



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE
LA CALIDAD SUPERFICIAL DE
PIEZAS FABRICADAS
MEDIANTE MECANIZADO Y
FABRICACIÓN ADITIVA**

Alumno: Mercedes Pérez Jiménez

Tutor: Prof. D. Diego Carou Porto
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2018

Lista de acrónimos

ABS: del inglés *Acrylonitrile Butadiene Styrene*

AISI: del inglés *American Iron and Steel Institute*

ANOVA: Análisis de la Varianza

CAD: del inglés *Computer Aided Design*

CLIP: del inglés *Continuous Liquid Interface Production*

CN: control numérico (CN)

CNC: del inglés *Computer Numerical Control*

DMLS: del inglés *Direct Metal Laser Sintering*

FDM: del inglés *Fused Deposition Modeling*

FFF: Fabricación de Filamentos Fundidos

ISO: del inglés *International Organization for Standardization*

LOM: del inglés *Laminated Object Manufacturing*

NIST: del inglés *National Institute of Standards and Technology*

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

PBF: del inglés *Powder Bed Fusion*

PLA: del inglés *polylactic acid*

SGC: del inglés *Solid Ground Curing*

SLA: estereolitografía

SLM: del inglés *Selective Laser Melting*

SLS: del inglés *Selective Laser Sintering*

SML: del inglés *Sheet Material Lamination*

STEP: del inglés *Standard for the Exchange of Product*

STL: del inglés *Standard Triangle Language*

TFG: Trabajo de Fin de Grado

VPP: del inglés *Vat Photopolymerization*

Índice de tablas

Tabla 2.1: Clases de rugosidad y ancho de cresta correspondiente (Lakić <i>et al.</i> , 2014).....	10
Tabla 2.2: Procesos de fabricación aditiva y años de invención (Rietzel <i>et al.</i> , 2017).....	15
Tabla 2.3: Materiales actuales comerciales para fabricación aditiva por categoría de proceso (Basada en Bourell <i>et al.</i> , 2017).	18
Tabla 2.4: Rugosidad superficial media de las técnicas de fabricación aditiva (Kumbhar y Mulay, 2016).	20
Tabla 2.5: Actividades de mecanizado por aleación de material y sector industrial (Childs <i>et al.</i> , 2000).	24
Tabla 2.6: Diferencias entre fabricación aditiva y mecanizado (Noorani, 2018).	29
Tabla 3.1: Factores, niveles y nomenclatura para el experimento 1.	38
Tabla 3.2: Factores, niveles y nomenclatura para el experimento 2.	38
Tabla 3.3: Factores, niveles y nomenclatura para los ensayos en torneado.	39
Tabla 3.4: Combinaciones para el diseño factorial fraccionado para el experimento 1.	40
Tabla 3.5: Plan del experimento 1.	42
Tabla 3.6: Plan del experimento 2.	42
Tabla 4.1: Propiedades del PLA utilizado.	50
Tabla 4.2: Dimensiones de la impresora Witbox.	51
Tabla 4.3: Parámetros de impresión de las probetas para torneado.	56
Tabla 4.4: Factores y niveles para el experimento 1.....	60
Tabla 4.5: Seguimiento de ensayos del experimento 1.....	60
Tabla 4.6: Factores y niveles para el experimento 2.....	62
Tabla 4.7: Seguimiento de ensayos del experimento 2.....	63
Tabla 4.8: Factores y niveles para los ensayos de torneado.	65
Tabla 4.9: Seguimiento de ensayos por mecanizado.	65
Tabla 4.10: Resultados de rugosidad superficial obtenidos en el experimento 1.	66
Tabla 4.11: Código de significación del software R	67
Tabla 4.12: Resultados del ANOVA para el experimento 1.	67
Tabla 4.13: Contribución de cada factor a la variabilidad para el experimento 1.....	69
Tabla 4.14: Test de normalidad de Shapiro-Wilk para el experimento 1.	70
Tabla 4.15: Test no paramétricos de Spearman y Kendall para el experimento 1.	70
Tabla 4.16: Resultados de rugosidad superficial obtenidos en el experimento 2.	74
Tabla 4.17: Resultados del ANOVA para el experimento 2.	75
Tabla 4.18: Contribución de cada factor a la variabilidad para el experimento 2.....	76
Tabla 4.19: Test de normalidad de Shapiro-Wilk para el experimento 2.	77
Tabla 4.20: Test no paramétricos de Spearman y Kendall para el experimento 2.	77
Tabla 4.21: Rugosidades de las probetas antes del torneado.	78
Tabla 4.22: Resultados de rugosidad obtenidos para las probetas torneadas.	79
Tabla 4.23: Rugosidades medias de las probetas por tramo.	79
Tabla 4.24: Temperaturas obtenidas durante el torneado de las probetas.	80

Índice de figuras

Figura 2.1: Desviaciones de forma (DIN 4760, 1982).	7
Figura 2.2: Parámetros básicos del perfil de rugosidad (UNE-EN ISO 4287:1997, 1999).....	9
Figura 2.3: Características de transmisión de los perfiles de rugosidad y de ondulación (UNE-EN ISO 4287:1997, 1999).	11
Figura 2.4: Perfiles característicos de la rugosidad superficial.....	12
Figura 2.5: Efecto escalera.....	19
Figura 2.6: Cinco pasos del proceso de impresión 3D (basado en Noorani, 2018).....	21
Figura 3.1: División de las probetas para la toma de medidas.....	41
Figura 4.1: Espray fijador y PLA empleados.	51
Figura 4.2: Impresora Witbox, PLA y espray fijador.	52
Figura 4.3: Software Ultimaker CURA 3.2.1.	53
Figura 4.4: Rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ 210.	54
Figura 4.5: Impresora AirWolf 3D HD.	56
Figura 4.6: Torno Pinacho SP/165.	57
Figura 4.7: Cámara de imagen térmica FLIR i3.	58
Figura 4.8: Probetas del experimento 1.....	61
Figura 4.9: Probetas del experimento 2.....	64
Figura 4.10: Probetas de los ensayos de torneado.....	66
Figura 4.11: Rugosidad superficial del experimento 1 agrupadas por altura de capa.	72
Figura 4.12: Rugosidad superficial del experimento 1 agrupadas por grosor de la pared.	73
Figura 4.13: Medición de probetas.	75
Figura 4.14: Rugosidad superficial del experimento 2 agrupadas por grosor de la pared.	78
Figura 4.15: Rugosidad superficial en los ensayos de torneado.	81
Figura 4.16: Temperaturas obtenidas en los ensayos de torneado.....	81

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento	1
1.2. Motivación y objetivos	2
1.3. Estructura.....	3
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. Introducción	5
2.2. Calidad superficial.....	6
2.2.1. Definiciones básicas	6
2.2.2. Medición de la rugosidad	10
2.3. Fabricación aditiva	13
2.3.1. Reseña histórica	13
2.3.2. Categorías de procesos	16
2.3.3. Materiales	17
2.3.4. Rugosidad.....	18
2.3.5. Procedimiento a seguir.....	21
2.4. Mecanizado.....	22
2.4.1. Reseña histórica	22
2.4.2. Categorías de procesos	23
2.4.3. Materiales	24
2.4.4. Rugosidad.....	26
2.4.5. Procedimiento a seguir.....	27
2.5. Comparación entre fabricación aditiva y mecanizado.....	28
2.5.1. Rugosidades en metales.....	30
2.5.2. Rugosidades en plásticos	32
3. METODOLOGÍA	35
3.1. Introducción	35
3.2. Planificación pre-experimental	35
3.2.1. Reconocimiento y declaración del problema	35
3.2.2. Selección de la variable de respuesta	36
3.2.3. Selección de los factores, niveles y rangos	36
3.3. Elección del diseño experimental	39
3.4. Realización del experimento	43
3.4.1. Actividades previas a los ensayos.....	43
3.4.1.1. Impresión 3D.....	43

3.4.1.2. Torneado.....	44
3.4.2. Realización de ensayos	44
3.4.2.1. Impresión 3D.....	44
3.4.2.2. Torneado.....	45
3.5. Análisis estadístico.....	46
3.6. Conclusiones.....	47
4. APLICACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	49
4.1. Introducción	49
4.2. Aplicaciones	49
4.2.1. Equipo experimental para los experimentos 1 y 2	49
4.2.2. Equipo experimental para los ensayos de torneado	54
4.2.3. Definición de los experimentos.....	59
4.2.3.1. Experimento 1	59
4.2.3.2. Experimento 2	61
4.2.3.3. Ensayos de torneado	64
4.3. Análisis de resultados	66
4.3.1. Resultados de rugosidad superficial del experimento 1.....	66
4.3.2. Análisis estadístico del experimento 1.....	67
4.3.3. Resultados de rugosidad superficial del experimento 2.....	74
4.3.4. Análisis estadístico del experimento 2.....	75
4.3.5. Resultados de rugosidad superficial de los ensayos de torneado	78
4.3.6. Análisis de resultados de las probetas torneadas.....	80
5. Conclusiones y trabajos futuros.....	83
5.1. Conclusiones.....	83
5.1.1. Conclusiones de carácter general	83
5.1.2. Conclusiones de carácter particular	84
5.2. Trabajos futuros	85
Bibliografía	88

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento

A lo largo de la historia, el hombre ha tenido la necesidad de fabricar para poder satisfacer sus menesteres. Con el desarrollo y la innovación tecnológica, se han ido mejorando los distintos procesos de fabricación convencionales, pudiendo obtener productos con una buena calidad, coste y rendimiento. Por otro lado, han ido apareciendo y creándose nuevos conceptos de producción como la fabricación aditiva.

La fabricación aditiva, también llamada impresión 3D, lleva presente alrededor de 30 años y ha ganado interés público y comercial, debido a que proporciona ventajas como imprimir todo en una pieza sin necesidad de ensamblar. La fabricación convencional, como el mecanizado, empieza a dar paso a estas nuevas tecnologías (Oropallo y Piegler, 2016). Aun así, la fabricación aditiva presenta limitaciones, por lo que es necesario el estudio y la comparación entre la fabricación convencional, el mecanizado, y una fabricación más innovadora, la impresión 3D.

El mecanizado es una tecnología convencional, extendida y madura que ofrece ventajas como no tener limitaciones de tamaño y el coste, además de obtener buenos acabados superficiales y una alta precisión, dos características limitantes todavía en la impresión 3D (Noorani, 2018).

El logro de una calidad predefinida con un equipo dado, coste y tiempo limitado, puede definirse como el problema general de la fabricación (Benardos y Vosniakos, 2003).

1.2. Motivación y objetivos

Uno de los requisitos principales de un producto es una buena calidad superficial, concretamente una baja rugosidad. Hay un gran número de publicaciones sobre estudios de la rugosidad superficial que se obtiene con distintos procesos de mecanizado y materiales. Sin embargo, el número de publicaciones es limitado cuando trata sobre la rugosidad superficial obtenida mediante fabricación aditiva.

La fabricación aditiva es contraria al mecanizado, mientras una añade capas la otra las elimina. La fabricación aditiva ha tenido un alto impacto en la sociedad e industria, aunque todavía se deben abordar ciertos desafíos, como obtener una buena rugosidad superficial. Por ello, entre otras razones, el mecanizado como proceso de fabricación sigue siendo de gran importancia para la industria.

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) intenta aportar conocimiento en un tema que ha sido tratado en la literatura científica de manera limitada. Así, se pretende desarrollar un estado del arte detallado sobre la fabricación aditiva y mecanizado, centrado en el estudio de la calidad superficial. Adicionalmente, se llevará a cabo un estudio experimental comparativo sobre la rugosidad superficial obtenida en impresión 3D y en mecanizado.

Los objetivos que se plantean pueden dividirse en objetivos de carácter general y de carácter particular. Así, el objetivo de carácter general es el estudio y análisis comparativo entre fabricación aditiva y sustractiva, identificando las diferencias entre las calidades superficiales que se obtienen. Para poder alcanzar dicho objetivo general, se plantean los objetivos particulares, relacionados con el estado del arte, de conocer: fundamentos de la calidad superficial, categorías de procesos en fabricación aditiva y mecanizado, materiales aptos, rugosidades superficiales obtenidas en diferentes materiales mediante fabricación aditiva y mecanizado. Además, otro de los objetivos particulares es el planteamiento de una metodología que permita llevar a cabo satisfactoriamente los experimentos y ensayos, así como conocer la influencia de distintos factores de fabricación aditiva sobre la rugosidad superficial y comparar las rugosidades superficiales obtenidas en fabricación aditiva y con un post-procesado de mecanizado, mediante experimentación y análisis estadístico.

1.3. Estructura

Este Trabajo Fin de Grado consta de 5 capítulos y una bibliografía, cuyo contenido y títulos se muestran a continuación:

Introducción: se establece el contexto general del estudio, motivación y objetivos que se persiguen con la investigación y la estructura dada al TFG.

Estado del arte: se presenta toda la información relacionada con los temas fundamentales a abordar en el estudio: definiciones y mediciones sobre la calidad superficial, reseña histórica, categorías de procesos, materiales y rugosidades en fabricación aditiva y mecanizado y rugosidades superficiales obtenidas en diferentes estudios de fabricación aditiva y sustractiva. Dicha información se obtiene tras un estudio exhaustivo de la bibliografía.

Metodología: se expone la estrategia empleada para realizar la parte experimental del TFG. Se emplea un diseño experimental que a partir de una planificación de experimentos nos permite recoger datos apropiados para un posterior análisis estadístico, dando resultados válidos y conclusiones objetivas.

Aplicaciones y análisis de resultados: se presenta todo el desarrollo práctico del diseño experimental expuesto en el punto anterior. En este apartado se definirán los equipos experimentales empleados en el desarrollo, se le darán valores a los factores seleccionados para el plan de experimentos y se hará un estudio detallado de los resultados obtenidos con representaciones gráficas y análisis estadístico.

Conclusiones y trabajos futuros: recoge las conclusiones obtenidas del TFG, tanto de carácter general como de carácter particular. También se recogen las líneas de actuación de posibles desarrollos futuros, así como trabajos que han tenido lugar a raíz de este TFG.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

Los procesos de fabricación tienen como propósito obtener unas determinadas características referidas a la calidad, costes y tiempo. Con dichos propósitos, los ingenieros e ingenieras se enfrentan a dos problemas. El primero es aumentar el rendimiento del proceso de fabricación y el segundo obtener la calidad deseada mediante la determinación de los valores de los parámetros que intervienen en el sistema (Yamazaki, 2016).

El avance tecnológico reduce largos pasos de la fabricación industrial tradicional (Adel *et al.*, 2018). Así por ejemplo, hoy en día la fabricación aditiva es una tecnología que se está expandiendo rápidamente en una serie de sectores industriales. Aunque, todavía tiene inconvenientes como la baja productividad, una baja calidad e incertidumbre de las propiedades mecánicas obtenidas (Bikas *et al.*, 2016).

Las nuevas tecnologías, como la fabricación aditiva, capacitarán a las personas y colectivos sociales a llevar a cabo su propia investigación y actividades innovadoras. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (2016) identifica a las impresoras 3D como uno de los productos simbólicos para la Generación Z, como lo fueron los automóviles, televisión, ordenadores y dispositivos móviles para las generaciones anteriores. Ahora se está ante una revolución industrial, la Industria 4.0, en la que la fabricación aditiva desempeña un papel de gran importancia. Para ello se debe hacer un estudio y desarrollo de los materiales, procesos y problemas de diseño, para poder fabricar productos personalizados con alta calidad en fábricas inteligentes de alta eficiencia con una integración ciberfísica, que es lo que propone la Industria 4.0 (Dilberoglu *et al.*, 2017).

2.2. Calidad superficial

En la industria se tiene la necesidad de alcanzar una calidad superficial adecuada para cada producto. La falta de conformidad de las piezas puede llevar a incurrir en pérdidas económicas. Por ello, se deben identificar y estudiar los distintos parámetros que intervienen en los procesos de fabricación, para garantizar la validez de un producto, aunque no se puedan controlar numerosos factores que tienen influencia en el resultado final de la rugosidad superficial (Diamoutene *et al.*, 2018) (Benardos *et al.*, 2003).

2.2.1. Definiciones básicas

Las irregularidades superficiales comprenden dos grupos de errores, los macro-geométricos y los micro-geométricos. Los errores macro-geométricos son errores que se pueden verificar con instrumentos de medición convencionales y engloban divergencias de ondulaciones, planicidad, ovalización, circularidad, rectilineidad, etc. El otro grupo, los errores micro-geométricos, son los errores conocidos como rugosidad (Alves *et al.*, 2011) (Benardos *et al.*, 2003).

La rugosidad se refiere a la desviación de un tercer hasta un sexto orden respecto a la superficie, es decir, irregularidades superficiales que caracterizarán la calidad superficial. El orden de desviación se encuentra recogido en las normas internacionales ISO 4287 (UNE-EN ISO 4287:1997, 1999) e ISO 4288 (UNE-EN ISO 4288:1996, 1998); refiriéndose las desviaciones de primer y segundo orden a la forma, las de tercer y cuarto orden a muescas periódicas, y las de quinto y sexto orden a la estructura del material. Estas desviaciones se pueden ver representadas en la Figura 2.1.

Structural deviations (in superelevated representation)	
	1 st Order: form deviations
	2 nd Order: waviness
	3 rd Order: grooves (roughness)
	4 th Order: scores, scales (roughness)
Not easily representable	5 th Order: textural structure
	6 th Order: lattice structures of the material
	Superposition of structural deviations 1 st up to 4 th Order

Figura 2.1: Desviaciones de forma (DIN 4760, 1982).

La rugosidad superficial en el mecanizado ha sido ampliamente estudiada. A continuación, se muestran cuatro categorías para clasificar los distintos enfoques sobre la rugosidad superficial en la fabricación sustractiva (Benardos *et al.*, 2003):

- Enfoques que se basan en la teoría de mecanizado para desarrollar modelos analíticos y/o algoritmos para representar la superficie mecanizada.
- Enfoques que examinan los efectos de varios factores a través de la ejecución de experimentos y el análisis de resultados.
- Enfoques que usan diseño de experimentos.
- Enfoques de inteligencia artificial.

Para cuantificar, definir y medir la rugosidad se emplean parámetros básicos que se definen a continuación (Lakić *et al.*, 2014) (UNE-EN ISO 4287:1997, 1999):

Longitud de muestreo (L): longitud en el eje X, empleada para identificar las irregularidades que caracterizan el perfil de evaluación de la pieza.

Ancho de cresta (K): distancia entre dos picos contiguos.

