



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

## DISEÑO DE PATRONES PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD SUPERFICIAL OBTENIDA EN DIFERENTES PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA

*Autor/es*

**MERCEDES CONCHA RIVERA**

*Director/es*

**LUCÍA CANDELA DÍAZ PÉREZ**

**DANIEL GALLARDO ARTAL**

Ingeniería de Tecnologías Industriales

**Universidad de Zaragoza**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2022



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
**Universidad** Zaragoza

## RESUMEN

La Fabricación Aditiva (FA) es un proceso de fabricación por el cual se crea cualquier tipo de elemento mediante la deposición de capas de material generalmente polimérico o metálico. Se puede llevar a cabo con diversas tecnologías, y se encuentra actualmente en crecimiento. Gracias a sus múltiples ventajas, cada vez más empresas introducen estas tecnologías a sus procesos de producción, no obstante, la obtención de calidad superficial sigue siendo un problema, ya que el propio proceso de fabricación capa por capa (layer by layer), produce de forma inherente una rugosidad creada por el llamado “efecto escalera”, que da forma escalonada al perfil de las piezas. Así pues, se necesitan técnicas de postprocesado para mejorar la calidad superficial, lo que aumenta el coste de fabricación.

Para llevar a cabo este trabajo, en primer lugar se recaba información de diversas fuentes sobre la predicción de la rugosidad, indicaciones para realizar el diseño de las piezas e información de patrones ya existentes. La mayoría de estos patrones, están centrados en el análisis dimensional de las piezas creadas con fabricación aditiva, y existen pocos patrones creados para el estudio de la calidad superficial, además, la mayoría de ellos no están diseñados para la investigación de piezas poliméricas.

En base a la investigación realizada, se crean modelos de predicción de la rugosidad fundamentados en la forma de escalonado inherente a la deposición por capas, y se diseñan unas piezas patrón de acuerdo con varias condiciones de diseño que se tienen en cuenta.

Este trabajo se centra en el estudio de la rugosidad producida en las piezas fabricadas en tres impresoras, a las que se tiene acceso en el departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza, y que utilizan distintas tecnologías de fabricación aditiva (FDM, SLS y Polyjet).

Las mediciones experimentales se realizan con un microscopio de variación focal y un rugosímetro. Con dichos equipos, se obtienen datos de rugosidad para cada tecnología y se comparan con los resultados que se esperan teóricamente.

Gracias al trabajo realizado, se encuentran las tendencias de la rugosidad y se revelan las diferencias de calidad superficial entre los resultados teóricos y experimentales para las distintas tecnologías.

## ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) is a production concept by which any type of element is created by deposition of layers of polymeric or metallic material. It can be carried out with various technologies and it is currently growing. Thanks to their multiple advantages, more and more companies are introducing these technologies to their production processes. However, obtaining surface quality continues to be a problem, since the layer-by-layer manufacturing process itself inherently produces a roughness created due to the so-called “staircase effect”, which gives a staggered shape to the profile of the pieces. Thus, post-processing techniques are needed to improve the surface quality, which increases the manufacturing cost.

To carry out this assignment, information is first collected from various sources on the prediction of roughness, indication to design the pieces and information on existing patterns. Most of these patterns are focused on the dimensional analysis of parts created with additive manufacturing, and there are few patterns created for the study of surface quality. Moreover, most of them are not designed for the investigation of polymer pieces.

This assignment focuses on the study of the roughness produced in the pieces created in three different printers, to which there is access in the Department of Design and Manufacturing Engineering of the University of Zaragoza, and which uses different additive manufacturing technologies (FDM, SLS and Polyjet).

Based on the research carried out, roughness prediction models are created based on the staggered shape inherent in layered deposition, and pattern parts are created according to various design conditions that are considered.

Experimental measurements are made with a focal variation microscope and a roughness meter. In said equipment, roughness data is obtained for each technology and compared with the results that are theoretically expected.

Thanks to the work carried out, the roughness trends are found and the differences in surface quality between the theoretical and experimental results for the different technologies are revealed.

