



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Departamento de Ingeniería Civil, de materiales y Fabricación**  
**Área de Conocimiento de Ingeniería de Procesos de Fabricación**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

**COMPARATIVA DEL MECANIZADO DE PIEZAS OBTENIDAS  
POR FABRICACIÓN ADITIVA FFF EN DIFERENTES  
POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS**

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: D. Jose Pablo Sánchez Nieto

Tutor: D. Fermín Bañón García

Cotutor: D. Sergio Martín Béjar

MÁLAGA, Julio de 2.025



## Resumen

La fabricación aditiva comenzó a dar sus primeros pasos de la mano del japonés Hideo Kodama en 1980. Actualmente, esta tecnología de fabricación ha ido evolucionando hasta nuestros días, donde se ha establecido gozando de una fuerte importancia.

Esta tecnología ha tenido un gran impacto en la industria influyendo en el desarrollo de las piezas necesarias en diversos ámbitos y sectores industriales, puesto que este método de fabricación permite la obtención de geometrías complejas de una manera eficiente, junto a la facilidad para la personalización de los diferentes elementos obtenidos por este método de fabricación.

Es notable la influencia de estos procesos en diversos ámbitos pudiéndose encontrar piezas fabricadas por este método en automoción, logrando aligerar motores, al igual que en el sector aeronáutico, destacado por sus restrictivas tolerancias, así como en el sector médico donde se emplea para fabricar desde prótesis hasta tejidos biocompatibles.

Aunque existan diversos métodos de fabricación aditiva, uno de los más conocidos hoy en día es el de fused filament fabrication (FFF, fabricación por fundición de filamento), en el que el filamento se funde depositándose en varias capas hasta la obtención de la pieza requerida.

Es cierto que, variando los parámetros de impresión es posible la modificación de la superficie de las piezas impresas, no obstante, es interesante la idea de realizar operaciones de postprocesado, como el mecanizado, para mejorar el estado superficial de las piezas junto con la posibilidad corregir los posibles defectos originados en el proceso de fabricación.

Mejorar el acabado superficial y forma de los elementos fabricados mediante FFF es un aspecto importante en sectores ya mencionados, de aquí nace el interés sobre el estudio de la influencia de una operación de postprocesado sobre diferentes polímeros termoplásticos empleados en procesos de fabricación aditiva. Esta post operación busca mejorar la calidad a nivel macro y microgeométrico, pudiendo satisfacer las necesidades de sectores como el aeronáutico, la automoción o la biomedicina.

Concretamente, dentro del campo de los polímeros se emplearán en este estudio los siguientes polímeros, ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), HIPS (polímero de alta resistencia a impacto) y PETG (copoliéster de polietilentereftalato glicol).

En este Trabajo Fin de Grado se busca analizar el comportamiento de estos tres polímeros al ser sometidos a una operación de mecanizado. En este caso se empleará un torno en el que se les aplicarán las mismas condiciones de corte a los tres polímeros. El fin de aplicar el mismo proceso a las probetas radica en la posibilidad de comparar cómo se comportan los diferentes materiales y en qué aspectos se han modificado sus propiedades, permitiendo establecer comparaciones entre los distintos polímeros para poder clasificar los resultados y estudiar cómo reaccionan estos materiales a este tipo de operaciones.

## Palabras clave

Fabricación aditiva, FFF, mecanizado, cilindrado, velocidad de corte, velocidad de avance, rugosidad, redondez, rectitud, cilindridad, PETG, HIPS, ABS.



## Abstract

Additive manufacturing took its first steps in 1980, led by Japanese engineer Hideo Kodama. Today, this manufacturing technology has evolved and established itself as a highly important industry.

This technology has had a major impact on industry, influencing the development of parts required in various fields and industrial sectors, as this manufacturing method allows complex geometries to be obtained efficiently, together with the ease of customisation of the different elements obtained by this manufacturing method.

The influence of these processes in various fields is remarkable, with parts manufactured by this method being found in the automotive industry, where they make engines lighter, as well as in the aeronautical sector, notable for its restrictive tolerances, and in the medical sector, where it is used to manufacture everything from prostheses to biocompatible tissues.

Although there are various additive manufacturing methods, one of the best known today is fused filament fabrication (FFF), in which the filament is melted and deposited in several layers until the required part is obtained.

It is true that by varying the printing parameters it is possible to modify the surface of the printed parts, however, it is interesting to consider post-processing operations, such as machining, to improve the surface condition of the parts along with the possibility of correcting any defects originating in the manufacturing process.

Improving the surface finish and shape of elements manufactured using FFF is an important aspect in the sectors mentioned above, hence the interest in studying the influence of a post-processing operation on different thermoplastic polymers used in additive manufacturing processes. This post-operation seeks to improve quality at the macro and microgeometric levels, meeting the needs of sectors such as aeronautics, automotive and biomedicine.

Specifically, within the field of polymers, the following polymers will be used in this study: ABS (acrylonitrile butadiene styrene), HIPS (high impact polymer) and PETG (polyethylene terephthalate glycol copolyester).

This Final Degree Project seeks to analyse the behaviour of these three polymers when subjected to a machining operation. In this case, a lathe will be used to apply the same cutting conditions to the three polymers. The purpose of applying the same process to the test pieces is to compare how the different materials behave and in what ways their properties have changed, allowing comparisons to be made between the different polymers in order to classify the results and study how these materials react to this type of operation.

## Keywords

Additive manufacturing, FFF, machining, turning, cutting speed, feed rate, roughness, roundness, straightness, cylindricity, PETG, HIPS, ABS.



## Índice de contenido

Resumen.....	3
Índice de figuras.....	8
Índice de tablas.....	12
1. Objetivo .....	14
2. Fabricación aditiva .....	14
2.1 .....	16
Tecnologías presentes en la fabricación aditiva.....	16
2.3 Procesos FFF .....	21
2.4 Metrología.....	26
2.5 Procesos de mecanizado.....	32
2.6 Fabricación aditiva y mecanizado .....	42
3. Metodología .....	43
3.1 Fase 1: Elaboración de probetas.....	43
3.1.3 Modelado 3D .....	45
3.1.4 Impresión de las probetas .....	45
3.1.5 Caracterización premecanizado .....	47
3.2 Fase 2: Mecanizado.....	53
3.3 Postmecanizado .....	60
4. Resultados .....	61
4.1 Temperaturas.....	61
4.2 Acabado superficial .....	68
4.3 Desviaciones de forma .....	83
4.4 Variación de diámetro .....	95
4.5 Fuerzas de corte.....	99
4.6 Consumo.....	109
5. Conclusiones.....	112
6. Líneas futuras de investigación .....	114
7. Bibliografía.....	116

## Índice de figuras

Figura 1: evolución de publicaciones ScienceDirect .....	15
Figura 2: Evolución de Publicaciones en Web of Science .....	15
Figura 3: Mercado mundial de la fabricación aditiva de metales y polímeros de 2020 a 2023 y previsión para 2028 .....	16
Figura 4: Esquema proceso BJT [4] .....	16
Figura 5: Pieza fabricada mediante proyección de aglutinante [5].....	17
Figura 6: Esquema proceso DED [6] .....	17
Figura 7: Piezas fabricadas mediante procesos DED [8].....	18
Figura 8: Esquema proceso MJ [9].....	18
Figura 9: Esquema proceso PBF [11] .....	19
Figura 10 :Pieza fabricada mediante proceso PBF [14] .....	19
Figura 11: Esquema proceso SHL [1].....	20
Figura 12: Esquema proceso VPP [16].....	20
Figura 13: Pieza creada mediante proceso VPP [17] .....	21
Figura 14: Esquema proceso MEX [18] .....	21
Figura 15: orientación óptima para una pieza sometida a tracción. ....	23
Figura 16: soportes en voladizos [24] .....	24
Figura 17: Medidora de forma [66].....	29
Figura 18: representación Sa [37].....	31
Figura 19: Representación Sz [37] .....	31
Figura 20: Representación Sk [37].....	32
Figura 21 Movimientos del torno [46] .....	34
Figura 22: Torno paralelo .....	34
Figura 23: Operaciones de torneado [31].....	35
Figura 24: Geometría de la herramienta de corte .....	36
Figura 25: Influencia de la velocidad de corte sobre la vida de la herramienta [48] .....	37
Figura 26: Influencia de la velocidad de avance sobre la vida de la herramienta [48] .....	38
Figura 27: :Influencia de la velocidad de avance sobre la vida de la herramienta [48] .....	39
Figura 28: Fuerzas en el torno [50] .....	39
Figura 29: Evolución de Ra en función de los distintos parámetros de corte[54].....	41
Figura 30: Efectos de los parámetros de corte en a) fuerzas de corte b) rugosidad superficial [56].....	42
Figura 31: Esquemización del plan de trabajo.....	43
Figura 32: a) bobina de filamento ABS b) bobina filamento PETG c)bobina de filamento HIPS.....	44
Figura 33: Diseño de la probeta .....	44
Figura 34: Modelo 3D de la probeta.....	45
Figura 35: Probeta laminada .....	46
Figura 36: Impresora Bambulab X1C .....	46
Figura 37: Alicona InfiniteFocus SL .....	47
Figura 38 : Superficie digitalizada mediante equipo Alicona InfinteFocus SL.....	48
Figura 39: Bloque en V.....	48
Figura 40: Superficie digitalizada .....	49
Figura 41: Superficie de la probeta con y sin forma .....	49

Figura 42: Filtro seleccionado .....	50
Figura 43: Medidora de forma ACCRETECH modelo Rondcom Nex .....	50
Figura 44: a) Palpador      b) plato de garras.....	51
Figura 45: Menú "Inclinación rotación" .....	52
Figura 46: Rueda para el ajuste del plato de garras .....	52
Figura 47: Indicaciones en tiempo real de la medición.....	53
Figura 48: Perfiles obtenidos .....	53
Figura 49: Torno CNC EMCOTURN E45.....	54
Figura 50:Tolerancias de las herramientas de corte [57].....	54
Figura 51: Representación gráfica de la geometría de la herramienta [57].....	55
Figura 52: Dinamómetro.....	56
Figura 53: Probeta colocada .....	56
Figura 54: Cámara termográfica.....	57
Figura 55: Analizador de redes .....	58
Figura 56: Gráficas fuerzas de corte .....	58
Figura 57: Software cámara termográfica.....	59
Figura 58: Grafica de temperaturas máximas en función del tiempo.....	59
Figura 59: Parámetros registrados por el analizador.....	60
Figura 60: Pistola colocada .....	61
Figura 61: Temperaturas registradas al reducir el diámetro a 18 mm.....	62
Figura 62: Temperaturas registradas al reducir el diámetro a 16 mm.....	63
Figura 63: Evolución de la temperatura en función del tiempo para PETG ( $V_c = 200$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev) .....	64
Figura 64: Evolución de la temperatura en función del tiempo para ABS ( $V_c = 200$ m/min, $f = 0,2$ mm/rev) .....	64
Figura 65: Evolución de la temperatura en función del tiempo para HIPS ( $V_c = 200$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev) .....	64
Figura 66: Probeta PETG mecanizada ( $V_c = 200$ m/min, $f = 0,05$ mm/rev) .....	65
Figura 67: Diagrama de contorno de $T^a$ para PETG .....	66
Figura 68: Diagrama de contorno de $T^a$ para HIPS .....	66
Figura 69: Diagrama de contorno de $T^a$ para ABS .....	67
Figura 70: Valores de $S_a$ para cada probeta .....	69
Figura 71: Valores de $S_z$ para cada probeta .....	70
Figura 72: Valores de $S_k$ para cada probeta .....	70
Figura 73: a) probeta $V_c=500$ m/min y $f=0,05$ mm/rev b) probeta $V_c=50$ m/min y $0,02$ mm/rev .....	71
Figura 74: a) probeta $V_c=200$ m/min y $f=0,05$ mm/rev b) probeta $V_c=200$ m/min y $0,02$ mm/rev .....	71
Figura 75: Valores de $S_a$ para cada probeta .....	72
Figura 76: Valores de $S_z$ para cada probeta .....	72
Figura 77: Valores de $S_k$ para cada probeta .....	73
Figura 78: Probetas a) $V_c=50$ m/min , $f 0,05$ mm/rev    b) $V_c=50$ m/min, $f= 0,02$ mm/rev .	74
Figura 79: Probetas a) $V_c=200$ m/min , $f 0,05$ mm/rev    b) $V_c=200$ m/min, $f= 0,02$ mm/rev.....	74
Figura 80: Valores de $S_a$ para cada probeta .....	74
Figura 81:Valores de $S_z$ para cada probeta .....	75
Figura 82: Valores de $S_k$ para cada probeta .....	75
Figura 83: Probetas a) $V_c=50$ m/min , $f 0,05$ mm/rev    b) $V_c=50$ m/min, $f= 0,02$ mm/rev .	76

Figura 84: Probetas a) $V_c=200$ m/min , $f$ 0,05 mm/rev    b) $V_c=200$ m/min, $f= 0,02$ mm/rev.....	76
Figura 85: Diagrama de contorno de $S_a$ para PETG.....	78
Figura 86: Diagrama de contorno de $S_Z$ para PETG.....	80
Figura 87: Diagrama de contorno de $S_z$ para HIPS.....	81
Figura 88: Diagrama de contorno de $S_z$ para ABS.....	81
Figura 89: Diagrama de contorno de $S_k$ para PETG.....	82
Figura 90: Redondez en función de cada probeta de PETG .....	85
Figura 91: Costura probetas PETG.....	85
Figura 92: a)probeta mecanizada con $V_c=200$ m/min y $f=0,05$ mm/rev    b) evolución de la redondez .....	86
Figura 93: a)probeta mecanizada con $V_c=50$ m/min y $f=0,05$ mm/rev    b) evolución de la redondez .....	86
Figura 94: Rectitud en función de cada probeta de PETG .....	87
Figura 95: Cilindricidad en función de cada probeta de PETG .....	87
Figura 96: Evolución de la cilindridad.....	88
Figura 97: Redondez en función de cada probeta de ABS.....	88
Figura 98: Zona de costura .....	89
Figura 99: Rectitud en función de cada probeta de ABS.....	90
Figura 100: Superficie de la probeta ABS en bruto y de alta calidad .....	90
Figura 101: Superficie de la probeta ABS mecanizada con $V_c=50$ m/min y $f=0,05$ mm/rev.....	91
Figura 102: Cilindricidad para a) $V_c=50$ m/min, $f=0,05$ mm/rev    b) $V_c=200$ m/min, $f=0,2$ mm/rev .....	91
Figura 103: Cilindricidad en función de cada probeta de ABS .....	92
Figura 104: Redondez en función de cada probeta de HIPS.....	93
Figura 105: Costura generada en la probeta de alta calidad de HIPS.....	93
Figura 106: a)Probeta mecanizada con $V_c=50$ m/min y $f=0,05$ mm/rev    b) evolución de la redondez .....	94
Figura 107: Rectitud en función de cada probeta de HIPS .....	94
Figura 108: Cilindricidad en función de cada probeta de HIPS .....	95
Figura 109: Cilindricidad a) $V_c=50$ m/min, $f=0,05$ mm/rev    b) $V_c=50$ , $f=0,2$ mm/rev. ....	95
Figura 110: Desviación en cada probeta de PETG .....	97
Figura 111: a) Probeta $V_c=200$ m/min, $f=0,05$ mm/rev    b) probeta $V_c=50$ m/min, $f=0,25$ mm/rev.....	97
Figura 112: Desviación en cada probeta de ABS .....	98
Figura 113: Desviación en cada probeta de HIPS .....	99
Figura 114: Probeta HIPS con enredo de viruta .....	99
Figura 115: Valores registrados de $F_x$ .....	100
Figura 116: Valores registrados de $F_y$ .....	101
Figura 117: Valores registrados de $F_z$ .....	102
Figura 118: Valores registrados de la resultante.....	103
Figura 119 a): Diagrama de contorno de $F_y$ para PETG .....	105
Figura 119 b): Diagrama de contorno de $F_y$ para HIPS.....	105
Figura 119 c): Diagrama de contorno de $F_z$ para ABS .....	107
Figura 120: Consumo para $V_c$ 50 m/min y $f$ 0,05 mm/rev.....	111
Figura 121: Consumo para $V_c$ 50 m/min y $f$ 0,2 mm/rev.....	111
Figura 122: Consumo para $V_c$ 200 m/min y $f$ 0,05 mm/rev .....	111



Figura 123: Consumo para Vc 200 m/min y f 0,2 mm/rev ..... 111

## Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades HIPS.....	25
Tabla 2: Propiedades PETG .....	25
Tabla 3: Propiedades ABS.....	26
Tabla 4: Tolerancias de forma .....	28
Tabla 5: Tolerancias de orientación .....	28
Tabla 6: Tolerancias de localización .....	29
Tabla 7: Tolerancias de alabeo .....	29
Tabla 8: Calidad de tolerancia según aplicación .....	30
Tabla 9: Temperaturas de impresión.....	46
Tabla 10: Parámetros herramienta de corte [57] .....	55
Tabla 11: Parámetros empleados.....	55
Tabla 12: Parámetros para medir la temperatura .....	57
Tabla 13: Temperaturas registradas.....	62
Tabla 14: Análisis de varianza para la temperatura.....	65
Tabla 15: Expresiones obtenidas a partir del modelo .....	67
Tabla 16: Valores de rugosidad superficial.....	68
Tabla 17: Parámetros de interés ANOVA para Sa .....	77
Tabla 18: Expresiones obtenidas a partir del modelo para Sa .....	78
Tabla 19: Parámetros de interés ANOVA para Sz .....	79
Tabla 20: Expresiones obtenidas a partir del modelo para sz.....	80
Tabla 21: Parámetros de interés ANOVA para Sk .....	81
Tabla 22: Expresiones obtenidas a partir del modelo para Sk .....	82
Tabla 23: Valores de las desviaciones de forma estudiadas .....	84
Tabla 24: Desviación diametral.....	96
Tabla 25: Valores registrados para Fx .....	100
Tabla 26: Valores registrados para Fy .....	101
Tabla 27: Valores registrados de Fz .....	102
Tabla 28: Valores de la resultante de las fuerzas .....	103
Tabla 29: Parámetros de interés ANOVA para Fy .....	105
Tabla 30: Expresiones resultantes del modelo para Fy .....	106
Tabla 31: Parámetros de interés ANOVA para Fz .....	107
Tabla 32: Expresiones resultantes del modelo para Fz .....	108



## 1. Objetivo

Se busca estudiar la aptitud de piezas obtenidas por fabricación aditiva FFF de distintos polímeros termoplásticos, HIPS, ABS y PETG, ampliamente usados en la industria actual frente al mecanizado en un torno CNC.

El estudio está orientado al análisis de los cambios experimentados en cada material referentes al grado de acabado superficial y precisión dimensional observando los diferentes aspectos involucrados en el proceso, tales como la temperatura media y fuerzas experimentadas en el cilindrado de piezas obtenidas, empleando velocidades de corte y avance con valores pequeños y elevados.

Se busca además, minimizar el tiempo del proceso al realizar la combinación de operaciones FFF junto al mecanizado

## 2. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva se basa en el conjunto de tecnologías de fabricación que permiten la obtención de piezas complejas mediante procesos en los que se adhieren capas de material [1]. Estas tecnologías nacen con la función de elaborar rápidamente prototipos, siendo una evolución del prototipado rápido, esto permite una evaluación inicial del producto buscado de manera eficiente y detallada como sucede en otros procesos [2].

Aunque nacieran como evolución del prototipado rápido es importante quedarse únicamente con este fin, puesto que estas tecnologías han ido avanzando, mejorando la calidad de los productos fabricados tanto en acabado superficial como en tolerancias, adecuándose las piezas al producto final

La norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2022 define la fabricación aditiva como “Proceso de unión de materiales para fabricar piezas u objetos a partir de datos de modelos 3D generalmente capa a capa a diferencia de los métodos de fabricación mediante eliminación de material y conformado [3].

A continuación, se muestran unas gráficas donde se puede apreciar el crecimiento anual del número de publicaciones sobre la fabricación aditiva en bases de datos como “Science direct, **Figura 1**, y Web of Science, **Figura 2**. El aumento del número de publicaciones demuestra que ha habido un creciente interés a lo largo de los años por esta rama de la fabricación.

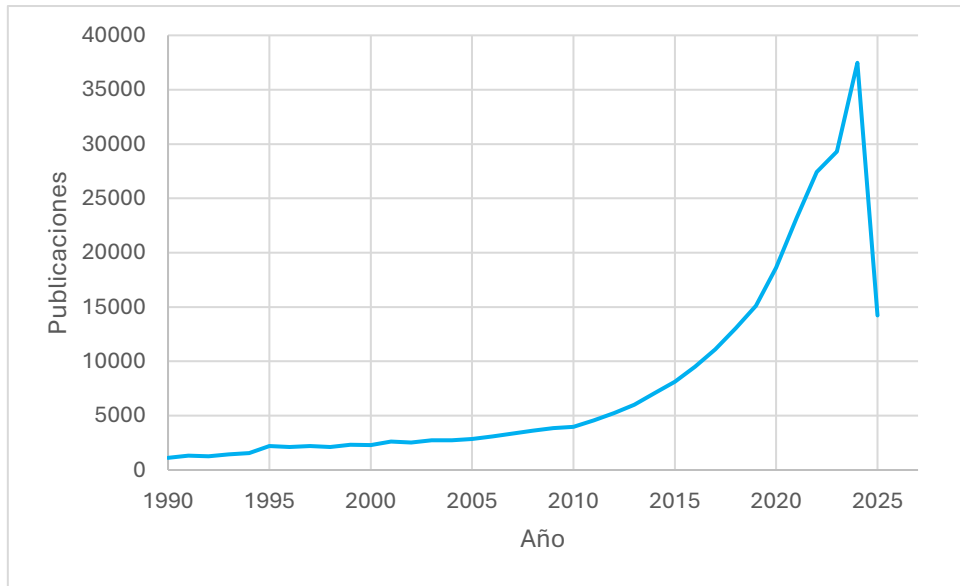


Figura 1: evolución de publicaciones ScienceDirect

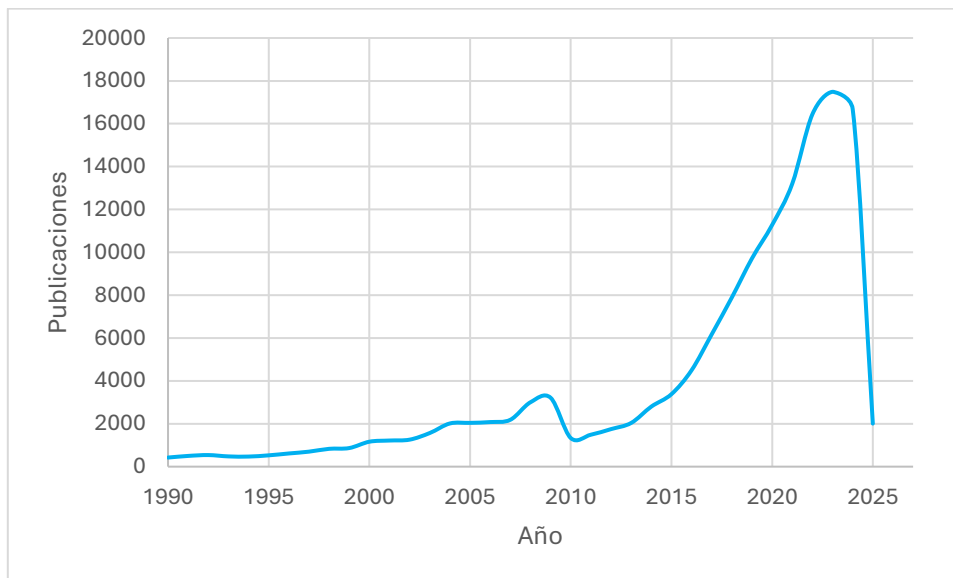


Figura 2: Evolución de Publicaciones en Web of Science

No tan solo es interesante observar el incremento del número de publicaciones de estos últimos años, también resulta conveniente visualizar un poco el mercado actual de la fabricación aditiva.

Son varios los informes que en los que se evalúa el crecimiento económico sucedido en esta rama de la fabricación. Según el informe publicado por Interempresas (Ampower), en el 2023 el mercado global de este sector contaba con un valor de 10.500 millones de euros, proveyéndose una tasa de crecimiento compuesto (TCAC) prevista del 13,9%, hasta 2028.

La misma empresa prevé que se generen unos ingresos de 20.000 millones de euros en 2028. En el siguiente gráfico se muestra el crecimiento de los ingresos de estos últimos años **Figura 3**.

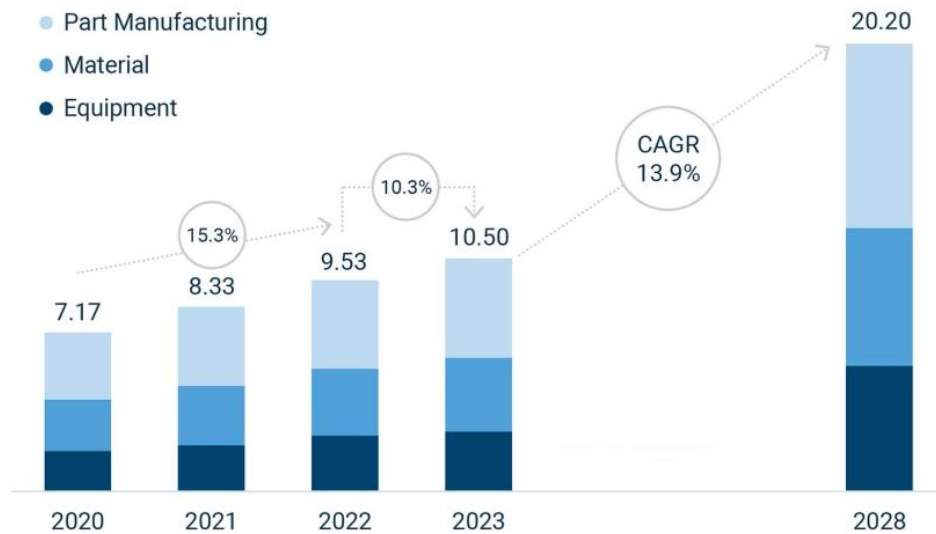


Figura 3: Mercado mundial de la fabricación aditiva de metales y polímeros de 2020 a 2023 y previsión para 2028

## 2.1 Tecnologías presentes en la fabricación aditiva

La norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2022, además de aportar la definición de fabricación aditiva muestra las distintas tecnologías presentes en la fabricación aditiva, las cuales son:

- Proyección de aglutinante, BJT (binder jetting):

“Proceso de fabricación aditiva en el que un agente líquido aglutinante se deposita de forma selectiva para unir materiales en polvo” [3]. En estos procesos se emplean dos materiales, uno de estos se encuentra pulverizado sobre el que incide un chorro del segundo material, el aglutinante es depositado por el cabezal de manera selectiva formando la primera capa. Una vez creada la plataforma donde se encuentra el material descende, repitiéndose este proceso hasta formar la pieza deseada. En la figura de a continuación, **Figura 4**, se muestra un esquema de las máquinas empleadas.

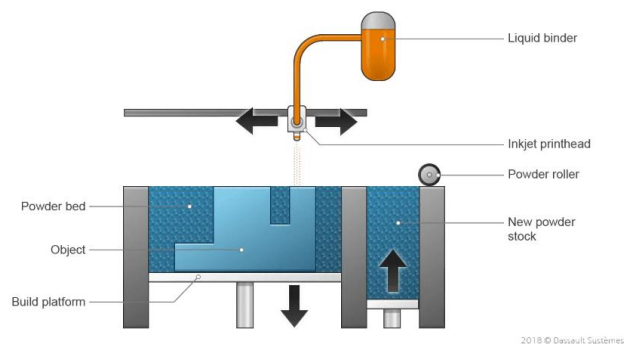


Figura 4: Esquema proceso BJT [4]

Esta tecnología permite emplear una amplia gama de materiales incluyendo materiales cerámicos, polímeros y algunos metales como el acero inoxidable, el tipo de aglutinante empleado dependerá del material que se emplee.

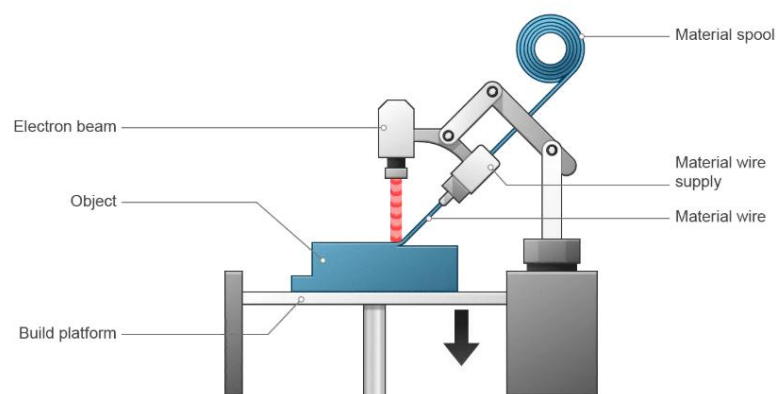
En este tipo de proceso las piezas obtenidas cuentan con gran porosidad, como se observa en la **Figura 5**, lo que puede conllevar a que se requieran complejos procesos de postprocesado para conseguir un buen acabado superficial.



*Figura 5: Pieza fabricada mediante proyección de aglutinante [5]*

Esta tecnología tiene como principal exponente la empresa ExOne, siendo esta líder del mercado, la cual colabora con empresas como Siemens o Ford.

- Deposición de energía focalizada, DED (directed energy deposition):  
“Proceso de fabricación aditiva en el cual se utiliza energía térmica focalizada para unir materiales mediante fusión, a medida que se deposita” [3]. El material de partida se encuentra en forma de hilo, fundiéndose este mediante un rayo de energía dirigida, comúnmente se emplea un láser o arco de plasma. Al igual que en el resto de las tecnologías de fabricación aditiva el material se deposita de forma selectiva, capa a capa, hasta que se completa la pieza [2]. En la figura de a continuación, **Figura 6**, se muestra un esquema de esta tecnología.



*Figura 6: Esquema proceso DED [6]*

Con esta técnica se pueden crear piezas usando como materia prima una lista de materiales en la que se incluyen polímeros, metales, materiales cerámicos y compuestos.

Pese a que esta tecnología se emplee principalmente para la fabricación de piezas con una geometría casi final, estos procesos se han expandido y se puede

encontrar en la reparación y restauración de piezas, además del texturizado, permitiendo aplicar un revestimiento poroso a las piezas [7].

Como se puede ver en la **Figura 7**, las piezas fabricadas no cuentan con un buen acabado superficial por lo que es común aplicarle un proceso de postprocesado.

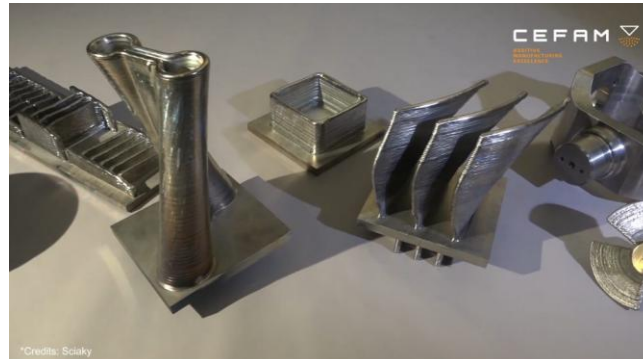


Figura 7: Piezas fabricadas mediante procesos DED [8]

Esta tecnología se puede encontrar en industrias como la aeroespacial, naval y automotriz [8].

- Proyección de material, MJT (material jetting):  
“Proceso de fabricación aditiva en el cual se depositan de forma selectiva gotas de materia prima” [3]. Para la fabricación de las piezas el cabezal deposita el material en estado líquido sobre la plataforma, una vez depositado el material, una fuente de radiación realiza el curado de las capas de material seleccionado, este proceso se puede asemejar a la impresión por inyección de tinta [2]. En la siguiente figura, **Figura 8**, se muestra un esquema de este proceso.

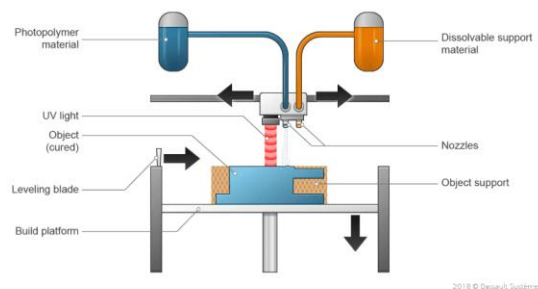


Figura 8: Esquema proceso MJ [9]

En este proceso se emplean como materia prima fotopolímeros líquidos. Además, estos procesos destacan por su alta precisión dimensional y baja rugosidad superficial, estas características han hecho que sea una tecnología interesante en sectores como la biomedicina, fabricación y aviación [10].

- Fusión de lecho de polvo, PBF (powder bed fusion):  
“Proceso de fabricación aditiva en el cual la energía térmica funde de forma selectiva ciertas zonas en un lecho de polvo” [3]. Para la fabricación de la pieza, en este proceso, se distribuye polvo en una capa, para generar una capa de material se puede emplear un láser o rayo de electrones para generar la adhesión entre los partículas [2]. En la **Figura 9** se muestra un esquema de estos procesos.

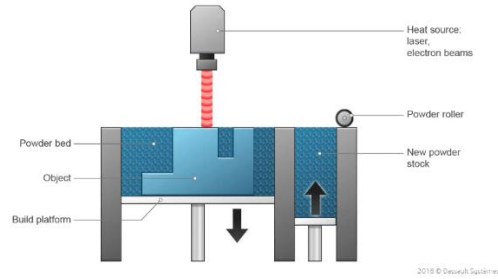


Figura 9: Esquema proceso PBF [11]

Cabe destacar que esta tecnología es la usada principalmente por muchas empresas a la hora de realizar piezas metálicas mediante la fabricación aditiva, pudiéndose emplear metales como el titanio, níquel y acero [12].

En la industria aeroespacial o automotriz se pueden encontrar elementos fabricados por este proceso, destacando en el mercado empresas como Trumpf o SLM Solutions [13]. En la siguiente figura, **Figura 10**, se muestra una pieza fabricada con esta tecnología.

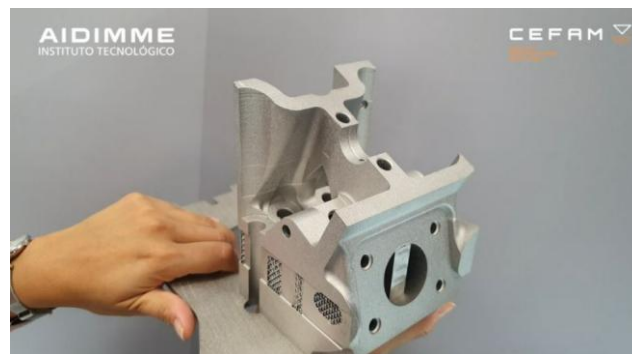


Figura 10 :Pieza fabricada mediante proceso PBF [14]

- Laminado de hojas, SHL (sheet lamination):  
“Proceso de fabricación aditiva en el cual el material en forma de láminas se une para formar una pieza” [3] . El punto de partida en estos procesos es una lámina. Cada lámina empleada corresponde a una capa completa y se va uniendo a la capa anterior, una vez adherida se realiza el corte dependiendo de la geometría de la capa que se esté realizando. Este proceso se vuelve a realizar hasta la finalización de la pieza [2]. En la **Figura 11**, se muestra el esquema de esta tecnología para facilitar su comprensión.

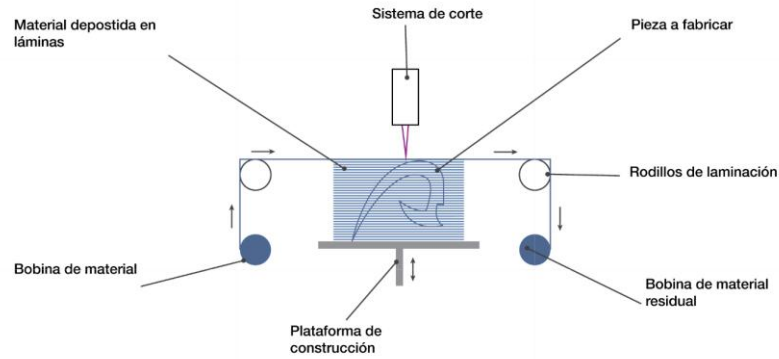


Figura 11: Esquema proceso SHL [1]

Se pueden emplear en esta tecnología desde polímeros hasta papel e incluso metales y materiales reciclados, siempre y cuando se encuentren en formato lámina.

Las piezas obtenidas por este método suelen requerir un postprocesado para obtener un buen acabado superficial.

En el ámbito industrial destacan empresas como Fabrisonic la cual produce piezas con este tipo de procesos para sectores como el aeroespacial o energético [15].

- Fotopolimerización en tanque o cuba, VPP (vat photopolymerization):  
“Proceso de fabricación aditiva en el que el fotopolímero líquido se cura de forma selectiva en una cuba mediante polimerización activada por luz” [3]. En estos procesos se consideran dos tipos de fuentes de energía para la fotopolimerización pudiendo emplearse un láser o una fuente de luz controlada. Para esclarecer este tipo de procesos se adjunta la **Figura 12**.

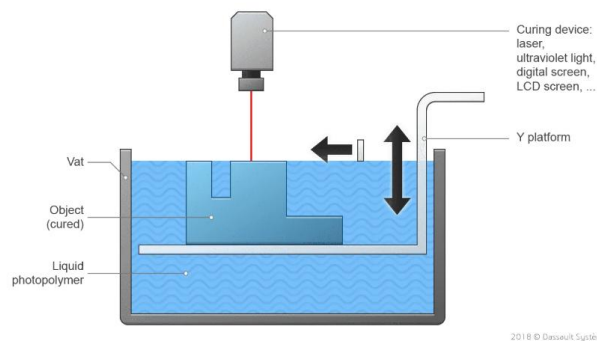


Figura 12: Esquema proceso VPP [16]

Los tipos de resinas que se emplean en este tipo de proceso son amplios, habiendo resinas biocompatibles, flexibles e incluso con componentes cerámicos.

Este tipo de proceso cuenta con gran flexibilidad pudiendo fabricarse desde prótesis como orejas artificiales, moldes para joyería, componentes flexibles para sensores e incluso impresiones nanométricas.

Las piezas obtenidas gozan de buen acabado superficial y de gran precisión dimensional, aunque en ciertas ocasiones necesitan ser sometidas a un proceso de curado. En la siguiente figura, **Figura 13**, se muestra una pieza fabricada con esta tecnología.



Figura 13: Pieza creada mediante proceso VPP [17]

- Extrusión de material, MEX (material extrusion):

“Proceso de fabricación en el cual el material se dispensa de forma selectiva a través de una boquilla o un orificio.” [3]. Coloquialmente se le conoce como impresión 3D, siendo esta la tecnología más extendida y en la que se basan los procesos FFF, en los que se extruye el material mediante una boquilla, el material es depositado de manera selectiva conformando las capas de la pieza. A continuación, en la **Figura 14**, se muestra una representación del proceso.

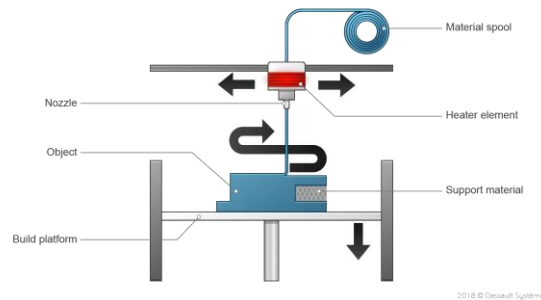


Figura 14: Esquema proceso MEX [18]

Esta tecnología primero se desarrolló para emplear filamento de polímeros como materia prima, más adelante se abrió el catálogo de materiales que se podían emplear encontrándose filamentos compuestos, los cuales nacen de la mezcla de un material, cerámico, por ejemplo, con un polímero, o arcillas entre estos.

En las piezas obtenidas por este tipo de proceso se pueden observar, en muchos casos a simple vista, las líneas de capa que componen la pieza, siendo esto negativo a la hora de conseguir un acabado superficial óptimo. Sin embargo, esto se puede corregir con un postprocesado.

Actualmente esta tecnología se encuentra presente en industrias como la automovilística y aeroespacial.

### 2.3 Procesos FFF

A continuación, una vez presentadas las diferentes tecnologías abarcadas el campo de la fabricación aditiva, se procederá a profundizar sobre los procesos de fabricación FFF (Fused Filament Fabrication).

Al mirar atrás en la historia de la impresión 3D es posible ver que las primeras apariciones se remontan a 1980 en Japón de la mano del DR. Hideo Kodama. Este ingeniero japonés desarrolló un método de producción por capas siendo el precursor de la estereolitografía

(SLA). No sería hasta 1988 cuando Scott Crump, cofundador de Stratasys Inc. Comenzaría a desarrollar una patente para la tecnología FFF. En 1992 comenzó la comercialización por parte de esta empresa de las primeras impresoras basadas en el proceso FFF, además en esta década se comenzaron a desarrollar los primeros softwares CAD destinadas a estas tecnologías.

La década de los 2000 fue importante en la evolución de esta tecnología puesto que en 2009 la patente pasó a ser de dominio público, facilitando así, el camino hacia la investigación e innovación, además esta liberación de patente produjo un aumento de la accesibilidad a las impresoras [19].

Actualmente destacan en el mercado a nivel industrial empresas como la citada anteriormente, Stratasys Inc y 3D Systems que fue pionera al igual que Stratasys Inc.

### 2.3.1 Descripción del funcionamiento

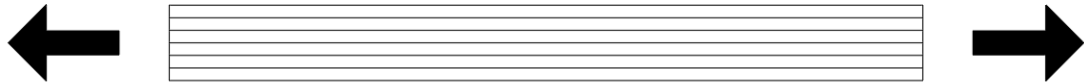
En el apartado anterior se mencionó el principio de funcionamiento de esta tecnología, el cual se basaba en la extrusión del material a través de una boquilla. Este material es depositado sobre la cama caliente de la impresora de manera selectiva hasta finalizar el proceso.

Se parte de un modelo físico, imagen o idea que se quiere llevar a cabo siendo necesario realizar una etapa previa de diseño de la pieza mediante programas CAD, como SolidWorks, en los cuales se define la geometría de la pieza. Este proceso de diseño se lleva a cabo en el caso que se parta de cero. Si se encontrase el caso en el que se parta ya de una pieza física, se podría generar su modelo 3D mediante un escáner.

Una vez generado el modelo el archivo se debe convertir al formato .STL o .3mf (Standard Tessellation Language y 3D Manufacturing Format, respectivamente). Es necesario realizar este cambio de formato ya que estos son los aceptados por las distintas impresoras disponibles en el mercado. Estos archivos representan la geometría del elemento a imprimir mediante una malla de triángulos, a mayor número de triángulos mayor será la definición de la malla. Cuanto mayor sea el número de triángulos de la malla mayor será la resolución, aunque esto conlleva un aumento de tiempo de procesado [1], [20].

