



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO DE LA RUGOSIDAD
DE PROBETAS FABRICADAS
EN FDM**

Alumno: José González Martínez

Tutor: Prof. D. Alberto J. García Collado
Dpto: Ing. Mecánica.

Junio, 2019



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Don Alberto J. García Collado, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Estudio de la rugosidad en probetas fabricadas en FDM, que presenta José González Martínez, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2019

El alumno:

Los tutores:

José González Martínez

Alberto J. García Collado

Contenido del Trabajo de Fin de Grado

Índice de ilustraciones:.....	4
Índice de tablas:.....	4
Índice de gráficas:	4
1. Introducción	6
1.1. Planteamiento	6
1.2. Estructura.....	6
2. Estado del arte.....	7
2.1. ¿Qué es el FDM?	7
2.2. Estudios previos.....	7
2.3. Rugosidad	9
3. Objetivo.....	12
4. Equipo y materiales.....	12
5. Metodología	16
5.1. Introducción.....	16
5.2. Planificación pre-experimental.....	16
5.2.1. Reconocimiento y declaración del problema.	16
5.2.2. Selección de la variable respuesta.	17
5.2.3. Selección de los factores, niveles y rangos.	17
5.3. Elección del diseño experimental.	18
5.4. Realización del experimento.	19
5.4.1. Creación de las probetas.....	19
5.4.2. Medición de la rugosidad superficial.	21
5.5. Análisis estadístico.	22
5.6. Conclusiones.....	22
6. Resultados y discusión.....	23
7. Conclusiones y trabajos futuros	30
8. Bibliografía	31

Índice de ilustraciones:

Ilustración 1. Representación real del FDM.....	7
Ilustración 2. Modelo simplificado del FDM	7
Ilustración 3. Perfil de rugosidad y de ondulación.....	11
Ilustración 4. Perfiles Norma ISO 4287	11
Ilustración 5. Filamento de PETG con fibra de carbono.....	13
Ilustración 6. Filamento de PETG	13
Ilustración 7. Filamento de limpieza.....	14
Ilustración 8. Impresora TEVO Little Monster	14
Ilustración 9. Interfaz Ultimaker CURA	15
Ilustración 10. Equipos para medición y toma de datos.....	15
Ilustración 11. Perspectiva probeta.....	19
Ilustración 12. Probeta segmentada con el software CURA.....	19
Ilustración 13. Acabado superficial con un extrusor nuevo	20
Ilustración 14. Acabado superficial con un extrusor deteriorado	20
Ilustración 15. Extrusor VOLCANO 0.8mm	20
Ilustración 16. Calibración del rugosímetro SurfTest SJ-210	21
Ilustración 17. Midiendo la rugosidad.....	22

Índice de tablas:

Tabla 1. Características PETG reforzado con fibra de carbono	13
Tabla 2. Características PETG	13
Tabla 3. Características filamento de limpieza.....	14
Tabla 4. Características impresora TEVO Little Monster.....	14
Tabla 5. Combinaciones.....	19
Tabla 6. Rugosidad R_a para cada ángulo de inclinación en todas las probetas.....	23
Tabla 7. Resultados ANOVA	29

Índice de gráficas:

Gráfica 1. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG+C (0.6mm)	25
Gráfica 2. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG (0.6mm)	25
Gráfica 3. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG+C (0.8mm)	26
Gráfica 4. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG (0.8mm)	26
Gráfica 5. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG VS PETG+C (0.6mm)	27
Gráfica 6. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG VS PETG+C (0.8mm)	27
Gráfica 7. Efectos principales. PETG VS PETG+C	28
Gráfica 8. Ajuste a polinomio.	28
Gráfica 9. Variaciones de parámetros	29

1. Introducción

1.1. Planteamiento

La humanidad, durante cientos de años, ha tenido la necesidad de fabricar para satisfacer sus necesidades. A lo largo de la historia se han desarrollado distintos tipos y métodos de fabricación, entre los que se encuentra el FDM (Fused Deposition Modeling), conocido también como impresión 3D.

La impresión 3D, desarrollada por S. Scott Crump, nace en la década de 1980 y empieza a comercializarse a partir del año 1990. Desde entonces ha ido evolucionando y ha ganado interés entre los usuarios. Hoy en día, con el auge de la Industria 4.0, es una tecnología que se ha abaratado mucho y que está al alcance de cualquier bolsillo.

1.2. Estructura

Este Trabajo de Fin de Grado cuenta con 8 capítulos, en los que se incluye una bibliografía. El contenido de cada uno de los capítulos se resume a continuación:

Introducción: Se establece un concepto general sobre la impresión 3D, o FDM y se describe la estructura del TFG.

Estado del arte: Contiene una recopilación de artículos de diferentes autores que tratan sobre el estudio de la rugosidad en probetas fabricadas mediante FDM.

Objetivo: Se describe el alcance de este trabajo experimental.

Equipo y materiales: Este capítulo incluye una lista con todos los materiales y equipos necesarios para llevar a cabo el estudio. Se describe cada uno de ellos y se adjuntan imágenes.

Metodología: Se presenta el camino a seguir para llevar a cabo la parte experimental del TFG. Se sigue un proceso que nos permita conocer una serie de datos a partir de los cuales poder realizar un análisis estadístico que nos muestre resultados fiables.

Resultados y discusión: Se muestran los resultados obtenidos tras el experimento. Así como todas las distintas combinaciones de parámetros que se necesitan realizar para llevar a cabo el estudio.

Conclusión: Recoge las conclusiones obtenidas del TFG.

2. Estado del arte

2.1. ¿Qué es el FDM?

El modelado por deposición fundida (FDM) es uno de los procesos más utilizados para la fabricación de prototipos y modelos con una producción a pequeña escala, sobre todo por su bajo coste respecto a otras tecnologías. El proceso de fabricación comienza con un modelo en 3 dimensiones de la pieza a fabricar y funciona gracias a la capacidad aditiva que tiene el plástico una vez fundido, ya que este se deposita en forma de capas para así ir creando el modelo a medida que aumenta la cota en el eje Z. El filamento viene enrollado en una bobina y se funde en el extrusor, donde se alcanza una temperatura (elegida por el operario de la máquina y distinta para cada material), siempre superior a la temperatura de fusión del material. El movimiento en los ejes X, Y y Z depositan el material fundido en el lugar adecuado.

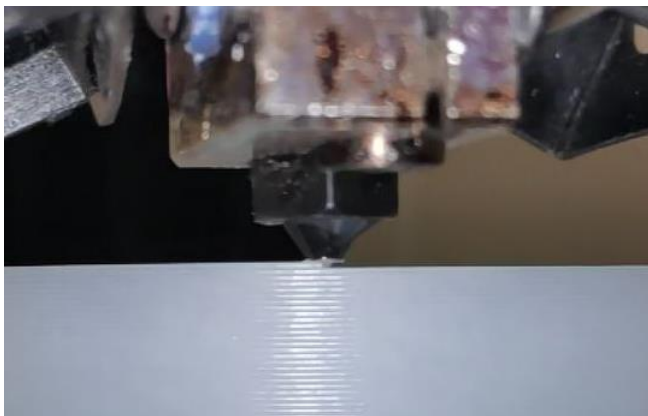


Ilustración 1. Representación real del FDM

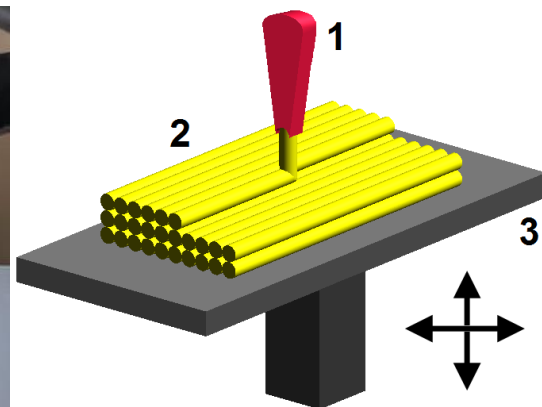


Ilustración 2. Modelo simplificado del FDM

2.2. Estudios previos

Kim et al., (2018) analizaron una única pasada de filamento extruido. Realizaron los ensayos experimentales variando parámetros como la distancia entre nozzle y la plataforma de impresión y la velocidad de impresión. Buscaron relaciones entre grosor y anchura de la línea de filamento extruido probando distintas combinaciones de las variables. Los autores llegan a la conclusión de que el grosor de una línea no será uniforme (y por tanto tendrá peor acabado superficial) siempre y cuando este grosor sea mayor que el diámetro del extrusor.

Xinlong Huang et al., (2018) hicieron una serie de pruebas con probetas que tenían forma de cubo (30x30x35 mm). Midieron la rugosidad de las paredes (SR) y de la zona superior (TR) cambiando parámetros como altura de capa, velocidad de impresión, porcentaje de relleno y tipo de material (PLA, ABS y ABS+) Descubrieron que la combinación optima de parámetros es distinta para la zona superior que para los laterales de la pieza. Para la zona superior la influencia de cada parámetro tiene el siguiente orden de importancia: Altura de capa, porcentaje de relleno de la pieza, tipo de material, velocidad de impresión. Para la zona lateral la influencia de cada parámetro tiene el siguiente orden de importancia: Altura de capa, tipo de material, porcentaje de relleno, velocidad de impresión. Con los resultados experimentales llegaron a la conclusión de que los parámetros de altura de capa, tipo de material y porcentaje de relleno son significantes para la rugosidad de la zona superior, mientras que la altura de capa es el único parámetro importante para la rugosidad de las zonas laterales.