# Índice

1.	INTRODUCCIÓN .....	6
1.1	Fabricación aditiva.....	6
1.2	Justificación del proyecto .....	7
1.3	Objetivo y alcance .....	8
2.	ESTADO DEL ARTE.....	10
2.1	Patrones actuales para el análisis de la superficie .....	10
2.2	Predicción de la rugosidad para superficies producidas por FDM .....	10
2.3	Marcos de diseño para fabricación aditiva.....	13
2.4	Equipos de impresión y medida .....	14
3.	CÁLCULO TEÓRICO.....	19
3.1	Efecto de escalonamiento .....	19
3.2	Elección del parámetro de rugosidad.....	20
3.3	Cálculo teórico general.....	20
3.4	Cálculo optimizado para FDM .....	22
3.5	Resultados teóricos para perfil sinusoidal y patrón de triángulos. ....	26
4.	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS.....	28
4.1	Condiciones iniciales de diseño .....	28
4.2	Presentación de las piezas diseñadas.....	30
4.3	Presentación de las piezas fabricadas .....	34
5.	MEDICIÓN EXPERIMENTAL.....	36
5.1	Elección de la longitud de corte .....	36
5.2	Resultados experimentales de FDM obtenidos con el microscopio .....	37
5.2.1	Resultados obtenidos para Lc de tabla 1.....	37
5.2.2	Resultados obtenidos para Lc de Tabla 3. ....	40
5.2.3	Resultados de piezas de FDM con segunda impresora .....	43
5.3	Resultados experimentales de SLS obtenidos con el microscopio.....	45
5.4	Resultados experimentales de Polyjet obtenidos con el microscopio .....	48
5.5	Resultados obtenidos con el rugosímetro.....	50
5.6	Comparación de piezas que no dependen del ángulo de construcción.....	54
5.7	Comparación entre tecnologías de fabricación.....	56
6.	CONCLUSIONES .....	60

7. Bibliografía.....	61
ANEXO 1. TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN [17].....	64
ANEXO 2. ESTADO DEL ARTE .....	71
1. Patrones para el estudio de la superficie [5].....	71
2. Predicción de la rugosidad para superficies producidas por FDM [3].....	73
3. Marco de diseño para fabricación aditiva [6].....	76
ANEXO 3. EQUIPOS DE IMPRESIÓN Y MATERIALES.....	80
ANEXO 4. EQUIPOS DE MEDICIÓN.....	85
ANEXO 5. PARÁMETROS DE MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD [21] [22].....	88
ANEXO 6. CÁLCULO TEÓRICO .....	94
ANEXO 7. PLANOS DE LAS PIEZAS.....	96
ANEXO 8. IMÁGENES DE LAS PIEZAS FABRICADAS.....	104
ANEXO 9. COMPARACIÓN DE DESVIACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES CON TEÓRICOS (VARIAS LC) .....	114
ANEXO 10. IMÁGENES DE FILTRADO SEGÚN LA LONGITUD DE CORTE .....	119
ANEXO 11. MEDIDAS COMPLETAS .....	121
ANEXO 12. PARÁMETROS DE LA CURVA DE ABBOTT-FIRESTONE.....	130
ANEXO 13. JUSTIFICACIÓN PROBLEMÁTICA PIEZAS BLANCAS .....	133
ANEXO 14. PRESENTACIÓN DE LAS PIEZAS DISEÑADAS.....	134
ANEXO 15. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE PIEZAS SINGULARES .....	141
ANEXO 16. COMPARACIÓN DE PIEZAS DE FDM CON SEGUNDA IMPRESORA .....	144

