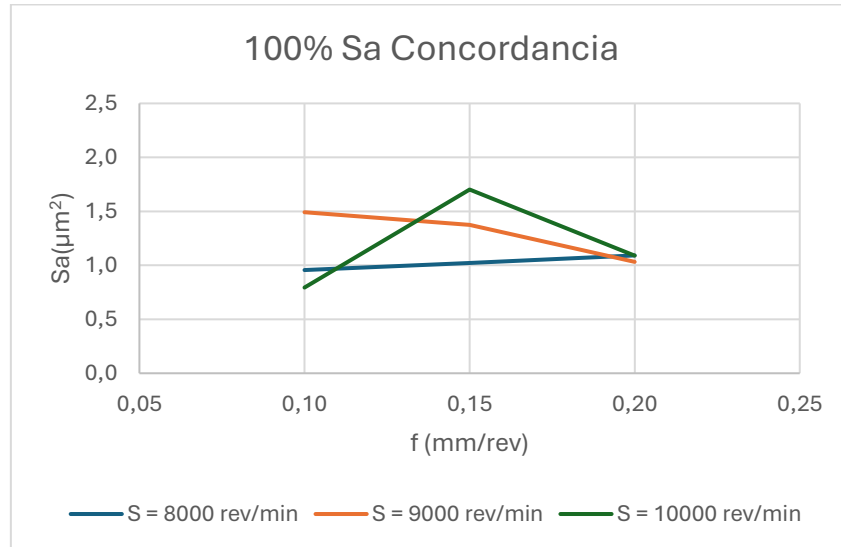


Figura 68. Representación de la altura media aritmética ante el empañe del 100% en concordancia con respecto a las velocidades.

El efecto de los parámetros de corte sobre la altura media aritmética de las caras laterales es distinto de lo observado en las caras superficiales. Se observa que en las gráficas de empañe 50% y 75% las tendencias seguidas por las rectas son parecidas. En ambas gráficas, los peores resultados son los obtenidos para una velocidad de corte de 8000 rev/min, además, ante un valor de velocidad de avance de 0,15 mm/rev se registran aumentos de la altura media aritmética.

Esto no se ve reflejado en las gráficas de empañe de 100%. De estas gráficas destacamos como se obtienen mejores resultados para la cara que se encuentra en concordancia. Mientras que los parámetros de corte no muestran influenciar de forma clara en ninguno de los dos casos.

A continuación, en la Figura 69, Figura 70, Figura 71 y Figura 72, se muestran los datos de la altura máxima en las caras laterales. En este caso, se representan las gráficas con el valor obtenido de la pieza impresa ya que se puede observar con mayor claridad los resultados, a diferencia de la situación anterior.

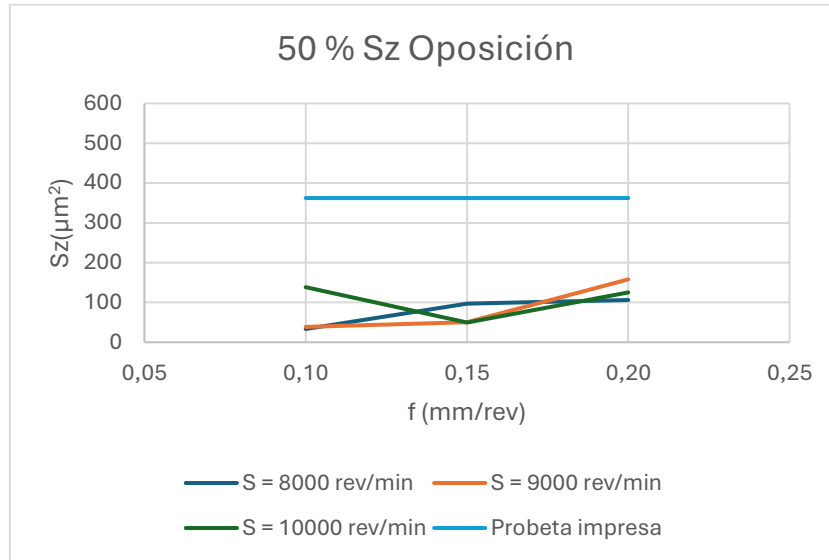


Figura 69. Representación de la altura máxima ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.

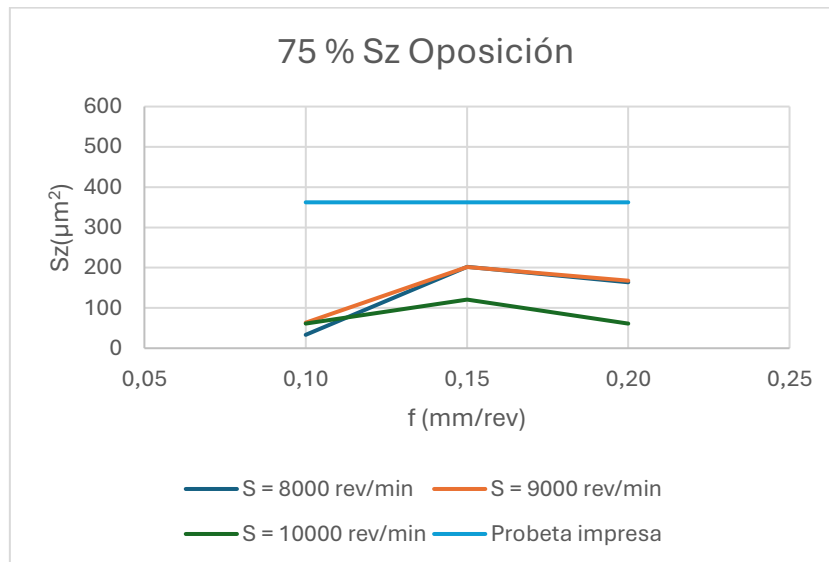


Figura 70. Representación de la altura máxima ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.

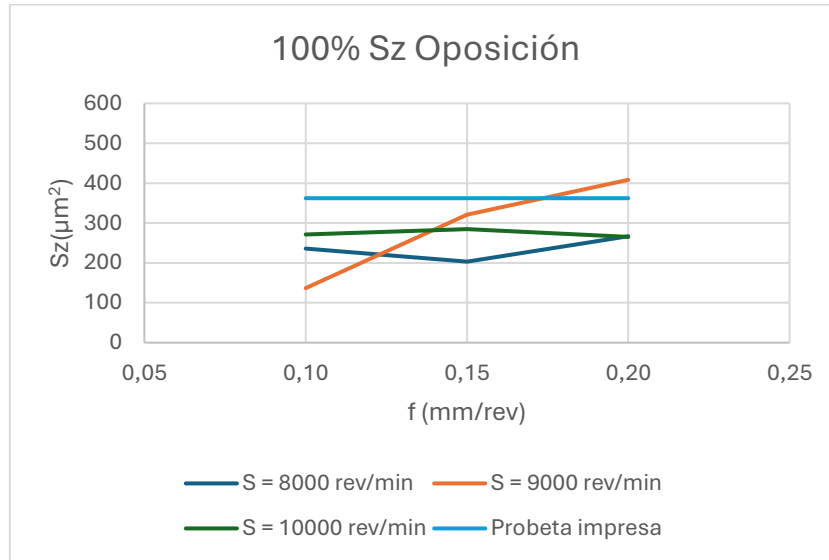


Figura 71. Representación de la altura máxima ante el empañe del 100% en oposición con respecto a las velocidades.

