



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO EXPERIMENTAL
PARA LA PREDICCIÓN DE
LA CALIDAD SUPERFICIAL
EN PIEZAS POLIMÉRICAS
FABRICADAS POR FDM**

Alumno: RAFAEL SEGOVIA JIMÉNEZ

Tutor: Prof. D. Gustavo Medina Sánchez
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Enero, 2023



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de

Don GUSTAVO MEDINA SÁNCHEZ, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: *ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA PREDICCIÓN DE LA CALIDAD SUPERFICIAL EN PIEZAS POLIMÉRICAS FABRICADAS POR FDM*, que presenta RAFAEL SEGOVIA JIMÉNEZ, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, ENERO de 2023

El alumno:

El tutor:

RAFAEL SEGOVIA JIMÉNEZ

GUSTAVO MEDINA SÁNCHEZ

Índice

Índice	3
Índice de ilustraciones	7
Resumen	9
Abstrac	10
1 Introducción	11
1.1Objetivos del TFG	11
1.2 Historia del FDM	11
1.3 Mayores hitos del FDM	12
1.4 Tecnologías de fabricación aditiva.	15
Funcionamiento del FDM	22
1.5 Rugosidad	23
Tipos de rugosímetros	24
Cálculo de la rugosidad	27
Cuando utilizamos Ra	30
2. Equipos y software utilizados	30
2.1 Microscopio confocal	30
2.2 Rugosímetro	32
2.3 Fusion 360	34
2.4 Matlab R2018a	34
2.5 Ultimaker Cura (5.1.1)	34
2.6 Impresora Elegoo neptune 2	35
2.7 Materiales usados	37

PETG Sunlu blanco	38
ABS rojo smart filaments	39
Características principales de los materiales	39
3 Diseño de experimentos	39
4 Diseño de probetas	41
5 Fabricación de probetas	45
Parámetros más relevantes a la hora de la impresión	46
6 Proceso de medición	49
6.1 Rugosímetro	49
6.2 Microscopio	50
7 Procesamiento de datos	51
8 Obtención de datos	53
Rugosímetro	53
Matlab	54
9 Resultados	56
9.1 Superficie de respuesta ABS	61
9.2 Superficie de respuesta PET	63
10 Conclusiones	64
Referencias bibliográficas	66
Referencias ilustraciones	67
Anexos	68
Anexo 1: códigos de procesamiento	68
Anexo 1.1 Python	68
Anexo 1.2 Matlab	69
Imágenes	69
Rugosidad media	70

Anexo 2: imágenes	72
Microscopio	72
ABS 0.2	72
ABS 0.16	76
ABS 0.12	80
PET 0.2	84
PET 0.16	89
PET 0.12	93
Matlab	97
ABS 0.2	97
ABS 0.16	102
ABS 0.16	106
ABS 0.12	111
PET 0.2	115
PET 0.16	120
PET 0.12	124
Anexo 3: Resultados	131
Anexo 3.1 Matlab	131
ABS 0.16	131
ABS 0.12	131
PET 0.2	132
PET 0.16	133
PET 0.12	133
Anexo 3.2 Rugosímetro	134
ABS 0.2	134
ABS 0.16	134

ABS 0.12	134
PET 0.2	135
PET 0.16	135
PET 0.12	136

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Deposición de líquido [1].....	16
Ilustración 2: Sinterizado láser [2]	17
Ilustración 3: Estereolitografía [3]	18
Ilustración 4: Modelado por deposición fundida [4]	20
Ilustración 5: Proceso del FDM [5]	22
Ilustración 6: Superficie real e ideal [6].....	24
Ilustración 7: Rugosímetro [7]	25
Ilustración 8: Palpador inductivo [7]	25
Ilustración 9: Palpador capacitivo [7].....	25
Ilustración 10: Palpador piezoeléctrico [7].....	26
Ilustración 11: Patín mecánico [7]	26
Ilustración 12: Rz [8].....	27
Ilustración 13: Rp [8]	27
Ilustración 14: Rv [8].....	28
Ilustración 15: Rc [8].....	28
Ilustración 16: Rt [8]	29
Ilustración 17: Rzijs [8]	29
Ilustración 18: Valores típicos de superficies Ra [9].....	30
Ilustración 19: Funcionamiento de microscopio confocal [10]	31
Ilustración 20: Microscopio confocal SCAI UJA [11]	32
Ilustración 21: Rugosímetro [18]	32
Ilustración 22: Características del rugosímetro [18]	33
Ilustración 23: Partes principales del rugosímetro [19].....	33
Ilustración 24: Impresora elegoo neptune [12]	36
Ilustración 25: Extrusor de doble rueda [13].....	36
Ilustración 26 Cama magnética kingroon [14]	37
Ilustración 27: Tubo capricron [15]	37
Ilustración 28: Torre de temperatura ABS.....	38
Ilustración 29: PETg Sunlu blanco [16]	38
Ilustración 30: ABS rojo smart filaments [17].....	39
Ilustración 31: Esquema factores de estudio.....	40

Ilustración 32: Probeta	41
Ilustración 33: Probeta ángulo 0.....	42
Ilustración 34: Probeta ángulo 10.....	42
Ilustración 35: Probeta ángulo 40.....	43
Ilustración 36: probeta ángulo 50	43
Ilustración 37: Probeta ángulo 60.....	43
Ilustración 38: Disposición de las probetas en Cura.....	44
Ilustración 39: Disposición de las probetas en cura (2)	44
Ilustración 40: Resultados de la impresión.....	45
Ilustración 41: Probeta ángulo 40.....	46
Ilustración 42: Probetas tras la segmentación.....	47
Ilustración 43: Ejemplo laminación	48
Ilustración 44: Resultado de las probetas	48
Ilustración 45: Rugosímetro [18]	49
Ilustración 46: Ayuda de uso (1) [19].....	49
Ilustración 47: Ayuda de uso (2) [19].....	50
Ilustración 48: Fotografía a 0°	50
Ilustración 49: Fotografía 70°	51
Ilustración 50: Matriz 3 dimensiones [20]	52
Ilustración 51: Explicación funcionamiento del código	53
Ilustración 52: Superficie de respuesta ABS	61
Ilustración 53: Superficie de respuesta ABS (2)	62
Ilustración 54: Superficie de respuesta ABS (3).....	62
Ilustración 55: Superficie de respuesta PET	63
Ilustración 56 Superficie de respuesta PET (2)	63
Ilustración 57 Superficie de respuesta PET (3)	64

Resumen

La fabricación aditiva, conocida popularmente como impresión 3D, es una tecnología que permite crear objetos tridimensionales a partir de archivos digitales. En lugar de tallar o moldear un material, la impresión 3D construye un objeto capa por capa a partir de una variedad de materiales, como plástico, metal o cerámica. Esto permite la creación de piezas personalizadas y de diseños complejos que no serían posibles de hacer mediante procesos tradicionales. La impresión 3D tiene una amplia variedad de aplicaciones, desde la fabricación de piezas de repuesto hasta la creación de prototipos y la producción de objetos finales.

Dentro de la fabricación aditiva una de las tecnologías más populares es la de extrusión de filamento fundido o FDM (del inglés Fused Deposition Modeling). Uno de los principales problemas que tiene la tecnología FDM es el acabado superficial de las piezas y por ende la generación de superficies rugosas. Este es uno de los mayores techos que está teniendo esta tecnología, puesto que para aumentar las velocidades de generación de piezas uno de los parámetros más influyentes es la distancia que se decide entre cada capa del proceso. Si se desea más velocidad en el proceso de fabricación, se obtienen de forma directa rugosidades mayores.

En este trabajo se va a realizar un estudio experimental sobre la influencia que tienen sobre la rugosidad de la pieza impresa algunos de los parámetros del proceso FDM como son la altura de capa, el material y el ángulo de impresión. Este estudio se realizará mediante métodos mecánicos y ópticos.

Abstrac

Additive manufacturing, commonly known as 3D printing, is a technology that allows three-dimensional objects to be created from digital files. Instead of carving or moulding a material, 3D printing builds an object layer by layer from a variety of materials, such as plastic, metal or ceramics. This allows for the creation of custom parts and complex designs that would not be possible using traditional processes. 3D printing has a wide variety of applications, from the manufacture of spare parts to the creation of prototypes and the production of final objects.

Within additive manufacturing, one of the most popular technologies is Fused Deposition Modelling (FDM). One of the main problems with FDM technology is the surface finish of the parts and therefore the generation of rough surfaces. This is one of the biggest problems that this technology is having, since one of the most influential parameters for increasing part generation speeds is the distance between each layer in the process. If more speed is desired in the manufacturing process, higher roughness is obtained directly.

In this work, an experimental study is going to be carried out on the influence that some of the parameters of the FDM process such as layer height, material and printing angle have on the roughness of the printed part. This study will be carried out using mechanical and optical methods.

1 Introducción

1.1 Objetivos del TFG

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la influencia que tienen los distintos grados de inclinación en la rugosidad de una pieza fabricada con la tecnología FDM de fabricación aditiva.

Para ello hay que cumplir varios objetivos previos:

- Diseño de las probetas de medición.
- Fabricación de las probetas.
- Medición de la rugosidad mediante distintos métodos.
- Relacionar las medidas con las probetas.
- Creación de una superficie de respuesta para prever la rugosidad.

Este proyecto se lleva a cabo en el departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Para la fabricación de las probetas se usará una impresora 3D (Elegoo Neptune 2).

Para medir la rugosidad se utilizará un rugosímetro (Surftest SJ-210).

Además, se utilizará el microscopio confocal situado en los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación (SCAI).

1.2 Historia del FDM

La historia de la impresión 3D se remonta a 1976, cuando se inventó la impresora de inyección de tinta. Desde su invención hace 50 años, la tecnología de impresión 3D ha progresado a un ritmo rápido, con un impacto significativo tanto en el mundo industrial como en el comercial. La estereolitografía, el sinterizado selectivo por láser y el modelado por deposición fundida fueron algunos de los primeros métodos de impresión 3D que tuvieron un gran éxito, utilizados inicialmente para la creación de prototipos industriales. La tecnología de impresión 3D pronto se desarrolló para su uso en diversos campos, para la fabricación a gran escala, la ingeniería de

piezas muy complejas e incluso para uso personal. En el ámbito de la salud, en particular, la impresión 3D facilita las intervenciones más específicas para el paciente, como la planificación quirúrgica y el diseño de implantes. Además, la tecnología de bioimpresión 3D desempeña un papel integral en el avance de la ingeniería de tejidos y la investigación biomédica. A medida que la impresión 3D se va sofisticando, es probable que tenga una gran influencia en la asistencia sanitaria en el futuro. *[Su, A., & Al'Aref, S. J. (2018).]*

La primera solicitud de patente para un dispositivo de impresión en 3 dimensiones tiene lugar en Japón, en 1981. Presentada por el Dr. Hideo Kodama del Instituto Municipal de Investigación Industrial, en Nagoya.

Su proyecto fue abandonado debido al presupuesto limitado, y al no conseguir los artículos publicados levantar el suficiente interés.

Kodama inventó 2 métodos de fabricación aditiva con resina fotosensible.

En 1984 todo cambió con Charles Hull, que más tarde fue, el cofundador de 3D Systems. Charles inventa la estereolitografía, un proceso de impresión que permite que un objeto en 3D se cree a partir de datos digitales. Se utiliza la tecnología para crear un modelo 3D a partir de una imagen y permite que los usuarios prueben un diseño antes de que se invierta en la fabricación del modelo definitivo. *[Horvath, J. (2014)]*

1.3 Mayores hitos del FDM

- 1999 – Órganos de Ingeniería traen nuevos avances en Medicina

El primer órgano creado en laboratorio que se implementó en humanos fue un aumento de la vejiga urinaria utilizando recubrimiento sintético con sus propias células.

La tecnología utilizada por los científicos del Instituto de Wake Forest de Medicina Regenerativa, abrió las puertas al desarrollo de otras estrategias para los órganos de

la ingeniería, el cual pasaba por la impresión de los mismos. Debido a que están fabricadas con células propias del paciente, el riesgo de rechazo es prácticamente nulo.

- 2002 – Un Riñón 3D en Funcionamiento

Los científicos diseñaron un riñón en miniatura completamente funcional y con la capacidad de filtrar sangre y producir orina diluida en un animal.

El desarrollo llevó a la investigación en el Instituto de Wake Forest de Medicina Regenerativa con el objetivo de imprimir los órganos y tejidos con tecnología de impresión 3D.

- 2005 – Open-Source Colabora con la Impresión 3D

El Dr. Adrian Bowyer funda RepRap, en la Universidad de Bath, una iniciativa de código abierto para construir una impresora 3D que puede imprimir la mayoría de sus propios componentes. La visión de este proyecto es el de democratizar la fabricación de unidades de distribución de bajo coste RepRap a las personas de todo el mundo, lo que les permite crear productos a diario por su cuenta, imprimiendo con filamento pla, abs, etc.

- 2008 – La Primera Impresora con Capacidad de Auto Replica

Tras su lanzamiento en 2005, el proyecto RepRap saca a la luz Darwin, la primera impresora 3D con capacidad de imprimir la mayoría de sus propios componentes, permitiendo a los usuarios que ya tienen una, hacer más impresoras para sus amigos o incluso reparar componentes de la suya.

- 2008 – Gran Avance en las Prótesis

La primera persona que camina sobre una pierna de prótesis impresa en 3D, con todas las partes, rodilla, pie, etc, impresa en una misma compleja estructura sin ningún tipo de montaje. Este tipo de avances permiten que los fabricantes de prótesis realicen desarrollos a medida en el sector de las prótesis

- **2009 – Kits de Impresoras 3D DIY Entran en el Mercado**

Industrias MakerBot, una compañía de hardware de código abierto para las impresoras 3D, comienza la venta de kits de montaje que permiten a los compradores fabricar sus propias impresoras 3D y productos.

- **2011 – Primer Avión Impreso en 3D**

Los ingenieros de la Universidad de Southampton diseñaron y planearon el primer avión impreso en 3D. Este avión no tripulado se construye en siete días, con un presupuesto de 7.000€. La impresión 3D permite que sus alas tengan forma elíptica, una característica normalmente cara que ayuda a mejorar la eficiencia aerodinámica y reduce al mínimo la resistencia inducida.

- **2011 – Primer Coche Impreso en 3D**

Kor Ecologic nos presenta Urbee, un prototipo de coche que trata de ser lo más eficiente posible con el medio ambiente, siendo toda su carrocería diseñada e impresa en 3D. Trata de ser un coche eficiente en cuanto a consumo de gasolina y en cuanto a su coste de producción. Su precio oscila entre los 12.000€ y 60.000€ siempre y cuando sea comercialmente rentable.

- **2012 – Primer Implante de Prótesis de Mandíbula Impresa en 3D**

Un grupo conjunto de investigadores belgas y neerlandeses implantó con éxito a una paciente de 83 años una prótesis de su mandíbula inferior, diseñada por ordenador y fabricada con una impresora 3D.

1.4 Tecnologías de fabricación aditiva.

En este apartado se detallan las principales tecnologías de fabricación aditiva. Para cada enfoque, se presenta el mecanismo físico de la impresión y se destacan los parámetros de procesamiento pertinentes, los materiales típicos, la fidelidad de las características geométricas, las tasas de producción alcanzables y las consideraciones prácticas. Se presentan cinco formas de impresión 3D que dominan el mercado actual de la fabricación aditiva:

1. Deposición de metal líquido

Las aleaciones metálicas de bajo punto de fusión presentan muchas de las propiedades deseables de los metales y aleaciones rígidos convencionales, como una alta conductividad eléctrica y térmica. Sin embargo, a diferencia de los metales en estado sólido, los metales fundidos son intrínsecamente blandos y pueden ser fácilmente dispensados, deformados y estirados. Esto hace que los metales líquidos sean especialmente adecuados para una serie de aplicaciones. Por estas razones y muchas más, el modelado y el procesamiento de estos materiales son un área de investigación activa.

Debido a su naturaleza fluida, los metales líquidos pueden modelarse y procesarse de formas que no son posibles con los metales sólidos. De los muchos métodos posibles para modelar metales líquidos, uno de los más interesantes es la fabricación aditiva, o conocida coloquialmente como "impresión 3D". La impresión 3D se ha convertido en un término general para designar la deposición de material capa a capa sólo en patrones específicos sobre una superficie. Aquí los términos se utilizarán indistintamente. Los procesos aditivos prometen utilizar menos material y generar menos residuos al colocar el material sólo donde se necesita, en comparación con los métodos sustractivos que deben comenzar con una cobertura completa de la superficie y eliminar material para formar los patrones deseados.

La impresión de metales líquidos, no requiere el uso de altas temperaturas o el procesamiento al vacío, y puede realizarse a temperatura ambiente o casi. Esto también significa que es compatible con materiales sensibles a la temperatura, como los polímeros y los hidrogeles. A diferencia del procesamiento de partículas o polvos, el metal líquido no requiere sinterización (que convencionalmente requiere calor, reacciones químicas o luz intensa) para formar estructuras conductoras; el metal líquido es inherentemente conductor. Además, muchos de los conceptos de la impresión de aleaciones de bajo punto de fusión pueden aplicarse en general a las aleaciones de mayor punto de fusión, aunque para ello se necesitan equipos y materiales especializados que soporten las altas temperaturas necesarias para hacer fluir estas aleaciones fundidas. Por último, aunque las estructuras impresas de metal líquido no pueden utilizarse con fines estructurales, su naturaleza líquida permite la formación de dispositivos en los que las propiedades mecánicas están definidas por el material que soporta o recubre el metal y no por el propio metal. Los metales líquidos ofrecen una combinación inigualable de conductividad y elasticidad, y pueden modelarse a temperatura ambiente en condiciones atmosféricas.

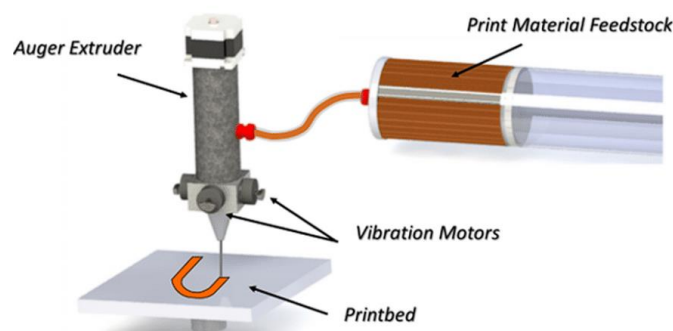


Ilustración 1: Deposición de líquido [1]

2. Sinterización

laser

El sinterizado selectivo por láser (SLS) es una de las técnicas de prototipado rápido (RPT) de más rápido crecimiento. Esto se debe principalmente a su idoneidad para procesar casi cualquier material: polímeros, metales, cerámica (incluida la arena de fundición) y muchos tipos de materiales

compuestos. El material debe suministrarse en forma de polvo que, ocasionalmente, puede contener un aglutinante polimérico de sacrificio que debe ser eliminado (desempolvado) posteriormente. La interacción entre el rayo láser y el material en polvo utilizado en el SLS es uno de los fenómenos dominantes que definen la viabilidad y la calidad de cualquier proceso de SLS. Este artículo examina el estado actual del SLS en cuanto a materiales y láseres. Describe las investigaciones llevadas a cabo experimentalmente y mediante simulación numérica con el fin de conocer la interacción láser-material y controlar adecuadamente esta interacción. [Su, 2018)]



Ilustración 2: Sinterizado láser [2]

3. Estereolitografía

La estereolitografía es un proceso de fabricación por adición que emplea resina que cura mediante luz ultravioleta en un tanque, y un láser ultravioleta para construir los objetos. Los objetos tridimensionales se obtienen mediante la adición sucesiva de finas capas, impresas una encima de otra. Cada capa es una sección transversal del objeto que el láser traza en la superficie de la resina, que es el material consumible. La resina líquida cura y se solidifica mediante la exposición al láser de luz ultravioleta, quedando así la capa recién solidificada pegada a la capa previa que existía debajo suya.

Una vez que la capa a imprimir ha sido creada, la plataforma de elevación del equipo desciende una distancia equivalente al grosor de una capa de resina

solidificada (típicamente entre 0.05 y 0.15 mm). Una hoja barre la pieza dejando una nueva capa de resina líquida en la superficie de la cubeta, lista para la siguiente impresión del láser. De esta forma se va creando, capa a capa una pieza tridimensional. Una vez que la pieza tridimensional se ha completado, ésta se sumerge en un baño químico que retira el exceso de resina y, posteriormente, curada en un horno de luz ultravioleta. [Melchels, F. P., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010)]

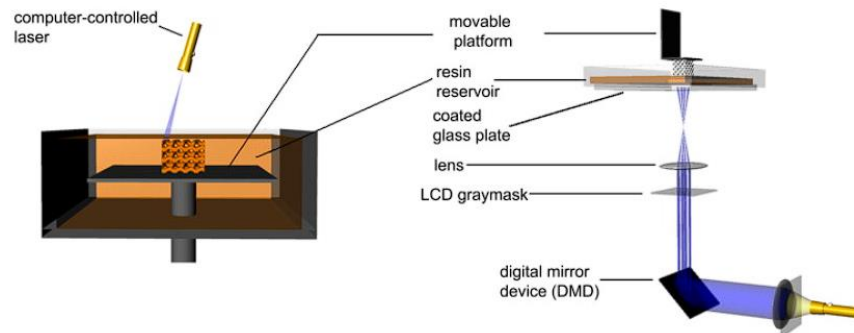


Ilustración 3: Estereolitografía [3]

4. Chorro de material

La fabricación aditiva por chorro de material es un proceso de fabricación aditiva establecido que puede crear piezas depositando gotas de fotopolímeros líquidos mediante cabezales de impresión piezoeléctricos y curando los fotopolímeros con lámparas ultravioletas. Las impresoras 3D de chorro de tinta, como PolyJet de Stratasys y MultiJet de 3D Systems, son capaces de depositar selectivamente varias resinas poliméricas fotocurables de forma simultánea para fabricar piezas multimateriales. Los materiales de soporte de sacrificio se generan automáticamente y se depositan junto con los fotopolímeros para soportar las estructuras que sobresalen. La tecnología de impresión 3D de chorro de tinta se ha adoptado ampliamente para producir no sólo prototipos, sino también componentes poliméricos funcionales como paneles ligeros, productos vestibles de estilo de vida, modelos anatómicos personalizados, así como andamios para la ingeniería de tejidos. [Yap, Y. L., Wang, C., Sing, S. L., Dikshit, V., Yeong, W. Y., & Wei, J. (2017)]

5. Modelado por deposición fundida

Este es el método usado para desarrollar este trabajo, por lo que la explicación del mismo es más extensa y detallada.

Una impresora 3D FDM funciona depositando material de filamento fundido sobre una plataforma de construcción, capa por capa, hasta obtener una pieza completa. La FDM utiliza archivos de diseño digital que se cargan en la propia máquina y los traduce en dimensiones físicas. Los materiales para FDM incluyen polímeros como ABS, PLA, PETG y PEI, que la máquina alimenta como hilos a través de una boquilla calentada.

Para hacer funcionar una máquina FDM, primero se carga una bobina de este filamento termoplástico en la impresora. Una vez que la boquilla alcanza la temperatura deseada, la impresora alimenta el filamento a través de un cabezal de extrusión y una boquilla.

Este cabezal de extrusión está unido a un sistema de tres ejes que le permite moverse a través de los ejes X, Y y Z. La impresora extruye el material fundido en finos filamentos y los deposita capa por capa a lo largo de una trayectoria determinada por el diseño. Una vez depositado, el material se enfría y se solidifica. En algunos casos se pueden acoplar ventiladores al cabezal de extrusión para acelerar el enfriamiento. También es muy aconsejable calentar la superficie en la que se van a depositar las primeras capas del material fundido. Para algunos casos con una temperatura de unos 50-60°C podría ser suficiente, pero en otros como el PETG o el ABS, que son los que incumben a este trabajo, es necesaria una temperatura de 90-100°C, dada su mala adherencia. En casos complejos puede ser necesario el uso de algún pegamento para mejorar aún más la adhesión de la primera capa a la superficie.

Para rellenar un área, se requieren varias pasadas, de forma similar a colorear una forma con un rotulador. Cuando la impresora térmica una capa, la plataforma de construcción desciende y la máquina comienza a trabajar en

la siguiente capa. En algunas configuraciones de la máquina, el cabezal de extrusión se mueve hacia arriba. Este proceso se repite hasta que la pieza está terminada.

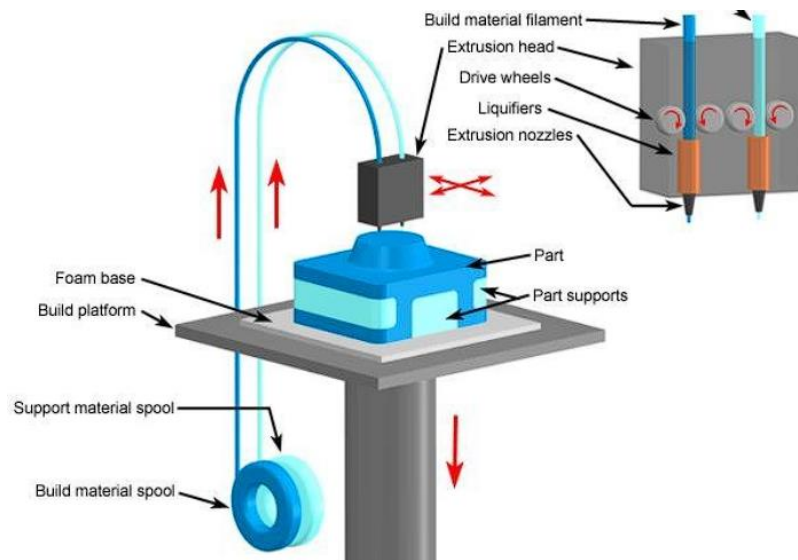


Ilustración 4: Modelado por deposición fundida [4]

Características de los materiales más comunes de FDM

- ABS
 - Buena resistencia mecánica.
 - Buena resistencia a altas temperaturas.
 - Tiene una complicada adherencia a la placa de impresión
- PLA
 - Es el material más común de impresión por su facilidad de impresión.
 - Buena calidad visual de las piezas impresas.
 - Poca resistencia mecánica de las piezas.
- Nylon (PA)
 - Buena resistencia mecánica.
 - Excelente resistencia al desgaste y a los productos químicos.
 - Hay que conservar el material muy bien porque absorbe mucha humedad, lo cual imposibilita mucho el proceso de impresión.

- PETG
 - Uso apto para la comida.
 - Buena resistencia.
 - De fácil impresión.
 - Reciclable.
- TPU
 - Material flexible.
 - Muy complicado de imprimir de forma exacta (mala tolerancia)
- PEI
 - Aguanta muy bien la compresión.
 - Aguanta muy bien el fuego y los químicos
 - Material muy caro.

Diferencias entre el FDM en la industria y en el uso particular.

Property	Industrial FDM	Desktop FDM
Standard accuracy	$\pm 0.15\%$ (lower limit ± 0.2 mm)	$\pm 1\%$ (lower limit: ± 1.0 mm)
Typical layer thickness	0.18 - 0.5 mm	0.10 - 0.25 mm
Minimum wall thickness	1 mm	0.8 - 1 mm
Maximum build envelope	Large (e.g. 900 x 600 x 900 mm)	Medium (e.g. 200 x 200 x 200 mm)
Common materials	ABS, PC, ULTEM	PLA, ABS, PETG
Support material	Water-soluble/Break-away	Same as part (typically)
Production capabilities (per machine)	Low/Medium	Low
Machine cost	\$50000+	\$500 - \$5000

Funcionamiento del FDM

Las impresoras 3D que utilizan la tecnología FDM crean piezas capa por capa de abajo a arriba calentando y extruyendo el filamento termoplástico. El proceso es sencillo:

1. El software de preparación de bandeja lámina y coloca un archivo CAD 3D. A continuación, calcula la trayectoria para extraer el material termoplástico y cualquier material de soporte necesario.
2. Producción: La impresora 3D calienta el material termoplástico hasta que alcanza un estado semilíquido y lo deposita en gotas ultra finas a lo largo de la trayectoria de extrusión. En los casos en los que se precisa un soporte o apoyo, la impresora 3D deposita un material eliminable que hace las veces de andamiaje.
3. Postprocesado: El usuario retira el material de soporte o lo disuelve en agua y detergente y, a continuación, la pieza ya se puede utilizar.

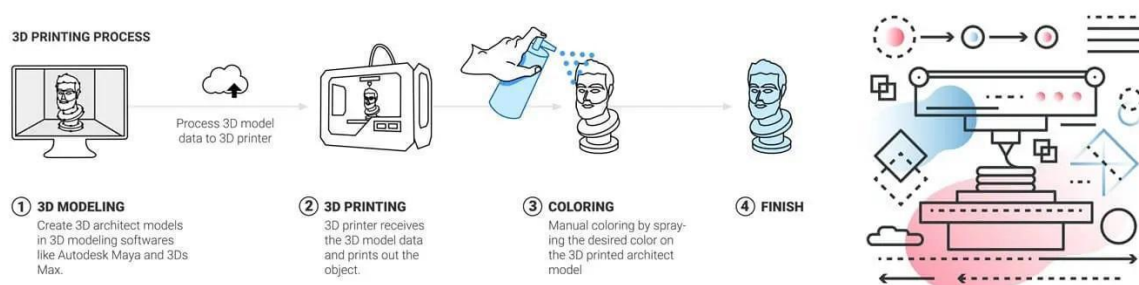


Ilustración 5: Proceso del FDM [5]

Ventajas del FDM

Algunas de las ventajas de la tecnología FDM son:

- Es una tecnología limpia y fácil de usar.
- Es de las más extendidas en la industria.
- Mecanismo sencillo.
- Creación de piezas en poco tiempo.
- Ahorra costes ya que tanto los precios de las impresoras como de los filamentos es menor que otras técnicas de impresión.

1.5 Rugosidad

En mecánica, la rugosidad es el conjunto de irregularidades que posee una superficie. La mayor o menor rugosidad de una superficie depende de su acabado superficial. Este, permite definir la micro geometría de las superficies para hacerlas válidas para la función para la que hayan sido realizadas.

La calidad de un producto está directamente relacionada a las desviaciones de éste con respecto al diseño original debido a fallas en los procesos de manufactura. Esto influye directamente en la funcionalidad de la pieza. Bajo ese punto de vista, la falla está definida por la incapacidad del tren de producción de funcionar de una manera esperada y, en la mayoría de los casos, se manifiesta en el producto en términos de calidad.

En los procesos de maquinado, las características superficiales del producto influyen en su funcionalidad. La figura dominante en una superficie está influenciada por el método de maquinado, ya que cada tipo de herramienta de corte deja marcas distintivas en la superficie. *[López Guerrero, (2003)]*

En el Sistema Internacional la unidad de rugosidad es el micrómetro o micra ($1 \text{ micra} = 1 \mu\text{m} = 0,000001 \text{ m} = 0,001 \text{ mm}$), mientras que en el sistema anglosajón se utiliza la micropulgada (μ ”).

Para medir la rugosidad de las piezas se utilizan instrumentos electrónicos llamados rugosímetros, que miden la profundidad de la rugosidad media (R_z) y el valor de la rugosidad media (R_a) expresada en micras y muestran la lectura de la medida en una pantalla o en un documento gráfico.

Aunque durante mucho tiempo la medición de la rugosidad no fue considerada como una rama de la metrología, en la actualidad es un requerimiento importante debido al reconocimiento creciente de la importancia y necesidad de esta medición.

Una superficie perfecta es una abstracción matemática, ya que cualquier superficie real, por perfecta que parezca, presentará irregularidades que se originan durante el proceso de fabricación, sea el proceso que sea. *[Bedón Rojas, (2017)]*

- Superficie real: Superficie que limita el cuerpo y lo separa del medio que lo separa.
- Superficie geométrica: Superficie ideal cuya forma está especificada por el dibujo y/o todo documento técnico.

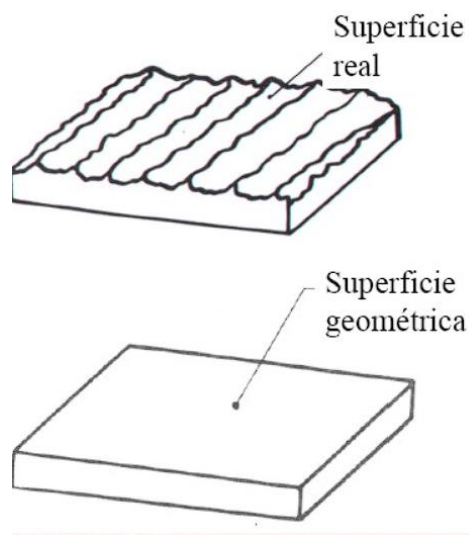


Ilustración 6: Superficie real e ideal [6]

Las irregularidades mayores (macro geométricas) son errores de forma, asociados con la variación en tamaño de una pieza. Las irregularidades menores (micro geométricas) son la ondulación y la rugosidad. La primera puede ocasionar la flexión de la pieza durante el maquinado, falta de homogeneidad del material, liberación de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamiento térmico, vibraciones, etcétera; la segunda la provoca el elemento utilizado para realizar el maquinado, por ejemplo, la herramienta de corte, la piedra de rectificado o en nuestro caso, el proceso de FDM.

Tipos de rugosímetros

- *Rugosímetro de palpador mecánico*: Instrumento para la medida de la calidad superficial pasado en la amplificación eléctrica de la señal generada por un palpador que traduce las irregularidades del perfil de la sección de la pieza.

Sus elementos principales son el palpador, el mecanismo de soporte y arrastre de éste, el amplificador electrónico, un calculador y un registrador.



Ilustración 7: Rugosímetro [7]

- **Palpador inductivo:** El desplazamiento de la aguja al describir las irregularidades del perfil modifica la longitud del entrehierro del circuito magnético, y con ello el flujo de campo magnético que lo atraviesa, generando una señal eléctrica.



Ilustración 8: Palpador inductivo [7]

- **Palpador capacitivo:** El desplazamiento vertical del palpador aproxima las dos láminas de un condensador, modificando su capacidad y con ella la señal eléctrica.



Ilustración 9: Palpador capacitivo [7]

- *Palpador piezoeléctrico*: El desplazamiento de la aguja del palpador de forma elásticamente un material piezoeléctrico, que responde a dicha deformación generando una señal eléctrica.



Ilustración 10: Palpador piezoeléctrico [7]

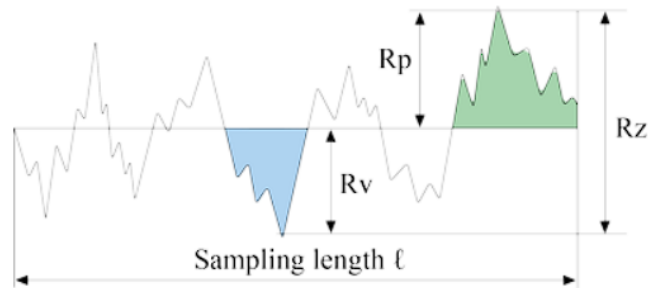
- *Patín mecánico*: El patín describe las ondulaciones de la superficie mientras la aguja recorre los picos y valles del perfil. Así se separan mecánicamente ondulación y rugosidad que son simplemente desviaciones respecto de la superficie geométrica con distinta longitud de onda.



Ilustración 11: Patín mecánico [7]

Cálculo de la rugosidad

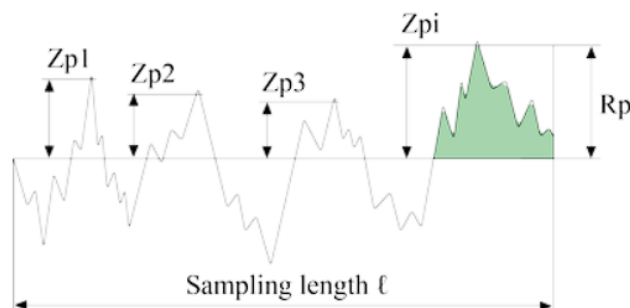
$$R_z = R_p + R_v$$

Ilustración 12: R_z [8]

- *Altura máxima (R_z)*

Representa la suma de la altura máxima del pico Z_p y la profundidad máxima del valle Z_v , pertenecientes a un perfil, en la longitud de referencia.

$$R_p = \max (Z(x))$$

Ilustración 13: R_p [8]

- *Altura máxima del pico del perfil (R_p)*

Representa la altura máxima de pico Z_p de un perfil en la longitud de muestreo.

$$R_v = \min (Z(x))$$

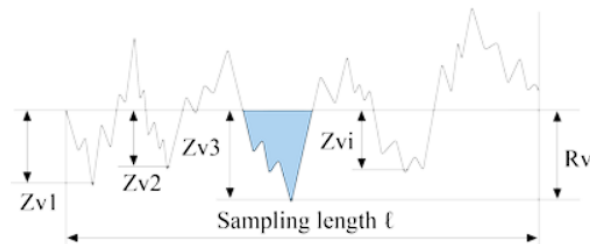


Ilustración 14: R_v [8]

- *Profundidad máxima del valle del perfil (R_v)*

Representa la altura máxima de pico Z_p de un perfil en la longitud de muestreo.