Leipeng Yang et al., (2018) realizaron una serie de ensayos experimentales buscando los parámetros óptimos de fabricación de PLA mediante FDM. En los ensayos midieron rugosidad superficial (a 0 grados) y resistencia a tracción de una probeta normalizada impresa con PLA. Los autores estudiaron 5 parámetros: diámetro del nozzle, temperatura de extrusión, velocidad de extrusión, altura de capa y velocidad de impresión. Encontrando que el diámetro del nozzle como un factor muy importante en la medida de la rugosidad, ya que un nozzle más grande implica menos pasadas para cerrar una superficie superior con un ángulo de 0 grados respecto a la placa de impresión.

L. Vargas et al., (2004) Velocidad de impresión, de extrusión y altura de capa son unos parámetros significantes para determinar la calidad superficial. Altura de capa de 0.86mm y una velocidad de 0.14mm/seg produjeron una buena rugosidad junto con la mayor resistencia a la tracción.

Alsoufi and Elsayed., (2018). Miden la rugosidad superficial en probetas con un 100% de relleno fabricadas en una impresora 3D convencional, cambian parámetros como altura de capa, diámetro del nozzle, velocidad de impresión, tipo de material (PLA, PLA+, ABS, ABS+) Descubren que dimensionalmente las piezas con PLA y PLA+ varían un 3% mientras que las de ABS y ABS+ varían hasta un 34.53% debido a un fenómeno llamado warping. En la cara superior de las probetas fabricadas con ABS y ABS+ se presenta una distribución irregular de la rugosidad. Las probetas de PLA y PLA+ tienen un excelente perfil ratio con desviación constante, mientras que las de ABS y ABS+ muestran un perfil inaceptable con desviaciones

aleatorias. Las probetas de PLA y PLA+ tienen unos valores de oblicuidad mucho más pequeños que las de ABS y ABS+

Galantucci et al., (2018) Se estudia la relación entre el FDM y el aspecto superficial (rugosidad) de los prototipos fabricados. Utilizan procesos químicos para mejorar el aspecto superficial. En la primera fase del experimento fabrican las probetas y miden su rugosidad superficial. La altura de capa no solo afecta a la rugosidad de los laterales si no que también afecta a la rugosidad superficial ya que la cantidad de material que se extruye es mayor. En la segunda fase, las probetas se someten a un tratamiento superficial químico. Las probetas se encogían menos de un 1% y ganaban peso también en un 1%. Repiten el tratamiento químico en una figura y consiguen reducir la rugosidad en hasta 11.5 μ m.

Reddy et al., (2018) La rugosidad varía al cambiar los valores de la altura de capa e inclinación. El relleno de la pieza es un parámetro no significativo.

Pérez et al., (2018) La altura de capa es un parámetro claramente significativo pero además también lo es el grosor de la pared (número de contornos) al que no se le daba tanta importancia en otras investigaciones. La influencia de estos valores se verifica con el uso de las correlaciones de Spearman y Kendall. La temperatura de impresión y el patrón de relleno de la pieza no tienen una clara influencia en la rugosidad superficial. El efecto de la altura de capa y el grosor de la pared disminuye la calidad superficial cuando uno o los dos parámetros aumentan.

Adel et al., (2018) En la búsqueda por mejorar la calidad superficial (rugosidad) de las probetas impresas mediante FDM, aparecen nuevos tratamientos post-impresión. En este caso se suministra un chorro de aire caliente sobre la pieza que funde mínimamente el plástico y mejora la calidad superficial de la pieza. Encuentra los valores óptimos para una temperatura del aire de 235 grados y una velocidad inferior a 20mm/s.

2.3. Rugosidad

El avance en la industria y el desarrollo de las nuevas tecnologías hacen que la calidad superficial sea cada vez más importante en el ámbito de la fabricación. La rugosidad cobra importancia con el uso del FDM ya que es una tecnología que presenta grandes limitaciones en

la calidad superficial y por ello aumenta el interés en su estudio. (Albu SC, 2018) (Di Angelo L, Di Stefano P, Marzola A, 2017)

Las superficies reales, por muy perfectas que sean, siempre presentarán pequeños defectos debidos al proceso de fabricación. Estos desperfectos o irregularidades tienden a formar un patrón a lo largo de toda la pieza. En esta textura superficial se distinguen dos componentes distintas: rugosidad y ondulación. La rugosidad está formada por los surcos que deja el proceso de fabricación mientras que la ondulación se refiere al conjunto de irregularidades repetidas con forma de onda.

Para definir una superficie es necesario dividir el tipo de defecto en dos grupos: errores macrogeométricos y microgeométricos. En los primeros se incluyen errores de forma como la ondulación mientras que en los segundos se incluye la rugosidad.

Para medir la rugosidad, se recorre la superficie con un palpador que produce una señal eléctrica proporcional a las irregularidades que encuentra en la superficie, el perfil de estas irregularidades se llama perfil efectivo. A partir de este perfil efectivo se obtiene el perfil de rugosidad, que está filtrado.

En la Norma ISO 4287 (UNE-EN ISO 4287:1997, 1999) se definen los distintos perfiles y filtros:

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.

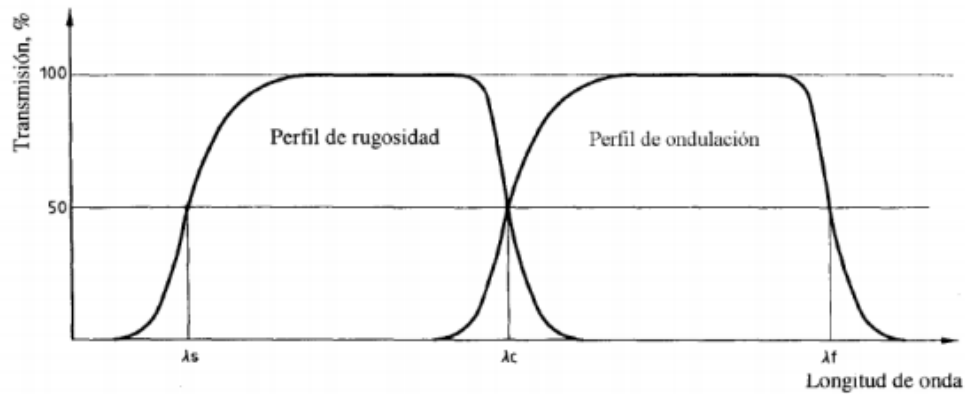


Ilustración 3. Perfil de rugosidad y de ondulación

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).

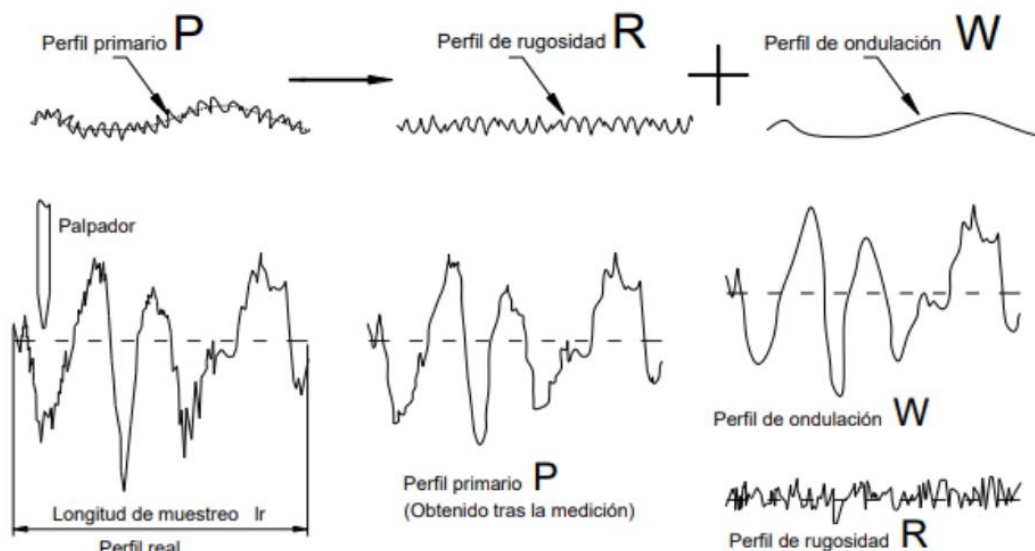


Ilustración 4. Perfiles Norma ISO 4287

Aparecen nuevas técnicas de post-procesamiento para mejorar el acabado superficial de las piezas fabricadas con FDM (Adel et al., 2018) (Kumbhar NN y Mulay AV, 2018) (Garg A, Bhattacharya A, Batish A, 2017) (Nguyen TK, Lee BK, 2018)

3. Objetivo

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es ampliar el conocimiento sobre el estudio de la rugosidad superficial en probetas fabricadas por FDM empleando materiales reforzados con microfibra de carbono. Se estudiarán los parámetros que más influyen en la calidad superficial de varias probetas, pudiendo así llegar incluso a descartar parámetros que no tengan influencia alguna. Además se desea realizar una comparativa entre dos filamentos (de los cuales uno contiene un 10% de fibra de carbono) y ver como se relaciona la calidad superficial con el contenido en carbono del material.