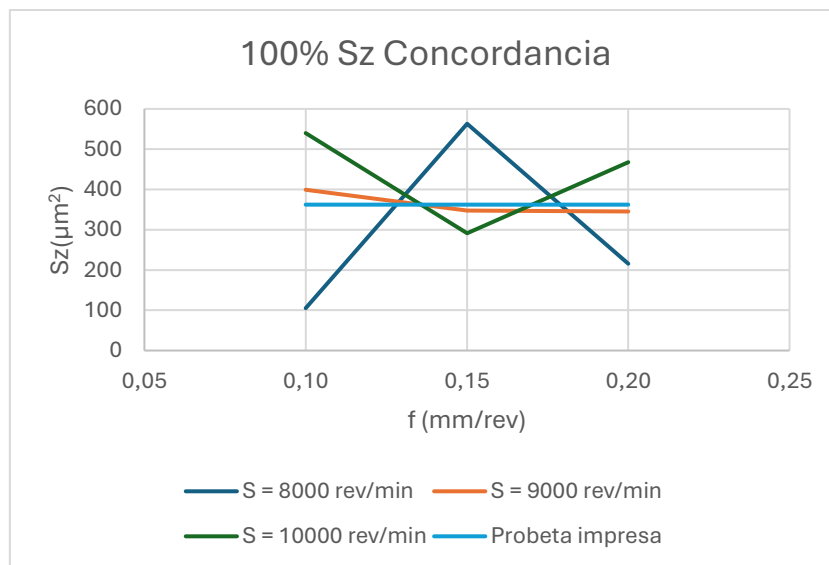


Figura 72. Representación de la altura máxima ante el empañe del 100% en concordancia con respecto a las velocidades.

En las caras en oposición, los valores obtenidos son mejores que los ofrecidos por la probeta impresa. En el caso del mecanizado en concordancia, se observa cómo no sucede lo mismo y no se llegan a mejorar los resultados en general.

El porcentaje de empañe produce un efecto en los resultados, a medida que se aumenta el porcentaje, aumentan también los valores de Sz, mientras que como hemos visto anteriormente, el empañe no tenía influencia sobre este parámetro.

De las velocidades de corte y avance no se puede sacar una influencia clara sobre el parámetro de rugosidad Sz.

Finalmente, se observan los valores de S_k en la Figura 74, Figura 75, Figura 76 y Figura 77. Al igual que para la S_a , se representa inicialmente una de las gráficas con el valor de la probeta impresa (Figura 73) y, posteriormente el resto de las gráficas sin dicho valor para poder analizarlas con mayor exactitud.

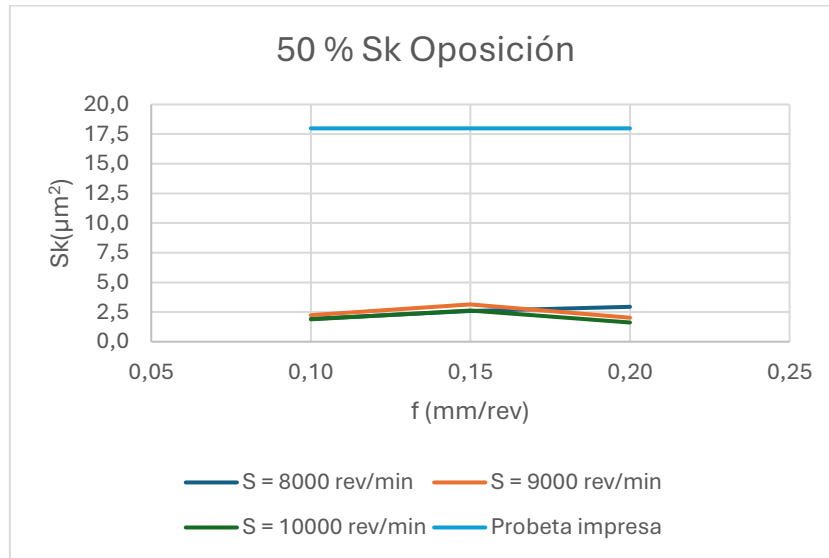


Figura 73. Representación de S_k de la cara lateral incluyendo la probeta impresa.

La mejora del parámetro S_k es clara, mientras supera los 17,5 μm en el caso de la probeta impresa, en el resto de casos dicho valor no superará los 10 μm , como se verá a continuación.

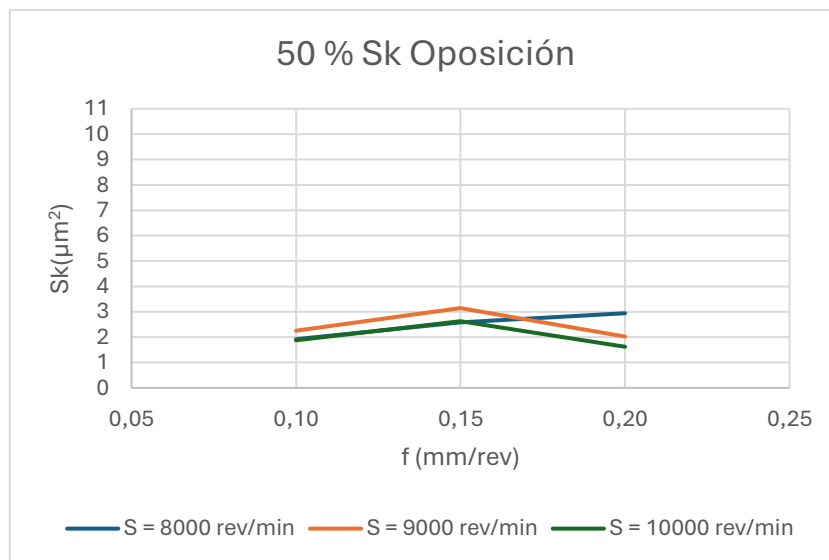


Figura 74. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 50% con respecto a las velocidades.

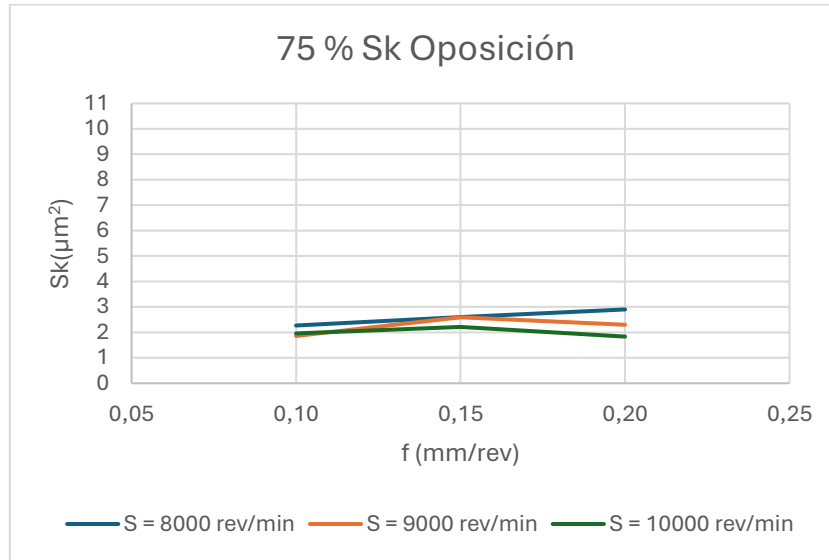


Figura 75. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 75% con respecto a las velocidades.