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{ti}$$

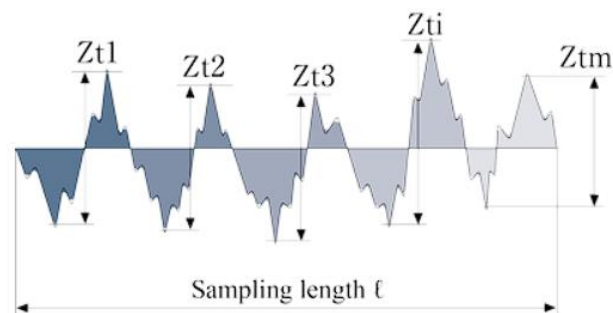
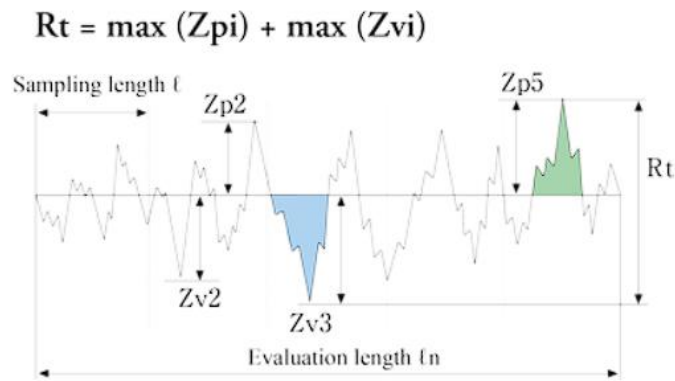


Ilustración 15: R_c [8]

- *Altura media (R_c)*

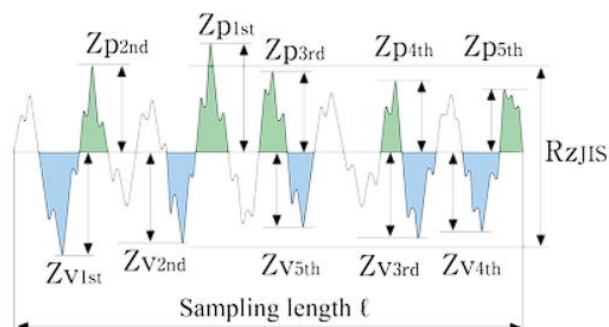
Representa la media de la altura Z_t de los elementos del perfil en la longitud de muestreo. También es denominada R_a

Ilustración 16: R_t [8]

- *Altura total (R_t)*

Representa la suma de la altura máxima del pico Z_p y la profundidad máxima del valle Z_v , pertenecientes a un perfil, en la longitud de evaluación y no en la longitud de muestreo.

$$R_{zjis} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 (Z_{pj} + Z_{vj})$$

Ilustración 17: R_{zjis} [8]

- *Rugosidad media de diez puntos (R_{zjis})*

Representa la suma del valor medio de la altura de los cinco picos más altos y la media de la profundidad de los cinco valles más profundos de un perfil dentro de la longitud de muestreo.

R_{zjis} equivale al parámetro R_z del estándar desactualizado

De todos estos parámetros el más utilizado es el R_a (la altura media de un perfil) medida en micras (μm)

Ejemplo de algunos valores de Ra en algunas superficies

Proceso de acabado	Gama aprox. de valores Ra		Valores de longitud de corte apropiados		
	μm	μpulg	0,25mm 0,01in	0,8mm 0,03in	2,5mm 0,1in
Superacabado	0,05-0,2	2-8	✓	✓	
Lapeado	0,05-0,4	2-16	✓	✓	
Bruñido	0,1-0,8	4-32	✓	✓	
Rectificado	0,1-1,6	4-63	✓	✓	✓
Torneado con diamante	0,1-0,4	4-16	✓	✓	
Torneado	0,4-6,3	16-250		✓	✓
Mandrinado	0,4-6,3	16-250		✓	✓
Estirado	0,8-3,2	32-125		✓	✓
Brochado	0,8-3,2	32-125		✓	✓
Extruido	0,8-3,2	32-125		✓	✓
Fresado	0,8-6,3	32-250		✓	✓
Conformado	1,6-12,5	63-500		✓	✓

Ilustración 18: Valores típicos de superficies Ra [9]

Cuando utilizamos Ra

- Cuando sea necesario el control de la rugosidad en forma continua en las líneas de producción, debido a la facilidad de obtención del resultado.
- Superficies donde el acabado presenta los surcos de mecanizado bien orientados (torneado, fresado)
- Superficies rectificadas, bruñidas, lapidadas, etc.
- Superficies de poca responsabilidad, por ejemplo, acabados con fines apenas estéticos.

2. Equipos y software utilizados

2.1 Microscopio confocal

La microscopía confocal es una técnica de obtención de imágenes ópticas que utiliza iluminación puntual a través de un agujero de alfiler especial para eliminar las señales fuera de foco. La luz de excitación en la microscopía confocal suele

proceder de un láser para generar altas intensidades de fluorescencia o reflectancia en el punto focal.

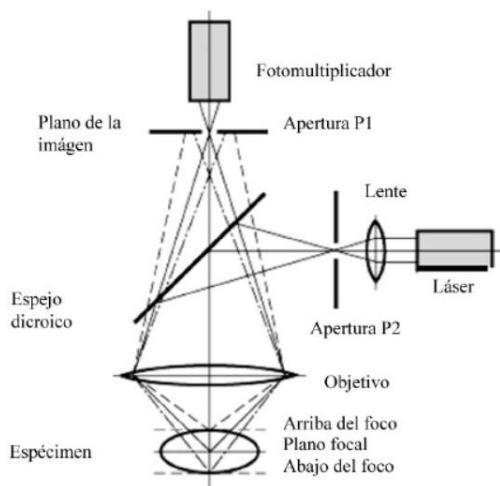


Ilustración 19: Funcionamiento de microscopio confocal [10]

La microscopía confocal de fluorescencia es la más utilizada en dermatología para analizar muestras *ex vivo* e *in vitro*. La microscopía confocal tiene muchas ventajas, como aumentar la resolución óptica y el contraste de la imagen de un espécimen; facilitar la reconstrucción de imágenes tridimensionales; permitir la recogida de secciones ópticas seriadas de especímenes gruesos; y posibilitar la obtención de imágenes *in vivo* sin los artefactos inducidos por el procesamiento de tejidos. Además de la LSCM, también pueden obtenerse imágenes tridimensionales de muestras no vivas mediante SCEM, en la que se utiliza un haz de electrones para la iluminación, lo que da lugar a una mayor resolución en comparación con la microscopía confocal. Las limitaciones de la microscopía confocal incluyen la profundidad de la imagen dentro de muestras gruesas y el coste en comparación con los microscopios convencionales. Los problemas del foto blanqueo de la sonda fluorescente y la fototoxicidad inherentes a la microscopía de fluorescencia convencional también están presentes en la microscopía confocal. La microscopía multifotónica es una estrategia alternativa a la microscopía de fluorescencia, que ofrece una mayor resolución, una profundidad de imagen algo mayor y un foto blanqueo mínimo. Las tecnologías de microscopía son prometedoras y siguen perfeccionándose. [Nwaneshiudu 2012]

El microscopio que hemos usado pertenece a los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación, SCAI, adscritos al Vicerrectorado de Investigación de la UJA



Ilustración 20: Microscopio confocal SCAI UJA [11]

2.2 Rugosímetro

El rugosímetro utilizado para este TFG es el rugosímetro Surftest SJ-210. Es un instrumento de medición de rugosidades, palpa la superficie de diferentes piezas, calcula la rugosidad de la superficie y muestra los resultados directamente sobre una pantalla integrada en el mismo dispositivo, lo que lo hace muy cómodo y portátil, al no depender de más hardware o software externo.



Ilustración 21: Rugosímetro [18]

El rugosímetro usado en este caso es del tipo mecánico, descrito anteriormente. En este caso sus principales características son:

Modelo		Modelo Padrão		Modelo Retrátil		Modelo Transversal			
		SI-210 0,75mN	SI-210 4mN	SI-210 0,75mN	SI-210 4mN	SI-210 0,75mN	SI-210 4mN		
Código	mm pol/mm	178-560-01	178-560-02	178-562-01	178-562-02	178-564-01	178-564-02		
		178-561-01	178-561-02	178-563-01	178-563-02	178-565-01	178-565-02		
Eixo X		16,0 mm				5,6 mm			
Curso Total	Curso Sensor Resolução	360 µm (-200 µm até +160 µm) 360 µm / 0,02 µm, 100 µm / 0,006 µm, 25 µm / 0,002 µm							
Velocidade de Medição		Durante a medição: 0,25mm/s, 0,5mm/s, 0,75mm/s Retorno: 1mm/s							
Força de medição / Formato da ponta		0,75mN/60°, 2µmR (quando o código termina com "-01") 4mN/90°, 5µmR (quando o código termina com "-02")							
Força de apoio		400mN ou menos							
Normas de referência		JIS1982/ JIS1994/ JIS2001/ ISO1997/ ANSI/ VDA							
Perfis calculados		Perfil primário, Perfil de Rugosidade, Perfil Df, Perfil Motif							
Parâmetros		Ra, Rc, Ry, Rz, Rq, Rt, Rmax, Rp, Rv, Rz3, Rsk, Rku, Rc, RPr, Rsm, Rz1max, S, HSc, Rz1S, Rp1, R3a, R3q, R1c, Rmr, Rmr(c), R, c, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rp, rpt, tp, Htp, R, Rx, AR, Análise Livre							
Gráficos		BAC e ADC							
Filtros		Gaussiano, 2CR75, PC75							
Valores de Cutoff	λc λs^{*5}	0,08, 0,25, 0,8, 2,5 mm 2,5, 8 µm							
Comprimento de amostragem		0,08, 0,25, 0,8, 2,5 mm							
Quantidade de segmentos de amostra		x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9, x10, arbitrário (0,3 a 16,0mm; 0,01mm intervalo)				x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9, x10, arbitrário (0,3 a 5,6mm; 0,01mm intervalo)			
Tamanho da tela		36,7x48,9 mm							
Linguagem		16 línguas (Japonês, Inglês, Alemão, Francês, Italiano, Espanhol, Português, Holandês, Polonês, Húngaro, Sueco, Checo, Chínês Simples, Chínês Tradicional, Coreano, Turco)							
Apresentação dos resultados		Vertical: 1 linha/3 linhas/Gráfico Horizontal: 1 coluna/4 colunas/Gráfico (condição direita/esquerda)							
Impressão *1		Condição de Medição / Resultados/ Resultados por Segmento/ Perfil Gráfico/ Curva de porcentagem de Material / Curva de distribuição da Amplitude / Detalhes da Medição							
Funções IO		USB IF, Saída Digimatic, Saída Impressora, RS-232C IF, Pedal IF							
Funções	Configurável	Os parâmetros podem ser selecionados para cálculo, apresentação e impressão.							
	Função de avaliação*2	Regra do valor máximo, Regra dos 16%, Regra do valor médio							
	Grava as configurações	Quando desliga o aparelho							
Funções	Armazenamento	Memória: Condições de Medição (Até 10) Cartão de Memória (opcional): 500 configurações, 10.000 perfis, 500 imagens, Texto (Condição de medição/Dados Medidos/Perfis/Curva de porcentagem de Material / Curva de Distribuição da Amplitude)							
	Calibração	Auto-calibração com entrada do valor padrão / Calibração pela média de vários valores (Até 5x)							
Economia de energia		"Auto Sleep" (configurável de 10 a 600 segundos) *3							
Alimentação		Bateria interna (bateria recarregável Ni-MH) / Carregador para tomada Tempo de carga de 4 horas (pode variar em função da temperatura do ambiente) Endurance: cerca de 1000 medições (differs slightly due to use conditions/environment)							
Dimensões Externas	Unidade principal Drive (Acionador)	160x65,8x52,1 mm (tampa fechada, sem o sensor) 115x23x26 mm (sem o sensor)							
Peso		Aprox. 500 g (Unidade principal, Drive, Sensor)							
Acessórios Padrão		128BA303	Cabo de conexão*4			128BA303	Cabo de conexão*4		
		178-601	Padrão de rugosidade			178-605	Padrão de rugosidade		
		128BA699	Estojo			12AAE643	Apoio para ponta		
		128BAK700	Suporte de calibração			12AAE644	Adaptador em V		
			Película de proteção para a tela			128BAK699	Estojo		
			Carregador, Manual			128BAK700	Suporte de Calibração		
			Guia rápido, Certificado de Garantia						

En la siguiente fotografía se pueden observar sus principales partes.



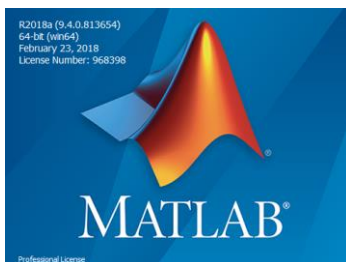
2.3 Fusion 360



Fusion 360 es una plataforma de software de modelado 3D, CAD, CAM, CAE y PCB basada en la nube destinada al diseño y la fabricación de productos.

Fusion 360 fue creado en 2013 por Autodesk, líder mundial en desarrollo de software de diseño 2D y 3D, que también cuenta con programas tan populares como AutoCAD y Tinkercad.

2.4 Matlab R2018a



MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada por millones de ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. *[Matlab - El Lenguaje del Cálculo Técnico 2023]*



2.5 Ultimaker Cura (5.1.1)

Es una aplicación diseñada para impresoras 3D, en la que se pueden modificar los parámetros de impresión y después transformarlos a código G. El funcionamiento de Ultimaker Cura es dividir el archivo del modelo de un usuario en varias capas, generando un código G para la impresora 3D. Cuando ya se haya finalizado el proceso, el código G se envía a la impresora por medio de un dispositivo de almacenamiento o vinculando la impresora

con el software por medio de una conexión, para que después la impresora fabrique el objeto físico.

2.6 Impresora Elegoo neptune 2

Ficha técnica de la impresora

[Elegoo, 2022]

- Material del marco: Extrusión de aluminio mecanizada por CNC
- Tecnología de modelado: FDM (Fused Deposition Modeling)
- Tamaño de impresión: 220x220x250mm
- Velocidad de impresión: ≤ 180 mm/s, velocidad normal a 30-60mm/s
- Precisión de impresión: ± 0.1 mm
- Espesor de la capa: 0.1-0.4mm
- Diámetro de la boquilla: 0,4mm(se puede sustituir por boquillas de 0,3mm y 0,2mm)
- Cantidad de boquillas: 1
- Temperatura máxima de la boquilla: 260° Celsius
- Temperatura MAX. de la cama caliente: 100° Celsius
- Transferencia de archivos: Tarjeta TF impresión offline, impresión online
- Formato de archivo: .stl, .obj, .amf
- Rebanador: Cura, Simplify3D, Repetier-host
- Fuente de alimentación: Entrada: 100-120/200-240V 50/60Hz Salida: 24V 17A
- Compatibilidad del filamento: PLA, ABS, TPU, PETG, madera, mármol, etc.
- Diámetro del filamento: 1.75mm
- Precisión XY: 0.012mm
- Precisión Z: 0.001mm
- Tarjeta de control: STEM32 F103
- Interfaz de usuario: Inglés, francés, alemán, ruso, italiano, español, japonés, chino
- Reanudación de la impresión: Sí
- Detección de filamento: Sí



Ilustración 24: Impresora elegoo neptune [12]

En este caso en particular el equipo tiene algunas mejoras sobre la impresora base:

- Extrusora de doble engranaje



Ilustración 25: Extrusor de doble rueda [13]

- Cama magnética



Ilustración 26 Cama magnética kingroon [14]

- Capricorn Bowden PTFE

Imprescindible en este caso para poder realizar las impresiones de los materiales implicados en este trabajo, puesto que los tubos convencionales se degradan a partir de los 240-245°C y producen atascos durante la impresión.



Ilustración 27: Tubo capricron [15]

2.7 Materiales usados

Para usar los materiales de la forma más óptima posible lo primero que hicimos fue diversas pruebas como una torre de temperatura, para saber la temperatura óptima de impresión, torre de retracciones, para saber cuáles son la distancia de retracción y velocidad de retracción que mejores resultados dan.

Para todas estas pruebas nos hemos ayudado de un complemento de Cura llamado “AutoTowersGenerator”. [Kartchnb. (n.d.). Kartchnb/autotowersgenerator]

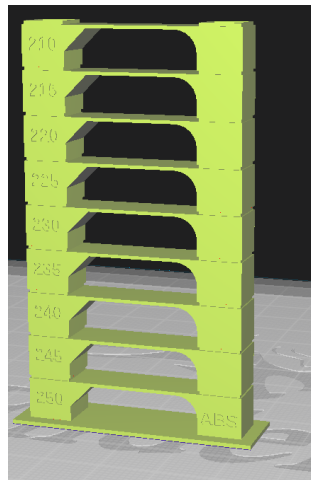


Ilustración 28: Torre de temperatura ABS

PETG Sunlu blanco



Ilustración 29: PETg Sunlu blanco [16]

ABS rojo smart filaments



Ilustración 30: ABS rojo smart filaments [17]

Características principales de los materiales

	ABS	PETG
Densidad	1,04 (g/cm ³)	1,27 (g/cm ³)
Temperatura de fusión	220 (°C)	240(°C)
Módulo de elasticidad	1335,9 (MPa)	72(MPa)
Tensión de rotura	29(MPa)	32,6(MPa)
Elongación máxima	7,08 %	7,74%
Resistencia a la flexión	66 (MPa)	72(MPa)

3 Diseño de experimentos

Para el diseño de experimentos hemos pensado en varios factores de los cuales solo hemos escogido 3:

- Ángulo de impresión: 9 niveles
- Material: 2 niveles
- Altura de capa: 3 niveles

Dando un total de 54 probetas que hay diseñar, fabricar, estudiar y procesar los datos.

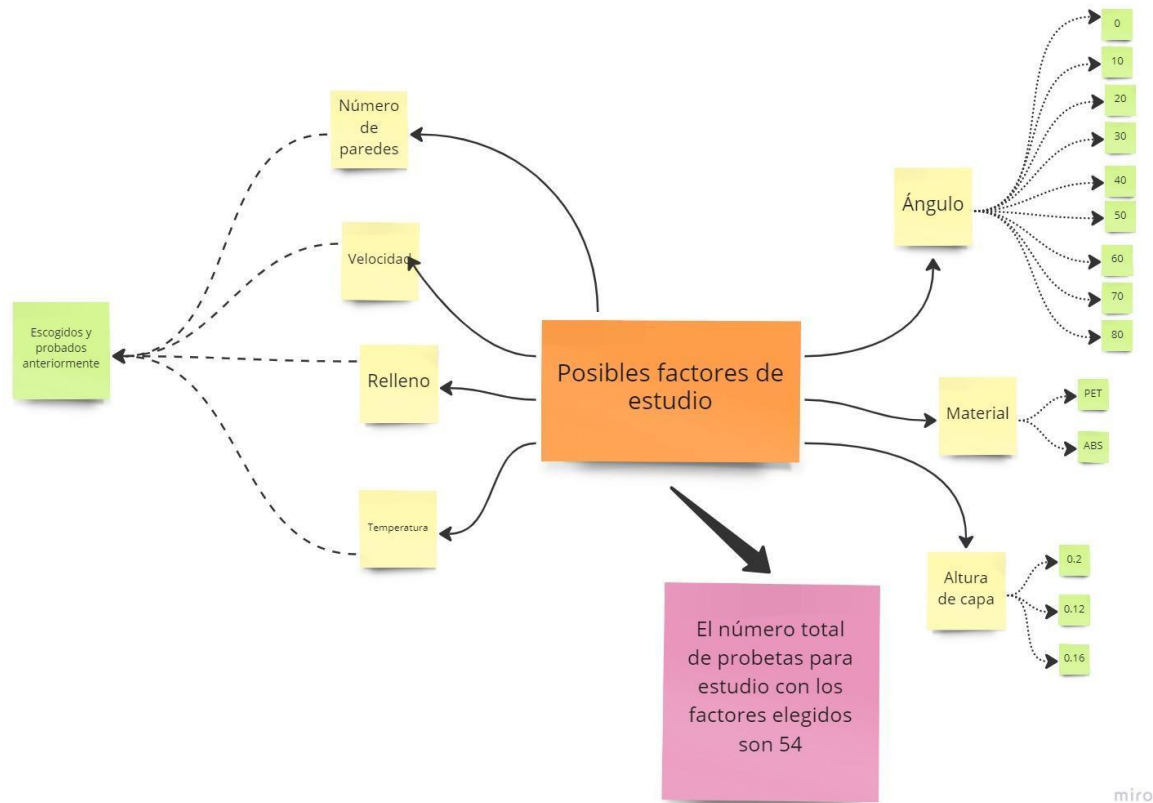


Ilustración 31: Esquema factores de estudio

Los factores a la izquierda de la imagen los hemos estudiado previamente:

- Relleno: hemos usado un 20% de relleno ya que con menos relleno no obtenemos mejores resultados para este estudio, y con menos se sufre el riesgo de probetas demasiado endebles.
- Temperatura: Se hizo una torre de temperatura en cada material para saber cuál es la temperatura óptima para cada material en la impresora en cuestión, ya que este parámetro varía según el hardware que se utilice para la impresión.
- Velocidad de impresión: Se han puesto velocidades conservadoras, puesto que son materiales que necesitan más temperatura para ser impresos y por esto mismo el flujo de material es complicado de mantener constante si le exigimos demasiada velocidad (que afecta directamente al flujo).
- Paredes: En este caso es muy importante el uso de varias paredes, puesto que en caso contrario el relleno podría quedarse marcado sobre las paredes exteriores, afectando a la rugosidad. También hay que tener en cuenta que

uno de los materiales que vamos a estudiar (PET) es ciertamente translúcido, y uno de los métodos que vamos a utilizar es óptico, por lo que podría afectar de forma directa seleccionar pocas paredes.

4 Diseño de probetas

Las probetas son de 40*15*4mm. Estas dimensiones son impuestas por el microscopio usado posteriormente para medir la rugosidad.

Para la creación de las probetas hemos usado el software ya mencionado Fusion 360.

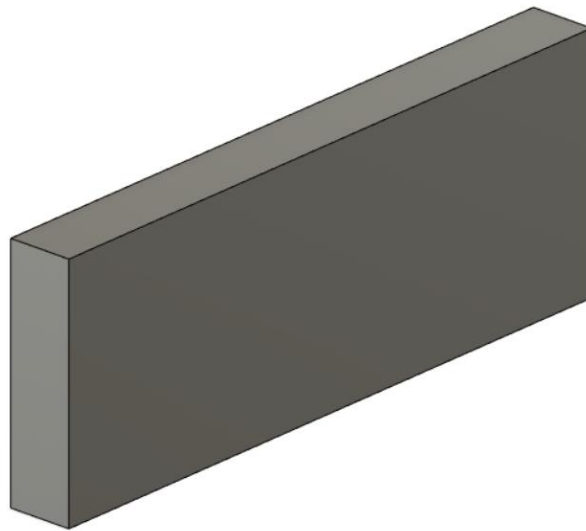


Ilustración 32: Probeta

Para distinguir las piezas más fácilmente las marcamos con un número equivalente a su ángulo de impresión posterior

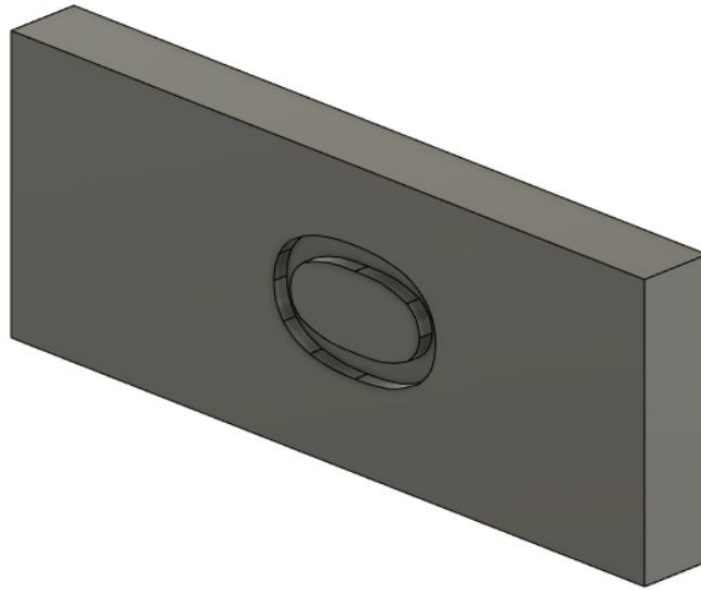


Ilustración 33: Probeta ángulo 0

Algunos ejemplos de los diseños

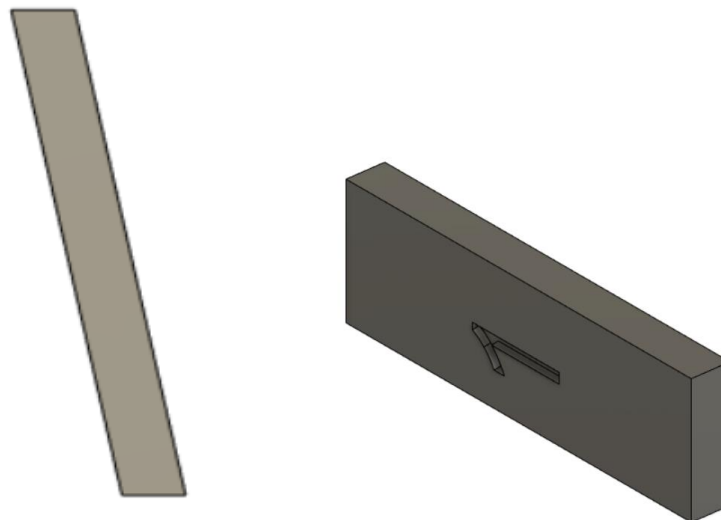


Ilustración 34: Probeta ángulo 10



Ilustración 35: Probeta ángulo 40

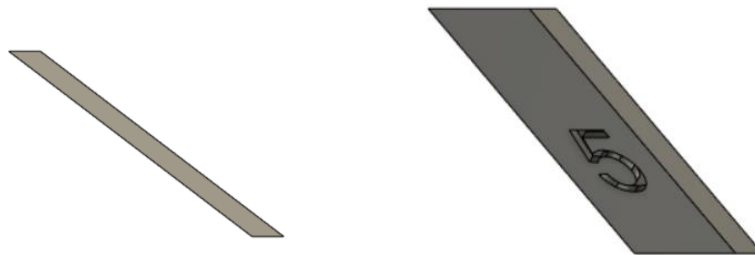


Ilustración 36: probeta ángulo 50



Ilustración 37: Probeta ángulo 60

Al colocarlas en el laminador las colocamos de esta forma, con el ángulo que vamos a medir apuntando arriba, para que de esta forma quede lo más limpia posible la cara para la hora de la medición posterior.

Como podemos observar los soportes solo se imprimen en las piezas que tienen un ángulo mayor o igual a 50° respecto a la base de impresión. Esto se debe a pruebas

hechas anteriormente para saber hasta qué ángulo es capaz de imprimir en voladizo la impresora.

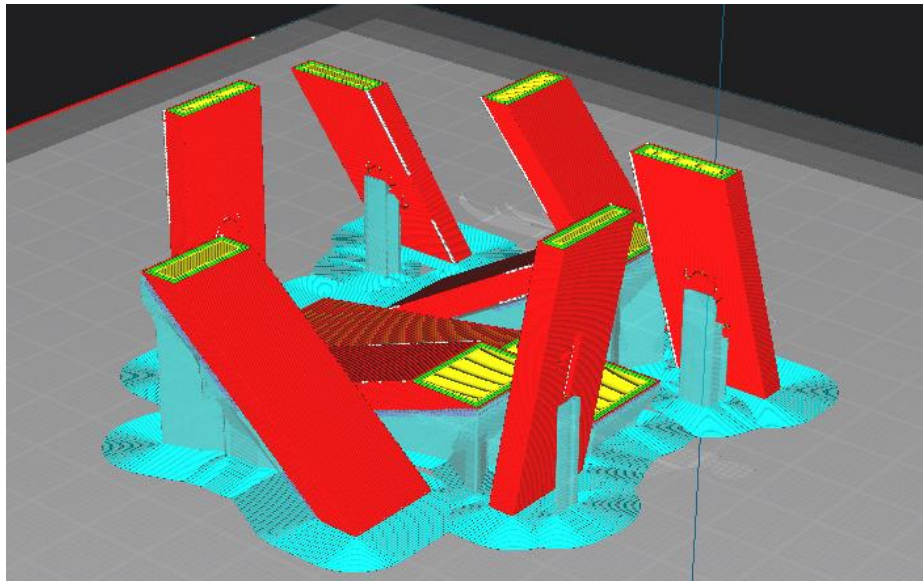


Ilustración 38: Disposición de las probetas en Cura

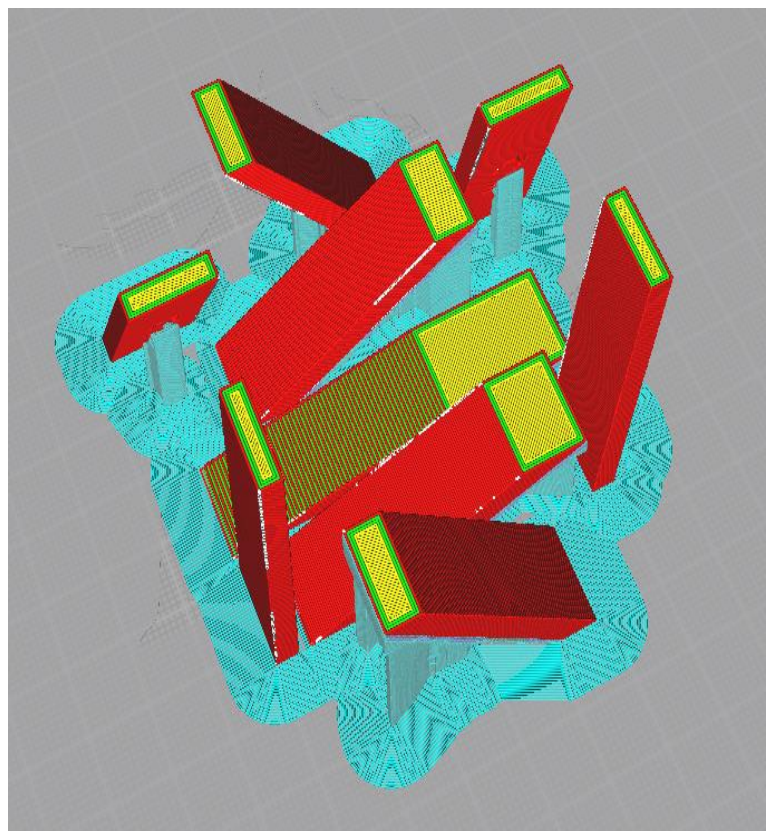


Ilustración 39: Disposición de las probetas en cura (2)

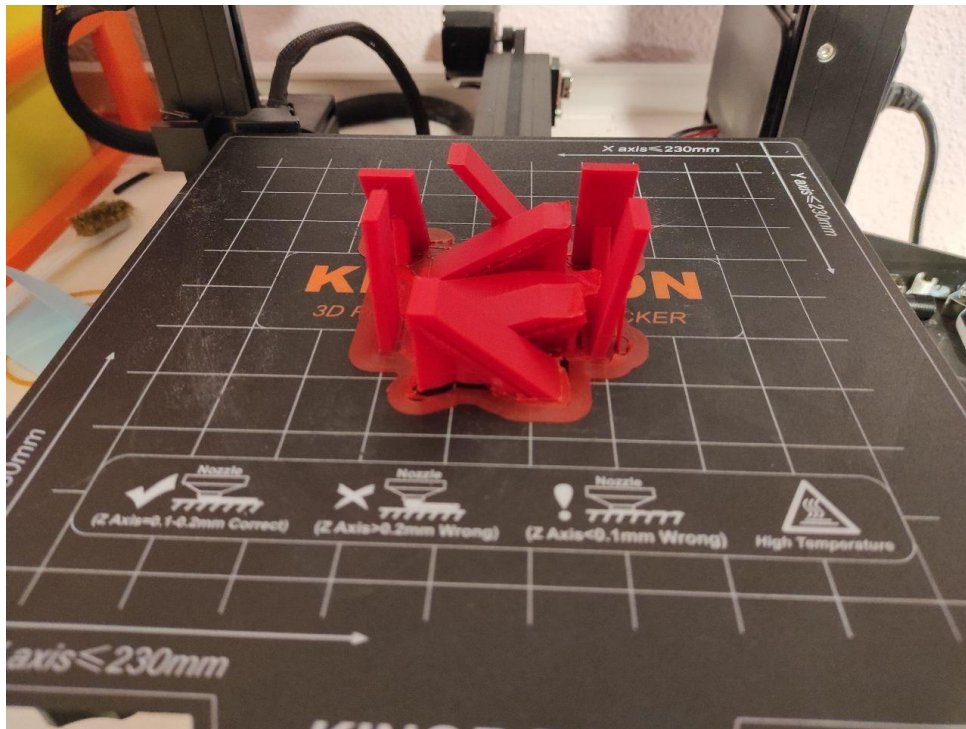


Ilustración 40: Resultados de la impresión

5 Fabricación de probetas

En este apartado se explica de forma resumida y cronológica como se han obtenido las probetas, desde el diseño hasta la medición.

- 1) Lo primero de todo fue pensar el diseño. Estos diseños estuvieron supeditados por la posterior medición de las probetas en el microscopio, puesto que el microscopio tiene una base para colocar objetos que deben tener medidas comprendidas entre 25 y 60 milímetros, con un espesor máximo de 8 milímetros.
- 2) Una vez claro el diseño lo creamos en el software Fusion 360. En este software aprovechamos para marcar las probetas en el fondo con un número para posteriormente distinguirlas de forma más sencillas. Estos archivos los exportamos mediante el propio

programa a formato stl, que es el que necesitamos para usarlo en el próximo paso.

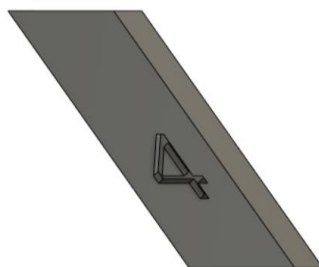


Ilustración 41: Probeta ángulo 40

- 3) Creado el modelo pasamos al software de laminación Ultimaker Cura. En este software lo primero antes de imprimir las probetas finales hay que decidir los parámetros más influyentes de impresión para cada material siendo algunos de ellos: la temperatura, la velocidad de impresión, el porcentaje de relleno, ángulo de voladizo admisible sin soporte, tipo de soporte, la cantidad de paredes, forma de adherencia a la placa y parámetros de retracciones. Algunos de ellos se probaron con las ya mencionadas torres de prueba, otros se ajustaron simplemente por la experiencia previa y algunas pruebas primerizas de cada material y otros reajustados después de que una impresión saliese mal.

Parámetros más relevantes a la hora de la impresión

- Boquilla 0.4mm
- Ancho de línea 0.4mm
- 3 líneas de pared
- 30% de relleno con estilo rejilla
- Soportes activados para voladizos de más de 60°
- Velocidad de impresión 20 mm/s en el relleno y 10 mm/s en las paredes
- Retracciones activadas
- Cama caliente a 90°C

- Temperatura para ABS 230°C
- Temperatura para PETG 235°C
- Ventilador de capa apagado
- Adherencia tipo balsa para ABS
- Adherencia tipo falda para PETG

4) Ajustados los parámetros ya mencionados pasamos a crear los archivos de impresión en formato gcode. Para hacer esto se abren los archivos ya mencionados stl de cada probeta y se colocan de forma óptima como hemos visto en apartados anteriores, dejando la parte con la numeración pegada a la base. Hecho esto se crearon los 3 archivos directamente solo cambiando el parámetro de altura de capa (de 0.2 a 0.16 a 0.12). Para cada altura se segmentan las probetas y se guarda en formato gcode para llevarlo posteriormente a la impresora.

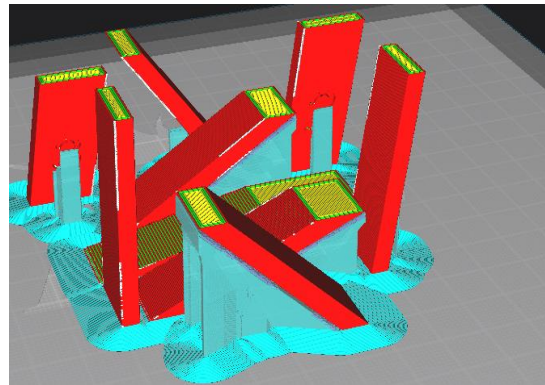


Ilustración 42: Probetas tras la segmentación

El proceso de segmentación lo que hace es descomponer los modelos seleccionados en laminas muy finas (de la altura de capa deseada), cada lámina el programa la escribe en formato gcode, que es un formato que descompone cada movimiento que debe hacer la impresora en cada lámina y con todos los parámetros definidos. Un proceso que de no ser por los softwares sería prácticamente imposible de hacer a mano.



Ilustración 43: Ejemplo laminación

- 5) Los archivos son llevados a la impresora y seleccionados en el menú. Antes de lanzarlos a imprimir se revisa que el material fluya bien, que este la boquilla y la cama limpia. Para asegurarnos que la impresión se adhiere bien se aplica un poco de fijador en spray.

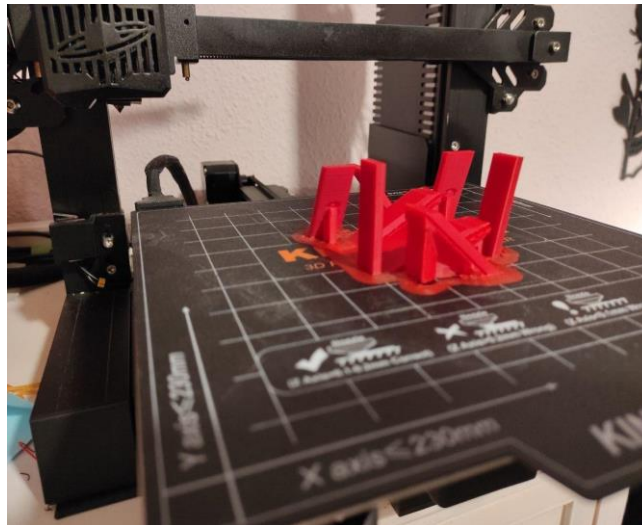


Ilustración 44: Resultado de las probetas

- 6) Las probetas se retiran de la cama caliente, se limpian de soportes y se guardan en bolsas separadas de cada altura de capa.
- 7) Como parte adicional para este caso hubo que limpiar algunos bordes de las probetas para que quedasen perpendiculares en el proceso de medición con el rugosímetro.