4. Equipo y materiales

Para llevar a cabo el experimento se han utilizado los siguientes recursos:

- Materiales de impresión: Filamento de PETG y PETG reforzado con fibra de carbono.
- Filamento de limpieza Smart Clean. Recomendable su uso después de cada impresión con materiales que contengan cualquier tipo de microfibra.
- Impresora delta TEVO Little Monster con extrusor VOLCANO.
- Software Ultimaker CURA 3.6.0.
- Rugosímetro Surftest SJ 210 del fabricante Mitutoyo.

¿Qué es el PETG? El PETG es uno de los plásticos más utilizados en impresión 3D y en todo el mundo. Es un copolímero que nace tras combinar el PET (Polyethylene terephthalate) con glicol. Respecto a la impresión 3D, este material nos ofrece una buena resistencia a las altas y bajas temperaturas, como el ABS, pero con la facilidad de ser impreso como el PLA. Es un material que no desprende olores al imprimirse, tiene buena resistencia a los agentes químicos, poca deformación durante su impresión y una muy buena adhesión entre capas. (Szykiedans K, Credo W, Osiński D)

PETG reforzado	
Fabricante.	Nanovia
Color	Negro mate
Composición.	PETG+10% carbono
Velocidad de impresión.	30-70 mm/s
Densidad.	1.08 g/cm ³
T ^a de Impresión.	200-240 °C
Diámetro filamento.	1,75mm
Diámetro mínimo Nozzle.	0.5 (>0.4) mm
Longitud fibras de carbono.	251 µm
Diámetro fibras de carbono.	7+/-2 µm
Fibras > 100 µm	70%
Cantidad de fibras.	9.10 ⁶ Unidades/gramo

Tabla 1. Características PETG reforzado con fibra de carbono



Ilustración 5. Filamento de PETG con fibra de carbono

PETG Smartfil	
Fabricante.	Smart Materials 3D
Color.	Negro brillante
Velocidad de impresión.	40 mm/s
Densidad.	1.27 g/cm ³
T ^a de Impresión.	210-250 °C
Diámetro filamento.	1,75mm
Diámetro mínimo Nozzle.	Cualquiera

Tabla 2. Características PETG



Ilustración 6. Filamento de PETG

Filamento de limpieza Smart Clean	
Fabricante.	Smart Materials 3D
Color.	Natural
Velocidad de impresión.	40 mm/s
Densidad.	1.1 g/cm ³
Tª de Impresión.	180-260 °C
Diametro filamento.	1,75mm

Tabla 3. Características filamento de limpieza



Ilustración 7. Filamento de limpieza

Little Monster 3D Printer	
Fabricante	TEVO 3D
Dimensiones de impresión.	Ø340x500 mm
Material del chasis	Aluminio
Dimensiones impresora.	1200x600x600 mm
Velocidad máxima.	300 m/s
Tª máxima extrusor	280 °C
Tª máxima placa impresión	120 °C

Tabla 4. Características impresora TEVO Little Monster



Ilustración 8. Impresora TEVO Little Monster

Ultimaker CURA 3.6.0 (Ilustración 9) es el software de segmentación que se utiliza en este experimento. Ha sido configurado a mano ya que el fabricante (TEVO) no proporciona soporte con este software. El software de segmentación es aquel que se encarga de transformar un sólido (.STL) en el lenguaje que lee la impresora (.GCODE) En el menú de ajustes seleccionamos los parámetros que queremos que tenga la impresión, como la altura de capa, grosor de las paredes, grosor de las capas superiores e inferiores, velocidad de impresión y desplazamiento, cantidad de relleno y su patrón, temperatura de impresión, etc.

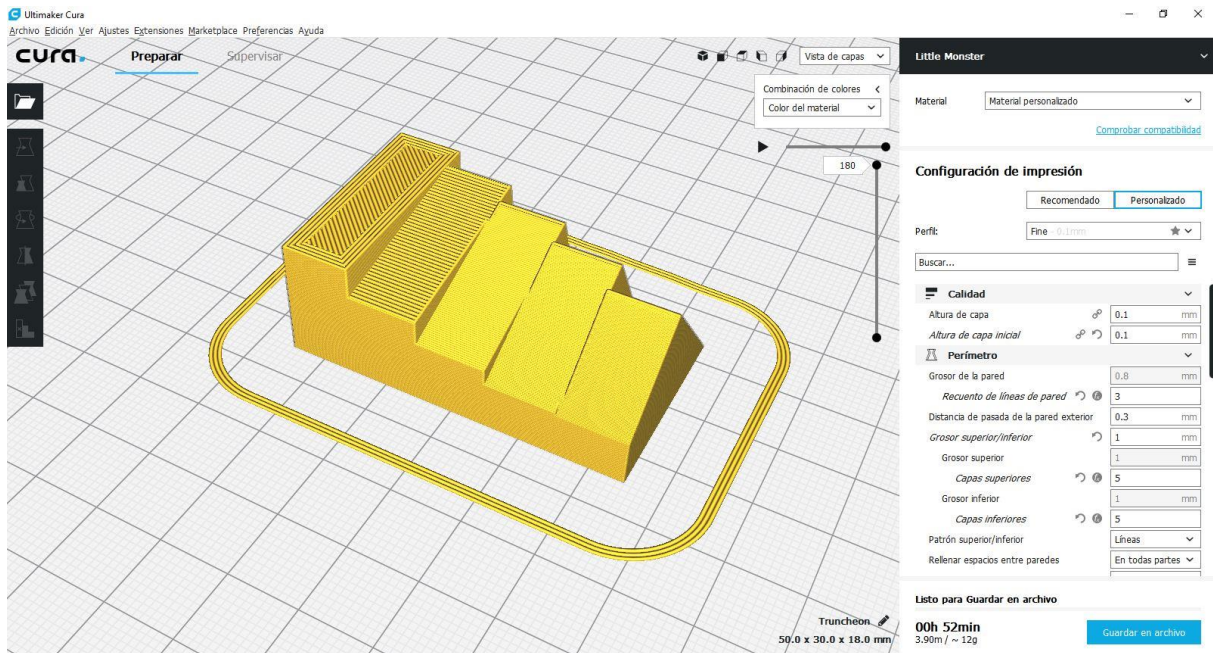


Ilustración 9. Interfaz Ultimaker CURA

El **rugosímetro Surftest SJ 210** del fabricante Mitutoyo es el instrumento empleado para medir la rugosidad en cada uno de los planos de nuestro Truncheon. Cuenta con una pantalla LCD de 2.4 pulgadas donde nos pondrá la medida de la rugosidad Ra en μm .



Ilustración 10. Equipos para medición y toma de datos

5. Metodología

5.1. Introducción.

En este capítulo se explica el método que se lleva a cabo para la realización del experimento. Se necesita un diseño experimental del cual obtener datos para realizar un posterior análisis estadístico. Se puede seguir el siguiente procedimiento (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.

5.2. Planificación pre-experimental.

5.2.1. Reconocimiento y declaración del problema.

El acabado superficial que se consigue con la fabricación aditiva es muy inferior al que se consigue con otras técnicas o procesos de fabricación, por eso, en este experimento se pretende estudiar la influencia de varios parámetros de impresión en el acabado superficial de la pieza.

5.2.2. Selección de la variable respuesta.

Como variable respuesta se escoge la rugosidad superficial ya que es la característica más empleada a nivel mundial para determinar la calidad superficial de una pieza. En concreto se considerará la Rugosidad media (R_a) expresada en micras (μm)

Además de los posibles parámetros que se pueden variar a la hora de realizar una impresión en 3D, tenemos que tener muy en cuenta el desgaste de la máquina, sobre todo si imprimimos con materiales que contienen algún refuerzo con cualquier tipo de microfibra. En este caso se realizan ensayos con PETG con un 10% de contenido de carbono, el cual es muy abrasivo y desgasta el extrusor (nozzle) de la impresora, por ello los ensayos se han realizado siempre con un extrusor nuevo.

5.2.3. Selección de los factores, niveles y rangos.

En este apartado se seleccionan los factores o parámetros influyentes en la rugosidad superficial, así como sus valores máximos y mínimos. Con estos valores sacaremos todas las distintas combinaciones de parámetros disponibles en nuestro experimento. (Xinlong Huang et al., 2018) (Leipeng Yang et al., 2019) (Pérez et al., 2018)

Los factores de los que depende nuestro experimento, en este caso, serán:

- **Material:** Se realizarán piezas con PETG y PETG con un contenido del 10% de microfibra de carbono.
- **Ángulo de inclinación de la superficie:** Varía desde los 10 hasta los 90 grados, en saltos de 10 grados. En total 9 inclinaciones distintas para cada pieza.
- **Diámetro del extrusor:** Se utilizan dos extrusores de acero endurecido con diámetros de 0.6mm y 0.8mm
- **Altura de capa:** Es la distancia en Z entre cada una de las capas que realiza la impresora durante el proceso de fabricación. Los ensayos se realizarán con alturas de 0.1 y 0.2 mm

●Grosor de la pared: El número de perímetros variará entre 1 y 3, consiguiendo grosores de 0.6mm y 1.8mm en el caso del extrusor de 0.6mm y 0.8mm y 2.4mm en el caso del extrusor de 0.8mm

●Velocidad de impresión: Se realizarán los ensayos con dos valores de velocidad, siendo 30mm/s y 60mm/s respectivamente.