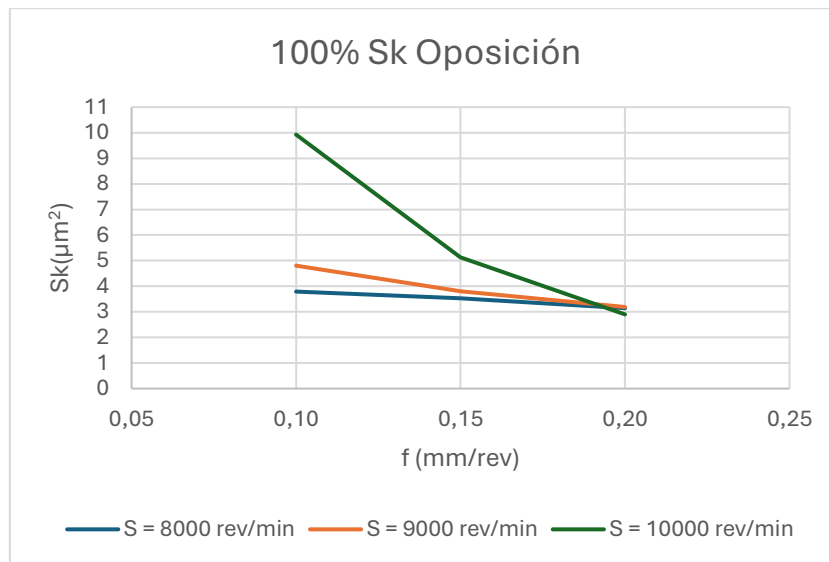


Figura 76. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 100% en oposición con respecto a las velocidades.

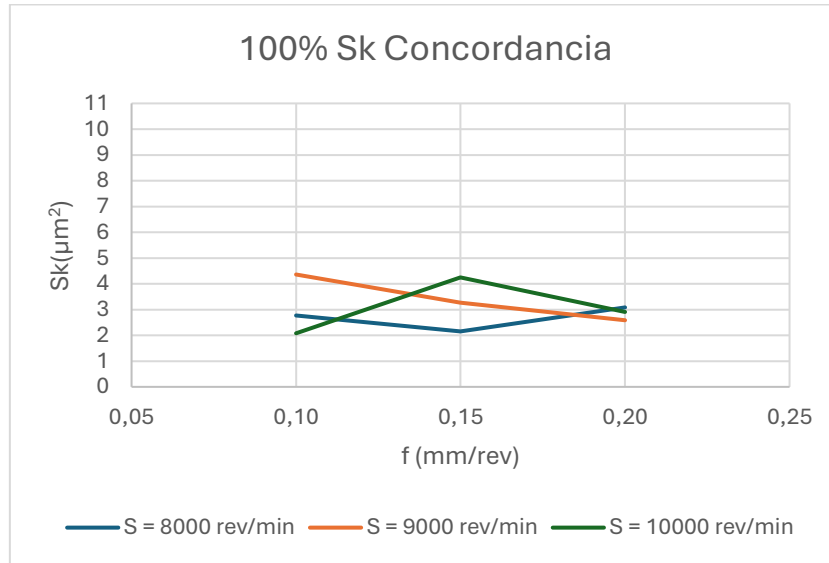


Figura 77. Representación de la profundidad de la rugosidad del núcleo ante el empañe del 100% en concordancia con respecto a las velocidades.

El valor de la profundidad de la rugosidad del núcleo de la superficie es muy parecido en el caso de los resultados obtenidos en las caras laterales de los fresados con empañe del 50% y del 75%. De los resultados obtenidos de las operaciones con empañe del 100% destacamos que se obtienen mejores resultados en oposición que en concordancia, a diferencia del caso de la Sz.

En cuanto a las velocidades de corte y de avance no se destaca ninguna influencia clara de estos parámetros sobre los valores obtenidos.

5.4. Análisis superficial tras mecanizado por chorro abrasivo

La superficie de las probetas sometidas a este tipo de operación de postprocesado presentan una variación de la superficie, sobre todo a nivel macrogeométrico.

5.3.1. Resultados macrogeométricos obtenidos del microscopio

En las siguientes figuras se observa claramente el efecto del proceso de postprocesado sobre la superficie de las probetas (Figura 78, Figura 79 y Figura 80).

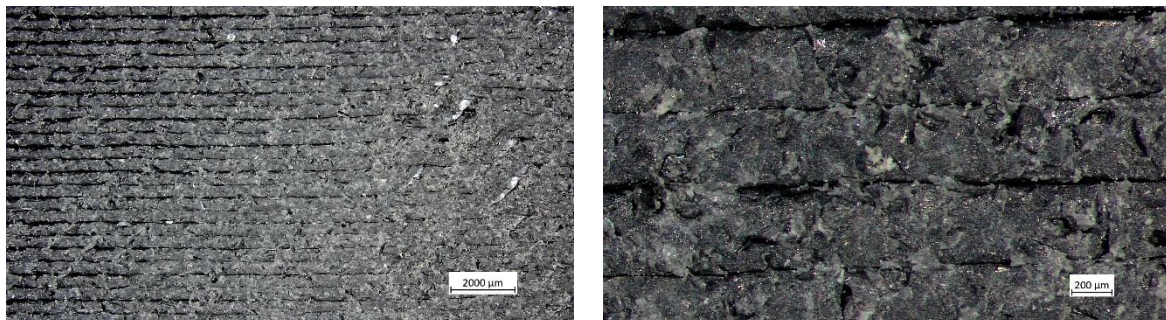


Figura 78. Imagen del microscopio de la probeta sometida a chorro abrasivo a 6 bares.

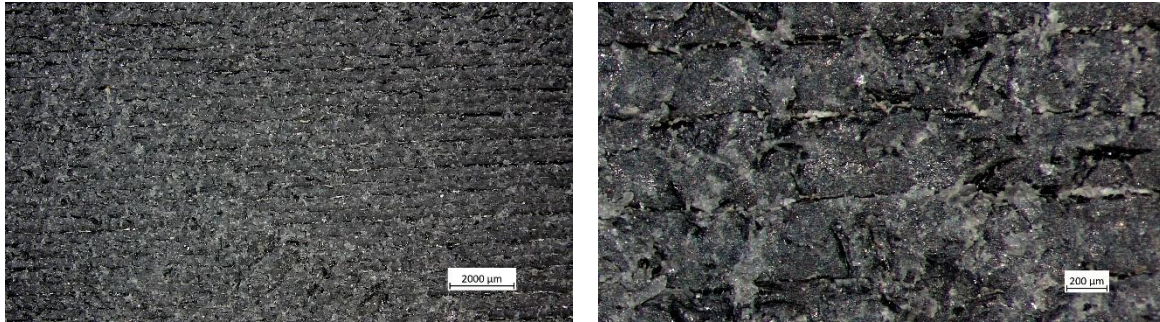


Figura 79. Imagen del microscopio de la probeta sometida a chorro abrasivo a 7 bares.

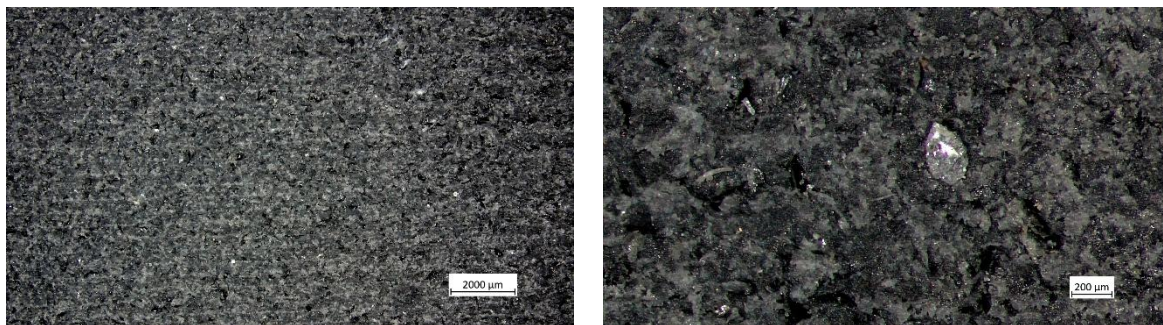


Figura 80. Imagen del microscopio de la probeta sometida a chorro abrasivo a 8 bares.