Rugosidad media (R_a): es la desviación media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas $Z(x)$ comprendidas en una longitud de muestreo L . Es un criterio básico de rugosidad.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (\text{Fórmula 2.1})$$

Rugosidad máxima (R_t): es la desviación máxima entre pico y valle en una longitud de muestreo L .

$$R_t = z_{max} - z_{min} \quad (\text{Fórmula 2.2})$$

Altura media de diez puntos de irregularidades (R_z): es la distancia media entre cinco picos y cinco valles de la longitud de muestreo L .

$$R_z = \frac{R_1 + R_3 + \dots + R_m - (R_2 + R_4 + \dots + R_n)}{5} \quad (\text{Fórmula 2.3})$$

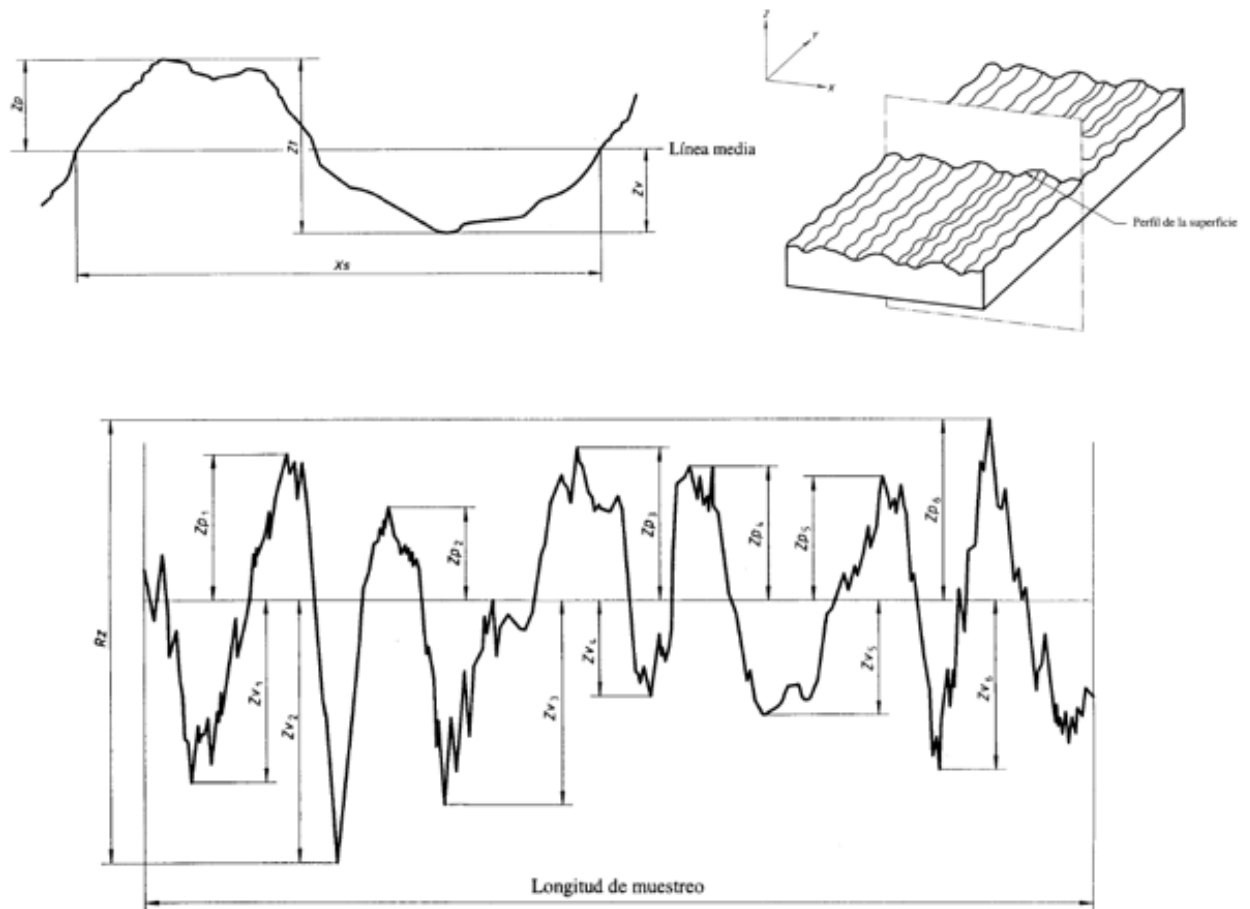


Figura 2.2: Parámetros básicos del perfil de rugosidad (UNE-EN ISO 4287:1997, 1999).

La desviación media aritmética es el valor más empleado para la evaluación de la rugosidad superficial (Sanz *et al.*, 2013). Así, generalmente es el parámetro empleado como referencia por la industria y los investigadores. Por ello, se usa como referencia la rugosidad media (R_a) y junto a la rugosidad medida en diez puntos de irregularidades (R_z) para clasificar la aspereza de la superficie en doce clases como se puede ver en la Tabla 2.1 (Lakić *et al.*, 2014).

Clase de rugosidad	Valor más alto		Ancho de cresta (mm)
	R_a (μm)	R_z (μm)	
N1	0,025	0,1	0,006
N2	0,05	0,2	0,0125
N3	0,1	0,4	0,025
N4	0,2	0,8	0,05
N5	0,4	1,6	0,1
N6	0,8	3,2	0,2
N7	1,6	6,3	0,4
N8	3,2	12,5	0,8
N9	6,3	25	1,6
N10	12,5	50	3,2
N11	25	100	6,3
N12	50	200	12,5

Tabla 2.1: Clases de rugosidad y ancho de cresta correspondiente (Lakić et al., 2014).

2.2.2. Medición de la rugosidad

La calidad superficial es un problema tridimensional, por lo que la determinación de la rugosidad presenta un problema técnico complejo. Por esta razón, se deben usar varios criterios de evaluación de rugosidad, siendo los métodos para medir la rugosidad superficial, métodos cuantitativos (Lakić et al., 2014). Como existe una gran gama de métodos para el estudio de la textura superficial, la ISO (del inglés *International Organization for Standardization*, ISO) trata la clasificación de métodos para medir la calidad superficial (UNE-EN ISO 25178-6:2010, 2010).

Para tener un control de la textura superficial se realiza un muestreo estadístico de la superficie en diferentes tramos, haciendo una comparación entre el perfil teórico y real de la pieza. Este perfil real no se determina de forma exhaustiva, ya que sería

costoso e innecesario. Para intentar obtener dicho perfil, una forma común, es recorrerlo con un palpador que, con los cambios de altura debidos a las irregularidades superficiales de una sección de la pieza, genera señales eléctricas proporcionales a dichos cambios. El perfil obtenido, por este medio, es un perfil efectivo que se aproxima y se obtiene a partir del perfil real. Para eliminar ondulaciones (señales de baja frecuencia o de onda larga) y rugosidades (señales de alta frecuencia o de onda corta), así como otras irregularidades más concretas, el perfil efectivo pasa por diferentes filtros, que separan dicho perfil en componentes de longitud de onda larga y componentes de longitud de onda corta (Company *et al.*, 2007) (Lakić *et al.*, 2014) (UNE-EN ISO 4287:1997,1999).

Los perfiles y filtros vienen definidos por la Norma ISO 4287 (UNE-EN ISO 4287:1997, 1999):

Filtro de perfil λ_s : define la separación entre las componentes de rugosidad y las componentes de longitud de onda más corta, presentes en la superficie.

Filtro de perfil λ_c : define la separación entre las componentes de rugosidad y las componentes de ondulación de onda largas, presentes en la superficie.

Filtro de perfil λ_f : define la separación entre las componentes de ondulación y las componentes de longitud de onda aún más largas, presentes en la superficie.

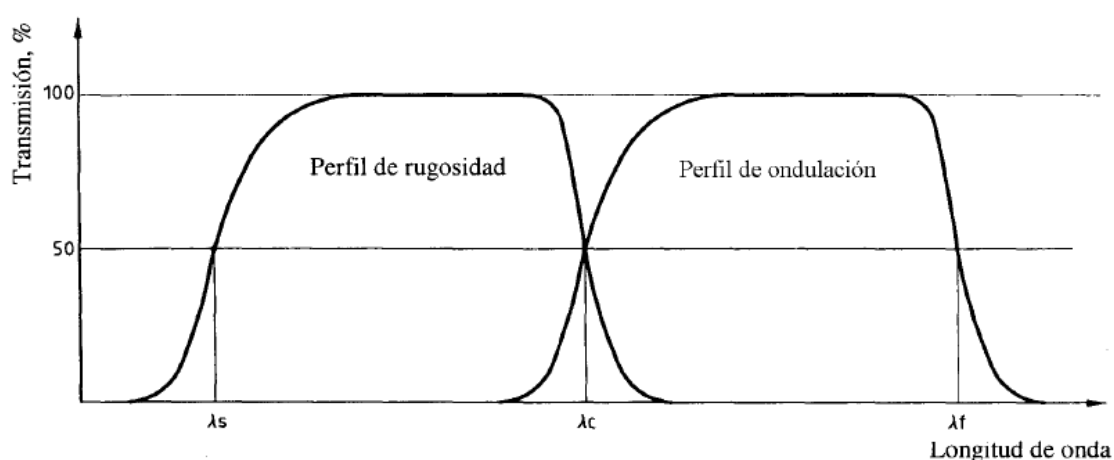


Figura 2.3: Características de transmisión de los perfiles de rugosidad y de ondulación (UNE-EN ISO 4287:1997, 1999).

Perfil primario (P): es la mejor aproximación del perfil real que se puede medir con el procedimiento empleado, es decir, es el perfil efectivo aplicándole el filtro para longitudes de onda cortas λ_s .

Perfil de rugosidad (R): se obtiene a partir del perfil primario eliminando las características del perfil de longitudes de onda largas con el filtro λ_c .

Perfil de ondulaciones (W): derivado del perfil primario por medio de la aplicación sucesiva de los filtros λ_c (longitudes de onda largas) y λ_f (longitudes de onda aún más largas).

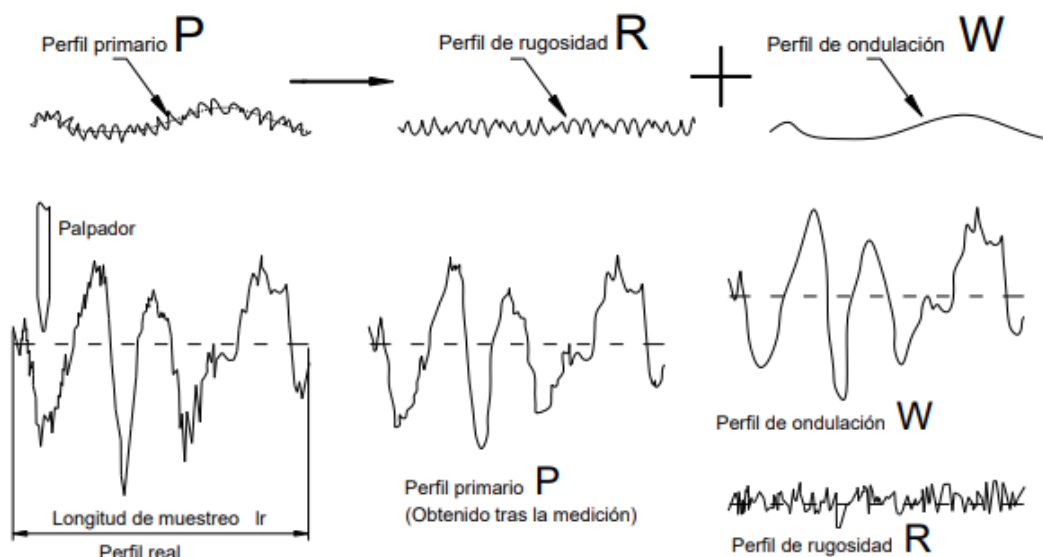


Figura 2.4: Perfiles característicos de la rugosidad superficial.

Para la determinación de la textura superficial, los estudios estadísticos tienen una gran importancia, por ejemplo la descripción de texturas utilizando niveles de gris de una imagen con matrices de co-ocurrencia, conocidas como descriptores de Haralick *et al.*, (1973).

Por otro lado, se ha desarrollado software para la medición y el estudio de los acabados superficiales en la industria. Bui *et al.*, (2004) presentan el desarrollo de un

sistema de análisis de superficies mediante la evaluación y validación de parámetros y algoritmos, en una base de datos digital del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (del inglés *National Institute of Standards and Technology*, NIST) de Estados Unidos. Dinis *et al.*, (2016) exponen un software para la creación de rugosidades y estructuras porosas en cualquier geometría apoyándose en la fabricación aditiva, debido a las ventajas que pueden llevar consigo este tipo de acabados superficiales en implantes ortopédicos y dentales.

2.3. Fabricación aditiva

2.3.1. Reseña histórica

La idea de fabricación aditiva tiene más de 100 años, cuando Joseph E. Blanton en 1892 diseñó un método para producir mapas topográficos de contorno mediante el corte de hojas de cera y apilarlas a continuación. Esta idea se aplicó hace 30 años a un proceso para realizar, inicialmente, maquetas de piezas o prototipos de plástico durante el desarrollo de la pieza final, dando lugar al concepto de fabricación aditiva que se tiene en la actualidad. Ahora es un área mucho más desarrollada y con una alta previsión de crecimiento, existiendo distintos procesos, como sinterización selectiva con láser (del inglés *Selective Laser Sintering*, SLS) o modelado por deposición fundida (del inglés *Fused Deposition Modeling*, FDM) y aplicaciones, como prototipado rápido, recubrimiento, soldadura, unión, etc. (Rietzel *et al.*, 2017) (Hallgrén *et al.*, 2016).

Charles Hull, fundador de 3D Systems, es considerado el creador de la impresión 3D. Su primera patente la obtuvo en 1984 para su aparato de estereolitografía (SLA), el cual se emplea para fabricar prototipos utilizando luz ultravioleta para curar la resina de un fotopolímero en una cuba. A principios de la década de 1980, el diseño asistido por ordenador CAD (del inglés *Computed Aided Design*, CAD) no estaba muy desarrollado, teniendo Hull la necesidad de transferir el archivo CAD en un formato que la impresora 3D pudiese interpretar e imprimir. Así, se desarrolló el formato de archivo de estereolitografía (del inglés *Standard Triangle Language*, STL) que cualquier máquina 3D puede usar (Noorani, 2018) (Bourell *et al.*, 2017).

En 1989, Scott Crup diseñó el proceso de modelado por deposición fundida, FDM. Para la máquina de FDM, desarrolló materiales de acrilonitrilo butadieno estireno, ABS (del inglés *Acrylonitrile Butadiene Styrene*, ABS), utilizados en la actualidad para la mayoría de impresoras 3D. Carl Deckard y Joe Beaman desarrollaron, a mediados de la década de 1980, un proceso de sinterización selectiva con láser, SLS, siendo ésta la única tecnología del momento capaz de fabricar prototipos con metales (Noorani, 2018) (Rietzel *et al.*, 2017).

En 2005, se inició la revolución de impresión 3D con el proyecto llamado RepRap, cuyo objetivo es crear una máquina que pueda replicarse a sí misma. Gracias a apoyos gubernamentales, empresarios y aficionados, y el avance de la tecnología informática, la electrónica y el software, la fabricación aditiva está en pleno desarrollo (Noorani, 2018) (Bourell *et al.*, 2017).

Con el avance de la industria 4.0, se está fomentando la integración de sistemas de producción inteligentes y tecnologías avanzadas. La fabricación aditiva juega un papel de gran importancia en este movimiento, teniendo un futuro prometedor y con un impacto impredecible sobre la industria tradicional (Dilberoglu *et al.*, 2017) (Lu *et al.*, 2015).

En la Tabla 2.2 se recogen las principales tecnologías de fabricación aditiva desarrolladas en las últimas décadas junto a su año de invención.

Nombre en la norma	Nombre alternativo	Año de invención
Fotopolimerización en tanque o cuba (VPP)	Estereolitografía (SLA)	1984
	Curado sólido en la base (SGC)	1986
	Producción de interfaz líquida continua (CLIP)	2015
Fusión en lecho de polvo (PBF)	Sinterizado selectivo con láser (SLS)	1986
	Fusión por multichorro	-
	Sinterizado selectivo por calor	2008
Extrusión de material	Modelado de deposición fundida (FDM)	1989
	Fabricación de filamentos fundidos (FFF)	1989
Laminado de hojas de material (SML)	Fabricación de objetos laminados (LOM)	1996
Proyección de aglutinante	Unión selectiva o impresión 3D	1989
Proyección de material	Chorro de cera	1989
	Inyección de polímero o formación libre	2013

Tabla 2.2: Procesos de fabricación aditiva y años de invención (Rietzel *et al.*, 2017).

2.3.2. Categorías de procesos

El término de fabricación aditiva se refiere a las tecnologías que crean objetos mediante la adición sucesiva de material. La norma ISO/ASTM 52900 (UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017) lo define como el proceso de unir materiales para hacer partes a partir de datos del modelo 3D, generalmente capa sobre capa, en oposición a la fabricación sustractiva.

Los procesos de fabricación aditiva tienen en común las siguientes características: un ordenador para almacenar y procesar información geométrica y para guiar al usuario, y un material de deposición que es procesado por puntos, líneas o áreas para crear partes (Bourell *et al.*, 2017).

Según la norma ISO/ASTM 52900 (UNE-EN ISO/ASTM 52900, 2017), las categorías de procesos de fabricación aditiva se dividen de la siguiente forma:

- Proyección de aglutinante: un agente líquido aglutinante se deposita selectivamente para unir materiales en polvo.
- Deposición de energía focalizada: se utiliza energía térmica focalizada para unir materiales mediante fusión, a medida que se depositan.
- Extrusión de material: el material se dispensa a través de una boquilla o un orificio.
- Proyección de material: se depositan selectivamente gotas del material de fabricación.
- Fusión de lecho de polvo: la energía térmica funde selectivamente ciertas zonas de un lecho de polvo.
- Laminado de hojas: el material en forma de láminas u hojas se une para formar un objeto.
- Fotopolimerización en tanque o cuba: un fotopolímero líquido se cura selectivamente en una cuba mediante polimerización activada por luz.

2.3.3. Materiales

Para cualquier proceso de fabricación, la materia prima seleccionada debe ser compatible con el proceso en cuestión, además de tener unas propiedades aceptables para llevar a cabo su aplicación de forma exitosa. En fabricación aditiva, para la producción de piezas que requieren tolerancias más estrechas, se suele hacer un post-procesamiento para mejorar su microestructura, reducir porosidad y rugosidad, para que cumplan con las tolerancias geométricas y estructurales necesarias (Bourell *et al.*, 2017).

Con fabricación aditiva se pueden realizar piezas de geometría compleja con materiales cerámicos, compuestos, metales y plásticos. Dependiendo del proceso de fabricación aditiva que se vaya a emplear se hará uso de unos materiales u otros, que sean adecuados o estén destinados para dicho proceso (Chua *et al.*, 2017).

El tipo de material empleado en la fabricación afecta directamente en la forma, las dimensiones, las aplicaciones, la durabilidad y el coste. En la industria, la fabricación de los productos, se realiza a partir de uno o múltiples materiales. En fabricación aditiva la selección de materiales todavía es limitada, teniendo buenas expectativas en la próxima generación de impresoras 3D que debe tener métodos mejorados de procesamiento, para poder producir con una mayor gama de materiales. En general, hay tres categorías principales de materiales; son materiales basados en líquidos, en sólidos y en polvo. Cada una de estas tres categorías tiene diferentes tipos de materiales, como cerámica, compuestos, metales y polímeros (Noorani, 2018) (Bikas *et al.*, 2016). En la Tabla 2.3 se presentan los principales materiales empleados en fabricación aditiva junto a la categoría de proceso que los utiliza.

	Extrusión de material	Fotopolimerización en tanque	Proyección de material	Fusión de lecho de polvo	Proyección de aglutinante	Laminado de hojas	Deposición de energía focalizada
ABS, policarbonato, PC/BS mezcla, PLA, polieterimida	X						
Acrílicos, acrilatos, epóxicos		X	X				
Poliamida (nylon), poliestireno, polipropileno, poliéster ("flex"), polieterecetona (PEEK), poliuretano termoplástico (elastómero)				X			
Aleaciones de aluminio				X	X	X	X
Aleaciones Co-Cr, aleaciones de níquel				X	X		X
Oro, plata				X			
Acero inoxidable, Ti-6Al-4V				X	X	X	X
Acero para herramientas				X	X		X

Tabla 2.3: Materiales actuales comerciales para fabricación aditiva por categoría de proceso (Basada en Bourell *et al.*, 2017).

2.3.4. Rugosidad

Las piezas producidas mediante fabricación aditiva presentan limitaciones en el acabado superficial, ya que tienen una rugosidad superficial elevada después del proceso de fabricación. Estas limitaciones están relacionadas con los aspectos térmicos y mecánicos, ya que el material se enfría rápidamente llevando a distorsiones y tensiones, ocasionando problemas en las áreas de la pieza cargadas cíclicamente o muy tensionadas (Bagehorn *et al.*, 2017) (Boschetto y Bottini, 2015).

Por otro lado, la calidad superficial, también depende de la orientación de la pieza, grosor de capa y la orientación de la deposición del material (Boschetto y Bottini, 2015). Para obtener mejores resultados, varios investigadores estudiaron estos parámetros y diferentes técnicas de post-procesamiento para mejorar el acabado (Kantaros y Karalekas, 2013) (Kumbhar y Mulay, 2016).