5.3. Elección del diseño experimental.

El objetivo de este experimento es el estudio de la influencia de varios parámetros en la medida de la rugosidad media (R_a). Por tanto, una vez conocidos los parámetros y los valores de los mismos, podremos realizar las distintas combinaciones (Tabla 5). Tenemos 6 variables distintas ya mencionadas anteriormente, pero el número de ensayos se reduce a 32 ya que todas las inclinaciones se encuentran la misma pieza.

Pieza	Ángulos	Tª plataforma	Tª extrusión	Material	Extrusor (mm)	Perímetros	Velocidad (mm/s)	Altura de capa (mm)
1	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,6	1	60	0,1
2	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,6	1	60	0,2
3	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,6	1	30	0,1
4	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,6	1	30	0,2
5	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,6	3	60	0,1
6	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,6	3	60	0,2
7	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,6	3	30	0,1
8	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,6	3	30	0,2
9	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,6	1	60	0,1
10	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,6	1	60	0,2
11	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,6	1	30	0,1
12	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,6	1	30	0,2
13	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,6	3	60	0,1
14	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,6	3	60	0,2
15	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,6	3	30	0,1
16	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,6	3	30	0,2
17	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,8	1	60	0,1
18	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,8	1	60	0,2
19	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,8	1	30	0,1
20	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,8	1	30	0,2
21	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,8	3	60	0,1
22	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,8	3	60	0,2

23	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,8	3	30	0,1
24	10° - 90°	70°C	235°C	PETG + C	0,8	3	30	0,2
25	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,8	1	60	0,1
26	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,8	1	60	0,2
27	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,8	1	30	0,1
28	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,8	1	30	0,2
29	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,8	3	60	0,1
30	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,8	3	60	0,2
31	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,8	3	30	0,1
32	10° - 90°	70°C	235°C	PETG	0,8	3	30	0,2

Tabla 5. Combinaciones

5.4. Realización del experimento.

5.4.1. Creación de las probetas

Antes de medir la rugosidad de la pieza es necesario fabricarla, para ello debemos crear primero un modelo CAD, en este caso, el software empleado ha sido Catia V5, desarrollado por Dassault Systems (Ilustración 11). Una vez creado el sólido, debemos exportarlo al formato .STL. El software Ultimaker CURA es capaz de laminar y agregar los parámetros de impresión a nuestro sólido en formato .STL (Ilustración 12). Después se genera el archivo .GCODE que leerá la impresora (TEVO Little Monster)

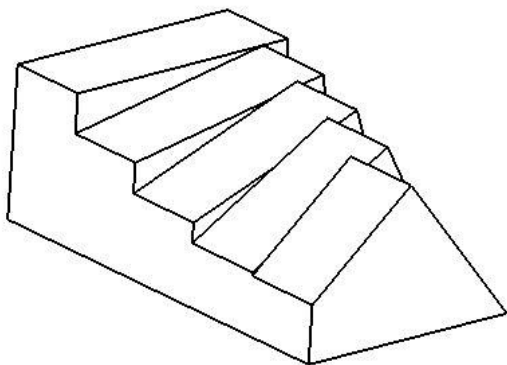


Ilustración 11. Probeta en perspectiva

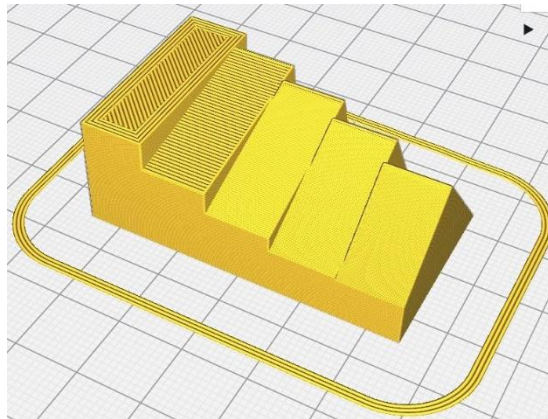


Ilustración 12. Probeta segmentada en CURA

Una vez se tienen los archivos .GCODE, uno para cada pieza, será la hora de imprimir, antes de ello debemos instalar el nuevo nozzle de acero endurecido (Ilustración 15) y realizar una nivelación y calibración de la impresora, que se realiza automáticamente ya que este modelo de impresora cuenta con sensor BL-Touch. Por último tendremos que introducir el filamento (PETG o PETG+C) en la impresora.

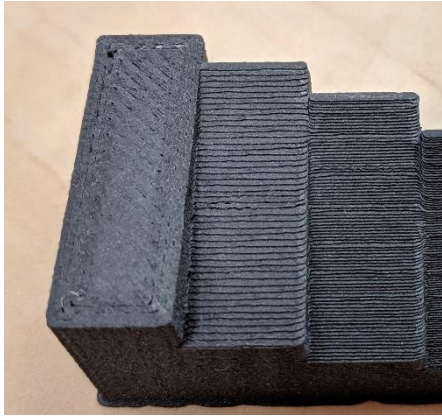


Ilustración 13. Acabado superficial con un extrusor nuevo

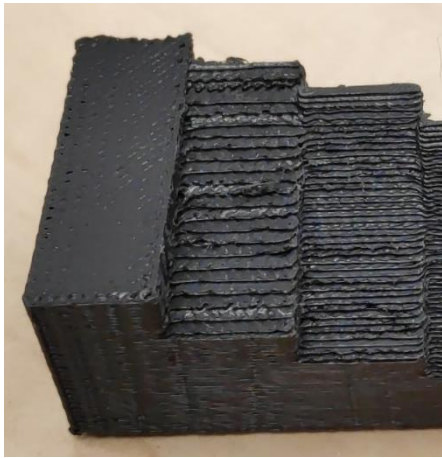


Ilustración 15. Acabado superficial con un extrusor deteriorado



Ilustración 14. Extrusor VOLCANO 0.8mm

También se debe calibrar el instrumento de medida, en este caso el Surftest SJ-210 de Mitutoyo. El manual de instrucciones indica cómo hacerlo, para ello se debe medir en la placa de calibración, que tiene una rugosidad R_a de 3 micras y actualizar el valor que lee el micrómetro. (Ilustración 16.)



Ilustración 17. Calibración del rugosímetro Surftest SJ-210

5.4.2. Medición de la rugosidad superficial.

Una vez estén las probetas fabricadas, se realizará la medida de la rugosidad. Con el rugosímetro calibrado y guiándose del manual de instrucciones suministrado por el fabricante se busca la tabla de la NORMA ISO 1997 donde indica, tras hacer un par de medidas de R_{Sm} , la longitud de muestreo λ_c y la longitud de evaluación λ_s que se debe emplear. Se añaden estos dos datos a la configuración del rugosímetro, que finalmente queda de la siguiente manera:

Norma ISO 1997, Perfil R, Filtro Gauss, $\lambda_c=0.8$, $\lambda_s=2.5$, $N=5$, Velocidad=0.5mm/s

Se mide la rugosidad en los 9 planos de distintas inclinaciones que posee cada probeta (Ilustración 17), ejecutando 3 medidas por plano, un total de 27 medidas por cada pieza. Como se tienen 32 ensayos distintos, nos saldrá un total de $32 \times 27 = 864$ medidas distintas de rugosidad. Para cada plano se realizará la media de las 3 medidas obtenidas de rugosidad.