## Índice de Tablas

Tabla 1. Características de los patrones AMSA .....	10
Tabla 2. Expresiones del modelo de Pandey [3].....	11
Tabla 3. Expresiones del modelo de Ahn [3] .....	12
Tabla 4. Consideraciones del marco de diseño [6].....	14
Tabla 5. Tabla resumen características del microscopio de Alicona .....	17
Tabla 6. Resultados de rugosidad del cálculo teórico general .....	21
Tabla 7. Comparación de resultados teóricos del cálculo general y del cálculo optimizado .....	24
Tabla 8. Resultados teóricos de rugosidad para las piezas singulares .....	27
Tabla 9. Medidas del escalonado de las piezas de Polyjet .....	32
Tabla 10. Resultados experimentales obtenidos con el microscopio para Lc según tabla 1 .....	38
Tabla 11. Parámetro Rsm y Lc para espesor 0,1 mm .....	40
Tabla 12. Parámetro Rsm y Lc para espesor 0,15 mm .....	40
Tabla 13. Parámetro Rsm y Lc para espesor 0,1 mm .....	40
Tabla 14. Resultados experimentales obtenidos con el microscopio para Lc según tabla 3 .....	41
Tabla 15. Resultados obtenidos con las s piezas de FDM de la segunda impresora.....	44
Tabla 16. Resultados experimentales obtenidos con el microscopio para las piezas de SLS.....	45
Tabla 17. Resultados experimentales obtenidos con el microscopio tras la limpieza con abrasivo.....	47
Tabla 18. Resultados obtenidos con el microscopio para las piezas de Polyjet.....	48
Tabla 19. Resultados experimentales medios obtenidos con el rugosímetro para Lc según tabla 1 .....	51
Tabla 20. Resultados experimentales medios obtenidos con el rugosímetro para Lc según tabla 3 .....	51
Tabla 21. Resultados experimentales medios obtenidos con el rugosímetro para las piezas limpias con abrasivo SLS .....	53
Tabla 22. Resultados experimentales medios obtenidos con el rugosímetro para las piezas Polyjet.....	54
Tabla 23. Parámetros de la curva de FDM .....	57
Tabla 24. Parámetros de la curva de SLS antes de la limpieza .....	57
Tabla 25. Parámetros de la curva de SLS después de la limpieza .....	58
Tabla 26. Parámetros de la curva de Polyjet .....	58

## Índice de Figuras

Figura 1. Pieza CAD y pieza preparada para fabricación aditiva (FA) .....	6
Figura 2. Esquema de la metodología del proyecto .....	8
Figura 3. Parámetros de la primera expresión del modelo de Ahn [3] .....	11
Figura 4. Parámetros de la tercera expresión del modelo de Ahn [3] .....	12
Figura 5. Impresora FDM Witbox2 de BQ.....	14
Figura 6. Impresora Objet Eden 350 V de Stratasys .....	15
Figura 7. Impresora de SLS Lisa Pro de Sinterit .....	15
Figura 8. Microscopio Alicona .....	16
Figura 9. Funcionamiento de variación de foco .....	16
Figura 10. Profundidad mínima de trabajo Alicona.....	17
Figura 11. Rugosímetro Mitutoyo SJ-201 .....	18
Figura 12. Efecto de escalonamiento (ángulo mayor de 45°) .....	19
Figura 13. Efecto de escalonamiento (ángulo menor de 45°) .....	19
Figura 14. Ejemplo de escalón con ángulo de 45° .....	20
Figura 15. Comparación de los resultados del cálculo teórico general.....	22
Figura 16. Efecto de escalonamiento con curvatura de los filamentos (ángulo mayor de 45°) .....	23
Figura 17. Efecto de escalonamiento con curvatura de los filamentos (ángulo menor de 45°) .....	23
Figura 18. Superficies A, B y C .....	23
Figura 19. Comparación entre cálculos teóricos .....	25
Figura 20. Pieza de forma sinusoidal .....	26
Figura 21. Perfil de patrón triangular .....	26
Figura 22. Detalle de sección del patrón triangular .....	27
Figura 23. Alzado y planta de la pieza de 4 superficies .....	30
Figura 24. Medidas de la pieza 45°-75° .....	30
Figura 25. Medidas de la pieza 30°-60° .....	31
Figura 26. Medidas de la pieza con forma sinusoidal.....	31
Figura 27. Medidas de la pieza de patrón triangular.....	31
Figura 28. Medidas de la pieza esférica.....	32
Figura 29. Detalle del escalonado .....	32
Figura 30. Medidas de la pieza 30°-60° de Polyjet y 96 μm .....	33
Figura 31. Medidas de la pieza 30°-60° de Polyjet y 192 μm .....	33
Figura 32. Medidas de la pieza 45°-75° de Polyjet y 96 μm .....	33
Figura 33. Medidas de la pieza 45°-75° de Polyjet y 192 μm .....	34
Figura 34. Conjunto de piezas FDM.....	34
Figura 35. Conjunto de piezas SLS .....	35
Figura 36. Conjunto de piezas Polyjet .....	35
Figura 37. Tabla 1 de longitudes de muestreo de rugosidad para la medida de Ra, para perfiles no periódicos [16] .....	36
Figura 38. Tabla 2 de longitudes de muestreo de rugosidad para la medida de Rz y Rz1max, para perfiles no periódicos [16].....	36
Figura 39. Tabla 3 de longitudes de muestreo de rugosidad para la medida de Rsm, para perfiles periódicos [16] .....	37