Para obtener las superficies requeridas se optimizan los parámetros del proceso haciendo en la etapa inicial distintas combinaciones en el archivo STL, referentes a la orientación de la pieza, orientación de construcción y espesor de capa, para obtener unos buenos requisitos de salida; y para un mejor acabado, se hace uso de operaciones posteriores, como operaciones de mecanizado, abrasión y micromecanizado y mecanizado por láser (Kumbhar y Mulay, 2016).

Para poder obtener una rugosidad satisfactoria, se puede modificar la orientación de construcción de la pieza. De este modo, se podrá comparar en una previsualización distintas rugosidades que se obtendrían dependiendo de la orientación. De este modo, el modelo de la pieza será reorientado usando una optimización del algoritmo apropiado (Campbell *et al.*, 2002).

Por otro lado, el efecto escalera, producido por la adicción de capas característica de estos procesos, no se puede controlar con dicha optimización de parámetros y se tiene que minimizar con operaciones de post-procesamiento. Este es un problema común en los diferentes procesos, lo que implica que la altura de capa afecta significativamente a la rugosidad superficial. Reduciendo la altura de capa se puede minimizar dicho efecto y obtener una mejor rugosidad, sin embargo esto implica un incremento en el tiempo de fabricación (Figura 2.5). Este incremento en el tiempo no siempre es rentable, por lo que se recurre a tratamientos de post-procesamiento superficial (Campbell *et al.*, 2002) (Kumbhar y Mulay, 2016).

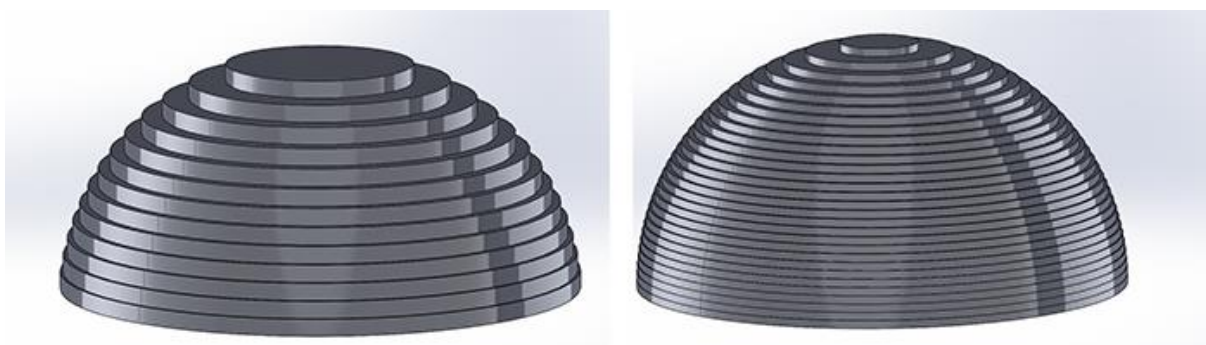


Figura 2.5: Efecto escalera

El efecto escalera afecta notablemente a la calidad superficial, sobre todo en las piezas fabricadas por modelado de deposición fundida (FDM) ya que el grosor más utilizado de filamento es de 0,254 mm y sólo para algunos materiales de 0,127 mm; valores altos en comparación de otras tecnologías como estereolitografía (0,05 mm), sinterización selectiva por láser (0,02 mm), impresión 3D (0,05 mm) o procesos de inyección (0,016 mm), como podemos ver en la Tabla 2.4 (Boschetto y Bottini, 2015).

Nombre del proceso	Altura de capa mínima (mm)	Rugosidad superficial media (R_a) (μm)
Inyección de polietileno	0,1	3-30
SLA	0,1	2-40
LOM	0,114	6-27
SLS	0,125	5-35
Impresión 3D	0,175	12-27
FDM	0,254	9-40

Tabla 2.4: Rugosidad superficial media de las técnicas de fabricación aditiva (Kumbhar y Mulay, 2016).

Las piezas construidas mediante fusión de lecho de polvo tienen una gran rugosidad causada por partículas de polvo que se pegan en el contorno de la superficie fundida durante el proceso. Estas morfologías de superficie heterogéneas causan grietas, muescas y afectan negativamente a la resistencia a fatiga (Bagehorn *et al.*, 2017). El análisis del efecto de la potencia del haz, la velocidad del haz y el ángulo de proyección sirve para comparar los parámetros que afectan a la rugosidad y a las características de la superficie (Fox *et al.*, 2016).

2.3.5. Procedimiento a seguir

Todas las piezas fabricadas con los procesos de impresión 3D actuales, tienen varios pasos en común en el procedimiento de fabricación. En primer lugar se crea un modelo CAD sólido o de superficie de la pieza y se convierte en un formato de archivo que el software de la máquina pueda leer. Este formato suele ser STL, aunque la ISO 10303 promueve el Estándar para el Intercambio de Productos (del inglés *Standard for the Exchange of Product*, STEP), esto transforma una superficie compleja de CAD en una superficie aproximada con triángulos, para poder dividirlos con mayor facilidad en dos cortes bidimensionales que luego se reproducen físicamente con el proceso de fabricación aditiva (Boschetto *et al.*, 2016). A continuación, se secciona la pieza electrónicamente en capas con un espesor determinado y se genera la trayectoria de la herramienta. La información de cada sección en capas se transmite a la máquina de forma electrónica, procesando así capa por capa hasta que la pieza es completada (Noorani, 2018) (Rietzel *et al.*, 2017). Los pasos seguidos para la fabricación de una pieza en impresión 3D incluyen los mostrados en la Figura 2.6 (Noorani, 2018).

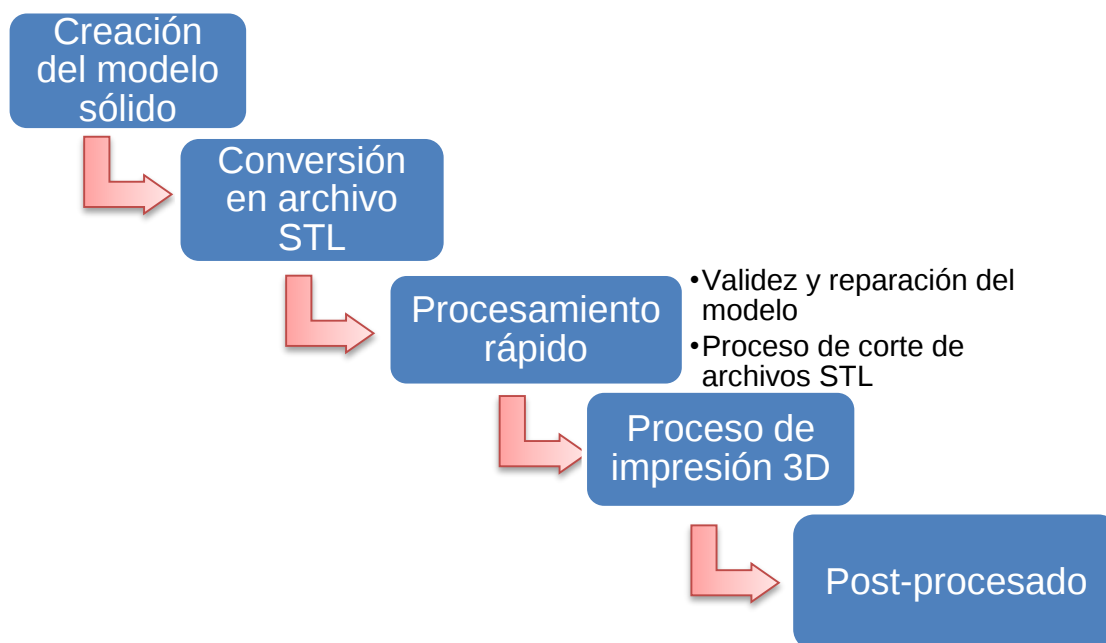


Figura 2.6: Cinco pasos del proceso de impresión 3D (basado en Noorani, 2018).

2.4. Mecanizado

2.4.1. Reseña histórica

Debido a la introducción del vapor y de la electricidad como fuentes de energía y el desarrollo metalúrgico de los aceros aleados, empezaron a surgir nuevas máquinas-herramienta en la industria en los siglos XVIII y XIX. Una de las contribuciones más importantes a esta industria vino por John Wilkinson en 1774. Wilkinson construyó una máquina de precisión para perforar los cilindros de un motor, superando un problema de tolerancias superficiales requeridas para la máquina de vapor. En 1794, Henry Maudsley desarrolló un torno paralelo con portaherramientas deslizante, añadiéndose años más tarde el husillo y el cambio de velocidades. En el siglo XIX se crearon distintas máquinas de fresado, por ejemplo, alrededor de 1818 por parte de Eli Whitney introduciendo años más tarde, en 1862 aproximadamente, una fresadora para ranuras, cola de milano, ranuras en T y superficies planas. En 1862, se construyó una fresadora universal por Joseph R. Brown. Desde finales del siglo XIX y durante el siglo XX, las máquinas-herramienta experimentaron un gran desarrollo, empleando fundamentalmente electricidad en lugar de vapor (El-Hofy, 2005) (Kohser *et al.*, 1988).

En el mecanizado por métodos convencionales, el operador juega un papel importante, ya que determina la estrategia a seguir, configura la máquina, selecciona herramientas, velocidades y avances, y manipula la máquina para realizar el arranque de material. Por dichas circunstancias, la precisión y las calidades superficiales obtenidas no eran satisfactorias. Con la introducción de técnicas de copiado y mecanismos automáticos se consiguió elevar la precisión de los productos. A comienzos de la década de 1950 se introdujo la tecnología de control numérico (CN) por el Instituto Tecnológico de Massachusetts, mejorando la precisión del producto y la uniformidad. En 1958 ya se comercializaban estos centros de mecanizado, capaces de ejecutar varios procesos. Una década después, estas máquinas se convirtieron en máquinas-herramienta de control numérico por ordenador (del inglés *Computer Numerical Control*, CNC) (El-Hofy, 2005) (Kohser *et al.*, 1988).

2.4.2. Categorías de procesos

El mecanizado consiste en producir componentes con una geometría determinada y características de superficie mediante arranque de material, de forma rápida y económica. Es un proceso de fabricación convencional en el que el ingeniero o ingeniera tiene que aplicar teorías de corte y su propia experiencia para buscar unas condiciones óptimas (Yamane *et al.*, 2017).

Entre los principales procesos de mecanizado convencional se destacan los siguientes (Tschätsch, 2009) (ASM, 1989):

- Torneado: se define como una tecnología de corte en la cual el movimiento de corte es llevado a cabo por la pieza, mientras que la herramienta realiza el movimiento de avance y penetración, generando superficies de revolución.
- Taladrado: es un procedimiento de corte diseñado para generar agujeros con una herramienta de corte. El taladrado es generalmente el método más económico y eficiente de perforación.
- Fresado: es un proceso de mecanizado en el que se elimina material mediante una herramienta de varios filos. Durante el fresado, la herramienta realiza el movimiento de corte, mientras que, generalmente, la pieza de trabajo ejecuta el movimiento de avance y penetración.
- Rectificado: es un proceso de corte en el que una herramienta compuesta por partículas abrasivas elimina material de la pieza de trabajo. Las técnicas de rectificado se clasifican según la forma de la pieza de trabajo en rectificado frontal o cilíndrico, o según el montaje, como rectificado entre centros o sin centro.

2.4.3. Materiales

En aplicaciones de ingeniería es habitual el uso de diversos materiales, usualmente aleaciones. Estas aplicaciones dependerán fundamentalmente de las propiedades de los materiales y de las necesidades específicas de determinados sectores industriales: ligereza, resistencia al desgaste, etc. En la Tabla 2.5 se muestran algunas aplicaciones de diversos materiales en varias aplicaciones industriales (Childs *et al.*, 2000).

Aleación	Ingeniería general	Automotor	Aeroespacial	Proceso de ingeniería	Información tecnológica
Aceros al carbono y aleaciones	Fijadores de estructuras, tren de fuerza, sistema hidráulico	Tren de fuerza, suspensión, fijadores hidráulicos	Tren de fuerza, control y tren de aterrizaje	Estructuras	Eje de impresora y mecanismos
Aceros inoxidables	Para la resistencia a la corrosión		Cuchillas de turbina	Para la resistencia a la corrosión	
Aluminio	Estructuras	Bloque del motor y pistones	Fuselaje, revestimiento	Para la resistencia a la corrosión	Espejos de escáneres, sustratos de disco
Cobre				Para la resistencia a la corrosión	
Níquel			Cuchillas y discos de turbina	Intercambiadores de calor y resistencia a la corrosión	
Titanio			Compresor/estructuras	Resistencia a la corrosión	

Tabla 2.5: Actividades de mecanizado por aleación de material y sector industrial (Childs *et al.*, 2000).

Generalmente, estos materiales son sometidos a procesos de mecanizado durante su procesado. Por ello, resulta de interés definir criterios que permitan evaluar la idoneidad de un material a ser mecanizado como la maquinabilidad. La maquinabilidad de los metales interviene en el coste y en la producción de componentes. Esto influye en distintos aspectos, como la energía consumida, la forma de la viruta, la superficie final y la vida de la herramienta. Característica como un bajo consumo de energía, un tamaño de viruta corta, un acabado suave y una larga vida de la herramienta definen una buena maquinabilidad (Childs *et al.*, 2000). Por ejemplo, el hierro fundido y el aluminio se mecanizan fácilmente. Otros metales, como el acero inoxidable o el titanio, son difíciles de mecanizar ya que se requieren altas fuerzas de corte o se obtienen malos acabados superficiales, aunque cumplen otros criterios de diseño de funcionalidad. Un acero con bajo contenido de carbono puede mostrar más problemas en el mecanizado con respecto a algunos aceros aleados (ASM, 1989) (Ilio y Paoletti, 2012).

A la aptitud del material para ser mecanizado le afectan parámetros como el proceso de conformado de la pieza de trabajo o la herramienta que se emplea para el arranque de material. Un hierro de fundición gris ofrece menor dificultad en el mecanizado que el mismo material vertido en un troquel. Por lo tanto, debido a diferentes métodos y condiciones de operación, así como características de la herramienta, el concepto de maquinabilidad no es fácilmente medible y comparable (Ilio y Paoletti, 2012).

La tasa de eliminación de material está determinada por la dureza del material además de la forma. AISI (del inglés *American Iron and Steel Institute*, AISI) establece una calificación de maquinabilidad para comparar la dificultad de corte de diferentes materiales, incluyendo costes y desgaste de herramienta. Una dureza Brinell de 160 tiene una clasificación AISI de 1,00; valores inferiores de 1,00 indican que el coste de mecanizado del material es superior y para valores más altos el coste es menor (Hällgren *et al.*, 2016).

2.4.4. Rugosidad

El torneado es uno de los procesos de mecanizado más habituales y la rugosidad superficial ha sido ampliamente estudiada. Por ello, resulta un proceso adecuado para comparar con la fabricación aditiva. En el torneado se definen dos rugosidades: rugosidad en la dirección de corte y rugosidad en la dirección de avance. Es más común emplear la rugosidad en la dirección de avance para evaluar la rugosidad superficial, ya que suele ser más significativa (Yamane *et al.*, 2017). Dentro de los parámetros de torneado, diversos estudios sobre el torneado llegan a la conclusión de que el avance es el factor que más afecta al resultado final de la rugosidad superficial. Se demuestra que un aumento del avance es directamente proporcional al aumento de la rugosidad (Carou *et al.*, 2014a).

Por otro lado, la influencia de otros parámetros en la rugosidad superficial también ha sido ampliamente estudiada. Por ejemplo, D'Addona *et al.*, (2017) relacionan el aumento de la velocidad de corte con una disminución de la rugosidad superficial en un rango de 60-190 m/min, aumentando la rugosidad para una velocidad en el rango de 190-255 m/min ya la herramienta se daña inmediatamente durante el giro por la alta velocidad.

Existen diversos estudios sobre condiciones óptimas de lubricación/refrigeración para obtener una buena calidad superficial. Por ejemplo, Butola *et al.*, (2017) han realizado estudios comparativos entre la rugosidad superficial obtenida en un torneado en seco y húmedo, obteniendo peores resultados con un torneado seco.

Por otro lado, también se destacan numerosos estudios con diversos enfoques estadísticos. Por ejemplo, Diamoutene *et al.*, (2018) emplean un enfoque basado en estadística de orden para estudiar la fiabilidad y la rugosidad en lotes de 5 piezas de 10 partes mecanizadas, obteniendo como mínimo de rugosidad superficial 1,79 μm y un límite superior de rugosidad de 4 μm . Se considera una pieza defectuosa cuando se supera el límite superior de rugosidad.

Con la demanda de piezas con superficies complejas y un mayor rendimiento en su fabricación, viene el desarrollo de la tecnología, convirtiéndose la técnica de mecanizado por CNC una herramienta muy usada al mismo tiempo que con

dificultades para obtener las especificaciones técnicas requeridas. La necesidad de generar formas complejas con una alta precisión es habitual en distintos sectores industriales avanzados, de alta tecnología. Por ejemplo, Jia *et al.*, (2018), refiriéndose al sector de ingeniería aeroespacial, hacen una revisión de los métodos de reducción de error en el torneado en máquinas de tres y cinco ejes, explicando la importancia de la reducción de estos errores en componentes como palas de turbinas, motores de cohetes y otros componentes, cuyo fallo o defecto serían críticos.

Yamane *et al.*, (2017) clasifican los factores que intervienen en la rugosidad del torneado según la dirección de avance y proponen un método de cálculo para cuantificar la desviación entre la forma de la herramienta y la curva real de rugosidad, llegando a la conclusión de ser posible evaluar cuantitativamente la inestabilidad del corte.

2.4.5. Procedimiento a seguir

La planificación y control del proceso del mecanizado es crucial, comprendiendo distintos temas a tratar, como la selección de herramientas y condiciones de corte (Childs *et al.*, 2000).

El principal objetivo del mecanizado es transformar una pieza de trabajo logrando las especificaciones funcionales y geométricas requeridas. Este proceso comienza desde el material base, que puede ser de materias primas y formas diferentes, o puede ser un producto semiacabado; pasando por los siguientes pasos de forma general (Lakić *et al.*, 2014):

- Analizar el material y geometría a mecanizar.
- Escoger herramientas de corte apropiadas para el material y la geometría.
- Elección de la máquina de mecanizado.
- Realizar un plan de ejecución.
- Mecanizar la pieza de trabajo.
- Verificar la geometría y cumplimiento de las especificaciones.

2.5. Comparación entre fabricación aditiva y mecanizado

Como ventajas de la fabricación aditiva se puede decir que tiene un rendimiento adecuado en la producción de lotes pequeños y permite obtener piezas de complejidad geométrica que antes no podían producirse con tecnologías tradicionales sin una configuración elaborada de la máquina o un ensamblaje final (Boschetto *et al.*, 2016). Aun así, todavía no se considera como un proceso del todo viable, debido a que supone un gasto de capital significativo, no se ha llegado a alcanzar un rendimiento similar al de otros procesos convencionales y se obtienen piezas con poca precisión. Este último inconveniente de precisión, conlleva normalmente a un procesamiento posterior por medio de un tratamiento térmico y ajustes de rugosidad superficial. Oropallo y Piegl (2016) presentan diez retos existentes en la impresión 3D, debido a las limitaciones que posee esta tecnología, proponiendo abordarlas para que este tipo de fabricación aditiva llegue a una etapa más madura con menos restricciones.

Uno de los grandes logros de la fabricación por adición es la optimización del proceso. GE Aviation, proveedor líder mundial de motores y componentes turbohélice comerciales y militares, y de aviación general, así como de aviónica, energía eléctrica y sistemas mecánicos para aeronaves, necesitaba fabricar una boquilla para el LEAP, uno de los motores de reacción más vendidos por CFM International, empresa formada por GE Aviation y Safran Aircraft Engines, dedicada al suministro de motores, teniendo el problema de una geometría compleja y al menos 20 piezas para ser soldadas. Gracias a la fabricación aditiva, mediante láser e impresión 3D se logró obtener dicha boquilla con unos resultados satisfactorios. Se combinaron las 20 piezas en una sola unidad, bajando el peso y siendo más duradera. En los años siguientes la compañía pasó a fabricar un motor turbohélice avanzado obteniendo también unos resultados satisfactorios. Al disminuir el peso de los componentes con este tipo de fabricación disminuye el consumo de combustible logrando una mayor potencia (General Electric, 2018).