Las imágenes están posicionadas en orden ascendente de la presión del chorro abrasivo al que fueron sometidas. Se observa como en el primer par de imágenes se mantiene la trayectoria lineal visible. En el caso del segundo y tercer par de imágenes, se aprecia dicha trayectoria en la imagen de menor aumento mientras que en la otra no se llega a apreciar con claridad.

En cuanto a la imagen de mayor aumento para el caso de una presión de 8 bares se observa como dicha trayectoria ya no se percibe. Además, se destaca la presencia de una esfera de vidrio incrustada en la superficie de la pieza.

5.3.2. Resultados microgeométricos obtenidos de la Alicona

A continuación, se muestran las gráficas (Figura 81, Figura 82 y Figura 83) obtenidas de los datos de la superficie de las piezas sometidas a mecanizado por chorro abrasivo.

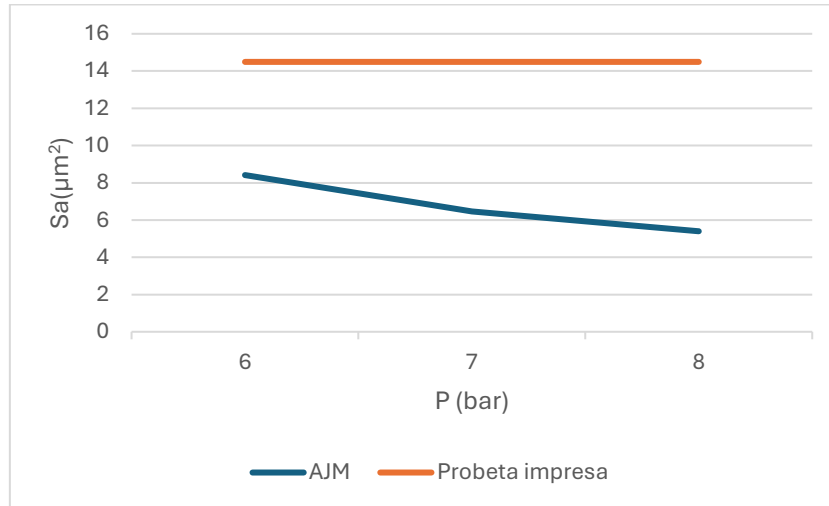


Figura 81. Sa en función de la presión

En este caso, los valores de la altura media aritmética mejoran los proporcionados por la probeta impresa. En cuanto a la influencia de la presión del aire con respecto a dicho parámetro observamos que a mayor presión se obtienen valores menores de altura media aritmética. Por tanto, una mayor presión ayuda a generar una superficie más uniforme.

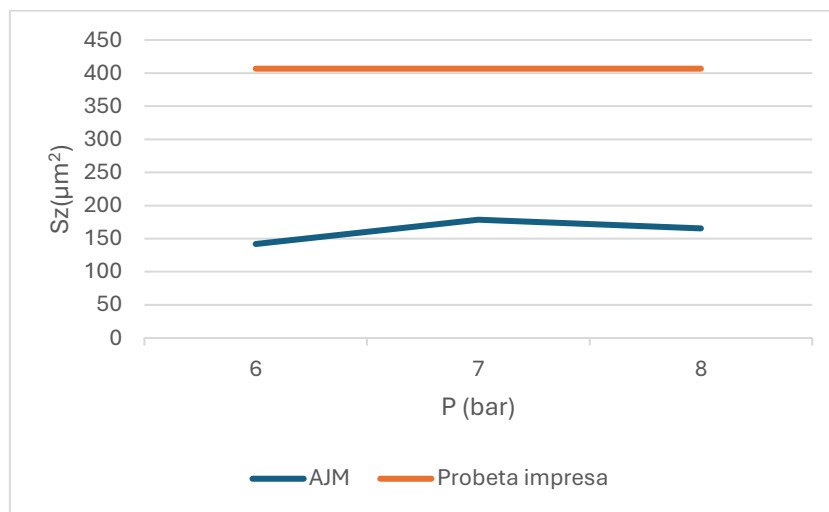


Figura 82. Sz en función de la presión.

Al igual que en el caso anterior, se mejoran los valores en comparación con la probeta impresa. Este parámetro representa la distancia entre el pico más alto y el valle más profundo y, aunque en este caso no se aprecia una tendencia clara en función de la presión del aire es posible que se obtengan dichos resultados debido a lo siguiente. A una presión de 6 bares se disminuye la diferencia entre picos y valles. A 7 bares, el aumento del valor de podría deberse a la aparición de un valle más profundo, posiblemente expuesto o generado por la acción más agresiva del chorro abrasivo. Finalmente, ante un valor de 8 bares, con una presión de 8 bar, podrían estarse reduciendo los picos más prominentes, mientras que también se generan nuevos valles, lo que explicaría una mejora respecto a 7 bar, pero sin llegar a los niveles observados a 6 bar.

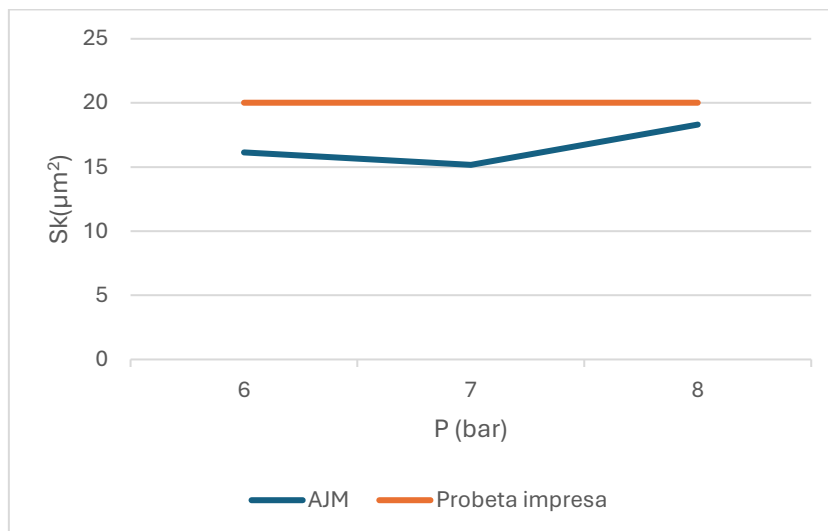


Figura 83. Sk en función de la presión.

Finalmente, los valores obtenidos de Sk también son mejores que los ofrecidos por la probeta impresa, pero, al igual que en el caso de la altura máxima, no se destaca ninguna influencia clara en función de la presión empleada. El parámetro Sk representa la profundidad de la superficie sin tener en cuenta los picos más altos ni los valles más profundos. Por ello, tiene un comportamiento distinto al visto en la Figura 82, y un comportamiento más próximo al de la gráfica de Sa.

De forma similar a lo observado en el caso del fresado, en la mayoría de los casos analizados se aprecia una mejora en los valores de los parámetros Sa, Sz y Sk cuando se comparan con los obtenidos de la probeta impresa con mayor calidad superficial, es decir, aquella fabricada con una menor altura de capa.