Por último, una vez que se tiene el archivo en el formato adecuado se debe abrir este con un laminador o (slicer en inglés). Este programa se encarga de transformar el modelo 3D a lenguaje máquina, GCODE, este será el código que usará la impresora para poder fabricar el objeto requerido [21]. Es importante destacar que antes de generar el GCODE se deben definir los parámetros necesarios para una correcta impresión, estos se muestran a continuación:

1. Orientación de la pieza: este parámetro puede afectar a la calidad de la impresión, ya que la precisión de las impresoras puede variar dependiendo del eje. Sin embargo, la orientación de la pieza influye en la resistencia de las piezas ya que este tipo de piezas son anisótropas. Para ejemplificar esto supongamos que tenemos una pieza que trabajaría a tracción, la orientación óptima sería aquella en la que las líneas que conforman las capas estén dispuestas de manera longitudinal al eje, como se ve en la **Figura 15**.



*Figura 15: orientación óptima para una pieza sometida a tracción.*

Esto se debe a que las fuerzas de adhesión de las capas son menores que las que puede soportar el material.

2. Altura de capa: define la altura de la capa de impresión, cuanto menor sea valor de este parámetro mayor será la resolución de la pieza, no obstante, el tiempo de impresión será mayor cuanto menor sea la altura de capa [19].
3. Temperatura de impresión: este parámetro depende del material que se emplee y es suministrado por el fabricante del filamento.
4. Temperatura de la placa de impresión: viene definido por el fabricante del filamento, una temperatura de la placa de impresión correcta garantiza una buena adhesión de la pieza.
5. Velocidad de impresión: se trata de la velocidad global del proceso, el valor habitual está entre 50 y 60 mm/s, aunque actualmente hay impresoras profesionales que pueden superar fácilmente estos valores llegando a velocidades de 500 mm/s como es el caso de la Bambulab X1 Carbon.
6. Velocidad de desplazamiento: rapidez con la que el cabezal de la impresora se desplaza cuando el filamento no se está extruyendo.
7. Relleno: el relleno define como será la estructura interna de la pieza. Este parámetro es definido por la densidad y tipo de relleno.
  - a. Densidad de relleno: representa el porcentaje de material empleado en el interior de la pieza. Este factor es clave ya que influye en la resistencia y tiempo de impresión de la pieza. A mayor densidad, la pieza gozará de mayor resistencia, pero también aumentará el tiempo de fabricación.
  - b. Tipo de patrón: los slicers ofrecen diversos tipos de patrones de impresión, elegir el más adecuado dependerá del objeto a fabricar. Según la geometría de cada patrón los esfuerzos a los que será sometida la pieza se distribuirán de manera diferente, lo que puede afectar a la resistencia de la pieza. Por ello, es imprescindible considerar el uso final del objeto al seleccionar el tipo de patrón [22].
8. Soportes: son estructuras creadas mediante el proceso de impresión que facilitan la correcta fabricación de piezas que cuenten con voladizos o puentes. En el caso de los puentes se recomienda utilizarlos cuando su longitud sea mayor a 5 mm mientras que, en el de los voladizos se recomienda su uso cuando se necesite solucionar voladizos con una inclinación mayor a 45°[23], como se puede ver en la **Figura 16**.



Figura 16: soportes en voladizos [24]

Con la configuración correcta de los parámetros aquí descritos se puede obtener una pieza de gran calidad, sin embargo, es importante recalcar que una pieza de gran calidad puede requerir de tiempos de operación elevados. Por esta razón es importante llegar a un equilibrio entre tiempo de operación y calidad final de la pieza.

Por ejemplo, una altura de capa pequeña ofrece una mayor resolución de la pieza, pero puede aumentar drásticamente el tiempo de impresión.

### 2.3.2 Materiales

En los procesos FFF, los materiales más utilizados son los polímeros termoplásticos debido a su versatilidad y a la facilidad para su procesado. Esto se debe a que no requieren temperaturas altas para alcanzar un estado plástico que permita trabajar con ellos eficientemente.

Actualmente el mercado de polímeros goza de una amplia gama de materiales con múltiples usos. De entre el gran abanico de posibilidades en este texto se destacan tres, ABS, HIPS y PETG estos tres materiales están presentes en la industria actual. A continuación, se exponen las propiedades de cada material junto con sus aplicaciones actuales.

#### 2.3.2.1 HIPS

Obtiene su nombre de las siglas en inglés de poliestireno de alto impacto (High-impact polystyrene). Este material se crea mediante la adición de caucho de polibutadieno a una matriz vítrea de poliestireno. Esta adición conlleva un endurecimiento de la matriz de poliestireno, destacando principalmente en el aumento de la resistencia a impactos [25].

Este material es ampliamente usado en la industria del envasado debido a su fuerte resistencia al impacto mencionada anteriormente. También se encuentra en la industria automotriz, concretamente, en la fabricación de componentes como paneles interiores, así como en utensilios de cocina, juguetes y carcasas de dispositivos eléctricos. En el ámbito de la impresión 3D, además de servir como material principal para la creación de piezas, se usa para la generación de soportes ya que el HIPS puede disolverse fácilmente en una disolución de limoneno.

En la siguiente tabla, **Tabla 1**, se muestran las propiedades de este polímero:

	Propiedades	Valor	Unidad	Estándar
Físicas	Densidad	1,05	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
	Resistencia a la tracción ( $\sigma$ )	59	MPa	ISO 527
	Módulo elástico (E)	3250	MPa	ISO 527
	Resistencia a la flexión	106	MPa	ISO 178

Mecánicas	Resistencia al impacto Charpy	16	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
-----------	----------------------------------	----	-------------------	---------

Tabla 1: Propiedades HIPS

A la hora de emplear este material para imprimir se recomienda una temperatura de boquilla de entre 225 y 240 °C y una temperatura de la cama caliente de entre 90 y 110 °C, aunque siempre es recomendable emplear los parámetros que dicta el fabricante.

### 2.3.2.2 PETG

El tereftalato de polietileno glicol, mayormente conocido como PETG, surge de la adición de glicol al PET (tereftalato de polietileno). Con la adición de glicol se consigue una mejora de las propiedades del PET aumentando su resistencia química y durabilidad.

Este polímero tiene una buena relación resistencia-peso, esta relación junto a su capacidad para soportar las diversas condiciones ambientales lo convierten en un material popular en la industria alimentaria siendo común verlo en envasado. En la industria médica también destaca a la hora de producir herramientas y prótesis ya que este material puede ser esterilizado consiguiendo así mantenerlo limpio proporcionando la seguridad para emplearlo en este sector.

Debido a las temperaturas bajas de conformado este producto destacó en el campo de la impresión 3D empleándose a nivel profesional en las industrias mencionadas anteriormente, como a nivel personal.

En la **Tabla 2**, se muestran las propiedades de este polímero:

	Propiedades	Valor	Unidad	Estándar
Físicas	Densidad	1,27	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Mecánicas	Resistencia a la tracción ( $\sigma$ )	50,4	MPa	ISO 527
	Módulo elástico (E)	2200	MPa	ISO 527
	Resistencia a la flexión	60	MPa	ISO 178
	Resistencia al impacto Charpy	8,1	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179

Tabla 2: Propiedades PETG

Cuando se emplea este material para realizar impresiones en 3D se recomienda una temperatura de la boquilla de entre 220 y 240 °C, una temperatura de impresión como mínimo de 60 y máximo 80, junto con una velocidad de impresión comprendida entre los 50 y 70 mm/s.

### 2.3.2.3 ABS

Este polímero, conocido como acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), debe su nombre a los tres monómeros que lo componen, cada uno de los cuales aporta propiedades diferentes. El acrilonitrilo proporciona resistencia química y térmica, además de rigidez; el butadieno mejora la tenacidad, y el estireno contribuye a la resistencia mecánica y a la rigidez del material, además mejora la facilidad de procesado del material [26].

El ABS presenta varias ventajas frente a otros materiales como un coste de producción razonable, ligereza y versatilidad lo que hace que sea comúnmente empleado en la

industria automotriz y electrónica entre otras. También es un material usado frecuentemente en los procesos FFF [27].

Dentro de las tecnologías FFF este material es más complejo de imprimir que otros como PLA o PETG, aun así, es muy común puesto que pese a ser un material con un características profesionales es más sencillo de emplear en la impresión 3D que otros termoplásticos. Usualmente requiere poco post-procesado aunque se le podría realizar un mecanizado para mejorar su acabado superficial [28].

Las propiedades mecánicas de este polímero se recogen en la tabla de a continuación,  
**Tabla 3:**

Propiedades		Valor	Unidad	Estándar
Físicas	Densidad	1,04	g/cm <sup>3</sup>	ISO ASTM D792
Mecánicas	Resistencia a la tracción ( $\sigma$ )	33,9	MPa	ISO 527
	Módulo elástico (E)	2030	MPa	ISO 527
	Resistencia a la flexión	70,5	Mpa	ISO 178
	Resistencia al impacto Charpy	10,5	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179

Tabla 3: Propiedades ABS

Para la correcta impresión de piezas con este material se recomienda una temperatura de la boquilla de como mínimo de 230 °C y máximo 250 °C, mientras que la temperatura de la capa caliente deberá estar entre 90 y 110 °C, además de una velocidad de impresión comprendida entre los 30 y 50 mm/s.

## 2.4 Metrología

Dentro del campo de la fabricación los procesos de medición desempeñan un papel fundamental, puesto que en los procesos de diseño y fabricación se van realizando, de manera continua las mediciones oportunas para garantizar el correcto desarrollo de la pieza en cuestión. Es en estos momentos donde la metrología hace acto de presencia adquiriendo una relevancia clave.

Según la norma UNE-EN/IEC GUIA 99:2012 IN la metrología se define como “ciencia de las mediciones y sus aplicaciones”. En esta misma norma se establece que la metrología abarca todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones sea cual sea su incertidumbre de medida y su campo de aplicación [29].

La metrología se divide además en tres ámbitos:

- Metrología Científica: esta rama es la encargada del desarrollo de los patrones de medida y su conservación.
- Metrología Industrial: su objetivo es garantizar la fiabilidad de las mediciones necesarias para asegurar la calidad de los productos durante los procesos de producción.
- Metrología Legal: abarca el campo de la metrología encargado las actividades por las que se establecen las exigencias legales sobre las medidas, unidades de medida, instrumentos y métodos de medida, cuyos resultados puedan tener

influencia sobre actividades comerciales, salud o seguridad de consumidores y usuarios [30].

#### 2.4.1 Metrología dimensional

Tal como se indicó con anterioridad, la metrología se basa en la medición. Estas mediciones consisten en expresar el valor de una magnitud en función de otra de mismas características, la unidad de medida.

Los resultados de las mediciones se identifican como el valor verdadero de la magnitud sujeta a medición. Sin embargo, no es posible asumir un valor real como resultado de la medición debido a los errores que puede acarrear cualquier instrumento de medida y las condiciones en las que se realiza la medición, pudiéndose obtener distintos resultados al repetir el mismo proceso de medición a un mismo objeto con los mismos instrumentos.

Esta variabilidad de medida da pie al concepto de incertidumbre y tolerancia, definiéndose la incertidumbre como el “valor de un intervalo, generalmente simétrico, dentro del cual se encuentra con alta probabilidad, el valor verdadero de la magnitud medida.” Esta incertidumbre provoca inevitablemente variabilidades en las medidas finales, para los productos finales se establecen unas tolerancias las cuales pueden ser definidas como la variabilidad máxima permitida.

Dentro de la metrología industrial se distinguen diversas especialidades. Una de las más destacables es la metrología dimensional, en la que podemos encontrar dos tipos de tolerancias:

- Macrogeométricas: referidas a las formas generales de una pieza y dimensiones.
- Microgeométricas: referidas a parámetros como la rugosidad superficial.

#### 2.4.2 Tolerancias macrogeométricas:

Como se ha mencionado en estas tolerancias se abarcan las de forma general de la pieza y las dimensionales.

Las tolerancias de forma que se dan en las piezas se dividen en cuatro grupos: forma, orientación, localización y alabeo.

##### Tolerancias de forma:

Estas tolerancias establecen los límites de las variaciones determinadas características, como son la rectitud o redondez las cuales no necesitan otro elemento para su definición [31]. Las tolerancias que se encuentran en este grupo son:

Tolerancia	Símbolo	Definición
Rectitud	—	La zona de tolerancia en el plano considerado está limitada por dos líneas paralelas (o por dos planos paralelos) distantes en t en la dirección especificada
Planitud	▭	La zona de tolerancia está limitada por dos planos paralelos distantes en t.
Redondez	○	La zona de tolerancia, en la sección recta considerada, está limitada por dos círculos concéntricos y distantes radialmente en t.




Cilindricidad		La zona de tolerancia está limitada por dos cilindros coaxiales distantes en t.
Perfil de una línea		La zona de tolerancia está limitada por líneas envolventes a circunferencias de diámetro t cuyos centros están situados sobre la línea que define la forma geométrica teóricamente exacta.
Perfil de una superficie		La zona de tolerancia está limitada por líneas envolventes a circunferencias de diámetro t cuyos centros están situados sobre la línea que define la forma geométrica teóricamente exacta con respecto al plano A de referencia y el plano B de referencia

Tabla 4: Tolerancias de forma

Tolerancias de orientación:

Estas especifican los límites de variación de unas características, como inclinación y perpendicularidad, este tipo de tolerancias se emplea con un elemento de referencia. Las tolerancias que pertenecen a esta familia son:







Tolerancia	Símbolo	Definición
Paralelismo		La zona de tolerancia está limitada por dos planos paralelos equidistantes en t. Los planos son paralelos a la referencia específica y dan la dirección especificada. En el caso de un cilindro la zona de tolerancia está limitada por un cilindro de diámetro t paralelo a la referencia especificada, cuyo valor de tolerancia está precedido del signo $\phi$ .
Perpendicularidad		La zona de tolerancia está limitada por dos planos paralelos distantes t y perpendiculares a la referencia o cilindro de diámetro t perpendicular a la referencia, cuyo valor de tolerancia está precedido del signo $\phi$ .
Angularidad		La zona de tolerancia está limitada por dos planos paralelos distantes t e inclinados un ángulo específico sobre la referencia.

Tabla 5: Tolerancias de orientación

Tolerancias de localización:

Determinan la ubicación de un elemento o característica en relación con una referencia [32]:

Tolerancia	Símbolo	Definición
Posición		La zona de tolerancia se limita por una esfera de diámetro t, si el valor de la zona de tolerancia está precedido del signo $\phi$ . O bien está limitada por dos planos paralelos distantes en t y dispuestos simétricamente con respecto a la línea central.
Concentricidad		La zona de tolerancia está limitada por un círculo de diámetro t, cuyo valor de tolerancia está precedido del signo $\phi$ . El centro de la zona de tolerancia circular coincide con el punto de referencia.
Coaxialidad		La zona de tolerancia está limitada por un cilindro de diámetro t, si el valor de tolerancia está precedido del signo $\phi$ . El eje de la zona de tolerancia cilíndrica coincide con la referencia.


Simetría		La zona de tolerancia está limitada por dos planos paralelos distantes en $t$ y dispuestos simétricamente con respecto a un plano medio, relativo a la referencia.
----------	---	--

Tabla 6: Tolerancias de localización

Tolerancias de alabeo:

Definen la variación permitida en la desviación de una superficie o línea de contorno respecto a una referencia:



Tolerancia	Símbolo	Definición
Alabeo radial		La zona de tolerancia está limitada, en cada sección perpendicular al eje de referencia, por dos círculos concéntricos con diferencia radial de $t$ , cuyos centros coinciden con la referencia.
Alabeo axial		La zona de tolerancia está limitada por dos cilindros coaxiales distantes radialmente en $t$ , cuyos ejes coinciden con la referencia.

Tabla 7: Tolerancias de alabeo

En la industria se emplean medidoras de forma, **Figura 17**, para determinar los defectos en la geometría de las piezas. Para poder medir la forma estas máquinas cuentan con un husillo giratorio en el que se coloca la pieza y se fija con un plato de garras, el husillo se debe de centrar mediante uno mandos de ajuste que permiten su desplazamiento en el plano X e Y. La recogida de datos se realiza mediante una sonda o palpador, cuando este ha recorrido todo el perímetro seleccionado, y por tanto recogido los datos, se digitalizan y envían al software correspondiente. En el software se aplican los filtros pertinentes, calcula los parámetros relacionados con la magnitud a medir y genera el perfil de los puntos recogidos [33].



Figura 17: Medidora de forma [66]

Tolerancias dimensionales:

Estas tolerancias se definen en la norma UNE-EN ISO 286-1 como la variación en dimensión aceptable en la fabricación que asegure los requisitos funcionales de ajuste del producto [34].

Para asegurar la intercambiabilidad de piezas en la fabricación en serie para estas tolerancias se establecieron unas calidades, estas calidades indican la amplitud de la tolerancia dimensional impuesta.

Las calidades están normalizadas y estas se dividen en 20 calidades de tolerancias y se designan de la siguiente manera:

IT01, IT0, IT1, IT2, IT3, ..., IT18

Siendo la calidad IT01 la más estrecha y la IT18 la más amplia, cada calidad se aplica para elementos determinados en función de su aplicación de la siguiente manera:

Calidad	IT01 e IT1	IT1 a IT4	IT4 a IT11	IT12 a IT18
Aplicación	Patrones de medida	Calibres y piezas de alta precisión	Parejas de piezas destinadas a ajustarse al ensamblar	Piezas o elementos aislados

Tabla 8: Calidad de tolerancia según aplicación

Junto a las calidades también se establece un sistema para poder realizar ajustes entre ejes y agujeros. Los ajustes son el acoplamiento de dos piezas de igual medida nominal para que puedan moverse o no, con más o menos facilidad siendo tres los tipos de ajustes:

- Apriete: asegura siempre un apriete entre el agujero y el eje después del ensamblaje estando la dimensión mínima del eje por encima de la mínima del agujero.
- Holgura: asegura siempre el juego entre el agujero y el eje después del ensamblaje estando la dimensión máxima del eje por debajo de la mínima del agujero.
- Indeterminado: en este tipo de ajuste se puede obtener tanto un apriete como una holgura en función de las medidas efectivas del eje y agujero.

Para comprobar las dimensiones máximas y mínimas de las piezas se disponen de instrumentos de verificación como son los calibres pasa-no pasa, dependiendo del tipo de pieza a verificar se emplea uno macho o hembra.

#### 2.4.3 Tolerancias microgeométricas:

A nivel microscópico toda pieza presenta una serie de desviaciones, estas pueden ser provocadas por múltiples factores como el arranque de la viruta en un proceso de mecanizado, golpes recibidos en algún momento de su fabricación o el propio paso de la herramienta empleada en algún momento de su fabricación.

Este conjunto de irregularidades en la superficie y desviaciones conforman la textura superficial siendo definida por la norma UNE-EN ISO 8785:2000 como “*desviaciones aleatorias o repetitivas de la superficie geométrica que constituyen la topología tridimensional de la superficie*”[35].

Para evaluar los parámetros superficiales de un elemento se utilizan instrumentos como rugosímetros, que permiten obtener el perfil de la pieza al recorrer su superficie con un palpador. Alternativamente, puede emplearse una máquina de medición tridimensional óptica, la cual escanea la superficie del componente para generar un modelo digital. La diferencia entre estas dos herramientas radica en la dimensión de los datos obtenidos, debido a que, el rugosímetro proporciona un parámetro en 2D, mientras que la máquina de medición tridimensional proporciona una superficie digitalizada permitiendo calcular los mismos parámetros referidos a toda la superficie.

Sin embargo, indiferentemente del instrumento empleado es necesario aplicar una serie de filtros a la superficie o perfil obtenido, puesto que el perfil o superficie primaria entra compuesta por tres componentes: forma, ondulación y rugosidad. Para separar estas componentes se emplean los siguientes filtros:

- Filtro  $\lambda_s$ : define la separación entre las componentes de rugosidad y los componentes de longitud de onda aún más corta.
- Filtro  $\lambda_c$ : define la separación entre las componentes de rugosidad y las componentes de ondulación.
- Filtro  $\lambda_f$ : define la separación entre las componentes de ondulación y las componentes de longitud de onda aún más larga.

Una vez aplicados los filtros correspondientes se pueden obtener los parámetros Ra, Rz y Rk, si estos se refieren a un perfil superficial, o Sa, Sz y Sk, si estos se refieren a una superficie.

Los parámetros referentes a la superficie se definen, según la norma UNE-EN ISO 25178-2:2023 [36] como:

- Altura media aritmética, Sa: media de los valores absolutos de las ordenadas de la superficie de escala limitada, **Figura 18**.

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x,y)| dx dy$$

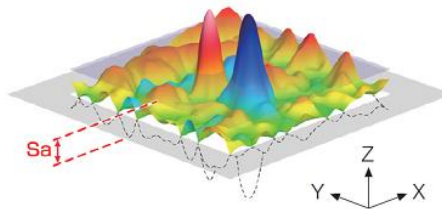


Figura 18: representación Sa [37]

- Altura máxima, Sz: es la suma del valor de la altura máxima de pico y del valor de profundidad máxima de hoyo de la superficie de escala limitada, **Figura 19**.

$$Sz = Sp + Sv$$

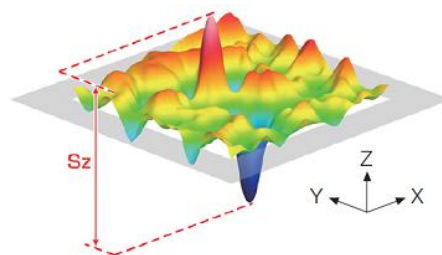


Figura 19: Representación Sz [37]

- Altura del núcleo, Sk: distancia entre el nivel más alto y el más bajo de la superficie del núcleo, **Figura 20**.

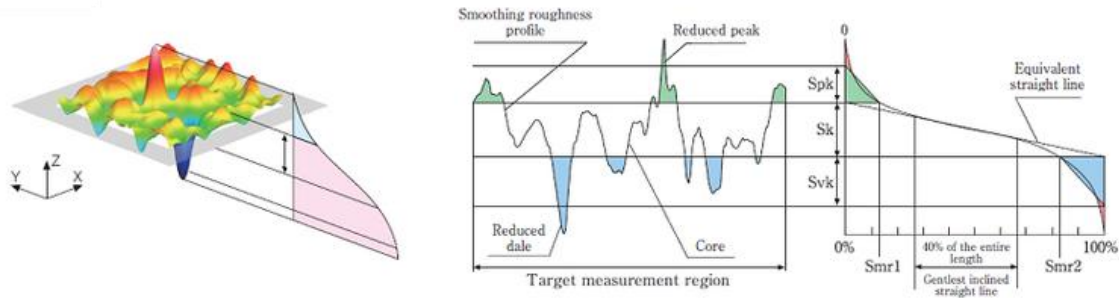


Figura 20: Representación Sk [37]

En cuanto a los parámetros referentes al perfil sus descripciones coinciden con las de sus homólogos superficiales pero aplicado a un perfil.

Sin embargo, es importante puntualizar que los parámetros superficiales permiten una representación más completa de la superficie, representando valores medios o máximos de un área. Al representar los valores referidos al área estudiada se consigue una reducción de la influencia de las anomalías locales, cosa que no ocurre con los parámetros en 2D, puesto que, estos se limitan a perfiles de una línea [38].

Es interesante contemplar la opción de realizar un análisis de la rugosidad en un área, sobre todo si la aplicación del elemento sometido a estudio está relacionada con los fenómenos de adhesión, por ejemplo. Estos estudios permiten realizar una mejor estimación del área de contacto real lo que puede resultar provechoso en este tipo de aplicaciones [39].

La principal desventaja que podría representar el análisis en un área determinada de la rugosidad es el tamaño de la zona a analizar. Son diversos los estudios que han determinado la influencia del tamaño de la zona de muestreo. Estos mismos concluyeron que a medida que aumenta el tamaño de la zona muestreada los resultados tienden a converger [40],[41].

## 2.5 Procesos de mecanizado

Los procesos de mecanizado constituyen un pilar fundamental en la industria moderna interviniendo en la fabricación de una amplia variedad de productos y permiten trabajar con numerosos materiales .

En la industria se suelen emplear para modificar las formas, dimensiones y grado de acabado superficial de las piezas mediante la eliminación de capas de material. No obstante, un arranque excesivo de material representa un coste elevado. Por este motivo el mecanizado se utiliza de manera habitual como un proceso complementario, aplicado a piezas previamente conformadas mediante otros métodos como fundición o deformación plástica [42].

A estas preformas obtenidas por otro proceso se les proporciona un margen adicional de material, conocido como creces de mecanizado, estas creces será la capa de material que será eliminado durante el mecanizado obteniendo el acabado y precisión dimensional requerida.

Esta opción de crear preformas mediante otros métodos da pie a combinar la fabricación aditiva con estos procesos. Si bien la fabricación aditiva permite crear piezas con geometrías complejas en un tiempo relativamente corto, si se desea que estas piezas cuenten con un buen acabado y precisión dimensional, los tiempos de producción sufren un importante crecimiento.

Sin embargo, se podría definir una geometría más “basta” y emplearla de preforma para ser sometida a un mecanizado. Al crear una preforma mediante un proceso FFF se conseguiría aprovechar la flexibilidad que ofrece este proceso, sumado esto a que al crear una geometría no definitiva se permite reducir los tiempos de impresión.

Otra de las ventajas que se podrían aprovechar de esta combinación reside no solo en la geometría exterior sino en la interior. La fabricación aditiva tiene la ventaja de poder modificar fácilmente el relleno de la pieza, esto podría ser aprovechado por los diseñadores para aplicar un mayor relleno en las zonas más solicitadas de la pieza y una orientación óptima con respecto a los esfuerzos a los que será sometida [43]. Si sumamos a esta ventaja la precisión que se puede conseguir al mecanizar un elemento se posibilita la obtención de piezas que gozan de buena precisión dimensional, más livianas y estructuralmente optimizadas.

En la actualidad ya hay empresas que han combinado estos dos métodos de fabricación como General Electric. Esta empresa logró fabricar las boquillas de combustibles de una turbina empleando la fabricación aditiva. Lograron combinar las 20 piezas que conformaban esta boquilla en una sola estructura. Estas 20 piezas requerían de un proceso de mecanizado para cada una, al incluirlas en la estructura consiguieron reducir el número de mecanizados que emplearon apoyándose en la flexibilidad de la fabricación aditiva, pero no rechazando el mecanizado aplicándose este proceso a la pieza obtenida del proceso [44].

Siemens electric también ha realizado esta hibridación de procesos de fabricación. Uno de sus grandes logros ha sido la creación de álabes para turbinas de gas empleando la fabricación aditiva para su construcción y el mecanizado para afinar sus dimensiones [45].

### 2.5.1 Torneado

Una de las máquinas-herramienta más comunes dentro del mecanizado es el torno, en ella se realizan las operaciones de torneado. El torneado es un proceso de mecanizado que genera geometrías de revolución partiendo de una pieza en bruto, generalmente cilíndrica.

En el torneado se distinguen tres tipos de movimiento: movimiento de corte, realizado por el giro de la pieza, avance, movimiento lineal realizado por la herramienta de corte y de penetración que también es realizado por la herramienta, pero este se realiza perpendicularmente al avance, como se puede ver en la **Figura 21**.

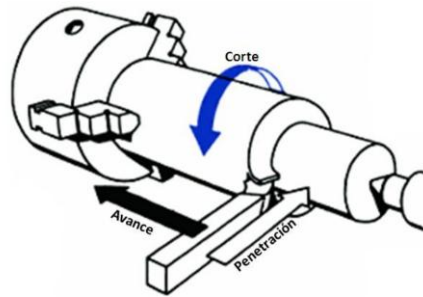


Figura 21 Movimientos del torno [46]

La combinación del movimiento de corte junto al de avance hacen posibles la evacuación de la viruta, esta misma depende del tipo de material, parámetros de corte y herramienta empleada en el proceso.

### 2.5.2 Elementos del torno

La configuración actual más común del torno es el denominado torno paralelo, **Figura 22**, aunque se pueden encontrar otro tipo de disposiciones como el torno vertical.



Figura 22: Torno paralelo

Esta máquinas-herramienta están compuestas por los siguientes elementos:

- Bancada: también conocida como bastidor es el órgano resistente principal del torno; soporta los elementos que conforman la máquina. Es muy importante que este elemento proporcione la rigidez estática y dinámica suficiente para evitar posibles vibraciones, para ello debe poseer una gran sección y una buena fijación al suelo. En su parte superior se pueden encontrar las guías sobre las que deslizan los carros que se encuentran en esta máquina-herramienta, transversal, principal y carro portaherramientas) y el contrapunto.
- Cabezal y contrapunto: su función principal es el posicionamiento y fijación de la pieza junto a la aplicación del movimiento principal. En el cabezal se localiza el husillo, encargado de transmitir el movimiento giratorio, en el extremo de este se encuentra el plato de garras que posibilita la fijación de la pieza a mecanizar.

El contrapunto fija la pieza en el extremo opuesto al plato de garras, este elemento es desplazable longitudinalmente sobre las guías de la bancada, permitiendo adaptarse a la longitud de la pieza.

- Lira o guitarra: formada por ruedas dentadas intercambiables, permitiendo un amplio margen de relación de velocidades.

- Caja Norton: este elemento se dispone con el fin de obtener una mayor variación de velocidad y se compone por un par de piñones, uno de ellos es desplazable en sobre un eje estriado.
- Husillo de roscar y husillo de cilindrar: facilitan el desplazamiento del carro, al transmitir el movimiento a un tornillo sinfín que obliga a mover el carro [47].

### 2.5.3 Operaciones de torneado

El torno permite realizar multitud de operaciones tanto exteriores como interiores, entre las operaciones más comunes se encuentran:

- Cilindrado, exterior e interior: consiste en arrancar una capa de material paralela al eje de rotación de la pieza.
- Refrentado, se elimina una capa de material perpendicular al eje de rotación de la pieza.
- Tronzado, esta operación consiste en realizar un corte en la pieza de manera transversal.

Estas son algunas de las operaciones que se pueden realizar, sin embargo, existen más operaciones como se puede ver en la **Figura 23**.



Figura 23: Operaciones de torneado [31]

La determinación de las operaciones necesarias para la realización de la pieza es un factor clave, puesto que del tipo de operaciones es uno de los factores determinantes para la elección de la herramienta de corte.

### 2.5.4 Herramientas de corte

La selección de una herramienta de corte adecuada es un aspecto crucial en cualquier proceso de mecanizado, y debe basarse en diversos factores, como el tipo de operación a realizar, las características del material a mecanizar y los parámetros de corte aplicados. No obstante, independientemente de estas variables, toda herramienta de corte debe cumplir con tres funciones esenciales: permitir la eliminación eficaz del exceso de material (viruta), garantizar una evacuación adecuada de la misma y facilitar la disipación del calor generado durante el proceso, con el fin de mantener la estabilidad dimensional y prolongar la vida útil de la herramienta.

Es importante que el material de la herramienta cumpla con una lista de requisitos entre los que se encuentra la dureza a temperaturas elevadas, resistencia al desgaste y buenas propiedades térmicas entre otras.

En cuanto a la geometría de las herramientas en la siguiente figura, **Figura 24**, se muestra una de las posibles configuraciones geométricas de la herramienta de corte empleada en el proceso.

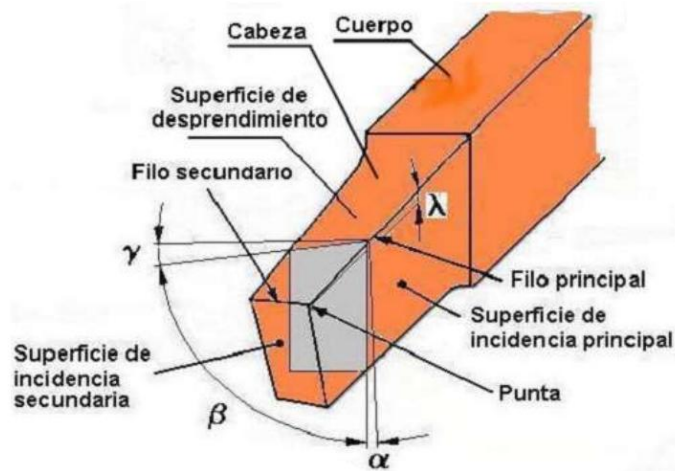


Figura 24: Geometría de la herramienta de corte

La geometría viene definida por una serie de parámetros que se expondrán a continuación:

- Ángulo de incidencia,  $\alpha$ : este ángulo se encuentra comprendido entre la cara de incidencia de la herramienta y la superficie de la pieza mecanizada, este ángulo debe de ser el menos posible pero siempre mayor a  $0^\circ$  para evitar la interacción con la superficie ya mecanizada.
- Ángulo de filo o herramienta  $\beta$ : se haya entre la cara de desprendimiento e incidencia, este parámetro influye principalmente a la robustez de la herramienta, disminuyendo la robustez al disminuir este ángulo.
- Ángulo de desprendimiento,  $\lambda$ : se encuentra comprendido entre el plano de referencia, plano perpendicular al avance de la herramienta, y la cara de desprendimiento.
- Ángulo Posición Filo Principal,  $\kappa_r$ : formado por el filo principal herramienta y dirección de avance, este parámetro influye sobre la formación de la viruta, la longitud del filo en contacto con la pieza a la hora del corte y la vida de la herramienta. Adquiere normalmente un valor comprendido entre  $45^\circ$  y  $90^\circ$ .
- Ángulo Posición Filo Secundario  $\kappa_r'$ : ángulo formado entre el filo secundario de la herramienta y el plano tangente a la superficie trabajada. Este ángulo evita el rozamiento entre la cara de incidencia secundaria y la superficie trabajada.
- Ángulo de Punta de Hta,  $\varepsilon$ : comprendido entre el filo principal y secundario. Este ángulo está relacionado con la tenacidad de la herramienta. Adquiere valores grandes en operaciones de desbaste, entre  $[80, 90]^\circ$ , y aproximadamente a  $35^\circ$  en operaciones de acabado [48].

### 2.5.5 Parámetros de corte

Al igual que ocurre con la herramienta de corte, es necesario ajustar los parámetros de corte dependiendo de las operaciones que se desean realizar y del material a emplear. Es muy importante ajustar los parámetros correctamente para poder obtener la geometría y

estado superficial correctos. Además, una correcta elección de estos parámetros puede alargar la vida de la herramienta afectando a los costes del mecanizado.

A continuación, se procede a la descripción de los parámetros de corte más importantes.

#### **Velocidad del husillo, $n$ .**

Se trata de la velocidad a la que gira la pieza, la unidad con la que se expresa son revoluciones por minuto (rpm).

#### **Velocidad de corte, $V_c$**

Se denomina velocidad de corte ( $V_c$ ) a la velocidad lineal de la superficie de la pieza que entra en contacto con la herramienta. Esta velocidad se mantiene constante siempre que el diámetro de la pieza y la velocidad del husillo no varíen. Es importante seleccionar un valor adecuado de  $V_c$ , debido a que, si este es demasiado bajo, pueden no generarse las fuerzas de corte suficientes para el corte.

Además, la velocidad de corte influye de forma directa en la temperatura del proceso: al incrementarse  $V_c$ , también aumenta la temperatura generada en la zona de corte. Como se ha mencionado, este parámetro afecta tanto la temperatura como las fuerzas implicadas en el mecanizado, lo que conlleva un mayor desgaste de la herramienta y, por ende, una reducción de su vida útil cuando se utilizan valores elevados de velocidad, en la **Figura 25**, se puede observar cómo afecta  $V_c$  a la vida de la herramienta [48].

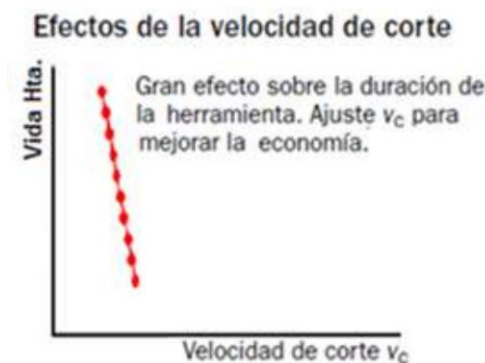


Figura 25: Influencia de la velocidad de corte sobre la vida de la herramienta [48]

La velocidad de corte se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ (m/min)}$$

#### **Velocidad de avance, $f_r$ :**

Esta velocidad, dependiendo del tipo de operación de mecanizado, puede definirse de diferentes maneras. En una operación de cilindrado, se considera como el desplazamiento axial de la herramienta por unidad de tiempo. En cambio, en un proceso de refrentado, corresponde al desplazamiento radial de la herramienta por unidad de tiempo.

Esta velocidad se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$f_r = nf$$

Donde es la velocidad de corte definida anteriormente y  $f$  corresponde al avance por vuelta medido en mm/rev.

Una velocidad de avance demasiado baja tiene como consecuencia una formación de viruta fibrosa, un rápido desgaste en incidencia y resulta en un mecanizado poco económico. Mientras que, un valor demasiado elevado puede acarrear una pérdida del control de la viruta, presentar un acabado superficial deficiente por la formación de cráteres de desgaste y soldadura de la viruta, y un alto consumo de energía. Todo esto hace que un avance elevado reduzca la vida de la herramienta, como se puede ver en la **Figura 26** [48].

#### Efectos de la velocidad de avance

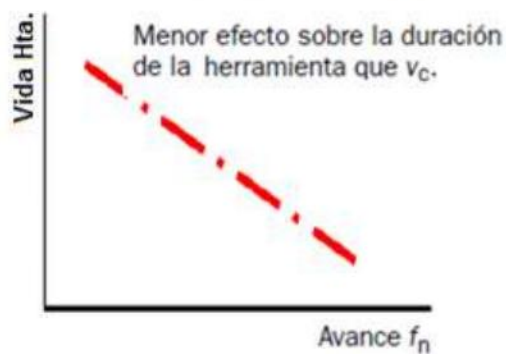


Figura 26: Influencia de la velocidad de avance sobre la vida de la herramienta [48]

#### **Profundidad de corte, $a_p$ :**

Esta variable se describe como la distancia entre la superficie de la pieza sin mecanizar y la superficie mecanizada.

Una profundidad de corte demasiado baja puede generar una pérdida de control en la viruta, lo que produce un calor excesivo al no evacuarse correctamente el calor por esta, y vibraciones. En contraposición una profundidad demasiado elevada puede producir un incremento en las fuerzas de corte afectando a la vida de la herramienta, además al eliminarse una capa mayor de material se incrementa el consumo de energía del proceso [48], [49].

En la siguiente gráfica, **Figura 27**, se puede observar el efecto de la profundidad de corte en la vida de la herramienta.

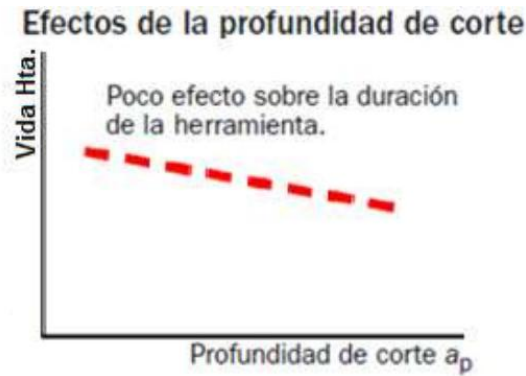


Figura 27: :Influencia de la velocidad de avance sobre la vida de la herramienta [48]

### 2.5.6 Fuerza y potencia involucrada en el proceso

La importancia de las fuerzas y la potencia de corte presentes en estas operaciones son de especial consideración por diversos motivos, tanto por los efectos que puedan tener sobre la maquinaria y utillaje empleados, como para la pieza de trabajo ya que si esta no es capaz de soportar las fuerzas fallará.

Las fuerza resultante de este proceso se puede dividir en 3 componentes:

- Fuerza de corte,  $F_c$ , actúa en la dirección de la velocidad de corte aportando la energía necesaria para realizar el corte.
- Fuerza de avance, actúa en la dirección del avance de la herramienta influyendo en el acabado superficial.
- Fuerza radial, actúa de manera perpendicular a la dirección de la anteriores.

En la **Figura 28** se puede observar la dirección de estas fuerzas:

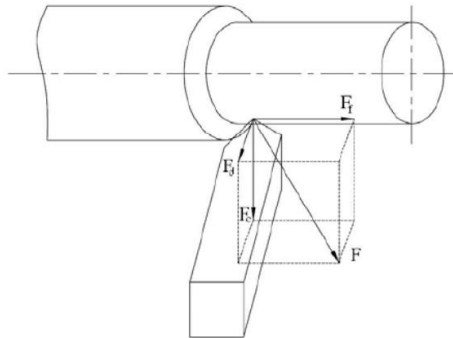


Figura 28: Fuerzas en el torno [50]

Estas fuerzas están influenciadas por la dureza de los materiales involucrados en el proceso. A medida que aumenta la dureza del material a mecanizar, las fuerzas también tienden a incrementarse. Asimismo, la dureza y el desgaste de la herramienta afectan directamente estas fuerzas: cuando la herramienta se desgasta, su geometría se modifica, lo que genera un aumento en las fuerzas que envuelven al proceso. Por otro lado, el uso de fluidos de corte puede reducir dichas fuerzas al disminuir el rozamiento entre la pieza y la herramienta [48].

En cuanto a los parámetros de corte se ha comprobado con diversos estudios que las condiciones idóneas para minimizar estas fuerzas se basan en emplear velocidades de corte altas junto con avances medio y una baja profundidad de corte [50], [51].

El interés en las bajas fuerzas de corte aparece reflejado en la potencia de corte ( $P_c$ ), la cual se calcula mediante la siguiente formulación:

$$P_c = F_c \cdot V_c$$

Donde:

- $F_c$ , fuerza de corte (N)
- $V_c$ , velocidad de corte (m/s)

Esta potencia es la necesaria para realizar el arranque de material, aunque a esta potencia es necesario añadirle la consumida por los elementos del torno para poder funcionar. Como se puede ver en la expresión de  $P_c$  la fuerza de corte influye directamente en su valor por tanto al disminuir su valor se consigue disminuir el coste energético del proceso disminuyendo así el coste de estas operaciones.

### 2.5.7 Concepto de maquinabilidad

La maquinabilidad se trata de la aptitud de los materiales para ser conformados un proceso de mecanizado en máquinas-herramienta. Esta aptitud se mide de manera experimental por medio de ensayo, en los que se suelen valorar características como: la fuerza y temperatura de corte, formación de viruta, influencia del material en la vida útil de la herramienta, entre otras [52].

Los factores afectan a esta característica de los materiales son diversos, entre ellos se encuentran:

- Composición química
- Microestructura
- Inclusiones o impurezas
- Dureza
- Tamaño de grano
- Conductividad

Además, como se mencionó anteriormente, las piezas sometidas a procesos de mecanizado suelen provenir de un proceso de conformado previo, del cual se obtiene una preforma. Estos procesos pueden afectar a la maquinabilidad del material, ya que estos procesos pueden influir, por ejemplo, al tamaño del grano [53].