En la Tabla 2.6 se muestran las diferencias características entre la fabricación aditiva y el mecanizado. En algunos casos, como en la creación de paredes delgadas o en la automatización del proceso, la fabricación aditiva es mejor frente al

mecanizado. Sin embargo, en otro tipo de características, la fabricación aditiva presenta inconvenientes, como el acabado superficial.

Fabricación aditiva	Mecanizado
Consolidación de piezas, conjunto completo fabricado	Muchas partes diferentes para el mismo conjunto deben fabricarse individualmente
Aun relativamente costoso	Barato debido al uso general y la disponibilidad
Materiales especiales	Materiales estándar
Normalmente no es la mejor precisión	La alta precisión es fácilmente alcanzable
En muchos casos, el acabado superficial no es óptimo	Excelente acabado superficial
Fiabilidad de maduración de las máquinas	En general, máquinas muy confiables
El tamaño de la pieza es una limitación	Sin limitaciones de tamaño de pieza
Puede crear paredes delgadas	Las paredes delgadas son difíciles de crear
Longitud ilimitada de pequeños agujeros que conforman los canales de enfriamiento	Difícil de crear pequeños agujeros y características
Las máquinas funcionan de forma autónoma	Las máquinas necesitan atención constante
Parte más compleja es más ahorro de costes se logra	Las partes complejas son muy caras
Pre-procesamiento automatizado	El pre-procesamiento debe hacerse manualmente

Tabla 2.6: Diferencias entre fabricación aditiva y mecanizado (Noorani, 2018).

También, para satisfacer los de acabado superficial, se ha llegado a la creación de máquinas-herramienta híbridas multitarea que permiten construir con polvos metálicos, componentes con geometrías cercanas a las requeridas para luego pasar por operaciones de mecanizado, obteniendo así la forma final de la pieza con un

acabado de alta precisión. Estas máquinas híbridas se adecuan en la producción de aleaciones aeroespaciales, materiales de alta dureza, herramientas de producción y componentes de alta precisión, como dispositivos médicos (Yamazaki, 2016).

2.5.1. Rugosidades en metales

La gama de metales usados en fabricación aditiva se expande continuamente con las entradas en el mercado de materiales nuevos (Bourell *et al.*, 2017). Una de las aleaciones más comercializadas es el Ti6Al4V, usada en la industria aeroespacial, cuyas pautas estándar sobre acabado superficial son R_a entre 0,8 y 1,6 μm o incluso más bajo para, por ejemplo, piezas rectificadas (ANSI/ASME B46.1-2009).

Fatemi *et al.*, (2017) estudiaron las rugosidades superficiales obtenidas mediante fusión en lecho de polvo por láser comparándolas con la rugosidad después de un lijado y un mecanizado y pulido. Se obtuvieron valores de rugosidad media de 15,45 μm para el proceso de fabricación aditiva, 11,91 μm aplicándole un lijado y 0,12 μm después de un mecanizado y pulido.

Bagehorn *et al.*, (2017) hicieron piezas a partir de polvo de Ti6Al4V con sinterización directa de metal con láser (del inglés *Direct Metal Laser Sintering*, DMLS) y un post-procesado mediante fresado para estudiar la rugosidad superficial. En la fabricación aditiva por DMLS se obtuvieron valores de rugosidad de $17,9 \pm 2,0 \mu\text{m}$ (R_a). En el proceso de acabado por fresado se obtuvo una reducción de la rugosidad superficial del 95%, llegando a valores de $0,3 \pm 2,0 \mu\text{m}$ (R_a).

Sartori *et al.*, (2017) hacen una evaluación del rendimiento de un nuevo método de enfriamiento en el mecanizado, que utiliza nitrógeno gaseoso enfriado por nitrógeno líquido en un rango de temperaturas de 0-150 °C, y comparan con el uso de nitrógeno líquido y una emulsión de agua con un 5% de fluido de corte. El método se aplicó en un semi-acabado de torneado de una aleación de Ti6Al4V, obteniendo valores de rugosidad comprendidos entre 1,044 y 1,327 μm (R_a).

Bruschi *et al.*, (2016) analizan la influencia de varios parámetros de mecanizado en la rugosidad en piezas de Ti6Al4V forjado y realizadas mediante fabricación aditiva con dicha aleación. Los cilindros obtenidos por fusión con haz de electrones (fabricación aditiva) y de Ti6Al4V forjado se sometieron a un proceso de semi-acabado por torneado bajo un corte seco y con condiciones criogénicas de enfriamiento. Los valores de rugosidad media obtenidos con las condiciones criogénicas fueron mejores que los valores obtenidos en el torneado seco. Así, con dichas condiciones, se alcanzaron valores de rugosidad en los cilindros realizados por fusión con haz de electrones de $0,89 \pm 0,05 \mu\text{m}$ a $2,32 \pm 0,04 \mu\text{m}$, mientras que los cilindros de Ti6Al4V forjado después del semi-acabado llegaron a rugosidades medias de $0,72 \pm 0,18 \mu\text{m}$ a $2,29 \pm 0,07 \mu\text{m}$.

Strano *et al.*, (2013) analizaron la rugosidad superficial (R_a) en piezas de acero AISI 316L realizadas por fusión selectiva con láser (del inglés *Selective Laser Melting*, SLM). Relacionaron el ángulo de inclinación de la pieza con la rugosidad, obteniendo un mejor acabado superficial para un ángulo de 0° . Las rugosidades están comprendidas entre 8 y $16 \mu\text{m}$.

Guo *et al.*, (2017) fabricaron piezas con polvo de acero inoxidable AISI 316L, mediante deposición directa por láser, usando dos direcciones de construcción, una de 0° y otra de 90° . Después, las piezas se sometieron a un post-procesado por fresado variando la velocidad de corte entre 60 y 150 m/min. El valor más bajo de rugosidad fue $0,2 \mu\text{m}$ para una dirección de construcción de 90° y una velocidad de corte de 150 m/min.

Maurotto *et al.*, (2017) presentaron una investigación experimental de acero inoxidable austenítico AISI 316L mediante una fresadora de 3 ejes. Los parámetros de entrada fueron: velocidad de corte (120-350 m/min), avance (0,15-0,35 mm/diente) y profundidad de corte (1,5-3 mm). La rugosidad superficial resultante, tanto de un fresado frontal como lateral, fue por debajo de 3,2 mm, límite usado en la industria nuclear.

Los anteriores ejemplos muestran claramente cómo, en el caso de la fabricación de piezas metálicas, el mecanizado es un proceso de post-procesado adecuado para mejorar la calidad superficial de las piezas generadas mediante fabricación aditiva.

2.5.2. Rugosidades en plásticos

Los materiales poliméricos son los materiales más empleados en la fabricación aditiva. Las calidades que se obtienen son deficientes, en ocasiones teniendo que someterse a un post-procesado, por ejemplo, por mecanizado.

Adel *et al.*, (2018) hicieron muestras de PLA4043D con tecnología FDM. Se sometieron a un post-procesamiento de chorro de aire caliente para derretir de forma local la superficie y mejorar el efecto escalera. Obtuvieron una reducción significativa del 88% de R_a .

Boschetto *et al.*, (2016) fabricaron piezas mediante FDM de ABS-P400 con parámetros de impresión de: 0,254 mm de altura de capa, un relleno sólido, un método de generación de ruptura del soporte y distintos ángulos de deposición, entre 0 y 90°. Después se sometieron a un mecanizado, concretamente, un fresado CNC de 3 ejes, con el fin de comparar las rugosidades obtenidas antes y después del mismo. Para ángulos de deposición de 60° y 9°, obtuvieron valores de rugosidad superficial de 17 y 50 μm , respectivamente, mejorándose, con un fresado con una profundidad de corte de 0,1 mm, a 2,5 y 20 μm , respectivamente.

Izamshah *et al.*, (2013) estudiaron el fresado en láminas de PEEK no reforzado. Las condiciones de corte que emplearon fueron: velocidad de rotación de 4000 a 8000 rpm, profundidad de corte de 4 a 8 mm y una velocidad de avance de 0,2 a 0,3 mm/diente. Como resultados tuvieron valores de rugosidad entre 0,69 y 3,5 μm siendo la velocidad de avance el factor más influyente.

Petropoulos *et al.*, (2008) analizaron las rugosidades superficiales de un torneado de PEEK. Las condiciones de corte fueron velocidades de corte de 50 a 200

m/min y avances de 0,05 a 0,2 mm/rev, resultando ser esta última la más influyente sobre las rugosidades superficiales obtenidas de 0,5 a 4 μm .

Huang *et al.*, (2017) imprimieron lentes ópticos de VeroClear 810 mediante el sistema Polyjet para someterlos a un posterior mecanizado mediante torneado con diamante. Se usaron tres configuraciones de impresión (horizontal, vertical y oblicua) y tres espesores (10, 15 y 20 mm), obteniendo valores de rugosidad superficial entre 0,14 y 1,07 μm . Después del torneado con diamante el acabado superficial mejoró notablemente, alcanzando valores de rugosidad entre 0,14 y 0,32 μm .

Igual que sucedía con la fabricación de piezas metálicas, el mecanizado muestra su idoneidad como método para mejorar la calidad superficial en determinados ejemplos de producción de piezas de tipo plástico.

3. METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En este capítulo se define la metodología que se desarrolla para la realización del ensayo experimental. Se emplearán diseños experimentales que permitirán el posterior análisis estadístico, dando resultados válidos y conclusiones objetivas. Previamente, es necesario tener una idea clara de todos los parámetros involucrados en el estudio, de cómo se deben recopilar los datos y entender cómo deben ser analizados dichos datos. Para ello se puede seguir el siguiente procedimiento, siendo los tres primeros puntos la planificación pre-experimental (Montgomery, 2001):

- i. Planificación pre-experimental
 - Reconocimiento y declaración del problema.
 - Selección de la variable de respuesta.
 - Selección de factores, niveles y rangos.
- ii. Elección del diseño experimental.
- iii. Realización del experimento.
- iv. Análisis estadístico.
- v. Conclusiones.

3.2. Planificación pre-experimental

3.2.1. Reconocimiento y declaración del problema

La rugosidad superficial que se obtiene en la fabricación aditiva presenta todavía muchas limitaciones frente a la obtenida mediante mecanizado. Con los experimentos a realizar se pretende estudiar la influencia de los diferentes factores que afectan al acabado superficial en la fabricación aditiva. Además, se realizarán probetas con distintos materiales mediante fabricación aditiva, para someterlas a un post-procesado por mecanizado, pudiendo comprar las rugosidades superficiales obtenidas en ambos casos.

3.2.2. Selección de la variable de respuesta

La variable de respuesta debe aportar información relevante sobre el estudio, por lo que se escoge la rugosidad superficial, característica fundamental y comúnmente empleada para la comparación entre las calidades obtenidas con distintos procesos de fabricación. Concretamente, se considera la rugosidad media (R_a), que se define como la desviación media aritmética de los valores de las ordenadas en Z a lo largo de una longitud de muestreo, definida en el apartado 2.2.1.

A parte del proceso de fabricación empleado, hay otras características mecánicas y tribológicas que afectan a la rugosidad superficial de una pieza, como por ejemplo la fricción, desgaste de la herramienta, resistencia a fatiga, transmisión de calor o resistencia a la corrosión (Benardos y Vosniakos, 2003) (Villeta *et al.*, 2012).

Desde otro punto de vista, el coste y el tiempo total del proceso son críticos para la industria, pudiendo verse afectados cuando los requerimientos de acabado superficial son exigentes, ya que para conseguir una baja rugosidad aumentarán los gastos de herramienta y tiempo, y los parámetros a emplear en el proceso serán más restrictivos, bajando, por consiguiente, el rendimiento de la producción (Yamazaki, 2016) (Benardos y Vosniakos, 2003).

Para entender la variable de respuesta elegida se tiene que diferenciar entre acabado superficial y textura de la superficie. La primera se refiere solo a las irregularidades geométricas de superficies de materiales sólidos y a las características de los instrumentos de medición de rugosidad, mientras que la textura de la superficie se define en términos de ondulación, defectos y rugosidad (ASM, 1989).

3.2.3. Selección de los factores, niveles y rangos

En este apartado se seleccionan los factores, así como sus niveles y rangos, que podrían llegar a influir en la rugosidad superficial. Para ello, se realizará una selección de los más adecuados para el estudio de la rugosidad.

Hay gran variedad de estudios sobre factores que pueden afectar al proceso de mecanizado, concretamente, sobre la rugosidad se pueden nombrar los siguientes factores (Benardos y Vosniakos, 2003):

- Herramienta de corte: material, geometría, radio de punta y forma.
- Material de la pieza de trabajo: tamaño, diámetro y dureza.
- Parámetros de mecanizado: proceso cinemático, profundidad de corte, fluido de refrigeración/lubricación, ángulo de la herramienta, avance y velocidad de corte.
- Fenómenos del proceso de corte: variaciones de la fuerza de corte, fricción en la zona de corte, vibraciones, aceleración y formación de viruta.

Por otro lado, en fabricación aditiva también existe un número elevado de factores que pueden influir en la rugosidad superficial. A continuación, se enumeran los principales (Bikas *et al.*, 2016) (Bourell *et al.*, 2017) (Hällgren *et al.*, 2016) (Umaras *et al.*, 2017):

- Material de extrusión: temperatura de fundición, viscosidad, densidad, tipo de material, propiedades mecánicas y fuerza de extrusión.
- Cámara: temperatura, presión, vibraciones, posición de la plataforma, posición del extrusor, sistema de coordenadas y evacuación del calor.
- Extrusor: velocidad, ángulo de inclinación, diámetro de extrusión, vibración y aceleración.
- Características de deposición: dirección de construcción, grosor de la pared, altura de capa, orientación, geometría lateral y velocidad.

Debido al número elevado de factores se hace una selección para poder hacer un estudio acotado, más práctico y económico. El estudio incorpora dos tipos distintos de experimentos: experimento 1 y experimento 2.

El experimento 1 tiene como objetivo analizar la influencia de los factores considerados como influyentes en la rugosidad superficial obtenida por impresión 3D, escogiendo los siguientes: altura de capa, grosor de la pared, velocidad de impresión

y temperatura de impresión; a los que se les asignan dos niveles, como se puede ver en la Tabla 3.1.

Factor	Nivel	Nomenclatura
Altura de capa (h)	2	$h1, h2$
Grosor de la pared (g)	2	$g1, g2$
Velocidad de impresión (v)	2	$v1, v2$
Temperatura de impresión (t)	2	$t1, t2$

Tabla 3.1: Factores, niveles y nomenclatura para el experimento 1.

Para el experimento 2 se fijaron unos valores para los factores anteriores, escogiendo dichos valores basados en uno de los ensayos con los que se obtiene una combinación de buena calidad superficial y tiempo de fabricación adecuado. Los factores seleccionados son el grosor de la pared y el tipo de relleno con cinco y tres niveles, respectivamente.

Factor	Nivel	Nomenclatura
Altura de capa (h)	1	$h1$
Grosor de la pared (g)	5	$g1, g2, g3, g4, g5$
Velocidad de impresión (v)	1	$v2$
Temperatura de impresión (t)	1	$t2$
Tipo de relleno (r)	3	$r1, r2, r3$

Tabla 3.2: Factores, niveles y nomenclatura para el experimento 2.

Por último, para realizar los ensayos de post-procesamiento de impresión 3D mediante mecanizado, en concreto, torneado; se escogen como factores los siguientes: avance, velocidad de giro del husillo, profundidad de corte y sistema de

refrigeración. Todos los factores tienen un nivel menos el sistema de refrigeración que posee tres, como se muestra en la Tabla 3.3.

Factor	Nivel	Nomenclatura
Avance (f)	1	$f1$
Velocidad de giro del husillo (n)	1	$n1$
Profundidad de corte (d)	1	$d1$
Sistema de refrigeración (s)	3	$s1, s2, s3$

Tabla 3.3: Factores, niveles y nomenclatura para los ensayos en torneado.

3.3. Elección del diseño experimental

La elección del diseño experimental tiene que ajustarse a los objetivos preestablecidos a partir de la información descrita en los anteriores apartados, con el fin de obtener resultados concluyentes.

El objetivo principal es el estudio de la influencia de distintos factores de impresión 3D sobre la rugosidad superficial (R_a). Para ello, en el experimento 1, se realizarán ensayos con distintas combinaciones de los niveles de los factores que están siendo investigados. Se realizará un segundo experimento, experimento 2, para profundizar en la influencia de los distintos parámetros que afectan a la calidad de la superficie en la impresión 3D.

Para el análisis del experimento 1 se ha seleccionado un diseño factorial fraccionado, por lo que se consideran la mitad de todas las combinaciones posibles de los factores. Para ello se representan los dos niveles de cada factor con “+” ó “-”, haciendo la Tabla 3.4 con todas las combinaciones. Al realizar la multiplicación de los factores para cada ensayo, resultarán la mitad positivos y la otra mitad negativos, escogiendo únicamente los ensayos positivos, ocho ensayos como se muestra en la Fórmula 3.1 (Montgomery, 2001).

$$N^{\circ} \text{ total de combinaciones} = 2^4 = 16 \text{ ensayos}$$

→ 8 ensayos seleccionados

(Fórmula 3.1)

Ensayo	Altura de capa (h)	Grosor de la pared (g)	Velocidad de impresión (v)	Temperatura de impresión (t)	$h*g*v*t$
e_1	+	+	+	+	+
e_2	+	+	+	-	-
e_3	+	+	-	+	-
e_4	+	+	-	-	+
e_5	+	-	+	+	-
e_6	+	-	+	-	+
e_7	+	-	-	+	+
e_8	+	-	-	-	-
e_9	-	+	+	+	-
e_10	-	+	+	-	+
e_11	-	+	-	+	+
e_12	-	+	-	-	-
e_13	-	-	+	+	+
e_14	-	-	+	-	-
e_15	-	-	-	+	-
e_16	-	-	-	-	+

Tabla 3.4: Combinaciones para el diseño factorial fraccionado para el experimento 1.

Para el estudio del experimento 2 se ha escogido un diseño factorial completo en el que se contemplan todas las combinaciones posibles entre los niveles de los factores de relleno y grosor de la pared; por lo que se tienen 15 ensayos.

Para cada probeta de ensayo se tomarán un total de seis medidas de R_a . Para hacer estas mediciones en primer lugar se dividirá la probeta en una parte inferior, referida al comienzo de impresión; y una parte superior, referida al final de la impresión. Por otro lado se realizarán tres generatrices, evitando la originada por el efecto cremallera (línea originada por el exceso de material al cambiar de capa), debido a la posibilidad de tomar medidas no concluyentes por dicho defecto. Una vez hechas las generatrices se tomarán tres medidas de rugosidad en sentido horario en la parte superior de la probeta (R_{a1} , R_{a2} y R_{a3}), y en sentido anti horario en la parte inferior (R_{a4} , R_{a5} y R_{a6}), como se muestra en la Figura 3.1. Con estas seis medidas se hace la media para obtener el valor promedio de R_a para cada pieza.

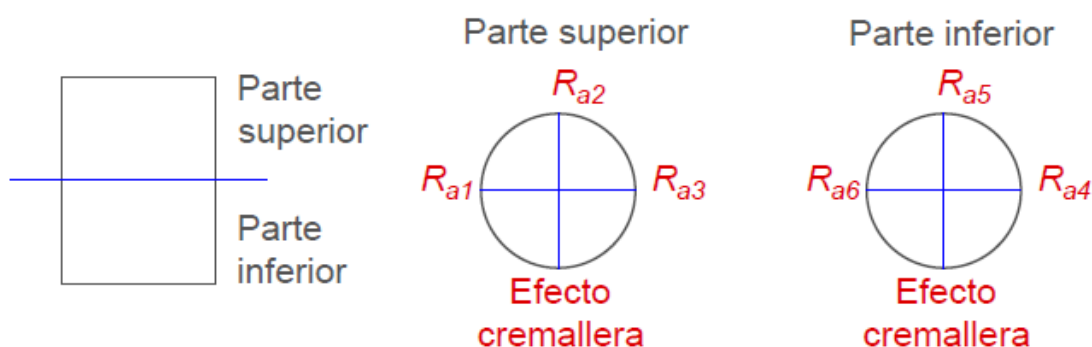


Figura 3.1: División de las probetas para la toma de medidas.