5.5. Análisis superficial tras pulido por vapores de acetona

Los datos obtenidos para este apartado, tanto de la probeta impresa como de las probetas tratadas, provienen del Trabajo de Fin de Grado: Influencia de la aplicación de acetona como post operación en la mojabilidad del ABS en piezas obtenidas por fabricación aditiva por FFF [84].

5.5.1. Resultados microgeométricos obtenidos de la Alicona

A continuación, se muestran los gráficos obtenidos de las probetas expuestas a los vapores de la acetona (Figura 84, Figura 85 y Figura 86).

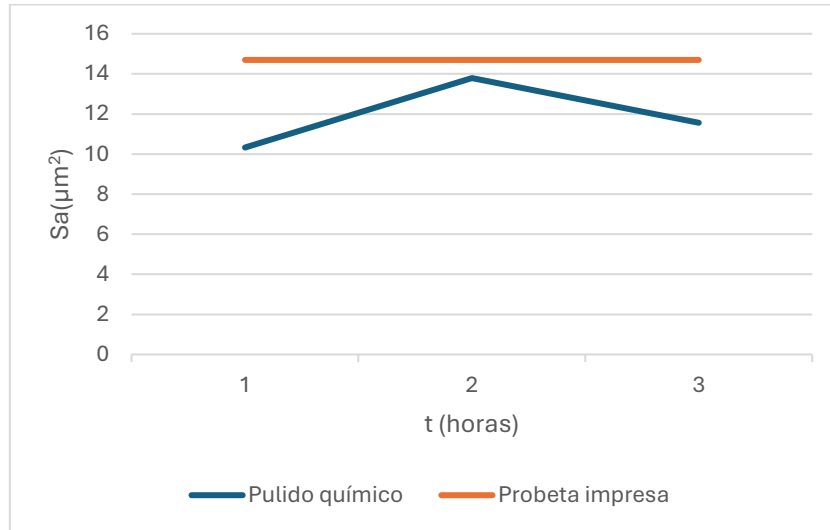


Figura 84. Altura media aritmética en función de las horas de exposición.

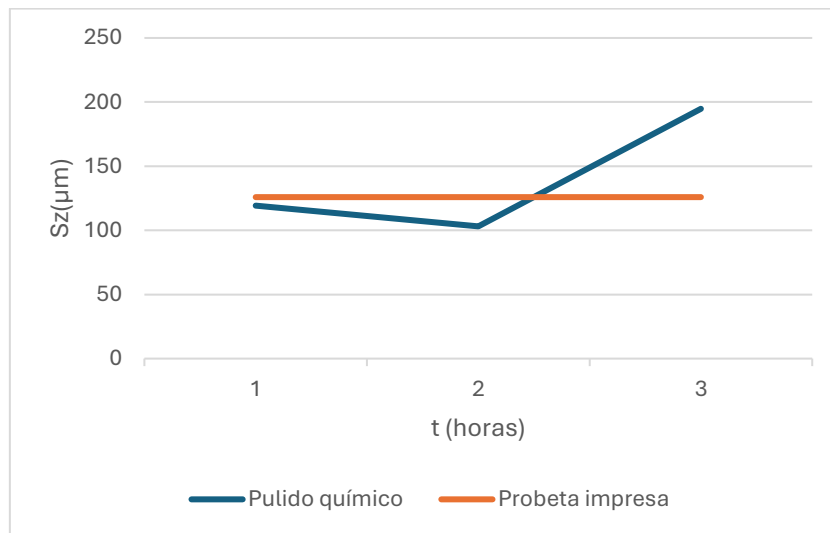


Figura 85. Altura máxima en función de las horas de exposición.

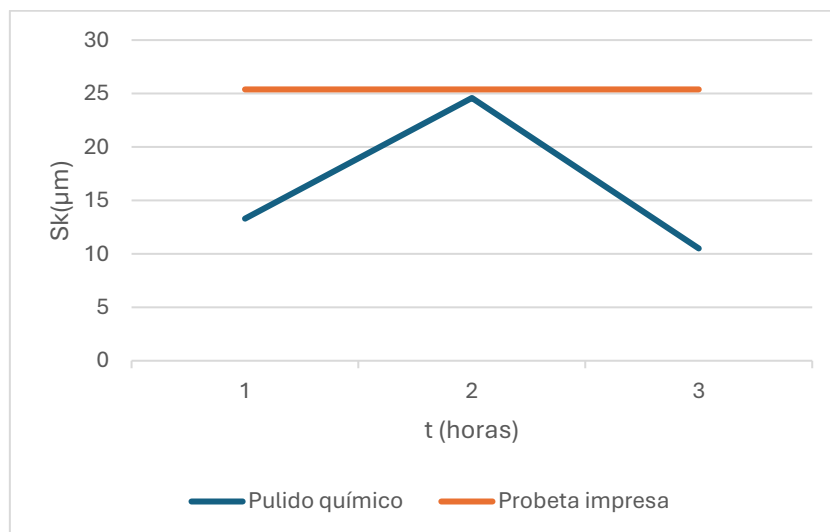


Figura 86. Profundidad de la rugosidad del núcleo en función de las horas de exposición.

De los resultados obtenidos tras el pulido químico, se observa como el comportamiento de las rectas obtenidas para los parámetros S_a y S_k son parecidas. En ellas se obtiene el peor resultado tras las 2 horas y el mejor resultado tras 3 y 1 horas de exposición respectivamente, aunque para ambos casos dichos valores son parecidos.

En cuando a los valores de S_z , se obtienen los mejores resultados tras la exposición de 2 horas y el peor resultado, siendo este mayor que el obtenido por la pieza impresa, es el obtenido tras una exposición de 3 horas.

A diferencia de los otros métodos de postprocesado analizados, el pulido químico es el que presenta mejoras más limitadas. En concreto, el valor de S_a no muestra mejoras respecto a la probeta impresa, mientras que S_z sí se reduce, aunque parte de un valor menor inicialmente. Por su parte, el parámetro S_k mejora únicamente en las exposiciones de 1 y 3 horas. Además, en este caso no se obtienen beneficios en cuanto a la reducción de los tiempos de fabricación, ya que el proceso de exposición a vapores requiere duraciones prolongadas.

5.6. Comparativa de los resultados obtenidos

Una vez analizados los resultados individualmente se procede a comparar dichos resultados entre ellos con el fin de conocer las diferencias entre los acabados ofrecidos por los diferentes postprocesados.

Inicialmente, se realiza una comparativa de las superficies a nivel macrogeométrico. En la Figura 87 se observan las geometrías de las algunas de las superficies analizadas.