Con el objetivo de cuantificar esta aptitud se decidió emplear el índice de maquinabilidad (IM), el cual es un valor numérico que indica la facilidad o dificultad de un material para ser conformado por arranque de viruta. Como referencia, se tomó el mecanizado del acero B1112 siendo este mecanizado con una herramienta de corte de acero rápido a una velocidad de corte de 55 m/min. A este material, bajo estas condiciones, se le asignó el valor de la unidad. A partir de esta referencia, si un material bajo unas condiciones determinadas presenta un IM superior a 1 significará que presenta una buena aptitud para el mecanizado; en cambio si el valor es inferior a 1, indicará una menor facilidad de mecanizado.

Como se observa este índice puede ser de gran utilidad en la industria, aun así, es necesario recalcar que, como se ha dicho, este índice depende de múltiples factores pudiendo tener el mismo material diferentes IM lo cual hace que se deba usar con cuidado.

### 2.5.8 Mecanizado de polímeros

Los polímeros son materiales ampliamente utilizados en la industria actual, como se ha mencionado en apartados anteriores, lo que ha generado un creciente interés en los procesos necesarios para su conformado. Una de las principales líneas de investigación en este ámbito es el mecanizado de polímeros, debido a las ventajas que ofrece, como una mayor precisión dimensional y una mejora en el acabado superficial, entre otros beneficios. Al ofrecer un cambio en el estado superficial de los elementos mecanizados se pueden modificar propiedades de los materiales como la vida a fatiga pudiéndose mejorar.

Hasta la fecha, se ha observado un creciente interés en la investigación del mecanizado de polímeros, una de estas líneas se basa en el mecanizado mediante el torno. Diversos estudios, como aquellos centrados en materiales compuestos como el PETG reforzado con fibra de carbono, han evidenciado que la velocidad de corte influye de forma moderada en la rugosidad superficial de las piezas. Se determinó que la velocidad de avance tiene un impacto más significativo sobre el acabado superficial. En este sentido, se ha establecido que un valor de avance de 0,05 mm/rev proporciona los mejores resultados, mientras que incrementos en dicho parámetro tienden a empeorar la calidad superficial de las piezas mecanizadas, en la siguiente figura, **Figura 29**, se muestra como afectaron los distintos parámetros de corte al Ra de este polímero [54].

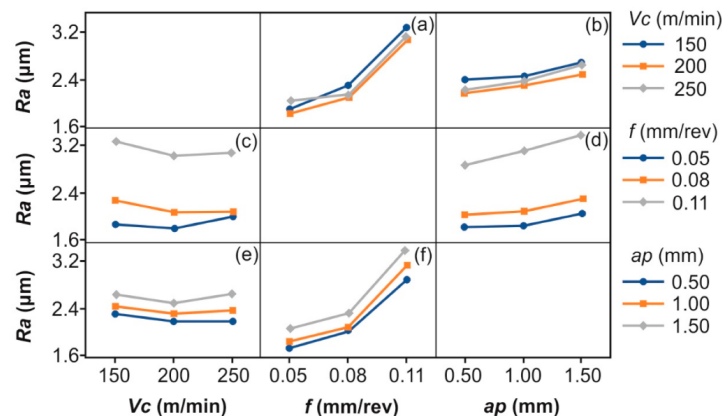


Figura 29: Evolución de Ra en función de los distintos parámetros de corte[54]

También se han realizado investigaciones con polímeros como el polietileno de alta densidad (HDPE) o poliamida 6 (PA6). En estos polímeros se concluyó que, al contrario de lo ocurrido con el PETG reforzado con fibra de carbono, que los resultados óptimos se dieron con valores de velocidad de corte y avance de bajos a medios siendo los valores más adecuados una Vc de 50 mm/min y f de 0,01 mm/rev consiguiéndose valores de Ra de 2,4 µm y 2,12 µm para el PA6 y HDPE respectivamente [55].

Otros estudios realizados en basados en el torneado de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), se concluyó que el parámetro más determinante en lo que respecta a fuerza de corte y rugosidad superficial es la velocidad de avance. También se observó una alta velocidad de corte conseguía un efecto positivo en el acabado superficial a la par que se observaban disminuciones en las fuerzas de corte. Este estudio también comenta que un aumento excesivo de la velocidad tanto de corte como avance más allá del punto óptimo puede inducir vibraciones en exceso lo cual perjudica al acabado superficial [56]. En la **Figura 30** se muestra unas gráficas donde se puede ver

cómo afectan los parámetros de corte (velocidad de corte y avance, y profundidad) a las fuerzas del proceso y acabado superficial [56].

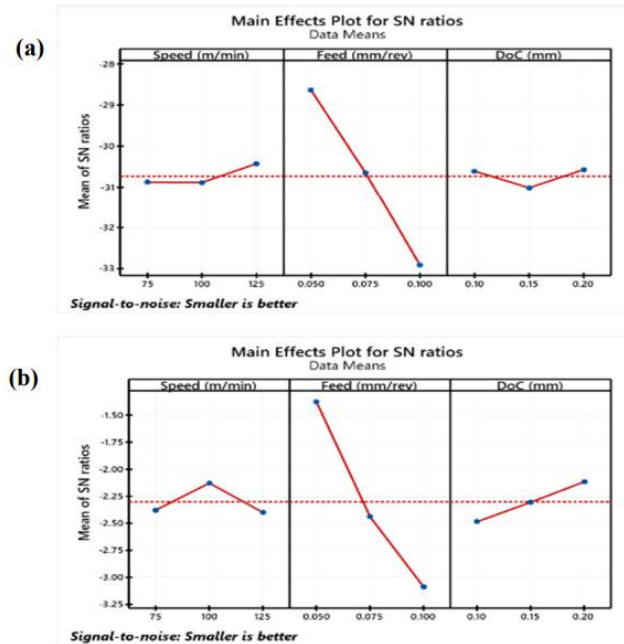


Figura 30: Efectos de los parámetros de corte en a) fuerzas de corte b) rugosidad superficial [56]

Como se puede observar hay polímeros en los que resulta ventajoso emplear valores de velocidad de corte y avance lo cual incita al estudio del comportamiento de los diversos tipos de polímeros destacables en la industria actual como son el HIPS, ABS y PETG sin ser reforzado con fibra de carbono.

## 2.6 Fabricación aditiva y mecanizado

Observando las ventajas que ofrecen las tecnologías de fabricación aditiva y mecanizado es interesante combinar ambas tecnologías brindando la posibilidad de fabricar piezas de geometría compleja, aprovechando la flexibilidad de la impresión 3D, con un mejor estado superficial y mayor precisión dimensional aportada por el mecanizado.

Como se indicó en apartados anteriores esta combinación de procesos se ha realizado en el campo de los metales, sin embargo, sigue siendo un tema novedoso especialmente en el campo de los polímeros.

Las empresas como Siemens Electric y General Electric han demostrado que es interesante realizar esta hibridación de procesos con los metales. Esto hace plantear si puede ser igual de interesante ampliar esta nueva cadena de operaciones a los polímeros.

Los polímeros se encuentran presentes en muchas ramas de la fabricación e industrias, estos materiales son mucho más sencillos de emplear en la fabricación aditiva, requiriendo menos energía para ser procesados.

El interés de comprobar la aptitud de los objetos fabricados mediante la impresión 3D usando de materia prima los polímeros reside en la posibilidad de estudiar la viabilidad de realizar una cadena de operaciones que combinen el mecanizado y la fabricación aditiva. Estas cadenas permitirían crear preformas de manera rápida con las impresoras y mejorar su acabado y precisión dimensional. De esta manera combinando la versatilidad de la impresión y la precisión del mecanizado sería posible conseguir piezas más eficientes estructuralmente, livianas y con precisión dimensional.

### 3. Metodología

El plan de trabajo realizado se divide en tres fases principales, como se puede ver en el esquema adjunto, **Figura 31**:

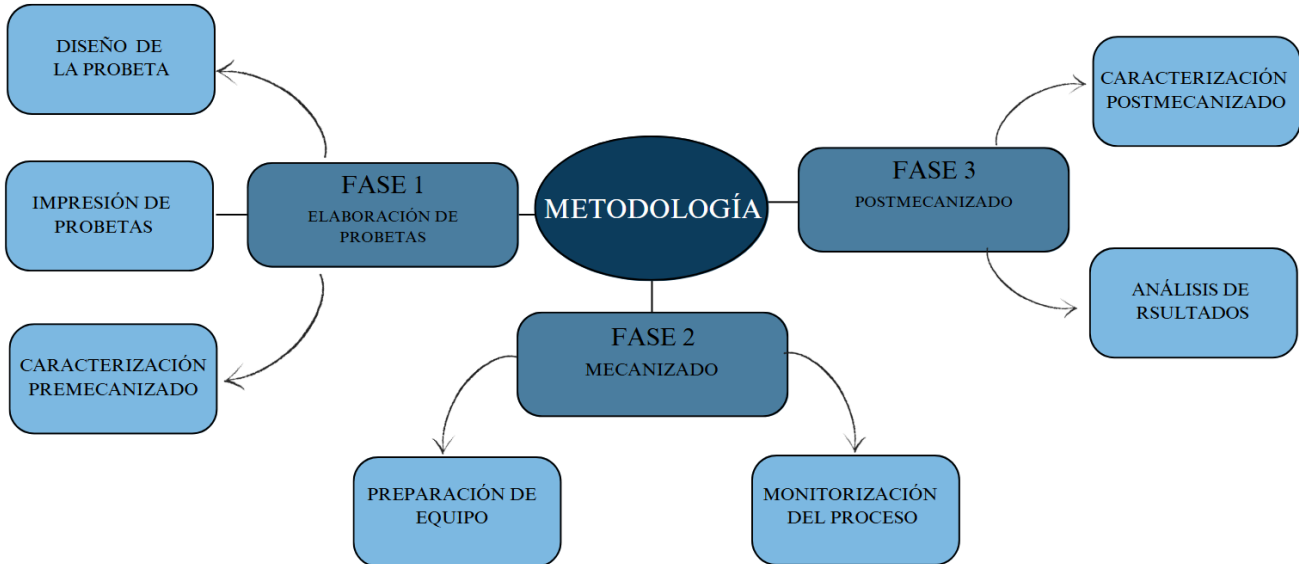


Figura 31: Esquemización del plan de trabajo

En la primera fase se aborda el diseño de la probeta, donde se escoge los materiales a emplear en el proceso de impresión, definición de geometría y modelado de probetas mediante software de modelado 3D. Tras el diseño se procede a determinar los parámetros de impresión en el laminador y para comenzar con la impresión de las probetas. Una vez impresas las probetas estas se caracterizan midiendo su dimensión, estado superficial y la forma de estas.

En la segunda fase se da lugar al mecanizado de las probetas, en el cual se debe primero preparar el equipo de medición para la recogida de datos, introducción de parámetros de velocidad de avance y corte en el torno de control numérico y realización de las operaciones de cilindrado mientras se monitoriza el proceso.

En la última fase se vuelven a caracterizar las probetas una vez han sido mecanizadas y se analizan los resultados obtenidos.

#### 3.1 Fase 1: Elaboración de probetas

##### 3.1.1 Elección de material

El primer paso de esta fase consiste en el diseño de las probetas que serán sometidas a las operaciones de cilindrado. Primeramente, se escogen los materiales que se emplearan para la impresión de las probetas en este caso los materiales empleados han sido:

- ABS, **Figura 32 a)**, marca Smartfil, el polímero se presenta en forma de filamento de 1,75 mm de diámetro y color negro, enrollado en una bobina con un peso de 1 kg sin contar con el carrete.
- PETG, **Figura 32 b)**, marca Winkle, el polímero se presenta en forma de filamento de 1,75 mm de diámetro y color plata, enrollado en una bobina con un peso de 1 kg sin contar el carrete.

- HIPS, **Figura 32 c)**, marca Printalot, el polímero se presenta en forma de filamento de 1,75 mm de diámetro, Figura y color negro, enrollado en una bobina con un peso de 1 kg sin contar con el carrete.

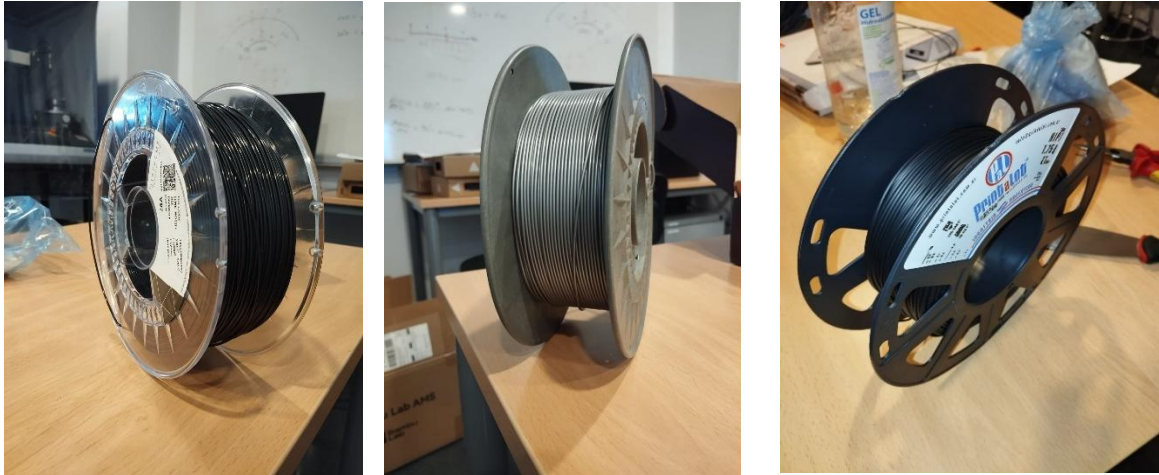


Figura 32: a) bobina de filamento ABS

b) bobina filamento PETG

c) bobina de filamento HIPS

### 3.1.2 Definición de la geometría

Una vez seleccionados los materiales para la impresión, se procede a definir la geometría de la probeta. El diseño, mostrado en la **Figura 33**, corresponde a un cilindro de 200 mm de longitud y 20 mm de diámetro. Para garantizar una correcta adhesión a la cama caliente de la impresora y evitar el posible desprendimiento durante el proceso, debido a la esbeltez de la pieza, se han incorporado soportes adicionales en su base. Dado que la impresora cuenta con un volumen de impresión de  $256 \times 256 \times 256 \text{ mm}^3$ , la fabricación de la probeta puede realizarse sin inconvenientes, ya que sus dimensiones se encuentran dentro de los límites máximos de la máquina.

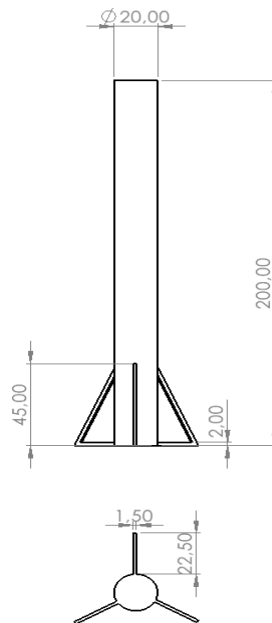


Figura 33: Diseño de la probeta

### 3.1.3 Modelado 3D

Para la generación del modelo tridimensional de la probeta se utilizó el software CAD SolidWorks. El diseño consta de un cilindro vertical que representa el cuerpo principal de la probeta, acompañado de tres soportes inclinados situados en la base, cuya función es proporcionar estabilidad durante el proceso de impresión 3D y evitar el desprendimiento de la cama caliente.

El procedimiento seguido para el modelado fue el siguiente:

- Creación del cuerpo: a partir de un croquis circular de diámetro 20 mm en el plano planta, posteriormente mediante la herramienta “Saliente-Extruir”, se generó el cilindro con una altura de 200 mm.
- Diseño de soportes: en un plano perpendicular a la base del cilindro, se croquizó un perfil triangular de altura 45 mm y base 22,5 mm, representando el soporte lateral de la probeta. Una vez dibujado se extruyó la geometría croquizada y se colocaron tres soportes de manera que formasen ángulos de 120° entre ellos.

Como resultado se obtuvo el modelo de la siguiente figura, **Figura 34**:

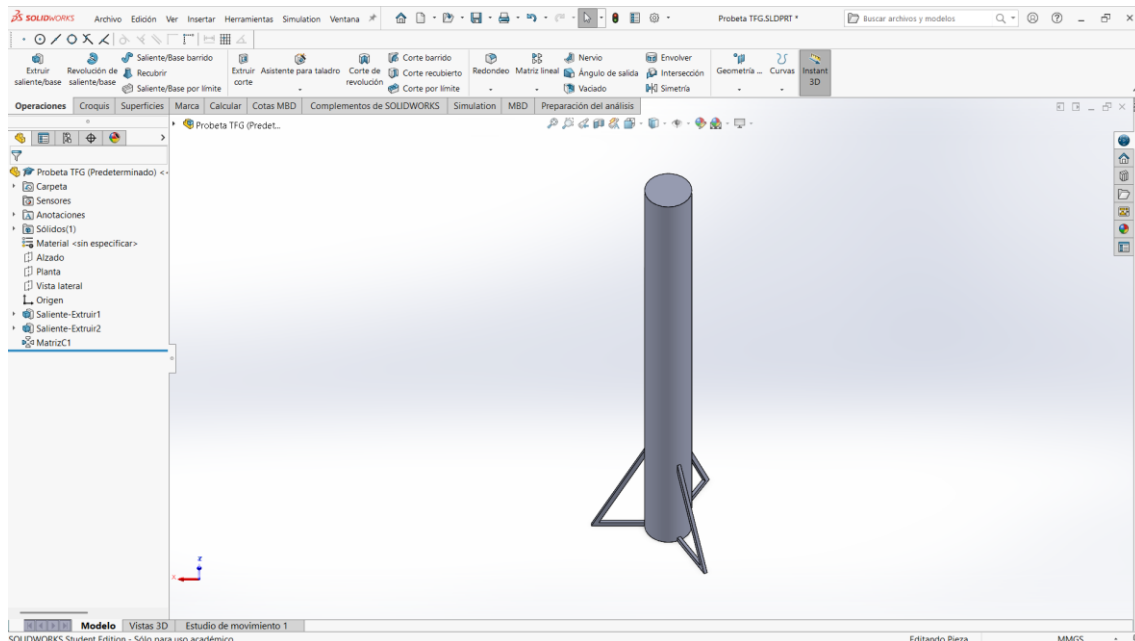


Figura 34: Modelo 3D de la probeta

### 3.1.4 Impresión de las probetas

Antes de realizar la impresión, se debe realizar la exportación del modelo 3D al formato .STL para introducirlo en el laminador y definir los parámetros de impresión. El laminador empleado es BambuStudio.

Las temperaturas de impresión empleadas en el proceso son las indicadas por los fabricantes de filamento, las temperaturas empleadas se recogen en la **Tabla 9**:

Material	Temperatura de extrusión (°C)	Temperatura de la cama caliente (°C)
PETG	230	70
ABS	240	110
HIPS	240	90

Tabla 9: Temperaturas de impresión

Para las probetas de alta calidad se empleó un patrón de relleno rectilíneo con un 15% de relleno, lo que permite reducir tanto los tiempos de impresión como el consumo de material. La altura de capa seleccionada fue de 0,08 mm, empleando la opción de alta calidad que ofrece el laminador Bambustudio para la impresora X1C. Para las probetas destinadas al mecanizado se empleó un patrón rectilíneo al 100% de relleno, y una altura de capa de 0,28 mm, utilizando la configuración "0.28 Extra Draft" para la misma impresora.

Una vez introducidos los parámetros de impresión en el laminador se procede a laminar la probeta de manera que se genere el G-Code, con esta función también se determina el tiempo de impresión y la cantidad de material necesaria, **Figura 35**. Una vez generado el G-Code se exporta la placa de impresión y se introduce en la impresora mediante una tarjeta microSD.

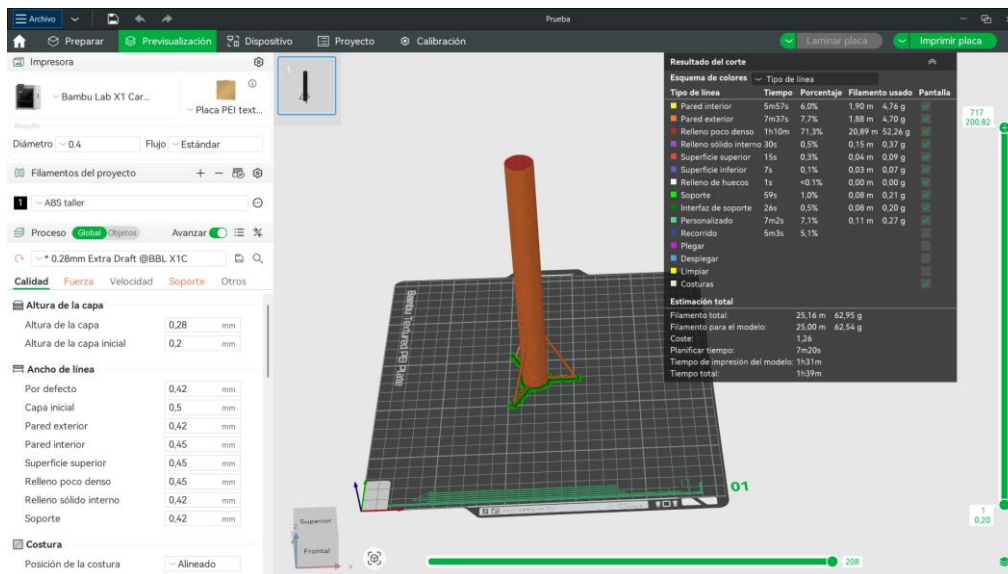


Figura 35: Probeta laminada

El proceso se llevará a cabo en una impresora Bambulab X1 Carbon, **Figura 36**.



Figura 36: Impresora Bambulab X1C

Esta impresora, como se ve en la figura anterior, es una impresora cerrada, lo cual genera un entorno de impresión más controlado. Esta impresora permite imprimir a altas velocidades sin comprometer la precisión dimensional. Además, permite la impresión con múltiples filamentos mediante el módulo AMS desarrollado por la misma marca.

Otra de las ventajas que ofrece esta impresora es la cámara integrada, que permite monitorizar el proceso de impresión en tiempo real, ofreciendo al usuario un mayor control de la impresión.

La nivelación de la base es realizada automáticamente por la impresora antes de cada impresión al igual que la calibración de flujo. Aunque estas opciones se pueden desactivar es recomendable realizar la nivelación de la cama y calibración de flujo para una correcta impresión.

Es importante recalcar que antes de iniciar la impresión es importante asegurarse de que la cama caliente se encuentra limpia, de esta forma se garantiza una correcta adhesión de la pieza.

### 3.1.5 Caracterización premecanizado

#### *Medición superficial*

Una vez impresas las probetas se procede a su caracterización para ello primero se evalúa la calidad superficial.

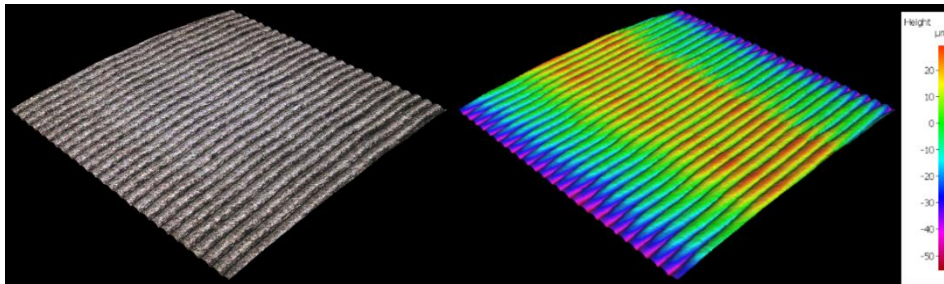
Para la medición del acabado superficial se ha empleado el sistema de medición Alicona, modelo InfiniteFocus SL, **Figura 37**. Este sistema de medición emplea tecnologías de enfoque variable. Este sistema proyecta luz sobre la superficie a evaluar capturando imágenes a distintas distancias focales moviendo el objetivo verticalmente realizando un barrido.



Figura 37: Alicona InfiniteFocus SL

Los datos adquiridos mediante la focalización de la superficie son procesados por el software mediante la aplicación de una serie de algoritmos creando una imagen en color

real, **Figura 38**, con la profundidad de campo completa. Se permite aplicar filtros a la imagen creada para y representar la superficie como un mapa de calor, **Figura 38**, facilitando la visualización del relieve de la superficie.



*Figura 38 : Superficie digitalizada mediante equipo Alicona InfinteFocus SL*

El proceso de medición con este equipo es el siguiente:

- Enfoque de la probeta: se coloca la probeta en la plataforma del equipo apoyada en un bloque en V, **Figura 39**. Una vez colocada la probeta se debe enfocar la superficie. Para facilitar esta tarea se puede emplear la opción “Focusing Help”, esta opción activa el puntero laser del equipo de medición, cuando este punto aparece nítidamente en la pantalla significa que se ha enfocado la superficie correctamente. Por último, se ajusta la luz de la lente para garantizar una correcta visualización de la superficie.



*Figura 39: Bloque en V*

- Cuando ya se ha enfocado la probeta, con ayuda del joystick se desplaza verticalmente la lente. Con este movimiento vertical se definen los límites inferior y superior de la zona a digitalizar, para saber cuáles son estos se debe de subir la lente hasta que se desenfoca la superficie, este será el límite superior, se debe repetir el proceso hacia abajo para determinar el límite inferior.
- El último paso es iniciar la digitalización, para ellos se debe clicar en la opción “Start Single Measurement”, así comenzará a digitalizar la superficie cada 200 nm.
- Una vez digitalizada la probeta se muestra la pantalla que aparece en la **Figura 40**, donde es necesario realizar una serie de operaciones antes de efectuar la medición:

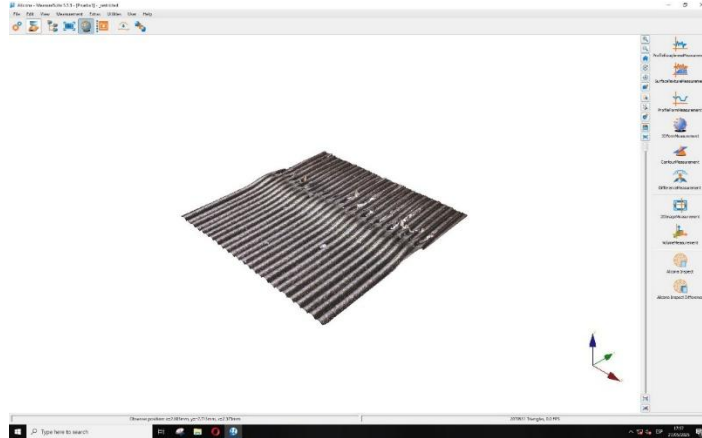


Figura 40: Superficie digitalizada

- Primero se establece un plano de referencia.
- Seguidamente se debe eliminar la forma de la probeta, para ello se selecciona la superficie, **Figura 41**, y se asemeja a un polinomio de grado 2. Ahora si se puede efectuar la medición de la superficie.

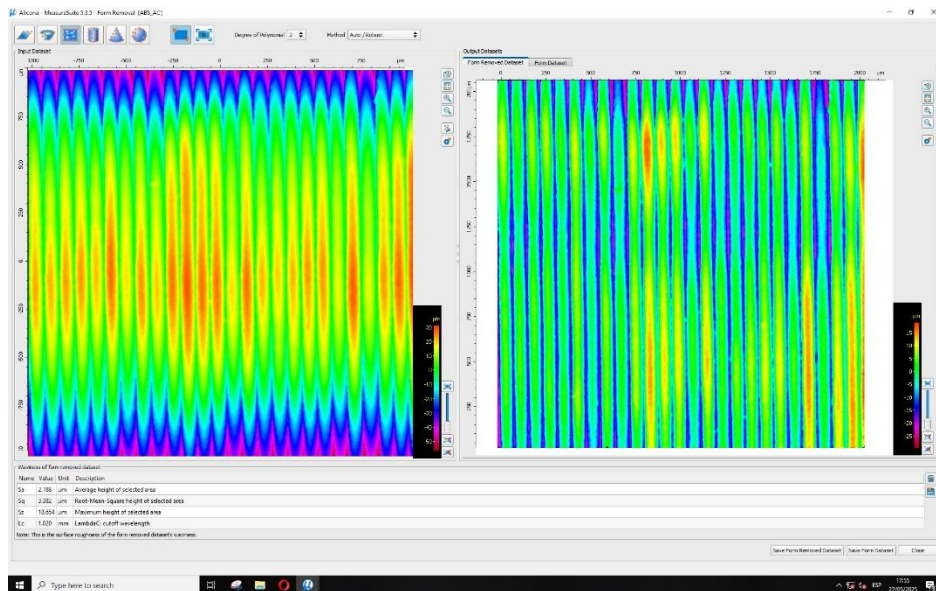


Figura 41: Superficie de la probeta con y sin forma

- Para medir la rugosidad de la superficie se aplica un filtro  $\lambda_c$ , **Figura 42**, una vez aplicado el sistema ofrece los datos de los parámetros superficiales, los parámetros de interés son:
  - Sa: Altura media de la zona seleccionada.
  - Sz: Altura máxima de la zona seleccionada.
  - Sk: Profundidad de la rugosidad del núcleo, altura del material del núcleo.

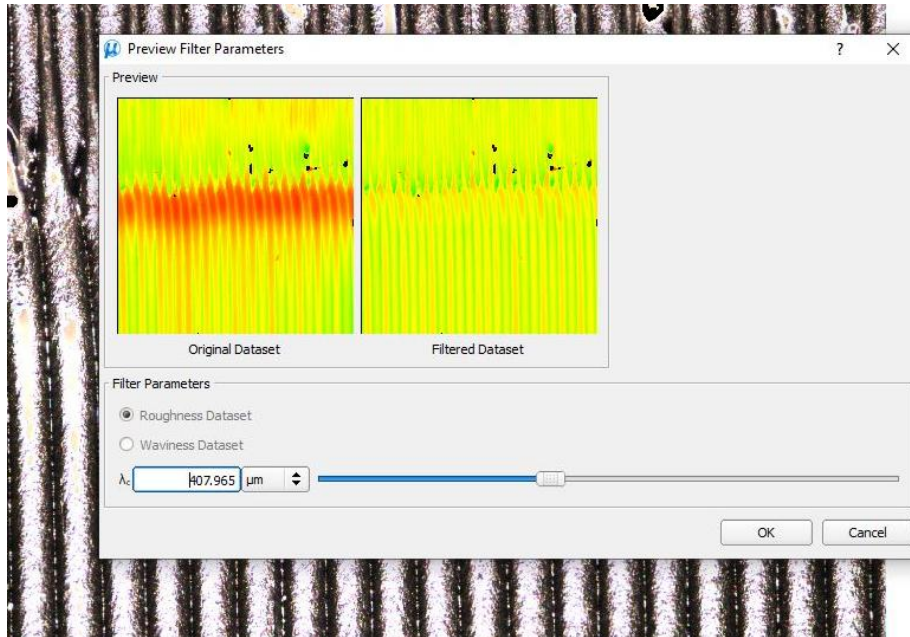


Figura 42: Filtro seleccionado

### Desviación de forma

Una vez medidos los parámetros superficiales se midieron las desviaciones de forma, para ello se empleó una medidora de formas, concretamente el modelo Rondcom Nex, de la marca ACCRETECH, **Figura 43**.

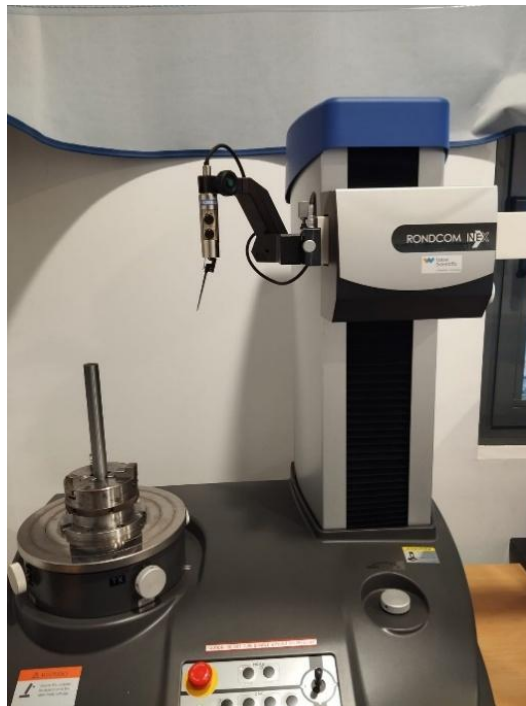


Figura 43: Medidora de forma ACCRETECH modelo Rondcom Nex

Este equipo cuenta con un palpador, **Figura 44 a)**, equipado en un brazo que se desplaza vertical y horizontalmente, este palpador debe de estar en contacto con la superficie de la pieza y cuenta con un margen de  $\pm 1$  mm, si se supera este valor se detendrá la medición. Las probetas se sujetan en el plato de garras, **Figura 44 b)**, de la medidora, este gira 360°.

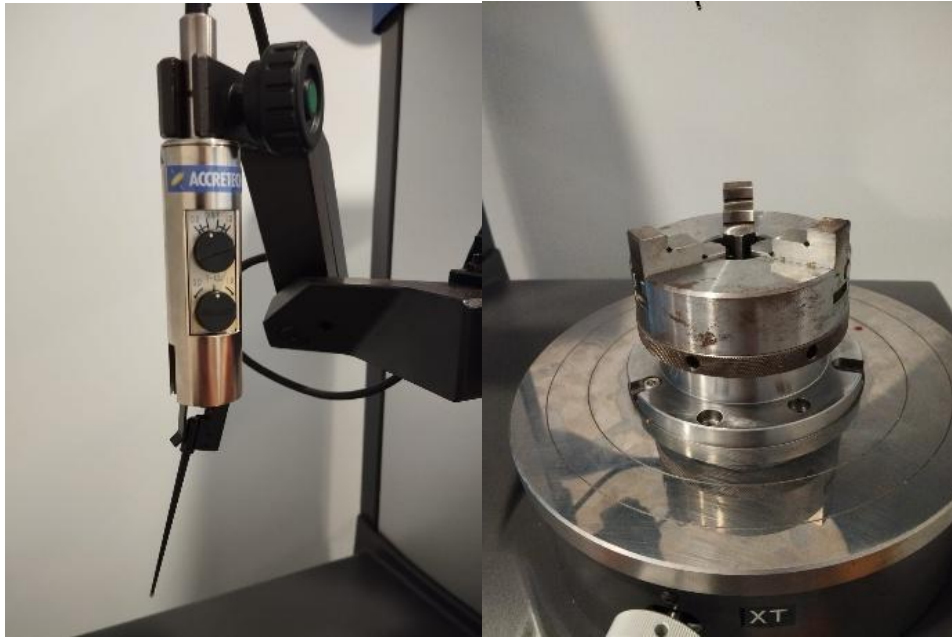


Figura 44: a) Palpador

b) plato de garras

Para realizar la medición, primero es necesario crear un programa en el software del equipo, ACCTee, en el que se especifican las desviaciones de forma a evaluar. Una vez se ejecute el programa, comenzará la medición de las desviaciones seleccionadas.

Antes de ejecutar el programa, es necesario ajustar un valor de Z igual a 0 y establecer el radio de la probeta a medir. Para ello, se debe posicionar el palpador en el punto donde se va a establecer el cero, es importante que el palpador también esté en contacto con la probeta.

Una vez posicionado el palpador, en el menú desplegable “Ajuste de coordenadas”, se encuentra la opción “Preajust cond<sup>t</sup>”, donde se permite establecer el radio de la probeta y la coordenada Z cero.

A continuación, es necesario centrar y alinear la probeta para asegurar una medición precisa y evitar que el palpador toque de manera excesiva la superficie o, por el contrario, no llegue a hacer contacto con ella, al tener este el rango mencionado anteriormente de 1 mm.

Para centrar la probeta, en el menú desplegable “Alineación”, se encuentra la opción “Inclinación rotación”. Al seleccionar esta opción, el palpador debe colocarse en la parte interior de la superficie lateral de la probeta. Una vez posicionado correctamente, se pulsa el botón “Siguiente”, tras lo cual el plato de garras comenzará a girar 360°.

Finalizado este movimiento, se debe ubicar el palpador en el extremo de la probeta y repetir el proceso. Al concluir, aparecerá una pantalla en la que se indica cuanto se debe de ajustar el plato de garras, **Figura 46**.

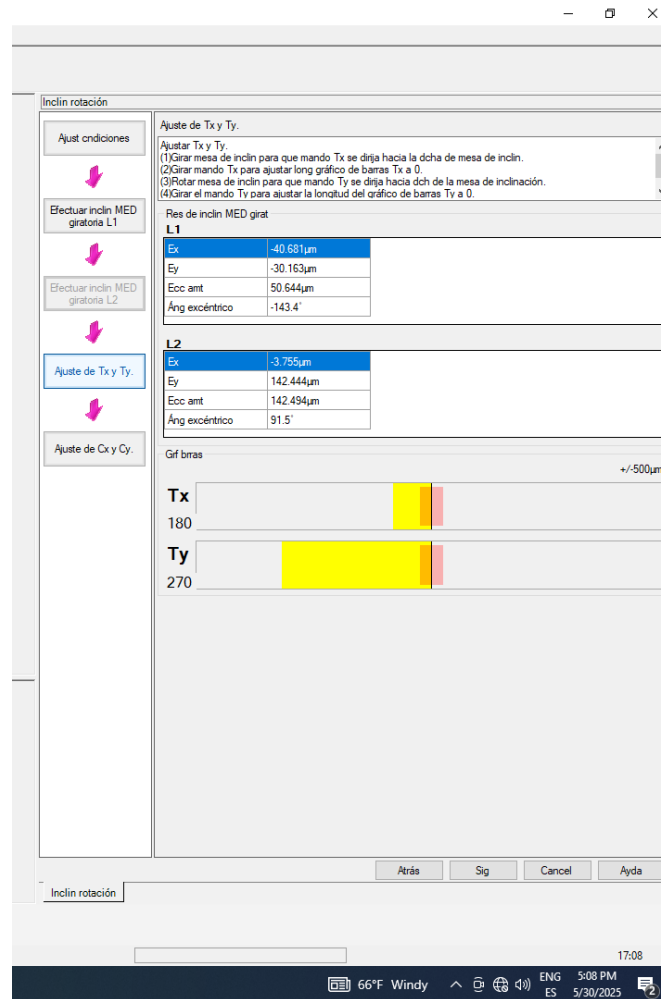


Figura 45: Menú "Inclinación rotación"

Para poder ajustar la inclinación y rotación se debe girar el plato de garras hasta que la rueda coincida con la marca roja, **Figura 47**. Una vez posicionado el plato de garras se debe girar la rueda indicada por el programa hasta que el rectángulo amarillo se encuentre dentro del rosa.



Figura 46: Rueda para el ajuste del plato de garras

Durante este procedimiento, puede ser necesario repetir el proceso en múltiples puntos si se detecta que el palpador realiza un contacto excesivo o insuficiente con la superficie de la probeta.

Ahora si se puede ejecutar el programa que se creó al inicio del proceso y efectuar las mediciones. Primero se llevan a cabo las mediciones correspondientes a la redondez y cilindricidad, al acabar comienzan las respectivas a la rectitud de la probeta. Mientras se realizan las mediciones aparecen representados en tiempo real los puntos recogidos por el sistema, **Figura 48**.

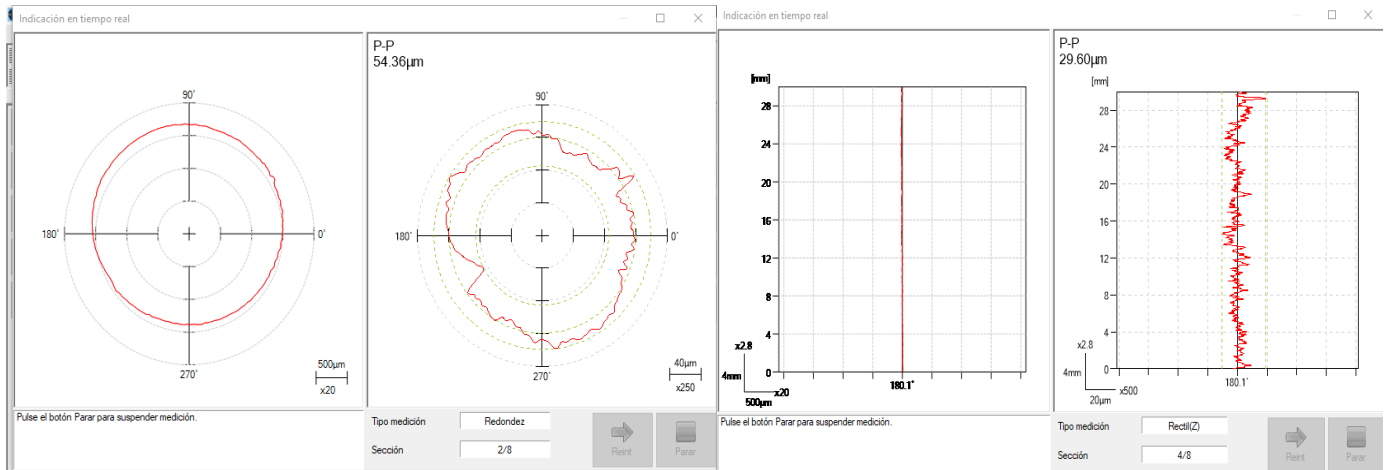


Figura 47: Indicaciones en tiempo real de la medición

Cuando acaba este proceso el software genera un documento con los perfiles de la probeta generados, **Figura 49**, y los datos obtenidos.

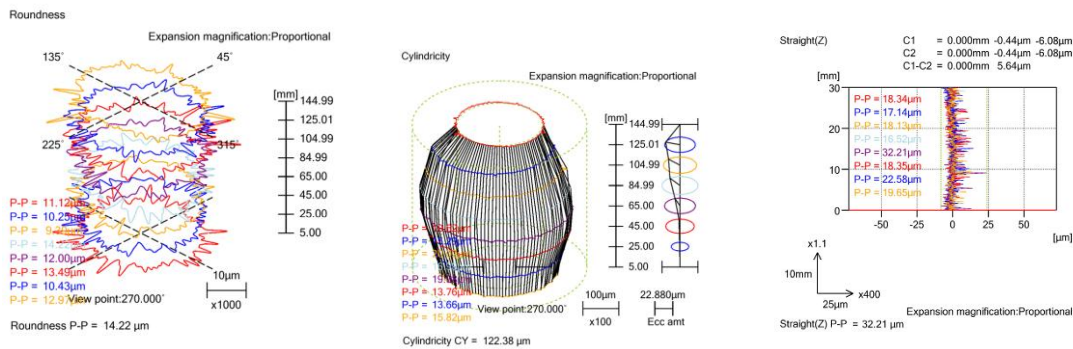


Figura 48: Perfiles obtenidos

### 3.2 Fase 2: Mecanizado

El objetivo de esta fase es mecanizar las probetas y observar cómo se comporta cada material en el proceso midiendo fuerzas, temperaturas y analizando como ha afectado el mecanizado a la forma de la probeta y acabado superficial.