De este modo, se tendrá un total de 48 medidas de rugosidad para el experimento 1; y 90 medidas para el experimento 2. Se hace con un orden aleatorio de ensayos para garantizar la hipótesis de que las observaciones o errores sean variables aleatorias distribuidas de forma independiente, evitando sesgos en los resultados (Montgomery, 2001).

Ensayo	h	v	t	g	Medición	
					Parte superior	Parte inferior
e_1	2	1	2	1	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
e_2	1	2	2	1	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
e_3	1	1	2	2	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
e_4	2	1	1	2	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
e_5	1	1	1	1	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
e_6	2	2	2	2	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
e_7	1	2	1	2	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
e_8	2	2	1	1	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}

Tabla 3.5: Plan del experimento 1.

Ensayo	r	g	Medición	
			Parte superior	Parte inferior
f_1	1	1	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_2	2	2	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_3	1	5	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_4	3	2	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_5	3	3	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_6	1	3	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_7	2	1	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_8	3	5	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_9	1	2	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_10	3	4	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_11	2	3	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_12	2	5	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_13	3	1	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_14	1	4	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}
f_15	2	4	R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	R_{a4}, R_{a5}, R_{a6}

Tabla 3.6: Plan del experimento 2.

Para los ensayos realizados con mecanizado, se imprimirán tres probetas con distintos materiales. Cada probeta se someterá a tres torneados, combinando los distintos niveles de los factores elegidos en el apartado 3.2.2. De este modo, cada probeta constará de tres tramos torneados, teniendo un total de nueve tramos mecanizados. Se medirán tres rugosidades superficiales en cada probeta antes del mecanizado y, una vez realizado, se tomarán tres medidas en cada cada tramo, basándose en el método de medición definido anteriormente.

3.4. Realización del experimento

Cuando se ejecuta un experimento, es de vital importancia planear el proceso cuidadosamente para asegurarse de que todo se esté siguiendo de acuerdo al plan.

Para la realización de los dos experimentos y ensayos de mecanizado se han seguido los pasos descritos en los apartados siguientes.

3.4.1. Actividades previas a los ensayos

3.4.1.1. Impresión 3D

Antes de imprimir las probetas se tiene que generar un modelo de CAD en un software comercial, en este caso SolidWorks. Una vez realizado el modelo, se convierte en un formato STL; pudiéndose abrir con el software Ultimaker CURA 3.2.1. para ajustar medidas, escalar, posicionar la pieza de forma óptima para la impresión y variar los distintos parámetros. Es necesario comprobar en el software Ultimaker CURA 3.2.1 que los parámetros escogidos para los ensayos no se salen de los rangos del programa, asegurándose el correcto funcionamiento y la impresión.

Con respecto a la impresora, se nivela la plataforma del área de impresión y se limpia la boquilla y el sistema de extrusión cargando un material específico para la limpieza de los mismos, Smart Clean, con el fin de eliminar materiales residuales que hayan podido quedar en el interior del extrusor. Por último se carga el material de impresión, para ambos experimentos, PLA (del inglés *polylactic acid*, PLA).

En cuanto al equipo de medida se procederá a la comprobación del funcionamiento del rugosímetro y su calibrado.

3.4.1.2. Torneado

En primer lugar se ha de obtener la pieza de ensayo mediante impresión 3D. Para ello, en el caso de las probetas de Nylon y PLA, se sigue el mismo procedimiento indicado en los apartados 3.4.1 y 3.4.2, debido a que se usa la misma impresora. Para la impresión de la probeta de ABS, se ha empleado una AirWolf 3D HD, debido a que el material necesita una cama caliente.

Con respecto al torneado, se ha de comprobar previamente el funcionamiento del torno según los parámetros que se han seleccionado. También es necesario asegurarse de que los sistemas de refrigeración por chorro de aire y por taladrina funcionan correctamente y que se dispone de una herramienta de corte adecuada y en buen estado.

3.4.2. Realización de ensayos

3.4.2.1. Impresión 3D

Para la realización de los distintos ensayos, tanto para los del experimento 1 como para los del experimento 2, se hace una impresión 3D variando los parámetros según el plan del experimento, como se ha indicado en las Tablas 3.5 y 3.6.

El procedimiento llevado a cabo para la ejecución de los ensayos es el siguiente:

- i. Abrir el archivo STL en Ultimaker CURA y fijar los parámetros correspondientes al ensayo.
- ii. Guardar el archivo como .gcode en una tarjeta e introducirla en la impresora.
- iii. Realizar el auto home a la impresora para posicionar los ejes de la impresora en el cero.

- iv. Añadir espray fijador a la plataforma de impresión para una mayor adhesión de la pieza.
- v. Seleccionar el archivo para su impresión.
- vi. Retirar la probeta imprimida.

3.4.2.2. Torneado

Para llevar a cabo los ensayos de torneado de las tres probetas obtenidas por FDM, previamente se tiene que quitar la falda de la pieza, es decir, la capa perimétrica de apoyo que evita el efecto *warping*.

El procedimiento para la realización es el siguiente:

- i. Posicionar y fijar la probeta a mecanizar en el plato de garras.
- ii. Colocar en el portaherramientas la herramienta requerida.
- iii. Seleccionar los parámetros de mecanizado del ensayo: velocidad de giro del husillo, avance, profundidad de corte y sistema de refrigeración.
- iv. Realizar el cilindrado en un tramo de la probeta.
- v. Fotografiar con la cámara de imagen térmica.
- vi. Alejar la herramienta de la probeta mecanizada.
- vii. Cambiar el sistema de refrigeración.
- viii. Repetir los pasos del iv al vii para los dos siguientes tramos.
- ix. Retirar la herramienta y la probeta mecanizada.

3.4.3. Medición de la rugosidad superficial

Tras imprimir las probetas, y mecanizar los correspondientes tramos, se procede a la medición de la rugosidad, parámetro R_a , empleando el rugosímetro. Antes de proceder a la toma de medidas se tiene que quitar la falda de la pieza.

Para la medición de las probetas de los experimentos 1 y 2, se tomarán las distintas partes indicadas en el punto 3.3 e indicadas en la Figura 3.1, marcando las tres generatrices de medición y la debida al efecto cremallera.

Los pasos a seguir para la toma de medidas es la siguiente:

- i. Colocar la probeta encima del apoyo.
- ii. Ajustar la posición de la probeta para fijar la generatriz de medida correspondiente.
- iii. Aproximar y posicionar el palpador del rugosímetro a la zona de medida.
- iv. Realizar la toma de medidas de la rugosidad superficial media (R_a), en las zonas correspondientes.
- v. Guardar los datos tomados.
- vi. Retirar el rugosímetro.
- vii. Retirar la probeta.

Para las probetas mecanizadas se tomarán tres medidas de rugosidad en cada tramo torneado, siguiendo las mismas instrucciones anteriores sobre el marcado de generatrices y la toma de medidas. Además se medirán tres rugosidades superficiales en cada probeta antes del mecanizado.

3.5. Análisis estadístico

En esta etapa del proceso se realizará un análisis estadístico de los datos de la variable respuesta obtenidos, con el fin de cuantificar las relaciones y asociaciones de los parámetros estudiados, pudiendo sacar conclusiones objetivas del experimento. El análisis del estudio experimental permitirá evaluar los diferentes parámetros estudiados y su influencia sobre la rugosidad superficial.

Para ambos experimentos se hace un Análisis de Varianza (ANOVA) según los siguientes pasos:

- Cálculo de la suma de cuadrados de cada una de las fuentes de variación.

- Cálculo de la suma de cuadrados del error y de la suma de cuadrados total.
- Identificación de los grados de libertad de las fuentes de variación.
- Cálculo de los cuadrados medios de las fuentes de variación y del error.
- Evaluación del estimador F para las fuentes de variación, a partir de los cuadrados medios de las fuentes de variación y error.

Para hacer dicha evaluación se empleará el software R de análisis estadístico de datos y Microsoft Excel. Con estos programas se podrán sacar conclusiones de los datos de ensayo y hacer una representación gráfica de ellos.

3.6. Conclusiones

En esta última fase se establecen las conclusiones obtenidas a partir de los resultados del análisis estadístico. Las conclusiones sirven para mejorar y aportar conocimiento sobre el experimento, pudiendo definir con mayor profundidad la influencia de los factores en la variable de respuesta y establecer recomendaciones prácticas en la ejecución. Por último, las conclusiones dan lugar a ideas o propuestas a posibles trabajos y estudios futuros.

4. APLICACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Introducción

En este apartado se presenta la aplicación de la metodología desarrollada en el apartado 3. Se muestran tanto los experimentos y procedimientos realizados, como los resultados obtenidos y su análisis estadístico y gráfico. A partir de esto, se podrá llegar a unas conclusiones objetivas, que permitan ampliar el conocimiento sobre el tema de estudio.

En primer lugar, se desglosan las distintas etapas seguidas para los experimentos 1 y 2 y ensayos de mecanizado, detallando el equipo experimental y materiales empleados en el ensayo. Seguidamente, se definen ambos experimentos y los ensayos de mecanizado, detallando los valores obtenidos por la medición para cada ensayo. Por último, se hace el análisis estadístico de los resultados, evaluando así la influencia de cada factor sobre la rugosidad superficial y pudiendo hacer una comparación entre la calidad superficial obtenida mediante impresión 3D y la obtenida con un post-procesamiento de mecanizado.

4.2. Aplicaciones

4.2.1. Equipo experimental para los experimentos 1 y 2

Para la realización de los experimentos 1 y 2 los recursos empleados para llevarlos a cabo son los siguientes:

- Material de impresión PLA.
- Material de limpieza Smart Clean.
- Espray fijador Dimafix.
- Software Ultimaker CURA 3.2.1.
- Impresora 3D Witbox de BQ.
- Rugosímetro Surftest SJ 210 de Mitutoyo.

El material de limpieza empleado se denomina Smart Clean, desarrollado para limpiar el extrusor de la impresora eliminando todos los restos de polímero que hayan

podido quedar depositados en el interior del extrusor durante la impresión. La composición de este filamento es: PLA (Resina Poliláctica) – 69% CAS: 9051-89-2 y CaCO_3 – 30% CAS: 1317-65-3; con un diámetro de 1,75 mm. El modo de uso es el siguiente:

- Calentar el extrusor hasta superar en 10 °C la temperatura del material que se ha usado con anterioridad, en nuestro caso es PLA, por lo que hay que programar la temperatura de impresión en unos 230 °C.
- A continuación se carga el material de limpieza, Smart Clean, y se extruye el material.
- Por último, se saca el filamento de limpieza y se carga el material que se quiera imprimir.

El material de impresión es ácido poliláctico o poliláctido, comúnmente conocido como PLA (Figura 4.1 y 4.2). Es un plástico biodegradable debido a su origen natural (maíz, patata o caña de azúcar), sin incorporación de material reciclado ni recuperado y totalmente estabilizado sin producción de *warping* (defecto en el que el material tiende a despegarse debido a tensiones internas) y una buena resolución de impresión según el fabricante. Las propiedades del material pueden verse en la Tabla 4.1.

PLA	
Nombre químico	Ácido poliláctico
Composición	PLA (Resina Poliláctica) - 99% CAS: 9051-89-2
Densidad	1,24 g/cm ³
Temperatura de impresión	220±20 °C
Diámetro	1,75±0,03 mm

Tabla 4.1: Propiedades del PLA utilizado.

Para una mayor adherencia del material a la base de impresión se hace uso del espray fijador, Dimafix (Figura 4.1 y 4.2), diseñado para la impresión 3D mediante Fabricación de Filamento Fundido (FFF) o FDM con el fin de evitar el efecto *warping*.



Figura 4.1: Espray fijador y PLA empleados.

La máquina para la impresión 3D utilizada es la Witbox de BQ (Figura 4.2), que emplea el método de FFF/FDM, consistente en ir añadiendo, capa por capa, filamento polimérico fundido hasta completar la pieza de impresión. El extrusor es un diseño propio de BQ con una boquilla de 0,4 mm y una tobera de refrigeración. Se recomienda una velocidad de impresión de 50 mm/s y una máxima de 80 mm/s. El área de impresión tiene una cama de base fría de cristal tamaño A4, el resto de medidas de la impresora se muestran en la Tabla 4.2.

Dimensiones de la Witbox	
Impresora	(x)505 x (y)388 x (z)450 mm
Área de impresión	(x)297 x (y)210 x (z)200 mm
Caja	(x)622 x (y)524 x (z)624 mm

Tabla 4.2: Dimensiones de la impresora Witbox.

La máquina Witbox tiene como software predeterminado de impresión el Ultimaker CURA 3.2.1, que es el utilizado para cambiar los parámetros de impresión de los distintos ensayos realizados. Por lo tanto, el software está programado con las características de la impresora. Este software es el encargado de preparar y convertir los modelos 3D generados en otros formatos en un formato compatible con la impresora, los archivos se guardan con un formato .gcode.



Figura 4.2: Impresora Witbox, PLA y espray fijador.

La interfaz gráfica del software Ultimaker CURA 3.2.1 (Figura 4.3) se compone de un área de trabajo tridimensional, correspondiente con el área de impresión de la impresora Witbox, y un cuadro de opciones. En primer lugar, se carga una pieza 3D que se desea imprimir, en este caso un cilindro generado en SolidWorks; en segundo lugar, se ajustan los parámetros de impresión en el cuadro de opciones según los factores del ensayo. Una vez hecho esto, se toma nota sobre el tiempo estimado de impresión y los gramos de plástico que se requieren para la misma. Por último, se guarda el archivo pudiendo imprimirlo en la impresora.

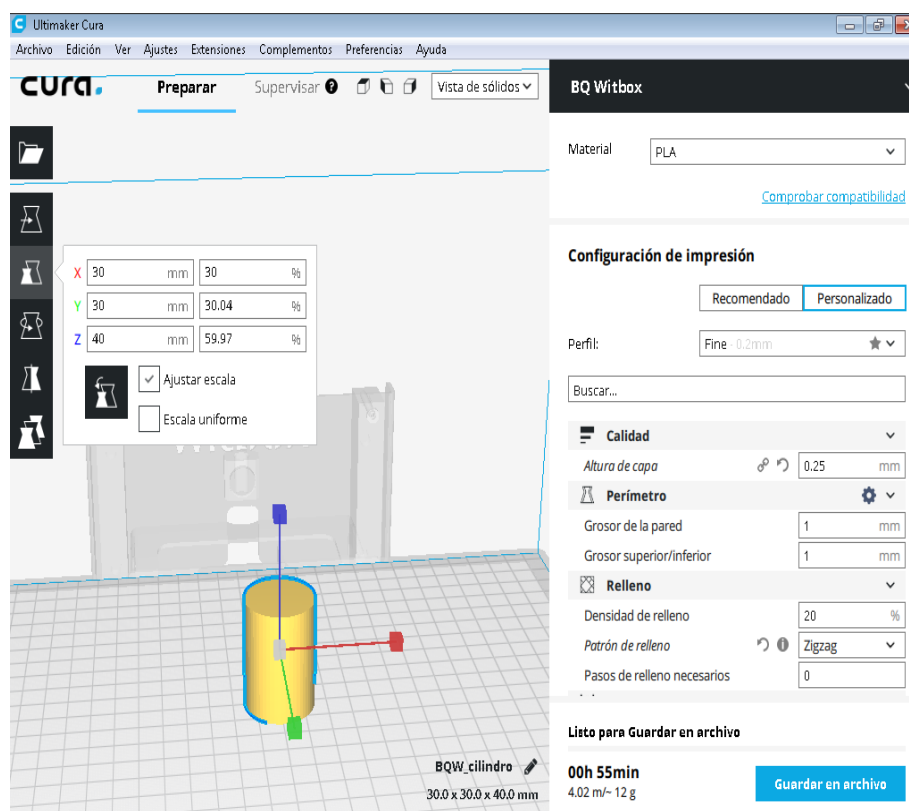


Figura 4.3: Software Ultimaker CURA 3.2.1.

El rugosímetro que se empleó para las mediciones es un Mitutoyo Surftest SJ 210 (Figura 4.4), un equipo de medición portátil con un rango de detección de $-200\ \mu\text{m}$ a $160\ \mu\text{m}$ y un rango de medición de $17,5\ \text{mm}$. Está capacitado para la medición de 39 parámetros característicos que cumplen los siguientes estándares: JIS (JIS-B0601-2001, JIS-B0601-1994, JIS BO601-1982), VDA, ISO-1997 y ANSI. Uno de estos parámetros es la desviación media aritmética, R_a , la medida de evaluación para el presente TFG. Las probetas se midieron con una longitud de muestreo de $2,5\ \text{mm}$ y una velocidad de medición de $0,5\ \text{mm/s}$.



Figura 4.4: Rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ 210.

4.2.2. Equipo experimental para los ensayos de torneado

Para los ensayos realizados por mecanizado de las tres probetas obtenidas por impresión 3D se emplearon los siguientes equipos experimentales:

- Material de impresión PLA, ABS y Nylon Strong.
- Material de limpieza Smart Clean.
- Espray fijador Dimafix.
- Software Ultimaker CURA 3.2.1.
- Impresora 3D Witbox de BQ.
- Impresora 3D AirWolf 3D HD.
- Torno Pinacho SP/165.
- Cámara de imagen térmica FLIR i3.
- Rugosímetro Surftest SJ 210 de Mitutoyo.

Para cada ensayo se ha empleado un material de impresión diferente. El PLA utilizado es el mismo que el descrito anteriormente. Para otro de los ensayos se ha empleado acrilonitrilo butadieno estireno, comúnmente conocido como ABS, un termoplástico muy usado en la impresión 3D. Sus características principales son: material muy tenaz, duro y rígido, con resistencia química a la abrasión. No es biodegradable, y sufre con la exposición a los rayos UV y requiere una cama caliente entre 80 °C y 100 °C. Para el último de los ensayos se ha utilizado Nylon Strong, una Poliamida 6 (PA6), un Nylon con una gran dureza, ideal para aplicaciones industriales donde se necesiten propiedades mecánicas de fuerza, resistencia o soportar altas temperaturas. También es un material rígido con una temperatura de reblandecimiento de 210 °C, lo que implica una oportunidad para la fabricación de piezas industriales mediante impresión 3D. El espray fijador y el material de limpieza son los mismos que los usados en los experimentos 1 y 2.

Para la impresión de los ensayos de las probetas de Nylon y PLA se ha utilizado la misma impresora 3D Witbox que para los experimentos 1 y 2, ya que uno de los materiales es PLA, al igual que en ambos experimentos, y el Nylon empleado tiene un diámetro también de 1,75 mm y es un material apto para la Witbox.

Para la impresión del ABS, debido a que requiere una impresión en cama caliente, se emplea una impresora AirWolf 3D HD, también con tecnología FDM/FFF. Tiene unas dimensiones de 600x440x450 mm y un tamaño máximo de impresión de 300x200x300 mm, el diámetro de la boquilla es 0,5 mm y el tamaño de filamento 3 mm.



Figura 4.5: Impresora AirWolf 3D HD.

Los parámetros usados para la impresión de las tres probetas son idénticos, con excepción de la temperatura de impresión ya que esta debe ajustarse al material a imprimir. En la Tabla 4.3 se recogen los parámetros empleados.

Material	Altura de capa (mm)	Velocidad de impresión (mm/s)	Temperatura de impresión (°C)	Grosor de la pared (mm)
PLA	0,2	120	200	3
ABS	0,2	120	225	3
Nylon Strong	0,2	120	250	3

Tabla 4.3: Parámetros de impresión de las probetas para torneado.