6 Proceso de medición

6.1 Rugosímetro

Para la obtención de datos hemos seguido dos vertientes. La primera y más simple con un rugosímetro.



Ilustración 45: Rugosímetro [18]

El rugosímetro usado en este caso es del tipo mecánico, descrito anteriormente. Es muy importante que en la utilización del mismo se mantenga totalmente perpendicular el palpador a la superficie que deseamos medir.

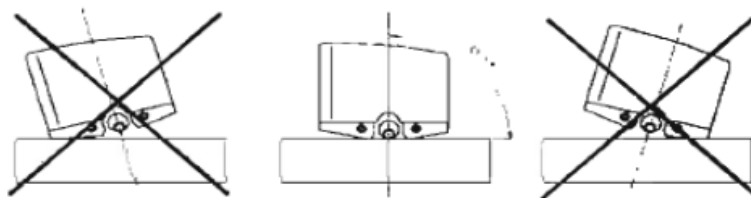


Ilustración 46: Ayuda de uso (1) [19]

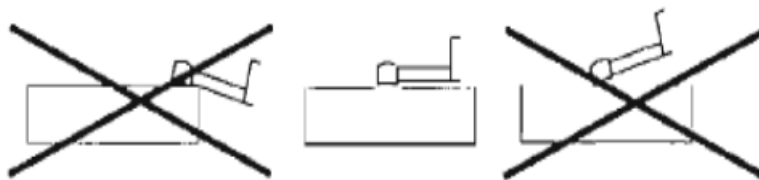


Ilustración 47: Ayuda de uso (2) [19]

[Andrés López, 2019]

6.2 Microscopio

La segunda forma de obtención de datos ha sido más compleja: primero se llevaron muestras de las probetas a analizar al microscopio confocal láser mencionado anteriormente. Este microscopio nos devolvió entre otras cosas unos ficheros de datos con valores de luminosidad según la cantidad de material que esté atravesando el láser, lo cual podemos extrapolar a profundidad.

El microscopio también nos proporcionó algunas fotografías como las siguientes:

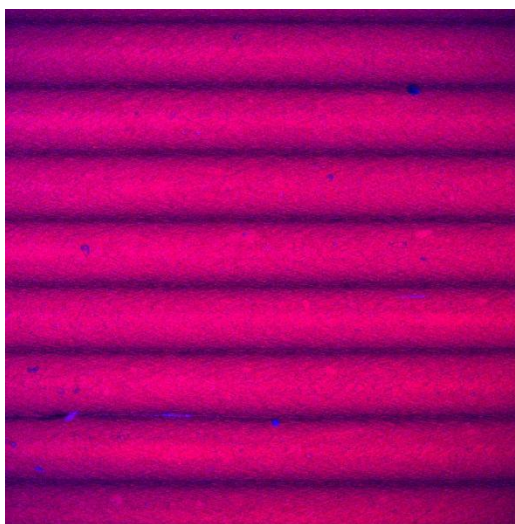


Ilustración 48: Fotografía a 0°



Ilustración 49: Fotografía 70°

El resto de datos el software del microscopio nos puede hacer una reconstrucción de la superficie. (Anexo 2)

Aun teniendo estas imágenes el software no nos puede dar la profundidad en cada imagen, por lo que posteriormente hemos usado software como Matlab o Python.

7 Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos nos hemos servido de la utilización de Matlab como en trabajos anteriores. En este caso hemos procesado alguna parte de los datos en Python, ya que descubrimos que el procesamiento inicial de los datos era con diferencia, mucho más óptimo. El código mencionado anteriormente se encuentra en el [anexo 1.1](#).

Este código lee los datos obtenidos por el microscopio y se queda con el mayor dato de cada posición. Esto anteriormente se hacía revisando todos los números de cada matriz una y otra vez y compararlos con uno anterior para saber si es mayor que el guardado o no. Ahora con Python se ha creado una matriz tridimensional y solo hay que buscar el mayor en una sola dirección, en vez de repasar todas las matrices una y otra vez.

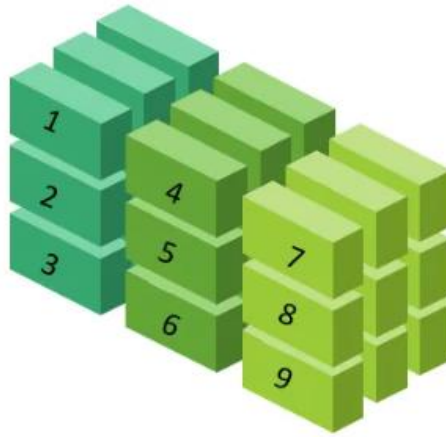


Ilustración 50: Matriz 3 dimensiones [20]

Una vez hecho esto obtenemos una matriz con todos los datos de mayor profundidad (mayor luminosidad) y otra matriz que nos interesa más que es la de profundidad real, puesto que sabemos a qué matriz pertenece cada dato de mayor luminosidad y además sabemos que cada corte tiene una micra de profundidad.

Después de este proceso usamos Matlab con las funciones creadas de “[Imágenes](#)” “[Agrupar y corte](#)”. La primera de ellas la que nos proporciona son distintas imágenes de las gráficas 3D que podemos obtener mediante Matlab ([Anexo 2](#)).

La segunda función nos da el perfil de una sección de cada probeta (Anexo 2).

Funcionamiento de código

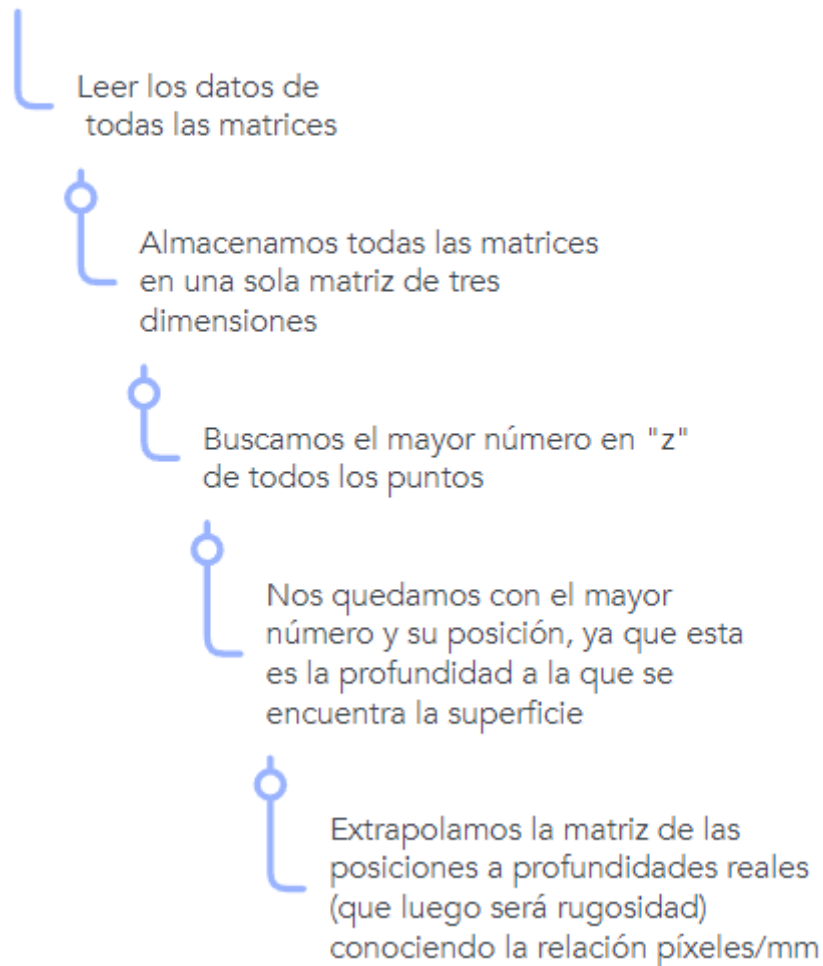


Ilustración 51: Explicación funcionamiento del código

8 Obtención de datos

Rugosímetro

Para obtener los datos mediante el rugosímetro se tomaron 5 medidas en cada probeta en distintos lugares de la probeta para obtener una idea general de la rugosidad en una mayor superficie de la probeta. A estos 5 valores se les hará la media para tener un único valor representativo de cada probeta.

Para el uso del rugosímetro es muy importante hacer las primeras medidas de calibración del mismo, y en este caso usar la longitud de muestreo acorde a las rugosidades que estamos obteniendo, en este caso 2,5 cm.

Entre cada medición movemos la posición en la que mide el rugosímetro para tener más superficie estudiada y poder evitar defectos que hayan podido suceder en la impresión. También es muy importante que ni la pieza ni el rugosímetro tengan ningún movimiento durante la propia medición, por lo que se usó cinta de doble cara para fijar ambos a la mesa.

Obtenemos finalmente los datos mostrados en el [anexo 3.2](#).

Matlab

Para obtener los resultados de los datos hemos probado varios softwares como “ImageJ” el cual es ampliamente utilizado para medir rugosidades en superficies, pero en este caso no era posible aplicarlo de forma correcta a nuestras imágenes. También hemos probado el software “Gwyddion” con el mismo resultado.

En este trabajo nos hemos inclinado por la utilización de Matlab para el cálculo de los resultados puesto que en trabajos anteriores se usaba el software online proporcionado por el NIST. Este software contaba con varias desventajas que hemos solucionado con el Matlab.

- Solo se pueden estudiar matrices de 200x200 valores, lo que nos fuerza a disminuir nuestras matrices obtenidas de 1024x1024 valores a un 20% de resolución.
- Este software al ser online no nos deja automatizar el proceso, por lo que solo se realizaba una comprobación del perfil obtenido, con la resolución ya bajada a un 20% una vez por ejecución. Perdiendo así todo el resto de valores que tenemos dentro de la matriz, al quedarnos solo con un perfil de toda la imagen 3D obtenida.

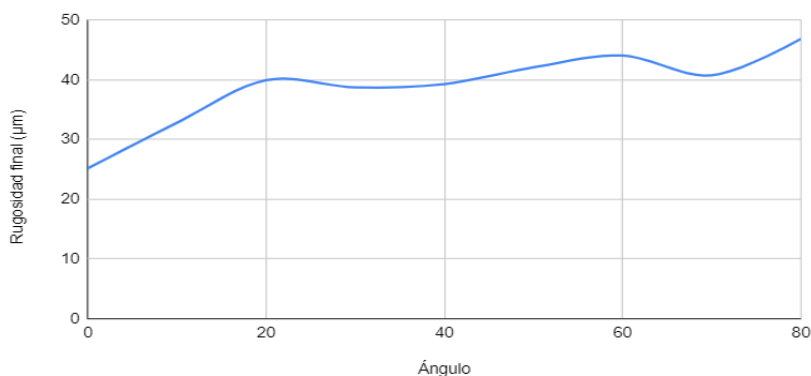
Finalmente hemos creado una función en Matlab “[Rugosidad media](#)” la cual nos calcula la rugosidad media mediante una aproximación cuadrática a la curva.

Para elegir la aproximación cuadrática hemos probado antes varias aproximaciones: lineal, de segundo, de tercer y cuarto orden. Después de elegir la cuadrática hacemos la media de la curva obtenida, obteniendo así el valor rugosidad media en las siguientes tablas.

ABS 0.2

Ángulo	Rugosidad final (μm)
0	25,17
10	32,825
20	39,959
30	38,76
40	39,32
50	42,113
60	44,104
70	40,783
80	46,896

Rugosidad final (μm) frente a Ángulo

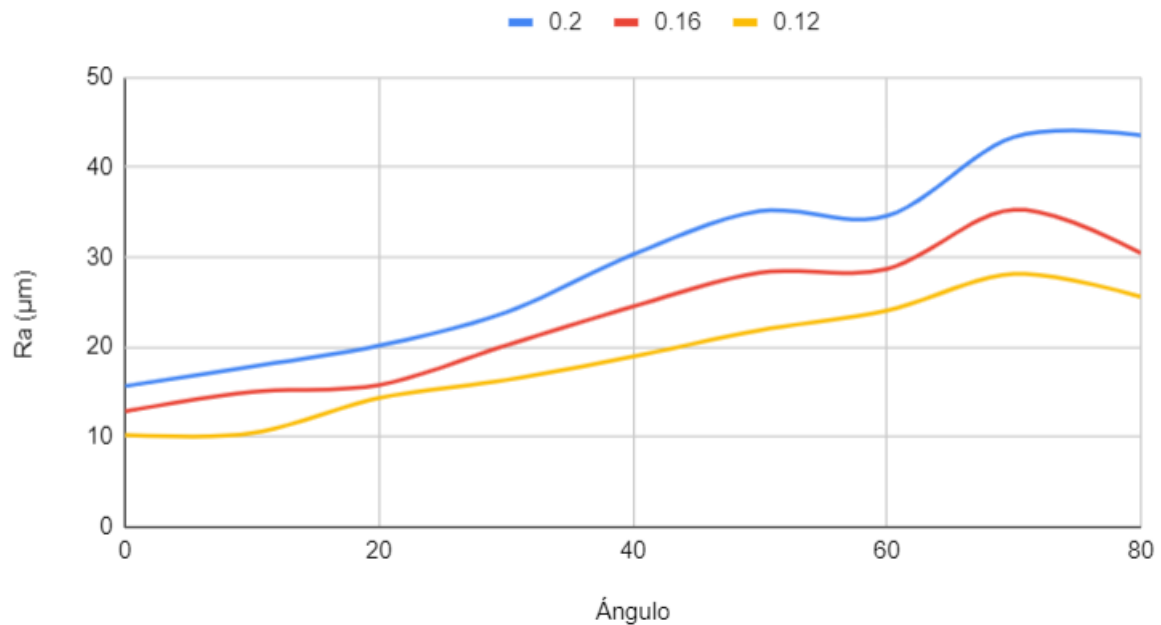


El resto de datos y gráficas se encuentran en el [anexo 3.1](#).

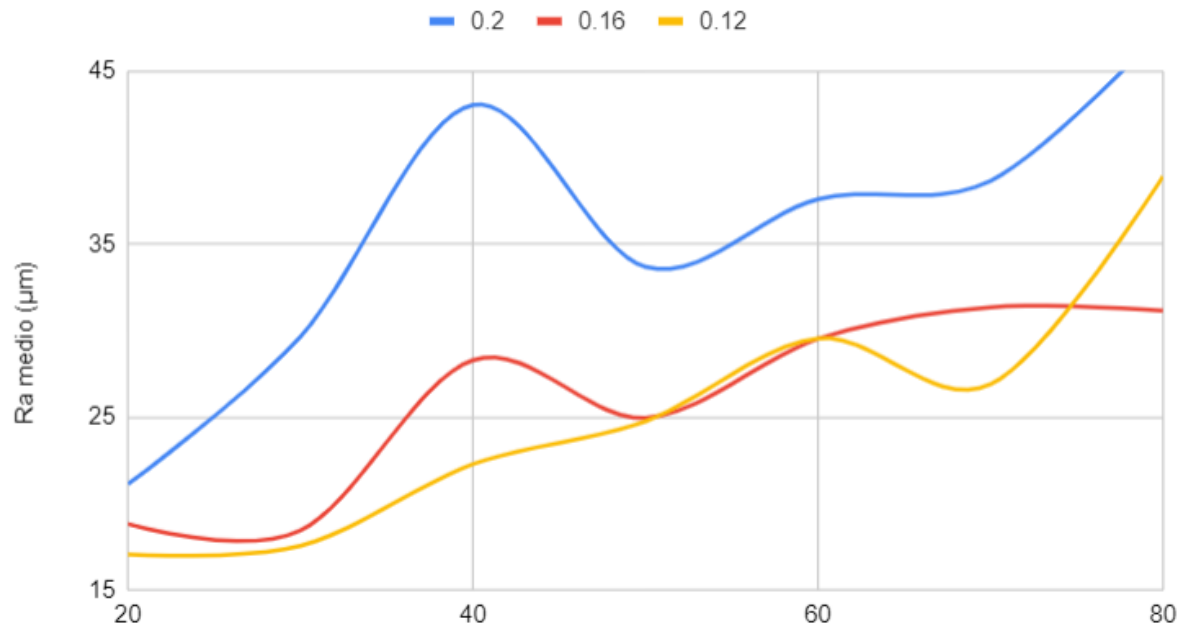
9 Resultados

En este epígrafe se presentan los resultados reflejados en gráficos, realizando una comparación entre los resultados más relevantes. A partir de esta información obtenemos las conclusiones del presente trabajo.

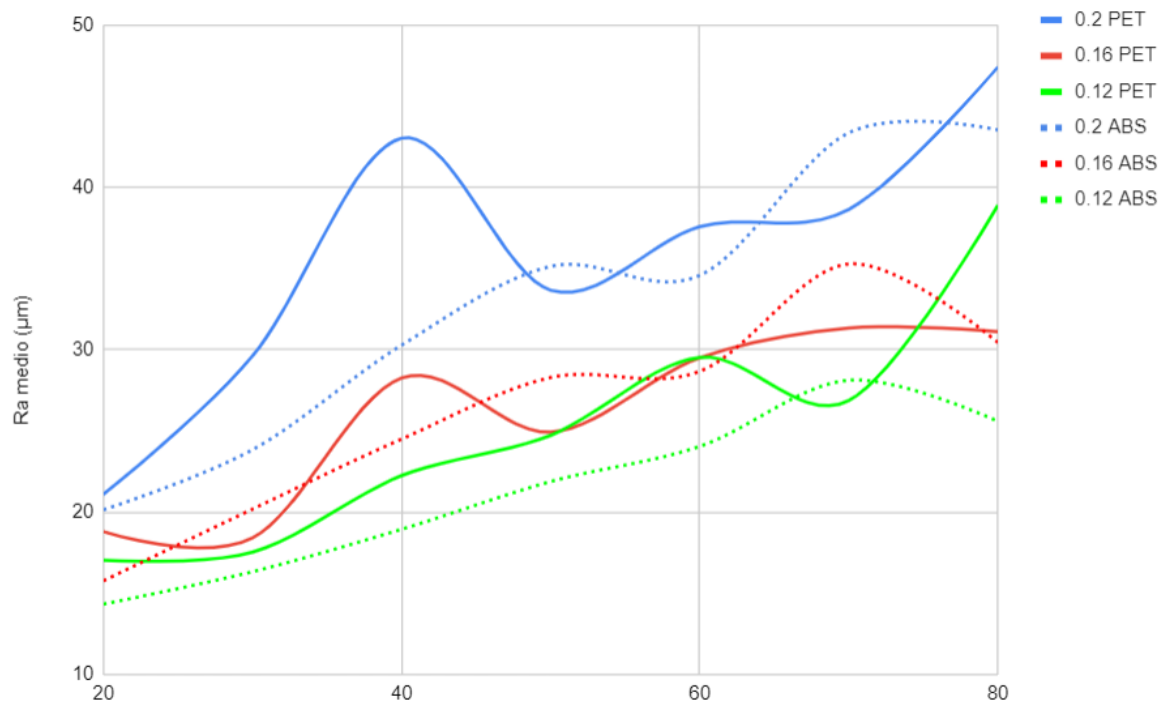
Comparación ABS rugosímetro



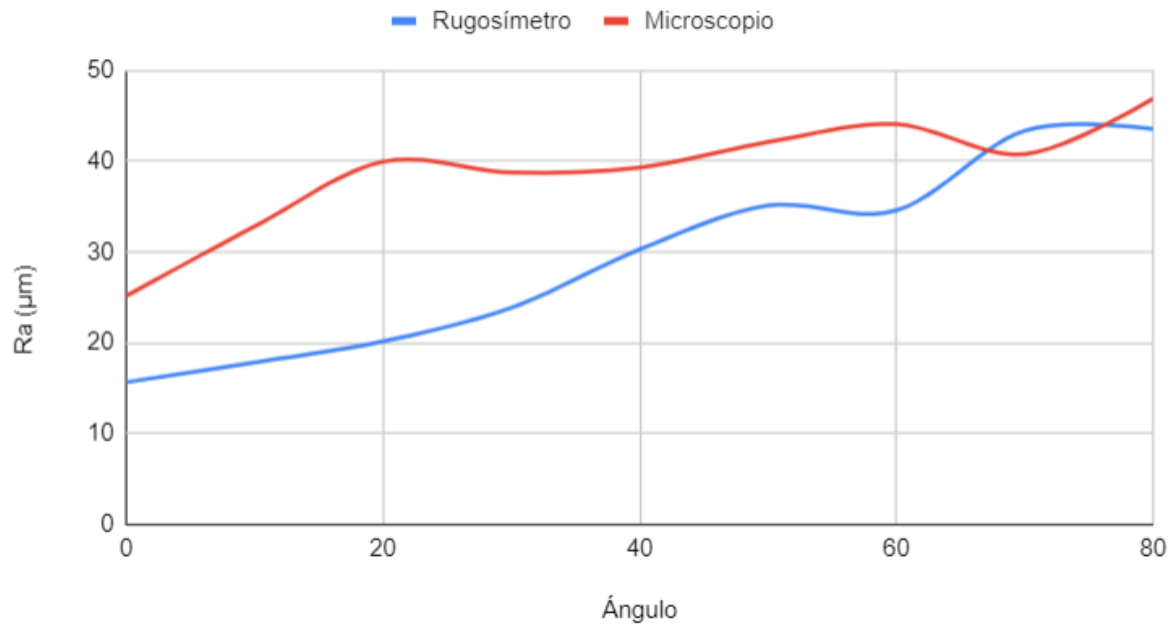
Comparación PET rugosómetro



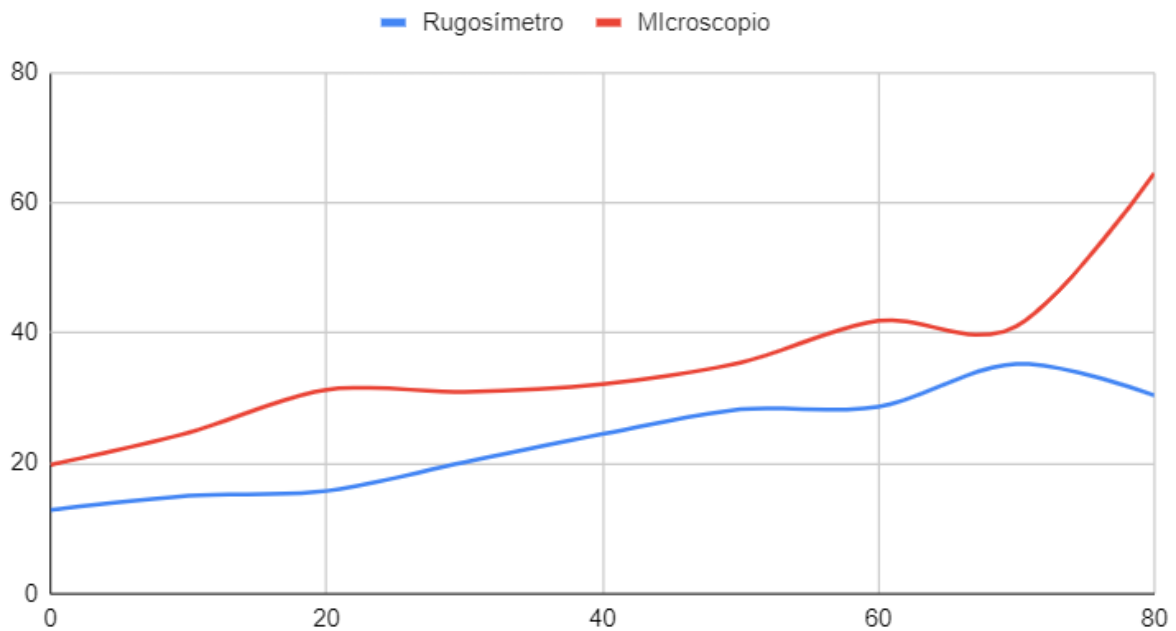
Comparación ABS//PET rugosómetro



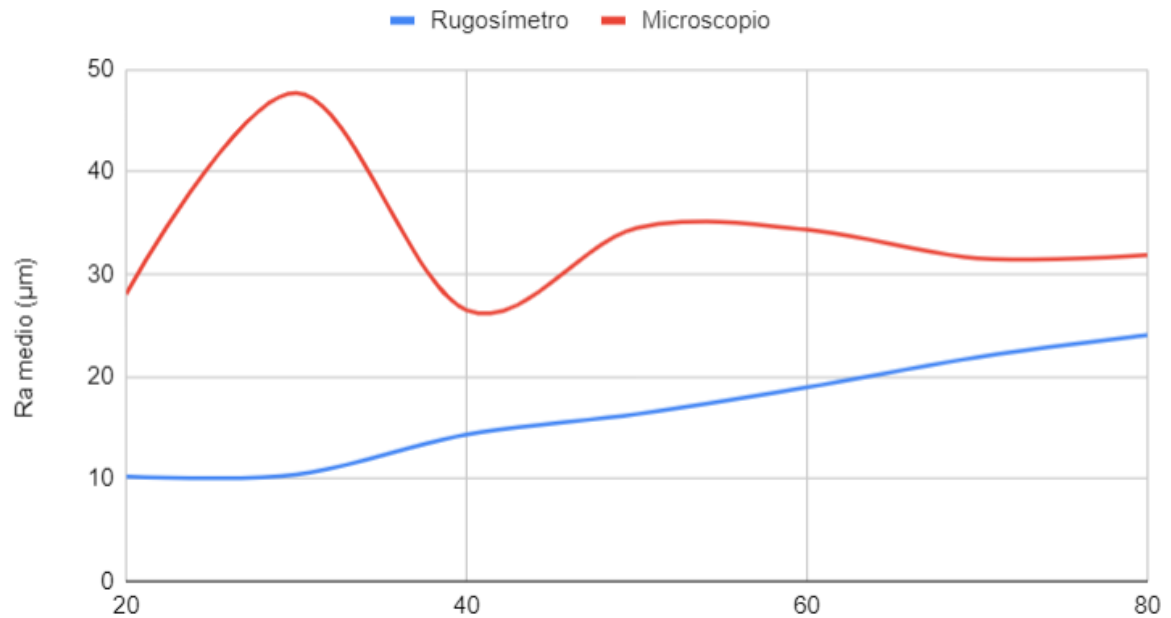
ABS 0.2 comparación métodos de medida



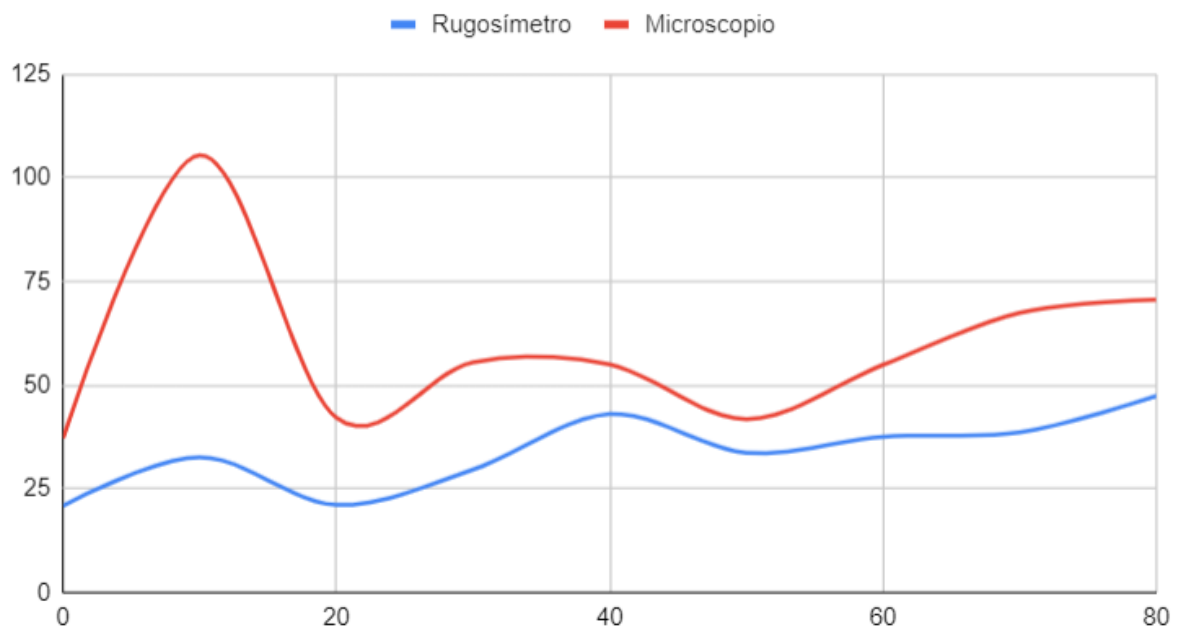
ABS 0.16 comparación métodos de medida



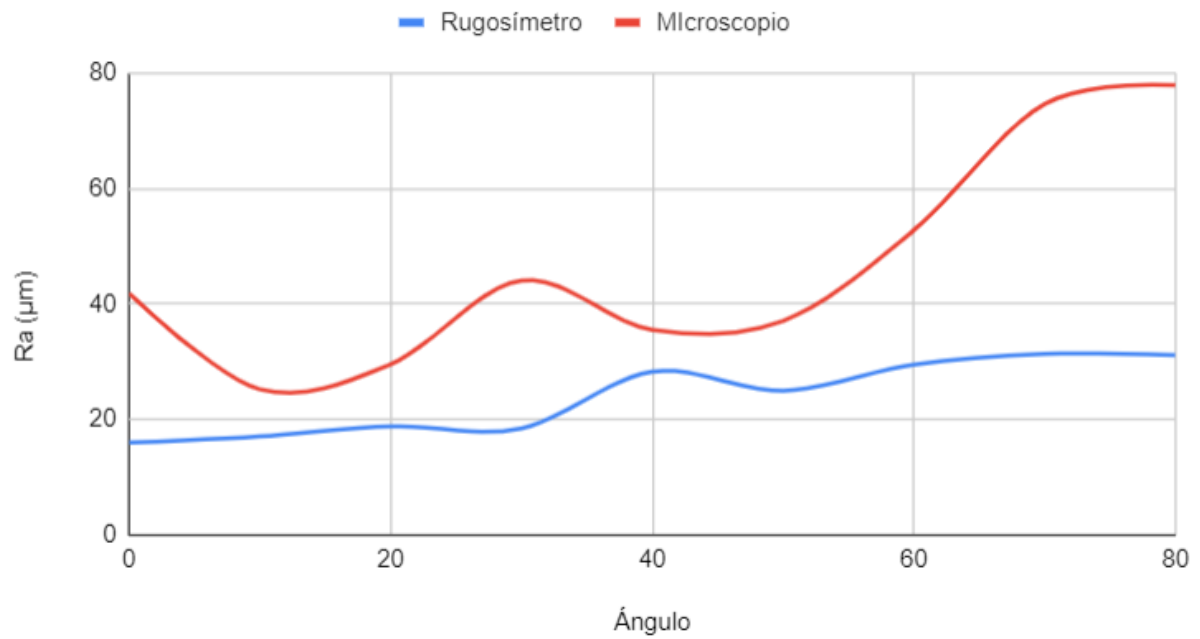
ABS 0.12 comparación métodos de medida



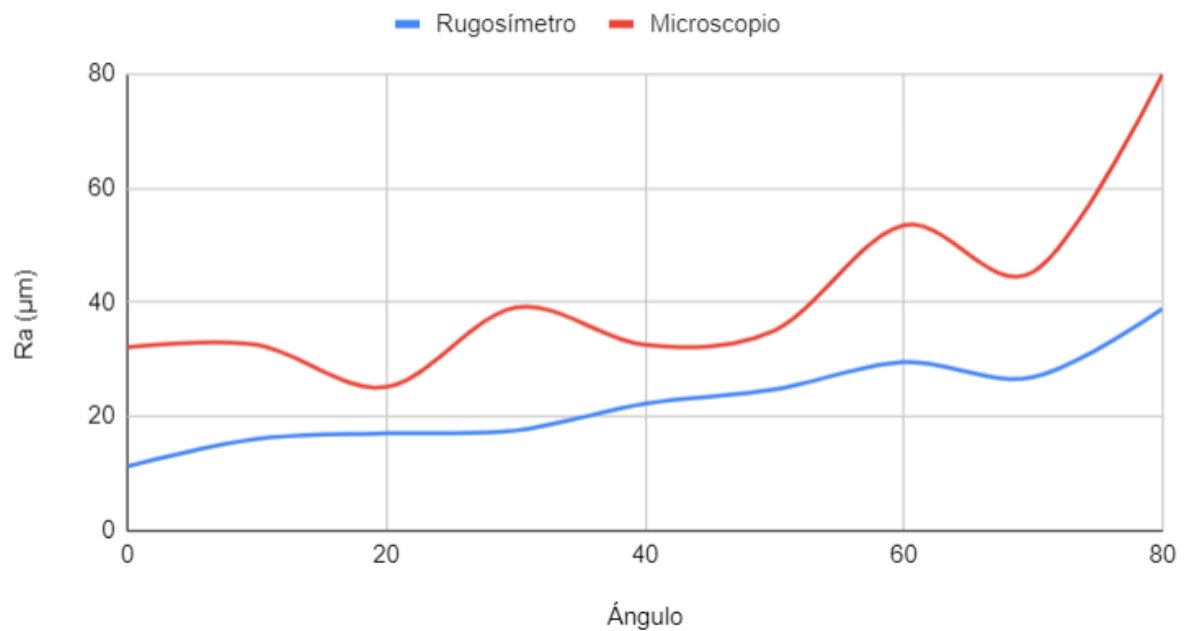
PET 0.2 comparación métodos de medida



PET 0.16 comparación métodos de medida



PET 0.12 comparación métodos de medida



Para complementar estos resultados hemos creado unas superficies de respuesta para ambas superficies.

Una superficie de respuesta es una representación matemática de una relación entre una o más entradas y una o más salidas. Se utiliza comúnmente en áreas como la ingeniería, la física y la biología para modelar y predecir el comportamiento de sistemas complejos.

En un sentido más amplio, una superficie de respuesta puede ser vista como un mapa que muestra cómo varían las salidas de un sistema ante diferentes valores de las entradas. Esta información puede ser utilizada para optimizar el rendimiento del sistema, identificar relaciones entre las variables y comprender el comportamiento subyacente del sistema.

En el contexto de un trabajo, la superficie de respuesta puede ser una herramienta muy útil para analizar y optimizar los procesos, mejorar la calidad de los productos y servicios, y para tomar decisiones informadas sobre la asignación de recursos.

Para nuestro caso en particular la superficie de respuesta nos puede aproximar una rugosidad dando como parámetros de entrada la altura de capa y el ángulo. Con los datos introducidos simplemente hay que interpolar entre los datos de entrada y los datos que forman la superficie de respuesta.