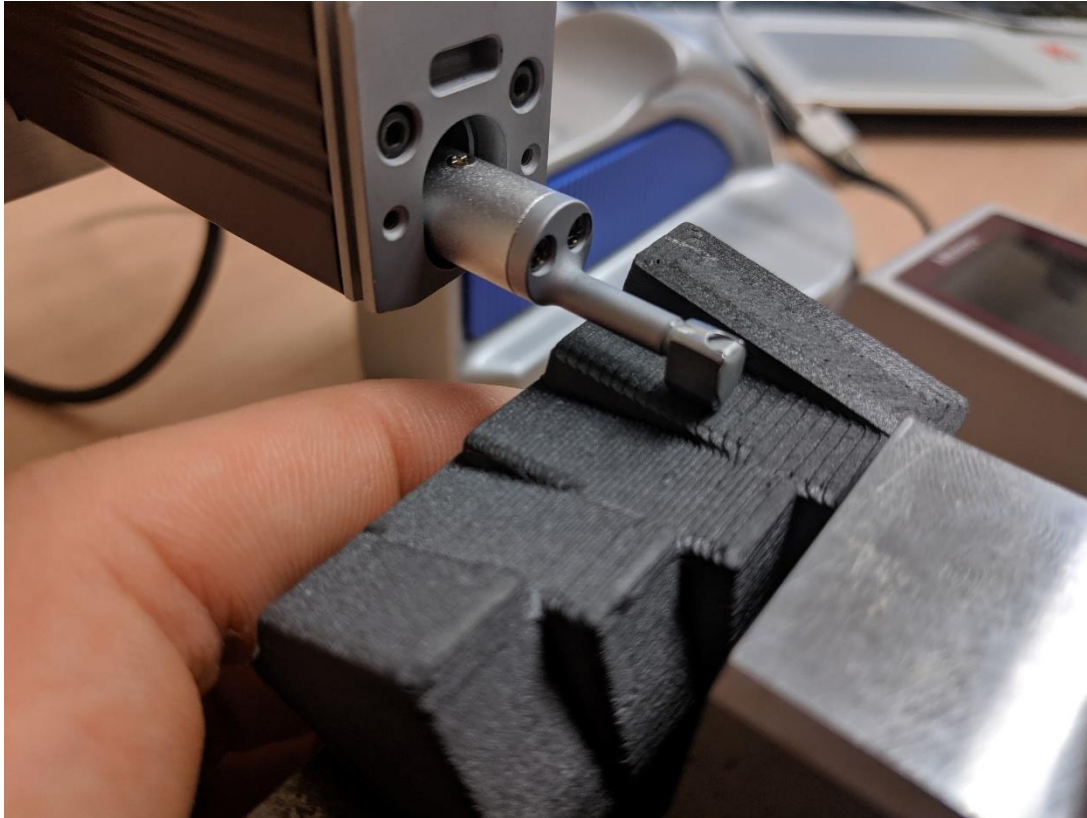


Ilustración 18. Midiendo la rugosidad

5.5. Análisis estadístico.

Una vez se tienen todas las medidas de rugosidad es necesario ordenarlas adecuadamente para poder realizar el análisis. Las 864 medidas pasarán a ser 288 ya que para el análisis realizaremos la media de cada 3 medidas de rugosidad. Teniendo en cuenta que tenemos 32 ensayos y cada uno de ellos dispone de 9 planos a distintas inclinaciones, el número real de datos con el que se realizará el análisis estadístico es de $32 \times 9 = 288$ datos.

Se realizará un Análisis de Varianza (ANOVA) con la ayuda del Software Wolfram Mathematica, para así poder conocer que variables o parámetros son más o menos significativos en nuestro experimento.

5.6. Conclusiones.

Una vez realizado el experimento podremos describir con mayor profundidad los parámetros que afectan más a la rugosidad superficial. En este caso la altura de capa y la inclinación de la superficie eran los parámetros más significativos.

6. Resultados y discusión

Tras medir la rugosidad R_a de todas las probetas en todos sus ángulos y calcular la media de estas rugosidades, se puede elaborar una tabla (Tabla 6) como la siguiente:

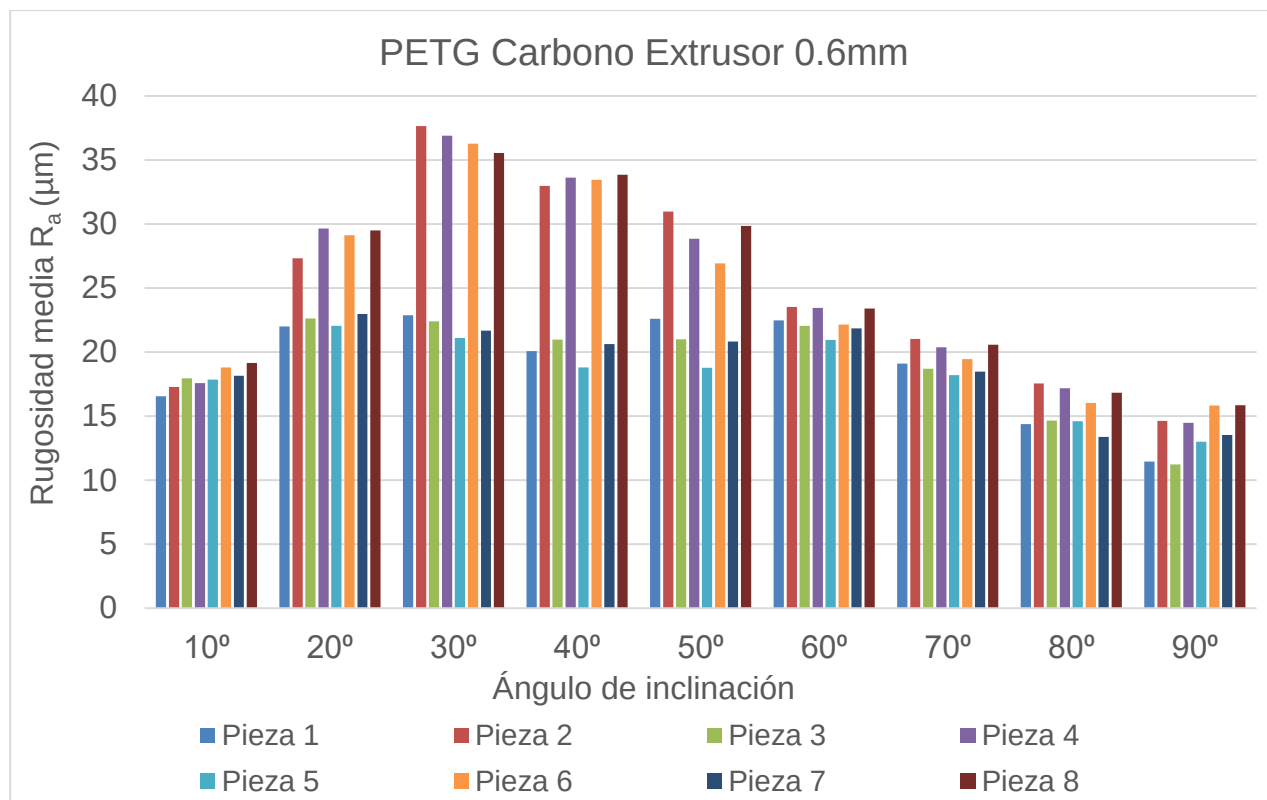
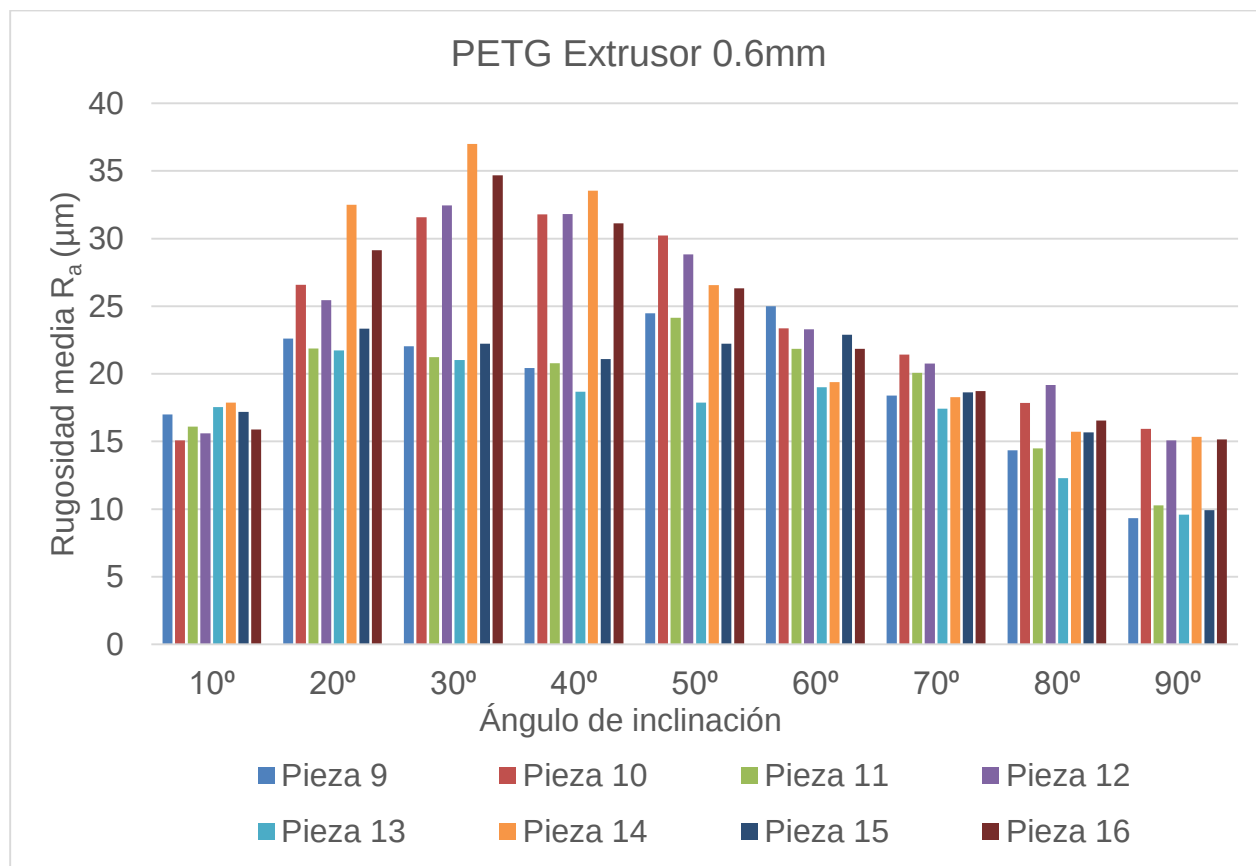
Rugosidad R_a (μm)									
	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Pieza 1	16,559	22,0033	22,867	20,0707	22,6003	22,476	19,106	14,3833	11,4363
Pieza 2	17,2853	27,3273	37,66	32,9777	30,9717	23,5323	21,0223	17,5413	14,6117
Pieza 3	17,9537	22,625	22,41	20,977	21,0027	22,0603	18,7047	14,6553	11,2237
Pieza 4	17,5703	29,6623	36,9123	33,6403	28,8423	23,4613	20,3853	17,1713	14,4647
Pieza 5	17,8363	22,0577	21,109	18,8087	18,778	20,9533	18,194	14,588	13,0083
Pieza 6	18,7973	29,1393	36,275	33,46	26,9167	22,1583	19,4467	16,0317	15,829
Pieza 7	18,153	22,9687	21,6763	20,6263	20,8277	21,8483	18,4667	13,3647	13,5233
Pieza 8	19,1393	29,514	35,557	33,8613	29,8437	23,402	20,5673	16,8173	15,854
Pieza 9	16,986	22,6167	22,0297	20,4207	24,4663	25,0037	18,393	14,3473	9,32167
Pieza 10	15,0757	26,5853	31,5757	31,7883	30,2233	23,3533	21,4217	17,8527	15,925
Pieza 11	16,098	21,8807	21,2413	20,7757	24,1353	21,841	20,0687	14,4873	10,2743
Pieza 12	15,608	25,4417	32,45	31,8167	28,8193	23,2947	20,7623	19,1767	15,073
Pieza 13	17,54	21,7393	21,0223	18,6813	17,8603	19,002	17,412	12,2967	9,58433
Pieza 14	17,867	32,4933	36,9847	33,5463	26,5647	19,389	18,2647	15,7127	15,331
Pieza 15	17,1827	23,3423	22,231	21,0827	22,2223	22,8787	18,6373	15,6707	9,92233
Pieza 16	15,8823	29,1443	34,673	31,135	26,3253	21,8437	18,7317	16,5393	15,1607
Pieza 17	16,0873	21,258	22,5253	21,5737	22,897	20,8357	18,6723	14,5627	12,181
Pieza 18	17,663	28,2757	34,683	32,441	27,849	20,9017	19,2663	16,4907	15,3853
Pieza 19	15,4377	22,1763	21,239	19,1347	21,276	21,626	19,758	14,1613	10,6393
Pieza 20	17,2273	28,5937	35,7963	34,4173	26,9343	20,8987	21,157	16,2383	15,1673