Para un tratamiento posterior a la impresión 3D, se ha realizado un mecanizado de las probetas mediante un torno paralelo convencional, concretamente, el torno Pinacho SP/165 (Figura 4.6). Para ello se han seleccionado velocidad de giro del

husillo y avance con la caja de velocidades y avances, respectivamente, y con el indicador de posición diametral, volante de posición frontal, se pone a cero el indicador con un palpado de la herramienta con la probeta, poniendo la referencia a cero y pudiendo poner la profundidad de corte.

Cada operación de mecanizado consiste en una pequeña pasada de acabado con bajo avance y profundidad de corte, siendo la longitud mecanizada de entre 10 y 20 mm. Para cada probeta, se han mecanizado tres partes, una primera sin refrigeración, una segunda con chorro de aire, con una presión entre 5 y 6 bares, y una tercera con taladrina (Cormetal Super más agua), pudiendo tomar así las temperaturas que alcanza la probeta con cada torneado.



Figura 4.6: Torno Pinacho SP/165.

La cámara de imagen térmica, empleada para medir las temperaturas alcanzadas durante el torneado, es el modelo FLIR i3 (Figura 4.7). Posee una precisión de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $\pm 2\%$ detectando temperaturas hasta de $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$, detectando diferencias de temperatura de $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 4.7: Cámara de imagen térmica FLIR i3.

El rugosímetro utilizado, para la toma de medidas de las tres probetas, es el mismo utilizado que en los experimentos 1 y 2, Mitutoyo Surftest SJ 210. Para estos ensayos se escogió una longitud de muestreo de 0,8 mm y una velocidad de medición de 0,5 mm/s.

4.2.3. Definición de los experimentos

En este apartado se seleccionan valores concretos para los distintos niveles de los factores propuestos para cada experimento y los ensayos de mecanizado.

4.2.3.1. Experimento 1

En este experimento se tienen cuatro factores con dos niveles cada uno.

- Altura de capa (h): se escogen 0,15 y 0,25 mm para este factor. Los valores se escogieron en función de que no se saliesen de los rangos recomendados por el programa Ultimaker CURA 3.2.1. Además, existen diversos estudios sobre la obtención de una mejor rugosidad superficial cuanto menor sea la altura de capa (Campbell *et al.*, 2002) (Kumbhar y Mulay, 2016); y la altura de capa mínima recomendada para FDM es 0,254 mm (Kumbhar y Mulay, 2016), por lo que se escoge un valor aproximado al mínimo recomendado y otro más bajo para estudiar el factor.
- Velocidad de impresión (v): las velocidades de impresión recomendadas por la impresora están en el rango de 50 y 80 mm/s. Para seleccionar los valores de cada nivel se escogieron dos valores extremos con estas velocidades de referencia, teniendo 40 y 80 mm/s.
- Temperatura de impresión (t): la temperatura recomendada para la impresión de PLA está en 220 ± 20 °C. Se han escogido los valores de 195 °C, que está por debajo de la temperatura mínima recomendada, y 225 °C, una temperatura 5 °C superior a la normal recomendada.
- Grosor de pared (g): según Noorani (2018) el grosor de la pared debe ser el doble que el diámetro de la boquilla de impresión. En este caso, la boquilla tiene un diámetro de 0,4 mm, por lo que se seleccionaron 1 y 3 mm para el grosor de la pared.

Las probetas se imprimieron con unas dimensiones de 30x30x40 mm. En la Tabla 4.4 se muestran los factores con los valores de sus niveles para el experimento 1.

Factor	Nivel	
Altura de capa (h)	0,15	0,25 mm
Grosor de la pared (g)	1 mm	3 mm
Velocidad de impresión (v)	40 mm/s	80 mm/s
Temperatura de impresión (t)	195 °C	225 °C

Tabla 4.4: Factores y niveles para el experimento 1.

Una vez definidos los factores y los valores de los niveles, se puede definir el primer plan de experimentos como se ve en la Tabla 4.5. Además, en esta tabla se añade el tiempo estimado de impresión determinado por el software Ultimaker CURA 3.2.1 dependiendo de los valores de los niveles de cada ensayo. Por otro lado, como se explicó con anterioridad, los ensayos se realizan con el orden aleatorizado.

Ensayo	Altura de capa (mm)	Velocidad de impresión (mm/s)	Temperatura (°C)	Grosor de la pared (mm)	Tiempo estimado (min)
e_1	0,25	40	195	3	74
e_2	0,15	40	225	3	123
e_3	0,15	80	195	3	64
e_4	0,25	80	195	1	29
e_5	0,15	40	195	1	90
e_6	0,25	80	225	3	38
e_7	0,15	80	225	1	47
e_8	0,25	40	225	1	55

Tabla 4.5: Seguimiento de ensayos del experimento 1.

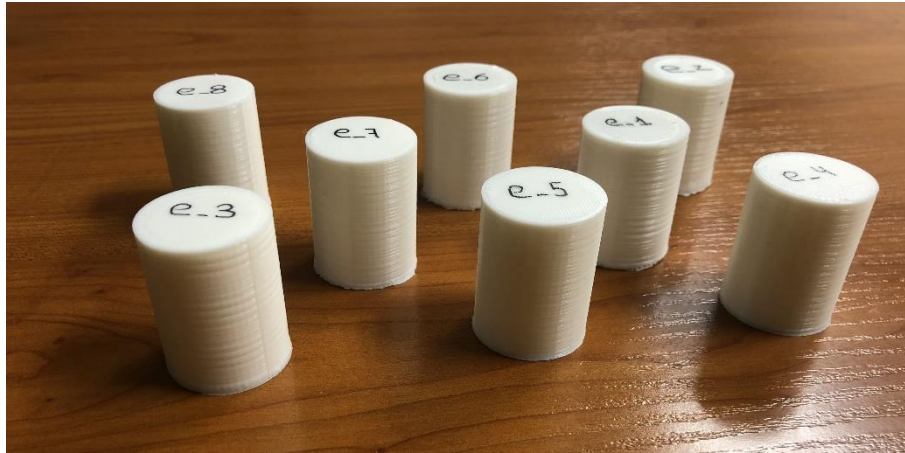


Figura 4.8: Probetas del experimento 1.

4.2.3.2. Experimento 2

En este experimento se tienen cinco factores todos con un nivel, menos el grosor de la pared y el tipo de relleno, con cinco y tres niveles, respectivamente. Los valores de los niveles, para la altura de capa, temperatura y velocidad de impresión, se han escogido en función a los ensayos del experimento 1. Para ello se ha seleccionado un ensayo con un valor de altura de capa de 0,15 mm (mejor rugosidad) y un tiempo óptimo de impresión. Así, se ha tomado como referencia el ensayo 7. Por lo tanto, los valores de los niveles serán los siguientes:

- Altura de capa (h): 0,15 mm.
- Velocidad de impresión (v): 80 mm/s.
- Temperatura de impresión (t): 225 °C.
- Grosor de la pared (g): para hacer un estudio más profundo e indagar sobre este factor, se ha ampliado el rango y el número de niveles. Debido a los resultados del experimento 1, se ha tomado como valor base 1 mm, por lo que se han escogido dos valores por debajo y dos por arriba del mismo. Los valores tomados son: 0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,5 mm.
- Tipo de relleno (r): la densidad de relleno establecida, tanto en el experimento 1 como en el 2, es del 20%. Se ha seleccionado este factor para estudiar si afecta la geometría de relleno interior a la calidad

superficial de la pieza de impresión. Para ello se han seleccionado rejilla, zig-zag y concéntrico como tipos de relleno.

En la Tabla 4.6 se muestran los factores con los valores de sus niveles para el experimento 2.

Factor	Nivel				
Altura de capa (h)	0,15 mm				
Grosor de la pared (g)	0,5 mm	0,75 mm	1 mm	1,25 mm	1,5 mm
Velocidad de impresión (v)	80 mm/s				
Temperatura de impresión (t)	225 °C				
Tipo de relleno (r)	Rejilla		Zig-zag		Concéntrico

Tabla 4.6: Factores y niveles para el experimento 2.

Al igual que para el experimento 1, se define el plan de experimentos en la Tabla 4.7, para el correcto seguimiento de los ensayos.

Ensayo	Altura de capa (mm)	Velocidad de impresión (mm/s)	Temperatura (°C)	Grosor de la pared (mm)	Tipo de relleno	Tiempo estimado (min)
f_1	0,15	80	225	0,5	Zig-zag	74
f_2	0,15	80	225	0,75	Rejilla	64
f_3	0,15	80	225	1,5	Zig-zag	123
f_4	0,15	80	225	0,75	Concéntrico	43
f_5	0,15	80	225	1	Concéntrico	43
f_6	0,15	80	225	1	Zig-zag	90
f_7	0,15	80	225	0,5	Rejilla	74
f_8	0,15	80	225	1,5	Concéntrico	123
f_9	0,15	80	225	0,75	Zig-zag	64
f_10	0,15	80	225	1,25	Concéntrico	29
f_11	0,15	80	225	1	Rejilla	90
f_12	0,15	80	225	1,5	Rejilla	55
f_13	0,15	80	225	0,5	Concéntrico	40
f_14	0,15	80	225	1,25	Zig-zag	29
f_15	0,15	80	225	1,25	Rejilla	51

Tabla 4.7: Seguimiento de ensayos del experimento 2.



Figura 4.9: Probetas del experimento 2.

4.2.3.3. Ensayos de torneado

Para las tres probetas, de materiales diferentes, dispuestas para el mecanizado, se han escogido tres ensayos iguales para cada una. Para los factores de profundidad de corte, avance y velocidad de giro del husillo se escoge un único nivel, mientras que para el sistema de refrigeración se seleccionan tres:

- Avance (f): la rugosidad superficial mejora con la disminución del avance, por lo que se ha escogido el mínimo avance disponible en el torno paralelo SP/165, 0,05 mm/rev.
- Velocidad de giro del husillo (n): para este factor se ha escogido una velocidad intermedia de 360 rev/min.
- Profundidad de corte (d): la profundidad de corte se ha elegido en función del parámetro de impresión del grosor de la pared, ya que no puede ser más grande a este porque se entraría en la zona de relleno. Además, se escoge una profundidad típica en operaciones de acabado en torneado. Se ha elegido 0,5 mm de profundidad de corte.
- Sistema de refrigeración (s): es el único factor con más de un nivel. Los sistemas elegidos son: en seco, por chorro de aire y con taladrina.

Factor	Nivel		
Avance (f)	0,05 mm/rev		
Velocidad de giro del husillo (n)	360 rev/min		
Profundidad de corte (d)	0,5 mm		
Refrigeración (s)	En seco	Chorro de aire	Taladrina

Tabla 4.8: Factores y niveles para los ensayos de torneado.

Los ensayos realizados en tres tramos en las tres probetas con sus factores y valores se representan en la Tabla 4.9.

Material	Tramo	Avance (mm/rev)	Velocidad de giro del husillo (rev/min)	Profundidad de corte (mm)	Refrigeración
PLA	1	0,05	360	0,5	En seco
	2	0,05	360	0,5	Chorro de aire
	3	0,05	360	0,5	Taladrina
ABS	1	0,05	360	0,5	En seco
	2	0,05	360	0,5	Chorro de aire
	3	0,05	360	0,5	Taladrina
Nylon Strong	1	0,05	360	0,5	En seco
	2	0,05	360	0,5	Chorro de aire
	3	0,05	360	0,5	Taladrina

Tabla 4.9: Seguimiento de ensayos por mecanizado.



Figura 4.10: Probetas de los ensayos de torneado.

4.3. Análisis de resultados

4.3.1. Resultados de rugosidad superficial del experimento 1

En la Tabla 4.10 se muestran las medidas de rugosidad media (R_a) tomadas para cada ensayo. En la última columna se muestra el promedio de las rugosidades obtenidas en cada probeta.

Ensayo	R_{a1} (μm)	R_{a2} (μm)	R_{a3} (μm)	R_{a4} (μm)	R_{a5} (μm)	R_{a6} (μm)	R_a (μm)
e_1	26,045	20,202	23,188	23,284	19,558	24,358	22,773
e_2	20,473	20,497	20,565	17,776	18,318	22,525	20,026
e_3	17,937	18,46	21,145	17,205	18,182	21,051	18,997
e_4	19,756	17,258	21,908	18,732	19,511	20,347	19,585
e_5	16,066	15,252	15,338	14,842	15,239	15,524	15,377
e_6	25,138	24,092	25,052	19,995	20,064	22,725	22,844
e_7	18,252	16,929	17,705	14,073	15,709	16,697	16,561
e_8	23,226	23,809	23,547	21,582	19,814	22,063	22,340

Tabla 4.10: Resultados de rugosidad superficial obtenidos en el experimento 1.

4.3.2. Análisis estadístico del experimento 1

Con los resultados obtenidos de la rugosidad superficial, se realiza un análisis estadístico de varianza, un ANOVA. Para la ejecución de dicho análisis se ha empleado el software R.

En primer lugar se hará un análisis para ver la influencia de cada factor sobre la variable respuesta con el ANOVA. El código de significación de la influencia sobre la rugosidad superficial se muestra en la Tabla 4.11, siendo “****” el factor con mayor nivel de significación. El criterio de significación escogido en este TFG es el de $p\text{-valor} < 0,05$.

Pr(> t)	0	0,001	0,01	0,05	0,1
Código	***	**	*	.	

Tabla 4.11: Código de significación del software R

Los resultados del ANOVA para el experimento 1 se muestran en la Tabla 4.12.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Pr(>F)
Altura de capa (h)	1	34,366	34,366	41,3466	0,007625 **
Velocidad de impresión (v)	1	0,799	0,799	0,9619	0,399039
Temperatura (t)	1	3,174	3,174	3,8186	0,145684
Grosor de la pared (g)	1	14,518	14,518	17,4669	0,024956 *
Residuos	3	2,494	0,831	-	-

Tabla 4.12: Resultados del ANOVA para el experimento 1.

Los resultados que se obtienen en el ANOVA llevan a las siguientes conclusiones:

- La altura de capa, como era predecible, es el factor más influyente sobre la rugosidad superficial, con un $p\text{-valor} < 0,01$.
- Los factores de temperatura y velocidad de impresión no son significativos sobre la variable de respuesta.
- El grosor de la pared afecta a la rugosidad superficial, aunque en menor medida que la altura de capa, con un $p\text{-valor} < 0,05$.

Se puede analizar la contribución de las fuentes de variación a la variabilidad de la rugosidad superficial, a partir de los resultados obtenidos en el ANOVA, explicada por el modelo y por el total, expresándose en porcentaje. Para ello se emplearán las siguientes expresiones:

$$\rho_1 = \frac{SC_{\text{fuente de variación}}}{SC_{\text{modelo}}} \cdot 100 \quad (\text{Fórmula 4.1})$$

$$\rho_2 = \frac{SC_{\text{fuente de variación}}}{SC_{\text{modelo}} + SC_{\text{error}}} \cdot 100 \quad (\text{Fórmula 4.2})$$

A partir de las anteriores expresiones se construye la siguiente Tabla 4.13 con las contribuciones de cada fuente de variación a la variabilidad.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	ρ_1	ρ_2
Altura de capa (h)	1	34,366	65,02%	62,09%
Velocidad de impresión (v)	1	0,799	1,51%	1,44%
Temperatura (t)	1	3,174	6%	5,73%
Grosor de la pared (g)	1	14,518	27,47%	26,23%
Residuos	3	2,494	-	-
Total	7	55,351	100%	95,49%

Tabla 4.13: Contribución de cada factor a la variabilidad para el experimento 1.

La contribución a la variabilidad más alta es la de la altura de capa, con un 65,02% de la variabilidad del modelo y con un 62,09% de la variabilidad total, frente a la velocidad de impresión que no llega a un 2% y la temperatura que no supera el 6%. El grosor de la pared tiene una contribución a la variabilidad media, ya que tiene un valor de 27,47% de la variabilidad del modelo y un 26,23% de la variabilidad total; de este modo, el grosor de la pared presenta influencia sobre la rugosidad superficial, aunque en menor medida que la altura de capa.

Para realizar el ANOVA se hace una hipótesis de que los errores siguen una distribución normal. Así, se va a comprobar la normalidad de los residuos mediante el test de normalidad de Shapiro-Wilk. La Tabla 4.14 muestra los resultados de dicho test.

Shapiro-Wilk			
Estadístico		p-valor	
W	0,86373	p<W	0,1308

Tabla 4.14: Test de normalidad de Shapiro-Wilk para el experimento 1.

Al ser el p-valor menor que el valor estadístico W, se concluye que no existe evidencia de ausencia de normalidad en los residuos.

Después de hacer el ANOVA y comprobar la normalidad de los residuos, se va a hacer uso de los test no paramétricos de Spearman y Kendall. Estos dos coeficientes permiten identificar relaciones monótonas entre parámetros. Además, tienen la ventaja de que son métodos robustos ante la existencia de valores extraños (*outliers*) (Gotway *et al.*, 1994) y no asumen un modelo paramétrico concreto y una distribución específica de los datos (Bodenhofer *et al.*, 2013).

Los coeficientes Spearman y Kendall se computarán mediante el software R según la metodología presentada por Carou *et al.*, (2014b). De este modo, se calculará el coeficiente de correlación entre la variable de salida y los factores del experimento 1 junto a su p-valor, como se muestra en la Tabla 4.15.

	Spearman ρ - p-valor	Kendall τ - p-valor
Altura de capa (<i>h</i>)	0,764	0,6618
	0,027 *	0,043 *
Velocidad de impresión (<i>v</i>)	-0,109	-0,094
	0,797	0,773
Temperatura (<i>t</i>)	0,327	0,283
	0,429	0,387
Grosor de la pared (<i>g</i>)	0,546	0,472
	0,162	0,149

Tabla 4.15: Test no paramétricos de Spearman y Kendall para el experimento 1.

La correlación de los coeficientes puede variar entre -1, asociación negativa perfecta, y +1, asociación positiva perfecta; si no hay correlación el coeficiente será 0. De la realización de estos test no paramétricos se puede ver lo siguiente:

- Para la velocidad y temperatura de impresión no se obtienen valores del coeficiente de correlación que muestren una clara correlación entre la variable de respuesta y los factores, ni los p-valores cumplen el criterio de significación ($p\text{-valor} < 0.5$).
- La altura de capa tiene un coeficiente de correlación próximo a +1 y el p-valor es significativo, por lo que al igual que en el ANOVA, se concluye que este valor afecta claramente a la rugosidad superficial. Según el signo del coeficiente, un incremento de la altura de capa conlleva un incremento de la rugosidad superficial.
- El grosor de la pared no tiene una correlación perfecta pero es positiva y más cercana al +1 que al 0. No obstante, aunque próximo, el p-valor obtenido no cumple con el criterio escogido de significación ($p\text{-valor} < 0,05$). Esto puede deberse al número limitado de resultados estudiados en el experimento 1.

Para obtener una mejor comprensión y visualización más clara de los resultados, se han realizado representaciones gráficas. En la Figura 4.11 se representan las rugosidades medias de cada ensayo. Los ensayos se pusieron conforme a la altura de capa, siendo así e_2, e_3, e_5 y e_7 los correspondientes a un valor de 0,15 mm, y e_1, e_4, e_6 y e_8 a un valor de 0,25 mm de altura de capa.