9.1 Superficie de respuesta ABS

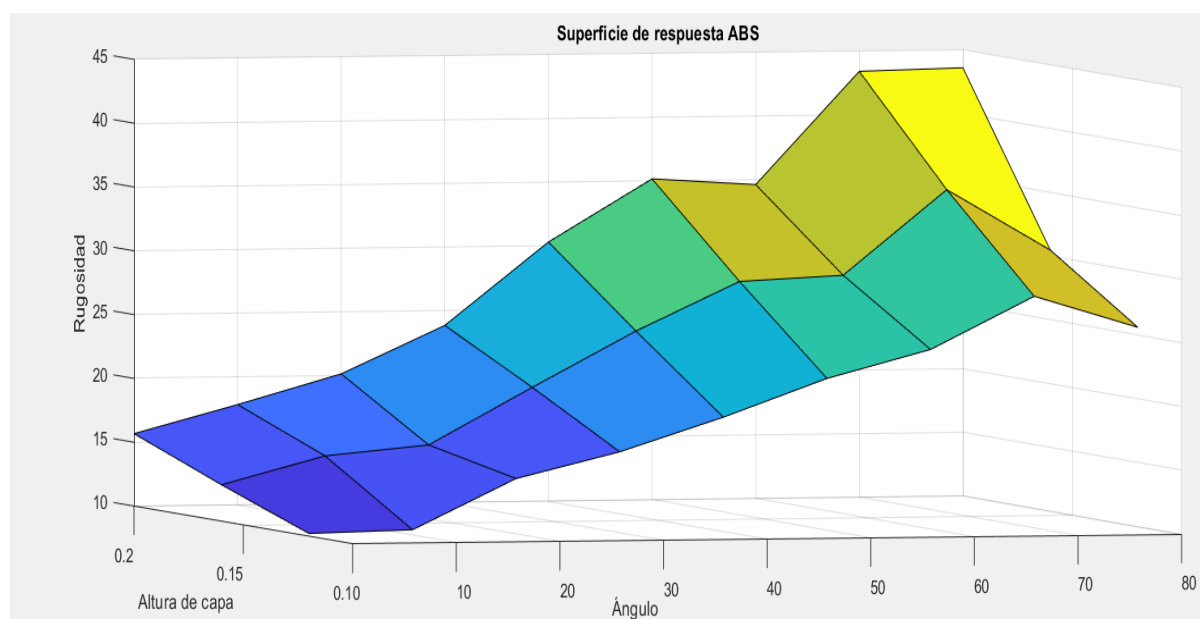
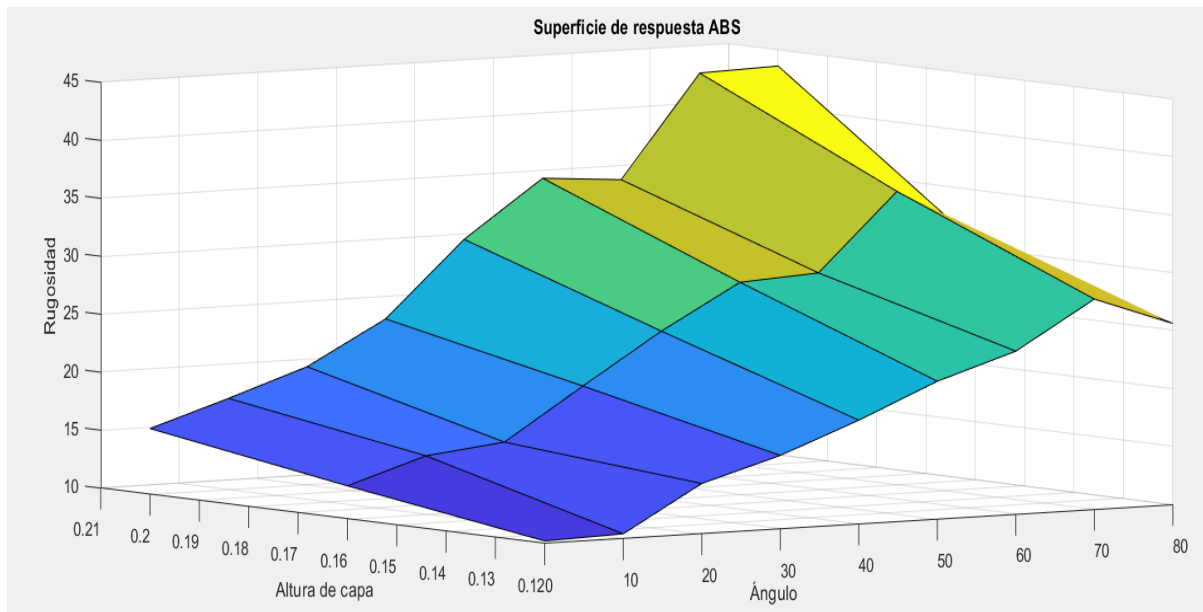
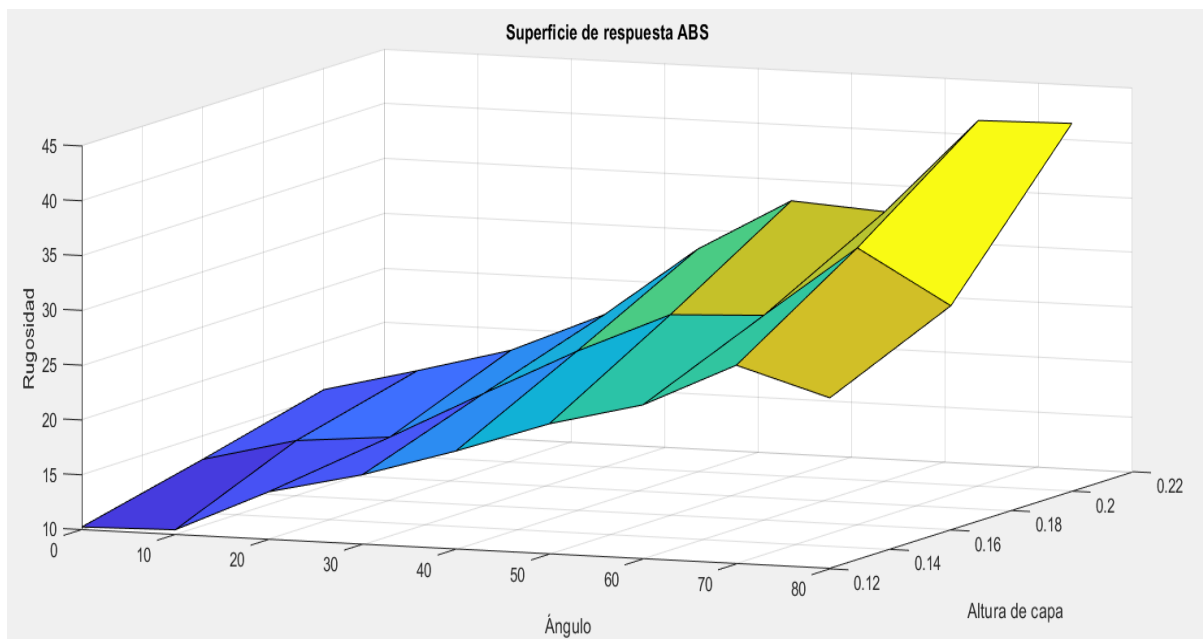


Ilustración 52: Superficie de respuesta ABS

*Ilustración 53: Superficie de respuesta ABS (2)**Ilustración 54: Superficie de respuesta ABS (3)*

9.2 Superficie de respuesta PET

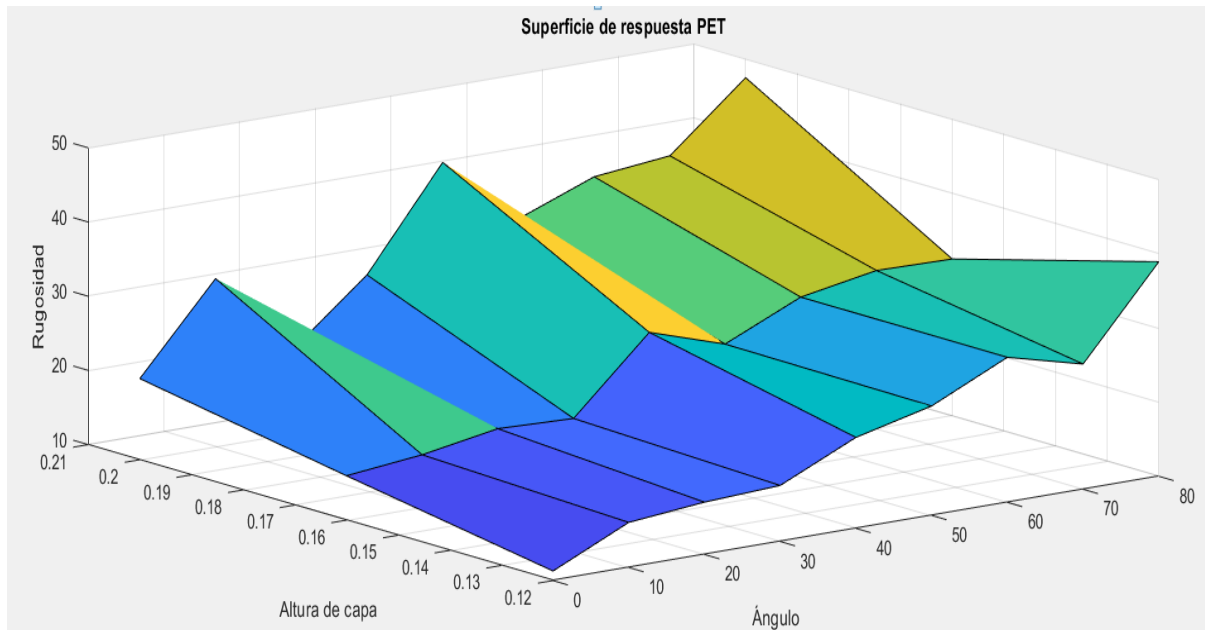


Ilustración 55: Superficie de respuesta PET

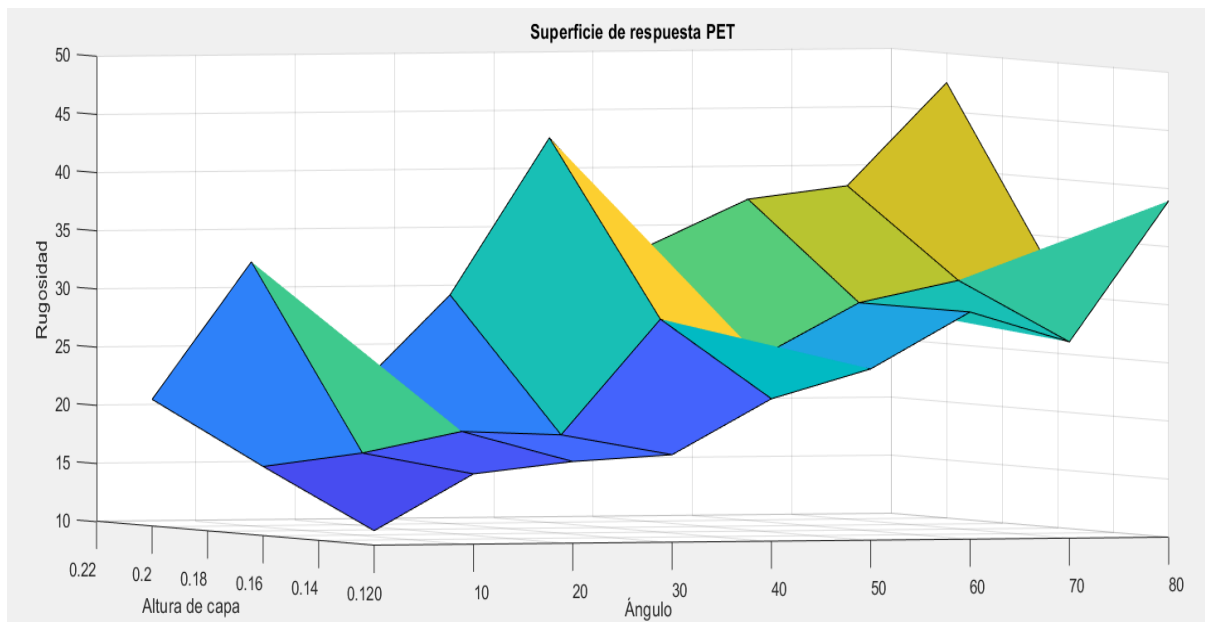
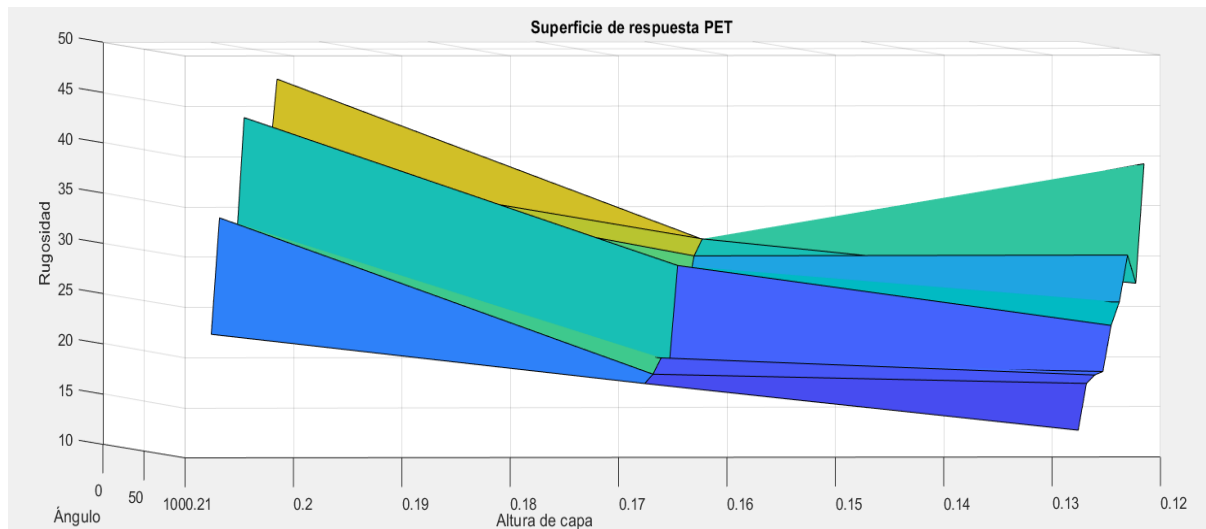


Ilustración 56 Superficie de respuesta PET (2)

*Ilustración 57 Superficie de respuesta PET (3)*

10 Conclusiones

A partir de todo este trabajo realizado podemos sacar en claro varias conclusiones:

- La metodología empleada para el diseño de experimentos nos permite seleccionar unos parámetros de estudio adecuados e influyentes. Aunque no se descarta que haya otros que no se han podido estudiar por la exponencial que esto supondría al número de experimentos, que también pueden ser influyentes.
- La fabricación aditiva por FDM tiene una versatilidad y facilidad para la obtención de casi cualquier tipo de geometría a partir de un diseño digital, que se superpone a otros procesos de fabricación más tradicionales.
- Lo mencionado en el punto anterior en conjunto con el gran abanico de posibilidades que tenemos en materiales (con fibra de carbono, cerámicos, flexibles, alta resistencia química, etc) hace que podamos satisfacer los requerimientos finales de nuestra pieza sin problema.
- La metodología utilizada nos permite obtener la rugosidad de las superficies de una manera mecánica y una óptica, teniendo cada una sus ventajas e inconvenientes.

- El estudio de forma mecánica tiene como ventajas principales la portabilidad del equipo y la rapidez con la que se puede obtener una medida. Los mayores inconvenientes que puede haber en este método es la calibración del mismo y que durante el proceso de medición hubo que calibrarlo varias veces.
- Respecto al método óptico utilizado tiene como ventaja indiscutible la precisión que obtenemos en los datos, aunque para este proceso llevado a cabo tiene desventajas como: la limitación de la geometría de las probetas, la poca superficie analizada por probeta y el gran tiempo que conlleva la toma de datos y el procesamiento posterior de los mismos.
- Las superficies de respuesta obtenida nos permiten conocer aproximadamente la rugosidad final que obtendrá una pieza mediante su ángulo de impresión y su altura de capa.
- Podemos observar claramente que el parámetro más influyente en la rugosidad es el ángulo de impresión, mientras más ángulo tengamos en nuestra pieza más rugosidad obtenemos en la misma.
- Observamos que ambos materiales tienen comportamientos parecidos, aunque el ABS presenta rugosidades más bajas y más lineales que el PET.
- La altura de capa influye de forma directa en la rugosidad, independientemente del material y del ángulo de impresión.

Referencias bibliográficas

- Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T., & Froyen, L. (2003). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*.
- Horvath, J. (2014). A brief history of 3D printing. In *Mastering 3D Printing* (pp. 3-10). Apress, Berkeley, CA.
- Su, A., & Al'Aref, S. J. (2018). History of 3D printing. In *3D Printing applications in cardiovascular medicine* (pp. 1-10). Academic Press.
- Melchels, F. P., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), 6121-6130.
- Yap, Y. L., Wang, C., Sing, S. L., Dikshit, V., Yeong, W. Y., & Wei, J. (2017). Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precision engineering*, 50, 275-285.
- López Guerrero, F. E., Cavazos Flores, R., & Delgado Acosta, M. (2003). Caracterización de superficies maquinadas por medio de parámetros de rugosidad. *Ingenierías*, 6(18), 62-68.
- Bedón Rojas, M. A. (2017). Rugosidad superficial de resinas con nanopartículas sometida a tres sistemas de pulido. *Soluciones de Microscopía Medición de la rugosidad superficial: Parámetros*. Olympus. (n.d.). Retrieved October 27, 2022, from [https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!/cms\[focus\]=cmsContent14709](https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!/cms[focus]=cmsContent14709)
- Elegoo Neptune 2 FDM 3D printer with Silent Motherboard. ELEGOO Official. (n.d.). Retrieved October 27, 2022, from <https://www.elegoo.com/products/elegoo-neptune-2-fdm-3d-printer>
- Kartchnb. (n.d.). *Kartchnb/autotowersgenerator: A Cura plugin to automate the creation of 3D printer calibration towers (e.g. temperature towers, retraction towers, etc)*. GitHub. Retrieved November 17, 2022, from <https://github.com/kartchnb/AutoTowersGenerator>
- Matlab - El Lenguaje del Cálculo Técnico. El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink. (n.d.). Retrieved January 9, 2023, from <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- Nwaneshiudu, A., Kuschal, C., Sakamoto, F. H., Rox Anderson, R., Schwarzenberger, K., & Young, R. C. (2012). Introduction to confocal microscopy. *Journal of Investigative Dermatology*, 132(12), 1-5. <https://doi.org/10.1038/jid.2012.429>
- Dr. Andrés López Velázquez | recursos académicos. (n.d.). Retrieved January 16, 2023, from <https://lopezva.files.wordpress.com/2019/02/manual-de-practicas-del-laboratorio-de-tribologia.pdf>

Referencias ilustraciones

1. https://www.researchgate.net/figure/Vibration-assisted-direct-write-3D-printing-setup-for-the-thermoset-based-inks_fig4_343896899
2. <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/>
3. <https://jbioleng.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13036-015-0001-4>
4. <https://todo-3d.com/fdm-fff-modelado-deposicion-fundida/>
5. a
6. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/122812/memoria-tfg-francisco.pdf?sequence=1>
7. <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumentos-de-medida/palpador-rugosidad-pce-rt1200.htm>
8. <https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>
9. https://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/745_ca.pdf
10. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-73812012000100005
11. <https://www.ujaen.es/servicios/scail/>
12. <https://www.amazon.com.mx/ELEGOO-alimentaci%C3%B3n-reanudaci%C3%B3n-construcci%C3%B3n-220x220x250mm/dp/B08T8RSGR2>
13. https://www.amazon.es/BIGTRETECH-Extrusora-Aluminio-Engranaje-RepRap/dp/B0BHP2YBGL/ref=asc_df_B0BHP2YBGL/?tag=googshopes-21&linkCode=df0&hvadid=638882959908&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=17326530957601479213&hvpone=&hvptwo=&hvgmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=1005416&hvtargid=pla-1929016458370&psc=1
14. <https://www.amazon.com/-/es/Kingroon-Flex-Adhesivo-magn%C3%A9tico-7-087/dp/B08KXN8ZGD>
15. https://www.impresoras3d.com/producto/capricorn-tl-tubo-bowden-ptfe/?gclid=CjwKCAiA5sieBhBnEiwAR9oh2IBHKnh8J2Tu2E9mmHkAmrv2Ygrpij-dR8qhUGX-6-khyBctopwqdBoCPLQQA_vD_BwE
16. https://www.amazon.es/SUNLU-Filamento-Impresora-Filament-Blanco/dp/B07R8X76GW/ref=asc_df_B07R8X76GW/?tag=googshopes-21&linkCode=df0&hvadid=376199076429&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=2650819232468275214&hvpone=&hvptwo=&hvgmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=1005416&hvtargid=pla-793011473945&psc=1
17. https://www.amazon.es/Smartfil-SMABS0RE0A075-Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno/dp/B07CM5DH6N/ref=asc_df_B07CM5DH6N/?tag=googshopes-21&linkCode=df0&hvadid=372996847332&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=3447933889333590555&hvpone=&hvptwo=&hvgmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=1005416&hvtargid=pla-791541271347&psc=1
18. <https://mitutoyo.com.ar/rugosimetro-portatil-sj-310-178-571-01a>
19. <https://lopezva.files.wordpress.com/2019/02/conocimiento-y-uso-del-rugosimetro.pdf>
20. <https://www.educba.com/3d-arrays-in-c/>

Anexos

Anexo 1: códigos de procesamiento

Anexo 1.1 Python

```
import sys
import numpy as np
import pandas as pd
from os import listdir
from os.path import isfile, join

prof=-140/140
path="Subir"
files = [join(path, f) for f in sorted(listdir(path)) if
isfile(join(path, f)) and f.endswith("00.txt")]

M=[]

for f in files:
    series=pd.read_csv(f, sep=" ",header=None)
    data=np.array(series.values) [0:1024,0:1024]
    M.append(data)

M=np.array(M)
print("M x",M.shape)
maxI=np.argmax(M, axis=0)
maxV=np.amax(M, axis=0)

print("maxIndexs:",maxI)
print("maxValues:",maxV)

np.savetxt("Profundidades.txt", maxI.astype(int)*prof, fmt='%i',
delimiter=" ")
np.savetxt("Maximos.txt", maxV.astype(int), fmt='%i', delimiter=" ")
```

Anexo 1.2 Matlab

Agrupar y corte

```
clear all
prof=importdata("Profundidades.txt");
ic=1;jc=1;
zc=zeros(204,204);
for i=1:5:1024
    for j=1:5:1024
        zc(ic,jc)=prof(i,j);
        jc=jc+1;
    end
    ic=ic+1;
    jc=1;
end
y=100;
for i=1:1:205
    perfil(i)=zc(i,y);
end
plot(perfil);
saveas(gca,'perfil.png');
```

Imágenes

```
clc
clear all
A=importdata("Profundidades.txt");B=importdata("Maximos.txt");
max=mesh(B);
```

```
saveas(gca,'figuraMaximos.png');
saveas(gca,'figuraMaximos.fig');
xlabel('ancho');ylabel('largo');zlabel('Prof');
view(90,0);
saveas(gca,'figuraMaximosLat.png');
view(0,90);
saveas(gca,'figuraMaximosAcimutal.png');
prof=mesh(A);
saveas(gca,'figuraProf.fig');
saveas(gca,'figuraProf.png');
view(90,0);
saveas(gca,'figuraProfLat.png');
view(0,90);
saveas(gca,'figuraProfAcimutal.png');
```

Rugosidad media

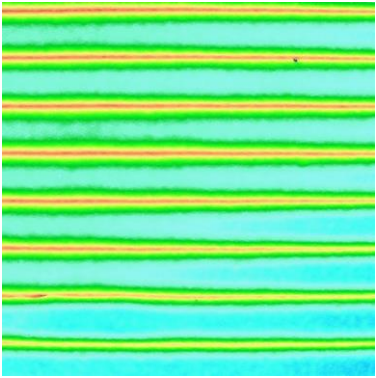
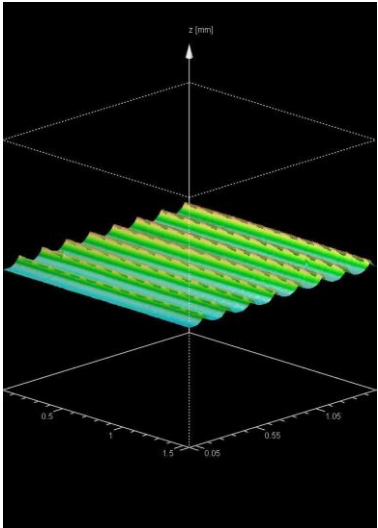
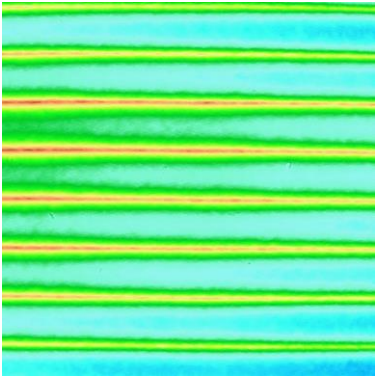
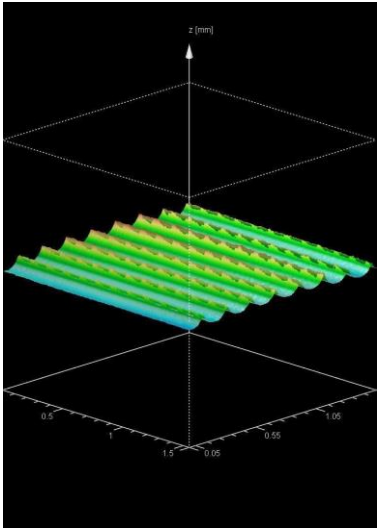
```
clc
clear all
r=[];
A=importdata("Profundidades.txt");
%mesh(A)
dist=[];
vq1=[];
rugosidad=[];rugosidadatenuada=[];
for i=1:1024
    dist(i)=i*0.1;
end
for j=1:1024
    r=A(:,j);
    r=r.';
    cuad=[];
```

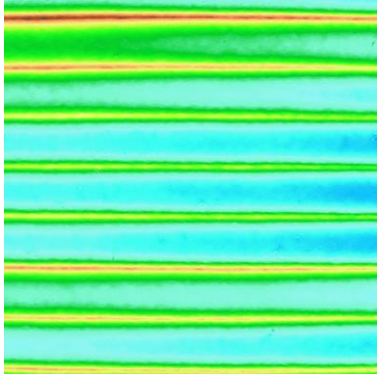
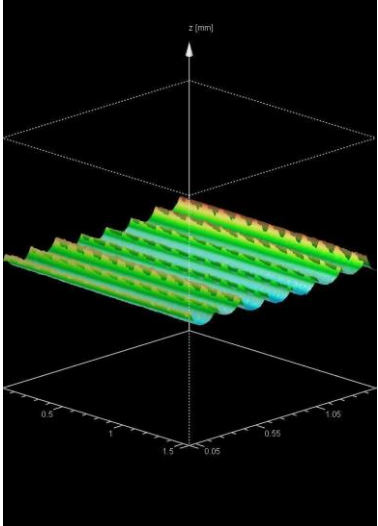
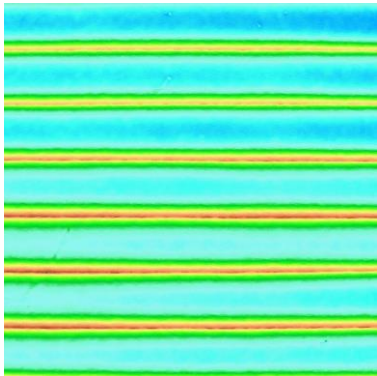
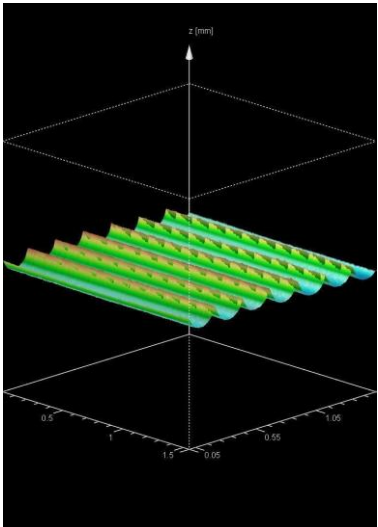
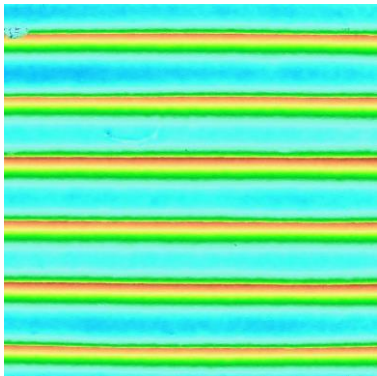
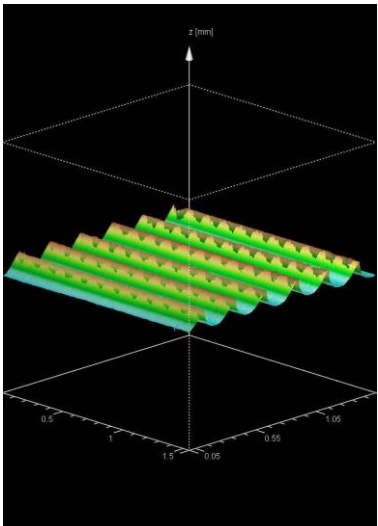
```
%plot(dist,r,'bo');title('figurapuntos');
ec=polyfit(dist,r,2);
p1=ec(1);p2=ec(2);p3=ec(3);
for i=1:1024
    dist(i)=i*0.1;
    cuad(i)=p1*dist(i)^2+p2*dist(i)+p3;
end
%plot(cuad)
a=[];
a= interp1(dist,r,'spline');
b=mean(a);
rugosidadatenuada(j)=mean(cuad)/2-b;
rugosidad(j)=mean(cuad);
end
rugosidadmedia=mean(rugosidad)
rugosidadmediaatenua=mean(rugosidadatenuada)
```

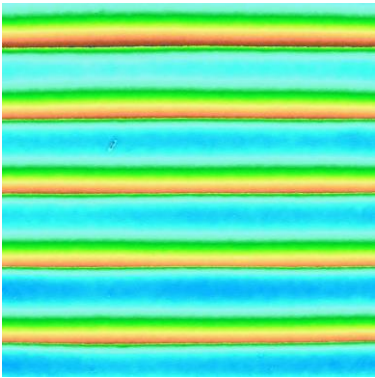
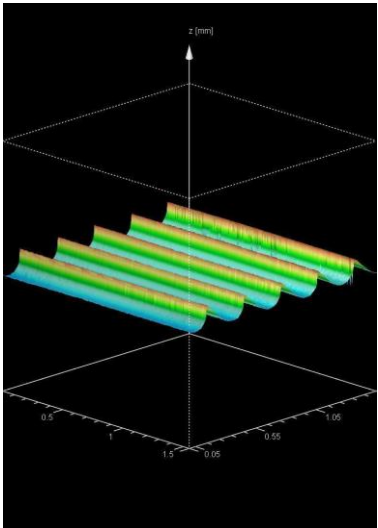
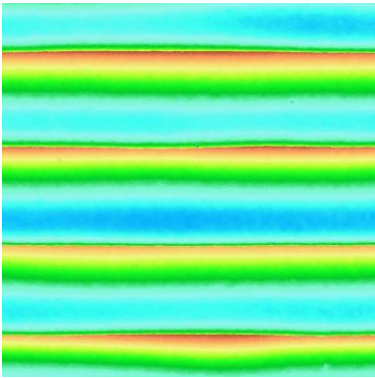
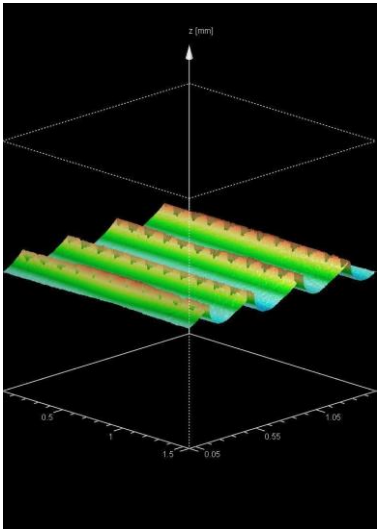
Anexo 2: imágenes

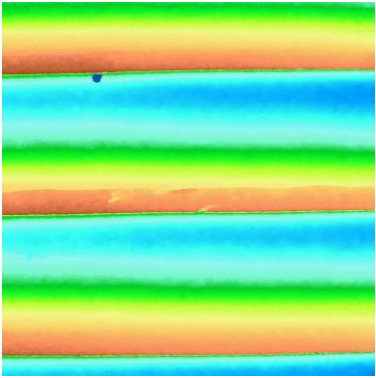
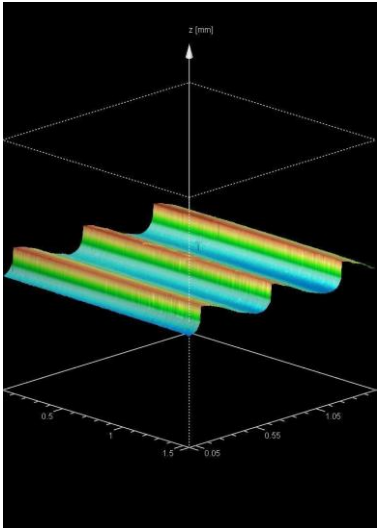
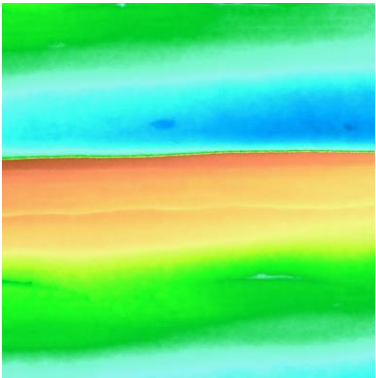
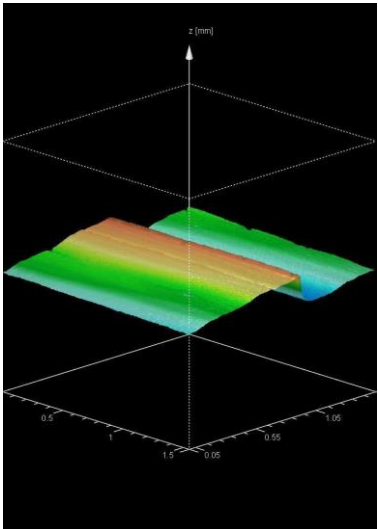
Microscopio

ABS 0.2

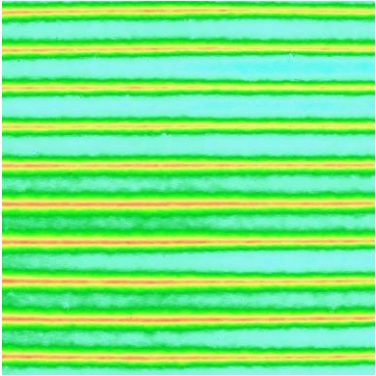
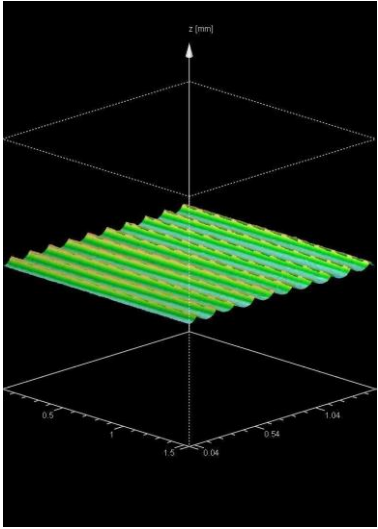
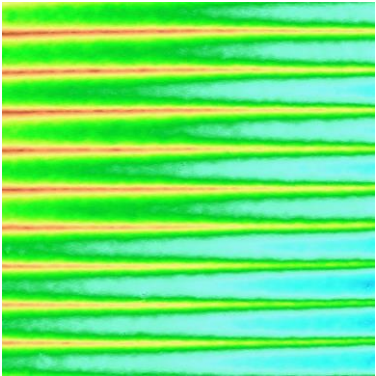
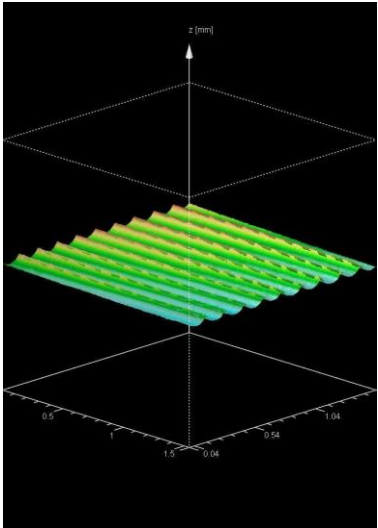
Angulo	Vista 2D	Vista 3D
0		
10		

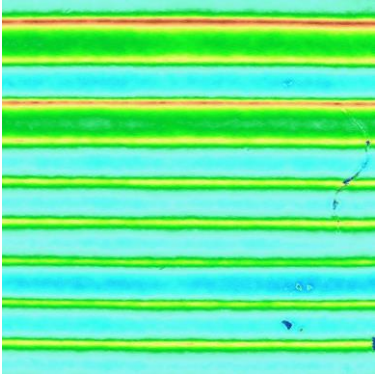
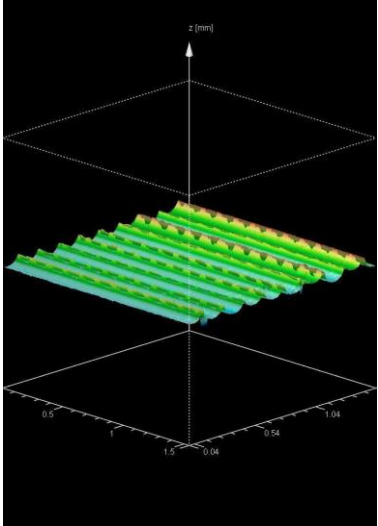
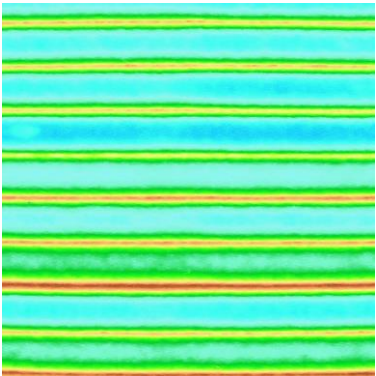
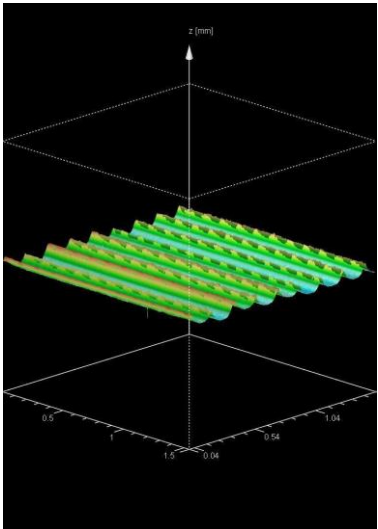
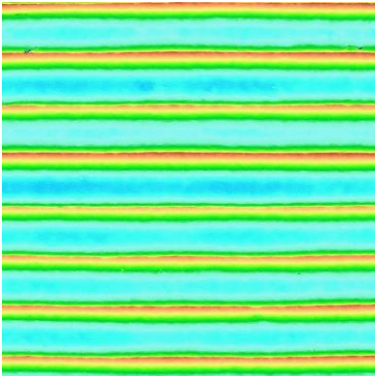
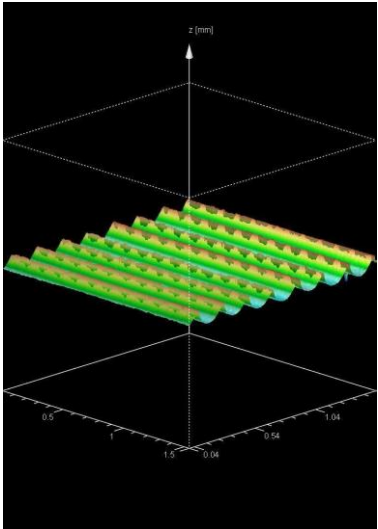
20		
30		
40		