#### 3.2.1 Torno CNC empleado

El mecanizado se llevó a cabo en un torno de control numérico modelo EMCOTURN E45 del grupo “emco”, **Figura 50**. Este torno puede albergar hasta 12 herramientas y desarrollar una potencia máxima de 13kW.



Figura 49: Torno CNC EMCOTURN E45

### 3.2.2 Herramienta de corte

La herramienta de corte empleada en el proceso se trata de una plaquita rómbica de 55° con desprendimiento positivo, ideal para fuerzas de corte bajas y apta para realizar operaciones de semi acabado y acabado. El fabricante “ISCAR” indica que puede ser utilizada para una amplia gama de materiales, incluyendo materiales blandos y aleaciones exóticas.

La herramienta de corte se denomina como DCMT 11T308-14 IC20, esta denominación se realiza acorde a la norma ISO 13399-1:2006. El objetivo de esta denominación es ofrecer información con cada término.

Primeramente, la parte DCMT brinda la siguiente información:

- D: referente a la forma de la plaquita, en este caso forma rómbica con un ángulo de punta de herramienta de 55°.
- C: denota al ángulo de incidencia de la herramienta de corte, la C corresponde a un ángulo de 7°.
- M: referente a las tolerancias de la herramienta de corte, las tolerancias se muestran en la **Figura 51**.

**3. Tolerance**

	m	s	d
E	±0.025	±0.025	±0.025
G	±0.025	±0.13	±0.025
M	fr. ±0.08 to ±0.18 <sup>(1)</sup>	±0.13	fr. ±0.05 to ±0.13 <sup>(1)</sup>
U	fr. ±0.13 to ±0.38 <sup>(1)</sup>	±0.13	fr. ±0.08 to ±0.25 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Exact tolerance depends on insert size.

Figura 50: Tolerancias de las herramientas de corte [57]

- T: Referente al tipo de rompevirutas empleado, en este caso el rompevirutas está en un solo lado, y cuenta con orificio cilíndrico y avellanado de una cara.

Seguidamente, la codificación 11T308-14 IC20 representa:

- 11: longitud del filo de corte
- T3: indica el grosor de la herramienta de corte, en este caso cuenta con 3,97 mm de grosor.
- 08: alude al radio de punta de la herramienta, esta herramienta cuenta con un radio de 0,8 mm.
- 14: describe el tipo de rompevirutas.
- IC20: expresa el máximo círculo inscrito posible en la geometría de la herramienta.

En la **Figura 52**, se muestra una representación gráfica de la geometría de la herramienta proporcionada por el fabricante, mientras que en la **Tabla 10** se exponen los parámetros de la herramienta de corte.

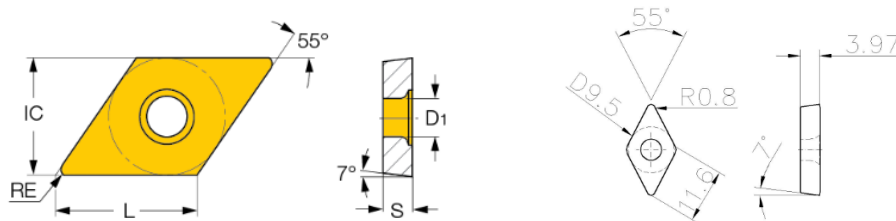


Figura 51: Representación gráfica de la geometría de la herramienta [57]

L (mm)	IC (mm)	S (mm)	RE (mm)	D1 (mm)	ft (min)	ft (max)	ap (min)	ap (max)
11,6	9,52	3,97	0,8	4,40	0,14	0,29	1,5	3

Tabla 10: Parámetros herramienta de corte [57]

### 3.2.3 Mecanizado de probetas

Se han mecanizado 12 probetas, 4 de cada material, con los parámetros de corte que se muestran en la **Tabla 11**.

Material	Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	Refrigeración
PETG	50	0,05	1	Aire
PETG	200	0,05	1	Aire
PETG	50	0,2	1	Aire
PETG	200	0,2	1	Aire
ABS	50	0,05	1	Aire
ABS	200	0,05	1	Aire
ABS	50	0,2	1	Aire
ABS	200	0,2	1	Aire
HIPS	50	0,05	1	Aire
HIPS	200	0,05	1	Aire
HIPS	50	0,2	1	Aire
HIPS	200	0,2	1	Aire

Tabla 11: Parámetros empleados

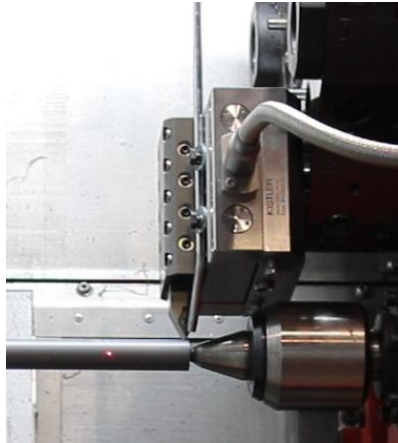
Los valores de los parámetros de corte empleados se basan en las condiciones extremas de los valores normalmente empleados en el mecanizado de polímeros según estudios anteriores.

El ensayo se realizó primero manteniendo un avance de 0,05 mm/rev y con  $V_c$  de 50 m/min y después con una  $V_c$  de 200 m/min, este mismo proceso se repitió después para un avance de 0,2 mm/rev.

Las probetas se introdujeron en el plato de garras una distancia de 25 mm, al ser la longitud de mecanizado de 150 mm se obtenía un margen entre el plato de garras y la herramienta de corte al final del proceso de 25 mm.

Previo al comienzo del mecanizado es necesario preparar el utillaje que se va a utilizar. En primer lugar, se coloca la pistola de aire comprimido de manera que pueda suministrar aire durante todo el proceso.

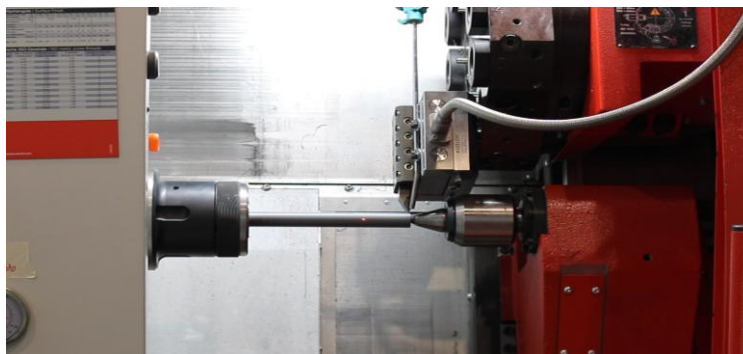
En segundo lugar, es necesario conectar el dinamómetro, **Figura 53**, para poder realizar un registro de las fuerzas de corte involucradas en el proceso, el software empleado para realizar el registro es DynoWare.



*Figura 52: Dinamómetro*

Tras esto se coloca la probeta en el plato de garras, introduciéndola los 25 mm ya mencionados, y se coloca el punto de manera que la probeta quede sujeta por ambos extremos, **Figura 524**

Una vez colocada la probeta se establece el Z cero en la punta de la probeta, para esto hay que posicionar la herramienta de corte en la punta de la probeta.



*Figura 53: Probeta colocada*

Tras esto, se coloca la cámara termográfica, la cámara empleada se trata del modelo A6750 MWIR de FLIR, **Figura 55**, a una distancia de 2 m del torno y se procede a la preparación del software involucrado en la monitorización. Para la temperatura se empleó el programa Flir ResearchIR Max, donde se introdujeron los parámetros que mostrados en la **Tabla 12**:

Emisividad (PETG)	0,9
Emisividad (ABS-HIPS)	0,92
Distancia (m)	2
Tª reflejada (°C)	20
Tº atmosférica (°C)	20
Humedad relativa (%)	30

*Tabla 12: Parámetros para medir la temperatura*



*Figura 54: Cámara termográfica*

La opción con la que se registran las temperaturas de la cámara es “Superframing”, esta opción permite captar 15 imágenes por segundo, dando lugar a un gran registro de temperaturas, aspecto positivo para una buena monitorización de temperaturas.

Una vez preparado todo el equipo, el siguiente paso es cargar el programa de control numérico (CNC) en el torno. En dicho programa se introducen los parámetros de velocidad de corte y avance correspondientes a cada probeta. Además, se configura el desplazamiento de la herramienta desde el punto cero en el eje Z hasta una distancia de 150 mm, realizando una pasada con una profundidad de corte de 1 mm. Al acabar el desplazamiento se concreta que la herramienta vuelva a su posición inicial.

Antes de comenzar el mecanizado se comienza un registro de la potencia consumida en el analizador de redes, **Figura 56**. Este analizador de la marca Fluke, concretamente el modelo 1732 Energy Logger, trabaja con frecuencias de entre 50 y 60 Hz y para registrar la potencia empleada por el torno se debe conectar a este y a la red eléctrica.



Figura 55: Analizador de redes

Una vez acabado el proceso las probetas se guardan en una bolsa identificativa junto con la viruta generada en el proceso.

Este proceso debe de repetirse con cada probeta.

### 3.2.4 Extracción de datos

Al acabar el mecanizado es necesario extraer los datos registrados en el proceso.

En primer lugar, se extrajeron los datos correspondientes a las fuerzas generadas. Para ello en el programa “DynoWare”, este software registra las fuerzas y las muestra en forma de gráficas, **Figura 57**, donde se pueden consultar los valores de estas.

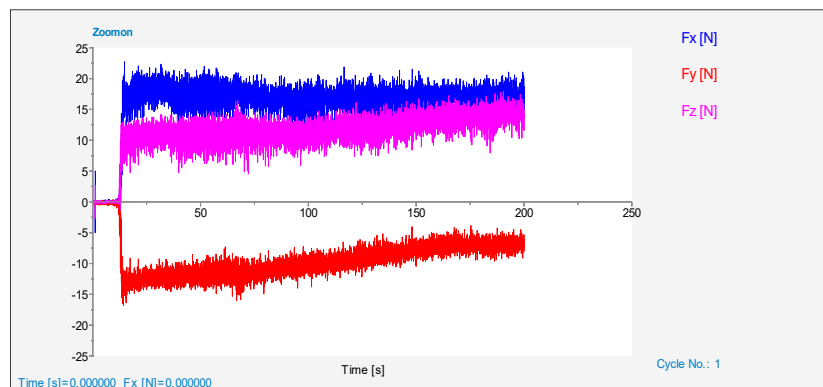


Figura 56: Gráficas fuerzas de corte

Una vez abierto el archivo correspondiente a la probeta mecanizada de la que se desea extraer los datos, con la opción “Manual Scaling” se procede a ajustar la escala de las gráficas generadas para una correcta visualización de estas, para acto seguido, con la opción “Statistics” visualizar los valores máximos, mínimos y medios de cada una de las tres fuerzas registradas. Las fuerzas obtenidas se recogieron en una hoja de Excel para su tratamiento de datos.

En segundo lugar, mediante el programa de la cámara termográfica, es posible obtener el registro de las temperaturas máximas alcanzadas en el proceso. Para ello se selecciona el recuadro en el que aparece la probeta”, **Figura 57**, y mediante la herramienta “Temporal

Plot”, **Figura 58**, seleccionando la opción de máxima temperatura se registran las temperaturas del proceso, estas serán exportadas como un archivo .CSV para su posterior tratamiento.

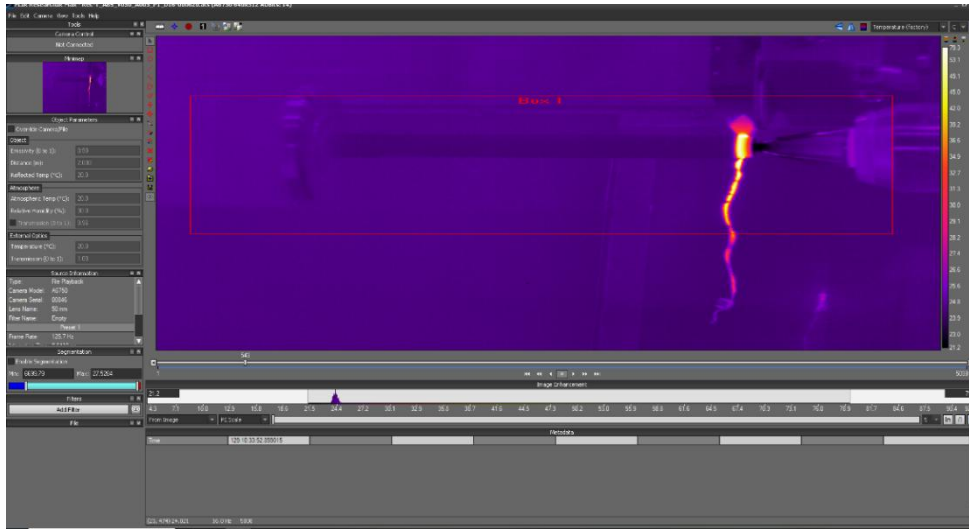


Figura 57: Software cámara termográfica

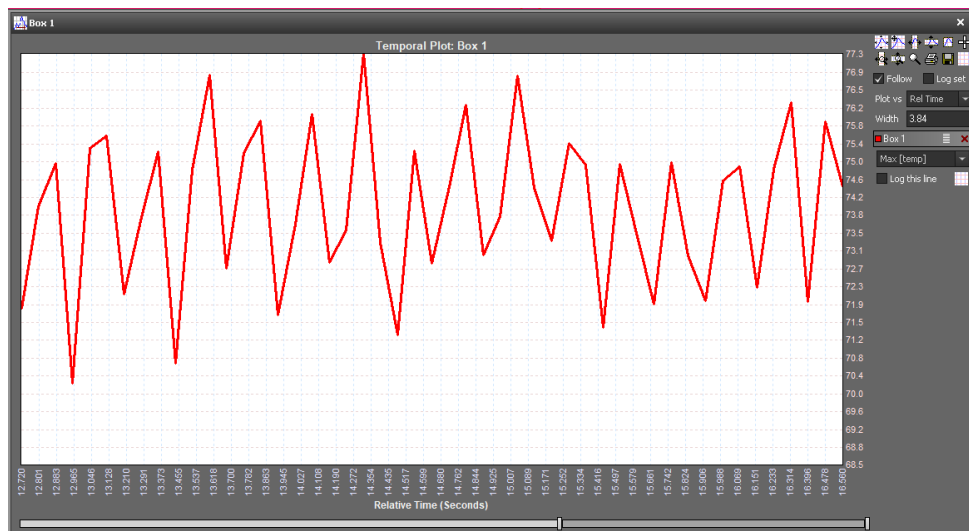


Figura 58: Grafica de temperaturas máximas en función del tiempo

Por último, se obtuvieron los datos registrados en el analizador de redes sobre el consumo energético que ha conllevado el mecanizado de estas probetas.

Para poder obtener los datos es necesaria la extracción de los registros mediante una memoria USB que se conecta al puerto del analizador. Una vez extraídos los archivos se deben abrir empleando el software que proporciona Fluke, Fluke Energy Analyze Plus. En este software se permite la visualización de parámetros como potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia, **Figura 59**.

ES-340				
Información de registro				
Tipo de estudio:		Estudio de energía	Topología: 3 F en triángulo	
Fecha inicial:		09/05/2025 13:03:42	Fecha final: 09/05/2025 13:05:08	
Duración:		1min 26s		
Intervalo de promedio:		1seg	Número de intervalos de promedio: 86	
Potencia activa [kW]				
	A	B	C	Total
Máx.	4,526 kW 09/05/2025 13:0443	5,002 kW 09/05/2025 13:0443	5,096 kW 09/05/2025 13:0443	14,625 kW 09/05/2025 13:0443
Media lineal	0,231 kW	0,557 kW	0,574 kW	1,362 kW
Min.	-3,117 kW 09/05/2025 13:0456	-2,822 kW 09/05/2025 13:0456	-2,899 kW 09/05/2025 13:0456	-8,838 kW 09/05/2025 13:0456
Potencia aparente [kVA]				
	A	B	C	Total
Máx.	5,615 kVA 09/05/2025 13:0443	5,950 kVA 09/05/2025 13:0443	6,135 kVA 09/05/2025 13:0443	17,711 kVA 09/05/2025 13:0443
Media lineal	2,464 kVA	2,476 kVA	2,587 kVA	7,529 kVA
Min.	2,273 kVA 09/05/2025 13:0400	2,275 kVA 09/05/2025 13:0411	2,380 kVA 09/05/2025 13:0411	6,938 kVA 09/05/2025 13:0411
Potencia no activa [kvar]				
	A	B	C	Total
Máx.	3,539 kvar 09/05/2025 13:0443	3,456 kvar 09/05/2025 13:0443	3,646 kvar 09/05/2025 13:0443	10,665 kvar 09/05/2025 13:0443
Media lineal	2,420 kvar	2,380 kvar	2,490 kvar	7,308 kvar
Min.	2,174 kvar 09/05/2025 13:0455	2,150 kvar 09/05/2025 13:0455	2,263 kvar 09/05/2025 13:0455	6,602 kvar 09/05/2025 13:0455
Factor de potencia [1]				
	A	B	C	Total
Máx.	0,70 ind 09/05/2025 13:0443	0,75 ind 09/05/2025 13:0443	0,73 ind 09/05/2025 13:0443	0,73 ind 09/05/2025 13:0443
Media lineal	0,094	0,22	0,22	0,18
Min.	-0,52 cap 09/05/2025 13:0455	-0,44 cap 09/05/2025 13:0455	-0,43 cap 09/05/2025 13:0455	-0,46 cap 09/05/2025 13:0455

Figura 59: Parámetros registrados por el analizador

### 3.3 Postmecanizado

En esta última fase se llevó a cabo una caracterización de las probetas mecanizadas, en la cual se siguió el mismo proceso que el realizado en la primera fase del plan de trabajo. Efectuando las mediciones de rugosidad y desviaciones de forma pertinentes.

## 4. Resultados

En el apartado se procederá a la exposición y análisis de los resultados obtenidos en el proceso descrito en el apartado anterior, apartado 3. Metodología. Para poder realizar el análisis de resultados se han empleado dos softwares diferentes, Excel y Minitab.

Mediante Excel se crearon las gráficas de barras en las que se puede observar los valores de los distintos parámetros de estudio en función del material y diámetro de las probetas. El programa Minitab 18 se empleó con el fin de llevar a cabo un estudio estadístico de los datos obtenidos. Para el análisis, mediante la herramienta de Diseño de experimentos (DOE) se creó un modelo de superficie de respuesta (RSM). Con estas herramientas se consigue un modelo estadístico de los diferentes parámetros de interés en función de los diámetros nominales de las probetas, velocidad de corte y avance para cada material

Este proceso de modelado se basa en realizar una regresión múltiple, en la que se estiman los coeficientes del modelo, posteriormente el programa realiza un análisis de varianza (ANOVA). En este análisis se verifica si el modelo generado es significativo y el efecto de los distintos factores estudiados sobre la respuesta.

En esta fase de análisis los parámetros que se discutirán serán:

- Temperatura
- Acabado superficial
- Desviaciones de forma
- Diámetro
- Fuerzas de corte
- Consumo

### 4.1 Temperaturas

Las temperaturas promedio y máximas registradas mediante las operaciones de cilindrado efectuadas, recogidas en la **Tabla 13**, muestran la dependencia de la temperatura del material de cada probeta y de la velocidad de corte aplicada. Estos aspectos se pueden ver con mayor claridad en las **Figuras 61 y 62**, donde se puede ver la variación de la temperatura en cada material con los diferentes parámetros de corte. Es importante recalcar que durante todo el proceso se empleó refrigeración por aire comprimido, aspecto que influye en la temperatura y evacuación de la viruta. La pistola se colocó de manera que el flujo de aire incidiese en la zona en la que se efectúa el corte, como se ve en la **Figura 60**

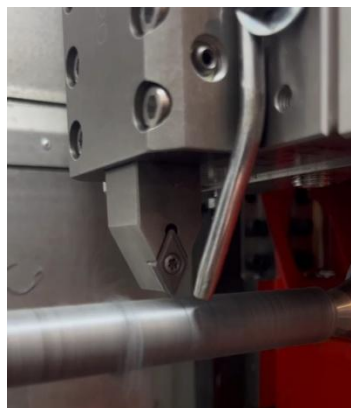


Figura 60: Pistola colocada

Material	V (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)	T med (°C)	T máx (°C)
PETG	50	0,05	18	70,879	97,051
PETG	200	0,05	18	93,376	123,531
PETG	50	0,2	18	84,517	93,469
PETG	200	0,2	18	96,132	105,141
PETG	50	0,05	16	76,762	98,963
PETG	200	0,05	16	98,780	110,945
PETG	50	0,2	16	78,900	88,827
PETG	200	0,2	16	100,374	111,465
HIPS	50	0,05	18	61,889	98,710
HIPS	200	0,05	18	83,432	95,296
HIPS	50	0,2	18	66,946	81,329
HIPS	200	0,2	18	74,215	94,702
HIPS	50	0,05	16	69,322	91,181
HIPS	200	0,05	16	84,226	95,296
HIPS	50	0,2	16	68,841	98,963
HIPS	200	0,2	16	79,850	98,963
ABS	50	0,05	18	65,904	81,710
ABS	200	0,05	18	91,362	98,143
ABS	50	0,2	18	76,289	83,305
ABS	200	0,2	18	88,708	93,992
ABS	50	0,05	16	72,088	84,675
ABS	200	0,05	16	98,606	107,290
ABS	50	0,2	16	75,054	86,160
ABS	200	0,2	16	85,762	99,044

Tabla 13: Temperaturas registradas

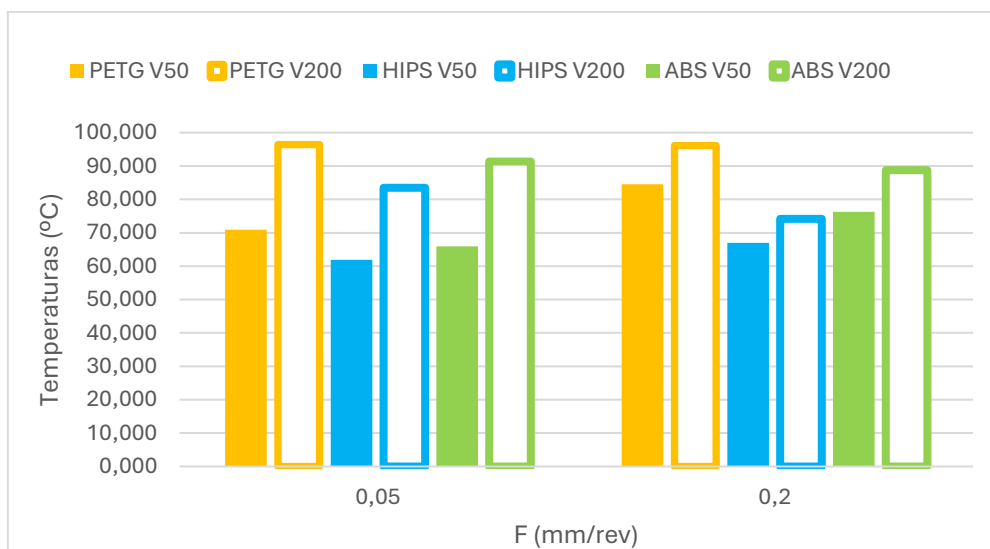


Figura 61: Temperaturas registradas al reducir el diámetro a 18 mm

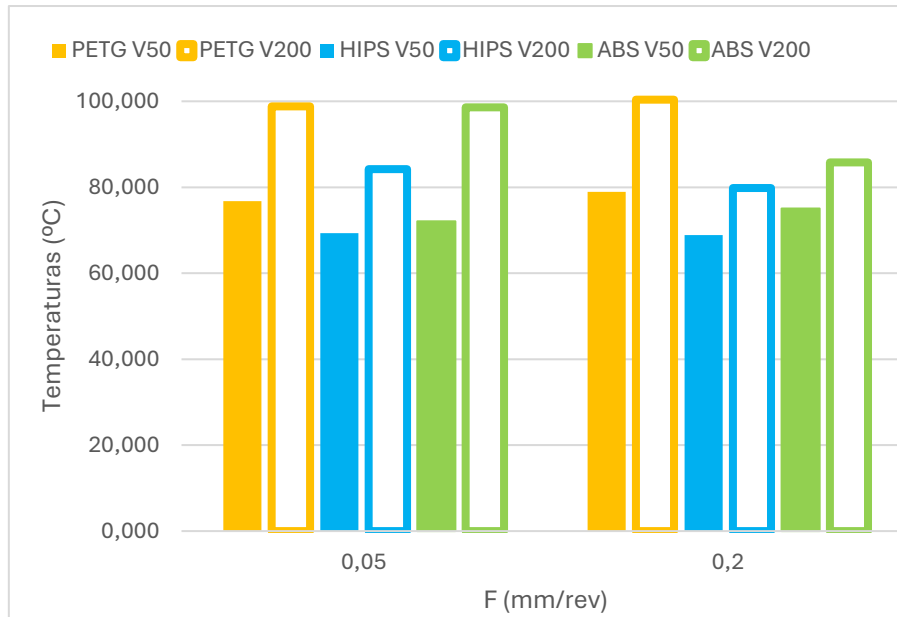


Figura 62: Temperaturas registradas al reducir el diámetro a 16 mm

De los datos obtenidos se observó de manera general:

- Influencia directa de la velocidad de corte ( $V_c$ ) en el proceso. En todos los materiales se obtuvieron las temperaturas máximas a  $V_c = 200$  m/min lo que indica una influencia directa y significativa de este parámetro de corte. Esta influencia se debe a la deformación plástica sufrida por la viruta durante el proceso sumado a la fricción existente entre la herramienta y la pieza mecanizada. Estos aspectos hacen que la generación de calor sea mayor al calor que puede ser evacuado traduciéndose en un aumento de la temperatura del proceso.
- La velocidad de avance ( $f$ ), muestra ser un parámetro poco significativo en cuanto al aspecto térmico del proceso al mostrar únicamente ligeras variaciones de temperatura al mecanizar las probetas con un avance de 0,05 mm/rev y 0,2 mm/rev en el caso de PETG. Se observa como en el caso de ABS y HIPS se muestra una tendencia decreciente de la temperatura al emplear una velocidad de corte de 200 m/min y 0,2 mm/rev de avance.
- Se observa la dependencia del material en las temperaturas del proceso registrándose las siguientes temperaturas máximas para cada material:
  - PETG: 123,531 °C ( $V_c = 200$  m/min,  $f = 0,05$  mm/rev)
  - ABS: 107,290 °C ( $V_c = 200$  m/min,  $f = 0,2$  mm/rev)
  - HIPS: 98,963 °C ( $V_c = 200$  m/min,  $f = 0,05$  mm/rev)

En las siguientes figuras, **Figuras 63, 64 y 65** se muestran las variaciones de la temperatura durante las operaciones que dieron lugar a las máximas temperaturas.

En la **Figura 63** se puede ver que la temperatura registrada en el PETG es muy fluctuante, esto se debe a que en el proceso la viruta generada se fue adheriendo a la probeta, como se ve en la **Figura 66**, lo que provoca estas fluctuaciones. El PETG cuenta con una temperatura de transición vítrea de unos 80 °C y como se puede ver en la figura anterior las temperaturas registradas superan dicho valor, esto acarrea consecuencias como el ablandamiento del material lo cual conlleva una mayor generación de rebabas y adhesión de virutas [58].

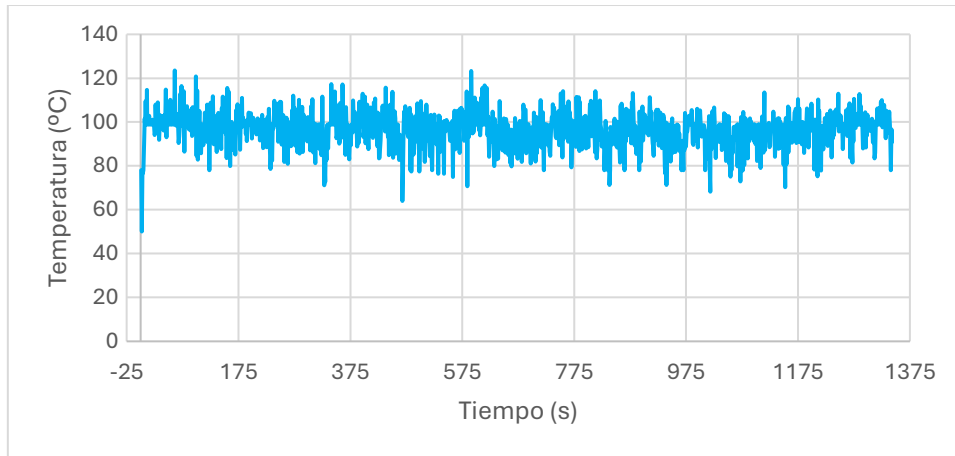


Figura 63: Evolución de la temperatura en función del tiempo para PETG ( $V_c = 200 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/rev}$ )

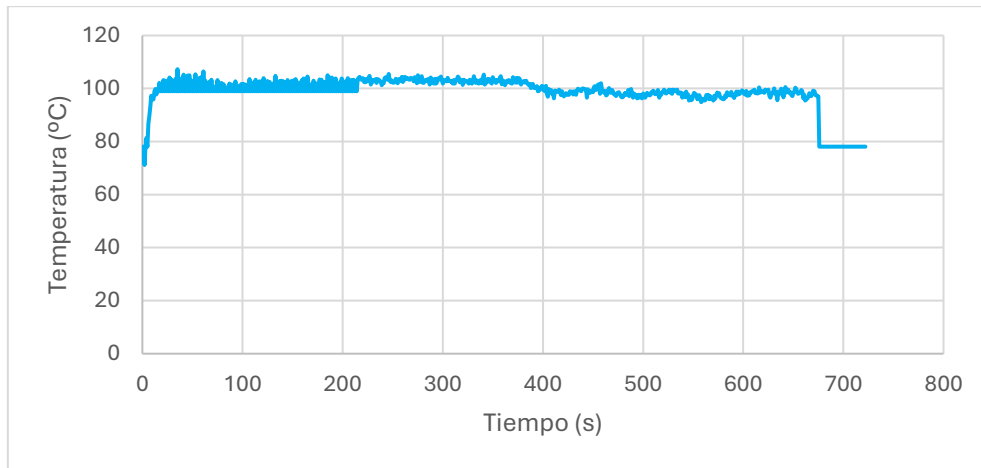


Figura 64: Evolución de la temperatura en función del tiempo para ABS ( $V_c = 200 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,2 \text{ mm/rev}$ )

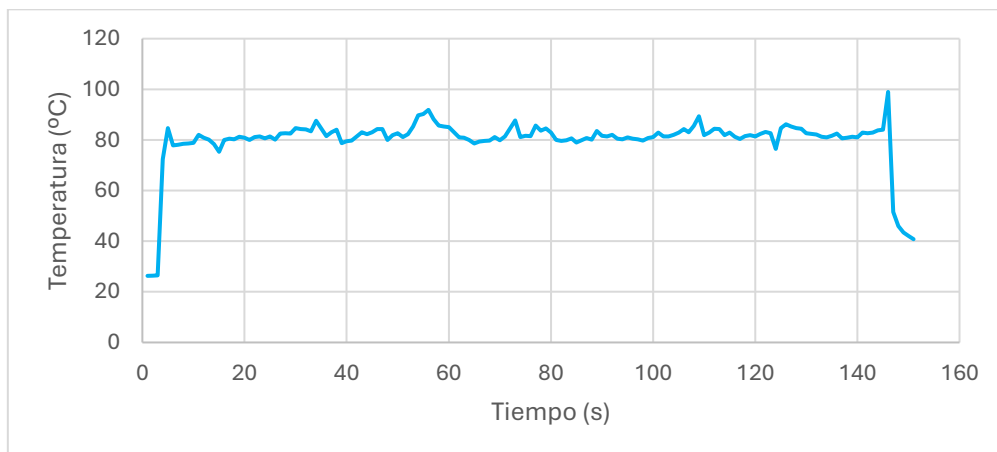


Figura 65: Evolución de la temperatura en función del tiempo para HIPS ( $V_c = 200 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/rev}$ )

Se puede observar en las figuras mostradas como el ABS y HIPS, pese a presentar fluctuaciones de temperatura, muestran un comportamiento más estable, presentando el

ABS mayor número de fluctuaciones, pero de menor magnitud, mientras que HIPS parece tener un comportamiento más intermedio.

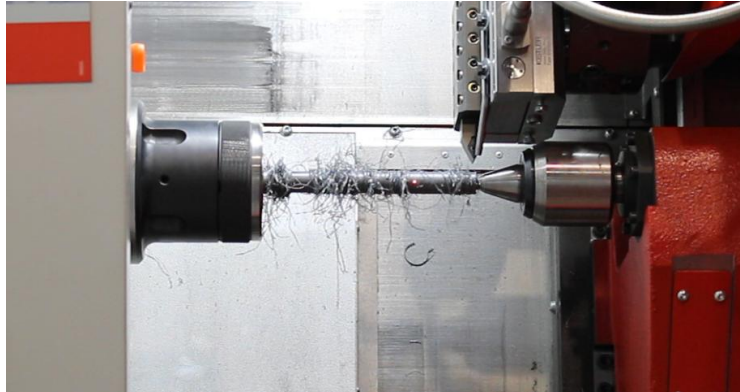


Figura 66: Probeta PETG mecanizada ( $V_c = 200 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/rev}$ )

Los datos reflejados en la **Tabla 13** se trataron en el software Minitab 18, siguiendo el proceso ya comentado, obteniéndose los siguientes resultados.

Se obtuvo un modelo con un valor  $R^2$  de 93,44% lo cual indica la validez de este modelo. En la siguiente tabla, **Tabla 14**.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	2908,98	207,78	24,39	0,000
Lineal	5	2624,68	524,94	61,62	0,000
V (m/min)	1	1792,87	1792,87	210,47	0,000
F (mm/rev)	1	3,35	3,35	0,39	0,546
D (mm)	1	50,80	50,80	5,96	0,037
Material	2	777,67	388,84	45,65	0,000
Interacción de 2 factores	9	284,30	31,59	3,71	0,032
V (m/min)*F (mm/rev)	1	142,31	142,31	16,71	0,003
V (m/min)*D (mm)	1	1,42	1,42	0,17	0,693
V (m/min)*Material	2	39,38	19,69	2,31	0,155
F (mm/rev)*D (mm)	1	39,96	39,96	4,69	0,059
F (mm/rev)*Material	2	58,03	29,01	3,41	0,079
D (mm)*Material	2	3,21	1,60	0,19	0,832
Error	9	76,67	8,52		
Total	23	2985,65			

Tabla 14: Análisis de varianza para la temperatura

En la tabla anterior se muestran ciertos valores de interés del ANOVA, estos son el valor F y p. El valor F define la influencia del factor en el modelo generado, cuanto mayor sea el valor de este mayor será el peso del factor, mientras que el valor p muestra el nivel de confianza del factor, si este valor fuese, por ejemplo, <0,05 significaría que el factor se considera significativo con un 95% de confianza.

Con los resultados mostrados en la tabla anterior se determina que los factores más determinantes en la temperatura del proceso son la velocidad de corte, con un valor F de 210,47, y el material con un valor F de 45,65, ambos con un valor p nulo lo que indica que estos parámetros son significativos con un nivel alto de confianza. También se observa que la velocidad de avance tiene escasa influencia en la temperatura del proceso con valores F y p desfavorables.

Aunque del análisis estadístico se muestra que la velocidad de avance no afecta de manera significativa en la temperatura si se muestra que la combinación de esta con la velocidad de corte si afecta, esto se puede ver en las **Figuras 67, 68 y 69**, donde se muestra el diagrama de contorno de la temperatura de cada material donde se muestra la evolución de la temperatura en función de las velocidades.

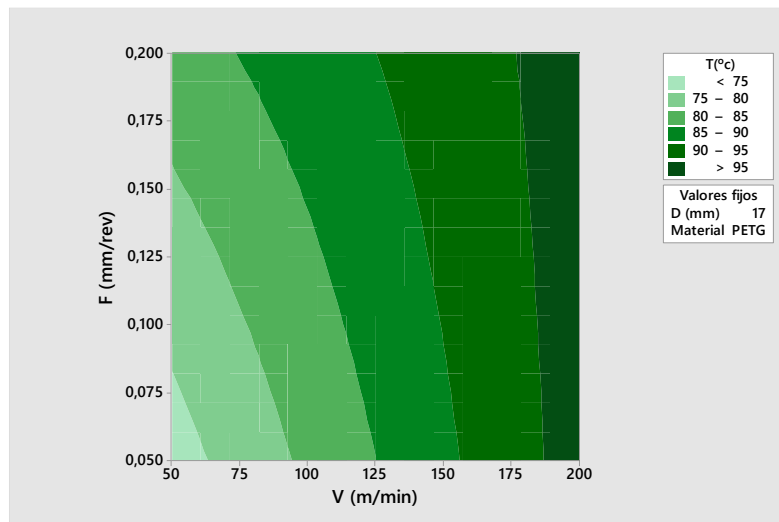


Figura 67: Diagrama de contorno de  $T^a$  para PETG

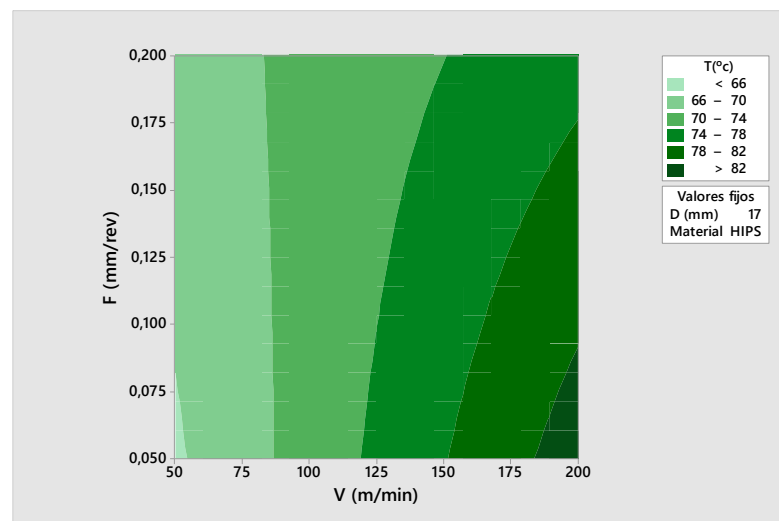


Figura 68: Diagrama de contorno de  $T^a$  para HIPS

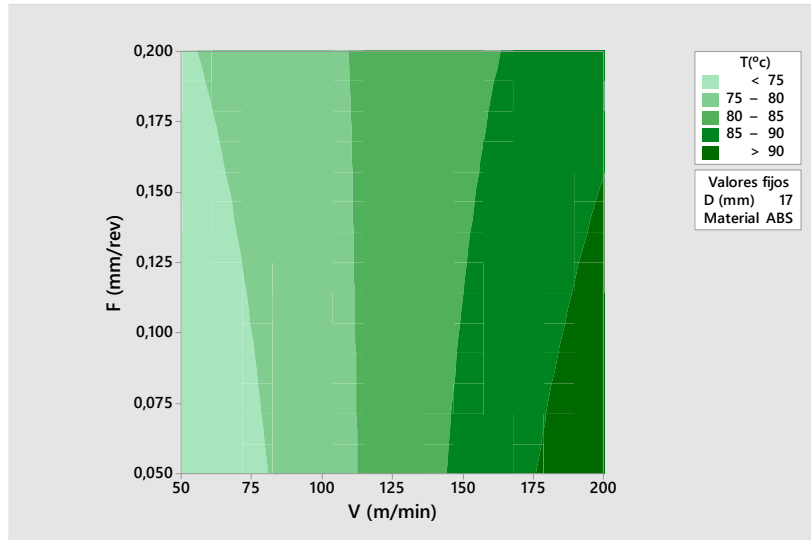


Figura 69: Diagrama de contorno de  $T^a$  para ABS

Estudiando los diagramas de contorno obtenidos se muestra como en los tres materiales se produce un aumento de la temperatura del proceso conforme aumenta la velocidad de corte. La velocidad de corte, tal y como se comentó en apartado 2.5.4 Parámetros de corte, influye directamente en las temperaturas desarrolladas en el mecanizado, puesto que un aumento de esta velocidad supone además un aumento de la fricción entre la pieza y la herramienta de corte, sumado a que al emplear altas velocidades de corte se genera un exceso de calor que no se evacúa a la velocidad suficiente lo que implica un aumento de la temperatura en la zona de corte [59].

Según la información mostrada en el diagrama de contorno, a medida que aumenta el avance empleado se produce un aumento de temperatura, sobre todo a altas velocidades en el caso del PETG, sin embargo, el ABS y HIPS presentan una ligera tendencia hacia una menor temperatura.

Del análisis se obtuvieron las expresiones mostradas en la **Tabla 15** para la temperatura de los distintos materiales.

ABS	$T(^{\circ}C)$	=	$109,1 + 0,234 V \text{ (m/min)} - 242 F \text{ (mm/rev)} - 2,90 D \text{ (mm)}$ $- 0,433 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} - 0,00324 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $+ 17,20 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$
HIPS	$T(^{\circ}C)$	=	$120,5 + 0,200 V \text{ (m/min)} - 253 F \text{ (mm/rev)} - 3,72 D \text{ (mm)}$ $- 0,433 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} - 0,00324 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $+ 17,20 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$
PETG	$T(^{\circ}C)$	=	$111,1 + 0,239 V \text{ (m/min)} - 205 F \text{ (mm/rev)} - 2,98 D \text{ (mm)}$ $- 0,433 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} - 0,00324 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $+ 17,20 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$

Tabla 15: Expresiones obtenidas a partir del modelo

En conclusión, del estudio realizado se obtiene que la velocidad de corte y el material de la probeta son los factores con mayor influencia en la temperatura del proceso. Esta afirmación ha sido corroborada tanto con los resultados experimentales como en el

análisis estadístico mediante ANOVA. En el ANOVA se obtuvieron valores  $f$  elevados y valores  $p < 0,05$  para estos factores, indicando una influencia estadísticamente significativa.

De los tres materiales ensayados el PETG fue el material que alcanzó las mayores temperaturas, mientras que el ABS y HIPS presentaron un comportamiento más estable. Es necesario puntualizar la influencia de la refrigeración por aire comprimido contribuyendo a la evacuación de la viruta y disminuyendo la temperatura parcialmente.

En cuanto a las velocidades de avance, tanto en los resultados experimentales como en el ANOVA, se muestra una menor influencia del proceso contando con valores  $f$  y  $P$  desfavorables.

## 4.2 Acabado superficial

En la **Tabla 16**, se muestran los valores de rugosidad superficial,  $S_a$ ,  $S_z$  y  $S_k$ , de las probetas según sus condiciones de corte, además de los referidos a las probetas en bruto y las probetas impresas con las opciones de alta calidad superficial.