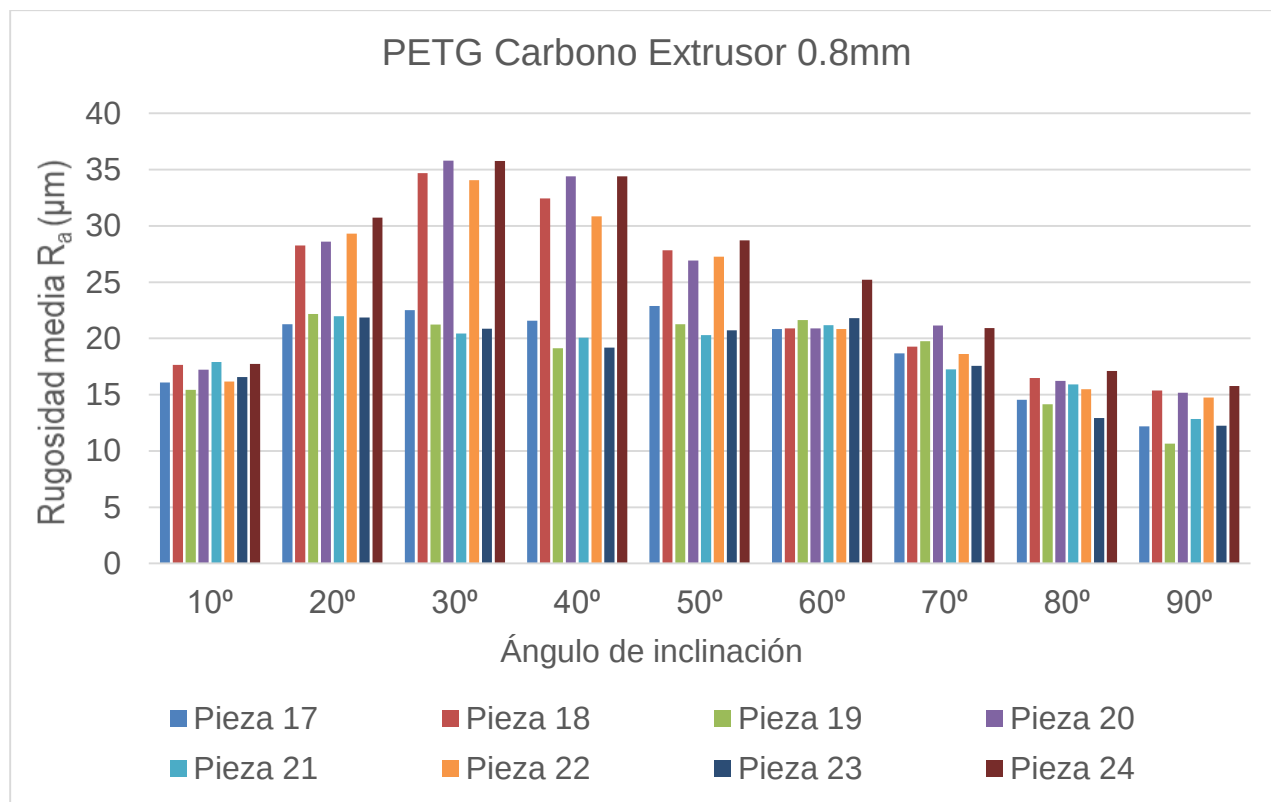
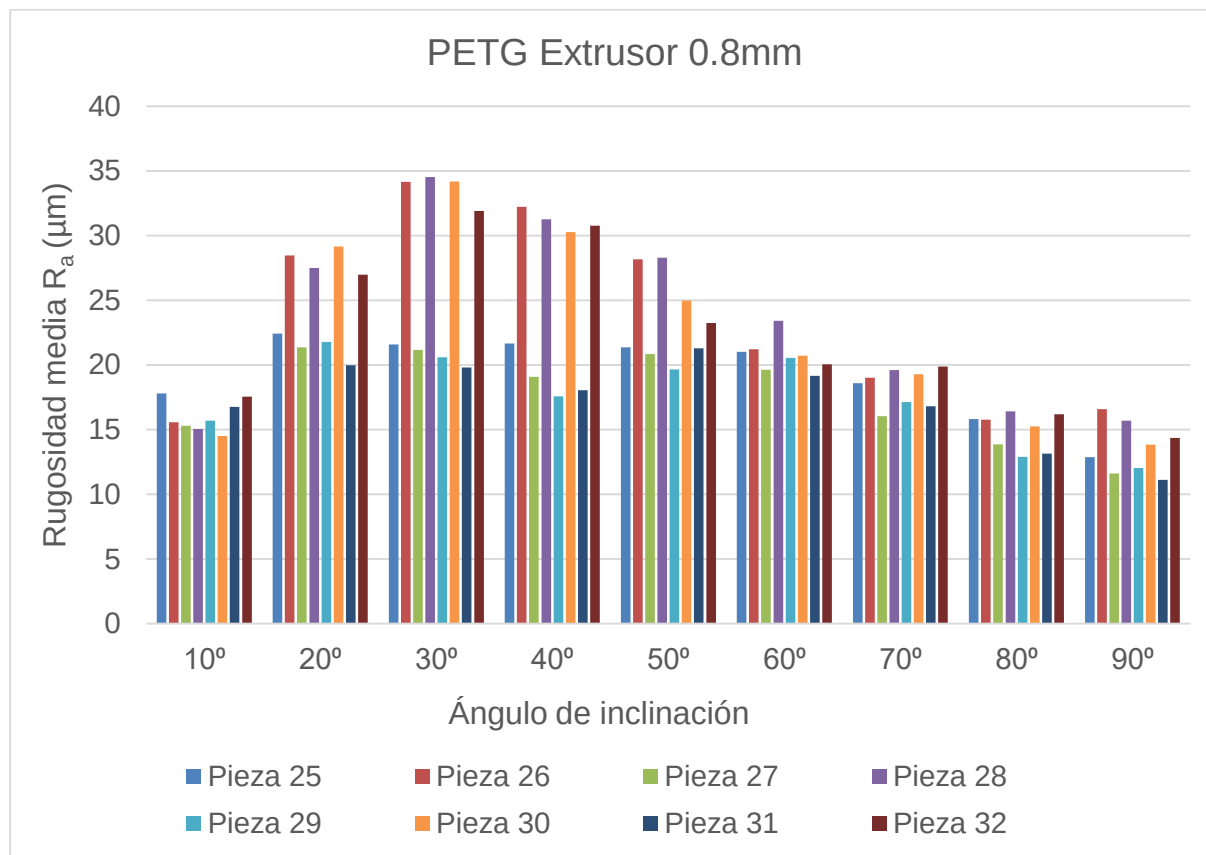
Tabla 6. Rugosidad R_a para cada ángulo de inclinación en todas las probetas