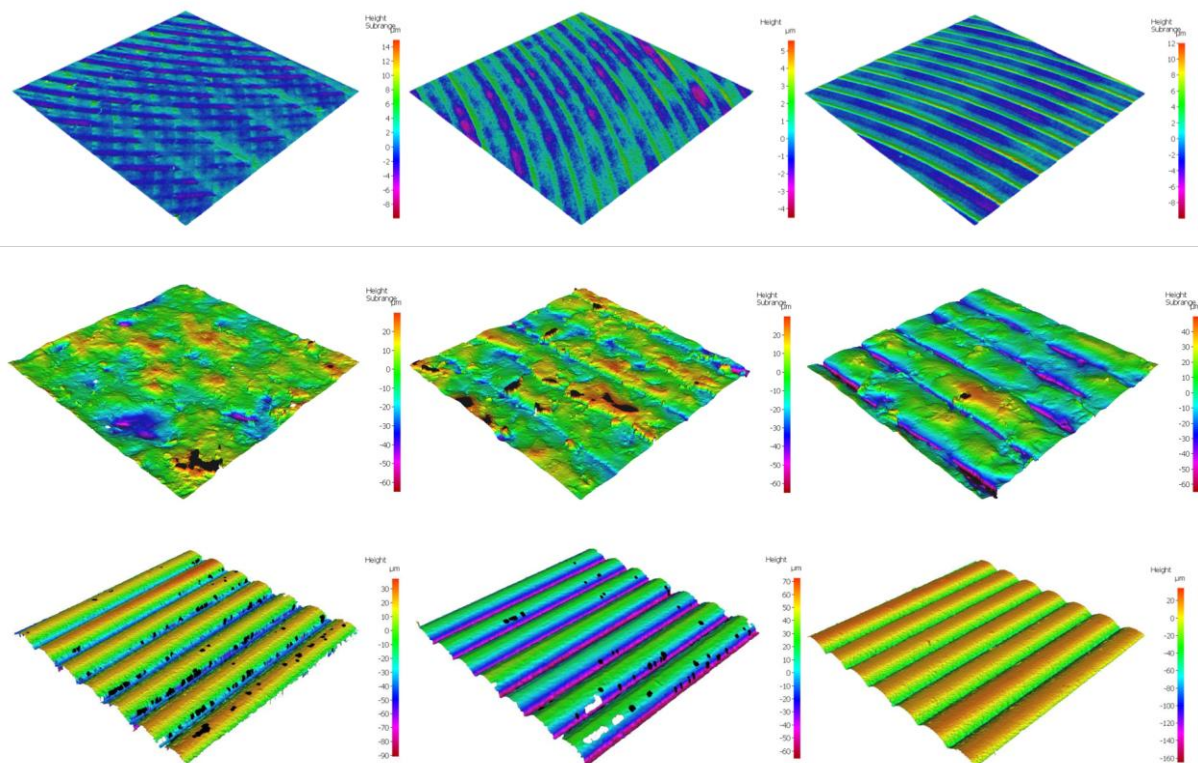


Figura 87. Comparativa macrogeométrica.

La figura anterior únicamente nos ofrece información a nivel macrogeométrico, no se deben comparar los colores que se ven en dichas imágenes ya que pertenecen a escalas distintas. Observamos los diferentes acabados que ofrecen los postprocesados. El fresado deja la huella de la herramienta sobre la superficie, mientras que el proceso de AJM deja una superficie irregular al emplear presiones de aire elevadas. Cuando estas son menores se mantiene la trayectoria de impresión al igual que para el caso del pulido químico.

En cuanto a los valores cuantitativos obtenidos observamos que, para los tres procesos, los datos de S_a y S_k muestran tendencias parecidas mientras que los valores de S_z siguen otro patrón.

Los valores menores de altura aritmética se obtienen mediante el proceso de fresado para algunas condiciones de mecanizado, en específico, ante valores pequeños de velocidad de avance o bien a un empañe del 100%. Aunque, es cierto que ante otros parámetros de corte se obtienen peores acabados y, por tanto, es más recomendable el mecanizado por chorro abrasivo. En general, el pulido químico muestra mejora, pero menor en comparación con las otras operaciones de postprocesado.

En cuanto a los valores de S_z obtenidos, los mejores los ofrece el mecanizado por chorro abrasivo, mientras que, como se ha comentado anteriormente, mediante el fresado no se obtienen mejoras considerables y, el proceso de pulido químico, mejora dicho valor, pero en menor medida.

Finalmente, el comportamiento de los valores de S_k es parecido a los de S_a . Es decir, se obtienen mejores resultados en el proceso de fresado, sobre todo ante empañe del 100% o velocidad de avance de 0,1 mm/rev. Para el postprocesado por AJM o pulido químico, se obtienen mayores cambios en este último tras 1 y 3 horas de exposición. La mejora ofrecida por el proceso de mecanizado por chorro abrasivo es menor en comparación con el resto de postprocesados.



6. Conclusiones

En este apartado se recogen las principales conclusiones derivadas de los ensayos realizados y del análisis de resultados obtenidos tras la aplicación de distintas técnicas de postprocesado sobre probetas fabricadas mediante Fabricación por Filamento Fundido (FFF). Estas conclusiones se estructuran según la técnica empleada, evaluando la eficacia de cada una en la mejora de la calidad superficial y estableciendo una comparación entre ellas.

En primer lugar, se exponen las conclusiones obtenidas de la operación de fresado:

1. Los resultados obtenidos con empañes del 50 % y 75 % solo han podido registrarse en oposición, ya que en concordancia se ha producido la fractura de las probetas debido a la delaminación entre capas. Este comportamiento se atribuye a las fuerzas de corte generadas durante el mecanizado, que tienden a levantar el material.
2. En las configuraciones en las que ha sido posible tomar medidas (empañe 100 % y 50–75 % en oposición), se ha observado que ante un mayor porcentaje de empañe se obtienen mayores temperaturas durante el mecanizado, esto afecta en los resultados siendo un beneficio en el caso del Sa y el Sk.
3. El fresado ha permitido cierta mejora en la calidad superficial respecto a la muestra sin postprocesar, sobre todo ante una velocidad de avance de 0,1 mm/rev o un empañe del 100%
4. Los resultados de este postprocesado han sido más variables, en función de los parámetros de corte, y, en algunos casos, inferiores a los de otras técnicas evaluadas.

En segundo lugar, se encuentran las conclusiones del proceso de mecanizado por chorro abrasivo:

5. El AJM ha mostrado una alta efectividad en la mejora de la rugosidad superficial. En todos los casos se ha observado una reducción significativa de los parámetros Sa y Sz en comparación con la probeta impresa sin postprocesado.
6. Existe una relación directa entre el aumento de presión y la mejora del acabado superficial, sin que se hayan observado daños estructurales en las probetas tras el tratamiento.

En tercer lugar, se muestran las conclusiones obtenidas del pulido químico por vapores de acetona:

7. El pulido químico ha proporcionado mejoras notables en la superficie tras una y tres horas de exposición, siendo estas las condiciones más favorables observadas.
8. Sin embargo, exposiciones de 2 horas han resultado en una degradación del acabado superficial, acompañada de un aumento de los valores de rugosidad.

Como se ha comentado, los mejores resultados se han obtenido para configuraciones específicas del proceso de fresado. El pulido químico ha mostrado por lo general mejoras



menores además de tiempos de postprocesado mayores, dejando como segunda opción el mecanizado por chorro abrasivo.

El uso de técnicas de postprocesado ha permitido mejorar la calidad superficial sin necesidad de reducir el espesor de capa durante la impresión, lo cual contribuye a una reducción de los tiempos de fabricación mejorando la productividad y eficiencia del proceso.