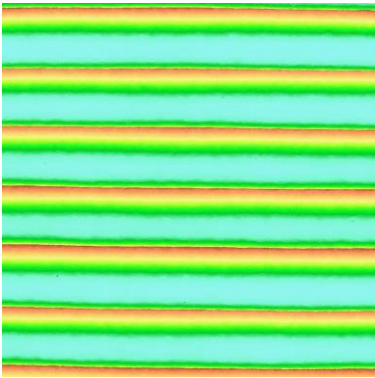
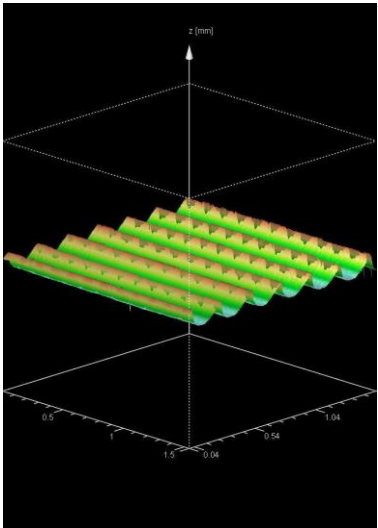
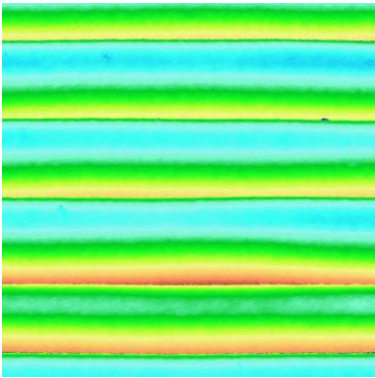
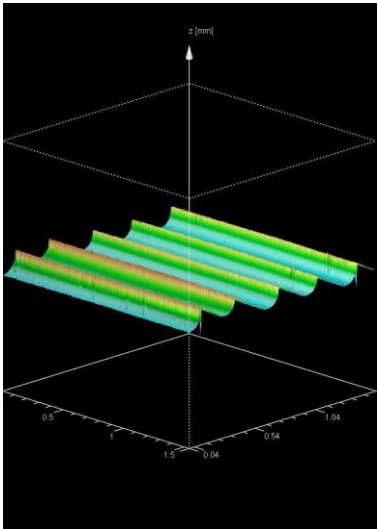
50		
60		

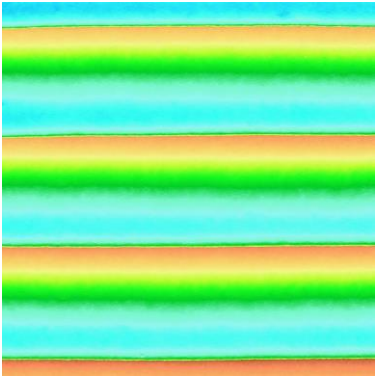
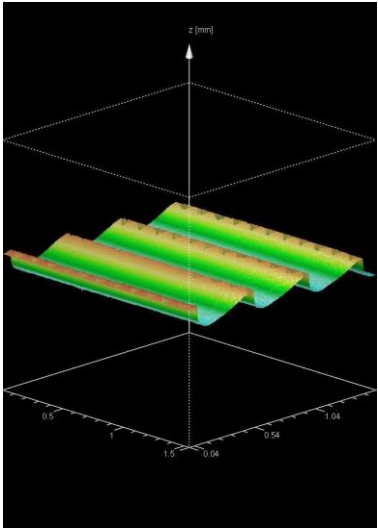
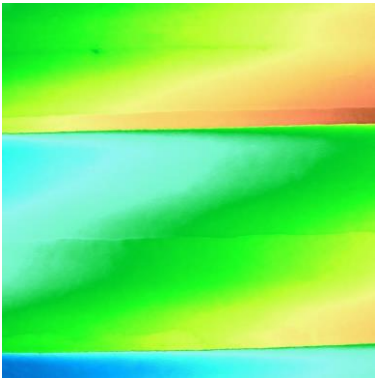
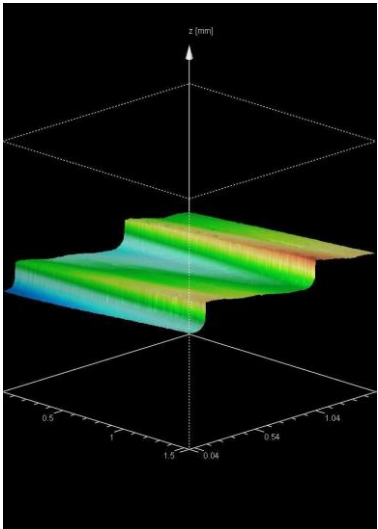
70		
80		

ABS 0.16

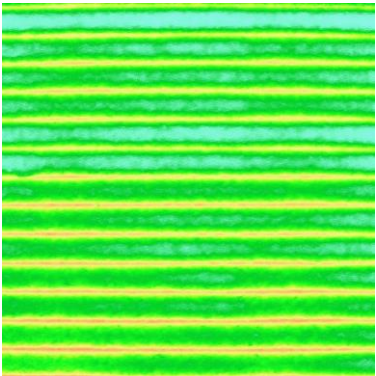
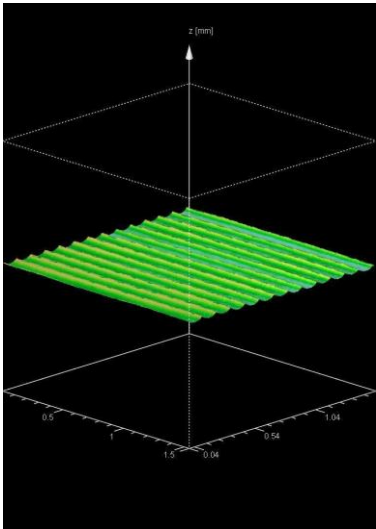
Angulo	Vista 2D	Vista 3D
0		
10		

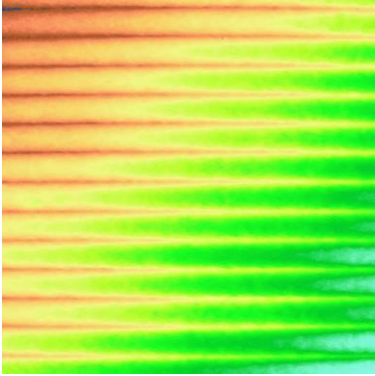
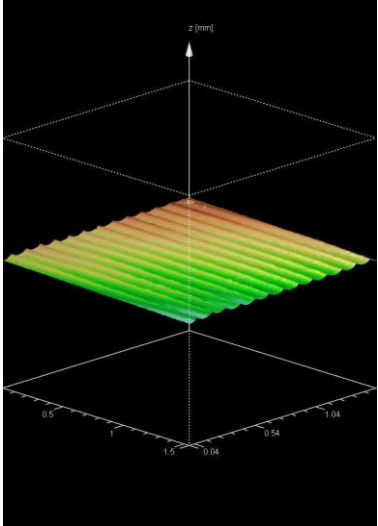
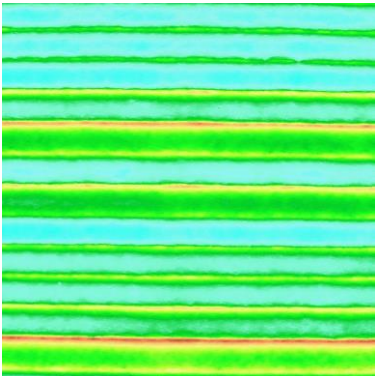
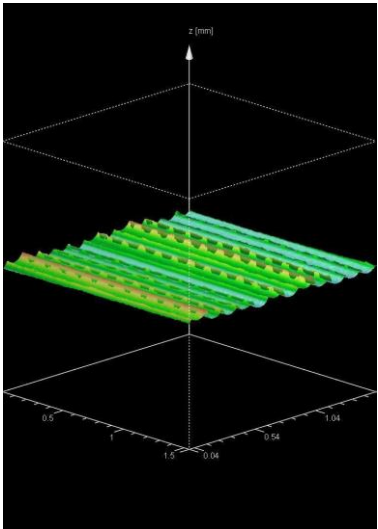
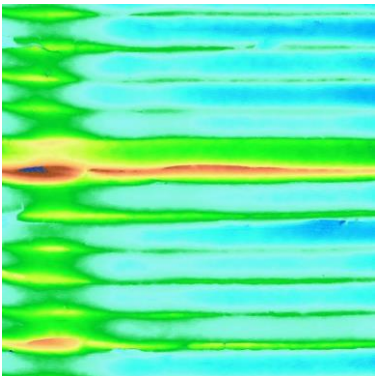
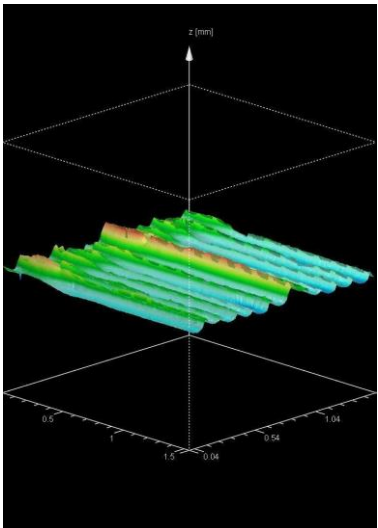
20		
30		
40		

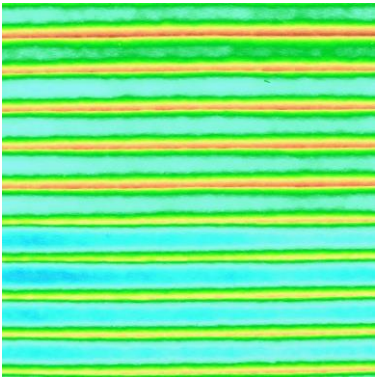
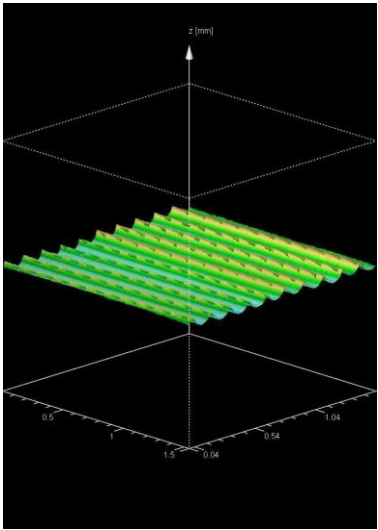
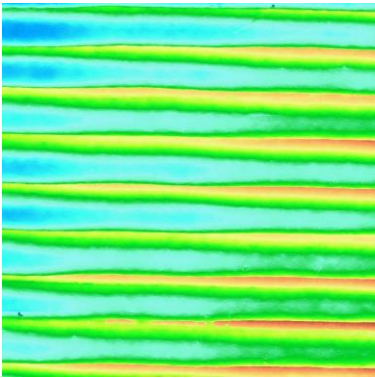
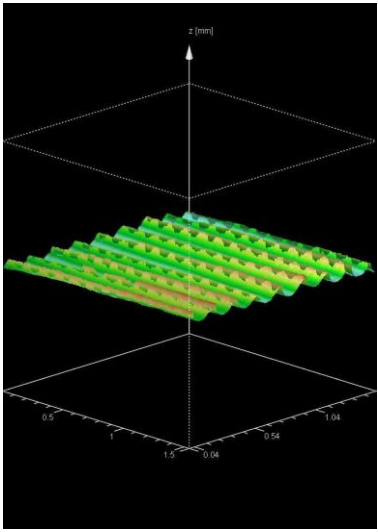
50		
60		

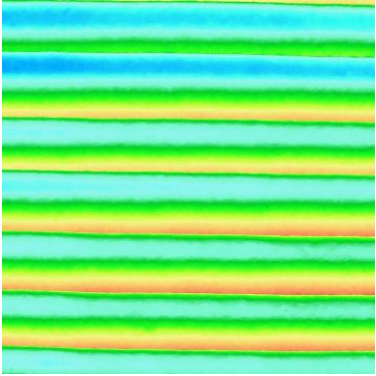
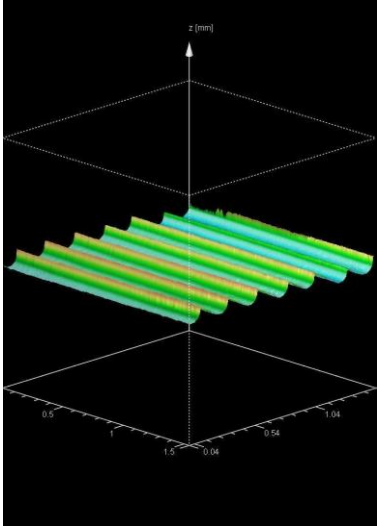
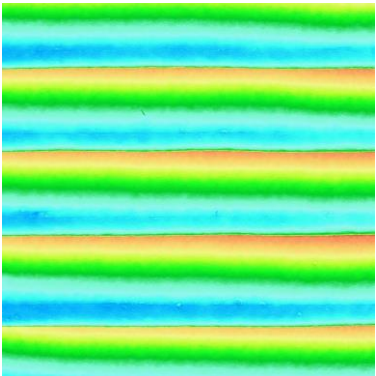
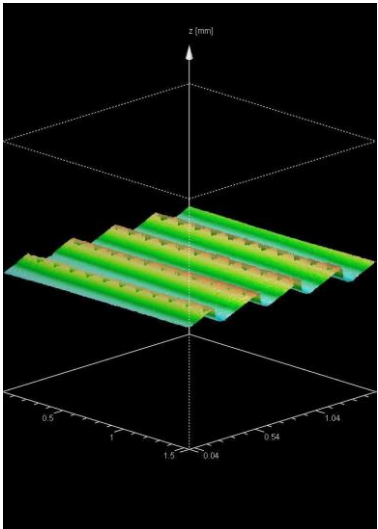
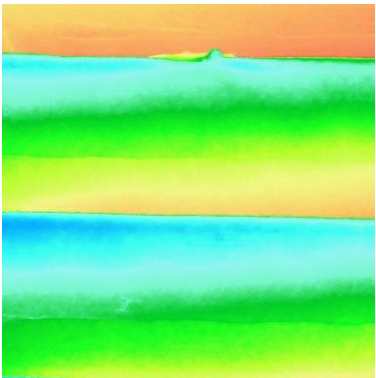
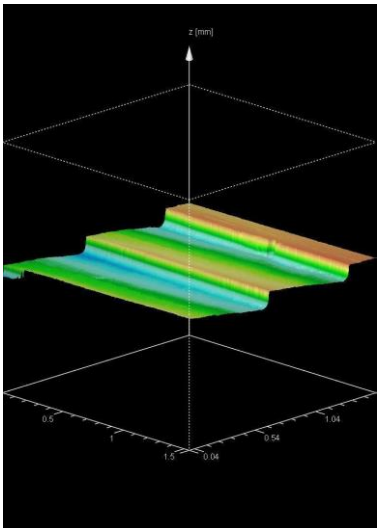
70		
80		

ABS 0.12

Angulo	Vista 2D	Vista 3D
0		

10		
20		
30		

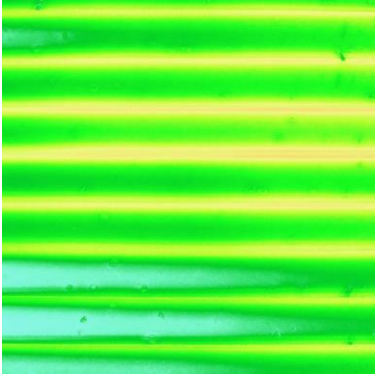
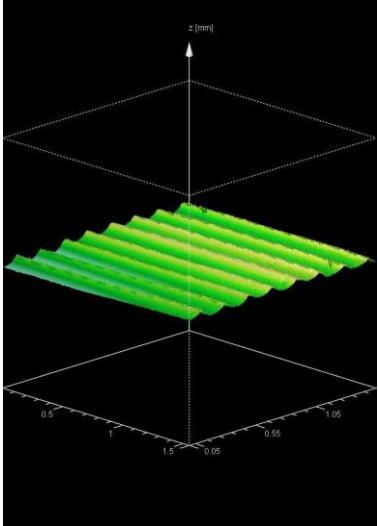
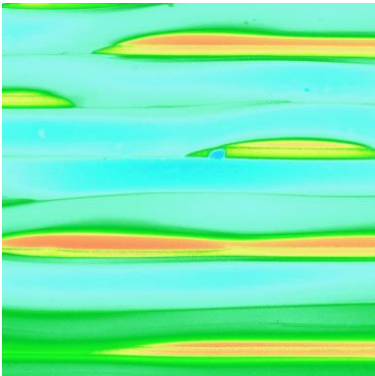
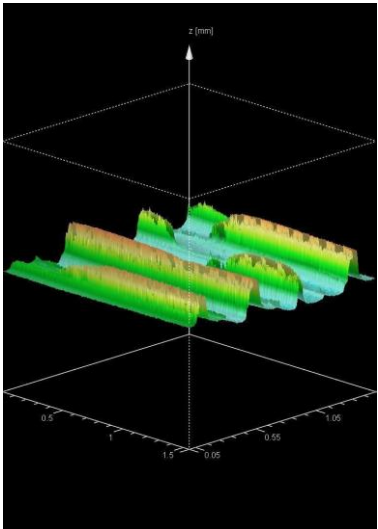
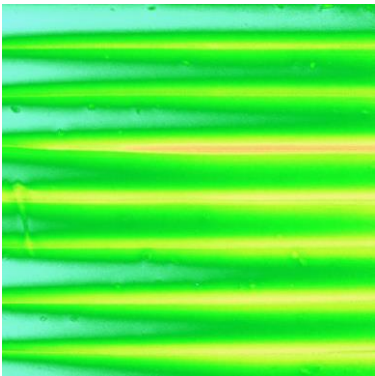
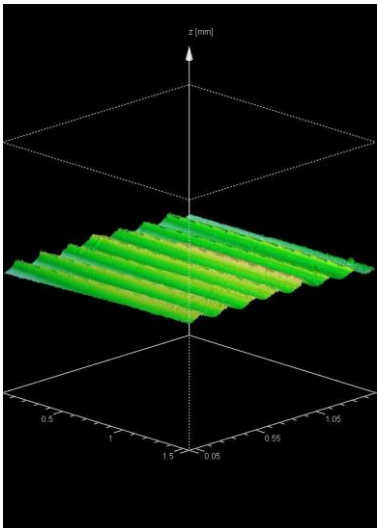
40		
50		

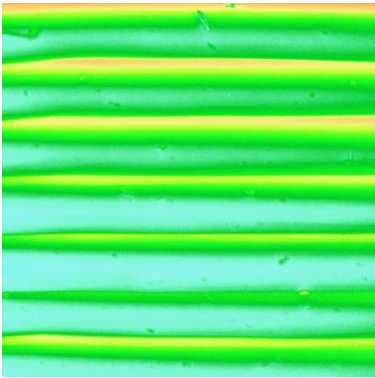
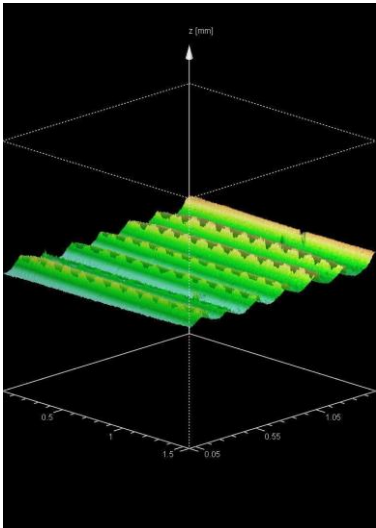
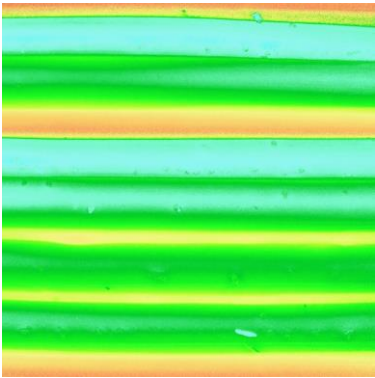
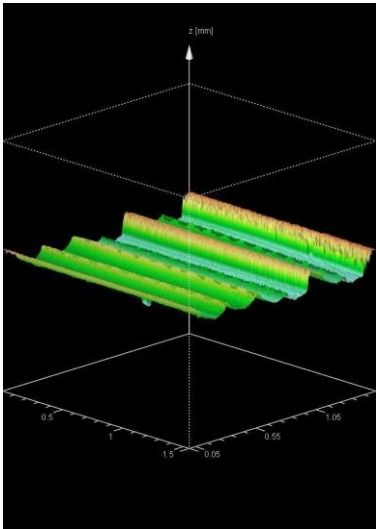
60		
70		
80		

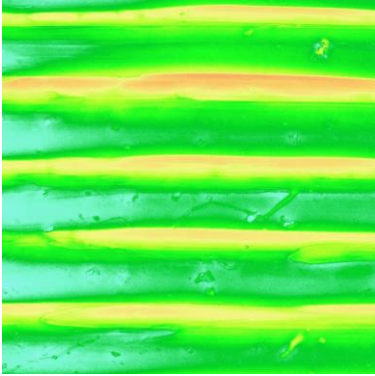
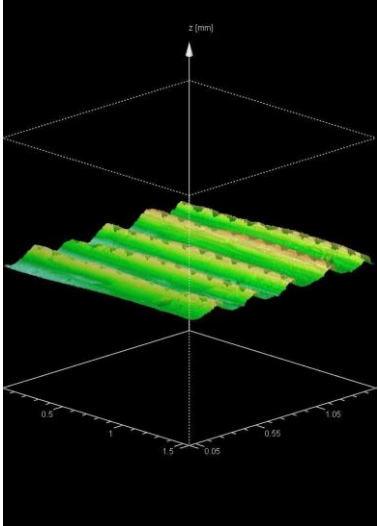
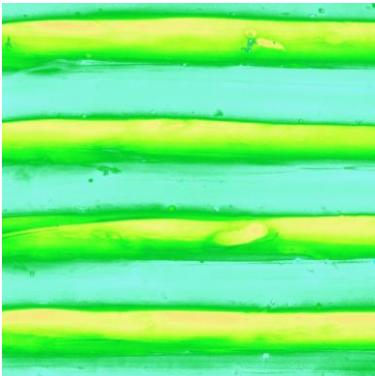
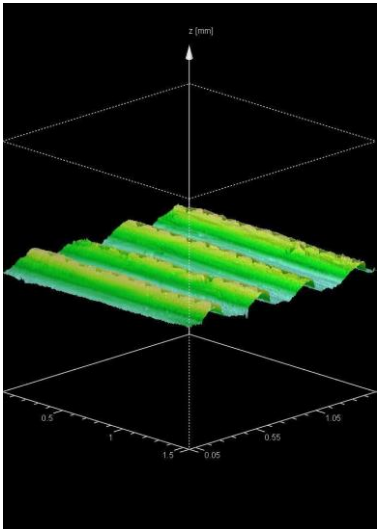
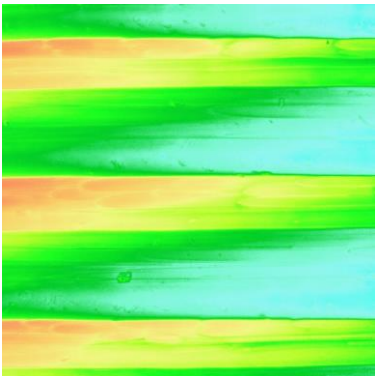
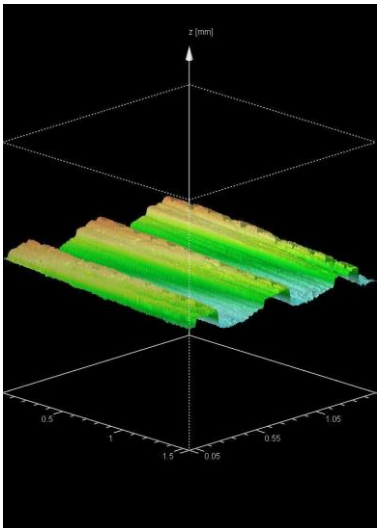
--	--	--

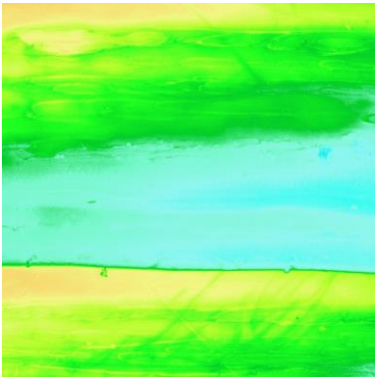
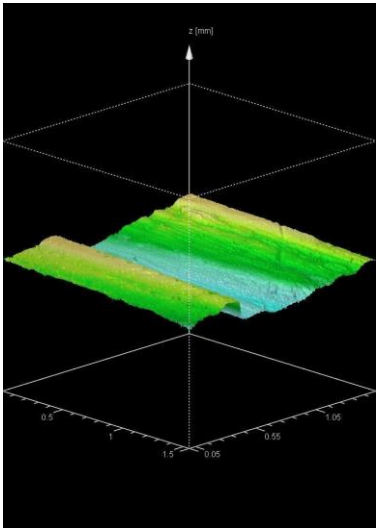
PET 0.2

Angulo	Vista 2D	Vista 3D
--------	----------	----------

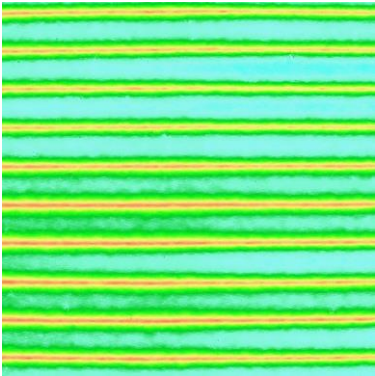
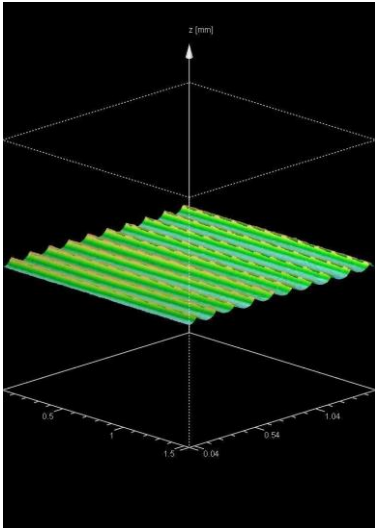
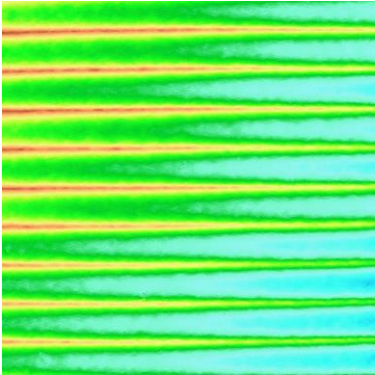
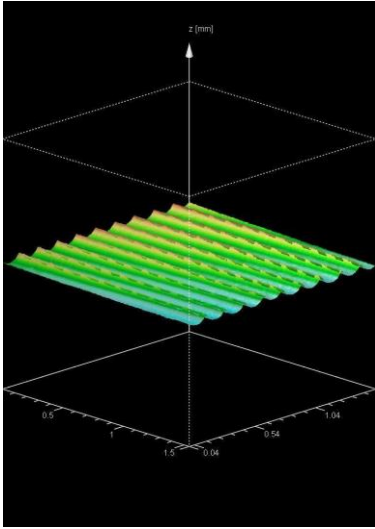
0		
10		
20		

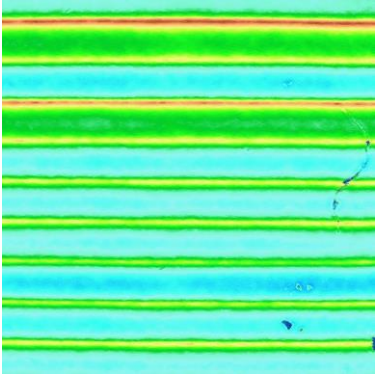
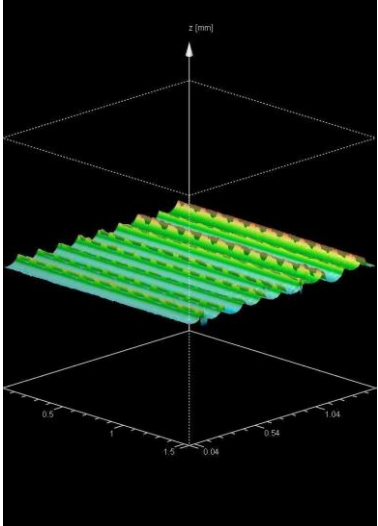
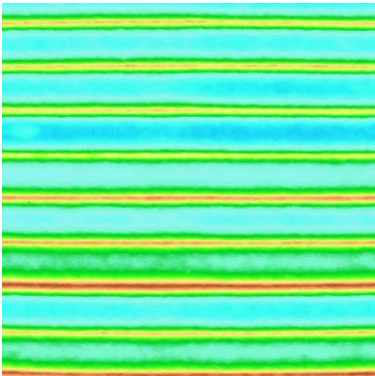
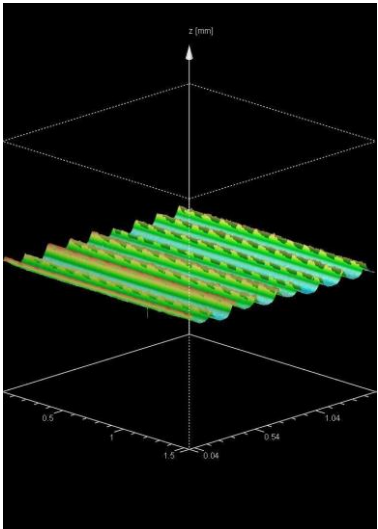
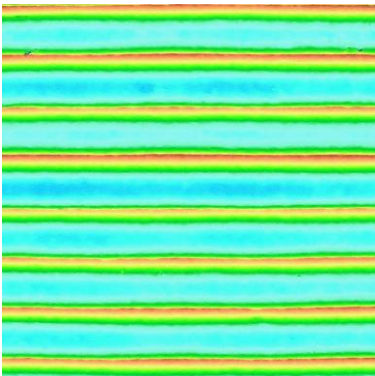
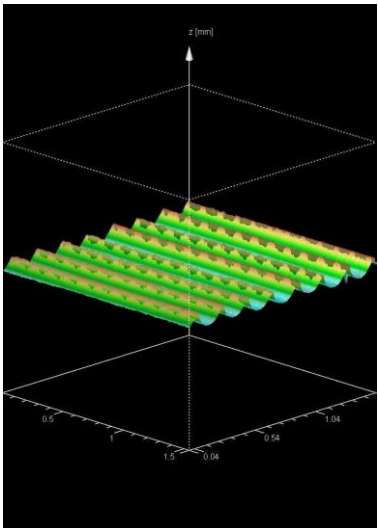
30		
40		

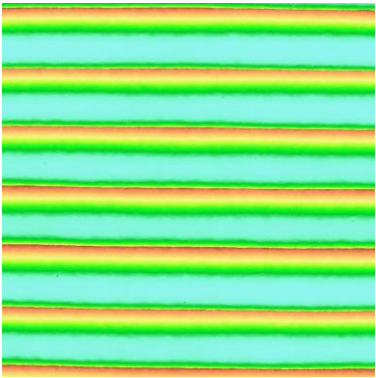
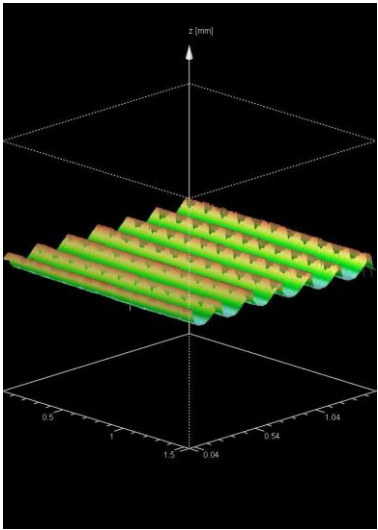
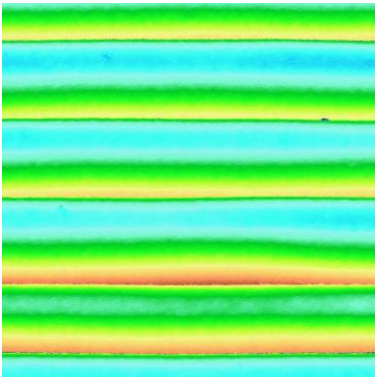
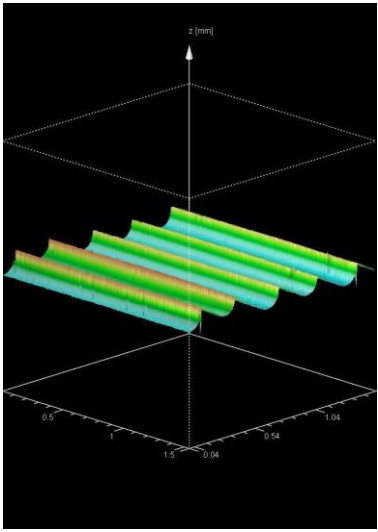
50		
60		
70		

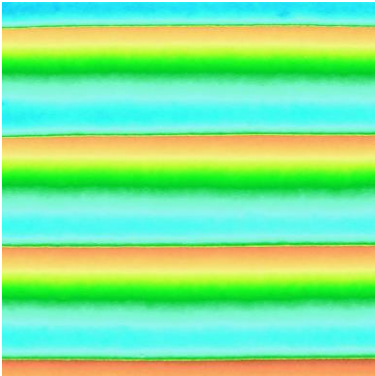
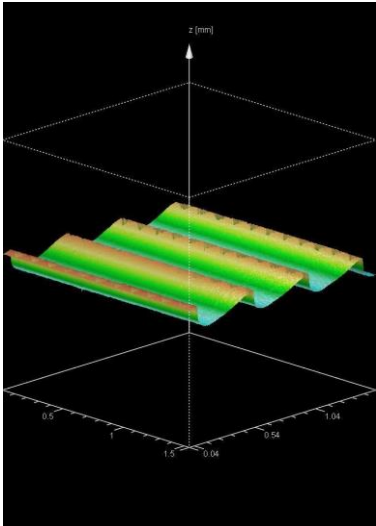
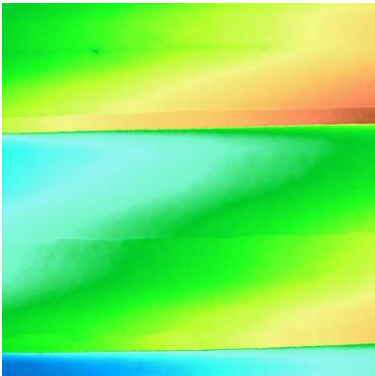
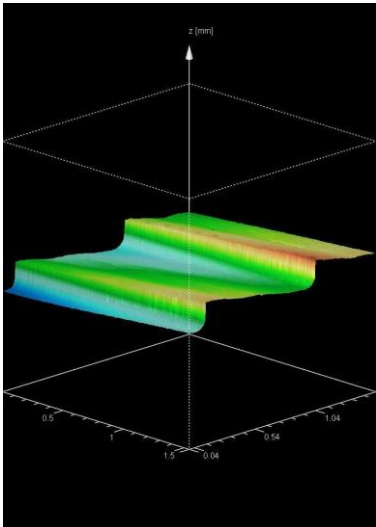
80		

PET 0.16

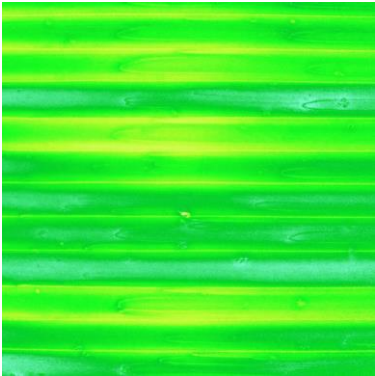
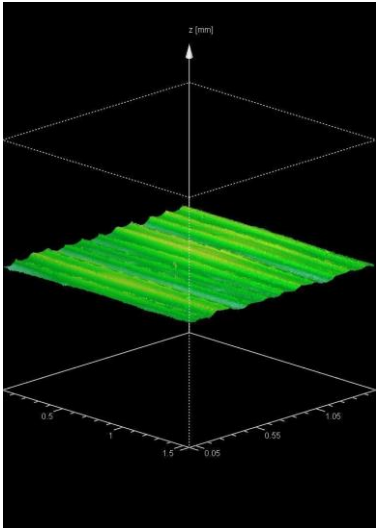
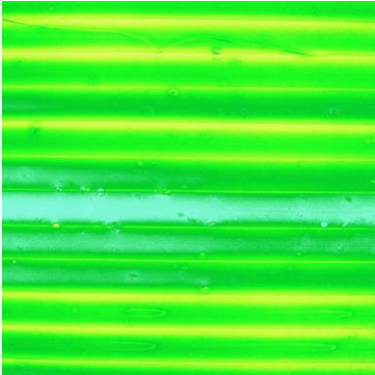
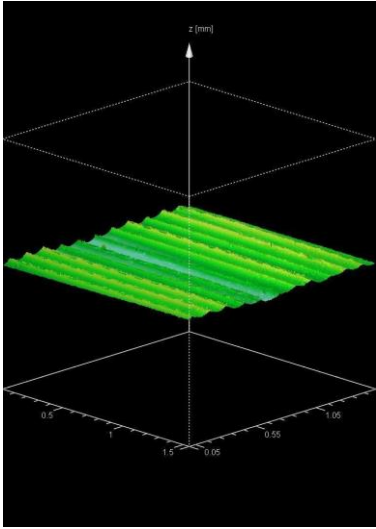
Angulo	Vista 2D	Vista 3D
0		
10		