Material	V (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)	$S_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_k$ ( $\mu\text{m}$ )
PETG	50	0,05	18	1,033	19,390	3,235
PETG	200	0,05	18	4,154	117,312	9,159
PETG	50	0,2	18	1,803	60,91	5,101
PETG	200	0,2	18	2,880	43,419	6,103
PETG Alta calidad	-	-	20	15,033	94,755	45,014
PETG Bruto	-	-	20	18,989	159,503	22,964
PETG con aire	50	0,05	16	1,649	160,559	4,478
PETG sin aire	50	0,05	16	4,446	297,704	10,224
PETG	200	0,05	16	1,771	43,234	5,155
PETG	50	0,2	16	2,847	153,464	8,861
PETG	200	0,2	16	2,707	23,071	8,918
HIPS	50	0,05	18	0,448	10,650	1,419
HIPS	200	0,05	18	0,58	35,343	1,721
HIPS	50	0,2	18	1,678	9,732	3,974
HIPS	200	0,2	18	1,733	38,125	3,923
HIPS Alta calidad	-	-	20	5,296	37,712	13,507
HIPS Bruto	-	-	20	16,737	102,933	18,449
HIPS	50	0,05	16	0,389	6,701	1,26
HIPS	200	0,2	16	1,948	65,508	4,727
ABS	50	0,05	18	0,473	6,841	1,482
ABS	200	0,05	18	0,841	51,349	2,585
ABS	50	0,2	18	1,73	13,433	3,705
ABS	200	0,2	18	1,854	60,782	5,074
ABS Alta calidad	-	-	20	5,554	33,387	15,307
ABS Bruto	-	-	20	15,778	88,982	19,538
ABS	50	0,05	16	0,818	18,087	2,068
ABS	200	0,05	16	0,855	26,53	2,58
ABS	50	0,2	16	1,657	22,728	3,934
ABS	200	0,2	16	1,959	29,168	5,109

Tabla 16: Valores de rugosidad superficial

Para cada material se representaron los resultados obtenidos consiguiendo así una representación gráfica de estos para conseguir un mayor claridad a la hora de su análisis.

#### 4.2.1 Rugosidad superficial probetas PETG

Al representar los valores obtenidos en las probetas de PETG se obtuvieron las **Figuras 70, 71 y 72**.

Antes de proceder al análisis de la rugosidad superficial de estas probetas, es necesario recalcar que en el segundo cilindrado efectuado con  $V_c=50$  m/min y  $f=0,05$  mm/rev hubo una zona en la que no se empleó aire comprimido, lo que produce una irregularidad en los resultados obtenidos.

En las gráficas se puede ver con mayor facilidad la evolución de la calidad superficial en las probetas ensayadas. Las probetas en bruto contaban con una rugosidad superficial elevada, con valores de  $S_a=18,989$   $\mu\text{m}$ ,  $S_z=159,503$   $\mu\text{m}$  y  $S_k = 22,264$   $\mu\text{m}$ . Este aspecto se vio mejorado al realizar una impresión de alta calidad, obteniéndose una mejora moderada en la rugosidad con valores de  $S_a=15,033$   $\mu\text{m}$ ,  $S_z=94,755$   $\mu\text{m}$  y  $S_k = 45,014$   $\mu\text{m}$ .

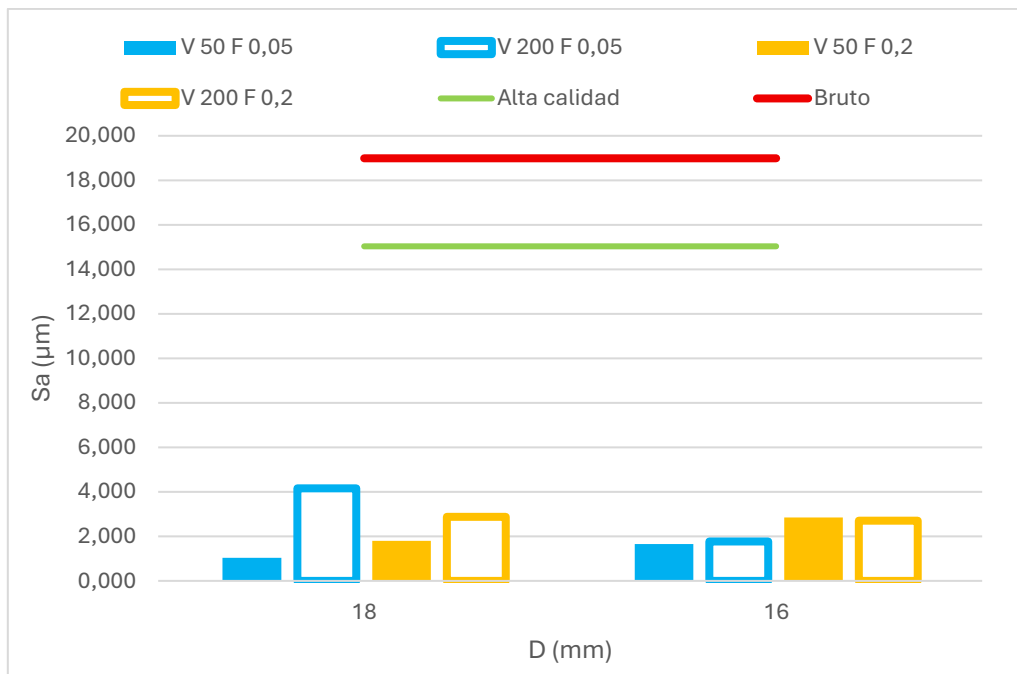


Figura 70: Valores de Sa para cada probeta

Observando los resultados obtenidos en cuanto a Sa se muestra como se ha reducido considerablemente este parámetro superficial. Este parámetro se vio reducido al aplicar las condiciones para generar una impresión de alta calidad, aunque no se logró una mejora tan significativa como la conseguida al aplicar el cilindrado a las probetas. Se observa cómo es más determinante la velocidad de avance que de corte, siendo beneficioso emplear bajas velocidades de avance.

Es interesante destacar como las combinaciones de parámetros que han dado resultado a un peor acabado superficial también han sido las combinaciones que han generado una temperatura media del proceso más alta pudiéndose ver cierta relación entre la rugosidad y temperatura del proceso.

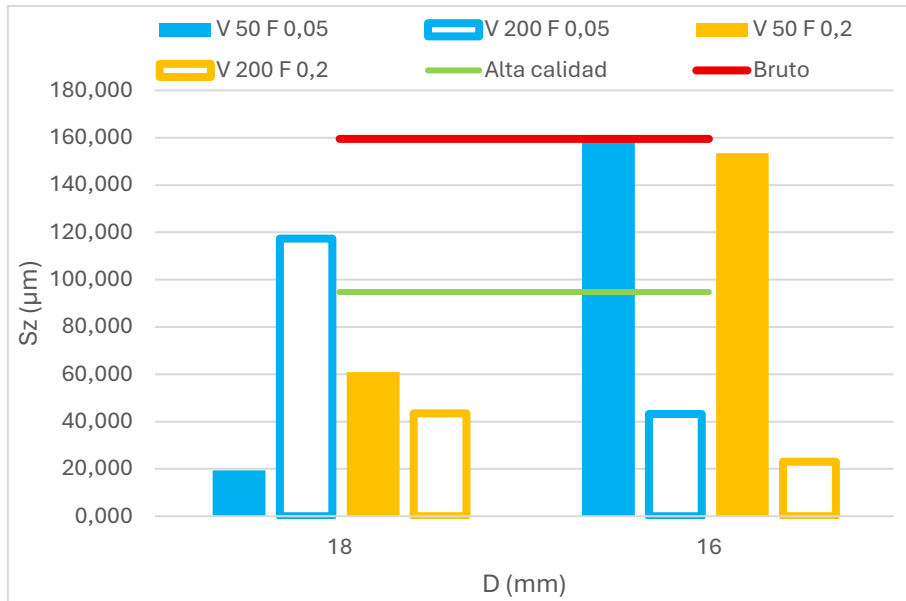


Figura 71: Valores de Sz para cada probeta

Al estudiar los datos registrados para el Sz se puede ver como en algunas de las probetas mecanizadas se han conseguido valores más altos que los registrados en la probeta de alta calidad, este aumento puede deberse a la adhesión de fragmentos de viruta en la superficie de la probeta, ya que recuperando la definición aportada el parámetro Sz es la suma del valor de la altura máxima de pico y del valor de profundidad máxima de hoyo de la superficie.

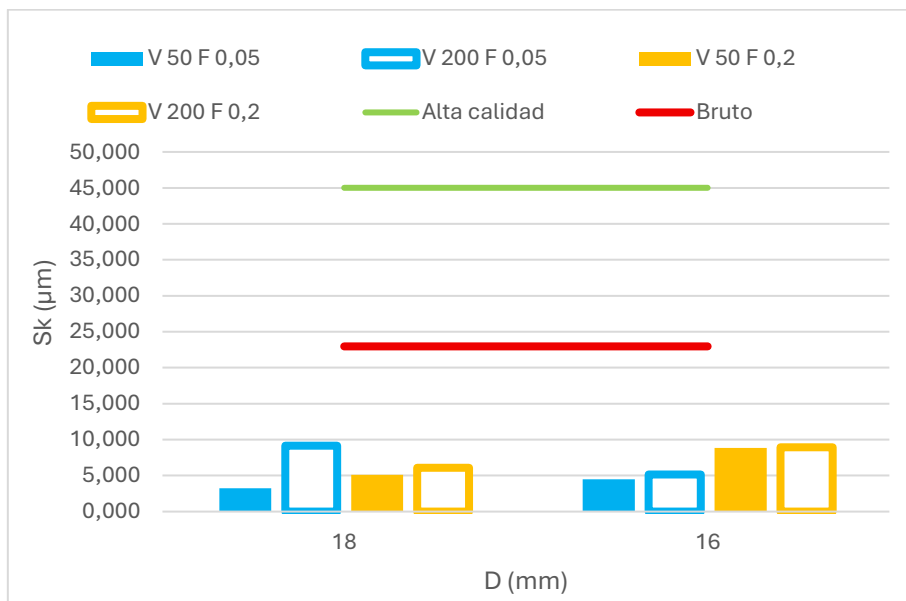


Figura 72: Valores de Sk para cada probeta

Por último, el parámetro Sk ha evolucionado de manera positiva al aplicar el mecanizado, obteniéndose una mejora considerable en todas las probetas, destacando sobre todo las que fueron mecanizadas con avances pequeños. Se vio además una ligera influencia de la velocidad de corte, aunque representa más un carácter secundario.

Al aplicar las operaciones de cilindrado, se mostró una mejora considerable, siendo la mejor configuración de parámetros para este material una velocidad de corte de 50 m/min

y 0,05 mm/rev, mientras que la combinación más desfavorable es con velocidad de corte de 200 m/min y 0,05 mm/rev generando una superficie más rugosa y con una uniformidad menor, aun así, presento una mejora con respecto a la rugosidad de la probeta en bruto.

En el mecanizado de este polímero se ha visto como un aumento de la velocidad de corte ha tenido un efecto negativo en cuanto a la rugosidad de la probetas, al igual que sucede con la velocidad de avance, puesto que los mejores resultados han sido obtenidos para velocidades de 0,05 mm/rev. Esto se debe a que, de manera general se ha comprobado que, aunque la influencia ha sido ligera, un aumento de la velocidad de corte ha aumentado ligeramente el valor de los parámetros de rugosidad estudiados, salvo en el caso de  $S_z$  que mostró una influencia positiva disminuyendo su valor, especialmente en el segundo mecanizado.

Estos resultados concuerdan con los del artículo mencionado en el apartado 2.5.7 Mecanizado de polímeros, sobre el mecanizado de PETG reforzado con fibra de carbono donde se determinó que el valor óptimo para mejorar el acabado superficial de este material se daba al emplear un avance de pequeño.

En los estudios consultados sobre el mecanizado de PETG reforzado con fibra de carbono se determinó como una combinación de alta velocidad de corte y avance producía aumentos en la temperatura del proceso [60], lo cual como se comentó en el apartado 4.1 Temperaturas, genera la adhesión de la viruta afectando a la rugosidad superficial.

Un aumento de temperaturas en el caso de los polímeros reblandece el material, lo cual puede hacer más destacable el paso de la herramienta en la superficie.

A continuación, en las **Figuras 73 y 74** se puede observar la superficie de las probetas tras realizar el mecanizado.

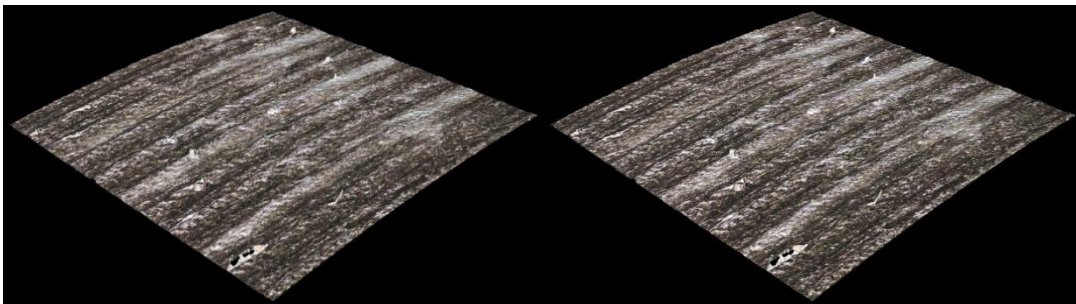


Figura 73: a) probeta  $V_c=500$  m/min y  $f=0,05$ mm/rev b) probeta  $V_c=50$  m/min y 0,02 mm/rev

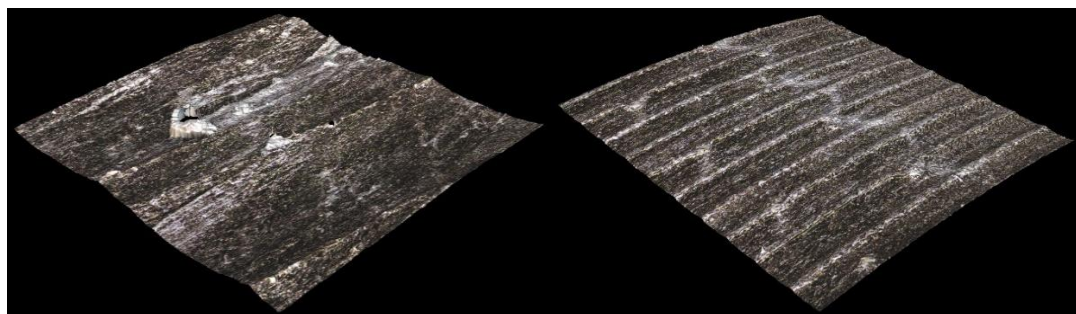


Figura 74: a) probeta  $V_c=200$  m/min y  $f=0,05$ mm/rev b) probeta  $V_c=200$  m/min y 0,02 mm/rev

#### 4.2.3 Rugosidad superficial probetas ABS

Este polímero presenta unos mejores valores de rugosidad superficial al ser impreso mediante una configuración de alta calidad que el PETG, sin embargo, al imprimir la probeta en bruto presentó valores similares.

En cuanto a los resultados tras efectuar las operaciones de mecanizado se observa que este material ha presentado mejores resultados que el anterior descrito, el mejor resultado se obtuvo con los mismos valores de velocidad de corte y de avance, 50 m/min y 0,05 mm/rev. Este material tuvo los resultados más desfavorables con una velocidad de corte de 200 m/min y de avance 0,2 mm/rev. Representando gráficamente los valores se obtienen las **Figuras 75, 76 y 77**.

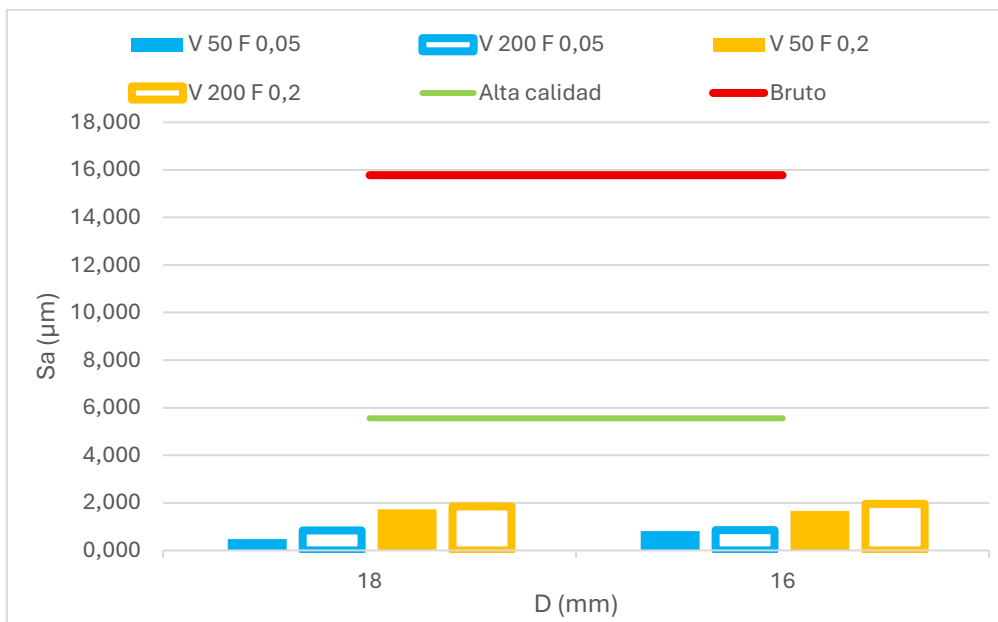


Figura 75: Valores de Sa para cada probeta

Tras un primer análisis de los datos, se observa que, en este polímero, la velocidad de avance es el factor más influyente en el Sa. A medida que esta velocidad aumenta se muestra un crecimiento del valor del Sa, indicando un peor acabado superficial.

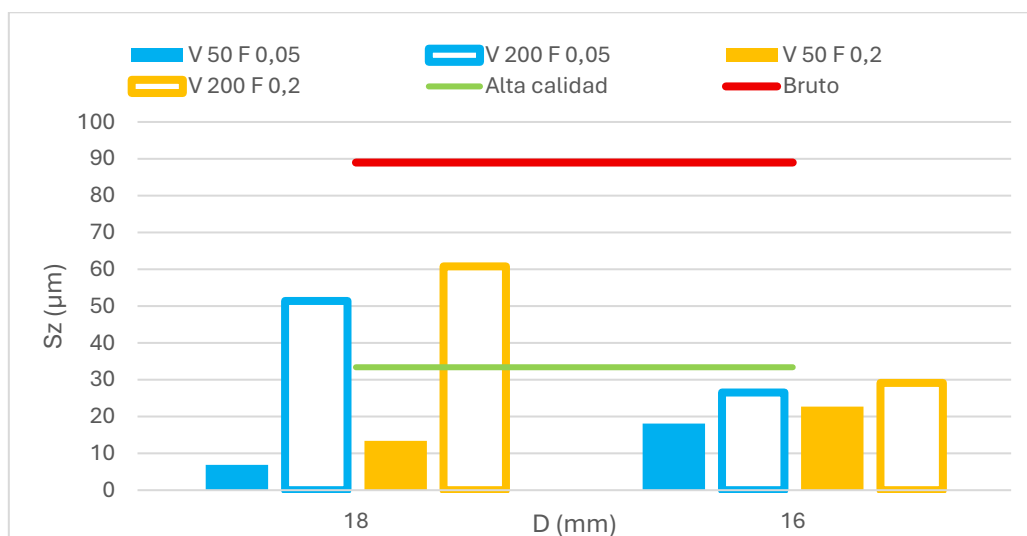


Figura 76: Valores de Sz para cada probeta

En el caso del Sz, se muestra influenciado principalmente por la velocidad de corte, apareciendo variaciones importantes al aumentar dicha velocidad en el primer mecanizado, aunque también es afectado por la de avance en menor medida.

Por último, para el Sk se observa un comportamiento similar al Sa viéndose con claridad como es más influyente el aumento de la velocidad de avance que de la velocidad de corte.

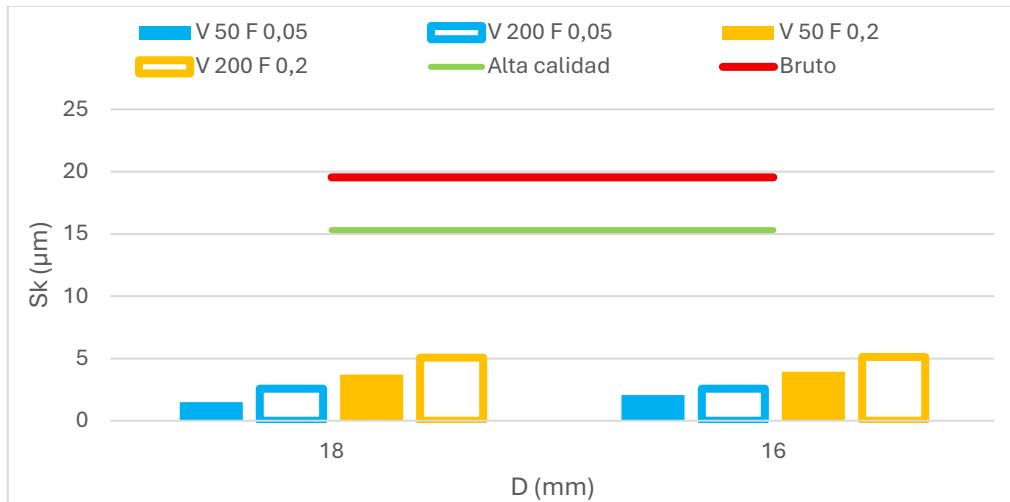


Figura 77: Valores de Sk para cada probeta

Según la bibliografía consultada sobre el torneado de ABS, en este material un avance pequeño provoca una mejora del acabado superficial ya que al emplear bajos avances se reducen las fuerzas de corte, disminuyendo la deformación que sufre el material lo que evita desgarros en el material. Además, un menor avance conducía una superficie más lisa al espaciarse más las crestas creadas por el paso de la herramienta [61][62].

Al mecanizar este polímero se concluye que esta operación ha sido efectiva al conseguir mejorar el acabado superficial de las probetas mecanizadas, la combinación de parámetros en la que se registró un mejor acabado superficial fue  $V_c=50$  m/min y  $f=0,05$  mm/rev. Lo cual corresponde a lo enunciado en los artículos consultados, además adelantando aspectos sobre las fuerzas que se comentaran más tarde, las fuerzas de corte se redujeron al emplear avances pequeños lo cual produce una menor deformación en el material, además como se puede ver en las **Figuras 78 y 79**, es más notable el paso de la herramienta en las superficies mecanizadas con un avance mayor.

Se ha visto que un aumento de la velocidad de corte resultó ser perjudicial en este aspecto principalmente en el parámetro Sz donde hubo probetas que registraron mayores valores a los presentados por la probeta de alta calidad de impresión. Un aumento de la velocidad de corte, como se comentó en el apartado referente a las temperaturas del proceso, implica un aumento de la temperatura, pudiendo provocar el reblandecimiento del material, la interacción de ambos aspectos conlleva un aumento de la deformación del material, aspecto que es negativo en cuanto al acabado superficial al torner polímeros.

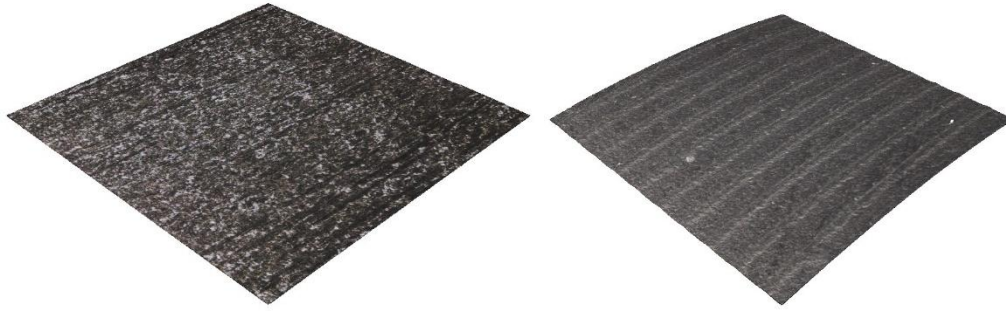


Figura 78: Probetas a)  $V_c=50 \text{ m/min}$ ,  $f=0,05 \text{ mm/rev}$

b)  $V_c=50 \text{ m/min}$ ,  $f=0,02 \text{ mm/rev}$

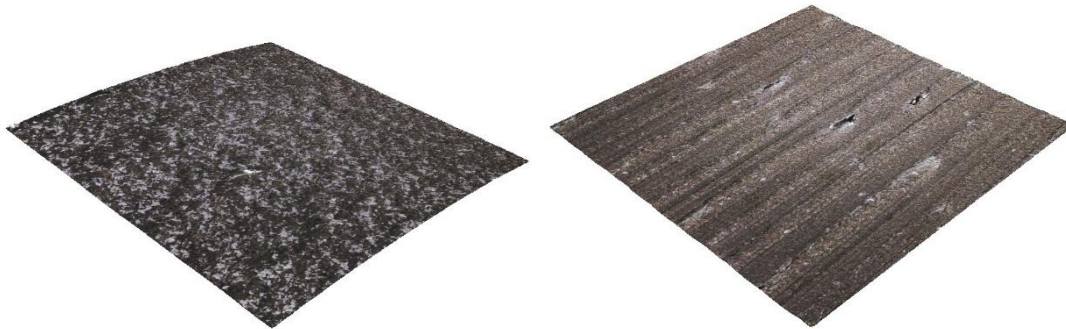


Figura 79: Probetas a)  $V_c=200 \text{ m/min}$ ,  $f=0,05 \text{ mm/rev}$

b)  $V_c=200 \text{ m/min}$ ,  $f=0,02 \text{ mm/rev}$

#### 4.2.3 Rugosidad superficial probetas HIPS

Este polímero ha presentado una notable diferencia entre la probeta en bruto y una vez mecanizada en cualquiera de las condiciones de corte, contando la probeta en bruto con un valor de  $S_a=16,737 \mu\text{m}$ ,  $S_z=102,933 \mu\text{m}$  y  $S_k=18,449 \mu\text{m}$ , comparándola con los parámetros obtenidos en el segundo cilindrado con una velocidad de corte de  $200 \text{ m/min}$  y  $0,2 \text{ mm/rev}$ , mecanizado en el que se presentaron los peores resultados, hubo una clara mejoría de la rugosidad contando con valores de  $S_a=1,948 \mu\text{m}$ ,  $S_z=65,508 \mu\text{m}$  y  $S_k=4,727 \mu\text{m}$ . En la **Figura 80** se muestran los valores de  $S_a$  para cada probeta.

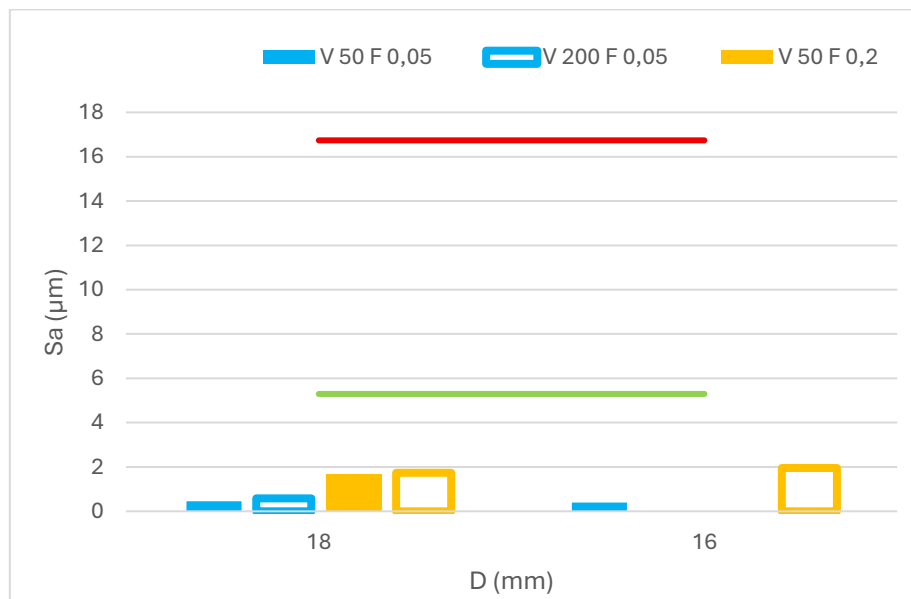


Figura 80: Valores de  $S_a$  para cada probeta

En cuanto al Sa se concluye la influencia del avance como parámetro fundamental contando con una notoria influencia. La velocidad de corte muestra un carácter más secundario en Sa al mostrar escasas variaciones al aumentar esta velocidad. Se presentó una mejoría al comparar los valores de Sa tras el mecanizado con los de la probeta impresa en alta calidad, mostrando todas las probetas una mejora en este aspecto superficial

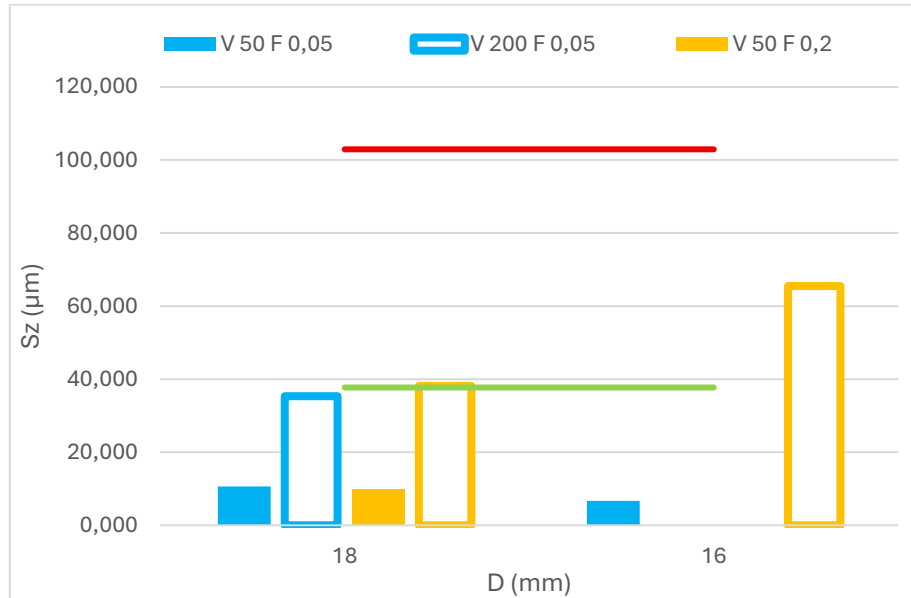


Figura 81: Valores de Sz para cada probeta

Tras analizar los resultados relativos al Sz aparece una mayor importancia de la velocidad de corte existiendo fluctuaciones importantes de Sz al aumentar esta velocidad. En cuanto a la velocidad de avance no parece gozar de mucha influencia en este caso. Al comparar la probeta de alta calidad con las mecanizadas no se observa mucha diferencia entre los valores obtenidos.

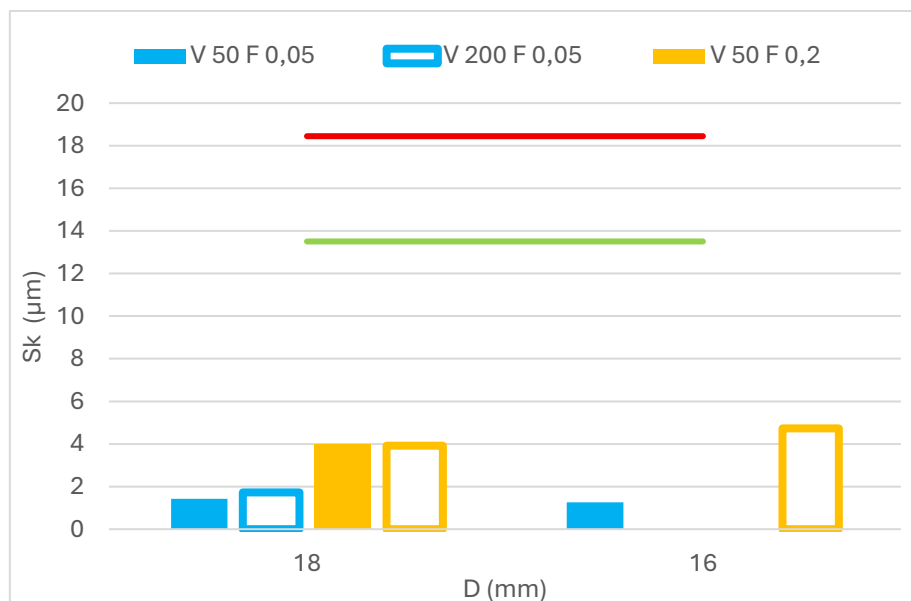


Figura 82: Valores de Sk para cada probeta

Por último, el parámetro  $S_k$  presenta un carácter similar al de  $S_a$  mostrándose una influencia principal del avance, consiguiéndose mejores resultados empleando un avance de 0,05 mm/rev. Al aumentar la velocidad de corte no se experimentaron cambios muy notables en este parámetro superficial lo que implica un carácter secundario de esta velocidad. Este parámetro ha experimentado un evolución positiva al compararse con los valores de las probetas en bruto y alta calidad.

En este material al igual que en ABS se muestran mejores resultados generales al emplear bajos avances combinados con velocidades de corte bajas, esto puede deberse a las mismas razones que en el anterior material. En las **Figuras 83 y 84**, se muestra como el paso de la herramienta no es tan notorio en la superficie en las probetas mecanizadas con un avance de 0,05 mm/rev. Se puede observar en la **Figura 84 b)** como se presentan mayores irregularidades en la superficie las cuales pueden tener como origen las consecuencias de empelar altas velocidades de corte y avance aumentándose las temperaturas y fuerzas involucradas en el proceso, que como se vio en la bibliografía consultada, un aumento de la fuerza y temperatura acarrear un peor acabado superficial.

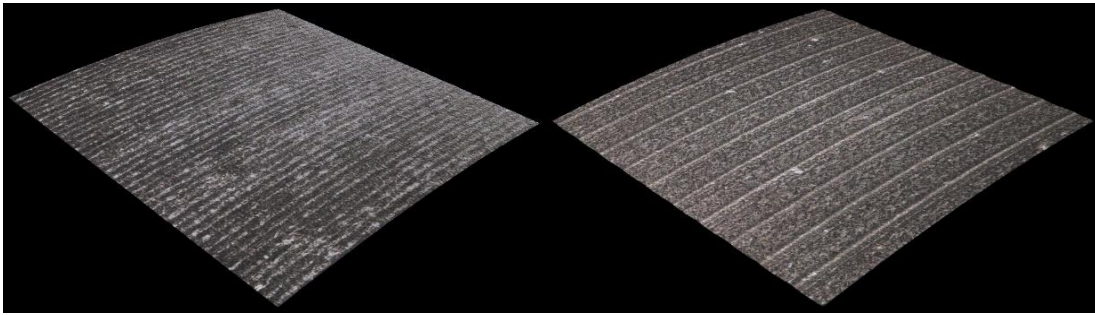


Figura 83: Probetas a)  $V_c=50$  m/min ,  $f$  0,05 mm/rev

b)  $V_c=50$ m/min,  $f=$  0,02 mm/rev

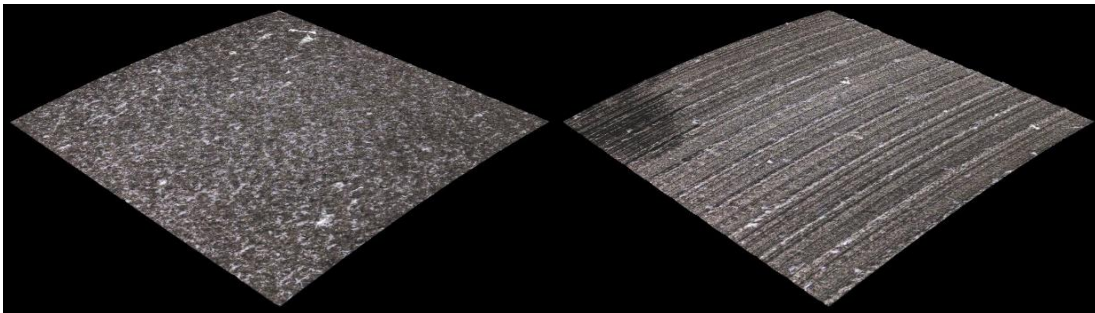


Figura 84: Probetas a)  $V_c=200$  m/min ,  $f$  0,05 mm/rev

b)  $V_c=200$ m/min,  $f=$  0,02 mm/rev

#### 4.2.4 Análisis de varianza realizado para $S_a$

Del análisis de varianza efectuado se obtuvo un modelo con un valor de  $R^2$  del 86,50% indicando que el modelo cuenta con una fiabilidad aceptable. En la **Tabla 17** se recogen los parámetros de interés del modelo generado. Donde se puede observar mediante el valor  $F$  cuales son los parámetros más influyentes en el  $S_a$  del proceso.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	16,0231	1,14451	3,20	0,064
Lineal	5	12,9448	2,58896	7,24	0,011
V (m/min)	1	0,5304	0,53040	1,48	0,263
F (mm/rev)	1	5,2526	5,25259	14,70	0,006
D (mm)	1	0,0014	0,00142	0,00	0,951
Material	2	6,1308	3,06538	8,58	0,013
Interacción de 2 factores	9	3,3553	0,37281	1,04	0,489
V (m/min)*F (mm/rev)	1	0,2790	0,27895	0,78	0,406
V (m/min)*D (mm)	1	1,1078	1,10784	3,10	0,122
V (m/min)*Material	2	1,3923	0,69614	1,95	0,213
F (mm/rev)*D (mm)	1	0,6035	0,60350	1,69	0,235
F (mm/rev)*Material	2	1,2144	0,60718	1,70	0,250
D (mm)*Material	2	0,1584	0,07918	0,22	0,807
Error	7	2,5014	0,35735		
Total	21	18,5246			

Tabla 17: Parámetros de interés ANOVA para Sa

Al evaluar los resultados obtenidos del ANOVA se obtiene que el parámetro de corte con mayor influencia es la velocidad de avance f, contando con el valor F más alto, 14,7, seguido del material de las probetas con un valor de 8,58, lo que concuerda con el primer análisis realizado en el que se determinó que el parámetro con mayor importancia era la velocidad de avance.

En las siguientes figuras, **Figuras 85, 86 y 87**, se muestran las gráficas de contorno generadas a partir del análisis estadístico efectuado.

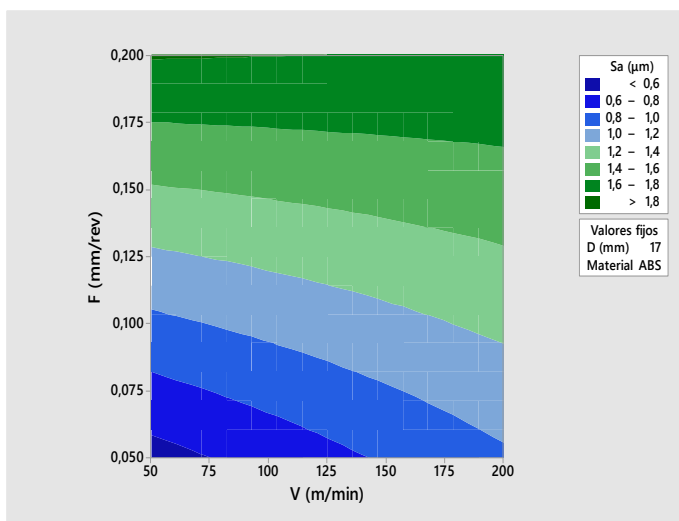


Figura 85: Diagrama de contorno de Sa para ABS

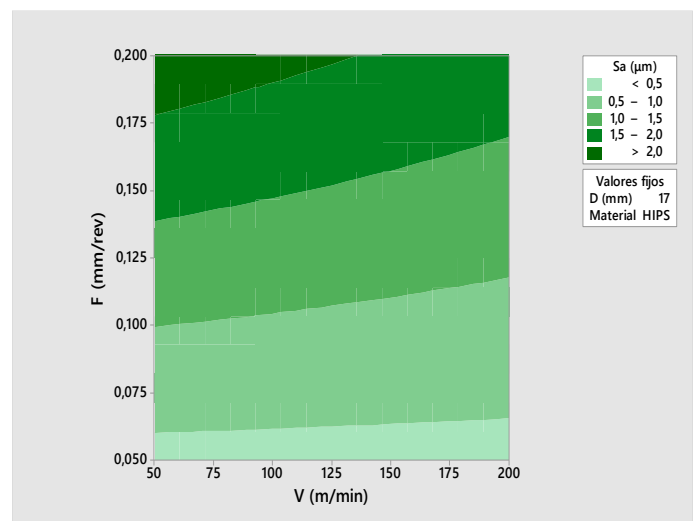


Figura 86: Diagrama de contorno de Sa para HIPS

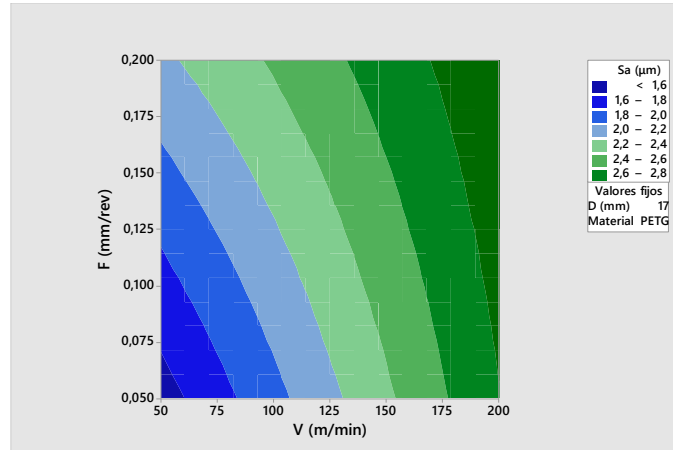


Figura 85: Diagrama de contorno de Sa para PETG

En las gráficas de contorno se muestra que los valores más bajos de Sa se alcanzan consistentemente con bajas velocidades de avance en los tres materiales estudiados, evidenciando la influencia de este parámetro en el proceso.

No obstante, el efecto de la velocidad de corte presenta un comportamiento más irregular en cada material. En las probetas de PETG, se evidencia una mayor sensibilidad al aumento de esta velocidad. Esta sensibilidad se ve reducida en el caso del ABS mostrando un comportamiento ligeramente más estable ante el aumento de la velocidad de corte.

En cuanto al HIPS, se muestra con claridad que la velocidad de corte tiene muy poco efecto, indicando una mayor tolerancia a altas velocidades de corte. En este material el factor más influyente es la velocidad de avance, se muestra que un aumento de esta velocidad conlleva un aumento del valor de Sa.