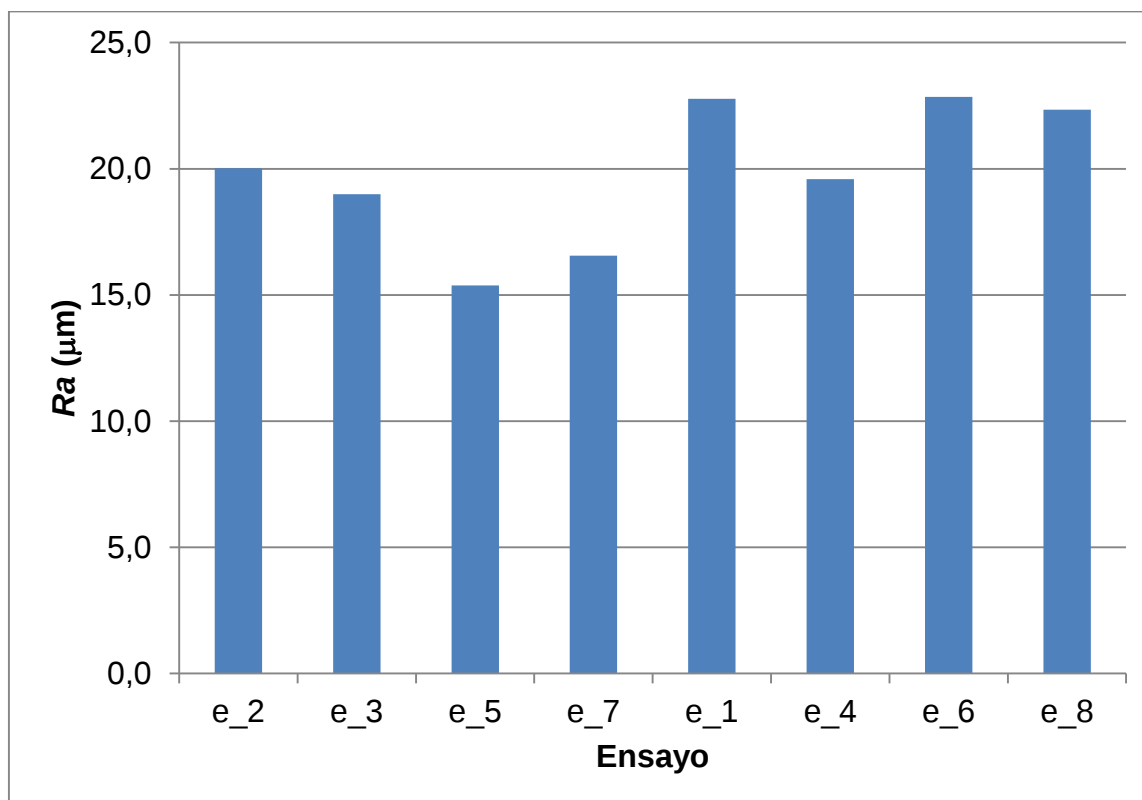


Figura 4.11: Rugosidad superficial del experimento 1 agrupadas por altura de capa.

En dicha figura se puede ver que para una altura de capa más pequeña se obtienen mejores resultados. Además, para un mismo valor de altura de capa los valores difieren entre sí.

En la Figura 4.12 se representan las rugosidades superficiales obtenidas agrupadas por grosor de la pared. De este modo, los ensayos e_5, e_7, e_4 y e_8 tienen un valor de 1 mm, y los ensayos e_2, e_3, e_1 y e_6 son los correspondientes a un valor de 3 mm de grosor de la pared.

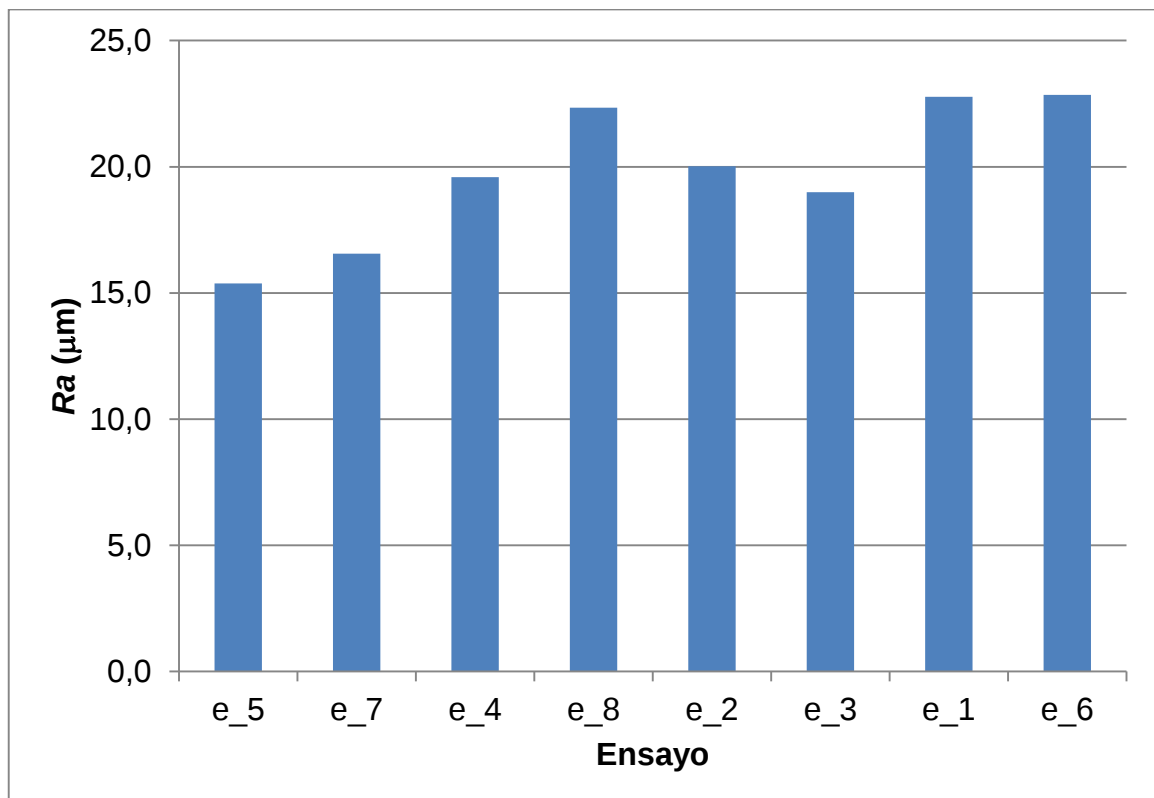


Figura 4.12: Rugosidad superficial del experimento 1 agrupadas por grosor de la pared.

En la Figura 4.12 se observa una menor rugosidad, en general, para los experimentos que tienen como parámetro de grosor de la pared 1 mm.

Debido a las discrepancias sobre el grosor de la pared entre el ANOVA y los test no paramétricos realizados, es necesario un estudio más profundo sobre la influencia de dicho factor, por lo que se procede a la realización del experimento 2.

4.3.3. Resultados de rugosidad superficial del experimento 2

Los resultados de rugosidad superficial y la media realizada para cada ensayo se pueden ver en la Tabla 4.16:

Ensayo	R_{a1} (μm)	R_{a2} (μm)	R_{a3} (μm)	R_{a4} (μm)	R_{a5} (μm)	R_{a6} (μm)	R_a (μm)
f_1	12,761	14,304	13,034	12,87	16,46	12,586	13,669
f_2	15,695	16,514	13,67	15,371	16,64	16,431	15,720
f_3	19,471	21,602	22,279	19,625	20,775	20,536	20,715
f_4	16,733	18,797	14,103	13,592	17,96	14,047	15,872
f_5	16,108	16,705	15,439	15,04	15,91	13,965	15,528
f_6	16,082	18,292	16,925	14,068	14,827	14,734	15,821
f_7	11,591	13,259	14,995	11,947	19,792	14,446	14,338
f_8	18,971	19,016	20,688	19,352	20,013	18,499	19,423
f_9	16,789	16,559	16,638	14,482	16,302	15,181	15,992
f_10	16,39	17,199	19,007	16,626	18,918	16,354	17,416
f_11	17,142	14,435	14,746	16,892	17,001	16,796	16,169
f_12	16,283	16,893	18,545	16,305	17,521	17,145	17,115
f_13	10,698	12,158	12,455	11,721	18,122	11,319	12,746
f_14	18,357	19,093	19,091	17,274	20,99	17,999	18,801
f_15	18,175	18,1	20,777	16,035	15,569	16,799	17,576

Tabla 4.16: Resultados de rugosidad superficial obtenidos en el experimento 2.

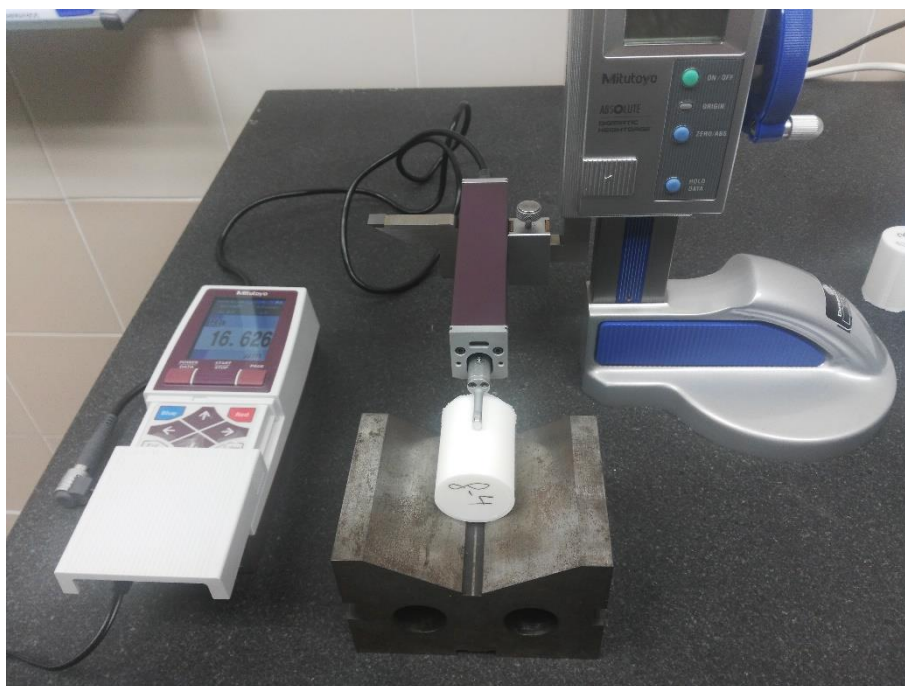


Figura 4.13: Medición de probetas.

4.3.4. Análisis estadístico del experimento 2

Con el mismo proceder que en el experimento 1, con los resultados obtenidos de la medición de los ensayos del experimento 2, se pasa a realizar un análisis estadístico ANOVA, usando el software R.

En la Tabla 4.17 se pueden ver los resultados obtenidos del ANOVA del experimento 2. El criterio de significación será el mismo que el escogido en el experimento 1, es decir, $p\text{-valor} < 0,05$.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Pr(>F)
Tipo de relleno (<i>r</i>)	2	2,184	1,0918	1,2238	0,3438
Grosor de la pared (<i>g</i>)	4	54,192	13,5480	15,1850	8,319E-04
Residuos	8	7,138	0,8922	-	-

Tabla 4.17: Resultados del ANOVA para el experimento 2.

Los resultados obtenidos son que el tipo de relleno no afecta a la variable respuesta, ya que tiene un p-valor elevado, superior a 0,2. Sin embargo, el grosor de la pared sale significativo con un p-valor<0,001.

Se procede a estudiar la contribución de las fuentes de variación a la variabilidad, como se hizo en el experimento 1. Para ello, se emplearán las fórmulas definidas anteriormente, la Fórmula 4.1 y 4.2. Los resultados se pueden ver en la Tabla 4.18.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	ρ_1	ρ_2
Tipo de relleno (<i>r</i>)	1	2,18	3,87%	3,44%
Grosor de la pared (<i>g</i>)	1	54,19	96,13%	85,32%
Residuos	12	7,14	-	-
Total	14	63,51	100%	88,76%

Tabla 4.18: Contribución de cada factor a la variabilidad para el experimento 2.

Para el tipo de relleno se obtiene como resultado que tiene una influencia muy limitada ya que posee una contribución de 3,87% de la variabilidad del modelo y un 3,44% de la variabilidad total, frente a un 96,13% y un 85,32%, respectivamente, por parte del grosor de la pared, siendo este parámetro el más influyente del experimento 2.

Al igual que en el experimento 1, se comprobará la normalidad de los residuos mediante el test de Shapiro-Wilk, como se muestra en la Tabla 4.19; concluyendo que no existe evidencia de ausencia de normalidad ($p < W$).

Shapiro-Wilk			
Estadístico		p-valor	
W	0,95369	p<W	0,5844

Tabla 4.19: Test de normalidad de Shapiro-Wilk para el experimento 2.

También se hacen los test no paramétricos de Spearman y Kendall, como se muestra en la Tabla 4.20. Al igual que en el ANOVA, en estos test se sacan las mismas conclusiones, teniendo el grosor una correlación positiva alta con la rugosidad superficial y un p-valor significativo; mientras que el tipo de relleno apenas tiene correlación con la rugosidad superficial y p-valor no es menor al criterio escogido. De este análisis, resulta evidente que la existencia de un mayor número de resultados permite identificar con mayor claridad la influencia del grosor de la pared en la rugosidad superficial.

	Spearman ρ - p-valor	Kendall τ - p-valor
Grosor de la pared (g)	0,895	0,761
	6,729E-06 *	0,000179 *
Tipo de relleno (r)	0,132	0,101
	0,638	0,635

Tabla 4.20: Test no paramétricos de Spearman y Kendall para el experimento 2.

Para tener una visión más clara de los resultados se han representado los resultados de rugosidad media con respecto al grosor de la pared (Figura 4.14), ordenándose los valores de los mismos de menor a mayor, para ver si hay alguna correlación. En general, para valores más bajos de grosor de la pared, la rugosidad superficial mejora.

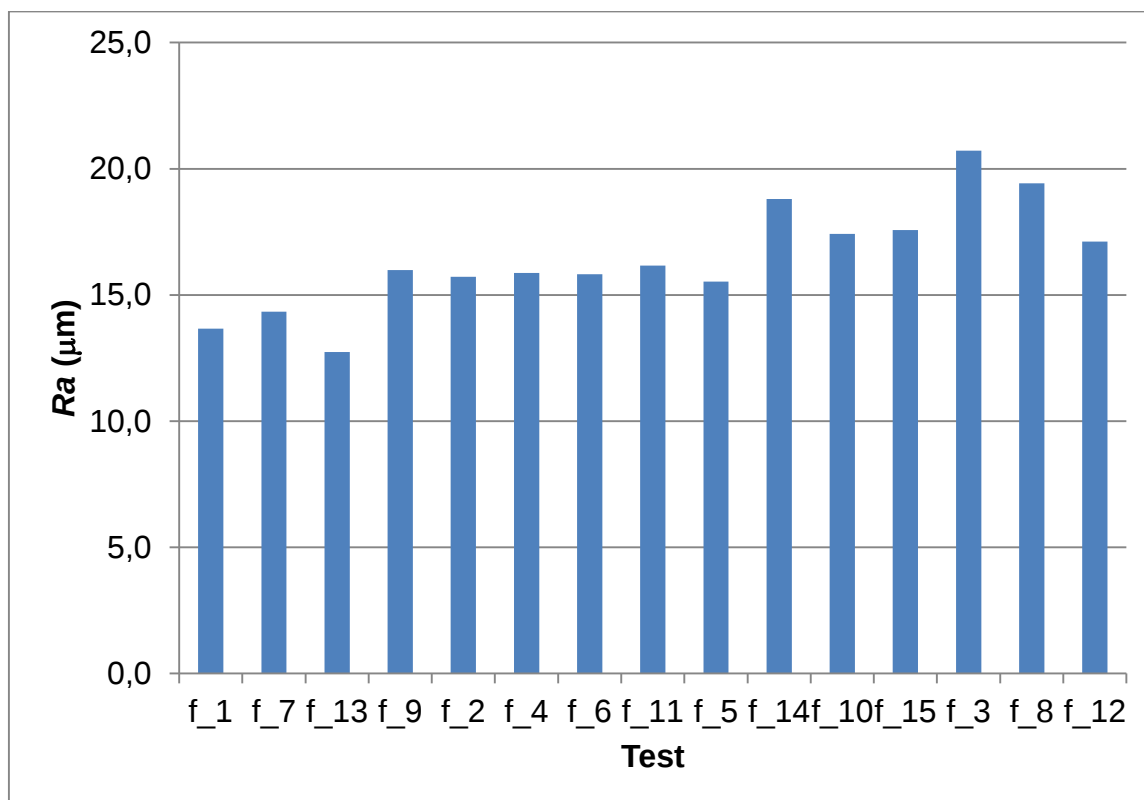


Figura 4.14: Rugosidad superficial del experimento 2 agrupadas por grosor de la pared.

4.3.5. Resultados de rugosidad superficial de los ensayos de torneado

Se tomaron las medidas de rugosidad antes del torneado, para comparar así los resultados obtenidos, presentándose en la Tabla 4.21.

Material	R_{a1} (μm)	R_{a2} (μm)	R_{a3} (μm)	R_a (μm)
PLA	16,540	14,960	16,360	15,953
ABS	14,810	15,181	14,727	14,906
Nylon Strong	28,080	27,791	28,146	28,006

Tabla 4.21: Rugosidades de las probetas antes del torneado.

Las medidas de rugosidad, tomadas en cada tramo de las probetas, se pueden ver en la Tabla 4.22.

Material	Tramo 1			Tramo 2			Tramo 3		
	R_{a1} (μm)	R_{a2} (μm)	R_{a3} (μm)	R_{a1} (μm)	R_{a2} (μm)	R_{a3} (μm)	R_{a1} (μm)	R_{a2} (μm)	R_{a3} (μm)
PLA	21,856	16,513	17,400	29,669	21,272	26,064	24,346	28,662	21,250
ABS	11,614	13,772	8,474	10,343	13,650	9,873	14,951	17,910	17,991
Nylon Strong	8,408	12,097	10,369	10,026	10,211	8,787	12,130	11,220	12,357

Tabla 4.22: Resultados de rugosidad obtenidos para las probetas torneadas.

Para mayor claridad, en la Tabla 4.23 se muestran las rugosidades medias de cada tramo.

Material	R_a (μm)		
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo3
PLA	18,590	25,668	24,753
ABS	11,287	11,289	16,951
Nylon Strong	10,291	9,675	11,902

Tabla 4.23: Rugosidades medias de las probetas por tramo.

En la Tabla 4.24 se presentan las temperaturas obtenidas durante el torneado de las probetas en cada tramo.

Material	T (°C)		
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo3
PLA	60	26	16
ABS	40	29	26
Nylon Strong	38	31	25

Tabla 4.24: Temperaturas obtenidas durante el torneado de las probetas.

4.3.6. Análisis de resultados de las probetas torneadas

Durante el torneado de la probeta de PLA, se produjo mucha viruta que no llegaba a romper, debido a que el material es fibroso y, por consiguiente, se obtuvo una rugosidad superficial peor que sin mecanizado, $R_a=15,953 \mu\text{m}$. No obstante, la rugosidad en el tramo 1, torneado en seco, que se obtuvo de $R_a=18,59 \mu\text{m}$ es considerablemente mejor a las obtenidas en los tramos 2 y 3, dichas con rugosidades similares, $R_a=25,668 \mu\text{m}$ y $R_a=24,753 \mu\text{m}$, respectivamente.

La probeta de ABS también formó virutas que no rompían fácilmente, aunque en menor medida que la probeta de PLA, como puede comprobarse en los resultados obtenidos. Con el proceso de torneado se mejoró la rugosidad superficial de dicha probeta en los tramos 1 y 2, en seco y con chorro de aire, respectivamente. Sin embargo, en el torneado con taladrina pasó de tener un $R_a=14,906 \mu\text{m}$ a $R_a=16,951 \mu\text{m}$, es decir, se empeoró ligeramente la rugosidad obtenida mediante fabricación aditiva. No obstante, esta variación de rugosidad no se considera importante debido a la variabilidad de los resultados de rugosidad obtenidos según la zona de medición observados en los experimentos 1 y 2.

Por último, se obtuvo una baja calidad superficial para la probeta de Nylon Strong tras la impresión 3D de la misma, $R_a=28,006 \mu\text{m}$. Las virutas que se produjeron durante el torneado se rompían con facilidad, pudiendo obtener buenos resultados de rugosidad superficial en comparación con los obtenidos tras la impresión. De este modo, se alcanzaron valores similares en los tres tramos, dando el valor más bajo en el tramo 2, con $R_a=9,675 \mu\text{m}$, y el valor más alto de rugosidad en el tramo 3, con $R_a=11,902 \mu\text{m}$.