Figura 40. Regresión lineal de los datos experimentales obtenidos con el microscopio (FDM).....	38
Figura 41. Gráficas de comparación de los resultados teóricos de Ra ( $\mu\text{m}$ ) con los experimentales: a) Espesor de capa de 0,2 mm. b) Espesor de capa de 0,15 mm. c) Espesor de capa de 0,1 mm. d) Comparación de las desviaciones teórico/experimental en los distintos espesores de capa. ....	39
Figura 42. Ejemplo de comparación de valores teóricos y experimentales de distintas LC .....	41
Figura 43. Perfil de rugosidad para Lc de 8000 $\mu\text{m}$ .....	42
Figura 44. Perfil de rugosidad para Lc de 2500 $\mu\text{m}$ .....	42
Figura 45. Perfil de rugosidad para Lc de 800 $\mu\text{m}$ .....	43
Figura 46. Perfil de rugosidad para Lc de 250 $\mu\text{m}$ .....	43
Figura 47. Perfil de rugosidad para Lc de 80 $\mu\text{m}$ .....	43
Figura 48. Piezas fabricadas con la impresora Ultimaker S5 .....	43
Figura 49. Comparación visual de pieza fabricada con Ultimaker y la fabricada con la impresora BQ .....	44
Figura 50. Comparación de resultados de ambas impresoras .....	45
Figura 51. Regresión lineal de los datos experimentales obtenidos con el microscopio (SLS) .....	46
Figura 52. Ejemplo de comparación de los datos teóricos y los experimentales Polyjet (0,2 mm de espesor de capa) .....	46
Figura 53. Superficie de 30° y 0,2 mm de espesor de capa tras la primera limpieza con aire a presión .....	47
Figura 54. Superficie de 30° y 0,2 mm de espesor de capa tras la limpieza con abrasivo .....	48
Figura 55. Regresión lineal de los datos experimentales obtenidos con el microscopio (Polyjet) .....	49
Figura 56. Detalle de la superficie de la pieza creada con Polyjet (60° y 192 $\mu\text{m}$ ).....	50
Figura 57. Comparación de los resultados de los dos equipos de medición (Lc según tabla 1) .....	52
Figura 58. Comparación de los resultados de los dos equipos de medición (Lc según tabla 3) .....	52
Figura 59. Comparación de los resultados de los dos equipos de medición(SLS).....	53
Figura 60. Comparación de los resultados de los dos equipos de medición (Polyjet) .....	54
Figura 61. Comparación de resultados de piezas esféricas.....	55
Figura 62. Comparación de resultados de piezas de patrón triangular .....	55
Figura 63. Comparación de resultados de piezas de forma senoidal.....	56
Figura 64. Curva de Abbot-Firestone para FDM (45° y 0,2 mm de espesor de capa) .....	57
Figura 65. Curva de Abbot-Firestone para SLS antes de la limpieza (45° y 0,2 mm de espesor de capa).....	57
Figura 66. Curva de Abbot-Firestone para SLS después de la limpieza (45° y 0,2 mm de espesor de capa) ....	58
Figura 67. Curva de Abbot-Firestone para Polyjet (45° y 0,2 mm de espesor de capa).....	58

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Fabricación aditiva

Se define la Fabricación Aditiva (FA) como “concepto de producción a través del cual el material es depositado capa a capa de manera controlada allí donde es necesario” [1].

Esta técnica se basa en diseños 3D creados por ordenador (CAD), cuya fabricación se lleva a cabo transformando dicho diseño en una pieza creada por la adición de numerosas capas, de un grosor que es escogido en los parámetros de impresión. Este acoplamiento entre capas creará una rugosidad en la superficie de la pieza como se puede apreciar en la Figura 1.