7. Referencias

- [1] L. Barbieri and M. Muzzupappa, “Performance-Driven Engineering Design Approaches Based on Generative Design and Topology Optimization Tools: A Comparative Study,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 4, Feb. 2022.
- [2] A. Al Rashid, W. Ahmed, M. Y. Khalid, and M. Koç, “Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications,” Nov. 01, 2021, *Elsevier B.V.*
- [3] “Las 7 categorías de la Manufactura Aditiva.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://blog.laminasyaceros.com/blog/las-7-categor%C3%ADas-de-la-manufactura-aditiva>
- [4] “Enabling New Approaches: Recent Advances in Processing Aliphatic Polycarbonate-Based Materials.” Accessed: Jun. 02, 2025. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ange.202307507>
- [5] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, and M. Khorasani, “Additive Manufacturing Technologies.”
- [6] “Material Jetting o inyección de material.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/la-impresion-3d-polyjet23072015/#!>
- [7] “Introducción a la inyección de material.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/material-jetting>
- [8] R. Singh *et al.*, “Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 3058–3070. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.635.
- [9] “Fusión del lecho de polvo.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/powder-bed-fusion>
- [10] “Comprender la tecnología de fusión por lecho de polvo.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.protolabs.com/es-es/recursos/sugerencias-de-diseno/comprender-la-tecnologia-de-fusion-por-lecho-de-polvo/#:>
- [11] T. Grzegorz Gawet, “Review of additive manufacturing methods,” *Solid State Phenomena*, vol. 308, pp. 1–20, 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.308.1.
- [12] “Apostando por el Binder Jetting para la Fabricación Aditiva de Producción .” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <http://es.insta3dm.com/info/betting-on-binder-jetting-for-production-addit-71999753.html>
- [13] “Laminación de láminas.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/sheet-lamination>

- [14] “Comparación de la fabricación aditiva frente a la fabricación sustractiva.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.rapiddirect.com/es/blog/additive-vs-subtractive-manufacturing/>
- [15] “Qué es la deposición de energía focalizada o directa.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://actualidad.aidimme.es/2023/06/15/que-es-la-deposicion-de-energia-focalizada-ded/>
- [16] “Deposición de energía dirigida.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/directed-energy-deposition>
- [17] Alba Cano-Vicent, Murtaza M. Tambuwala, Sk. Sarif Hassan, and Debmalya Barh, “Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects,” in *Additive Manufacturing*, 2021.
- [18] “FDM-FFF o modelado por deposición fundida.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://todo-3d.com/fdm-fff-modelado-deposicion-fundida/?v=7ee12bda8e7f>
- [19] “7 ventajas de la fabricación aditiva Addvance3D”, Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://addvance3d.com/7-ventajas-de-la-fabricacion-aditiva/>
- [20] “Fabricación aditiva: descubre 8 de sus principales ventajas”, Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.asidek.es/blog-8-ventajas-de-la-fabricacion-aditiva/>.
- [21] “Fabricación aditiva: ventajas y desventajas de este proceso. Recuperado de”, Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.ferrotall.com/es/fabricacion-aditiva-ventajas-y-desventajas-de-este-proceso/>
- [22] “Fabricación aditiva: ventajas y desventajas de este proceso. Herramienta de futuro”, Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.ferrotall.com/es/fabricacion-aditiva-ventajas-y-desventajas-de-este-proceso/>.
- [23] M. Srivastava, S. Rathee, V. Patel, A. Kumar, and P. G. Koppad, “A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues,” Nov. 01, 2022, *Elsevier Editora Ltda*. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.10.015.
- [24] “¿Cómo está creciendo el mercado de los filamentos 3D?” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/mercado-de-filamentos-3d-100620192/>
- [25] “Tipos de filamentos para impresoras 3D.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/types-3d-printer-filaments>

- [26] K.G. Budinski and M. K. Budinski, *Engineering Materials: Properties and Selection*, Pearson. 1989.
- [27] “¿Que es la metrología?” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.cem.es/es/divulgacion/preguntas-frecuentes/es-metrologia>
- [28] “El Sistema Internacional de Unidades, SI.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.cem.es/es/cem/metrologia/sistema-internacional-unidades-si>
- [29] “Definición de tolerancia RAE.”, Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://dle.rae.es/tolerancia>
- [30] “Tolerancias Dimensionales.” Accessed: May 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.imh.eus/es/imh/comunicacion/docu-libre/medicion-tridimensional/resultados/tolerancias/dimensionales#:~:text=En%20la%20UD%20Metrolog%C3%ADa%20defin%C3%ADamos,plano%20seg%C3%BAn%20la%20cota%20nominal.>
- [31] “Tolerancias Dimensionales ISO 286.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: https://www.elesa-ganter.es/siteassets/technical/DIN_ISO_286_ISO_Fundamental_Tolerances_ES.pdf
- [32] “Dimensioning and Tolerancing.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://tajhizkala.ir/doc/ASME/ASME%20Y14.5-2009-03.pdf>
- [33] “Tolerancias Geométricas según ISO y ANSI.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: http://educatronica.net/PG_ME/Vinueza_Ivan/Lexias/Lexia_P_3.htm
- [34] “Explicación de la rugosidad superficial: Ra, Rq, Rz y más.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://richconn.com/es/surface-roughness/>
- [35] “Parámetros de rugosidad del área.” Accessed: May 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/sq-root-mean-square-height.jsp>
- [36] M. Mani, A. G. Karthikeyan, K. Kalaiselvan, P. Muthusamy, and P. Muruganandhan, “Optimization of FDM 3-D printer process parameters for surface roughness and mechanical properties using PLA material,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Jan. 2022, pp. 1926–1931.
- [37] J. Giri, A. Chiwande, Y. Gupta, C. Mahatme, and P. Giri, “Effect of process parameters on mechanical properties of 3d printed samples using FDM process,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 5856–5861.
- [38] H. R. , Vanaei et al., “Comparative study of PLA and ABS in terms of surface quality and mechanical properties,” *Polymers (Basel)*, 2021.

- [39] J. R. Dizon et al., “Effect of Cooling Rate on Residual Stress and Warpage of FDM Printed ABS Parts,” *Addit Manuf*, 2018.
- [40] R. Matsuzaki et al., “Investigation on Surface Roughness of Carbon Fiber-Reinforced FDM 3D Prints,” *Compos Struct*, 2019.
- [41] P. M. Pandey and P. Kumar, “Effects of Process Parameters on Surface Roughness, Dimensional Accuracy and Printing Time in 3D Printing,” 2020.
- [42] S. Nath et al., “Geometrical Factors Influencing Surface Quality of 3D Printed Parts: A Comprehensive Review,” *J Manuf Process*, 2020.
- [43] A. Boschetto and L. Bottini, “Influence of Part Geometry and Build Orientation on Surface Roughness in FDM Process,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015.
- [44] A. Townsend et al., “Surface Quality in Additive Manufacturing: The Impact on Functional Requirements,” *Addit Manuf*, 2016.
- [45] B. Mueller, “Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing,” *Assembly Automation*, vol. 32, no. 2, pp. 151–154, 2012.
- [46] A. Mathew et al., “Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts,” Dec. 01, 2023, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s40964-022-00391-7.
- [47] M. L. Dezaki, M. K. A. Mohd Ariffin, and M. I. S. Ismail, “Effects of CNC machining on surface roughness in fused deposition modelling (FDM) products,” *Materials*, vol. 13, no. 11, Jun. 2020.
- [48] N. N. Kumbhar and A. V. Mulay, “Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review,” *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 99, no. 4, pp. 481–487, Aug. 2018.
- [49] M. R. Fernandez-Vicente and J. C. Gañán-Calvo, “Solvent-based post-processing of 3D-printed polymers: Impact on surface roughness and mechanical properties,” *Mater Des*, 2016.
- [50] N. Jayanth, K. Jaswanthraj, S. Sandeep, N. H. Mallaya, and S. R. Siddharth, “Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA,” *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 123, Nov. 2021.
- [51] F. Olaoye, A. Gracias, and P. Broklyn, “Integrating Additive and Subtractive Processes Hybrid Manufacturing: Integrating Additive and Subtractive Processes,” 2024.