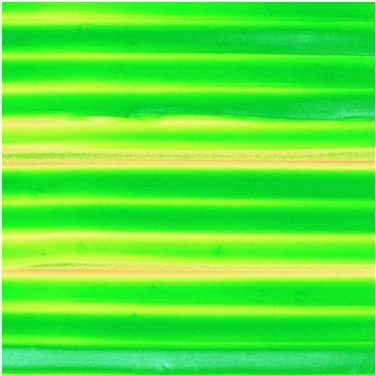
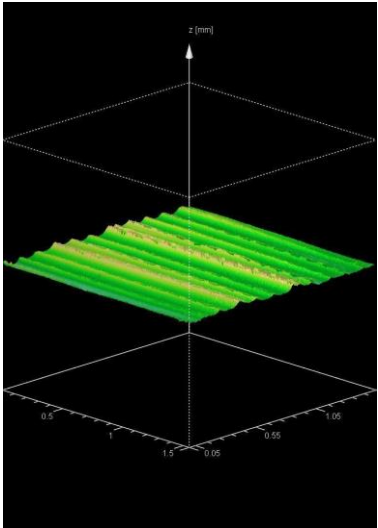
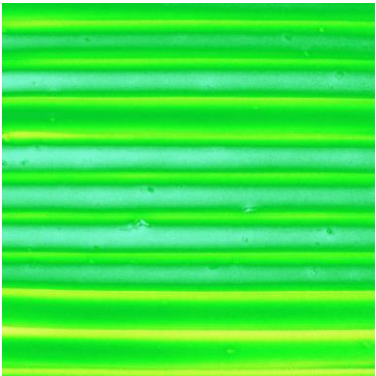
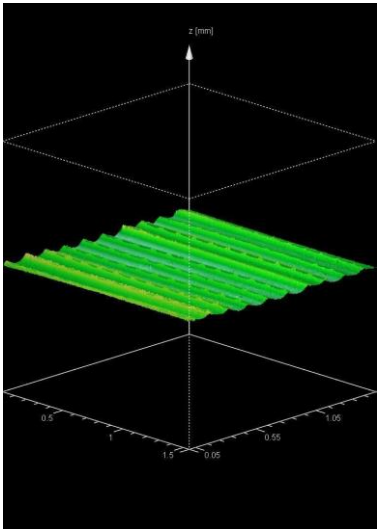
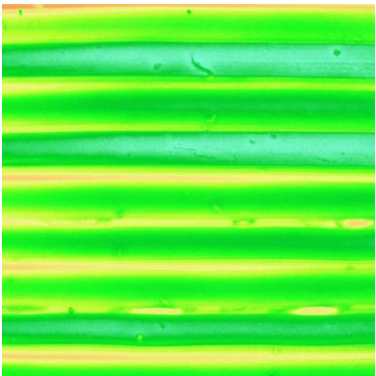
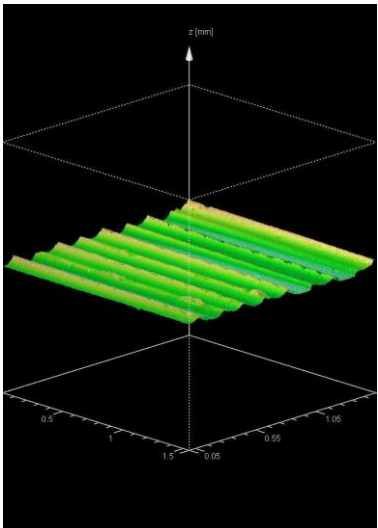
20		
30		
40		

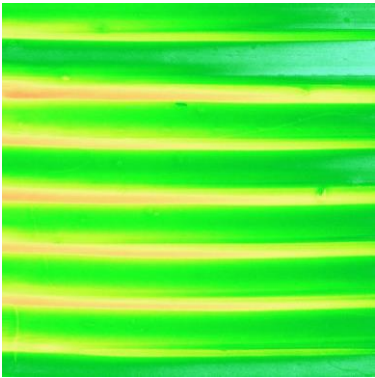
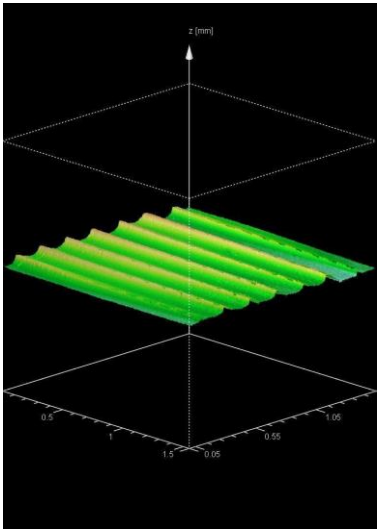
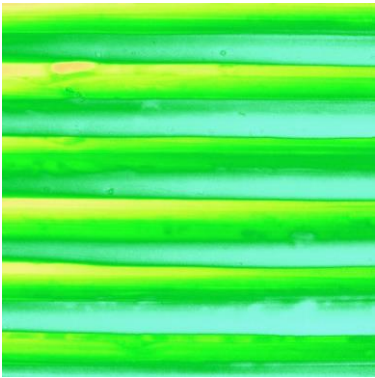
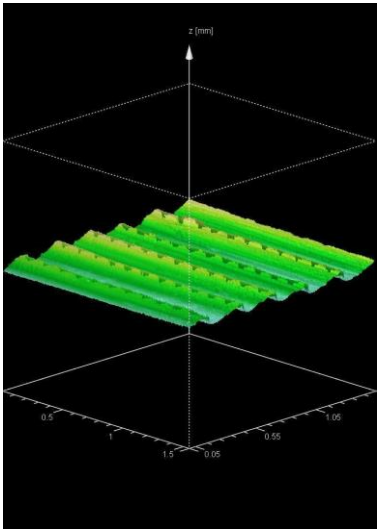
50		
60		

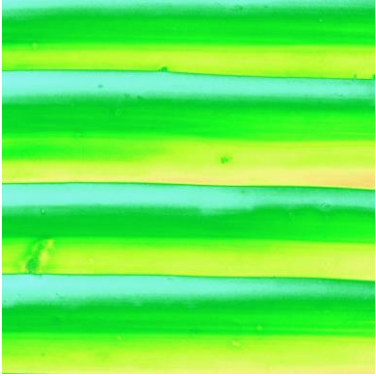
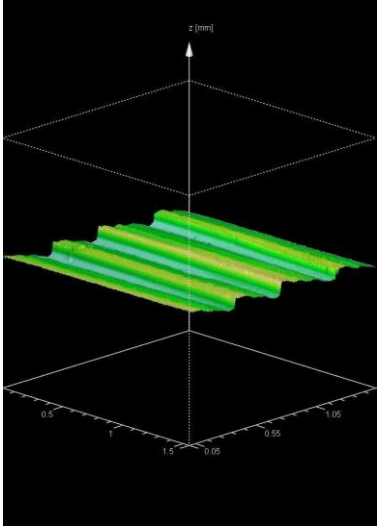
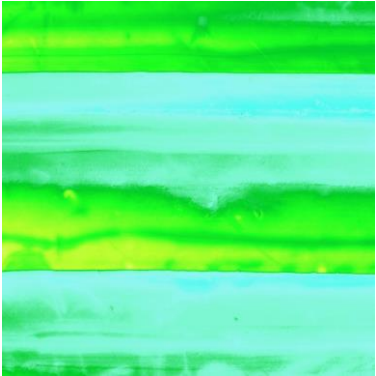
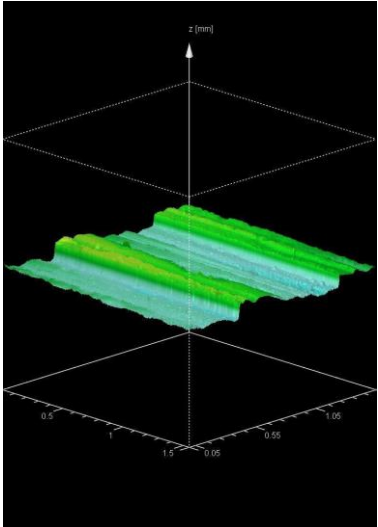
70		
80		

PET 0.12

Angulo	Vista 2D	Vista 3D
0		
10		

20		
30		
40		

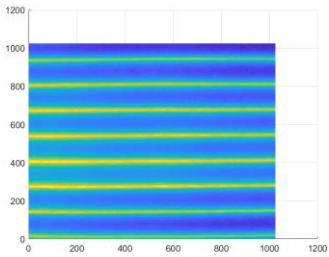
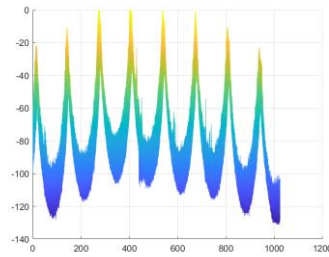
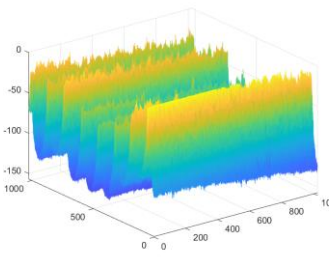
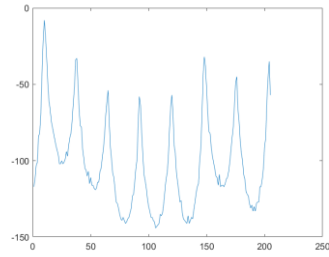
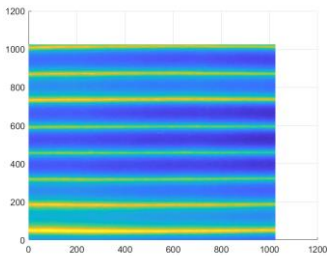
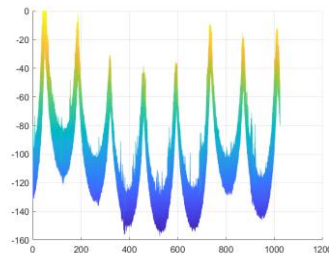
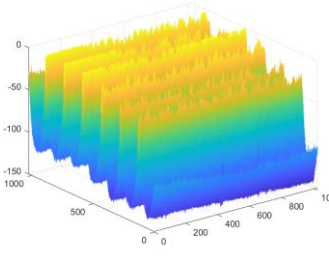
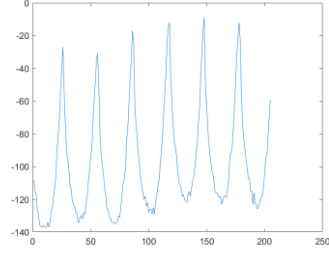
50		
60		

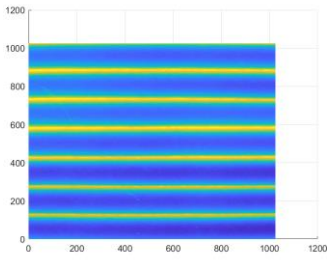
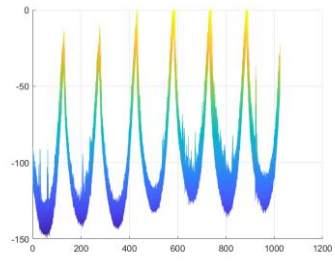
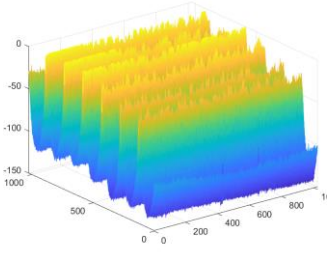
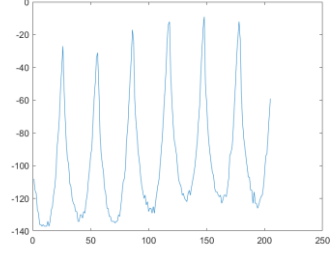
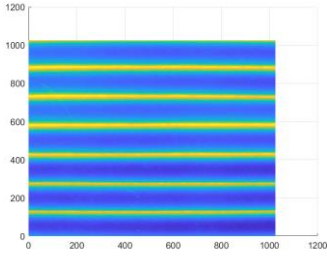
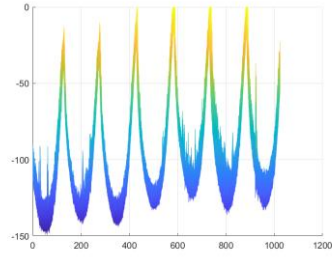
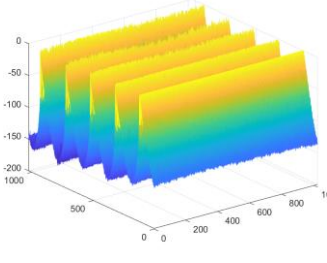
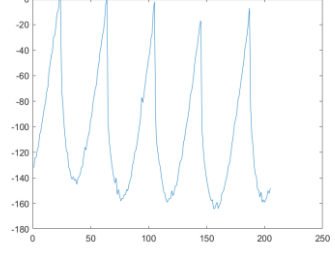
70		
80		

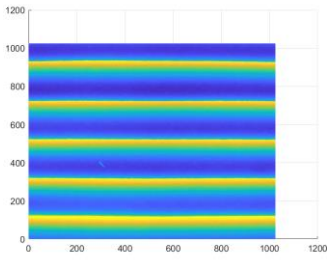
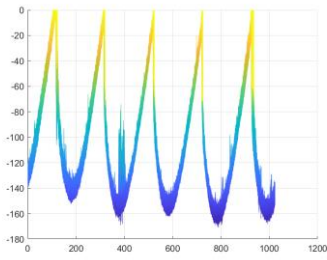
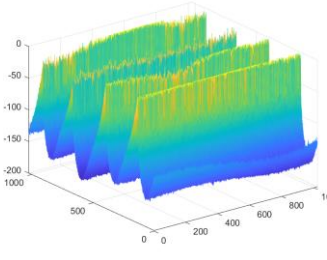
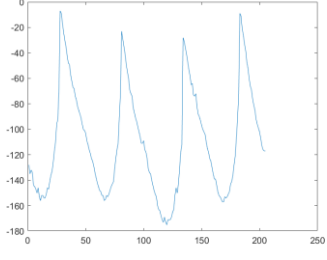
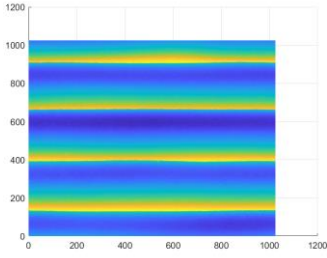
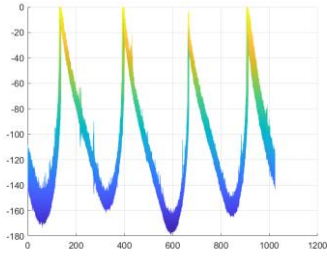
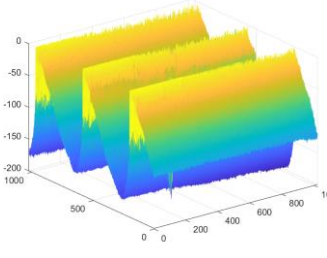
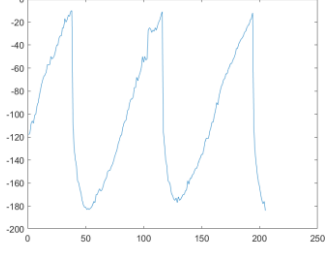
Matlab

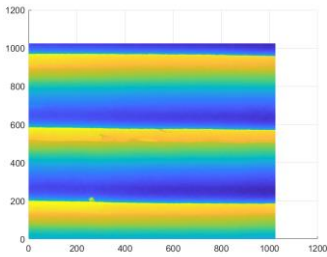
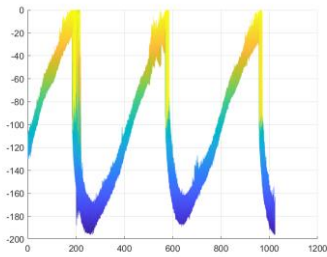
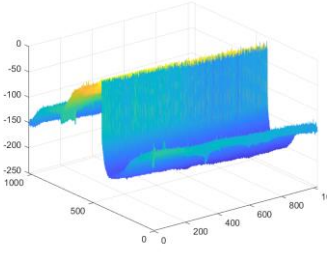
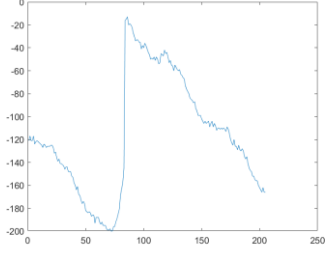
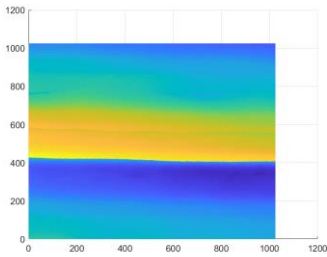
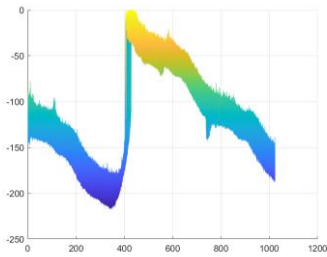
ABS 0.2

Ángulo	Figura	Perfil
0		
	Figura por arriba	Figura lateral
10	Figura	Perfil
	Figura por arriba	Figura lateral

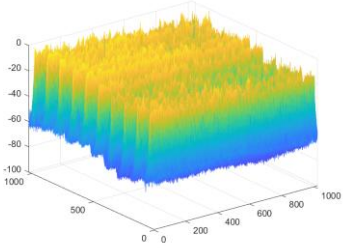
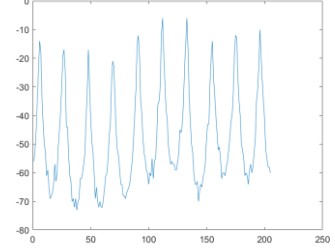
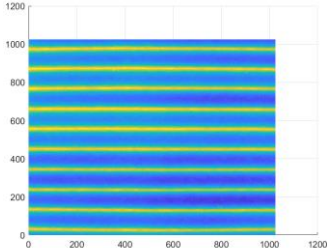
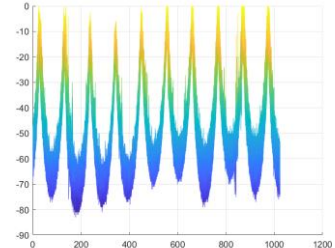
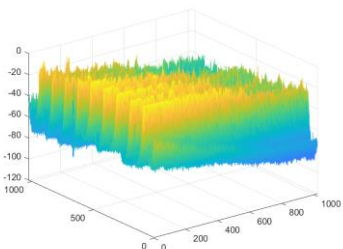
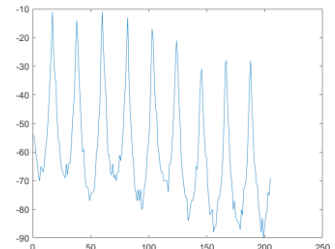
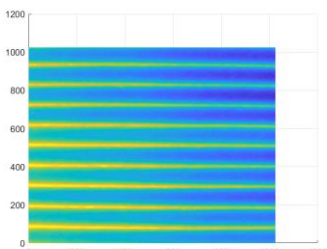
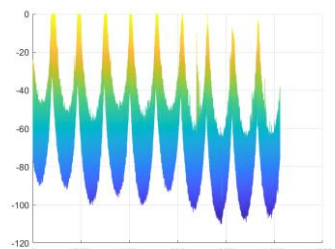
		
20	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
30	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

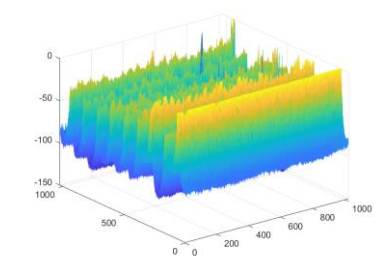
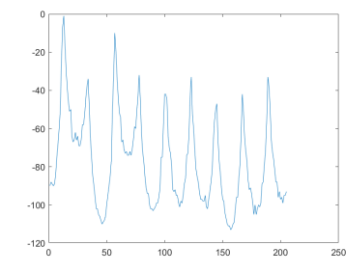
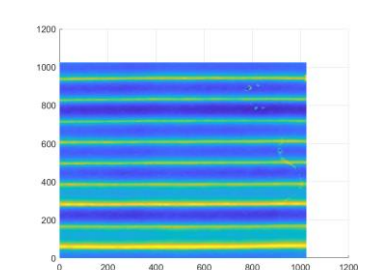
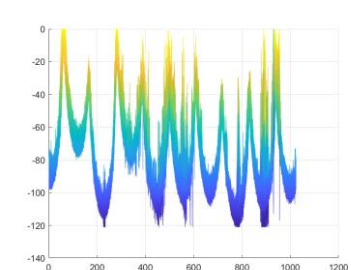
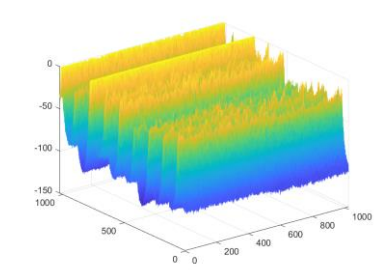
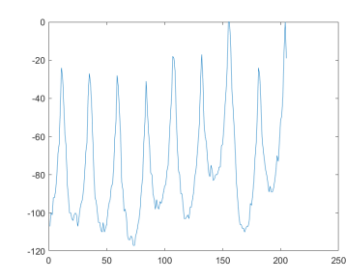
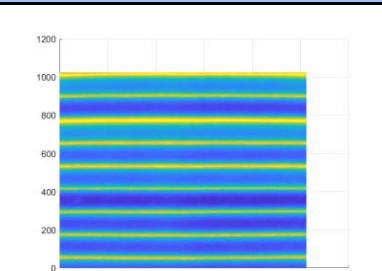
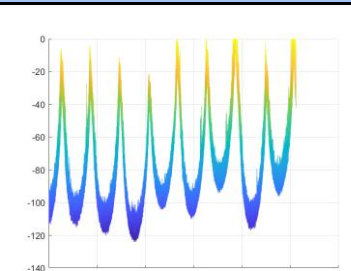
		
40	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
50	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

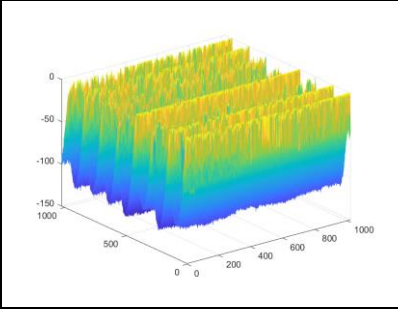
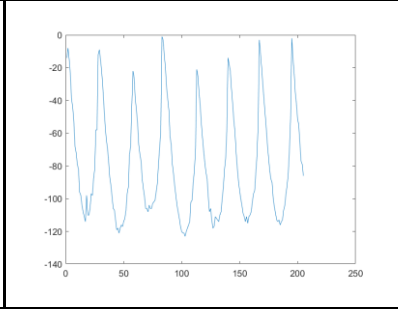
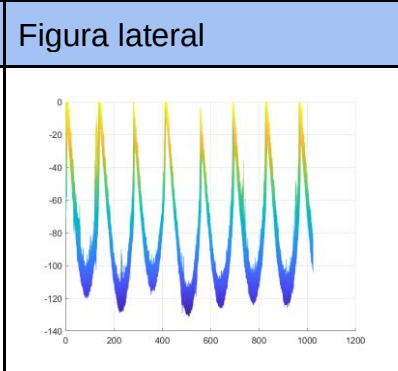
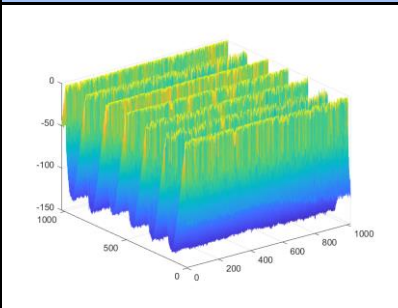
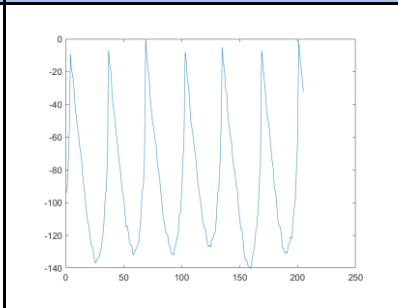
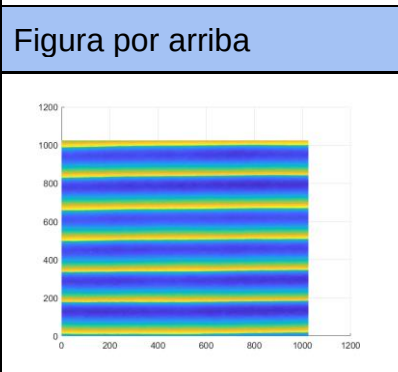
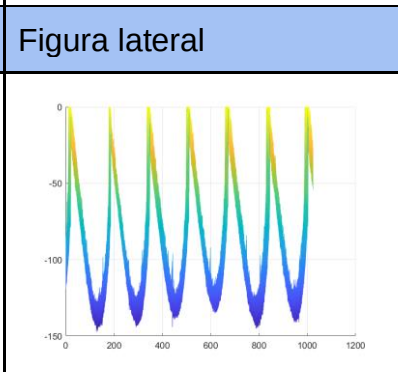
		
60	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
70	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

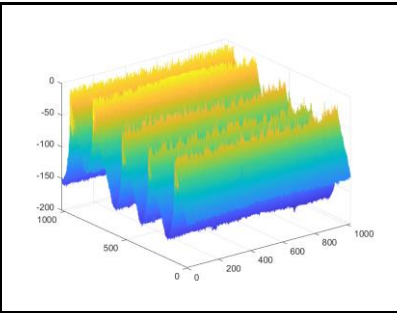
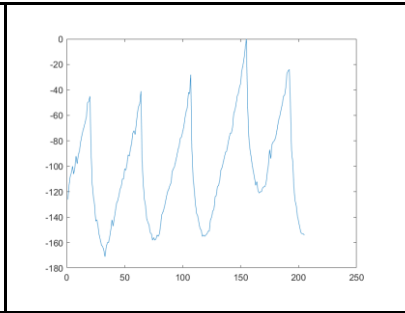
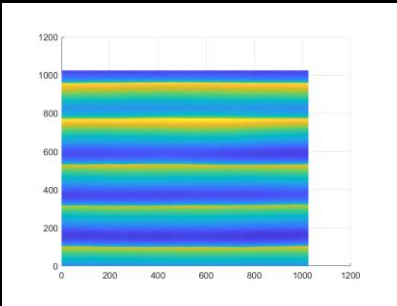
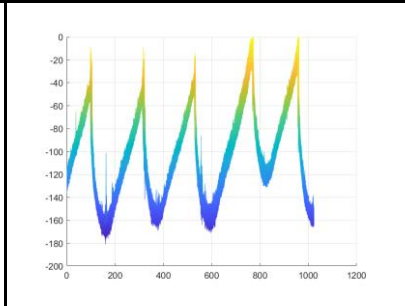
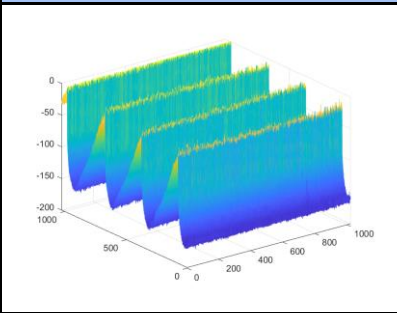
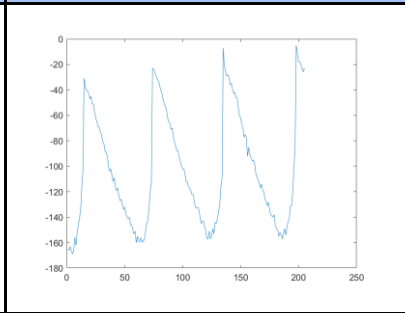
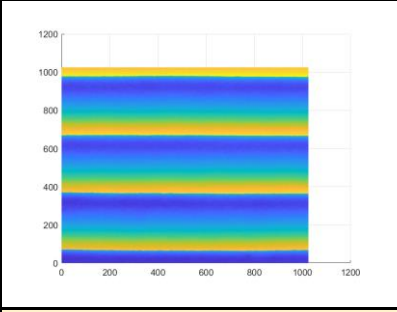
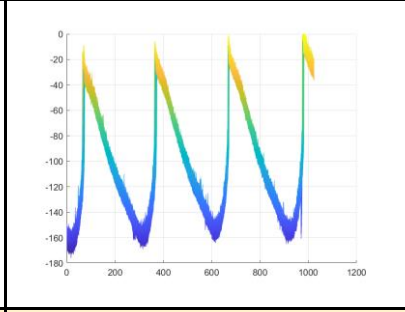
		
80	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		

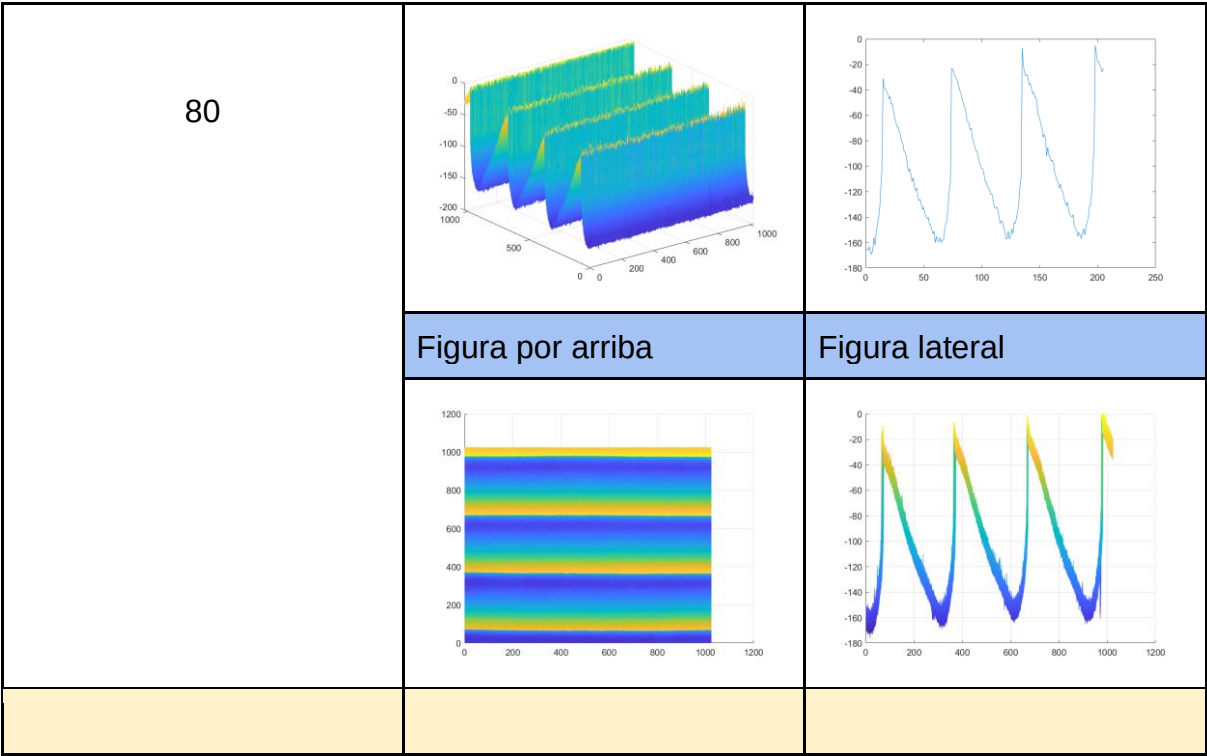
ABS 0.16

Ángulo	Figura	Perfil
0		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
10	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		

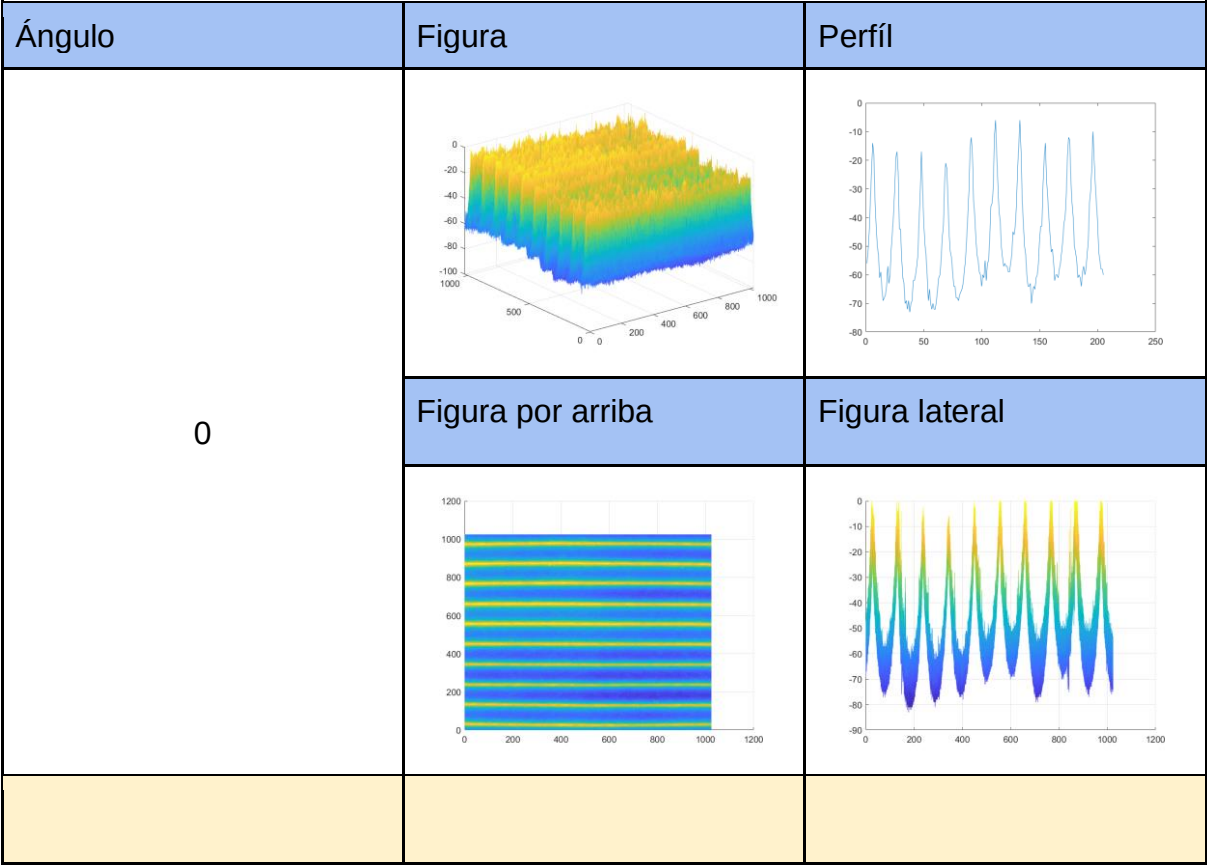
20	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
30	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
	Figura	Perfil

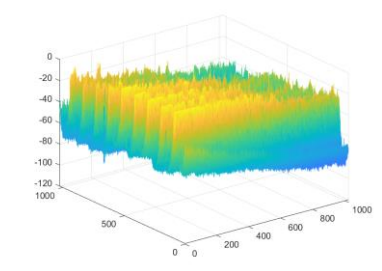
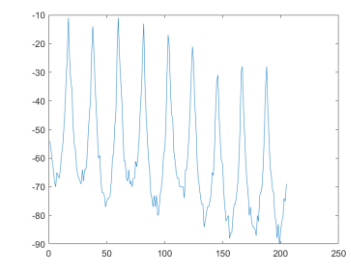
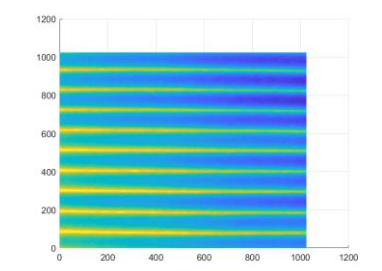
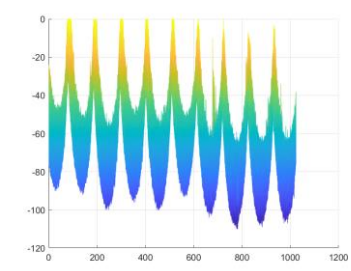
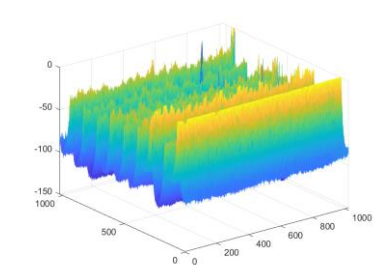
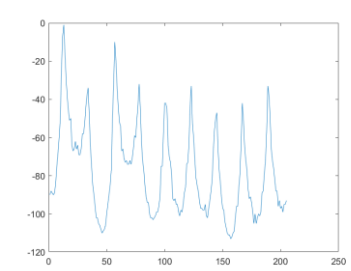
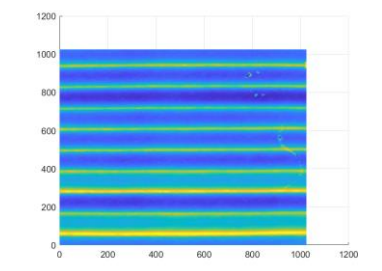
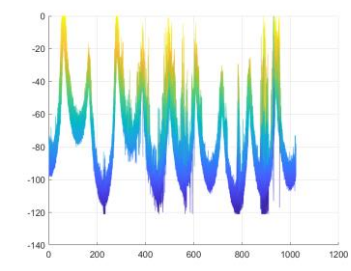
40				
	Figura por arriba		Figura lateral	
				