Las expresiones que modelan el Sa obtenidas con el análisis de varianza se muestran en la **Tabla 18**:

ABS	Sa (µm)	=	2,51 - 0,0504 V (m/min) + 49,8 F (mm/rev) - 0,154 D (mm) - 0,0210 V (m/min)*F (mm/rev) + 0,00320 V (m/min)*D (mm) - 2,36 F (mm/rev)*D (mm)
HIPS	Sa (µm)	=	2,97 - 0,0535 V (m/min) + 54,0 F (mm/rev) - 0,193 D (mm) - 0,0210 V (m/min)*F (mm/rev) + 0,00320 V (m/min)*D (mm) - 2,36 F (mm/rev)*D (mm)
PETG	Sa (µm)	=	0,70 - 0,0449 V (m/min) + 45,5 F (mm/rev) + 0,007 D (mm) - 0,0210 V (m/min)*F (mm/rev) + 0,00320 V (m/min)*D (mm) - 2,36 F (mm/rev)*D (mm)

Tabla 18: Expresiones obtenidas a partir del modelo para Sa

#### 4.2.5 Análisis de varianza realizado para Sz

Del análisis de varianza efectuado se obtuvo un modelo con un valor de R<sup>2</sup> del 76,58%, siendo un modelo menos fiable que el obtenido para el Sa, pero estando dentro de los valores aceptables al ser superior al 75%. En la **Tabla 19** se recogen los parámetros de interés del modelo generado.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	31179,7	2227,12	1,63	0,262
Lineal	5	13364,1	2672,81	1,96	0,202
V (m/min)	1	18,3	18,28	0,01	0,911
F (mm/rev)	1	327,4	327,40	0,24	0,639
D (mm)	1	1109,6	1109,57	0,81	0,397
Material	2	11189,3	5594,67	4,11	0,066
Interacción de 2 factores	9	17705,3	1967,26	1,44	0,321
V (m/min)*F (mm/rev)	1	768,1	768,09	0,56	0,477
V (m/min)*D (mm)	1	7494,4	7494,38	5,50	0,051
V (m/min)*Material	2	4945,6	2472,79	1,81	0,232
F (mm/rev)*D (mm)	1	546,8	546,76	0,40	0,547
F (mm/rev)*Material	2	1740,5	870,27	0,64	0,556
D (mm)*Material	2	1951,5	975,75	0,72	0,521
Error	7	9537,4	1362,49		
Total	21	40717,1			

Tabla 19: Parámetros de interés ANOVA para Sz

Evaluando los resultados mostrados en la **Tabla 19**, se muestra que el material representa el principal factor de influencia en este parámetro, seguido de la velocidad de avance y mosteándose una influencia baja de la velocidad de corte.

Para observar cómo varía Sz en función del material, velocidad de corte y avance se adjuntan las **Figuras 88, 89 y 90** en las cuales se pueden ver los diagramas de contorno.

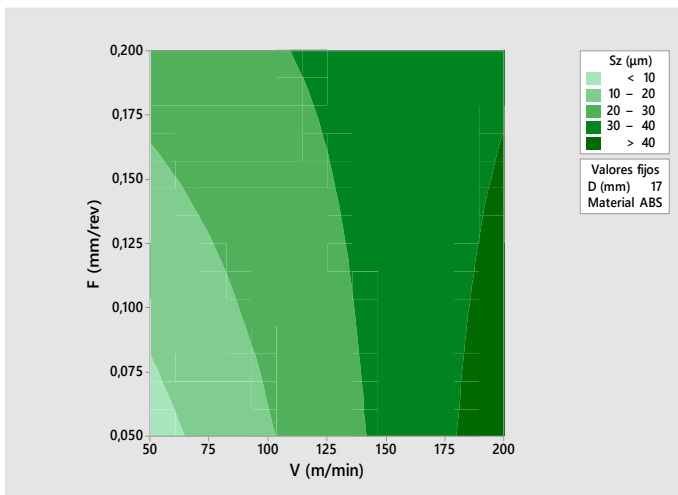


Figura 88: Diagrama de contorno de SZ para ABS

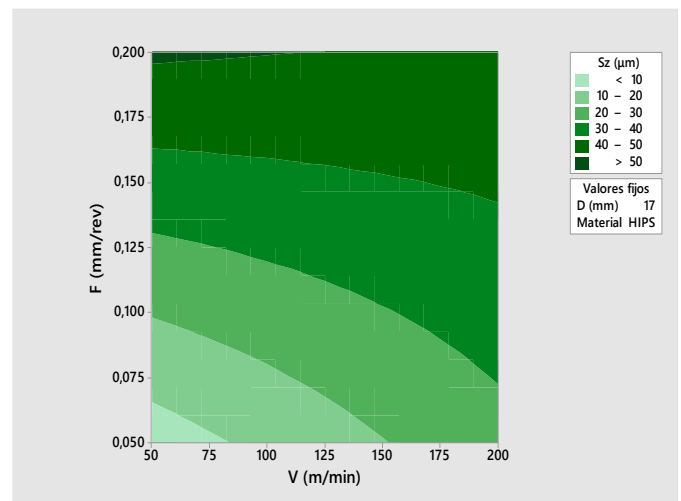


Figura 89: Diagrama de contorno de SZ para HIPS

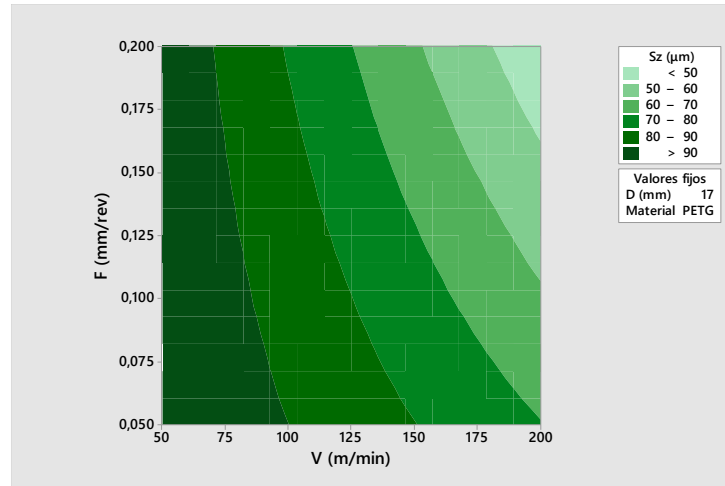


Figura 86: Diagrama de contorno de Sz para PETG

De los diagramas generados se puede mostrar las diferencias del comportamiento de los distintos materiales.

En el caso del PETG es notable la mejora de Sz al ser sometido a altas velocidades de corte y avance, mostrándose una mayor variabilidad de este parámetro con la velocidad de corte. No obstante, este parámetro resulta ser más estable ante la variación de la velocidad de corte que el Sa.

Para el ABS sucede el caso contrario al PETG, se obtienen valores más favorables a bajas velocidades. En este material se muestra una mayor tolerancia a la variación de velocidad tanto de avance como de corte.

El HIPS muestra mayor variabilidad con el aumento de la velocidad de corte si se compara con el Sa, sin embargo, la velocidad de avance sigue siendo más influyente. Al igual que sucede con el ABS se obtienen valores más favorables al mecanizar con bajas velocidades de corte y avance.

Las expresiones que modelan el Sz obtenidas con el análisis de varianza se muestran en la **Tabla 20**:

ABS	Sz (µm)	=	$317 - 4,16 V \text{ (m/min)} + 1386 F \text{ (mm/rev)} - 19,5 D \text{ (mm)}$ $- 1,10 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} + 0,263 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $- 71 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$
HIPS	Sz (µm)	=	$548 - 4,28 V \text{ (m/min)} + 1573 F \text{ (mm/rev)} - 33,5 D \text{ (mm)}$ $- 1,10 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} + 0,263 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $- 71 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$
PETG	Sz (µm)	=	$812 - 4,62 V \text{ (m/min)} + 1248 F \text{ (mm/rev)} - 41,4 D \text{ (mm)}$ $- 1,10 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} + 0,263 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $- 71 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$

Tabla 20: Expresiones obtenidas a partir del modelo para sz

#### 4.2.6 Análisis de varianza realizado para Sk

Del análisis de varianza efectuado se obtuvo un modelo con un valor de R<sup>2</sup> del 89,06%, al ser superior al 75% se considera un modelo v

álido. En la **Tabla 21** se recogen los parámetros de interés del modelo generado.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	103,952	7,4252	4,07	0,035
Lineal	5	93,991	18,7983	10,31	0,004
V (m/min)	1	2,874	2,8737	1,58	0,250
F (mm/rev)	1	31,088	31,0877	17,05	0,004
D (mm)	1	1,508	1,5076	0,83	0,393
Material	2	50,417	25,2085	13,83	0,004
Interacción de 2 factores	9	12,638	1,4042	0,77	0,651
V (m/min)*F (mm/rev)	1	1,233	1,2331	0,68	0,438
V (m/min)*D (mm)	1	3,342	3,3420	1,83	0,218
V (m/min)*Material	2	4,727	2,3634	1,30	0,332
F (mm/rev)*D (mm)	1	6,516	6,5156	3,57	0,101
F (mm/rev)*Material	2	2,596	1,2982	0,71	0,523
D (mm)*Material	2	0,560	0,2802	0,15	0,860
Error	7	12,763	1,8233		
Total	21	116,716			

Tabla 21: Parámetros de interés ANOVA para Sk

Al estudiar los resultados obtenidos se destaca que para este parámetro el avance representa el factor más influyente, dejando en segundo lugar al material y, al igual que en los dos anteriores, la velocidad de corte no adquiere tanta relevancia.

A partir de este modelo se obtuvieron las gráficas de contorno que se muestran a continuación, **Figuras 91, 92 y 93**:

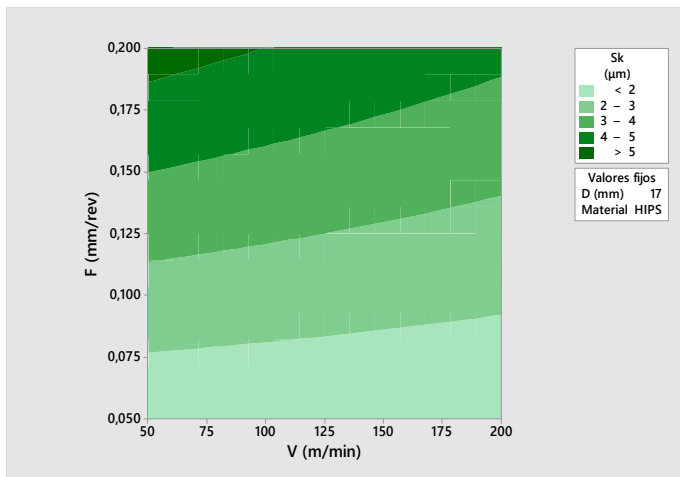


Figura 87: Diagrama de contorno de Sz para HIPS

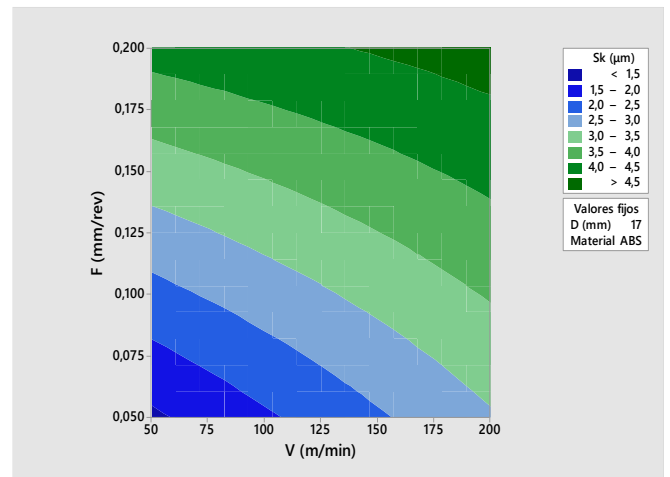


Figura 88: Diagrama de contorno de Sz para ABS

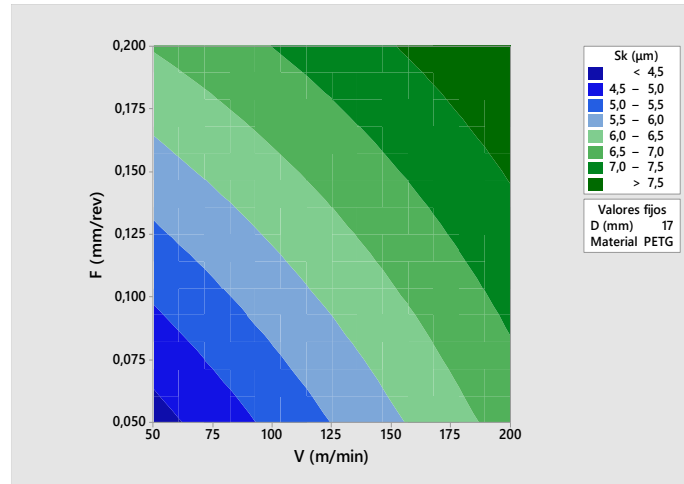


Figura 89: Diagrama de contorno de Sk para PETG

En primer lugar, en la gráfica correspondiente al PETG, se observa que los resultados óptimos se dan a bajas velocidades de avance y corte. El avance se presenta en este caso como el factor más influyente, lo cual concuerda con su valor asociado en el análisis estadístico realiza. Pese a que la velocidad de corte influye, su efecto pasa a ser secundario.

En segundo lugar, para el ABS se muestra que, al igual que sucede con el PETG, los mejores resultados se dan a bajas velocidades. El parámetro más influyente sigue siendo la velocidad de avance, esta misma presenta mayor importancia en este material demostrando que el ABS es más sensible ante la velocidad de avance. En cuanto a la velocidad de corte sigue representando un factor de carácter más secundario.

Finalmente, en el caso del HIPS los resultados más favorables se pueden conseguir empelando bajas velocidades de avance, como se puede apreciar en el diagrama de contorno. Observando este diagrama se muestra que el material muestra tener versatilidad para ser mecanizado con velocidades de corte altas, al no afectar estes de manera importante al aumentar su magnitud. Por tanto, a diferencia de los dos materiales anteriores, este material puede ser mecanizado con velocidades de corte altas y obtener buenos resultados, siempre que se mantenga un avance pequeño.

Las expresiones que modelan el Sk obtenidas con el análisis de varianza se muestran en la **Tabla 22**:

ABS	Sk (µm)	=	$-3,0 - 0,0821 V \text{ (m/min)} + 152,7 F \text{ (mm/rev)} + 0,170 D \text{ (mm)}$ $- 0,0441 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} + 0,00556 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $- 7,77 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$
HIPS	Sk (µm)	=	$-0,8 - 0,0933 V \text{ (m/min)} + 161,7 F \text{ (mm/rev)} + 0,034 D \text{ (mm)}$ $- 0,0441 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} + 0,00556 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $- 7,77 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$
PETG	Sk (µm)	=	$6,1 - 0,0763 V \text{ (m/min)} + 149,2 F \text{ (mm/rev)} - 0,201 D \text{ (mm)}$ $- 0,0441 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} + 0,00556 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $- 7,77 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$

Tabla 22: Expresiones obtenidas a partir del modelo para Sk

En conclusión, a través de análisis de la rugosidad superficial realizado mediante los parámetros  $S_a$ ,  $S_z$  y  $S_k$ , se comprueba que el factor más influyente para los tres parámetros se trata de la velocidad de avance, teniendo mayor influencia sobre los parámetros  $S_a$  y  $S_k$ , como se puede ver tanto en el análisis de varianza como en las gráficas de contorno.

El HIPS fue el material que presentó las mejores respuestas, presentando la mayor mejora con respecto a la rugosidad de la probeta en bruto y comparándola con la probeta impresa mediante la configuración de alta calidad. Este polímero mostró una notable dependencia de la velocidad de avance, caso contrario a la velocidad de corte, donde resulta tener aptitudes para ser mecanizado a altas velocidades sin comprometer sus propiedades superficiales.

El segundo material que presentó buenos resultados fue el ABS, presentando una buena calidad al mecanizarse con bajas velocidades de corte y avance, siendo este material más sensible a la de avance. En este polímero se presentó mayor sensibilidad al aumento de la velocidad de corte que en el HIPS.

El PETG mostró ser el material con un peor resultado mostrando mayor variabilidad frente a la velocidad de corte. A pesar de no tener un resultado como los anteriores materiales ha presentado una mejora considerable con respecto a la probeta en bruto y de alta calidad disminuyendo en gran medida la rugosidad superficial.

En este análisis se comprueba que un mecanizado posterior al proceso de impresión 3D mejora notablemente la calidad superficial de las piezas impresas, puesto que en todos los materiales mecanizados se logró mejorar la rugosidad de las probetas mejorando, obteniéndose valores inferiores a las probetas de alta calidad.

### 4.3 Desviaciones de forma

En este apartado se evaluarán las siguientes desviaciones de forma: rectitud, redondez y cilindridad. En la **Tabla 23** se muestran los valores obtenidos de estos parámetros, los cuales serán representados en sus correspondientes figuras para una mejor visualización de los datos recogidos.

Para estos parámetros no se generará un modeloya que los modelos generados no contaban con un valor  $R^2$  superior al 75%, por tanto, no se podría asegurar una buena fiabilidad. Como consecuencia tampoco se generarán los diagramas de contorno como los mostrados en los apartados anteriores. En este apartado se estudiarán únicamente los resultados experimentales obtenidos.

Para obtener los valores de las desviaciones de forma se empleó el método del LSC (Least Squares Circle o Círculo de Mínimos cuadrados) este método es empleado especialmente en mediciones de redondez.

El método consiste en ajustar matemáticamente un círculo al conjunto de puntos recogidos de la superficie, de manera que el círculo obtenido minimice la suma de los cuadrados de las distancias entre cada punto y el círculo creado. Este método permite calcular la desviación de una forma real con una perfectamente circular, siendo uno de los más precisos y aceptados en cuanto a mediciones de redondez, aunque puede ser aplicado a otras formas como las cilíndricas.

Material	V (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)	Redondez ( $\mu\text{m}$ )	Rectitud ( $\mu\text{m}$ )	Cilindricidad ( $\mu\text{m}$ )
PETG	50	0,05	18	10,18	33,15	114,88
PETG	200	0,05	18	687,67	222,62	990,53
PETG	50	0,2	18	14,22	32,21	122,38
PETG	200	0,2	18	25,86	26,48	131,99
PETG Alta calidad	-	-	20	207,61	24,46	226,72
PETG Bruto	-	-	20	263,2	31,6	280,22
PETG	50	0,05	16	297,6	174,71	424,65
PETG	200	0,05	16	64,7	98,14	203,88
PETG	50	0,2	16	17,02	22,75	132,91
PETG	200	0,2	16	20,32	33,08	107,74
HIPS	50	0,05	18	3,84	9,42	141,4
HIPS	200	0,05	18	9,89	23,49	84,4
HIPS	50	0,2	18	5,24	12,06	187,74
HIPS	200	0,2	18	26,42	33,17	57,02
HIPS Alta calidad	-	-	20	81,91	32,34	103,76
HIPS Bruto	-	-	20	392,82	236,46	499,46
HIPS	50	0,05	16	4,49	8,42	158,28
HIPS	200	0,05	16	-	-	-
HIPS	50	0,2	16	-	-	-
HIPS	200	0,2	16	14,18	30,53	104,43
ABS	50	0,05	18	11,51	26,63	97,21
ABS	200	0,05	18	15,24	19,34	120,13
ABS	50	0,2	18	27,33	22,13	145,08
ABS	200	0,2	18	83,49	32,66	167,59
ABS Alta calidad	-	-	20	156,81	55,72	197,31
ABS Bruto	-	-	20	289,09	73,67	379,58
ABS	50	0,05	16	34,09	22,6	188,81
ABS	200	0,05	16	15,82	21,08	167,44
ABS	50	0,2	16	7,84	15,39	174,7
ABS	200	0,2	16	14,71	23,12	181,74

Tabla 23: Valores de las desviaciones de forma estudiadas

#### 4.3.1 Desviaciones de forma para PETG

En las siguientes figuras, **Figuras 90, 94 y 95** se representan de manera gráfica los datos reflejados en la tabla anterior para las probetas de PETG.

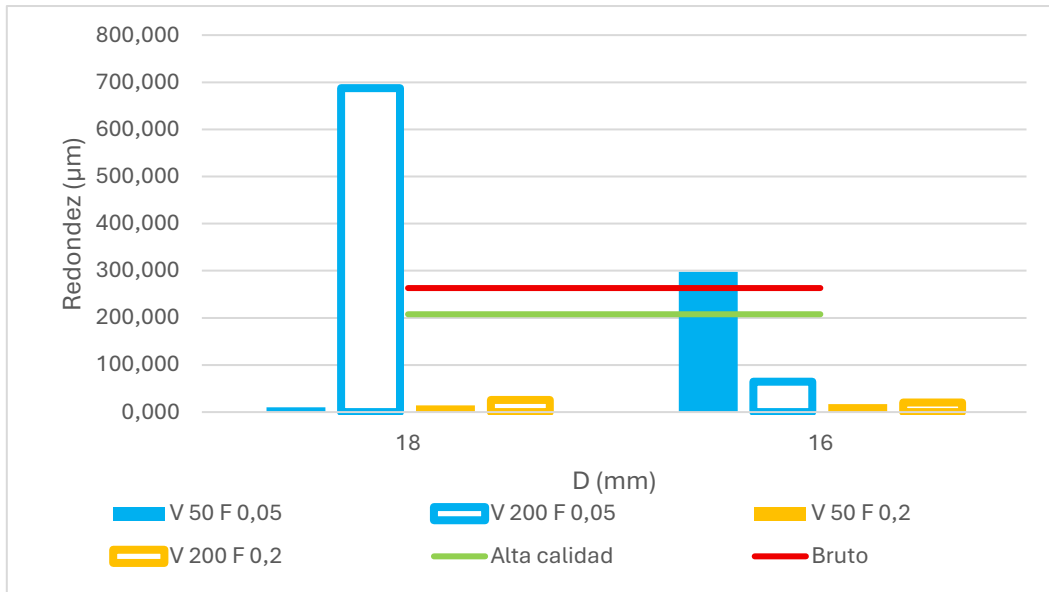


Figura 90: Redondez en función de cada probeta de PETG

En este material al cambiar la configuración de impresión no se logró una reducción importante de la redondez de las probetas, teniendo valores similares de redondez la probeta en bruto y la probeta impresa empleando una configuración de alta calidad de impresión. Es importante recalcar, tanto para la probeta medida en bruto y alta calidad la presencia de la costura de la probeta, **Figura 91**, esta representa una singularidad en la probeta que causa un efecto negativo en cuanto a las tolerancias macrogeométricas.



Figura 91: Costura probetas PETG

Generalmente se muestra una mejora en cuanto a redondez encontrándose valores mucho menores que los presentados originalmente antes de realizar las operaciones de cilindrado. Aunque se haya dado una mejoría general destaca notablemente el valor alcanzado en el primer mecanizado cuando se empleó un avance de 0,05 mm/rev y una velocidad de corte de 200 m/min. Esta configuración generó una superficie irregular, **Figura 92 a)**, debido a la adhesión de las virutas y al paso de la herramienta lo que conllevó un empeoramiento de estos valores.

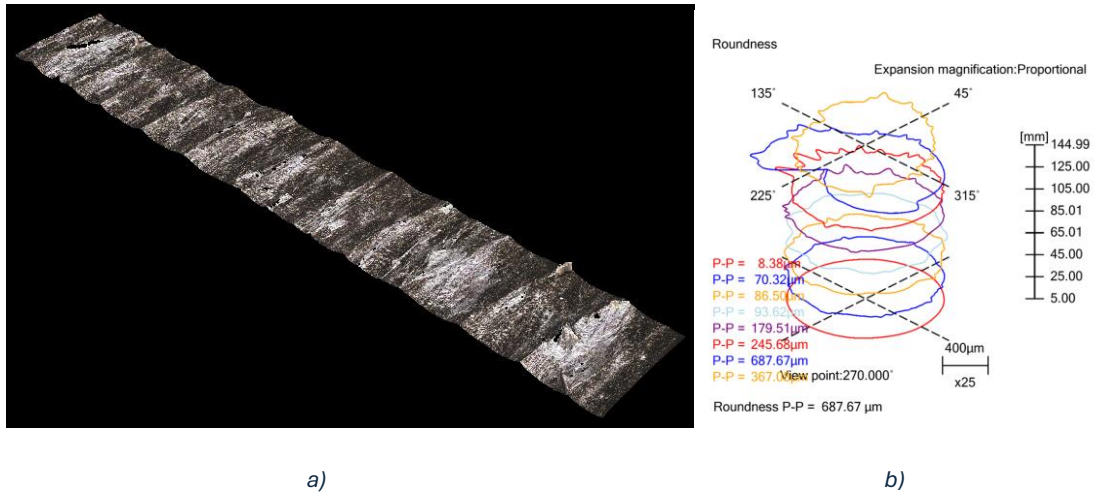


Figura 92: a) probeta mecanizada con  $V_c=200$  m/min y  $f=0,05$  mm/rev b) evolución de la redondez

Sin embargo, al emplear una baja velocidad de corte y manteniendo el mismo avance se lograron buenos valores de redondez en el primer mecanizado realizado, puesto que la superficie generada no cuenta con las irregularidades presentadas al aumentar la velocidad de corte, **Figura 93**.

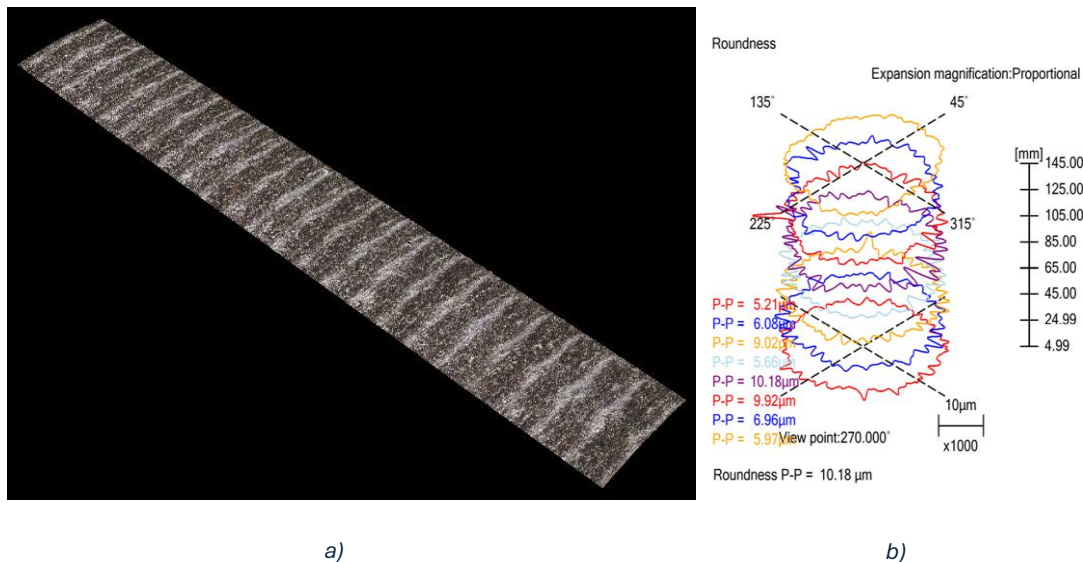


Figura 93: a) probeta mecanizada con  $V_c=50$  m/min y  $f=0,05$  mm/rev b) evolución de la redondez

Es necesario aclarar que, pese que en la **Figura 93 b)**, parezca que la probeta presenta regularidades mayores que la probeta mostrada en la **Figura 92 b)** las figuras se encuentran a diferente escala para que se pudiesen observar correctamente las desviaciones de cada una.

En el segundo mecanizado aparecen medidas que pueden resultar contradictorias con lo declarado respecto al primer mecanizado, sin embargo, la variación de resultados radica en la refrigeración empleada. En el segundo mecanizado al aplicar la primera combinación de parámetros de corte hubo una zona que fue mecanizada en ausencia de aire comprimido lo cual genera un empeoramiento de los resultados. También es destacable que se empleó un compresor diferente en cada mecanizado entregando el segundo un caudal mayor, mejorando considerablemente el resultado al aumentar la velocidad de

corde. Esto demuestra la importancia del aire comprimido en el mecanizado de este material.

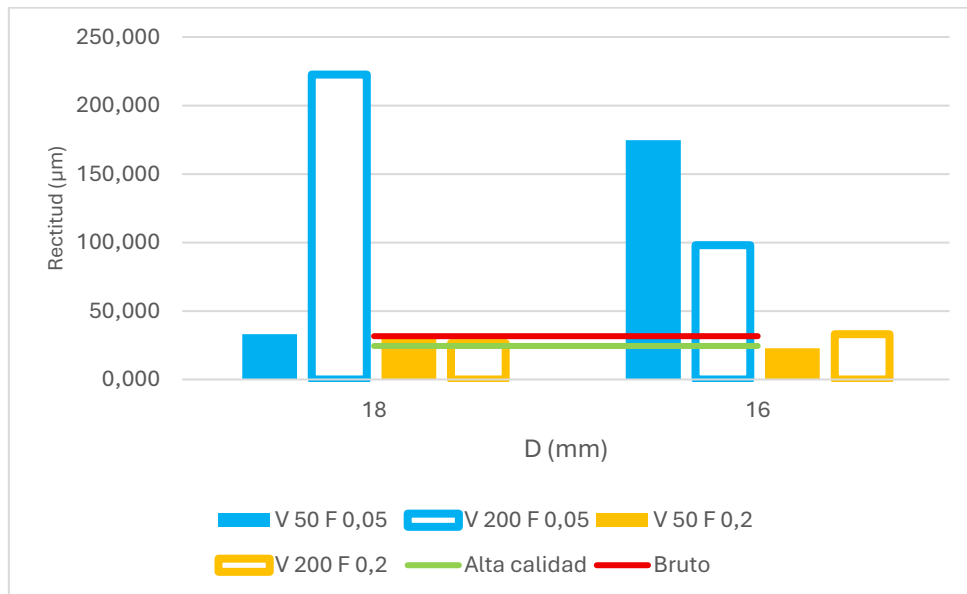


Figura 94: Rectitud en función de cada probeta de PETG

Al observar la figura anterior, **Figura 94**, se verifica que para este material no ha resultado muy influyente el efectuar las operaciones de cilindrado, conservando valores similares de rectitud en todas las configuraciones, destacando negativamente el efecto que tiene emplear una alta velocidad de corte combinada con un avance pequeño.

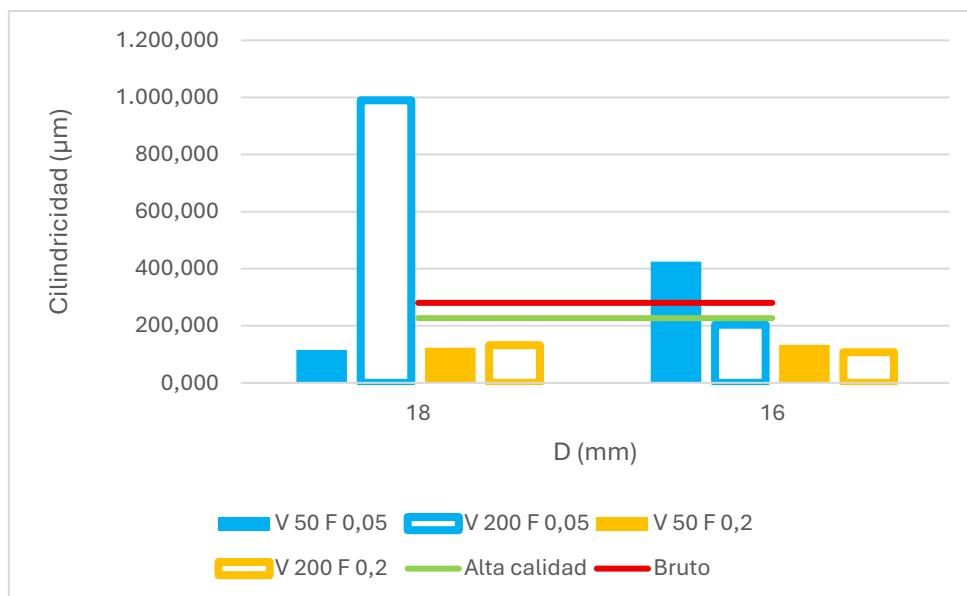


Figura 95: Cilindricidad en función de cada probeta de PETG

Finalmente, la cilindricidad de las probetas si se ha visto afectada por el mecanizado observándose que, al igual que con las dos tolerancias macrogeométricas anteriores, se encontró un efecto significativamente negativo al emplear un avance pequeño combinado con una alta velocidad de corte.

En este material se ha presentado mejoría general en cuanto a las desviaciones de forma de las probetas de alta calidad y en bruto. Es importante recalcar la influencia de ciertos factores como la esbeltez de las probetas. Al tratarse de probetas con una esbeltez considerable se producen mayores deformaciones a medida que la herramienta de corte se aleja de los apoyos. Estas desviaciones se pueden ver en la **Figura 96**, donde se observa cómo se aumentando la desviación a medida que se aleja de los extremos.

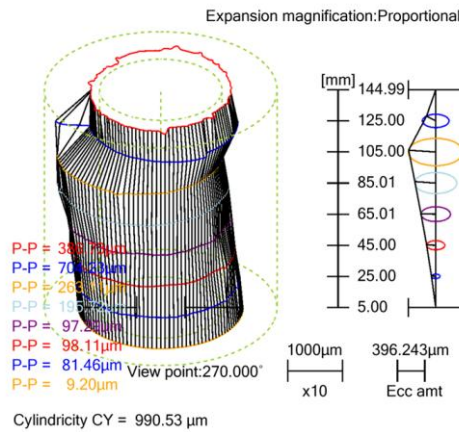


Figura 96: Evolución de la cilindridad

Como se comentó anteriormente para combinaciones de velocidad como 200 m/min para la de corte y 0,05 mm/rev para la de avance, se observaba la presencia de crestas generadas por el paso de la herramienta. Estas irregularidades también afectan a los defectos de forma al representar singularidades en la superficie que pueden perjudicar aspectos como la redondez de la probeta.

#### 4.3.2 Desviaciones de forma para ABS

En las figuras de continuación, **Figuras 97, 99 y 106** se representan de manera gráfica los datos reflejados en la tabla anterior para las probetas de ABS

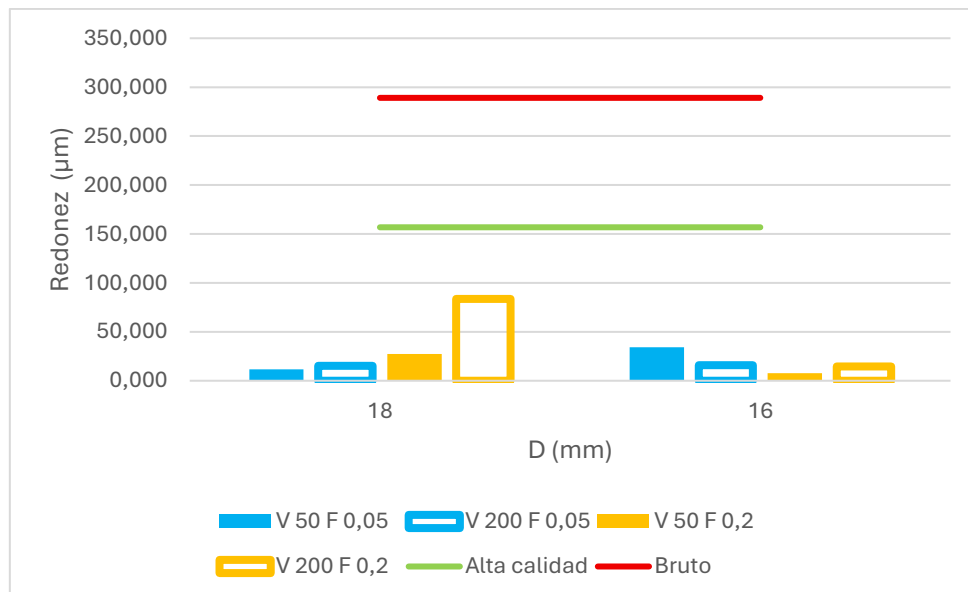
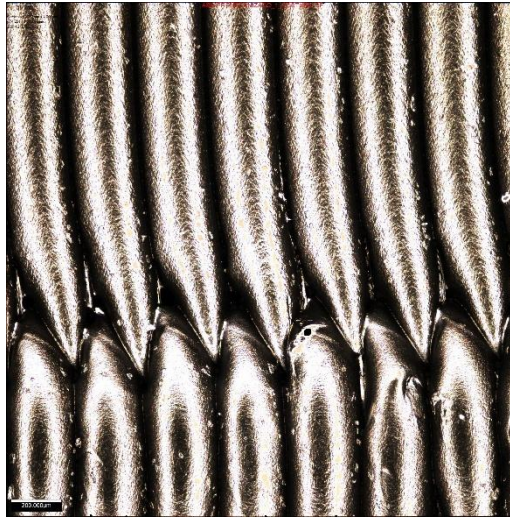


Figura 97: Redondez en función de cada probeta de ABS

En primer lugar, estudiando los resultados obtenidos en cuanto a la redondez de las probetas de ABS, destaca el alto valor que obtiene la probeta en bruto contando con un valor de 289,09  $\mu\text{m}$ , valor que se logró mejorar al aplicar las condiciones de alta calidad reduciendo su medida a 156,81  $\mu\text{m}$  lo que representa una disminución del 45,76%. Como se comentó anteriormente la costura, **Figura 98**, representa una singularidad que eleva estos valores.



*Figura 98: Zona de costura*

Pese a haberse conseguido una mejora importante al cambiar las condiciones de impresión, al cilindrar las probetas se han obtenido menores valores de redondez en todas las combinaciones empleadas. El valor de redondez más desfavorable se obtuvo con una velocidad de corte de 200 m/min y un avance de 0,2 mm/rev en el primer mecanizado, alcanzando este parámetro la magnitud de 83,49  $\mu\text{m}$ , aunque este haya sido el resultado pésimo se obtuvo una redondez más favorable que la obtenida al imprimir en alta calidad.

Analizando las medidas obtenidas tras realizar los dos mecanizados se puede percibir que los valores más bajos de redondez se han obtenido empleando una velocidad de corte de 50 m/min, en cuanto a la velocidad de avance, en el primer mecanizado es interesante recalcar el hecho de que el valor de redondez ha subido a medida que subía esta velocidad. Sin embargo, esto no ocurrió en el segundo que presentó mayor irregularidad en cuanto a resultados.

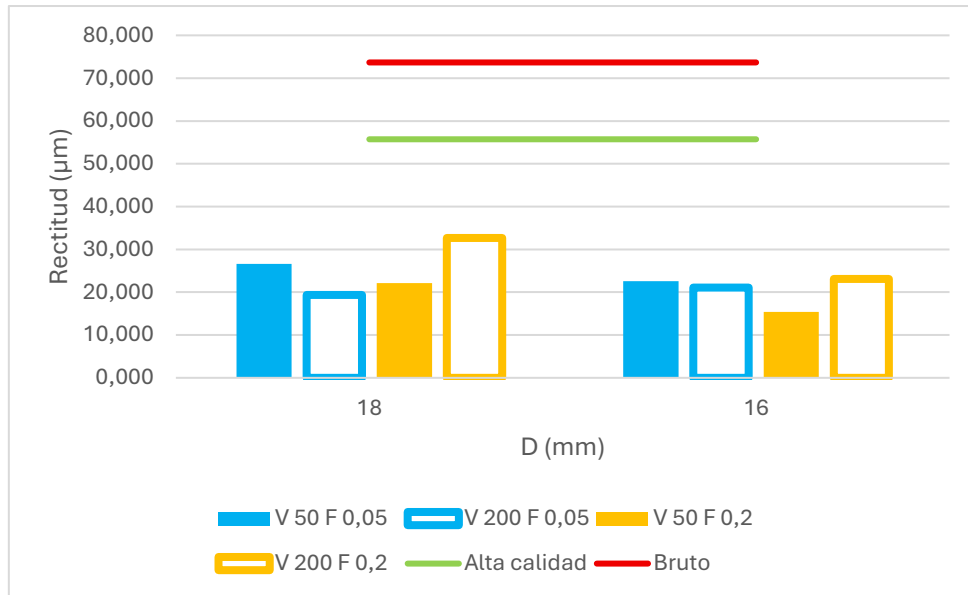


Figura 99: Rectitud en función de cada probeta de ABS

Viendo el diagrama de la **Figura 99** es notable la diferencia de rectitud entre las probetas impresas y mecanizadas, contando las mecanizadas con valores más favorables.

Las probetas en bruto y de alta calidad presentan valores de rectitud más elevados, puesto que el proceso de impresión se basa en la deposición selectiva de capas de material unas encima de otras creando un escalonamiento entre las capas, como se muestra en la **Figura 100**.

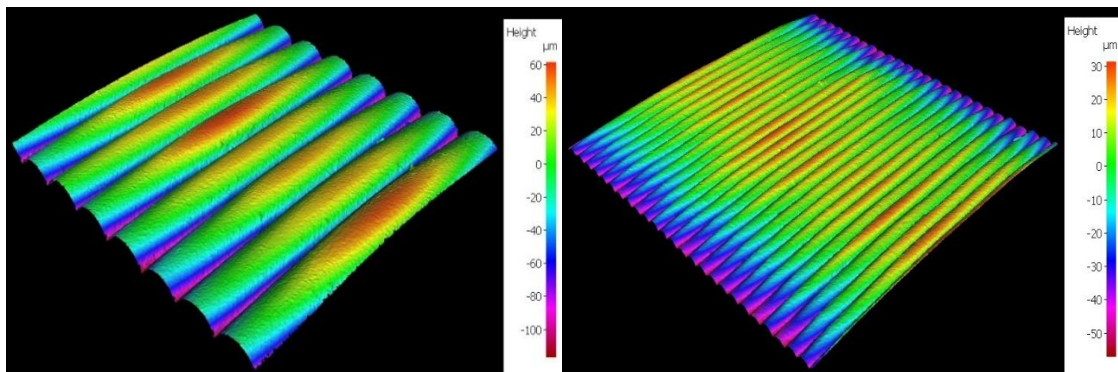


Figura 100: Superficie de la probeta ABS en bruto y de alta calidad

Al mecanizar la superficie este escalonamiento es eliminado, **Figura 101**, consiguiéndose un valor mejorado de la rectitud como se puede ver en el diagrama de la **Figura 99**, donde se muestran valores inferiores de rectitud para todas las condiciones de corte.



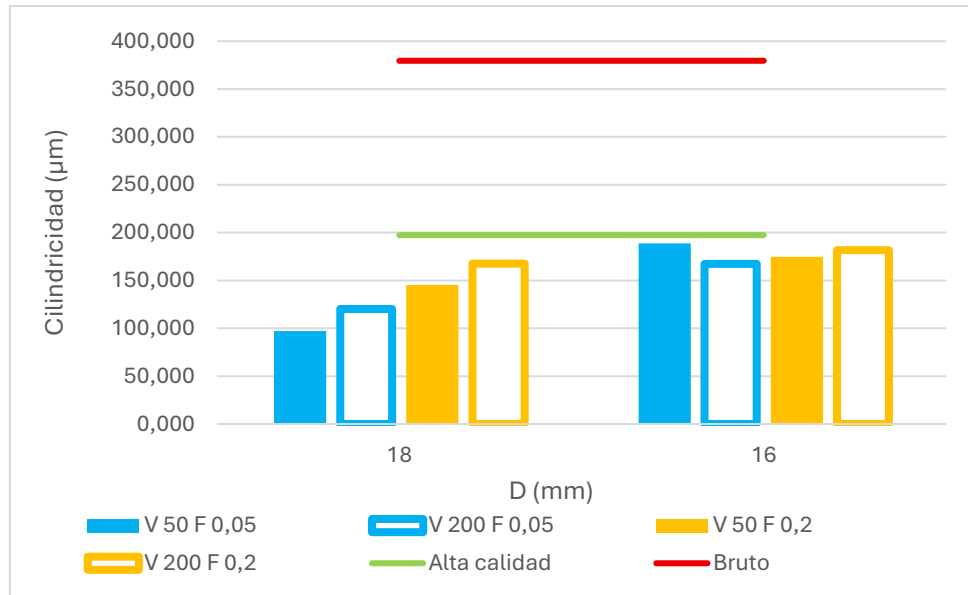


Figura 103: Cilindricidad en función de cada probeta de ABS

En cuanto a la cilindridad se observa la influencia de la ya mencionada costura en estos valores y la clara mejora de esta tolerancia macrogeométrica al optimizar las condiciones de impresión.