- [52] “Operaciones de fresado.” Accessed: Jun. 01, 2025. [Online]. Available: https://isa.umh.es/asignaturas/tf/Tema9_2.pdf
- [53] “CNC 12 tipos de operaciones de fresado: una explicación detallada.” Accessed: Jun. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.rapiddirect.com/es/blog/types-of-milling-operations/>
- [54] “Plastics Recycling Europe. (2021). The benefits of recycled plastics. Recuperado de <https://www.plasticsrecyclingeurope.com/>.”
- [55] “Factores de corte en el fresado.” Accessed: Jun. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos104/factores-corte-fresado/factores-corte-fresado2>
- [56] “Herramientas de fresado.” Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: <https://guehring.com/es/productos/herramientas-de-fresado/>
- [57] “Herramientas de corte para plásticos y polímeros,” Maquinaria internacional. Accessed: Nov. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.maquinariainternacional.com/herramientas-de-corte-para-plasticos-y-polimeros/>
- [58] “¿Cuáles son los seis tipos comunes de fresas que se utilizan en el mecanizado de piezas de precisión?” Accessed: Jun. 01, 2025. [Online]. Available: <https://want.net/es/what-are-the-six-common-types-of-milling-cutters-used-in-precision-parts-machining/>
- [59] Mikell P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*. Hoboken, Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [60] J. W. G. Song and J. H. L. C. Zhao et al., “Chemical Vapor Smoothing of 3D Printed Polymer Parts: A Review,” *Addit Manuf*, vol. 38, 2021.
- [61] S. Maidin, F. Bin Ramli, and M. S. Bin Kasim, “Surface finishing of FDM-fabricated parts using a chemical treatment process,” *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2017.
- [62] P. A. Stokes and M. A. Kotlowitz, “Development of an Automated Post-Processing System for Surface Finishing of FDM Parts Using Vapor Smoothing,” *Procedia Manuf*, 2019.
- [63] T. K. Zatezalo and T. W. Simpson, “Surface smoothing of 3D-printed polymer parts with acetone vapor: Towards process repeatability and geometry independence,” *Addit Manuf*, 2020.
- [64] M. L. Shofner and T. K. Zatezalo, “Limitations of chemical vapor smoothing for polymer parts produced via Fused Deposition Modeling,” *Polym Test*, 2019.

- [65] Z. Liu, H. Wang, and G. Hou, "Dimensional accuracy and deformation of FDM parts treated with chemical vapor smoothing," *J Mater Process Technol*, 2018.
- [66] A. Petrovic and V. Haro, "Safety considerations in post-processing of 3D printed polymer parts using chemical solvents," *Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2020.
- [67] Y. Hu and X. Chen, "Improving surface quality of FDM parts using a chemical treatment process," *Rapid Prototyp J*, 2017.
- [68] A. B. Laari, J. Järvinen, and H. Saarela, "Surface treatment of 3D-printed ABS parts using acetone solution: Evaluation of surface roughness and mechanical properties," *Surf Coat Technol*, 2016.
- [69] A. M. P. Lima, F. T. Barroso, and M. P. A. Oliveira, "Comparison of vapor and liquid acetone smoothing on the surface quality of 3D printed ABS parts," *Materials Science and Engineering: A*, 2020.
- [70] U. M. Dilberoglu, U. Yaman, and M. Dolen, "A comprehensive guide to milling techniques for smoothing the surfaces of 3D-printed thermoplastic parts," *Rapid Prototyp J*, Aug. 2024.
- [71] S. R. Sundara Bharathi, D. Ravindran, A. Arul Marcel Moshi, R. Rajeshkumar, and R. Palanikumar, "Multi objective optimization of CNC turning process parameters with Acrylonitrile Butadiene Styrene material," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 2042–2047. doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.055.
- [72] A. Boschetto, L. Bottini, and F. Veniali, "Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 41, pp. 92–101, Oct. 2016.
- [73] A. Uysal, M. Altan, and E. Altan, "Effects of cutting parameters on tool wear in drilling of polymer composite by Taguchi method," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 9–12, pp. 915–921, Feb. 2012.
- [74] A. B. Pop, A. M. Titu, S. Ravai-Nagy, and C. Daraba, "Influence of Machining Parameters on the Dimensional Accuracy of Drilled Holes in Engineering Plastics," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 11, Jun. 2024.
- [75] J. Y. Sheikh-Ahmad and J. P. Davim, "Cutting and Machining of Polymer Composites," in *Wiley Encyclopedia of Composites*, Wiley, 2012, pp. 1–10. doi: 10.1002/9781118097298.weoc061.
- [76] L. Riva, A. Fiorentino, and E. Ceretti, "Characterization of the Chemical Finishing Process with a Cold Acetone Bath of ABS Parts Fabricated by FFF," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022, pp. 77–89.

- [77] A. Colpani, A. Fiorentino, and E. Ceretti, "Characterization of chemical surface finishing with cold acetone vapours on ABS parts fabricated by FDM," *Production Engineering*, vol. 13, pp. 437–447, Jul. 2019.
- [78] F. B. J. Aguilar, J. Varela-Soriano, A. Medina-Castro, S. G. Torres-Cedillo, J. Cortes-Perez, and M. Jimenez-Martinez, "Post-fabrication treatment process for ABS printed parts using acetone vapor," *Progress in Additive Manufacturing*, 2024.
- [79] J. Nsengimana, J. Van der Walt, E. Pei, and M. Miah, "Effect of post-processing on the dimensional accuracy of small plastic additive manufactured parts," *Rapid Prototyp J*, vol. 25, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2019.
- [80] M. Leite, A. Varanda, A. R. Ribeiro, A. Silva, and M. F. Vaz, "Mechanical properties and water absorption of surface modified ABS 3D printed by fused deposition modelling," *Rapid Prototyp J*, vol. 24, no. 1, pp. 195–203, 2018.
- [81] A. P. Valerga Puerta, J. D. Lopez-Castro, A. Ojeda López, and S. R. Fernández Vidal, "On improving the surface finish of 3D printing polylactic acid parts by corundum blasting," *Rapid Prototyp J*, vol. 27, no. 7, pp. 1398–1407, 2021.
- [82] P. H. Shipway and D. P. Weston, "Thermal effects in blasting and erosion of polymeric materials," *J Mater Process Technol*, vol. 209, no. 20, pp. 6161–6167, Nov. 2009.
- [83] "Microesferas de vidrio." Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.coniex.com/microesfera-de-vidrio/>
- [84] C. Ortigosa, M. Fermín, and B. García, "TRABAJO DE FIN DE GRADO."
- [85] "Tapas para tarros de cristal." Accessed: Jun. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.amazon.es/mermelada-metalicas-repuesto-contenedores-alimentos/dp/B0B7XF9C53>
- [86] "Cámaras termográficas." Accessed: Jun. 01, 2025. [Online]. Available: <https://bcbingenieria.com/camaras-termograficas/>
- [87] "microscopio Zeiss." Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.ideal.de/preisvergleich/OffersOfProduct/6415381_-stemi-305-zeiss.html
- [88] "camara axiocam color 208." Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.zeiss.com/microscopy/es/productos/camaras/axiocam-105-color.html>
- [89] "Alicona InfiniteFocus SL." Accessed: Jun. 03, 2025. [Online]. Available: <https://zeppelinlusitania.com/alicon-a-infinite-focus-sl/>



- [90] “ISO 21920-2:2021. Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization, Ginebra, 2021.”
- [91] “What Is CNC Machining Surface Roughness? A Complete Guide.” Accessed: Jun. 13, 2025. [Online]. Available: https://geomiq.com/blog/cnc-machining-surface-roughness-guide/?utm_source=chatgpt.com
- [92] D. Blanco, E. M. Rubio, J. M. S. de Pipaón, and M. M. Marín, “Thicknesses/roughness relationship in mg-al-mg and mg-ti-mg hybrid component plates for drilled aeronautical lightweight parts,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 22, pp. 1–20, Nov. 2020.