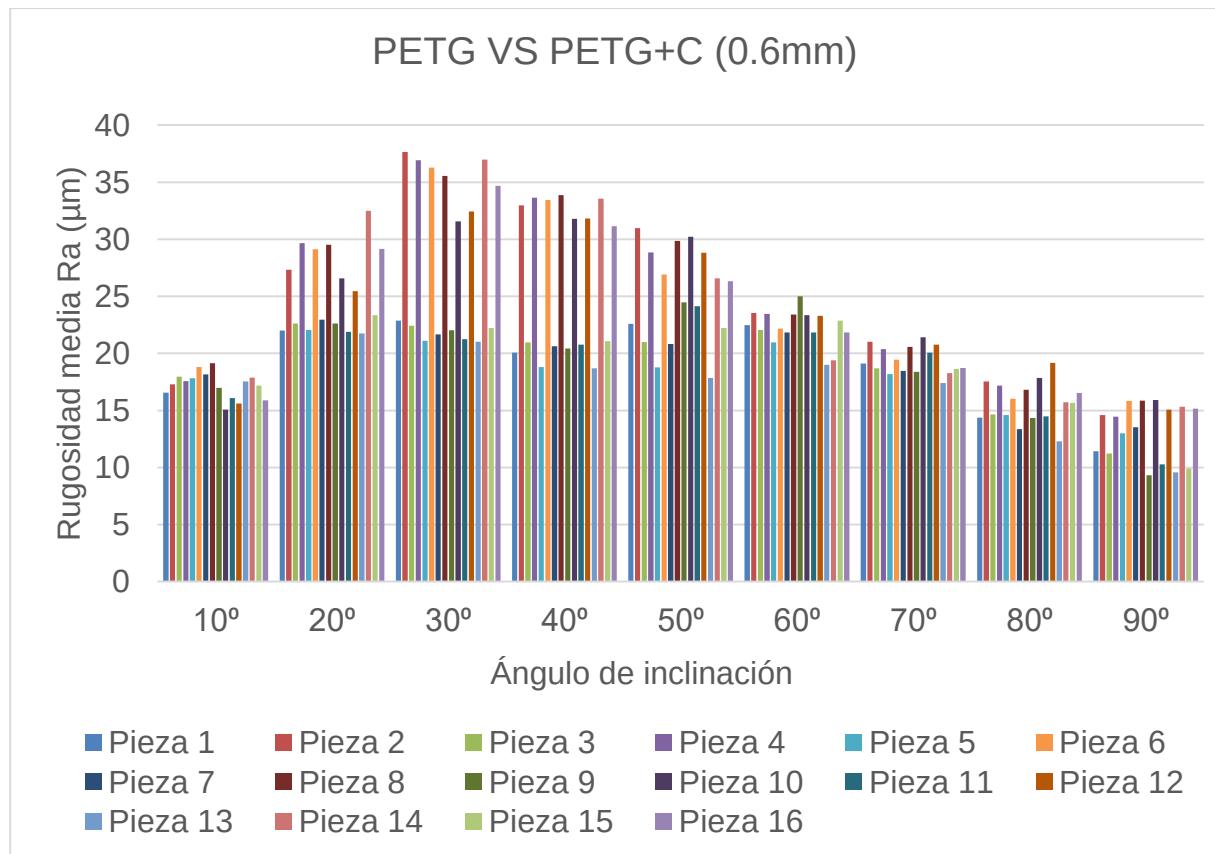
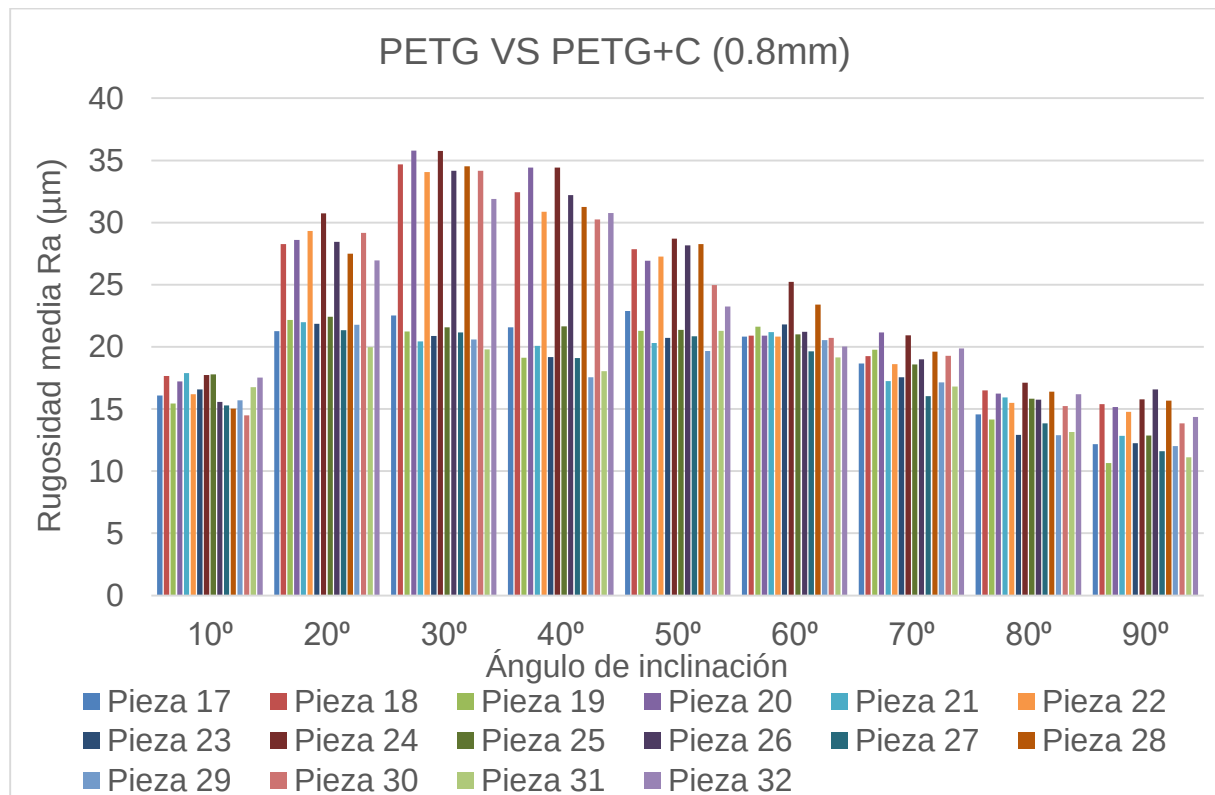
Pieza 21	17,898	21,9747	20,4287	20,0733	20,302	21,1727	17,2457	15,922	12,8397
Pieza 22	16,179	29,311	34,052	30,8567	27,266	20,8313	18,6063	15,486	14,7623
Pieza 23	16,5743	21,8637	20,875	19,174	20,7157	21,8083	17,5583	12,916	12,2397
Pieza 24	17,723	30,742	35,774	34,4113	28,7143	25,218	20,9253	17,1097	15,78
Pieza 25	17,7947	22,418	21,5687	21,657	21,3627	21,0063	18,5803	15,826	12,873
Pieza 26	15,5697	28,456	34,1563	32,2133	28,1623	21,2083	19,002	15,76	16,5857
Pieza 27	15,2863	21,349	21,1613	19,087	20,847	19,6343	16,0463	13,8547	11,595
Pieza 28	15,0343	27,4913	34,5167	31,2573	28,2797	23,4003	19,6037	16,405	15,685
Pieza 29	15,6967	21,7677	20,587	17,5607	19,653	20,5493	17,1303	12,9	12,0167
Pieza 30	14,5007	29,16	34,1687	30,2547	24,9743	20,7113	19,2677	15,2453	13,8367
Pieza 31	16,7607	19,967	19,7867	18,052	21,2813	19,159	16,8	13,1433	11,1167
Pieza 32	17,5393	26,9643	31,9053	30,7547	23,245	20,0353	19,8623	16,1903	14,3527

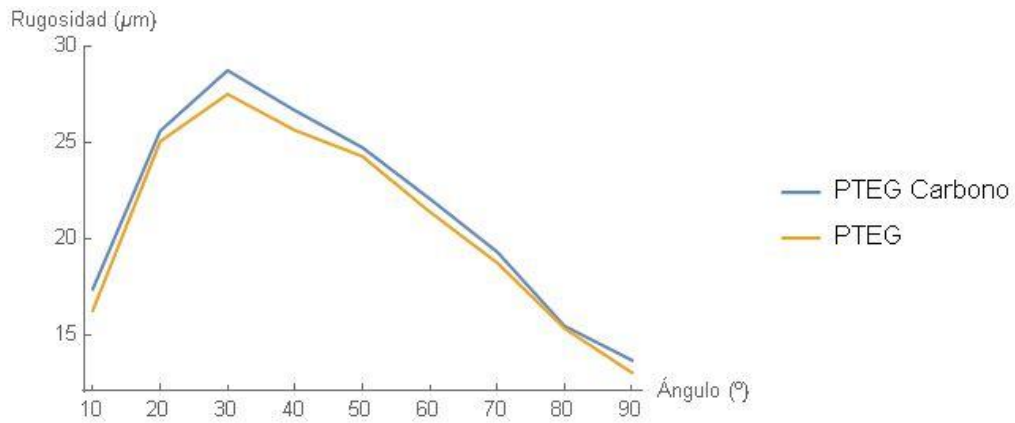
En la tabla (Tabla 7) se observa la Rugosidad media (R_a) para cada plano de inclinación de cada una de las probetas fabricadas en las que se lleva a cabo el experimento.