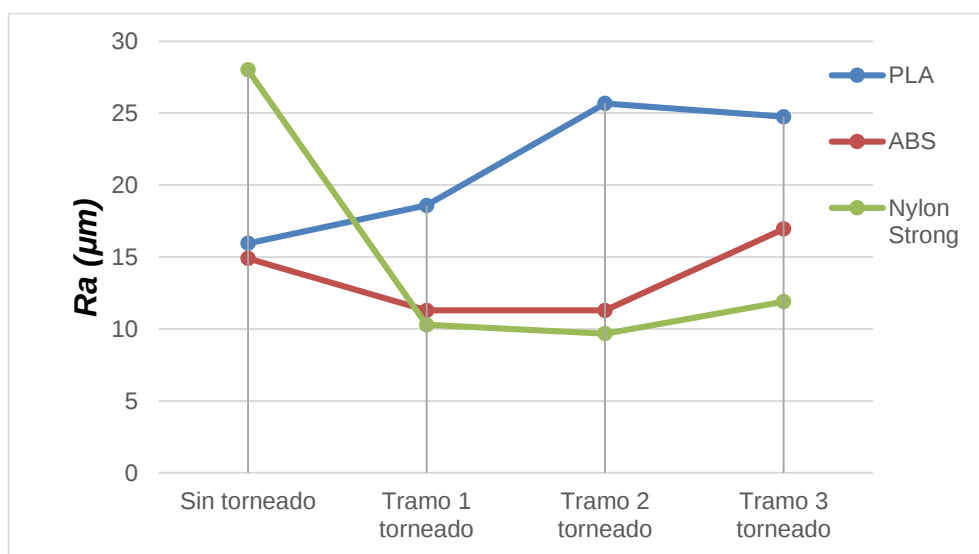


Figura 4.15: Rugosidad superficial en los ensayos de torneado.

Con respecto a las temperaturas obtenidas durante el torneado, el PLA presenta un mayor cambio térmico, pasando de 60 °C en el tramo 1 (torneado en seco), a 26 °C en el tramo 2 y 16 °C en el tramo 3, refrigeración por chorro de aire y por taladrina, respectivamente. En el ABS y el Nylon Strong se comportan de manera semejante, obteniéndose temperaturas entorno a los 38-40 °C para los torneados en seco, 29-31 °C para refrigeración por chorro de aire, y 26-25 °C para refrigeración por taladrina. La representación gráfica de dichas temperaturas se muestra en la Figura 4.16.

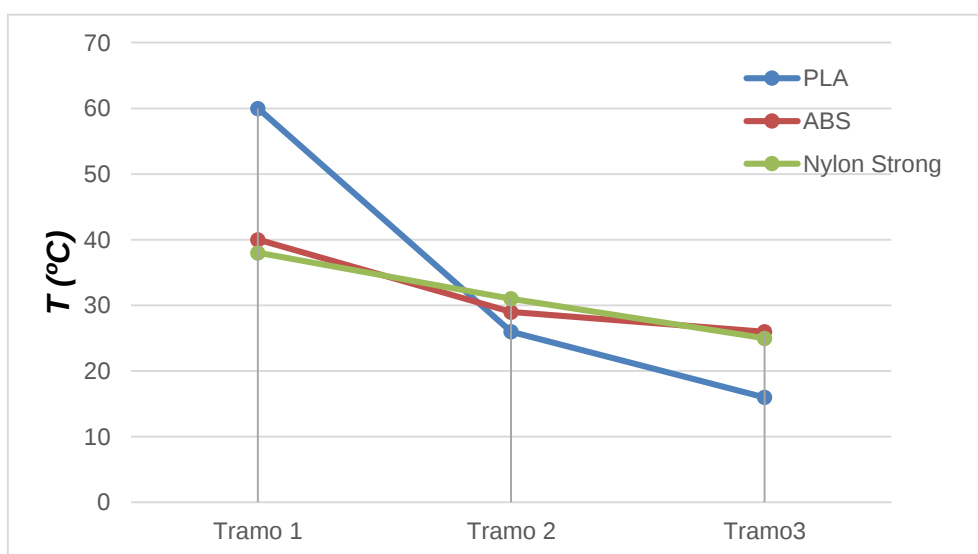


Figura 4.16: Temperaturas obtenidas en los ensayos de torneado.

5. Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

La industria manufacturera está en continuo desarrollo, debido a nuevas demandas que vienen dadas por cambios sociales y económicos. Uno de estos cambios, en los últimos años, es la implementación de la fabricación aditiva en el sector industrial. Pero, dicha fabricación, todavía presenta límites y retos a superar. Para el avance de la fabricación aditiva es necesaria una comparación con procesos de fabricación convencionales, como lo es el mecanizado. La comparación y el estudio de ambos procesos llevan a una mayor comprensión entre las ventajas y desventajas que presenta cada uno.

Una de las limitaciones que presenta la fabricación aditiva es el acabado superficial. Sin embargo, en el mecanizado, se puede obtener una alta calidad superficial. Esto se debe, en parte, al control de los factores de entrada que afectan a esta variable de respuesta.

En el presente TFG se recoge un estado del arte sobre ambos procesos de fabricación, dos experimentos para el estudio de los parámetros influyentes sobre la rugosidad superficial obtenida en fabricación aditiva y la comparación de tres ensayos de la rugosidad superficial obtenida en probetas, fabricadas con tecnología FDM y después de su posterior mecanizado. De este modo, se ha llegado a unas conclusiones de carácter general y particular, que se exponen a continuación.

5.1.1. Conclusiones de carácter general

Estas conclusiones surgen del apartado 2, referidos al estado del arte.

- La fabricación aditiva es un tema de interés público, estando cada vez más presente en distintos sectores industriales, como en el aeroespacial o automoción, debido a ciertas ventajas que presentan los productos realizados con este tipo de fabricación no convencional, como reducción del peso y ausencia de ensamblajes o montaje.

- La fabricación aditiva presenta límites y retos que son necesarios superar para su completa implantación en la industria.
- Existe un campo amplio de estudio sobre materiales y procesos en mecanizado y fabricación aditiva.
- Las rugosidades superficiales obtenidas en fabricación aditiva pueden limitar la implantación de dicha tecnología en ciertas aplicaciones.
- Mediante procesos de mecanizado se puede obtener una buena calidad superficial, pudiendo así, hacer un post-procesado en piezas de fabricación aditiva para mejorar la misma.
- Las máquinas híbridas pueden ser una solución, pudiendo beneficiarse de las ventajas que presenta la fabricación aditiva durante la producción y de las ventajas de acabado que presenta un proceso de mecanizado.

5.1.2. Conclusiones de carácter particular

Las conclusiones con carácter particular se establecen a partir de la metodología desarrollada, su aplicación y análisis de resultados, presentados en los apartados 3 y 4.

- Mediante un diseño de experimentos y un análisis estadístico se puede estudiar la influencia de ciertos factores de fabricación aditiva sobre la rugosidad superficial, en este caso, la desviación media aritmética R_a .
- La altura de capa es el factor más influyente sobre la rugosidad superficial en procesos de fabricación aditiva, como ya habían concluido otros autores.
- La influencia de la altura de capa resalta sobre la escasa influencia de la velocidad y temperatura de impresión.
- El grosor de la pared también es influyente sobre la variable de respuesta, aunque en menor medida que la altura de capa.
- El tipo de relleno no es influyente sobre la rugosidad superficial.
- Con valores más bajos, tanto de altura de capa como de grosor de la pared, se obtienen mejores resultados de rugosidad superficial.

- El PLA no es un material adecuado para el mecanizado, mientras que el Nylon Strong y el ABS sí lo son, aunque este último en menor medida que el Nylon Strong.
- El PLA, tras el torneado, presenta un peor acabado superficial que el obtenido simplemente por FDM.
- El ABS posee una mejor rugosidad superficial después del torneado en seco y con chorro de aire. Sin embargo, para el torneado con sistema de refrigeración por taladrina presenta peores rugosidades superficiales que las presentadas por fabricación aditiva.
- El Nylon Strong mejora notablemente la rugosidad superficial tras el torneado.

5.2. Trabajos futuros

El presente TFG comprende un área de conocimiento cambiante y con un rápido avance, por lo que es preciso su estudio, para aportar y desarrollar nuevas líneas de actuación en los procesos de fabricación expuestos. A continuación se exponen algunas líneas de actuación para desarrollos futuros:

- Estudio y experimentación sobre otros parámetros que puedan afectar a la rugosidad superficial en fabricación aditiva.
- Desarrollar diferentes geometrías en fabricación aditiva, para ver cómo afecta la forma a las propiedades del producto.
- Estudio comparativo sobre el rendimiento de distintos procesos de fabricación aditiva y sustractiva.
- Análisis comparativo entre piezas obtenidas en máquinas híbridas y obtenidas mediante mecanizado.
- Experimentos sobre el comportamiento de distintos materiales (propios de fabricación aditiva) ante el mecanizado.

A partir de los resultados del presente TFG se han elaborado dos artículos de investigación que en el presente momento se encuentran, uno en curso y, el otro, en

estado de revisión en revistas científicas internacionales de prestigio revisadas por pares.

Estos dos trabajos incluyen un artículo de revisión de literatura científica relativa al acabado superficial obtenido en procesos de fabricación aditiva y mecanizado y un estudio experimental para la identificación de factores críticos en impresión FDM que permitan obtener una buena calidad superficial. Estos trabajos son los siguientes:

- M. Pérez, D. Carou, G. Medina, R. Dorado. A comparative review on surface quality in additive manufacturing and machining. En curso.
- M. Pérez, G. Medina, A. García, M. Gupta, D. Carou. *Surface quality enhancement of fused deposition modelling (FDM) printed samples based on the selection of critical printing parameters*. En estado de revisión en la revista Materials (Editor: MDPI).

Bibliografía

- Adel, M., Abdelaal, O., Gad, A., Nasr, A. B., Khalil, A. M. (2018). *Polishing of fused deposition modeling products by hot air jet: Evaluation of surface roughness*. Journal of Materials Processing Tech. 251, 73-82.
- Alves, M.L., Ferreira, B. B., Leta, F. R. (2011). *Evaluación de Parámetros de Rugosidad usando Análisis de Imágenes de Diferentes Microscopios Ópticos y Electrónicos*. Información Tecnológica 22 (4), 129-146.
- ASM (1989). *ASM Handbook - Machining (Vol. 16)*. ASM International
- ANSI/ASME B46.1-2009 (2010) *Surface texture: surface roughness, waviness and lay*. ASME, New York.
- Bagehorn, S., Wehr, J., Maier, H. J. (2017). *Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts*. International Journal of Fatigue 102, 135-142.
- Benardos, P. G., Vosniakos, G.-C. (2003). *Predicting Surface roughness in machining: a review*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 833-844.
- Bikas, H., Stavropoulos, P., Chryssolouris, G. (2016). *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 83, 389–405.
- Bodenhofer, U.; Krone, M.; Klawonn, F. (2013). *Testing noisy numerical data for monotonic association*. Inf. Sci. 245, 21–37, doi: 10.1016/j.ins.2012.11.026.
- Boschetto, A., Bottini, L., Veniali, F. (2016). *Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 41, 92-101.
- Boschetto, A., Bottini, L. (2015). *Roughness prediction in coupled operations of fused deposition modeling and barrel finishing*. Journal of Materials Processing Technology 219, 181-192.
- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., Clare, A. (2017). *Materials for additive manufacturing*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 66, 659–681.
- Bruschi, S., Bertolini, R., Bordin, A., Medea, F., Ghiotti, A. (2016). *Influence of the machining parameters and cooling strategies on the wear behavior of wrought and additive manufactured Ti6Al4V for biomedical applications*. Tribology International 102, 133–142.
- Bui, S. H., Renegar, T. B., Vorburger, T. V., Raja, J., Malburg, M. C. (2004). *Internet-based surface metrology algorithm testing system*. Wear 257, 1213–1218.
- Butola, R., Jitendrakumar, Vaibhavkhanna, ParveshAli, Khanna, V. (2017). *Effect on Surface Properties OF Mild Steel During Dry Turning & Wet Turning On Lathe*. Materials Today: Proceedings 4, 7892–7902.

- Campbell, R.I., Martorelli, M., Lee, H.S. (2002). *Surface roughness visualization for rapid prototyping models*. Computer-Aided Design 34, 717-725.
- Carou, D., Rubio, E.M., Lauro, C.H., Davim, J.P. (2014a). *Experimental investigation on surface finish during intermittent turning of UNS M11917 magnesium alloy under dry and near dry machining conditions*. Measurement 56, 136-154.
- Carou, D., Rubio, E.M., Lauro, C.H., Davim, J. P. (2014b). *Experimental investigation on finish intermittent turning of UNS M11917 magnesium alloy under dry machining*. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 75, 1417–1429
- Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., Yamane, Y. (2000). *Metal Machining. Theory and Applications*. Editorial Arnold.
- Chua, C.K., Wong, C.H., Yeong, W.Y. (2017). *Chapter One: Introduction to 3D Printing or Additive Manufacturing*. Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing, Pages 1–29.
- Company, P.P., Vergara, M., Mondragón, S. (2007). *Dibujo industrial*. Editorial Universidad de Jaume I.
- D'Addona, D.M., Raykar, S.J., Narke, M.M. (2017). *High speed machining of Inconel 718: tool wear and surface roughness analysis*. Procedia CIRP 62, 269–274.
- Diamoutene, A., Noureddine, F., Kamsu-Foguem, B., Barro, D. (2018). *Quality control in machining using order statistics*. Measurement 116, 596–601.
- Dilberoglu, U.M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., Dolen, M. (2017). *The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0*. Procedia Manufacturing 11, 545 – 554.
- DIN 4760 (1982). *Form deviations; concepts; classification system*. Deutches Institut Fuer Normung.
- Dinis, J.C., Moraes, T.F., Amorim, P.H.J., Moreno, M.R., Nunes, A.A., Silva, J.V.L. (2016). *POMES: An Open-Source Software Tool to Generate Porous/Roughness on Surfaces*. Procedia CIRP 49, 178 – 182.
- El-Hofy, H. (2005). *Advanced Machining Processes. Nontraditional and Hybrid Machining Processes*. Editorial McGraw-Hill.
- Fatemi, A., Molaei, R., Sharifimehr, S., Shamsaei, N., Phan, N. (2017). *Torsional fatigue behavior of wrought and additivemanufacturedTi-6Al-4V by powder bed fusion including surface finish effect*. International Journal of Fatigue 99, 187-201.
- Fox, J.C., Moylan, S.P., Lane, B.M. (2016). *Effect of process parameters on the surface roughness of overhanging structures in laser powder bed fusion additive manufacturing*. Procedia CIRP 45, 131–134.
- General Electric (2018) <https://www.ge.com/reports/epiphany-disruption-ge-additive-chief-explains-3d-printing-will-upend-manufacturing/>

- Gotway, C. A.; Helsel, D. R.; Hirsch, R. M (1994). *Statistical Methods in Water Resources*. Technometrics, 36, 323, doi: 10.2307/1269385.
- Guo, P., Zou, B., Huang, C., Gao, H. (2017). *Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition*. Journal of Materials Processing Technology 240, 12–22.
- Hällgren, S., Pejryd, L., Ekengren, J. (2016). *Additive Manufacturing and High Speed Machining –Cost comparison of short lead time manufacturing methods*. Procedia CIRP 50, 384 – 389.
- Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, H. (1973), *Textural Features for Image Classification*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Vol. SMC-3, 610-621.
- Huang, Y., Chang, C-M., Ho, C-F., Lee, T-W., Lin, P-H., Hsu, W-Y. (2017). *The research on surface characteristics of optical lens by 3D printing technique and precise diamond turning technique*. Proc. SPIE 10449, Fifth International Conference on Optical and Photonics Engineering, 1044910, 1-6.
- Ilio, A., Paoletti, A. (2012). *Machinability Aspects of Metal Matrix Composites*. En Davim J.P. Machining of Metal Matrix Composites. Springer.
- Izamshah, R., Azam, M.A., Hadzley, M., Md Ali, M.A., Kasim, M.S., Abdul, M.S., Aziz (2013). *Study of surface roughness on milling unfilled-polyetheretherketones engineering plastics*. Procedia Engineering 68, 654 – 660.
- Jia, Z., Ma, J., Song, D., Wang, F., Liu, W. (2018). *A review of contouring-error reduction method in multi-axis CNC machining*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 125, 34–54.
- Kantaros, Karalekas, D. (2013). *Fiber Bragg grating based investigation of residual strains in ABS parts fabricated by fused deposition modeling process*. Materials and Design 50, 44–50.
- Kohser, R.A., Garmo, E.P., Black, J.T. (1988). *Materiales y procesos de fabricación*. Editorial Reverté.
- Kumbhar, N.N., Mulay, V. (2016). *Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review*. J. Inst. Eng. India Ser. C, DOI: 10.1007/s40032-016-0340-z
- Lakić, G.G., Kramar, D., Kopač, J. (2014). *Metal Cutting. Theory and Applications*. Editorial Universidad de Banja Luka, Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Lu, B., Li, D., Tian, X (2015). *Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing*. Engineering 1, 85–89.
- Maurotto, A., Tsivoulas, D., Gu, Y., Burke, M.G. (2017). *Effects of machining abuse on the surface properties of AISI 316L stainless steel*. International Journal of Pressure Vessels and Piping 151, 35-44.

Montgomery, D.C. (2001). *Design and analysis of experiments*. Editorial John Wiley&Sons, Inc.

Noorani (2018). *3D Printing*. Editorial CRC Press

OECD (2016). *OECD science, technology and innovation outlook 2016: Megatrends affecting science, technology and innovation*.

Oropallo, W., Piegl, L.A. (2016). *Ten challenges in 3D printing*. Engineering with Computers 32, 135–148.

Petropoulos, G., Mata, F., Davim, J.P. (2008). *Statistical study of surface roughness in turning of peek composites*. Materials and Design 29, 218–223.

Rietzel, D., Friedrich, M., Osswald, T.A. (2017). Additive Manufacturing. En Tim A. Osswald (Ed.). *Understanding Polymer Processing* (147-169). Editorial: Hanser.

Sanz, A., Negre, A.A., Fernández, R., Calvo, F. (2013). *Comparative study about the use of two and three-dimensional methods in surface finishing characterization*. Procedia Engineering 63, 913 –921.

Sartori, S., Ghiotti, A., Bruschi, S. (2017). *Temperature effects on the Ti6Al4V machinability using cooled gaseous nitrogen in semi-finishing turning*. Journal of Manufacturing Processes 30, 187–194.

Strano, G., Hao, L., Everson, R.M., Evans, K.E. (2013). *Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting*. Journal of Materials Processing Technology 213, 589–597.

Tschätsch (2009). *Applied Machining Technology*. Editorial Springer.

Umaras, E., Marcos, Tsuzuki, M.S.G. (2017). *Additive Manufacturing – Considerations o Geometric Accuracy and Factors of Influence*. IFAC Papers Online 50-1, 14940-14945.

UNE-EN ISO 25178-6:2010 (2010). *Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 6: Classification of methods for measuring surface texture*. ISO.

UNE-EN ISO 4287:1997 + Technical Corrigendum 1 (1999). *Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial*. ISO.

UNE-EN ISO 4288:1996 (1998). *Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial*. ISO

UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 (2017). *Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología*. ISO

Villeta, M., Agustina, B., Sáenz de Pipaón, J.M., Rubio, E.M. (2012). *Efficient optimization of machining processes based on technical specifications for surface roughness: application to*

magnesium pieces in the aerospace industry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 60, 1237-1246.

Yamane, Y., Ryutaro, T., Tadanori, S., Ramirez, I.M., Keiji, Y. (2017). *A new quantitative evaluation for characteristic of surface roughness in turning*. Precision Engineering 50, 20–26.

Yamazaki, T. (2016). *Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining*. Procedia CIRP 42, 81-86.