50	Figura		Perfil	
				
	Figura por arriba		Figura lateral	
				
	Figura		Perfil	

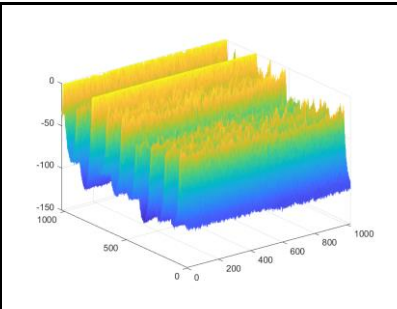
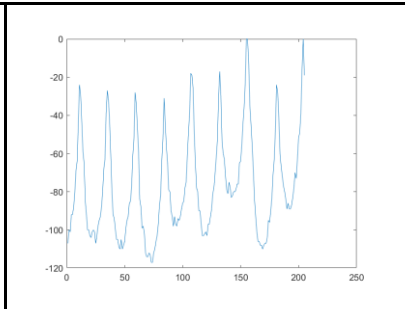
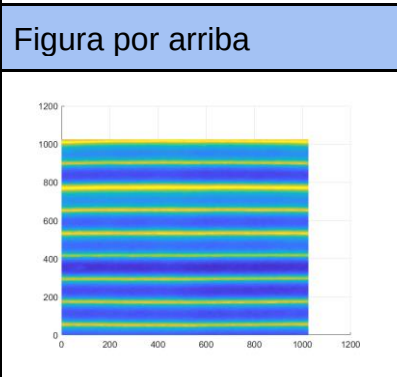
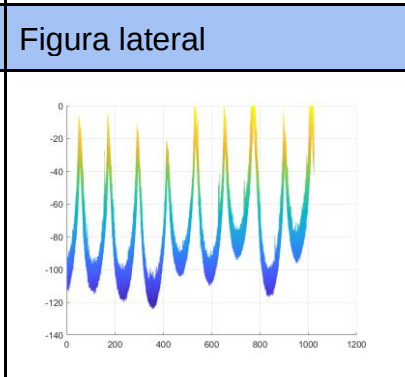
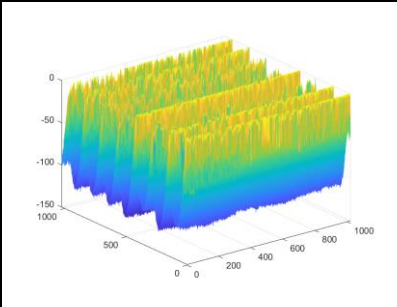
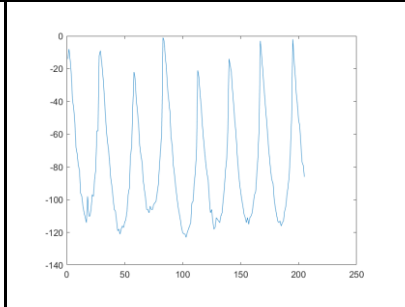
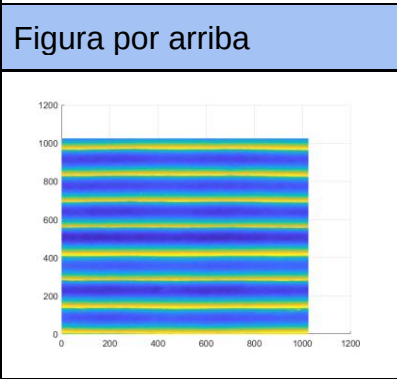
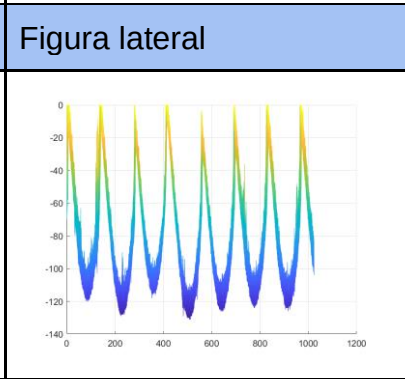
60				
	Figura por arriba		Figura lateral	
				
70	Figura		Perfil	
				
	Figura por arriba		Figura lateral	
				
Figura		Perfil		

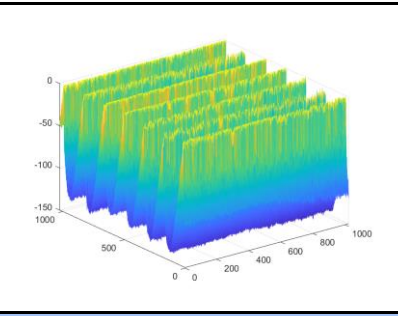
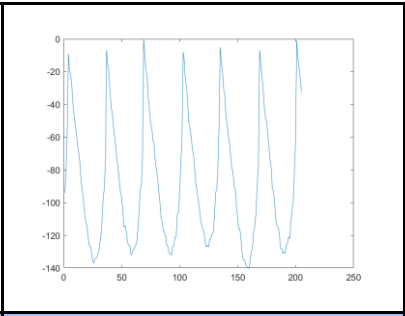
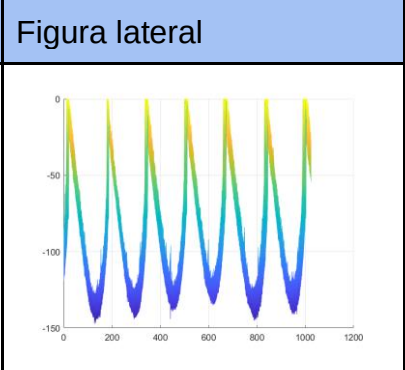
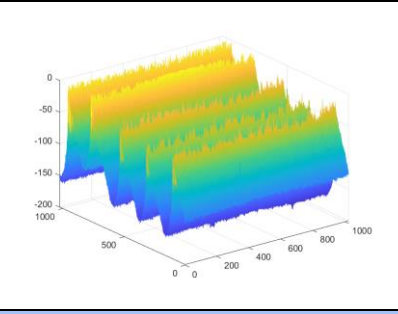
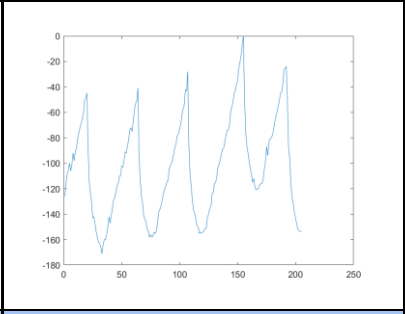
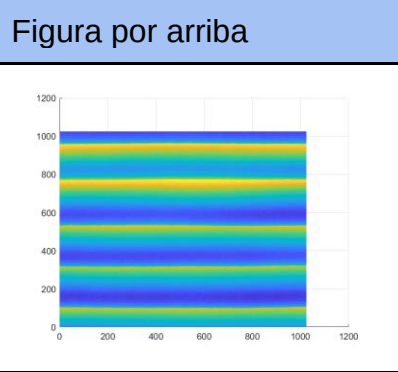
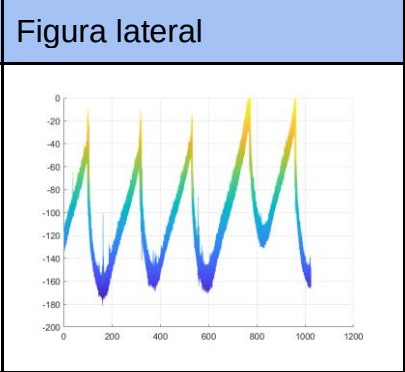


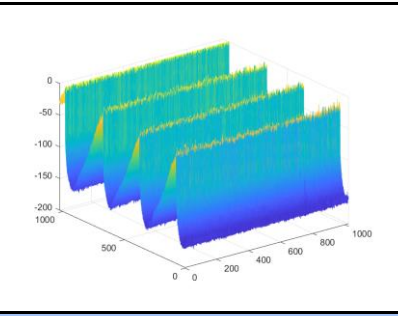
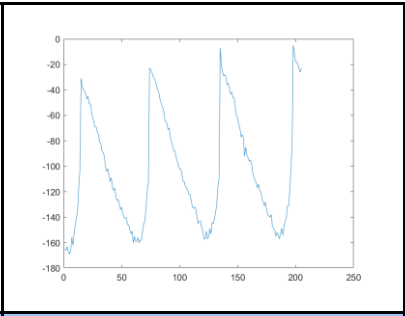
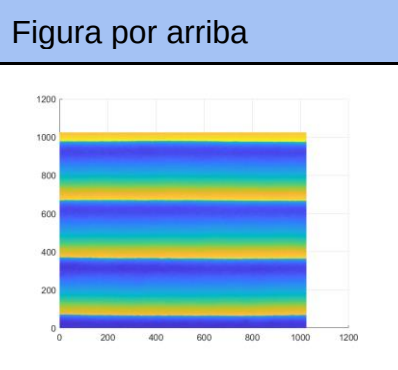
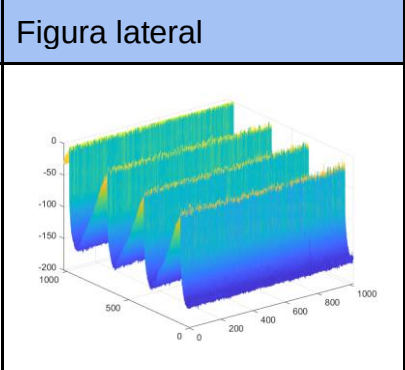
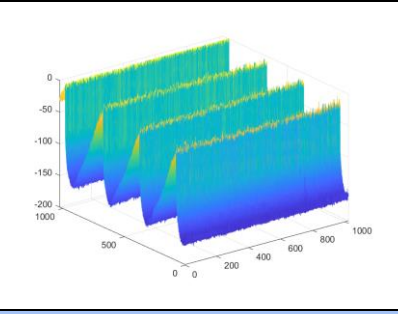
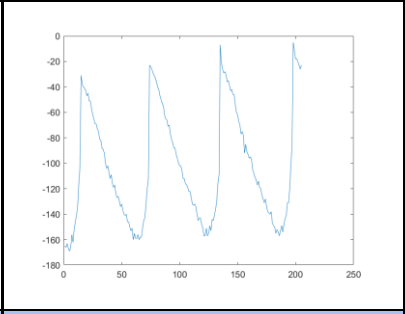
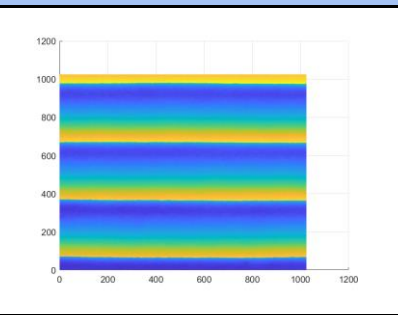
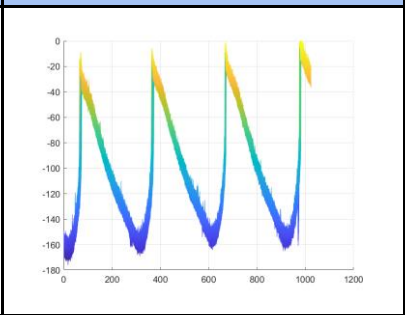
ABS 0.16



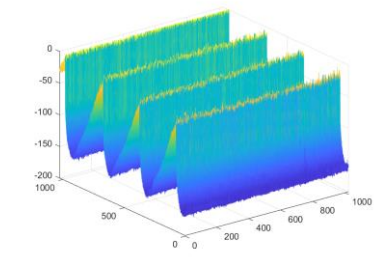
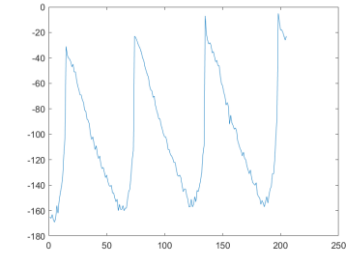
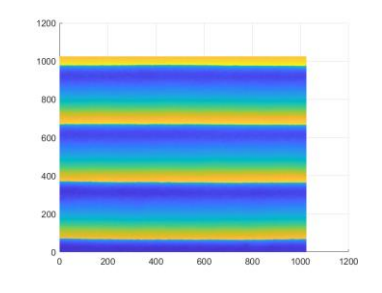
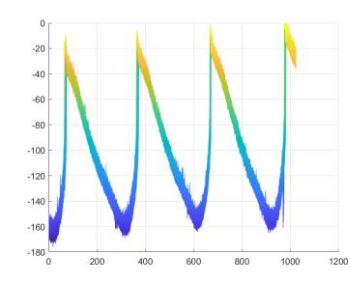
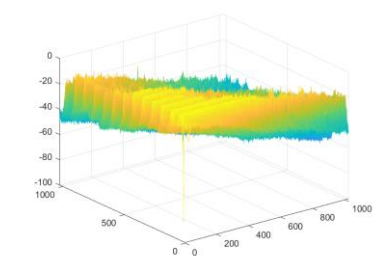
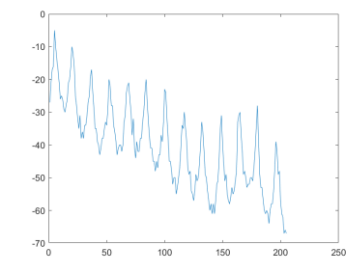
10	Figura	Perfíl
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
20	Figura	Perfíl
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
	Figura	Perfíl

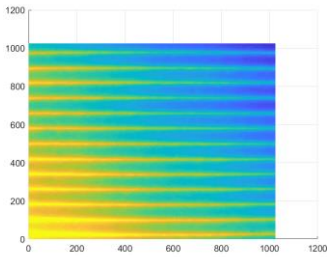
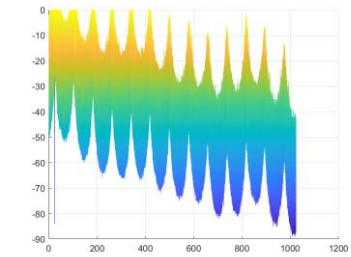
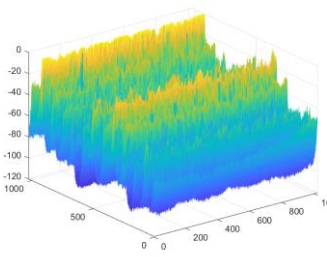
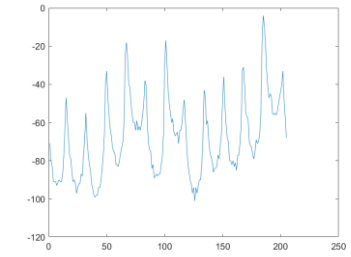
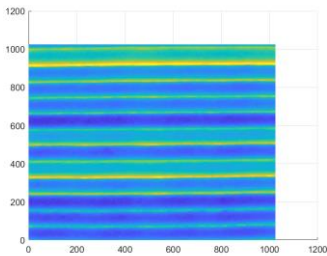
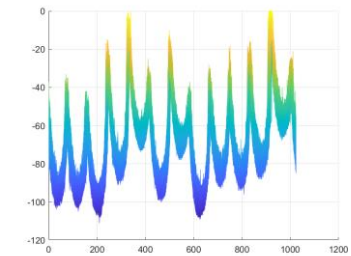
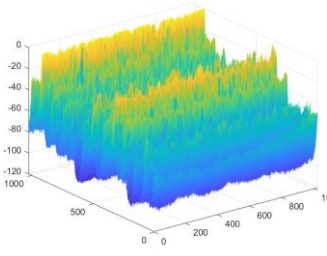
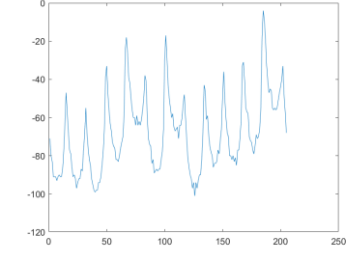
30				
	Figura por arriba		Figura lateral	
				
40	Figura		Perfil	
				
	Figura por arriba		Figura lateral	
				
	Figura		Perfil	

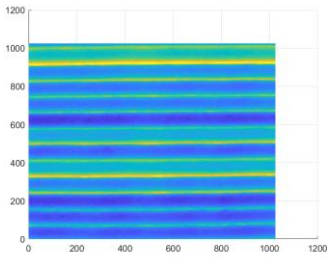
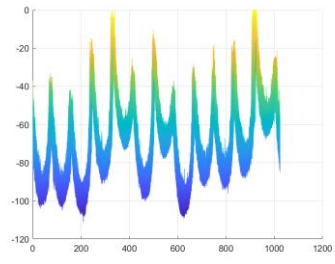
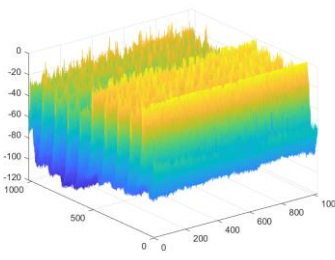
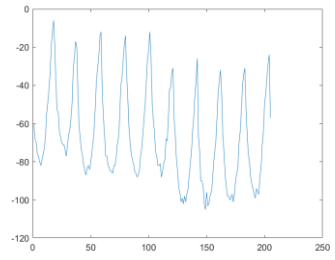
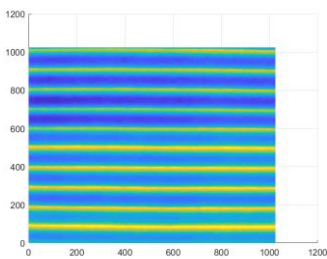
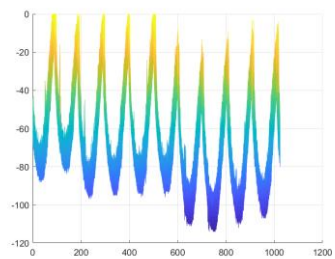
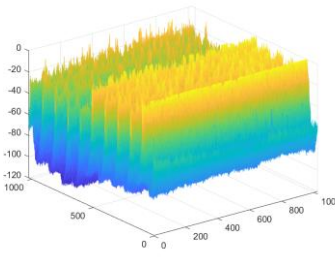
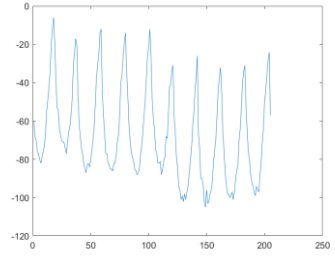
50				
	Figura por arriba		Figura lateral	
				
60	Figura		Perfil	
				
	Figura por arriba		Figura lateral	
				
	Figura		Perfil	

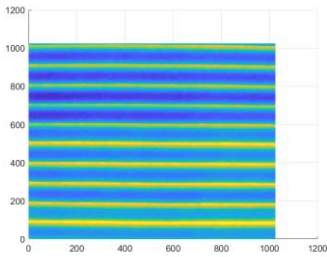
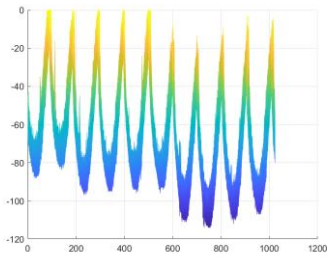
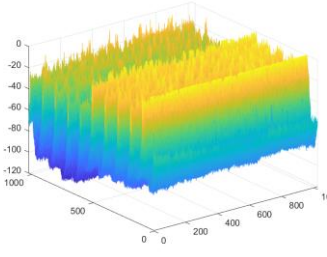
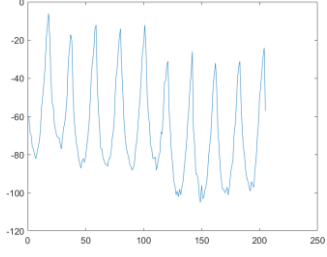
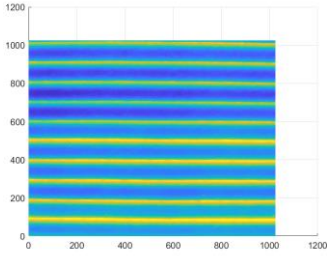
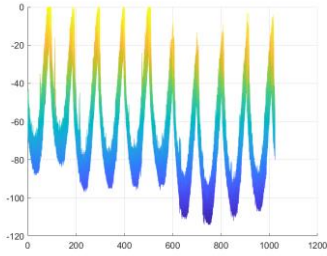
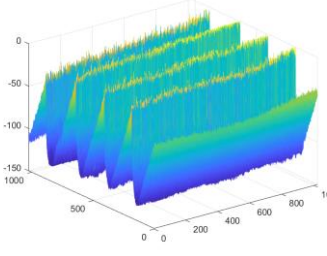
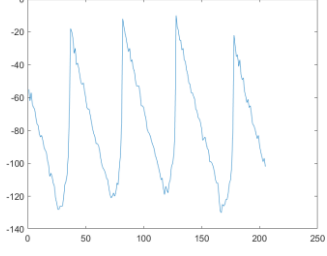
70		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
80	Figura	Perfíl
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		

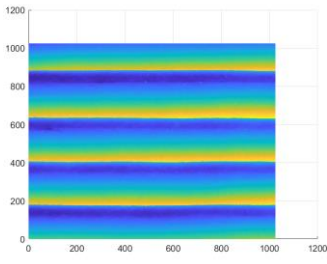
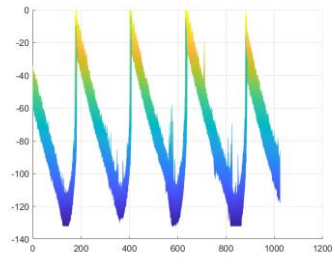
ABS 0.12

Ángulo	Figura	Perfil
0		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
10	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

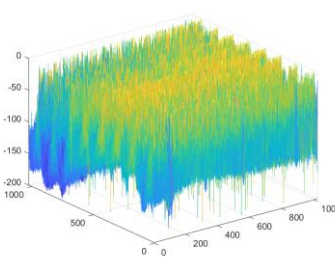
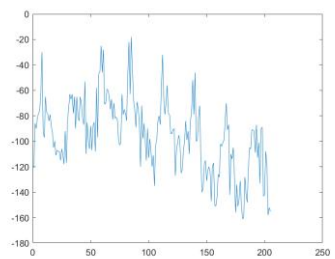
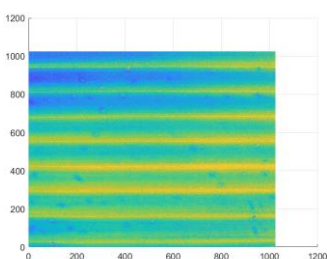
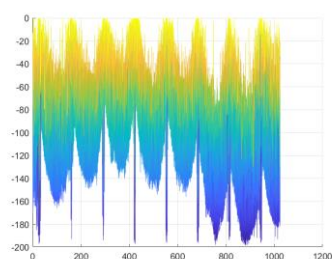
		
20	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
30	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

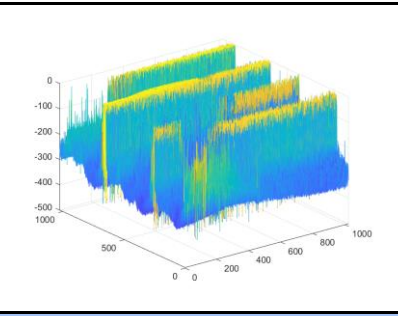
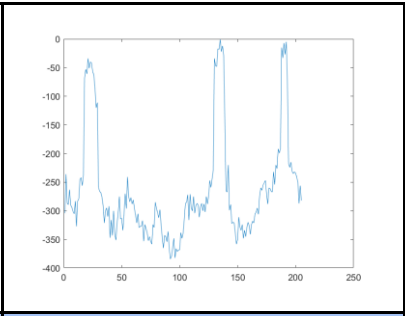
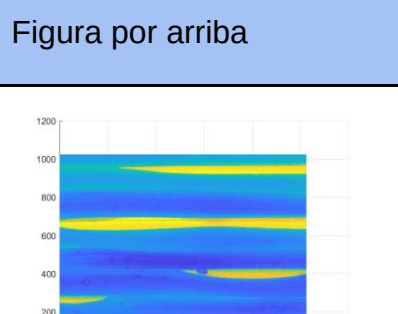
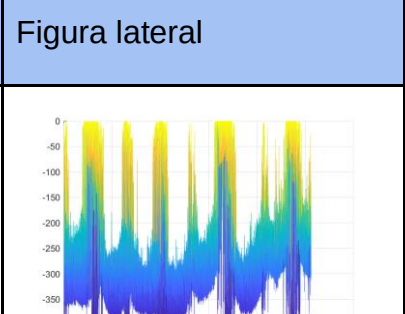
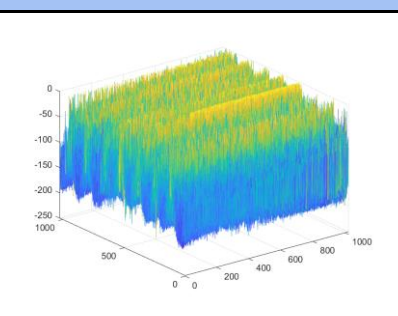
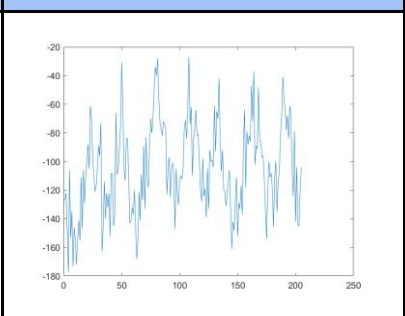
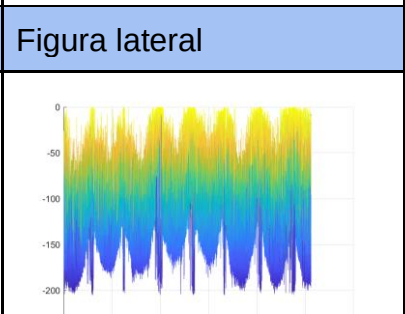
		
40	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
50	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

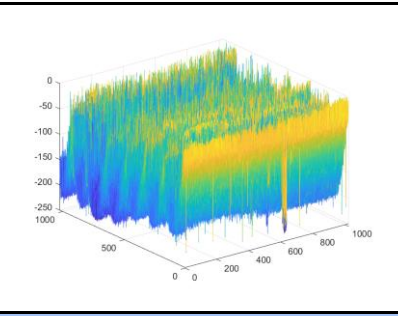
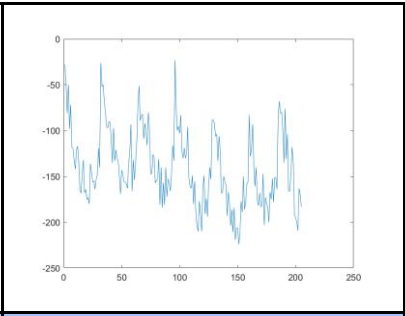
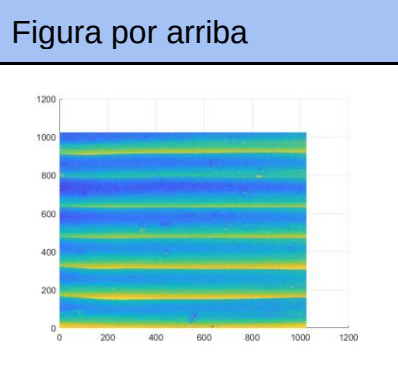
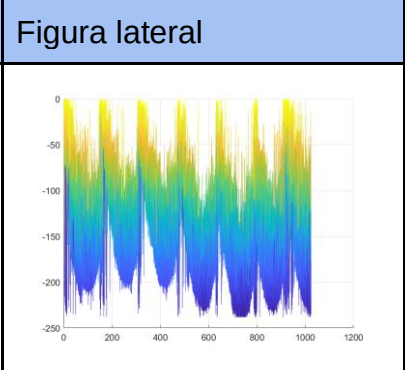
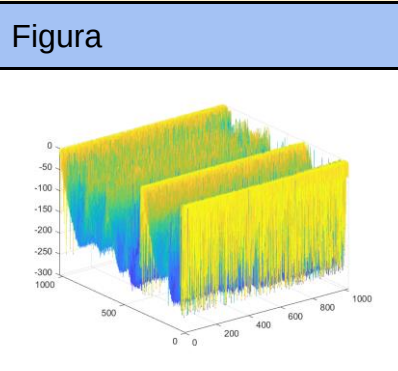
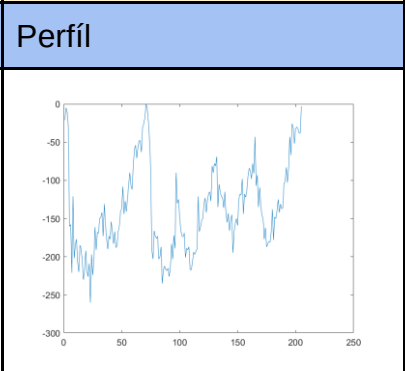
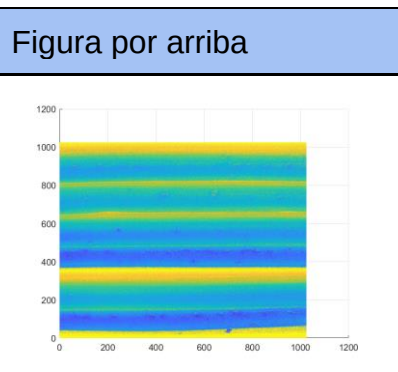
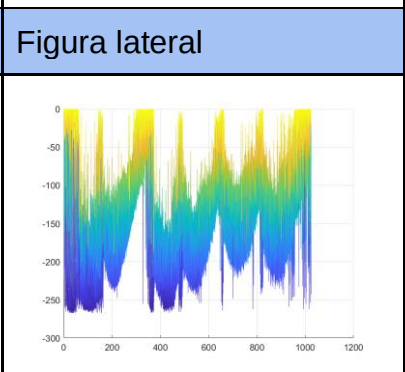
		
60	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
70	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

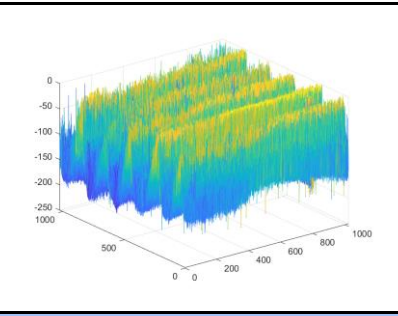
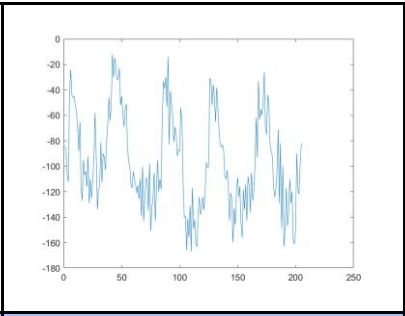
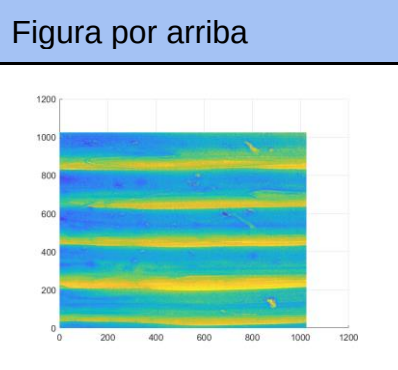
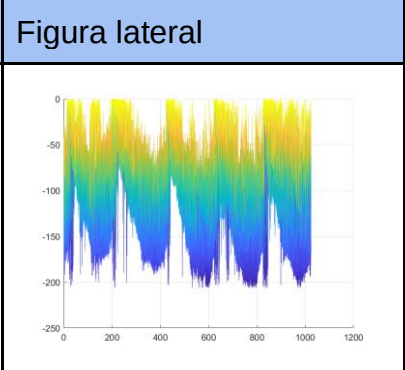
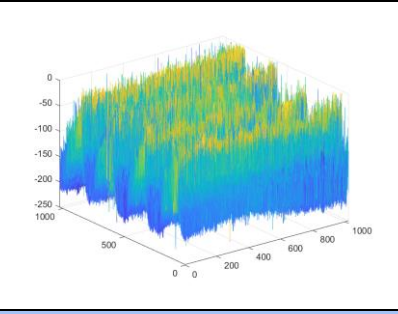
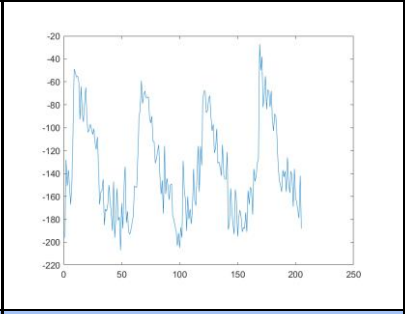
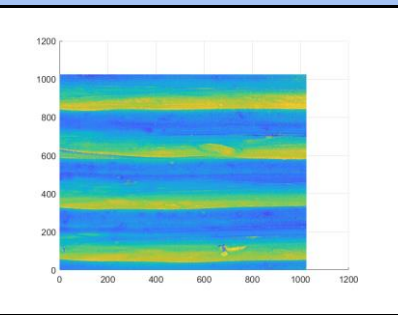
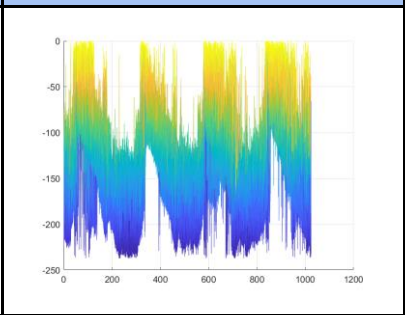
		
80	Figura	Perfil
	Figura por arriba	Figura lateral

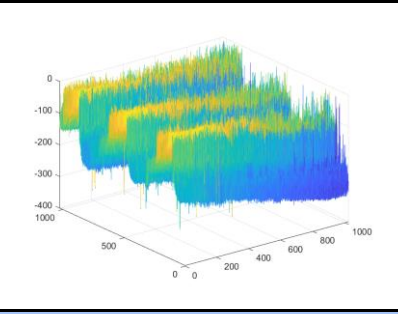
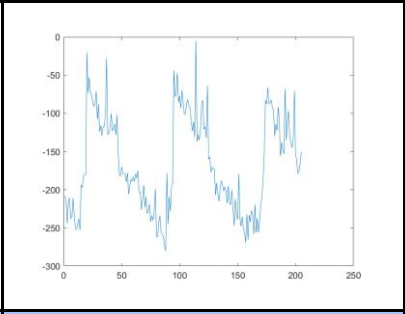
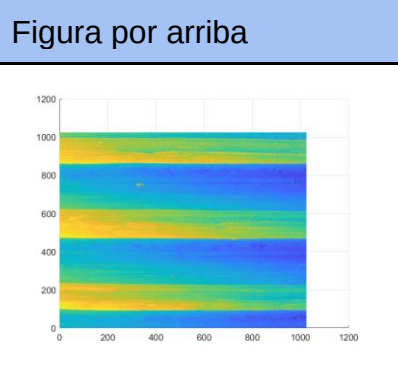
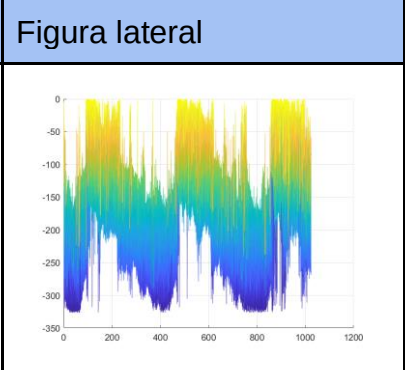
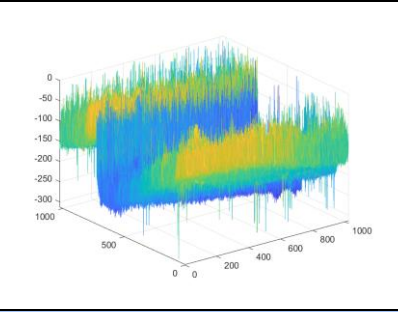
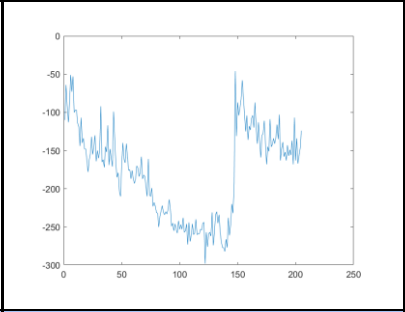
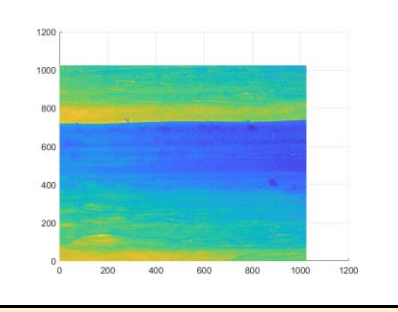
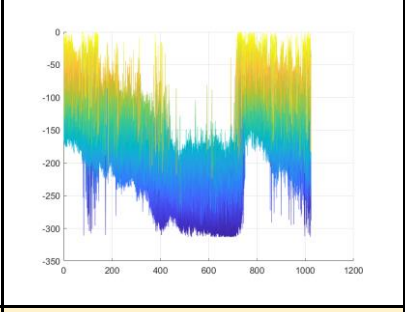
PET 0.2

Ángulo	Figura	Perfil
0		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
	Figura	Perfil

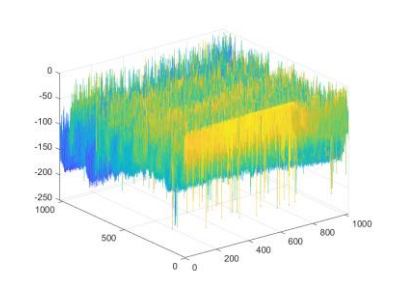
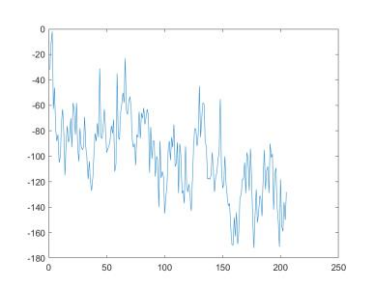
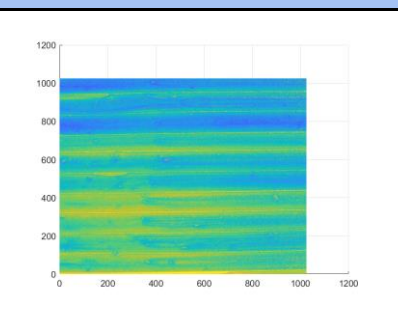
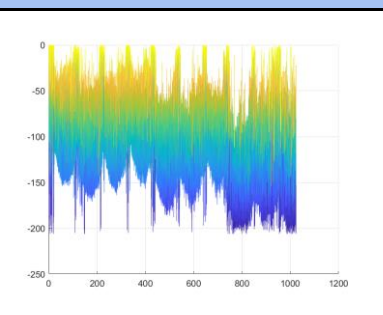
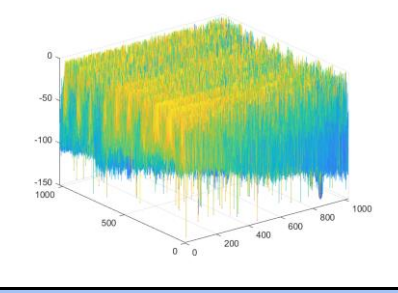
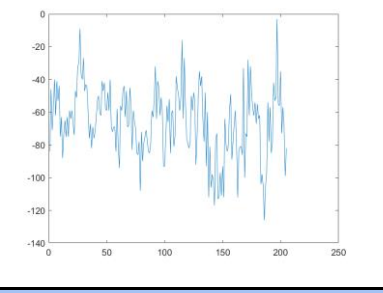
10		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
20	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
	Figura	Perfil