En cuanto a estos parámetros se observa la clara influencia de las operaciones de cilindrado realizadas en las probetas, es importante recalcar que una reducción del diámetro aumenta la esbeltez de la probeta, característica que influye en el parámetro estudiado.

Una baja velocidad de corte y avance ha sido más favorable en el primer mecanizado, en este se muestra como un aumento de ambas velocidades ha perjudicado la cilindridad de las probetas, mientras que en el segundo se han conseguido resultados más elevados, aunque homogéneos. El aumento de la cilindridad con la velocidad de corte puede relacionarse, al igual que en el caso del PETG, al efecto de esta en las temperaturas del proceso. El ABS cuenta con una temperatura de deformación térmica en torno a los 80 °C y 100 °C, estas temperaturas fueron alcanzadas en el mecanizado con altas velocidades de corte, lo cual lleva a pensar que el ablandamiento del material induce mayores deformaciones en la probeta perjudicando sus precisión dimensional.

#### 4.3.3 Desviaciones de forma para HIPS

En las figuras de a continuación, **Figuras 104, 107 y 108** se representan de manera gráfica los datos reflejados en la tabla anterior para las probetas de HIPS

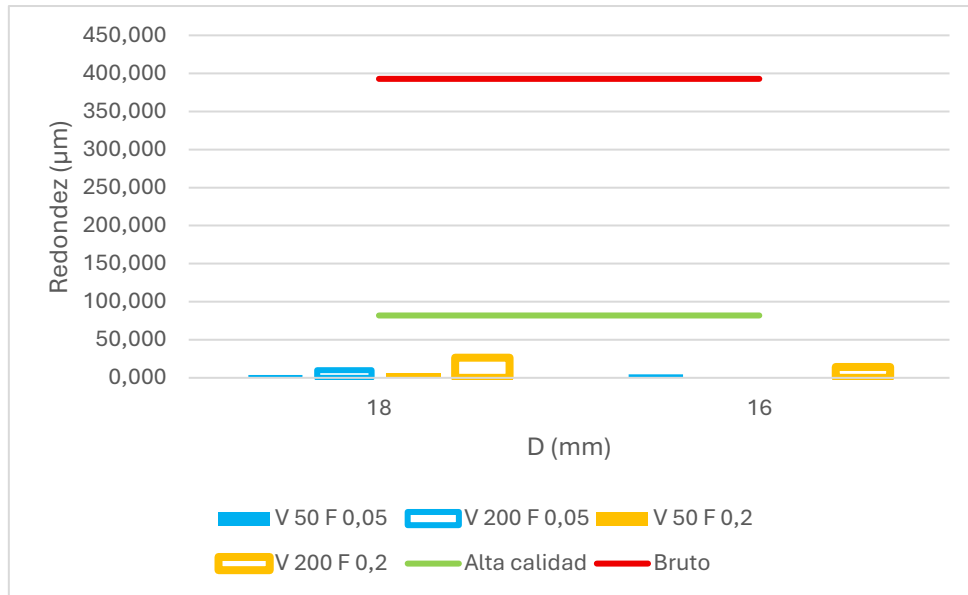


Figura 104: Redondez en función de cada probeta de HIPS

Analizando la información obtenida de la redondez de las probetas, se observa una clara mejora en este parámetro. Las probetas en bruto presentan un valor más elevado con una magnitud de 392,82 µm, es necesario puntualizar a que en parte este elevado valor se debe a la presencia de la costura de la probeta, **Figura 105**, puesto que esta irregulariza la superficie de la probeta impresa.



Figura 105: Costura generada en la probeta de alta calidad de HIPS

En cuanto a la probeta de a la probeta de alta calidad, esta presentó una importante mejora en este aspecto alcanzando un valore de redondez de 81,91 µm, representando una disminución de un 79,41%. No obstante, los valores de redondez de las probetas mecanizadas resultan más favorables que los de la probeta de alta calidad, reflejando que el cilindrado aplicado ha mejorado considerablemente la redondez.

Los mejores resultados se obtuvieron empleando una velocidad de corte de 50 m/min y 0,05 mm/rev presentando un valor de 3,89 µm en el primer cilindrado y 4,49 µm en el segundo. El valor más elevado se dio al emplear una velocidad de corte de 200 m/min y un avance de 0,2 mm/rev presentando un valor de 26,42 µm y 14,18 µm en el primer y segundo cilindrado respectivamente. Esto indica que las condiciones óptimas para mejorar este parámetro en el HIPS son velocidades de corte y avance pequeñas. Estas velocidades generaron una superficie homogénea como se muestra en la **Figura 106**.

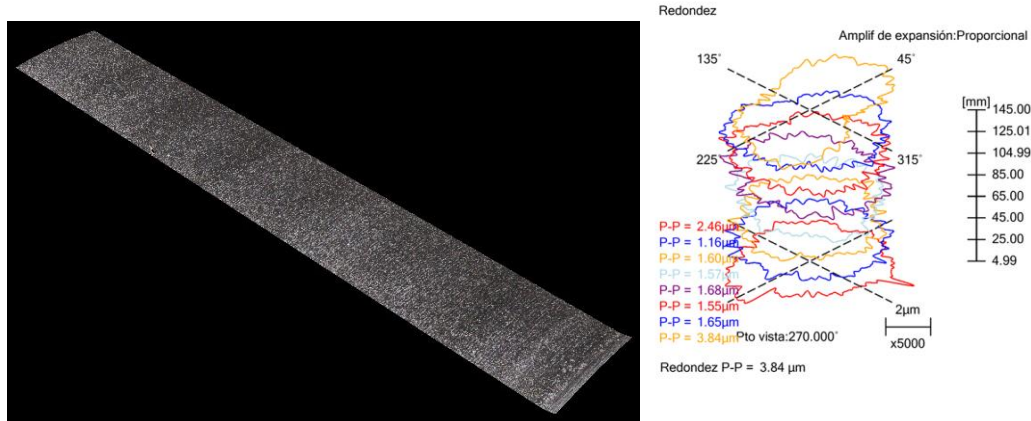


Figura 106: a) Probeta mecanizada con  $V_c=50$  m/min y  $f=0,05$  mm/rev b) evolución de la redondez

Tal como ocurrió con los otros polímeros termoplásticos mecanizados al emplear bajas velocidades de corte y avance se generó una superficie más lisa y homogénea. Usando como referencia la bibliografía consultada sobre el mecanizado de los polímeros se muestra como en este material el paso de la herramienta a bajos avances ayuda a disminuir la influencia del paso de la herramienta, aspecto que se refleja en la redondez de las probetas obteniéndose los valores más bajos de redondez de todos los materiales empleados.

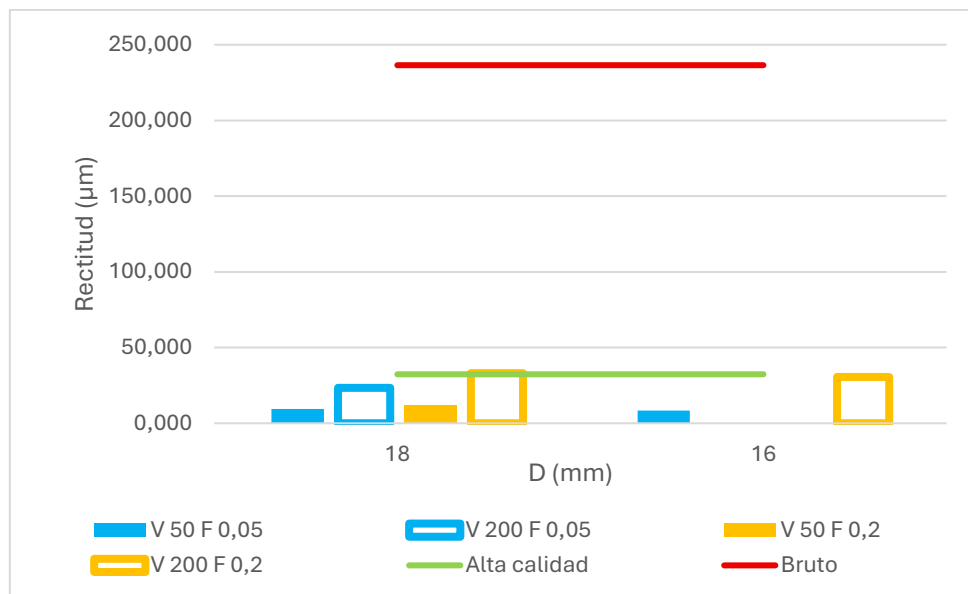


Figura 107: Rectitud en función de cada probeta de HIPS

En cuanto a la rectitud de las probetas se observa la influencia del escalonamiento formado por la deposición de las capas que conforman el material en la probeta en bruto. El valor de rectitud se mejoró considerablemente al optimizar los parámetros de impresión, esta mejora puede deberse a la disminución de la altura de las capas que conforman a la probeta.

En este material se ha comprobado que para conseguir una mejora significativa de la rectitud de las probetas resulta interesante disminuir la velocidad de corte, velocidad que se muestra más influyente que la de avance. Al emplear altas velocidades de corte se consiguió una importante mejora en cuanto al estado inicial de la probeta en bruto, pero el valor logrado fue similar al obtenido al mejorar las condiciones de impresión. La rectitud se mejoró con las bajas velocidades de avance pequeñas fundamentalmente.

Según estudios donde se mecanizaron polímeros como el PA6 y el POM-C se mostró como un avance pequeño correspondía a la configuración óptima consiguiéndose una mejora de la rectitud y una desviación pequeña mejorando la rectitud [63], [64], [65]. Este mismo fenómeno como se ha podido ver también se ha dado en el HIPS.

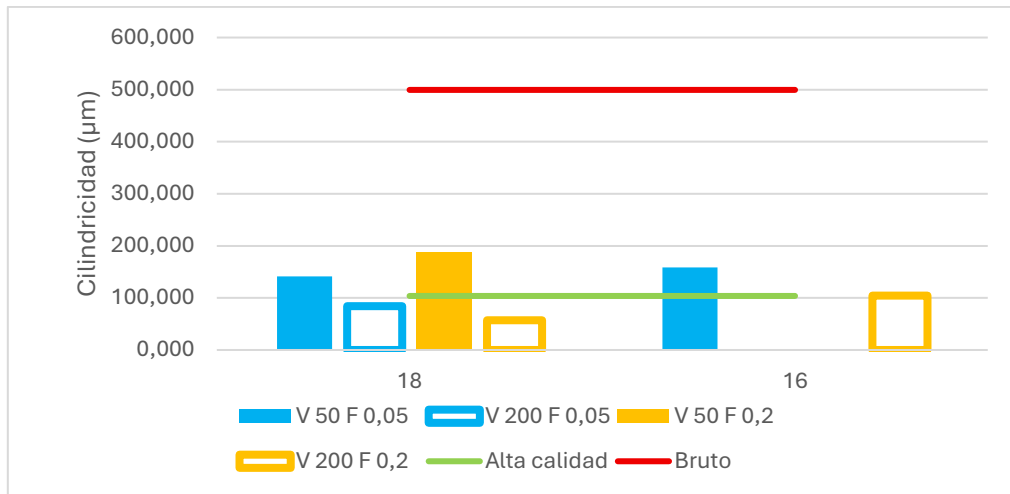


Figura 108: Cilindricidad en función de cada probeta de HIPS

Por último, en cuanto a la cilindricidad se muestra cómo se dio lugar a un clara mejoría con respecto a la probeta en bruto, pero al comparar con la medición realizada con la probeta de alta calidad no se muestra una mejoría destacable al emplear altas velocidades de corte y avance. Se muestra cómo, al contrario del PETG y ABS, el HIPS presenta una mejora de la cilindricidad al emplearse una velocidad de corte mayor. Este material presenta una temperatura de deformación térmica entre 85 °C y 95 °C, como se pudo ver en el apartado referente a la temperatura no se llegó a alcanzar una temperatura media dentro de este rango por lo que el material no sufriría las deformaciones sufridas en las probetas de ABS y HIPS. En la **Figura 109** se muestra la evolución de la cilindricidad para las combinaciones de mayor y menor cilindricidad.

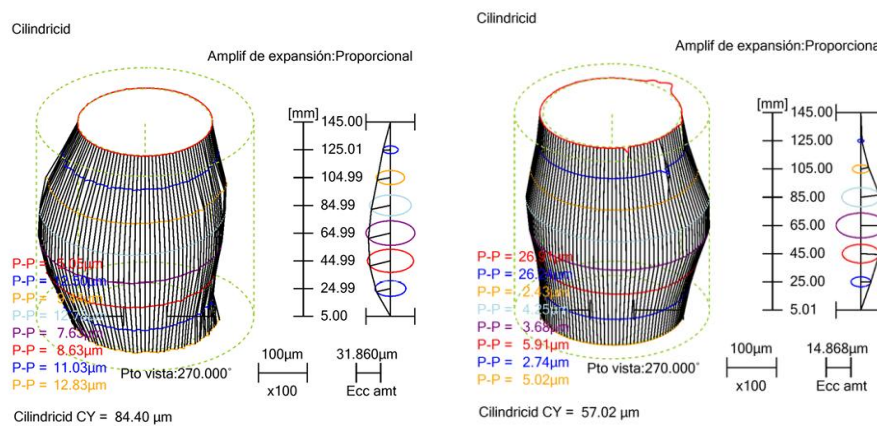


Figura 109: Cilindricidad a)  $V_c=50$  m/min,  $f=0,05$  mm/rev

b)  $V_c=50$ ,  $f=0,2$  mm/rev.

#### 4.4 Variación de diámetro

En este apartado se busca estudiar la variación del diámetro de las probetas a lo largo de los cilindrados efectuados y comparar las medidas tras el mecanizado con las obtenidas tras el proceso de impresión.

En la **Tabla 24** se muestran los resultados de las mediciones realizadas. Los valores mostrados corresponden al promedio obtenido tras medir el diámetro de las probetas en múltiples secciones.

Material	V	F	DN (mm)	D (mm)	Desviación(mm)
PETG	50	0,05	18	18,08	0,08
PETG	200	0,05	18	18,18	0,18
PETG	50	0,2	18	18,05	0,05
PETG	200	0,2	18	17,92	-0,08
PETG	50	0,05	16	16,06	0,06
PETG	200	0,05	16	16,15	0,15
PETG	50	0,2	16	16,14	0,14
PETG	200	0,2	16	16,13	0,13
PETG bruto	-	-	20	19,75	-0,25
PETG AC	-	-	20	19,85	-0,15
ABS	50	0,05	18	18,02	0,02
ABS	200	0,05	18	18,16	0,16
ABS	50	0,2	18	17,91	-0,09
ABS	200	0,2	18	18,14	0,14
ABS	50	0,05	16	16,24	0,24
ABS	200	0,05	16	16,19	0,19
ABS	50	0,2	16	16,13	0,13
ABS	200	0,2	16	16,15	0,15
ABS bruto	-	-	20	19,59	-0,41
ABS AC	-	-	20	19,7	-0,3
HIPS	50	0,05	18	18,04	0,04
HIPS	200	0,05	18	18,02	0,02
HIPS	50	0,2	18	18,13	0,13
HIPS	200	0,2	18	18,03	0,03
HIPS	50	0,05	16	16,24	0,24
HIPS	200	0,05	16	-	-
HIPS	50	0,2	16	-	-
HIPS	200	0,2	16	16,1	0,1
HIPS bruto	-	-	20	19,65	-0,35
HIPS AC	-	-	20	19,65	-0,45

Tabla 24: Desviación diametral

En el análisis de los resultados correspondientes a cada material se mostrarán los datos correspondientes de manera gráfica mediante las **Figuras 110, 113, 115**.

#### 4.4.1 Variación diametral en PETG

Como ya se ha comentado en la **Figura 113** se recogen de manera gráfica los resultados obtenidos para el PETG.

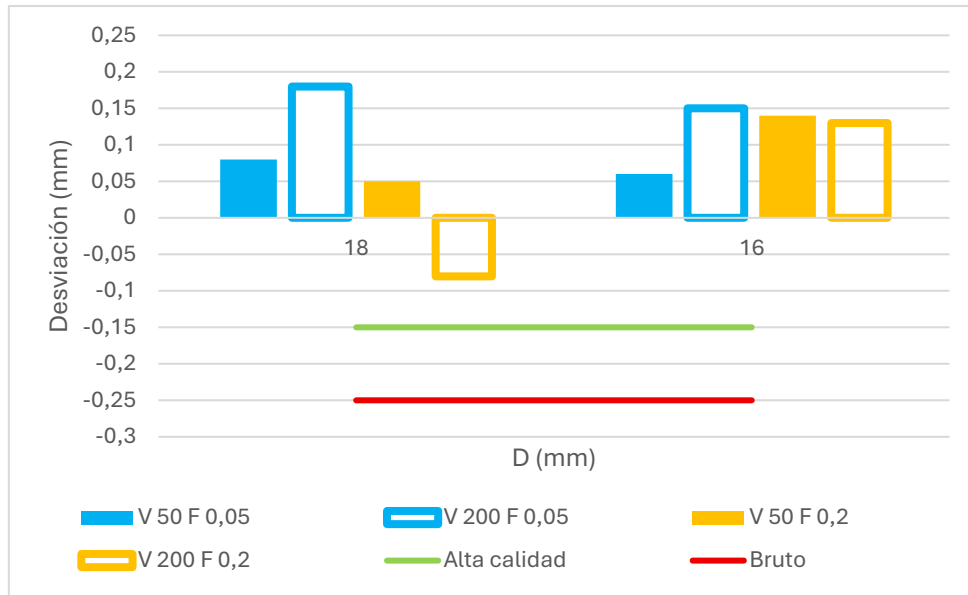


Figura 110: Desviación en cada probeta de PETG

En las probetas de PETG se observa una tendencia a presentar sobreespesores en las probetas mecanizadas. Este aumento del diámetro de la probeta puede estar asociado a la adherencia de la viruta generada en el proceso de corte, puesto a que esta no fue evacuada correctamente durante el proceso, afectando a la precisión del diámetro final.

La mayor desviación positiva se dio bajo una velocidad de corte de 200 m/min y un avance de 0,05 mm/rev, mientras que para unas condiciones de una velocidad de 50 m/min y un avance de 0,2 mm/rev se consiguió el mejor resultado, en el primer mecanizado. Esto se debe a que en el primer mecanizado citado la viruta no se evacuó correctamente generando la adhesión de esta en la probeta, como se puede ver en la **Figura 111 a)**, mientras que en el segundo mencionado la viruta se desalojó correctamente evitando esa adhesión, **Figura 111 b)**.

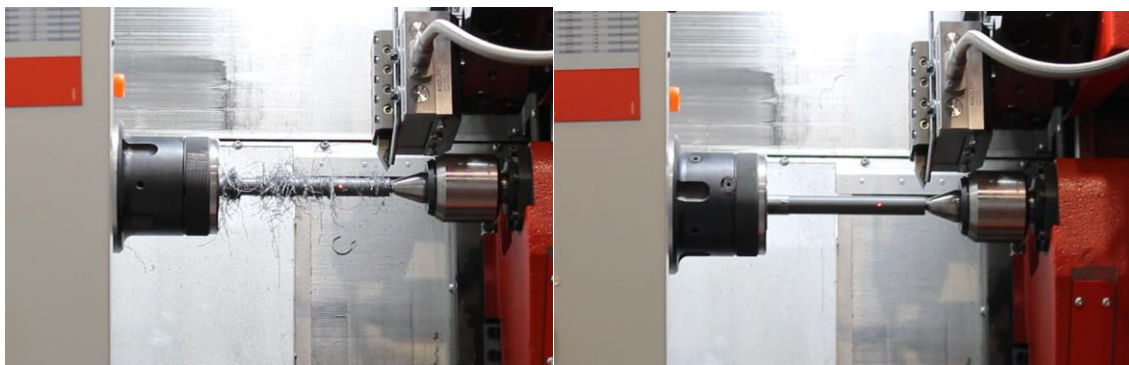


Figura 111: a) Probeta  $V_c=200\text{m/min}$ ,  $f=0,05\text{ mm/rev}$  b) probeta  $V_c=50\text{m/min}$ ,  $f=0,25\text{ mm/rev}$

En la probeta impresa en alta calidad al igual que la probeta antes de ser mecanizada se observa una desviación negativa. Esta reducción de diámetro puede residir en la contracción sufrida por el polímero al enfriarse tras el proceso de impresión.

Al comparar los resultados obtenidos tras el mecanizado se afirma la existencia de una mejoría respecto a las probetas en bruto. Sin embargo, esta mejora no es tan destacable al ser comparada con la probeta impresa en alta calidad.

#### 4.4.2 Variación diametral en ABS

En primer lugar, se muestran de manera gráfica los resultados obtenidos en las probetas de ABS, **Figura 112**.

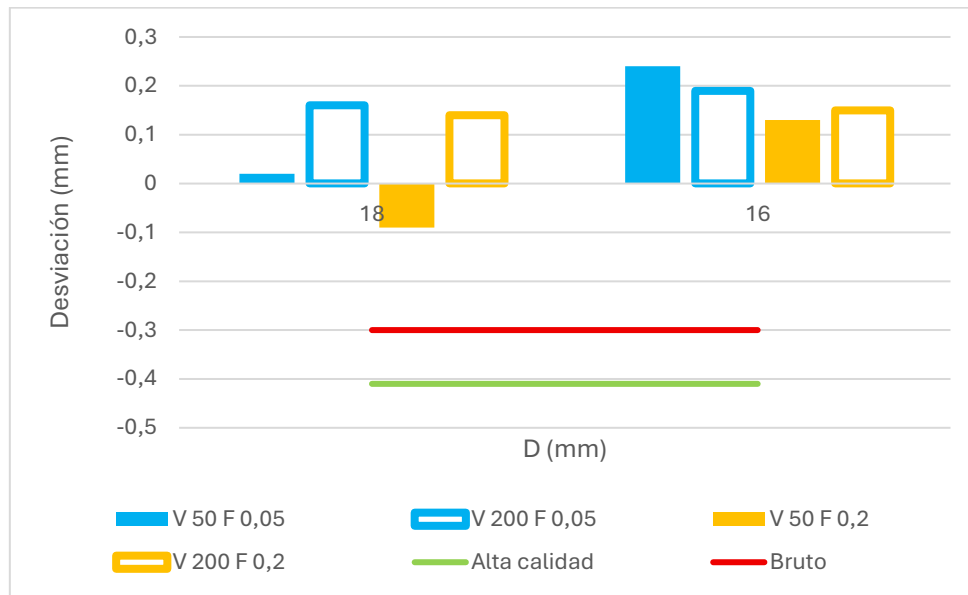


Figura 112: Desviación en cada probeta de ABS

En este material se presenta de nuevo una tendencia a la generación de sobreespesores. Este comportamiento puede deberse a una adherencia ligera de material como se puede ver al ser más presente en condiciones de avances bajos.

La mayor desviación se obtuvo en el segundo cilindrado bajo una baja velocidad de corte y avance, se observa, además, que los mejores resultados para este material se dieron al emplearse tanto una velocidad alta de corte como de avance.

En este material se ha presentado para todas las condiciones de corte una mejoría notable con respecto a la probeta en bruto, incluso se aprecia un mejor resultado al compararla con la probeta impresa en alta calidad aspecto que no ocurrió el en PETG. El ABS es característico por la contracción que sufre al enfriarse cosa que se puede ver gráficamente en la **Figura 112**, en este caso se ha visto como la aplicación del mecanizado ha sido útil para efectuar una corrección de esta variación de medida.

#### 4.4.3 Variación diametral en HIPS

En el caso del HIPS, como se ve en la gráfica de la **Figura 113** vuelve a presentarse esa sobremedida general presentada en ambos materiales. En el mecanizado de este polímero se dio lugar a una viruta continua la cual se enredó en varias ocasiones en la probeta, como se puede ver en la **Figura 114**, estos enredos generaban la adhesión parcial de la viruta. Esta citada adhesión puede resultar en las sobremedidas que se presentan.

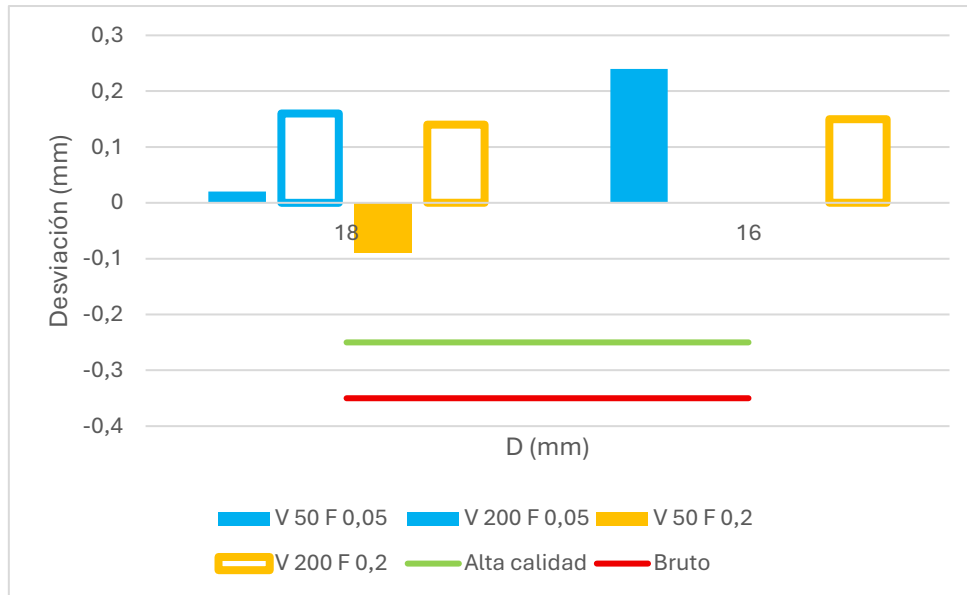


Figura 113: Desviación en cada probeta de HIPS



Figura 114: Probeta HIPS con enredo de viruta

Las mayores desviaciones para este material ocurrieron en el segundo mecanizado bajo al emplear una velocidad de corte de 50 m/min y un avance de 0,05 mm/rev alcanzando un valor de 0,24 mm. En este material se han presentado unas desviaciones más homogéneas no existiendo una combinación que conlleve una variación brusca.

Al comparar las probetas mecanizadas con las impresas se muestra un efecto positivo del mecanizado en las desviaciones presentadas paliando la contracción ocurrida al enfriarse el polímero tras la impresión lográndose resultados más favorables que los obtenidos en la probeta en bruto y de alta calidad.

#### 4.5 Fuerzas de corte

Durante el mecanizado de los tres materiales el dinamómetro registró las tres componentes de las fuerzas involucradas en las operaciones realizadas, los valores mínimos máximos y medios se muestran en las **Tablas 24, 25 y 26**, mientras que la

resultante de las fuerzas se recoge en la **Tabla 27**. Cabe destacar de que el signo negativo de alguna de estas fuerzas indica el sentido de las fuerzas.

MATERIAL	V (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)	Fx(N) Min	Fx(N) Max	Fx(N) Media
PETG	50	0,05	18	-3,90	54,95	18,08
PETG	200	0,05	18	6,30	28,81	17,33
PETG	50	0,2	18	0,76	16,90	11,39
PETG	200	0,2	18	-0,29	27,79	14,79
PETG	50	0,05	16	-77,42	172,10	19,56
PETG	200	0,05	16	-0,36	28,29	13,69
PETG	50	0,2	16	4,14	21,90	13,62
PETG	200	0,2	16	3,04	27,08	15,24
ABS	50	0,05	18	8,74	24,07	17,18
ABS	200	0,05	18	-1,97	24,58	11,39
ABS	50	0,2	18	7,52	21,49	15,92
ABS	200	0,2	18	0,20	33,91	14,89
ABS	50	0,05	16	12,85	27,18	20,61
ABS	200	0,05	16	9,55	27,89	18,95
ABS	50	0,2	16	8,24	16,93	12,85
ABS	200	0,2	16	2,99	31,81	16,43
HIPS	50	0,05	18	13,50	17,56	15,13
HIPS	200	0,05	18	12,45	18,87	15,48
HIPS	50	0,2	18	9,17	14,96	11,92
HIPS	200	0,2	18	7,76	15,85	11,80
HIPS	50	0,05	16	13,71	19,17	16,41
HIPS	200	0,05	16	12,90	20,52	17,31
HIPS	50	0,2	16	8,15	16,77	12,81
HIPS	200	0,2	16	8,75	16,88	12,76

Tabla 25: Valores registrados para Fx

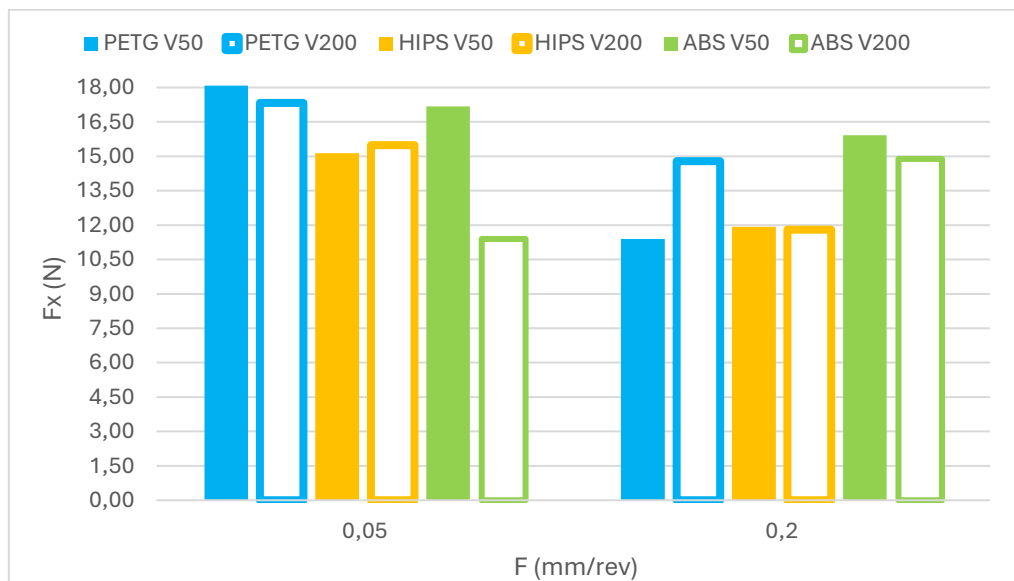


Figura 115: Valores registrados de Fx

MATERIAL	V (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)	Fy(N) Min	Fy(N) Max	Fy(N) Media
PETG	50	0,05	18	-24,68	-2,08	-7,65
PETG	200	0,05	18	-14,56	-0,09	-5,78
PETG	50	0,2	18	-38,12	0,45	-18,60
PETG	200	0,2	18	-33,39	1,08	-15,84
PETG	50	0,05	16	-34,51	16,04	-14,03
PETG	200	0,05	16	-20,94	-4,13	-13,16
PETG	50	0,2	16	-37,02	-20,32	-29,71
PETG	200	0,2	16	-39,66	-16,64	-30,45
ABS	50	0,05	18	-18,38	-2,55	-9,83
ABS	200	0,05	18	-16,64	0,99	-7,54
ABS	50	0,2	18	-35,82	-9,94	-22,26
ABS	200	0,2	18	-51,16	-8,09	-22,39
ABS	50	0,05	16	-14,96	-6,33	-11,38
ABS	200	0,05	16	-16,22	-5,91	-11,32
ABS	50	0,2	16	-28,74	-17,63	-24,96
ABS	200	0,2	16	-42,17	-16,53	-26,63
HIPS	50	0,05	18	-12,61	-5,09	-8,89
HIPS	200	0,05	18	-12,36	-2,60	-8,21
HIPS	50	0,2	18	-31,91	-16,69	-24,80
HIPS	200	0,2	18	-25,67	-16,15	-21,14
HIPS	50	0,05	16	-13,53	-8,63	-10,67
HIPS	200	0,05	16	-14,18	-7,97	-10,78
HIPS	50	0,2	16	-31,53	-20,33	-26,28
HIPS	200	0,2	16	-28,25	-21,33	-24,22

Tabla 26: Valores registrados para Fy

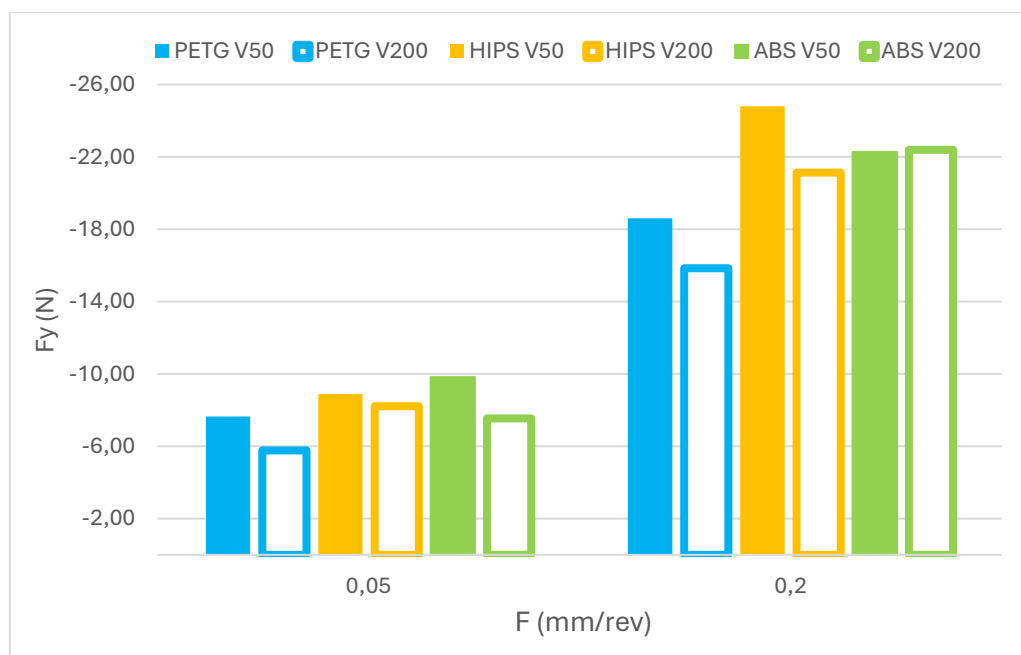


Figura 116: Valores registrados de Fy

MATERIAL	V (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)	Fz(N) Min	Fz(N) Max	Fz(N) Media
PETG	50	0,05	18	0,88	30,94	12,73
PETG	200	0,05	18	1,81	25,92	13,91
PETG	50	0,2	18	0,62	16,60	8,96
PETG	200	0,2	18	-2,47	24,69	11,22
PETG	50	0,05	16	-2,40	38,90	12,93
PETG	200	0,05	16	2,76	39,44	20,52
PETG	50	0,2	16	4,76	28,99	14,92
PETG	200	0,2	16	1,01	31,78	14,65
ABS	50	0,05	18	11,98	18,60	11,98
ABS	200	0,05	18	-4,63	25,26	11,89
ABS	50	0,2	18	3,61	19,98	12,72
ABS	200	0,2	18	-3,62	28,57	12,87
ABS	50	0,05	16	7,68	27,50	16,26
ABS	200	0,05	16	5,94	30,95	16,46
ABS	50	0,2	16	4,95	18,14	9,46
ABS	200	0,2	16	0,02	38,80	13,80
HIPS	50	0,05	18	7,90	14,87	12,06
HIPS	200	0,05	18	10,95	19,50	14,45
HIPS	50	0,2	18	6,35	14,65	10,20
HIPS	200	0,2	18	5,50	17,56	12,00
HIPS	50	0,05	16	9,18	20,38	12,81
HIPS	200	0,05	16	10,10	22,87	14,17
HIPS	50	0,2	16	5,45	17,66	9,66
HIPS	200	0,2	16	5,18	19,80	10,79

Tabla 27: Valores registrados de Fz

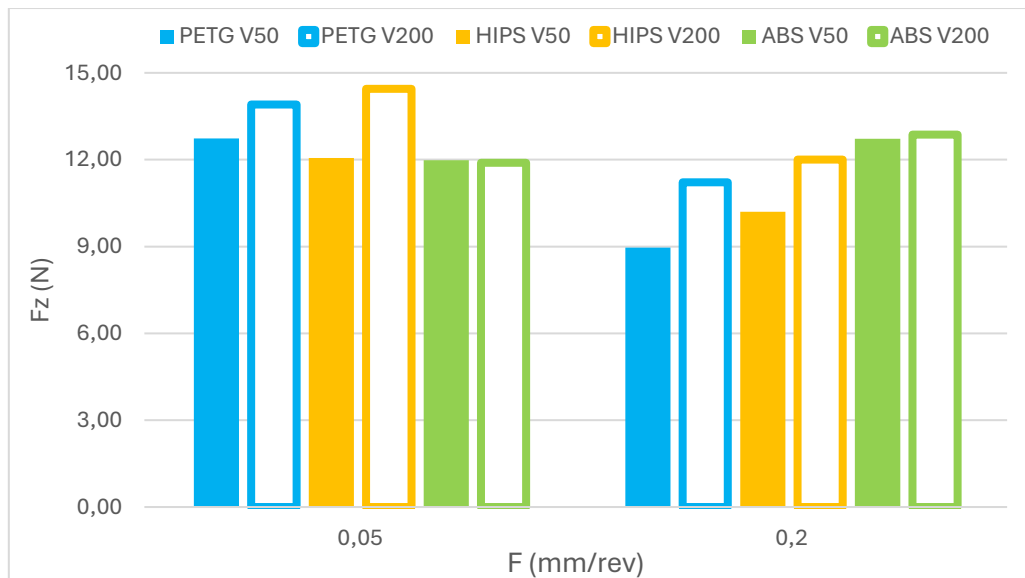


Figura 117: Valores registrados de Fz

MATERIAL	V (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)	Resultante (N)
PETG	50	0,05	18	23,40
PETG	200	0,05	18	22,96
PETG	50	0,2	18	23,58
PETG	200	0,2	18	24,40
ABS	50	0,05	18	23,14
ABS	200	0,05	18	18,11
ABS	50	0,2	18	30,18
ABS	200	0,2	18	29,81
HIPS	50	0,05	18	21,29
HIPS	200	0,05	18	22,71
HIPS	50	0,2	18	29,35
HIPS	200	0,2	18	27,02
PETG	50	0,05	16	27,32
PETG	200	0,05	16	27,96
PETG	50	0,2	16	35,93
PETG	200	0,2	16	37,07
ABS	50	0,05	16	28,61
ABS	200	0,05	16	27,54
ABS	50	0,2	16	29,63
ABS	200	0,2	16	34,20
HIPS	50	0,05	16	23,39
HIPS	200	0,05	16	24,83
HIPS	50	0,2	16	30,79
HIPS	200	0,2	16	29,43

Tabla 28: Valores de la resultante de las fuerzas

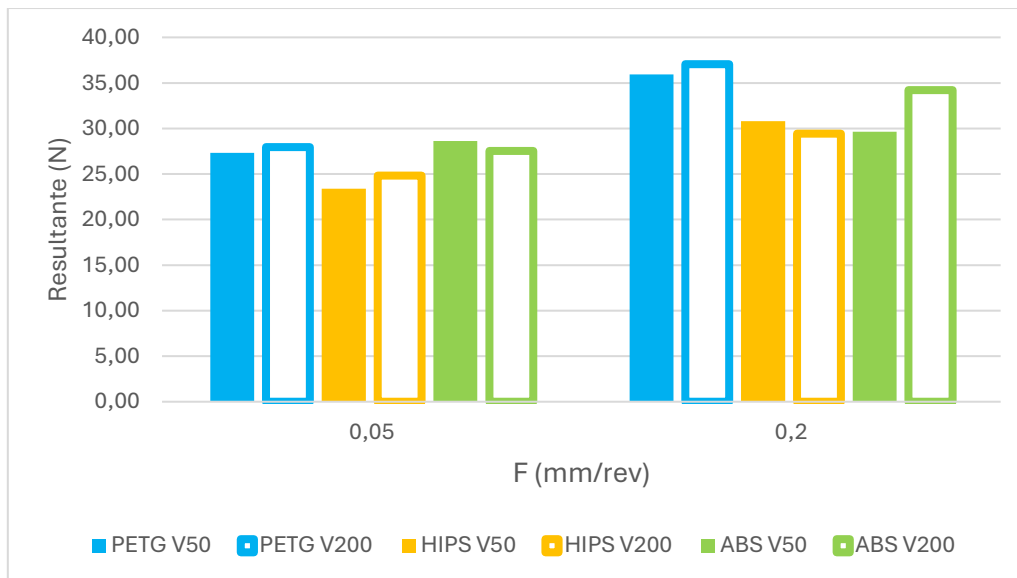


Figura 118: Valores registrados de la resultante

#### 4.5.1 Análisis de Fx

Con base a los datos recogidos tanto en la gráfica como figura correspondiente, se observa como la fuerza en el eje X, correspondiente a la fuerza radial, presenta una tendencia a disminuir a medida que se aumenta el avance, mostrándose valores menores para un

avance de 0,05 mm/rev. Este efecto se muestra de una manera más evidente en el HIPS, material que ha presentado una diferencia mayor al aumentar la velocidad de avance.

Al observar los valores obtenidos se puede ver como el PETG ofrece una mayor resistencia en esta dirección al presentar mayores valores de las fuerzas aplicadas, esto se debe a que presenta una mayor resistencia que los dos polímeros empleados.

Se evidencia la influencia de la velocidad de corte reduciendo generalmente el valor de las fuerzas experimentadas, este aspecto como se podrá ver más adelante, es común para todas las fuerzas involucradas en el proceso. Esta reducción podía preverse debido a que al emplear mayores velocidades de corte se consiguen mayores temperaturas en el mecanizado. Este aumento de temperatura repercute en la resistencia de los tres materiales reblandeciéndose, afectando la resistencia de los polímeros termoplásticos empleados.

En conclusión, esta fuerza depende principalmente del avance empleado en el mecanizado y del material empleado. Además, se vio que la fuerza tendía a disminuir con mayores avances y velocidades de corte.