A partir de esta tabla se puede realizar un Análisis de Varianza (ANOVA) y también una serie de gráficas con las que comparar a simple vista la rugosidad de las distintas probetas.

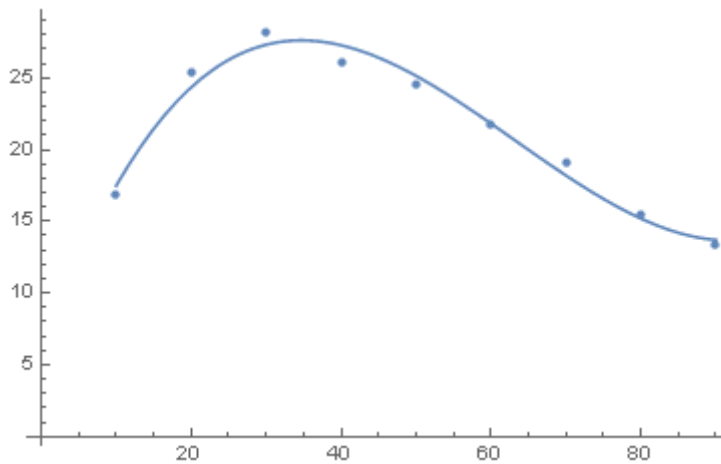
Gráfica 1. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG+C (0.6mm)Gráfica 2. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG (0.6mm)

Gráfica 3. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG+C (0.8mm)Gráfica 4. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG (0.8mm)

Gráfica 5. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG VS PETG+C (0.6mm)Gráfica 6. Rugosidad R_a frente ángulo de inclinación. PETG VS PETG+C (0.8mm)



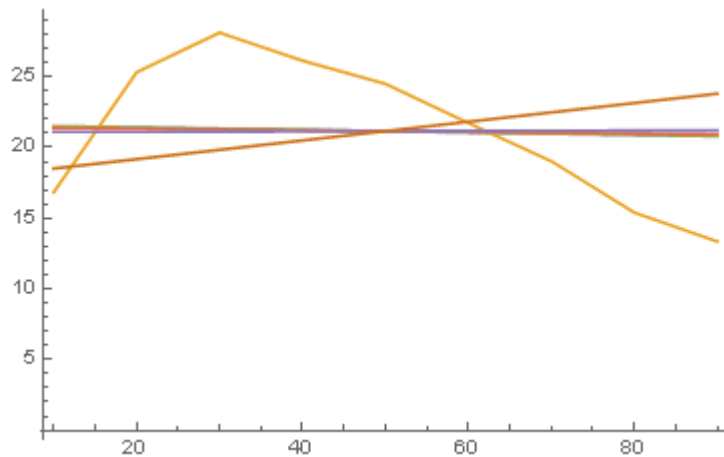
Gráfica 7. Efectos principales. PETG VS PETG+C



Gráfica 8. Ajuste a polinomio.

En la gráfica (Gráfica 8) se observa la media de todos los valores de rugosidad en cada ángulo y la curva se ajusta al siguiente polinomio de grado 3:

$$5.818495618386155 + 1.4367648889690567an - 0.028531795108826363an^2 + 0.00015046797839506174an^3 = 0$$



Gráfica 9. Variaciones de parámetros

En la gráfica (Gráfica 9) se observa como varía la rugosidad para cada parámetro. Siendo el ángulo de inclinación la curva de color naranja y la altura de capa la recta marrón. Los demás parámetros siguen una recta casi horizontal al eje x muy similar.

Con el Análisis de Varianza (ANOVA) se conocen los parámetros de impresión que son más significativos (Tabla 7). Con la ayuda del software Wolfram Mathematica:

	DF	SumOfSq	MeanSq	FRatio	PValue
AnguloV	8	7020,52	877,565	122,923	$4,76588 \cdot 10^{-86}$
MaterialV	1	36,232	36,232	5,07511	0,025063
Extrusor	1	27,9326	27,9326	3,91259	0,0489274
Perimetros	1	13,9678	13,9678	1,9565	0,163018
Velocidad	1	0,845181	0,845181	0,118386	0,731055
AlturaCapa	1	2017,58	2017,58	282,607	$4,57055 \cdot 10^{-44}$
Error	274	1956,13	7,13917		
Total	287	11073,2			

Tabla 8. Resultados ANOVA

Los parámetros con un valor P-Value inferior a 0.05 son significativos. Por tanto el ángulo de inclinación y la altura de capa son parámetros altamente significativos. Seguidos por el tipo

de material y el extrusor. La velocidad de impresión y el número de perímetros no son significativos en este análisis estadístico, por lo que su influencia en la calidad superficial de la pieza es baja.

7. Conclusiones y trabajos futuros

En términos generales, tanto la rugosidad del PETG como la del PETG+C varían entorno al 3.4% al comparar un extrusor de 0.6mm con uno de 0.8mm, teniendo un mejor acabado superficial en ambos materiales con el extrusor de mayor diámetro. En el caso del PETG con carbono esto podría suceder debido a que las fibras se alinean mejor con la dirección del flujo cuanto más grande es el diámetro del extrusor.

Hay un 3.33% de diferencia entre usar PETG y el PETG+C, siendo el material reforzado más rugoso en todas las combinaciones.

Además un extrusor más grande nos da un grosor de pared mayor, aunque en este estudio no es un parámetro significativo ya que debido a la microfibras que contiene el carbono no se puede imprimir con extrusores menores de 0.5mm pero sería conveniente, como trabajos futuros, el estudio de la rugosidad en paredes delgadas con materiales sin refuerzo. Así se podría comprobar cuanto mejora la rugosidad con el número de perímetros y hasta qué punto es interesante seguir aumentando el tamaño del extrusor o el número de perímetros para conseguir mejor calidad en las paredes de la probeta.

El filamento de PETG que se puede encontrar en la actualidad no contiene más de un 15% de fibra de carbono. Al tener un contenido pequeño no se puede afirmar que la fibra influya notablemente en la rugosidad superficial de las probetas. Como trabajos futuros se desea realizar de nuevo el experimento con materiales que contengan más fibra de carbono.

8. Bibliografía

- Huang X, Shen Z, Yang S. *Effect of Fabrication Parameters and Material Features on Surface Roughness of FDM Build Parts*. 2018 3rd Joint International Information Technology, Mechanical and Electronic Engineering Conference (JIMEC 2018)
- Kim MK, Lee IH, Kim HC. *Effect of fabrication parameters on surface roughness of FDM parts International*. Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2018
- Parts Yang L, Li S, Li Y, Yang M, Yuan Q. *Experimental Investigations for Optimizing the Extrusion Parameter on FDM PLA Printed*. J Mater Eng Perform.
- Lalehpour A, Barari A. *A more accurate analytical formulation of surface roughness in layer-based additive manufacturing to enhance the product's precision*. Int J Adv Manuf Technol,
- Alsoufi MS, Elsayed AE. *Surface roughness quality and dimensional accuracy—a comprehensive analysis of 100% infill printed parts fabricated by a personal/desktop cost-effective FDM 3D printer*. Mater Sci Appl, 2018.
- Galantucci LM, Lavecchia F, Percoco G. *Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts*. CIRP Ann, 2009
- Reddy V, Flys O, Chaparala A, Berrimi CE, V A, Rosen BG. *Study on surface texture of Fused Deposition Modeling*. Procedia Manufacturing, 2018
- Pérez M, Medina-Sánchez G, García-Collado A, Gupta M, Carou D. *Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters*. Materials, 2018
- Rahmati S, Vahabli E. *Evaluation of analytical modeling for improvement of surface roughness of FDM test part using measurement results*. Int J Adv Manuf Technol, 2015
- Adel M, Abdelaal O, Gad A, Nasr AB, Khalil A. *Polishing of fused deposition modeling products by hot air jet: Evaluation of surface roughness*. J Mater Process Technol, 2018
- Huang X, Shen Z, Yang S. *Effect of Fabrication Parameters and Material Features on Surface Roughness of FDM Build Parts* 2018 3rd Joint International Information Technology, Mechanical and Electronic Engineering Conference (JIMEC 2018), 2018
- Montgomery, D.C. (2001). *Design and analysis of experiments*. Editorial John Wiley & Sons, Inc
- Kumbhar NN, Mulay AV. *Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review* Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 2018
- Szykiedans K Credo W Osiński D. *Selected Mechanical Properties of PETG 3-D Prints*. Procedia Engineering, 2017.

Garg A, Bhattacharya A, Batish A. *Effect of cold vapour treatment on geometric accuracy of fused deposition modelling parts*. *Rapid Prototyping Journal*, 2017

Nguyen TK, Lee BK. *Post-processing of FDM parts to improve surface and thermal properties*. *Rapid Prototyping Journal*, 2018

Albu SC. *Development on the production of a new type of extruder used in additive manufacturing, FDM technology* *Procedia Manufacturing*, 2018

Di Angelo L, Di Stefano P, Marzola A. *Surface quality prediction in FDM additive manufacturing*. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017