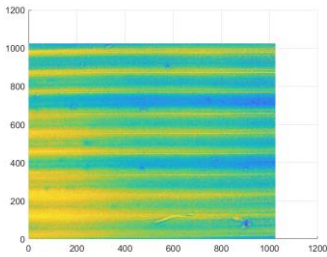
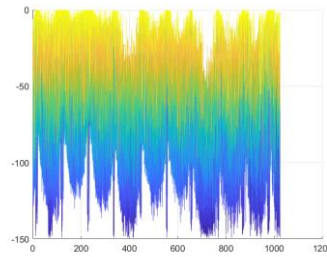
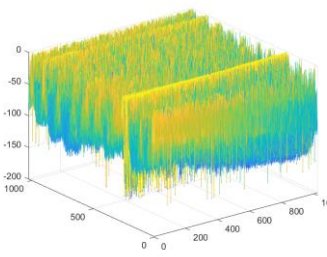
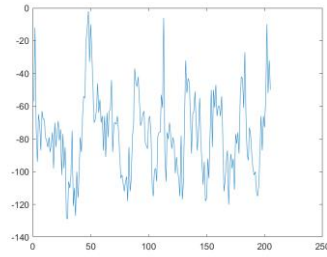
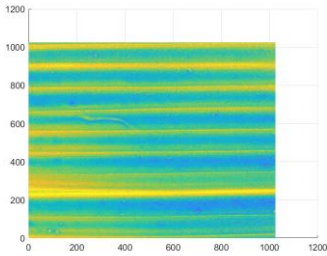
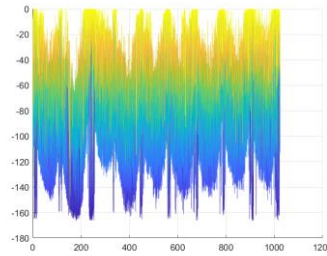
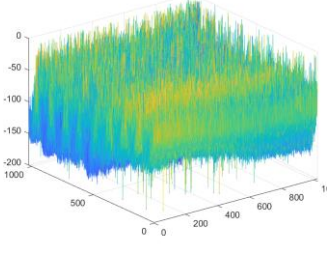
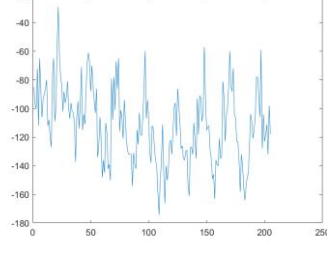
30		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
40	Figura	Perfíl
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
	Figura	Perfíl

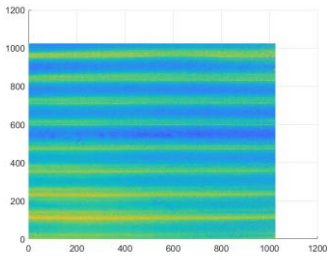
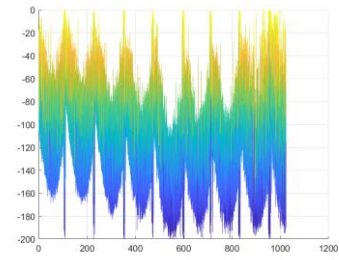
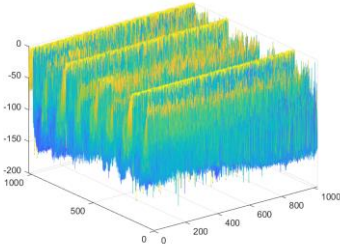
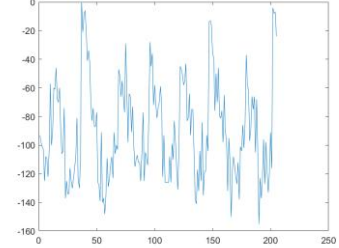
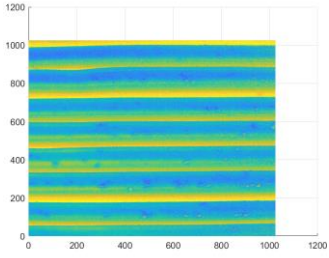
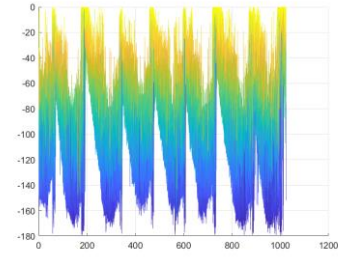
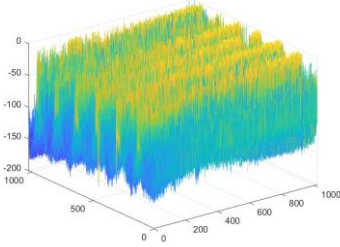
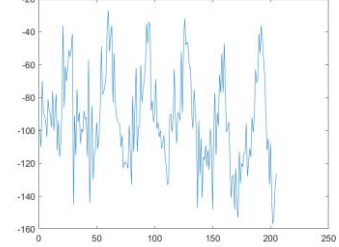
50		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
60	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
	Figura	Perfil

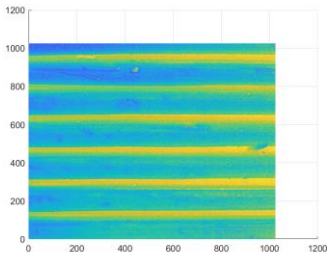
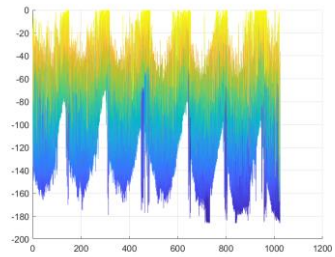
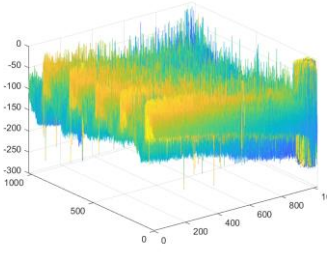
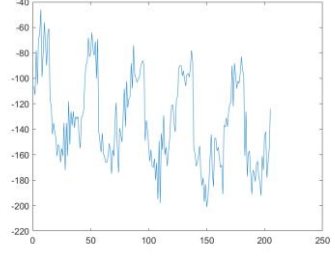
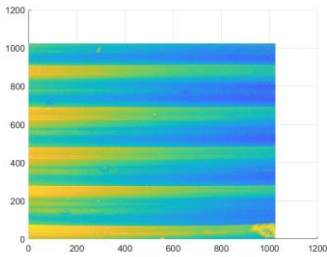
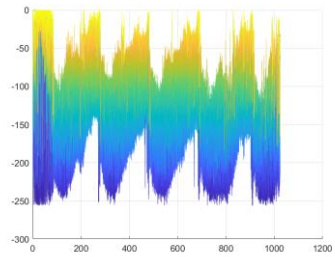
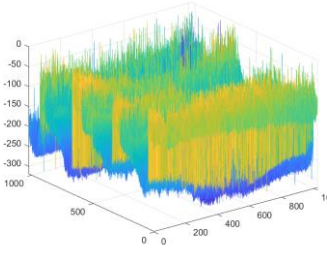
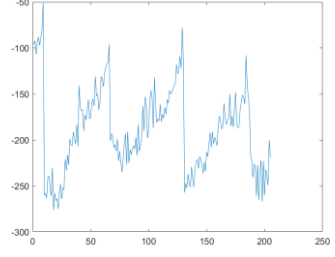
70		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
80	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		

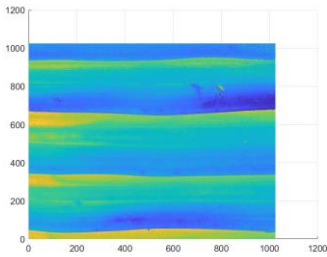
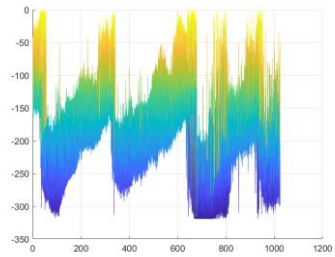
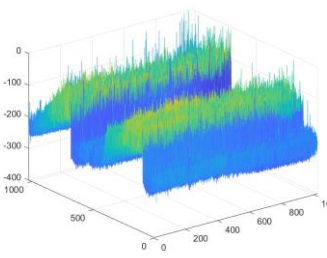
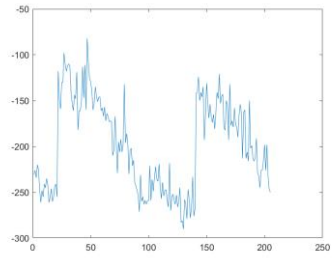
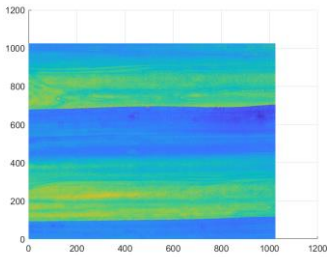
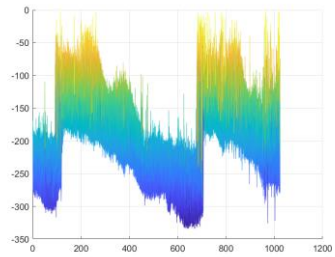
PET 0.16

Ángulo	Figura	Perfil
0		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
10	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

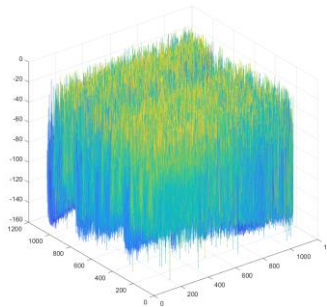
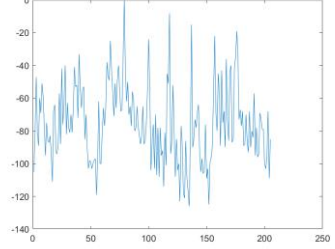
		
20	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
30	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

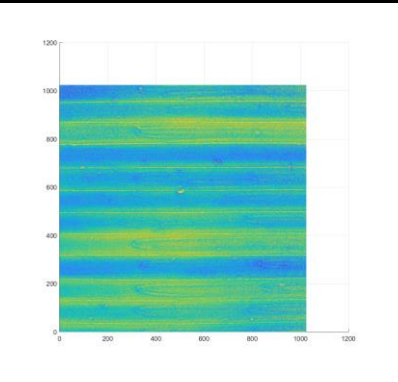
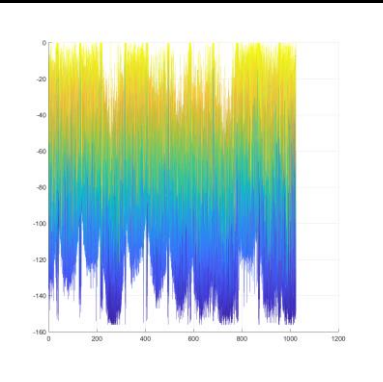
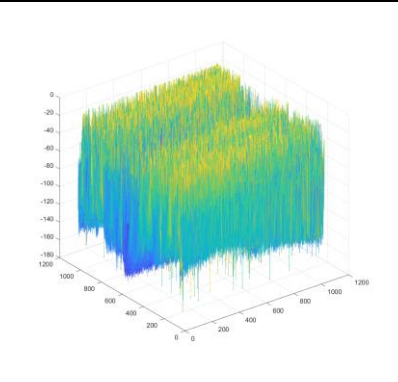
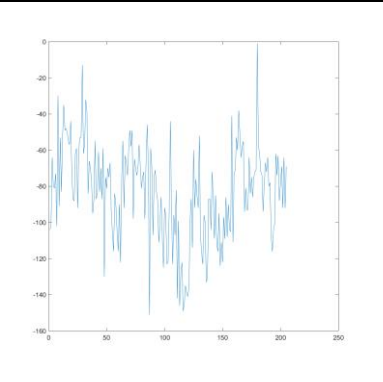
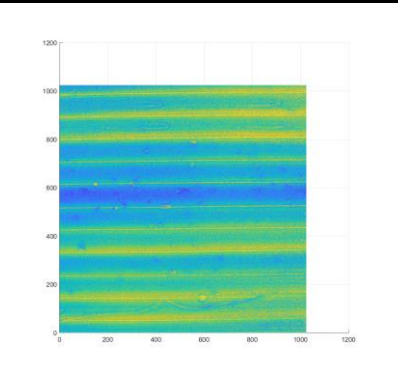
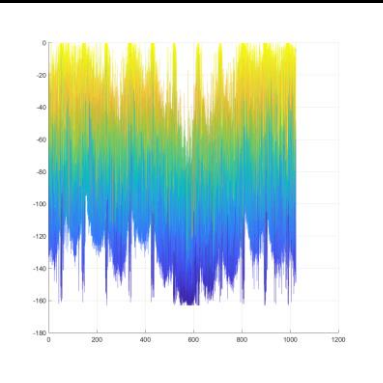
		
40	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
50	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

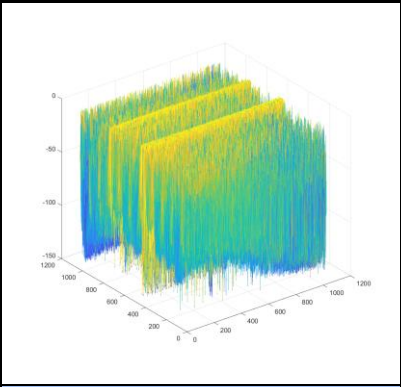
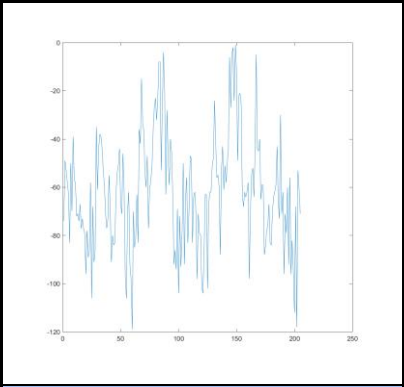
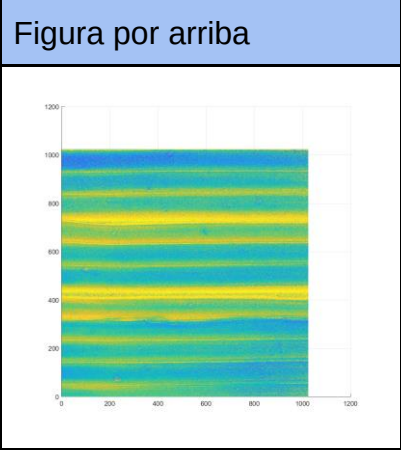
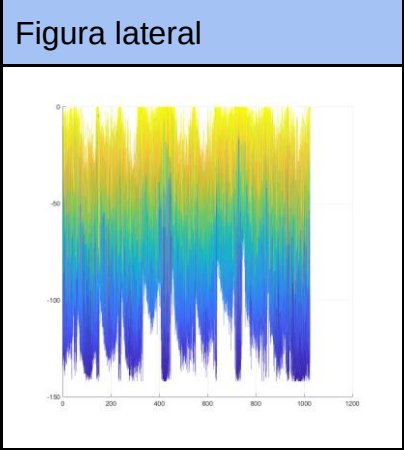
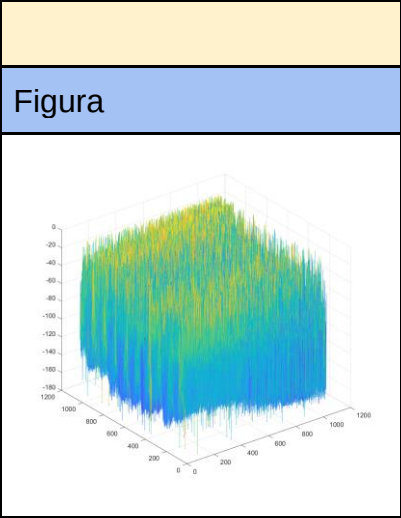
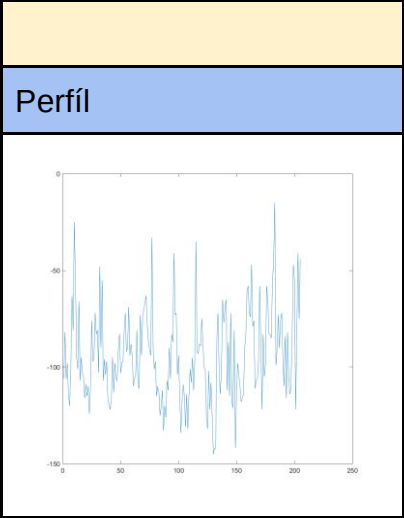
		
60	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
70	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

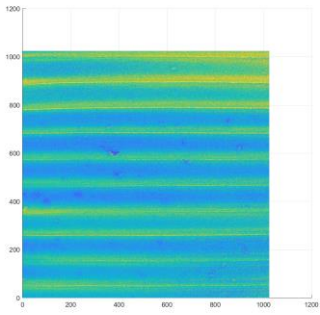
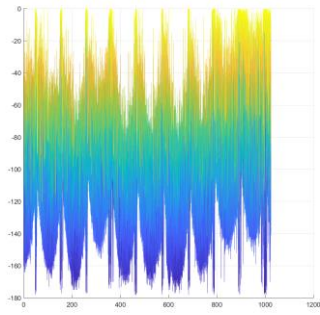
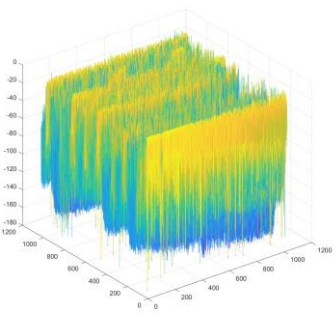
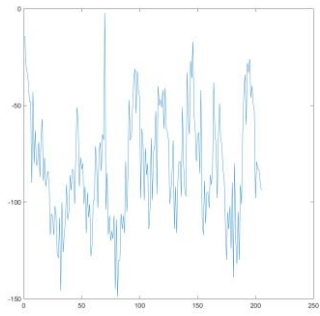
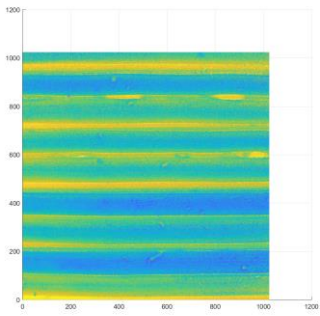
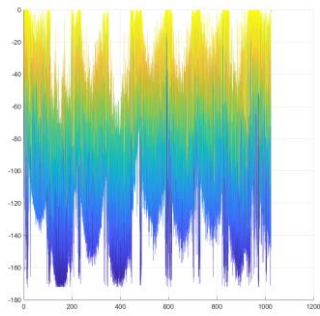
		
80	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		

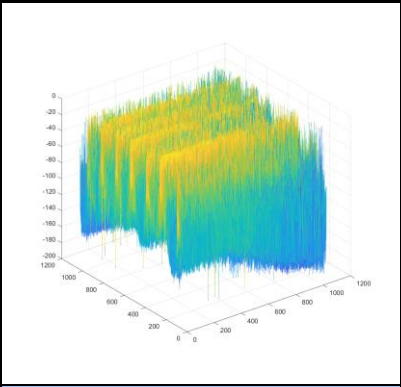
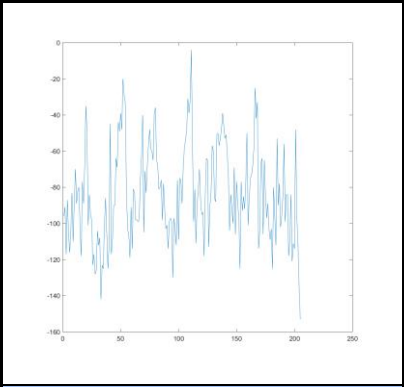
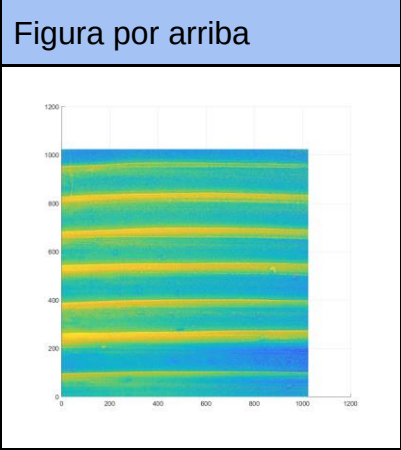
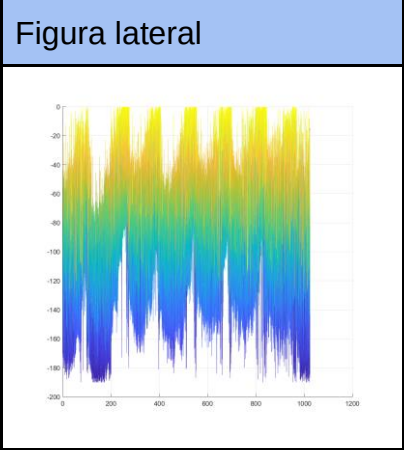
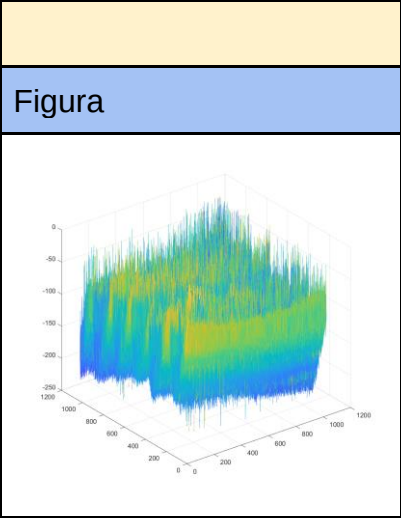
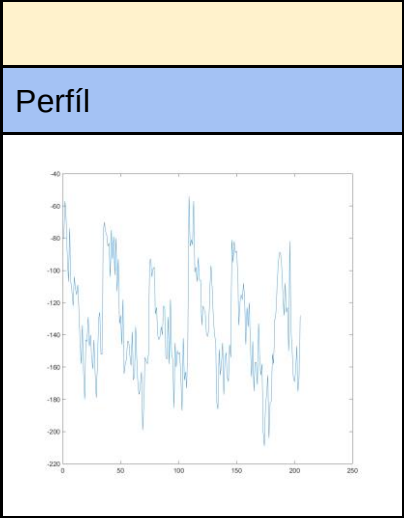
PET 0.12

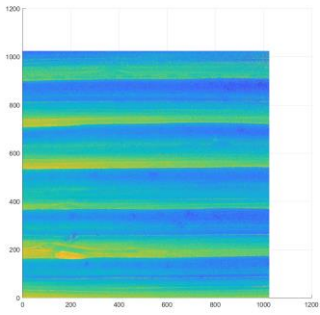
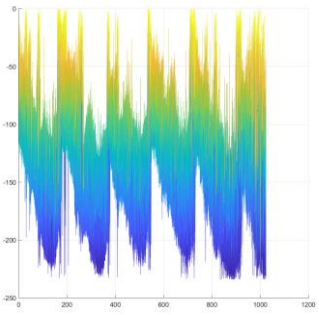
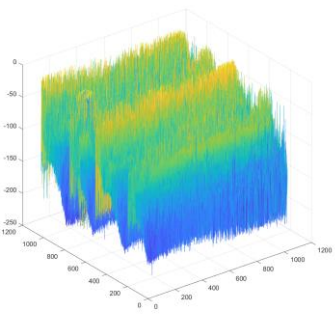
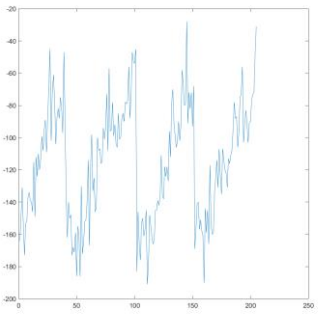
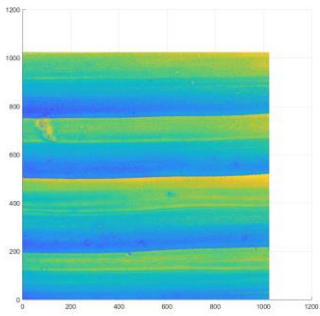
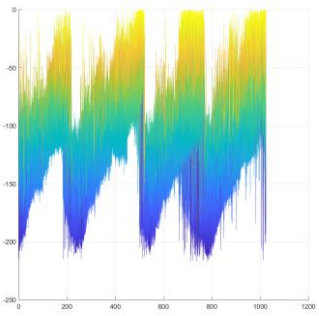
Ángulo	Figura	Perfil
		

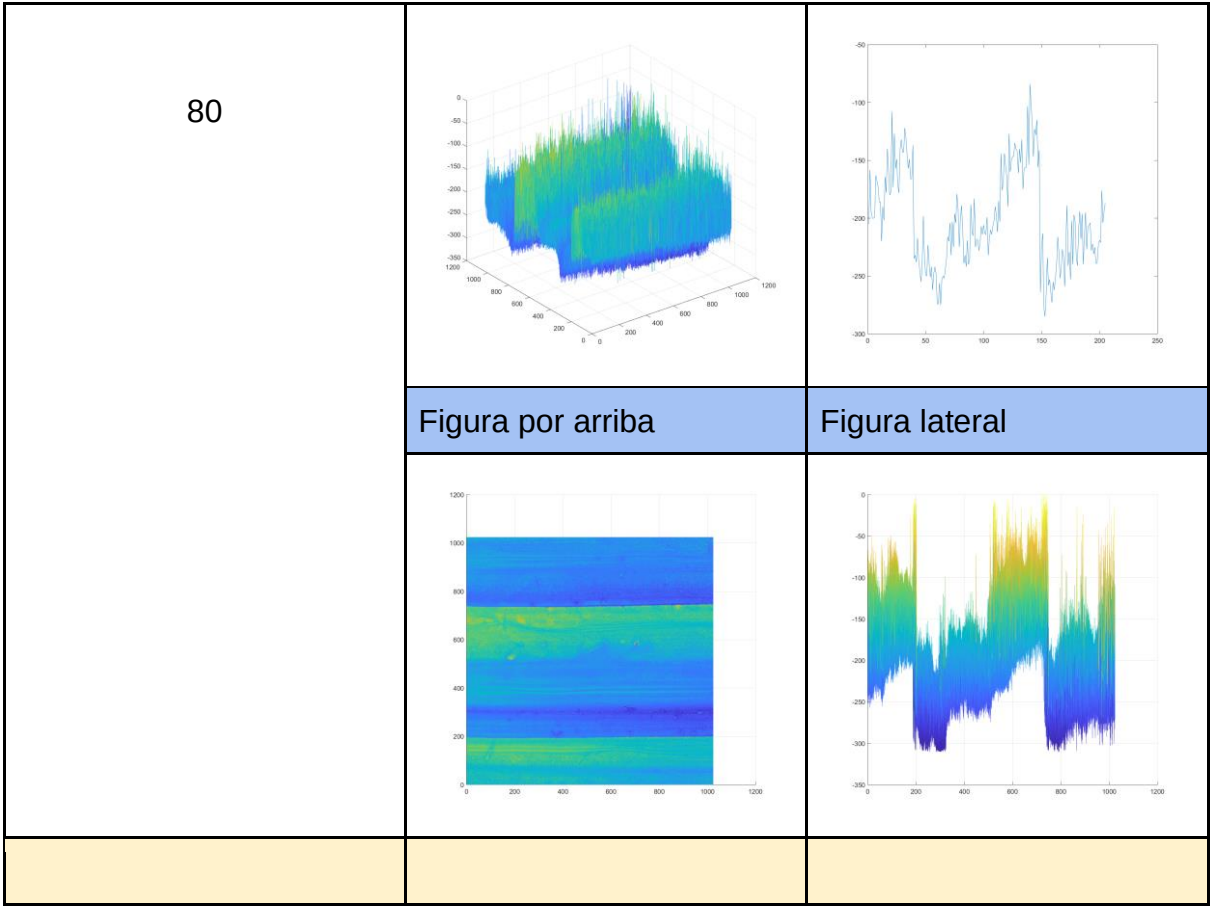
0	Figura por arriba	Figura lateral
		
10	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
	Figura	Perfil

20		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
30	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

		
40	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
	Figura	Perfil

50		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
60	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral

		
70	Figura	Perfil
		
	Figura por arriba	Figura lateral
		
	Figura	Perfil



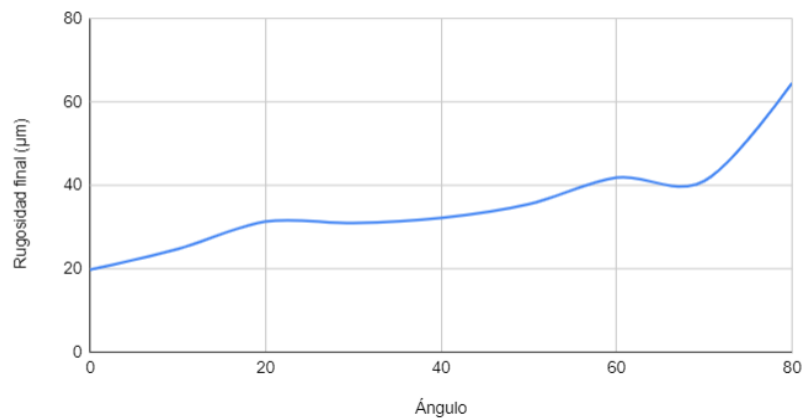
Anexo 3: Resultados

Anexo 3.1 Matlab

ABS 0.16

Ángulo	rugosidad media
0	24,7485
10	30,9285
20	39,1545
30	38,729
40	40,2675
50	44,363
60	52,3785
70	51,328
80	80,7085

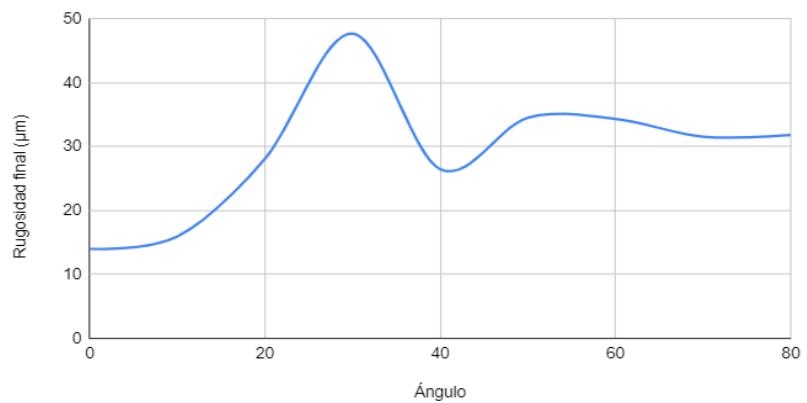
Rugosidad final (μm) frente a Ángulo



ABS 0.12

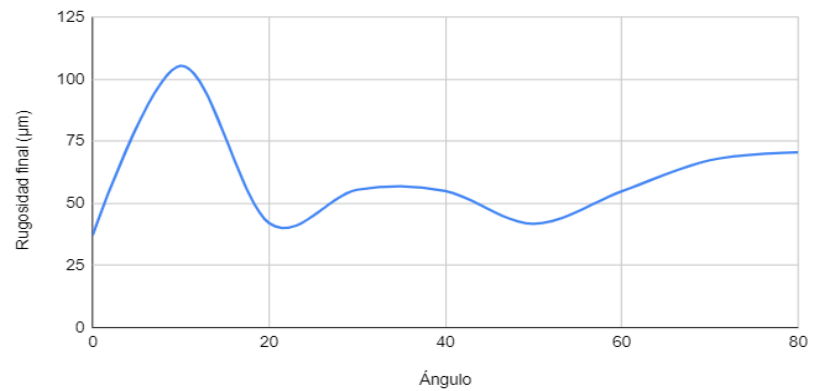
Ángulo	rugosidad media
0	17,507
10	19,932
20	35,091
30	59,667
40	33,117
50	43,1735
60	42,951
70	39,4705
80	39,837

Rugosidad final (μm) frente a Ángulo



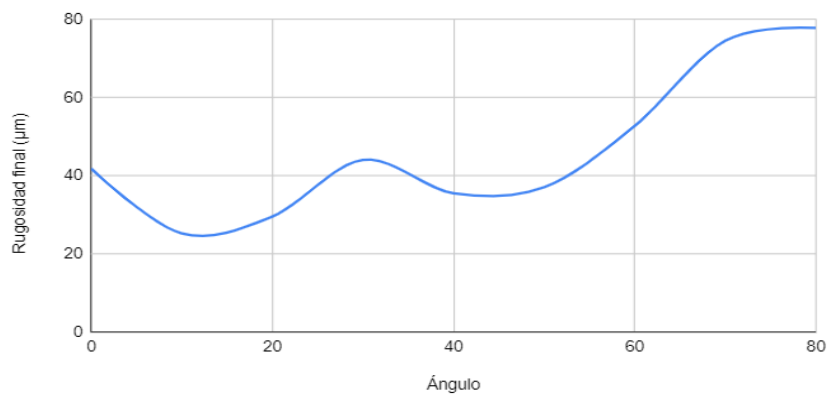
PET 0.2

Ángulo	rugosidad media
0	46,452
10	131,8725
20	52,6865
30	69,4325
40	68,763
50	52,2915
60	68,665
70	84,325
80	88,3075

Rugosidad final (μm) frente a Ángulo

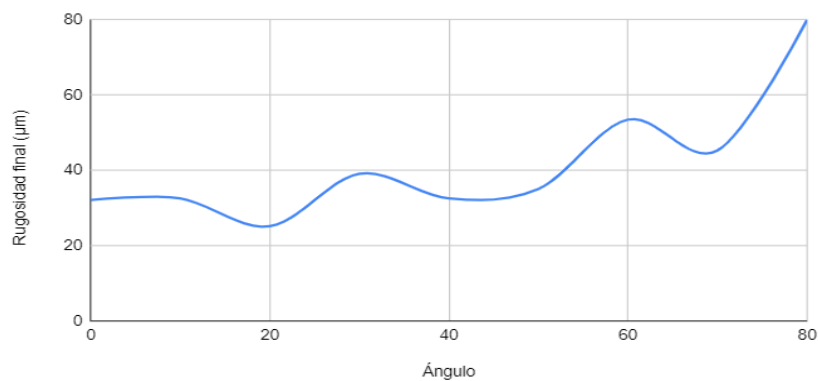
PET 0.16

Ángulo	rugosidad media
0	52,3235
10	31,537
20	36,946
30	55,086
40	44,41
50	46,332
60	65,9655
70	93,277
80	97,33

Rugosidad final (μm) frente a Ángulo

PET 0.12

Ángulo	rugosidad media
0	40,151
10	40,708
20	31,45
30	48,8575
40	40,683
50	43,841
60	66,8805
70	56,6545
80	99,9855

Rugosidad final (μm) frente a Ángulo

Anexo 3.2 Rugosímetro

ABS 0.2

Ángulo	Ra medio (μm)	Desviación
0	15,6734	0,04668297334
10	17,852	0,2252665088
20	20,1586	0,5982297218
30	23,8596	0,2946256947
40	30,297	0,0881901355
50	35,1446	0,9806096573
60	34,5976	0,4612367071
70	43,3722	0,6721902261
80	43,553	0,9287892657

ABS 0.16

Ángulo	Ra medio (μm)	Desviación
0	12,8608	0,2792753122
10	15,0282	0,2609247018
20	15,7856	0,4552057776
30	20,2002	1,471208755
40	24,5134	0,2323419893
50	28,3008	0,3399046925
60	28,6878	0,3879686843
70	35,2954	0,8274695161
80	30,4598	0,6765391341

ABS 0.12

Ángulo	Ra medio (μm)	Desviación
0	10,23685736	0,1922542587
10	10,43222938	0,6862120663
20	14,34734228	0,7589938735
30	16,34448367	0,2621015071
40	18,95687372	0,4489534497
50	21,89484059	0,2437314095
60	24,06462133	0,3395111191
70	28,13366692	0,4974250697
80	25,60559299	0,5343316386

PET 0.2

Ángulo	Ra medio (μm)	Desviación
0	20,9307186	0,574163043
10	32,65371805	0,2756289172
20	21,11107733	0,5224487535
30	29,63893359	0,4879034741
40	43,041748	3,713216355
50	33,67848091	0,4056541631
60	37,59143475	0,2128445442
70	38,65701614	1,044920906
80	47,42784996	0,4710953194

PET 0.16

Ángulo	Ra medio (μm)	Desviación
0	15,9824926	0,04631738335
10	17,05092947	0,119433245
20	18,81238722	0,07075521182
30	18,43240376	0,1176477794
40	28,27930589	3,628300057
50	24,94129697	0,3090797632
60	29,51671843	0,6540344028
70	31,3460566	1,455123088
80	31,13575767	3,226240428

PET 0.12

Ángulo	Ra medio (μm)	Desviación
0	11,28895419	3,42079387
10	16,08000887	0,0619975806
20	17,0535117	0,5254248757
30	17,54876452	0,1347675777
40	22,26409482	0,4800810348
50	24,74233113	1,17624636
60	29,54094449	1,870300056
70	26,88187226	1,059568843
80	38,90366008	0,3239424332