#### 4.5.2 Análisis de $F_y$

La fuerza en esta dirección se ve influenciada principalmente por la velocidad de avance, registrándose en los tres materiales un aumento considerable de  $F_y$  al pasar de un avance pequeño, 0,05 mm/rev, a uno mayor, 0,2 mm/rev. En contraposición, la velocidad de corte vuelve a adquirir un carácter más secundario en la evolución de esta fuerza. Si bien se observan ciertas variaciones al aumentar la velocidad de corte, estas no son tan significativas como las producidas al aumentar el avance.

Para el PETG un aumento del avance correspondió a una importante subida del valor de  $F_y$  viéndose prácticamente duplicado al aumentarse. Al someter este material a velocidades altas de corte no se experimentaron cambios significativos en la fuerza aplicada en este eje.

En el caso del HIPS, se presenta la fuerte variación del valor de la fuerza al aumentar la velocidad de avance. En valores bajos de esta velocidad se consiguen fuerzas en torno a los -8 N y -10 N, al aumentar el avance estas fuerzas aumentaron hasta conseguir un orden de -25 N. Como se muestra en la gráfica presenta un comportamiento estable al mecanizarse con altas velocidades de corte mostrando cierta permisividad para ser mecanizado con distintas velocidades de corte.

Por último, el ABS presentó el mismo comportamiento que el PETG y HIPS frente al avance y velocidad de corte. Las fuerzas registradas en ambos mecanizados para un avance pequeño se encontraban en un rango entre -7 N y -12 N, mientras que al aumentarse este valor pasaron a un rango entre -22 N y -25 N.

En este caso el análisis de varianza obtenido para esta fuerza si cuenta con un buen valor de  $R^2$ , alcanzando el 98,81%, por tanto, este modelo si se tuvo en cuenta en el estudio de este parámetro debido a su buena fiabilidad.

Los parámetros de interés estadístico de este modelo se muestran en la **Tabla 29**.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	1421,72	101,55	53,60	0,000
Lineal	5	1335,66	267,13	141,00	0,000
V (m/min)	1	5,62	5,62	2,96	0,119
F (mm/rev)	1	1176,59	1176,59	621,02	0,000
D (mm)	1	153,33	153,33	80,93	0,000
Material	2	0,12	0,06	0,03	0,968
Interacción de 2 factores	9	86,06	9,56	5,05	0,012
V (m/min)*F (mm/rev)	1	0,00	0,00	0,00	0,969
V (m/min)*D (mm)	1	4,74	4,74	2,50	0,148
V (m/min)*Material	2	2,21	1,10	0,58	0,578
F (mm/rev)*D (mm)	1	7,91	7,91	4,17	0,071
F (mm/rev)*Material	2	0,96	0,48	0,25	0,781
D (mm)*Material	2	70,24	35,12	18,54	0,001
Error	9	17,05	1,89		
Total	23	1438,77			

Tabla 29: Parámetros de interés ANOVA para Fy

Observando la tabla anterior se observa la fuerte dependencia que tiene esta fuerza frente a la velocidad de avance, como se puede ver por su elevado valor F. El siguiente parámetro más influyente ha sido el diámetro de la probeta contando con un valor F de 80,93. Como se mencionó anteriormente la velocidad de corte tenía un papel secundario en esta fuerza quedando demostrado en este modelo por su pequeño valor F. En este caso no ocurre como en anteriores modelos donde el material no representa un parámetro tan influyente.

En los diagramas de contorno mostrados a continuación se puede observar de manera gráfica la variación de esta fuerza en función de las velocidades, **Figuras 118 a), b) y c)**

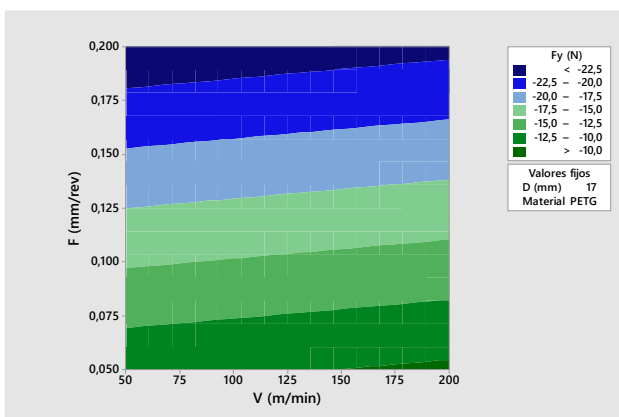


Figura 118 a): Diagrama de contorno de Fy para PETG

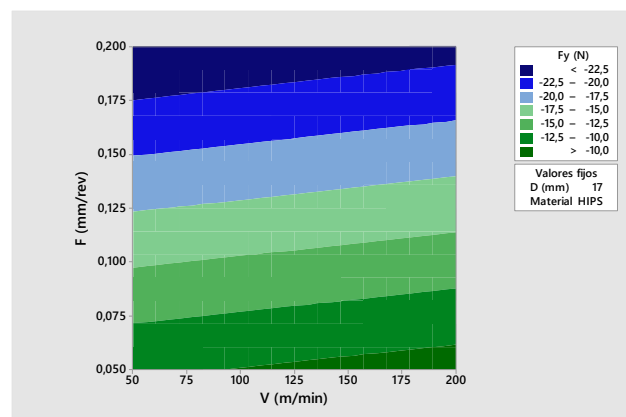


Figura 118 b): Diagrama de contorno de Fy para HIPS

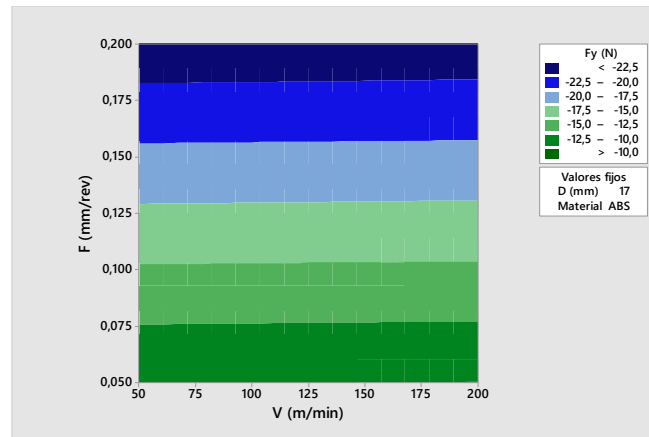


Figura 118 c): Diagrama de contorno de  $F_y$  para ABS

En los diagramas presentados se muestran resultados muy similares entre los distintos materiales, evidenciándose que el avance es el parámetro más influyente en esta fuerza. Esta afirmación se puede corroborar observando la disposición prácticamente horizontal de las bandas de los diagramas, indicando la fuerte dependencia respecto al avance y una influencia secundaria en cuanto a la velocidad de corte. En el caso del PETG y el HIPS, las bandas presentan una ligera inclinación hacia arriba lo que se puede interpretar como una ligera sensibilidad a la velocidad de corte. Caso contrario ocurre en el ABS, las bandas se mantienen prácticamente horizontales mostrando una influencia casi nula de la velocidad de corte.

A partir de este modelo se generaron las siguientes expresiones para  $F_y$  para cada material, **Tabla 30**.

Material			
ABS	$F_y$ (N)	=	$-2,6 - 0,1001 V \text{ (m/min)} - 224,0 F \text{ (mm/rev)} - 0,164 D \text{ (mm)}$ $+ 0,0020 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} + 0,00593 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $+ 7,65 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$
HIPS	$F_y$ (N)	=	$3,8 - 0,0905 V \text{ (m/min)} - 226,9 F \text{ (mm/rev)} - 0,584 D \text{ (mm)}$ $+ 0,0020 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} + 0,00593 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $+ 7,65 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$
PETG	$F_y$ (N)	=	$-61,6 - 0,0931 V \text{ (m/min)} - 220,3 F \text{ (mm/rev)} + 3,237 D \text{ (mm)}$ $+ 0,0020 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} + 0,00593 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $+ 7,65 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$

Tabla 30: Expresiones resultantes del modelo para  $F_y$

#### 4.5.3 Análisis de $F_z$

Esta fuerza presenta un comportamiento más homogéneo frente a la velocidad de avance que  $F_y$  observándose en las **Figuras 119 a), b) y c)**, como, aunque se presenta una ligera disminución al aumentar el avance, no existe una variación tan brusca en ningún material como pasaba en la anterior fuerza analizada. Esta fuerza presentó valores más homogéneos y bajos en el primer cilindrado que en el segundo pudiendo ser esto consecuencia deberse a la diferencia de diámetro entre ambas operaciones.

En el ANOVA realizado para esta fuerza se obtuvo un  $R^2$  del 76,93% siendo superior al límite fijado y por tanto se consideró para el análisis. En la **Tabla 31** se muestran los parámetros de interés de este modelo.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	115,979	8,2842	2,14	0,126
Lineal	5	86,488	17,2977	4,48	0,025
V (m/min)	1	20,244	20,2437	5,24	0,048
F (mm/rev)	1	34,853	34,8534	9,02	0,015
D (mm)	1	19,153	19,1531	4,96	0,053
Material	2	12,238	6,1191	1,58	0,258
Interacción de 2 factores	9	29,491	3,2768	0,85	0,595
V (m/min)*F (mm/rev)	1	0,431	0,4315	0,11	0,746
V (m/min)*D (mm)	1	1,848	1,8481	0,48	0,507
V (m/min)*Material	2	2,457	1,2286	0,32	0,736
F (mm/rev)*D (mm)	1	4,878	4,8780	1,26	0,290
F (mm/rev)*Material	2	0,695	0,3477	0,09	0,915
D (mm)*Material	2	19,181	9,5904	2,48	0,139
Error	9	34,785	3,8650		
Total	23	150,764			

Tabla 31: Parámetros de interés ANOVA para Fz

Como se observa en la tabla en esta fuerza no se encuentra esa predominancia del avance en la fuerza analizada como sucedía en Fy, aun así, sigue siendo el parámetro con mayor influencia, seguido de la velocidad de corte y diámetro de la probeta. El material representa un parámetro con un carácter poco influyente.

De este modelo se obtuvieron los diagramas de contorno de las Figuras 119 a), b) y c). En las cuales se muestra de manera gráfica una dependencia en cada material no tan determinante de la velocidad de avance como ocurría en el caso anterior. Esto se ve por la forma de las bandas del diagrama en las que se ve como a medida que aumenta la velocidad de corte estas se van inclinando hacia arriba. También se observa que las menores fuerzas se don con velocidades de avance y corte pequeñas.

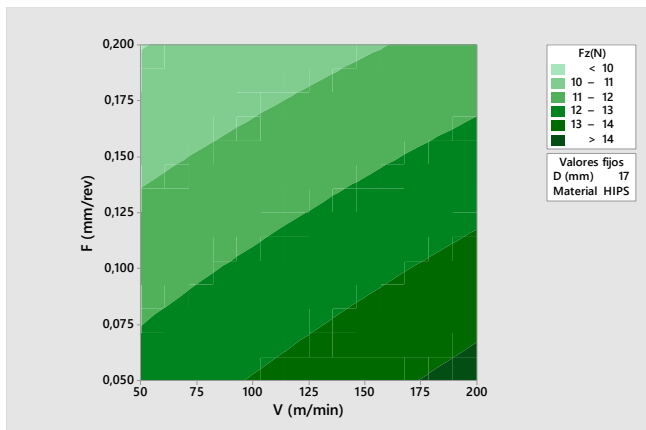


Figura 119 a): Diagrama de contorno de Fz para HIPS

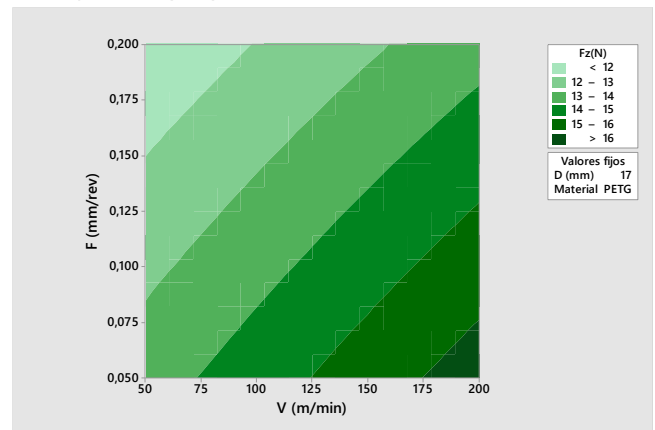


Figura 119 b): Diagrama de contorno de Fz para PETG

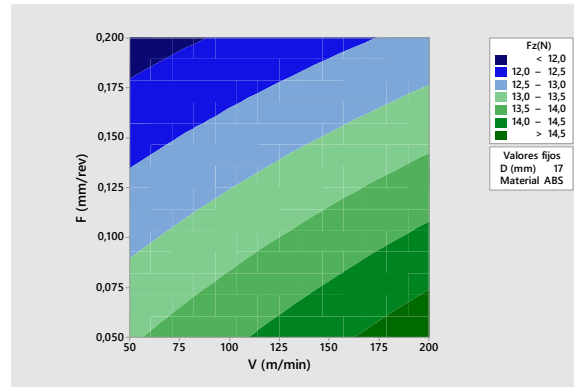


Figura 119 c): Diagrama de contorno de Fz para HIPS

A partir del modelo matemático se obtuvieron las siguientes expresiones:

Material			
ABS	Fz(N)	=	$32,2 + 0,0735 V \text{ (m/min)} - 112,1 F \text{ (mm/rev)} - 1,10 D \text{ (mm)}$ $- 0,0238 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} - 0,00370 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $+ 6,01 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$
HIPS	Fz(N)	=	$14,7 + 0,0770 V \text{ (m/min)} - 117,3 F \text{ (mm/rev)} - 0,13 D \text{ (mm)}$ $- 0,0238 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} - 0,00370 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $+ 6,01 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$
PETG	Fz(N)	=	$52,6 + 0,0838 V \text{ (m/min)} - 116,4 F \text{ (mm/rev)} - 2,31 D \text{ (mm)}$ $- 0,0238 V \text{ (m/min)} * F \text{ (mm/rev)} - 0,00370 V \text{ (m/min)} * D \text{ (mm)}$ $+ 6,01 F \text{ (mm/rev)} * D \text{ (mm)}$

Tabla 32: Expresiones resultantes del modelo para Fz

En resumen de este apartado se determinó que en el proceso de cilindrado de los tres materiales ensayados, PETG, HIPS y ABS, se evidenció la influencia de los distintos parámetros de corte, destacando especialmente el avance, sobre las componentes de la fuerza evaluada.

Para la componente Fx, el avance represento el factor principal sobre esta, presentandose los valores más altos en general para avances bajos, y una sensibilidad más baja frente a la velocidad de corte.

El PETG presentó las mayores fuerzas en esta dirección, esto se puede deber a que se presente una mayor resistencia en este eje para el PETG que para los materiales anteriores. En cuanto al HIPS, contó con un comportamiento más estable mientras que el ABS tuvo una respuesta más irregular frente a la velocidad de corte.

En la fuerza Fy se mostró una dependencia clara de la velocidad de avance, mostrandose tanto en los resultados experimentales como en el análisis estadístico. Al aumentar el avance, las fuerzas aumentaron drásticamente en los tres materiales, aunque PETG y HIPS presentaron mayores variaciones. En esta fuerza se mostró un claro papel secundario de la velocidad de corte.

Por último, en lo que respecta a Fz, hubo un comportamiento más homogéneo entre el material y las condiciones de corte. Pese a esta homogeneidad siguió destacando el avance frente al resto de parámetros.

La destacable influencia del avance en las fuerzas registradas se debe a que al emplear un avance mayor se incrementa la cantidad de material removido por unidad de tiempo. Esta mayor cantidad de material eliminado implica un aumento de la resistencia ofrecida por el material por lo que será necesario emplear una fuerza mayor para poder continuar con la eliminación del material.

#### 4.6 Consumo

En la **Tabla 32** han sido recogidos los valores promedios de las potencias registradas tras en el mecanizado de cada una de las probetas.

Material	V	F	DN (mm)	P (kW)	Q (kVA)	S (kvar)
PETG	50	0,05	18	1,279	7,46	7,905
PETG	200	0,05	18	1,628	7,559	7,33
PETG	50	0,2	18	1,226	7,512	7,403
PETG	200	0,2	18	1,033	6,996	6,914
PETG	50	0,05	16	1,304	7,202	7,427
PETG	200	0,05	16	1,469	7,532	7,319
PETG	50	0,2	16	1,184	7,363	7,257
PETG	200	0,2	16	1,401	7,677	7,421
ABS	50	0,05	18	1,142	7,014	6,893
ABS	200	0,05	18	1,181	7,161	7,052
ABS	50	0,2	18	1,528	7,229	7,005
ABS	200	0,2	18	1,237	7,252	7,137
ABS	50	0,05	16	1,312	7,436	7,309
ABS	200	0,05	16	1,888	7,683	7,329
ABS	50	0,2	16	1,226	7,28	7,165
ABS	200	0,2	16	1,324	7,451	7,236
HIPS	50	0,05	18	1,353	7,336	7,203
HIPS	200	0,05	18	1,835	7,334	7,022
HIPS	50	0,2	18	1,262	7,509	7,394
HIPS	200	0,2	18	1,419	7,625	7,407
HIPS	50	0,05	16	1,298	7,319	7,85
HIPS	200	0,05	16	1,735	7,511	7,223
HIPS	50	0,2	16	1,164	7,284	7,179
HIPS	200	0,2	16	1,362	7,529	7,308

Tabla 33: potencias registradas

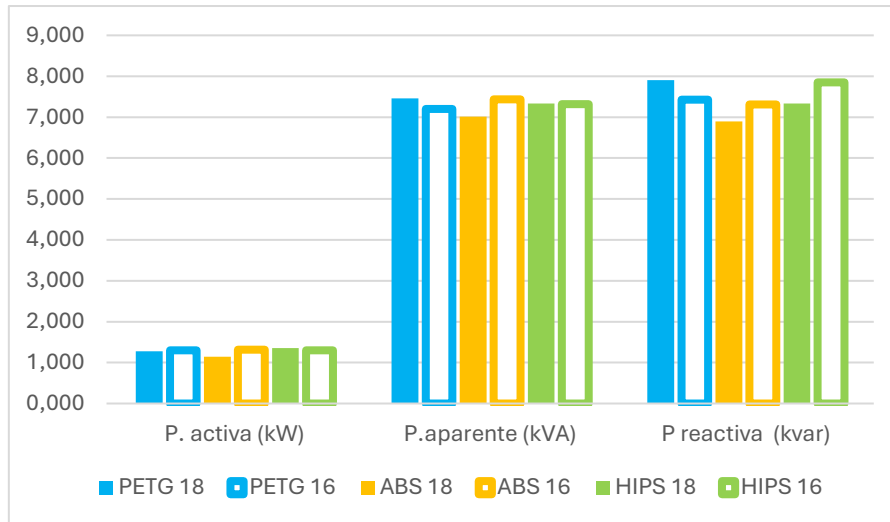


Figura 120: Consumo para Vc 50 m/min y f 0,05 mm/rev

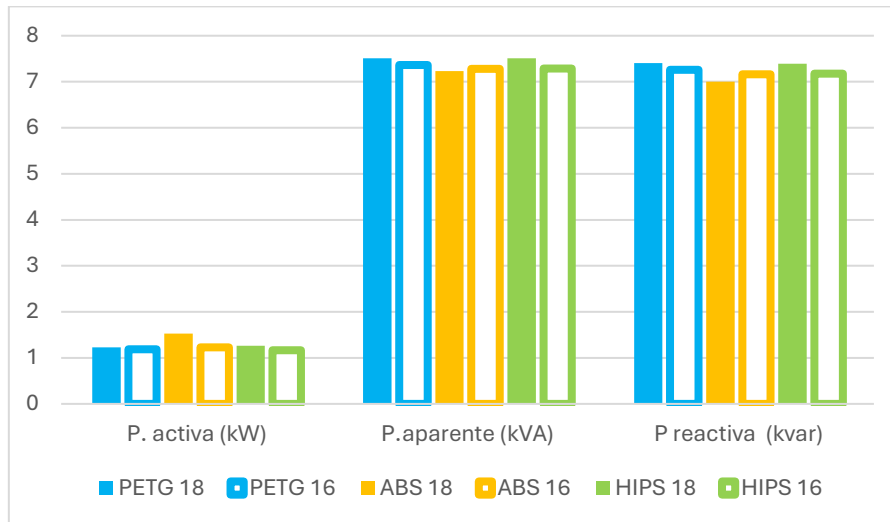


Figura 121: Consumo para Vc 50 m/min y f 0,2 mm/rev

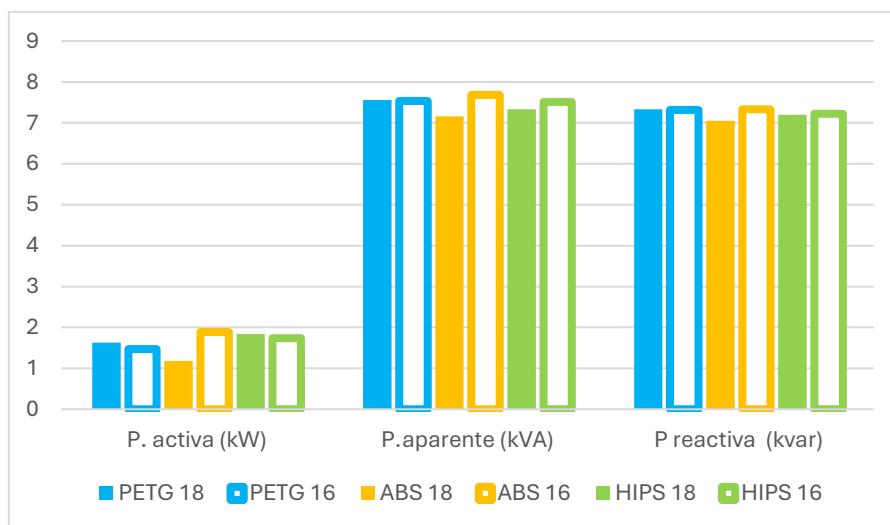


Figura 122: Consumo para Vc 200 m/min y f 0,05 mm/rev

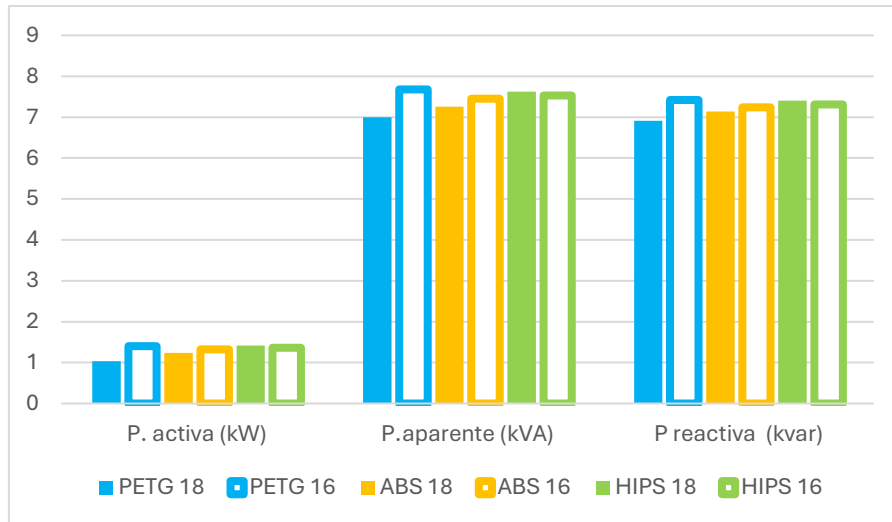


Figura 121: Consumo para  $V_c$  200 m/min y  $f$  0,2 mm/rev

A la vista de los resultados obtenidos se muestra cierta homogeneidad entre las potencias desarrolladas en cada uno de los materiales. Se observa que el PETG ha necesitado una potencia ligeramente mayor al ABS y HIPS sin embargo esta diferencia no es muy significativa.

El aspecto más destacable en cuanto a las potencias desarrolladas es la clara influencia de la velocidad de corte, no tan notable en el caso de la de avance.

## 5. Conclusiones

Una vez expuestos los resultados obtenidos a lo largo del proceso, se concluyen los siguientes aspectos:

De los parámetros medidos durante el proceso de cilindrado de las probetas se pueden extraer diversos aspectos:

- **Temperatura del proceso:** En el mecanizado de los tres materiales no se encontraron valores muy elevados, esto se debe a las propiedades térmicas de estos materiales y al uso de aire comprimido en el proceso. El parámetro con mayor influencia en la temperatura en los tres materiales fue la velocidad de corte afectando directamente a la temperatura conforme aumenta, la velocidad de avance mostró un carácter secundario.  
Los tres materiales mostraron un comportamiento relativamente similar, aunque como se puede ver en los diagramas de contorno, el PETG contaba con una mayor influencia de la velocidad de avance, no obstante, seguía sin ser determinante en el proceso.  
El PETG fue el material que registró mayores temperaturas de corte, seguido del ABS y HIPS.
- **Fuerzas:** Las probetas resistieron adecuadamente las fuerzas de corte ejercidas, no presentando deformaciones ni roturas en estas pese a su esbeltez elevada, sumado a dirección de aplicación de las fuerzas, estas fueron aplicadas en la dirección más desfavorable, siendo esta la dirección paralela a la orientación de las capas.  
Las fuerzas desarrolladas no fueron excesivamente altas comparadas con las que se pueden obtener al procesar metales puesto a que los polímeros ensayados no cuentan con valores de resistencia tan elevados.  
Viendo los resultados experimentales y los modelos generados se concluye que el parámetro más influyente en los valores de las fuerzas alcanzadas dependía fundamentalmente del avance teniendo una ligera influencia la velocidad de corte.
- **Consumo:** Los cilindrados realizados presentaron unos valores homogéneos en los tres materiales. Los valores de la potencia desarrollada dependían fundamentalmente de la velocidad de corte empleada, aumentando en la potencia según lo hacía esta velocidad. Todos los procesos se realizaron sin presentar dificultades al poder ofrecer el torno empleado la potencia requerida con facilidad.

De las mediciones efectuadas sobre la rugosidad y las referentes a la precisión dimensional de las probetas se extrajo:

- **Rugosidad superficial:** Se mostró una mejora importante de la calidad superficial presentada en todas las probetas tras ser sometidas a las operaciones de mecanizado, lográndose mejoras significativas respecto a la rugosidad de la probeta en bruto y a la impresa bajo condiciones de alta calidad.  
Los valores más altos de rugosidad se dieron para el PETG mientras que los menores se dieron para HIPS, el ABS presentó valores cercanos a los obtenidos en las probetas de HIPS. En los tres materiales se dieron los mejores resultados al emplear una velocidad de corte de 50 m/min y un avance de 0,05 mm/rev.

- **Desviaciones de forma:** Las probetas mecanizadas presentaron mejoras significativas en este aspecto con respecto a las probetas en bruto y de alta calidad. En cuanto a las desviaciones sufridas en los distintos materiales se observa que, al igual que ocurrió con la rugosidad superficial, el HIPS fue el polímero que presentó mejores resultados, seguido de ABS y por último PETG. Se observó como una baja velocidad de avance y de corte produjeron, de manera general, los resultados óptimos.
- **Diámetro:** en los tres materiales se observó como la aplicación del cilindrado, pese a que no llegó al valor nominal, disminuyó la diferencia entre este valor con el real. Las probetas en bruto y de alta calidad, generalmente, presentaron mayores desviaciones con respecto al valor nominal del diámetro.

Como se ha expuesto una combinación de velocidades pequeñas han resultado en los mejores resultados en los tres materiales ensayados, al analizar los resultados experimentales se observó como al aumentar los valores de velocidad empeoraban los resultados obtenidos. La velocidad de avance resultó ser un parámetro más influyente en el mecanizado de estos polímeros presentando influencia en la mayoría de los aspectos estudiados.

Para acabar, se quiere destacar dos aspectos:

- Se logró de manera exitosa una mejoría de la calidad superficial y una reducción de las desviaciones macrogeométricas de las probetas obtenidas por fabricación aditiva FFF de distintos materiales mostrando una buena aptitud de estos para ser sometidos al mecanizado.
- Se demostró que la combinación de las tecnologías de fabricación aditiva y operaciones de mecanizado permite conseguir mejores calidades geométricas y superficiales que las obtenidas exclusivamente mediante una impresión de alta calidad. Además, esta combinación no solo resultó ser ventajosa en cuanto a las propiedades de las piezas obtenidas, sino que se logró una reducción importante de los tiempos empleados en el proceso. A pesar de que las probetas de alta calidad no contaban con un relleno del 100%, como las destinadas al mecanizado, tuvieron tiempos de impresión considerablemente mayores.

## 6. Líneas futuras de investigación

La investigación realizada abre las puertas a numerosas posibilidades de estudio.

Una de las posibilidades que se aportan sería un estudio del comportamiento de los polímeros ensayados bajo condiciones de corte intermedias, de esta manera se podría realizar un seguimiento más detallado del comportamiento de estos permitiendo buscar la combinación óptima para cada polímero. En este nuevo estudio sería interesante variar también la profundidad de corte observando la influencia de este parámetro en los distintos aspectos que engloban al proceso.

Otro de los aspectos interesantes sería realizar un estudio de vibraciones y observar la influencia de estas en temperaturas, precisión dimensional y rugosidad superficial en los distintos materiales, permitiendo evaluar la influencia de las vibraciones en los resultados finales.

Otro de los parámetros que sería interesante estudiar sería la influencia del patrón escogido a la hora de realizar la impresión en el proceso de mecanizado. Realizar el mismo estudio, pero variando el tipo de patrón y cantidad de relleno. De esta manera se podría determinar el valor mínimo de relleno necesario para poder efectuar un mecanizado exitoso permitiendo optimizar el proceso de impresión ahorrando material y disminuyendo los tiempos de impresión. En cuanto al tipo de patrón sería interesante evaluar la influencia de este en la resistencia de la pieza y observar como afectaría también los distintos patrones y rellenos a la temperatura del proceso.

Por último, sería interesante evaluar la resistencia de las probetas mecanizadas de estos materiales ensayándolas a fatiga permitiendo evaluar como ha afectado el mecanizado y comparar los datos recogidos con los de las probetas sin realizar un mecanizado.



## 7. Bibliografía

- [1] P. M. Hernandez Castellano, *Tecnologías de fabricación aditiva*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica, 2018. [Online]. Available: <https://elibro.net/es/lc/uma/titulos/57246>
- [2] A. Lamikiz Mentxaka, A. M. Camacho López, S. Ferrándiz Bou, and M. Batista Ponce, *Fabricación aditiva*, 1ª ed., 1ª reimp. in Máster ; 2804007MR01A01. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2023.
- [3] AENOR, “UNE-EN ISO/ASTM 52900:2022 UNEVigente 27 / 04 / 2022 Fabricación aditiva. Principios generales. Fundamentos y vocabulario,” Apr. 2022.
- [4] Dassault Systèmes®, “Binder Jetting, ¿Qué es y cómo funciona?” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/binder-jetting>
- [5] ExOne, “What is binder jetting?” Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.exone.com/en-US/3d-printing-materials-and-binders/sand>
- [6] Dassault Systemes, “Directed Energy Deposition.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/make/guide/process/directed-energy-deposition>
- [7] D.-G. Ahn, “Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 8, pp. 703–742, 123AD, doi: 10.1007/s40684-020-00302-7.
- [8] AIDIMME, “Qué es la deposición de energía focalizada o directa (DED).” Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://actualidad.aidimme.es/2023/06/15/que-es-la-deposicion-de-energia-focalizada-ded/>
- [9] Dassault Systèmes®, “Inyección de material, ¿Qué es y cómo funciona? | Dassault Systèmes®.” Accessed: Mar. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/material-jetting>
- [10] O. Gülcan, K. Günaydın, and A. Tamer, “The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 16, 2021, doi: 10.3390/polym13162829.
- [11] Dassault Systèmes, “Fusión de lechos de polvo, ¿cómo funciona? | Dassault Systèmes®.” Accessed: Mar. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/powder-bed-fusion>
- [12] L. Ladani and M. Sadeghilaridjani, “Review of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing for Metals,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/met11091391.

- [13] “CEFAM / Tecnologías > Fusión de lecho de polvo - Powder Bed Fusion – PBF.” Accessed: Mar. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.aidimme.es/plataforma/cefamweb/pbf.asp>
- [14] “Tecnología de fusión de lecho de polvo para piezas finales.” Accessed: Mar. 02, 2025. [Online]. Available: <https://actualidad.aidimme.es/2023/06/21/tecnologia-de-fusion-de-lecho-de-polvo-pbf-para-piezas-finales/>
- [15] “Industries Served – Fabrisonic.” Accessed: Mar. 02, 2025. [Online]. Available: <https://fabrisonic.com/industries-served/>
- [16] “Photopolymerization, What is it and how does it work? | Dassault Systèmes®.” Accessed: Mar. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/make/guide/process/photopolymerization>
- [17] “¿Qué es la impresión 3D en resina?” Accessed: Mar. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.weerg.com/es/guias/impresion-3d-como-funciona>
- [18] “Extrusión de materiales, ¿qué es y cómo funciona? | Dassault Systèmes®.” Accessed: Mar. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/material-extrusion>
- [19] B. Jellimann, *Impresión 3D FDM: La guía completa de la impresión 3D*. in LA FABRICA. Barcelona: Ediciones ENI, 2024.
- [20] “Archivo STL, ¿Qué es y para qué sirve? |.” Accessed: Mar. 16, 2025. [Online]. Available: <https://creafab3d.com/archivo-stl-que-es/>
- [21] “FUNCIONAMIENTO DE SLICERS | Blog Ingenius.” Accessed: Mar. 16, 2025. [Online]. Available: <https://eddm.es/blog-ingenius/funcionamiento-slicers/>
- [22] “Los patrones de relleno en la impresión 3D, ¿qué tipos hay y para qué se utilizan? - 3Dnatives.” Accessed: Mar. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/guia-patrones-relleno-impresion-3d-170720232/>
- [23] “Soportes de impresión 3D | Dassault Systèmes.” Accessed: Mar. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/3d-printing-supports>
- [24] “Soportes de impresión 3D: La guía completa - 3Dnatives.” Accessed: Mar. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/guia-soportes-de-impresion-3d-200920222/#!>
- [25] V. G. Grassi, M. Madalena, C. Forte, and M. F. Dal Pizzol, “Aspectos Morfológicos e Relação Estrutura-Propriedades de Poliestireno de Alto Impacto,” *Polímeros*, vol. 11, no. 3, pp. 158–168, Sep. 2001, doi: 10.1590/S0104-14282001000300016.
- [26] “ABS | Tecnología de los Plásticos.” Accessed: Mar. 31, 2025. [Online]. Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html>

- [27] “Guía completa del plástico ABS: propiedades y aplicaciones.” Accessed: Mar. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.plastico.com/es/noticias/guia-completa-del-plastico-abs-propiedades-y-aplicaciones>
- [28] “Guía completa: El filamento de ABS en la impresión 3D - 3Dnatives.” Accessed: Mar. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/#!>
- [29] AENOR, “UNE-ISO/IEC GUIA 99:2012 IN UNE Vigente 15 / 02 / 2012 Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados (VIM).,” Feb. 2012.
- [30] M. Gómez Galán, *Metrología dimensional : resumen de teoría y problemas resueltos*. Universidad de Almería, 2023.
- [31] Lorenzo. Solano García, *Procesos de fabricación mecánica* . in Colección Académica. Valencia: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, 2020.
- [32] “Tolerancia de ubicación (desviación de ubicación) | Tipos de tolerancias geométricas | Fundamentos de GD&T | KEYENCE México.” Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/gd-and-t/type/location-tolerance.jsp>
- [33] V. Šimunović and G. Baršić, “Evaluating the spindle error of the roundness measurement device,” *Measurement: Sensors*, vol. 32, p. 101038, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.MEASEN.2024.101038.
- [34] “AENORMas.” Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://plataforma-aenormas-aenor-com.eu1.proxy.openathens.net/pdf/UNE/N0046845>
- [35] “AENORMas.” Accessed: May 11, 2025. [Online]. Available: <https://plataforma-aenormas-aenor-com.eu1.proxy.openathens.net/pdf/UNE/N0022726>
- [36] “AENORMas.” Accessed: May 11, 2025. [Online]. Available: <https://plataforma-aenormas-aenor-com.eu1.proxy.openathens.net/pdf/UNE/N0071403>
- [37] “Surface Roughness Measurement—Parameters | Evident.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://evidentscientific.com/es/applications/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters>
- [38] C. Felhő, K. Kun-Bodnár, and Z. Maros, “Comparison of 2D and 3D Surface Roughness Parameters of AlMgSi0.5 Aluminium Alloy Surfaces Machined by Abrasive Waterjet,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 9, no. 3, 2025, doi: 10.3390/jmmp9030080.

- [39] L. Tonietto *et al.*, “Method for evaluating roughness and valley areas coefficients of surfaces acquired by laser scanner,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, p. 1486, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-04847-2.
- [40] K. Singh, N. Paliwal, and K. Kasamias, “Surface roughness characterization using representative elementary area (REA) analysis,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 1785, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-52329-4.
- [41] V. Molnár, “Minimization Method for 3D Surface Roughness Evaluation Area,” *Machines*, vol. 9, no. 9, 2021, doi: 10.3390/machines9090192.
- [42] “INGENIERÍA DE FABRICACIÓN FUNDAMENTOS DEL MECANIZADO I”.
- [43] “Los patrones de relleno en la impresión 3D, ¿qué tipos hay y para qué se utilizan? - 3Dnatives.” Accessed: Jun. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/guia-patrones-relleno-impresion-3d-170720232/>
- [44] “Game Changer: Four Parts Proving Additive Manufacturing Can Compete with Casting on Cost | GE Aerospace News.” Accessed: Jun. 02, 2025. [Online]. Available: [https://www.geaerospace.com/news/articles/technology/game-changer-four-parts-proving-additive-manufacturing-can-compete-casting-cost?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.geaerospace.com/news/articles/technology/game-changer-four-parts-proving-additive-manufacturing-can-compete-casting-cost?utm_source=chatgpt.com)
- [45] “Additive Manufacturing: Siemens uses innovative technology to produce gas turbines | Press | Company | Siemens.” Accessed: Jun. 02, 2025. [Online]. Available: <https://press.siemens.com/global/en/feature/additive-manufacturing-siemens-uses-innovative-technology-produce-gas-turbines>
- [46] I. G. Bavaresco, “TORNO”.
- [47] “MÁQUINAS-HERRAMIENTA I”.
- [48] A. Generales and D. Torneado, “UNIVERSIDAD DE MÁLAGA Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación Tema 8”.
- [49] M. P. Groover, C. M. de la Peña Gómez, F. J. Sandoval Palafox, and M. Á. Martínez Sarmiento, *Fundamentos de manufactura moderna : materiales, procesos y sistemas* . México [etc: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997.
- [50] J. Pereira and D. Romanello, “Determinación experimental de la fuerza de corte de la aleación AA A356 T6 en operaciones de torneado,” *REVISTA INGENIERÍA UC*, vol. 14, pp. 64–73, May 2007.
- [51] B. Sharma, “EFFECT OF PARAMETERS LIKE SPINDLE SPEED, DEPTH OF CUT AND FEED RATE ON THE CUTTING FORCE OF A SINGLE POINT CUTTING TOOL,” *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, vol. 4, 2020, Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: <http://www.ijeast.com>
- [52] “INGENIERÍA DE FABRICACIÓN FUNDAMENTOS DEL MECANIZADO I”.

- [53] A. Nápoles Alberro, *Ingeniería en los procesos de fabricación mediante el arranque de virutas*, 1st ed. Madrid: Delta Publicaciones, 2015.
- [54] A. Tzotzis, D. Nedelcu, S.-N. Mazurchevici, and P. Kyratsis, “Surface Quality Evaluation of 3D-Printed Carbon-Fiber-Reinforced PETG Polymer During Turning: Experimental Analysis, ANN Modeling and Optimization,” *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 20, 2024, doi: 10.3390/polym16202927.
- [55] A. I. Alateyah, Y. El-Taybany, S. El-Sanabary, W. H. El-Garaihy, and H. Kouta, “Experimental Investigation and Optimization of Turning Polymers Using RSM, GA, Hybrid FFD-GA, and MOGA Methods,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 17, 2022, doi: 10.3390/polym14173585.
- [56] S. M. Abdur Rob and A. K. Srivastava, “Turning of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composites: Process Modeling and Optimization using Taguchi Analysis and Multi-Objective Genetic Algorithm,” *Manuf Lett*, vol. 33, pp. 29–40, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.MFGLET.2022.07.012.
- [57] “ISCAR Cutting Tools - Metal Working Tools - Mandrinado - - DCMT-14.” Accessed: May 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.iscar.com/eCatalog/MoreInfo.aspx?mapp=BO&fnum=72&app=0&item=5594615&GFSTYP=M&isoD=-1>
- [58] C. Su, X. Cheng, Y. Li, X. Yan, G. Zheng, and R. Dong, “Low Temperature Assisted Small Hole Fabrications on Carbon Fiber Reinforced Polymer,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 47, no. 4, pp. 2211–2223, 2023, doi: 10.1007/s40997-023-00634-0.
- [59] L. Zhao and B. Li, “Development of Cutting Temperature Model Based on Experiment and Analysis of its Influencing Factors in Cutting ADI,” *J Phys Conf Ser*, vol. 2578, no. 1, p. 12037, Aug. 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2578/1/012037.
- [60] A. Tzotzis, D. Nedelcu, S.-N. Mazurchevici, and P. Kyratsis, “Investigating the Machining Behavior of the Additively Manufactured Polymer-Based Composite Using Adaptive Neuro-Fuzzy Learning,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 10, 2025, doi: 10.3390/app15105373.
- [61] S. Wei, P. Zou, L. Fang, and J. Duan, “Theoretical and experimental study of 3D ultrasonic vibration-assisted turning driven by two actuators,” *Measurement*, vol. 215, p. 112865, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2023.112865.
- [62] 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,” *Mater Today Proc*, vol. 27, pp. 2042–2047, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.MATPR.2019.09.055.
- [63] T. Hakmi, A. Hamdi, Y. Touggui, A. Laouissi, S. Belhadi, and M. A. Yallese, “Machinability investigation during turning of polyoxymethylene POM-C and optimization of cutting parameters using Pareto analysis, linear regression

and genetic algorithm,” *Archive of Mechanical Engineering*, vol. 71, no. No 1, pp. 47–71, 2024, doi: 10.24425/ame.2024.149184.

- [64] A. Chabbi, M. A. Yallese, M. Nouioua, I. Meddour, T. Mabrouki, and F. Girardin, “Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POM C) based on RSM, ANN, and DF methods,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, no. 5, pp. 2267–2290, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9858-8.
- [65] M. Esangbedo and J. Abifarin, “Determination and managerial implications of machine conditions for high-grade industrial polycaprolactam (nylon 6),” *Sci Rep*, vol. 13, p., 2023, doi: 10.1038/s41598-023-37383-8.
- [66] “Sistema de medición de redondez - Roundtest RA-120 - MITUTOYO - de forma / optomecánico / compacto.” Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/mitutoyo/product-7785-1931895.html>