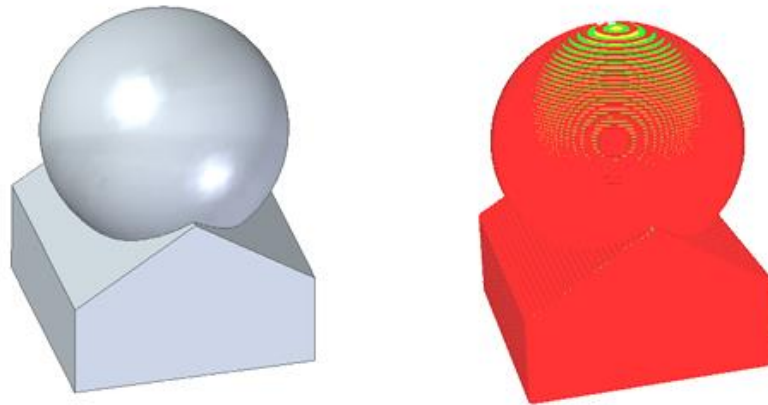


Figura 1. Pieza CAD y pieza preparada para fabricación aditiva (FA)

Dentro de la fabricación aditiva existen diferentes tipos de tecnologías. La elección de uso de un tipo u otro depende de diversos factores, de los acabados que se requieran en la pieza que se va a fabricar y del material elegido. En el **Anexo 1** se recogen las distintas tecnologías de fabricación aditiva. Algunas de las principales y que van a ser tratadas en este trabajo son:

- Modelado por deposición fundida o Fused Deposition Modelling (FDM).
- Sinterización selectiva por láser o Selective Laser Sintering (SLS).
- Material Jetting (Polyjet).

La FA está experimentando un auge destacado en los últimos años gracias a las numerosas ventajas que ofrece [2]. Si se compara con técnicas tradicionales, se comprueba que con esta tecnología se reducen mucho los tiempos de producción y se eliminan las limitaciones de diseño convencionales, ya que se puede conseguir mayor complejidad estructural en el producto y personalización. Además, la sostenibilidad es un punto a favor de este proceso, dado que no se generan desechos porque se utiliza únicamente el material necesario para la fabricación de la pieza. Otra ventaja igualmente importante es la flexibilidad, puesto que es posible realizar series cortas de producción como en el prototipado rápido, donde, además, se puede observar una elevada reducción de costes ya que se disminuye la cantidad de material necesario en la producción.

Por otro lado, también se pueden encontrar algunas desventajas [2]. La mayoría de las piezas impresas en 3D necesitan algún tipo de técnica de postprocesado para lograr el acabado superficial requerido.

Aunque el acabado superficial ha mejorado mucho en la última década, en algunos tipos de tecnología aditiva se observa un efecto de escalonado producido por el propio proceso de deposición capa a capa del material, que es inherente a este tipo de construcción y que le confiere rugosidad superficial. Otra desventaja viene dada por el tamaño de la máquina, que limita las dimensiones de la pieza a construir. Además, no está indicada para la producción de grandes volúmenes, ya que el coste por unidad no disminuye en la mayoría de los casos.

La FA actualmente se utiliza en numerosas aplicaciones [1], como en el sector de la salud, donde se utiliza para la elaboración de implantes, instrumentos quirúrgicos, piezas ortopédicas... Otro sector en el que la FA se encuentra en auge se trata del aeroespacial, esta aplicación destaca por la creación de prototipos funcionales e incluso piezas finales que mejoran la aerodinámica de los aviones. Además, en el ámbito industrial también se extiende el uso de la FA, sobre todo en el sector de la automoción, en la industria textil, electrónica y creación de muebles entre otros.

## 1.2 Justificación del proyecto

La fabricación aditiva actualmente es una de las tecnologías de fabricación de mayor crecimiento y que presenta importantes ventajas respecto a otros procesos convencionales, como la capacidad de generar formas libres, superficies complejas e incluso cavidades internas en las piezas.

Es por ello que cada vez hay más empresas que optan por incorporar esta tecnología a sus procesos productivos, pero a pesar de sus ventajas, podemos encontrar algunos inconvenientes; todavía se encuentra en desarrollo y debe afrontar algunos retos. Uno de ellos es la falta de calidad superficial de las piezas que se realizan con ciertas tecnologías de impresión 3D [3]. El propio proceso de fabricación conlleva de forma inherente una rugosidad creada por el llamado “efecto escalera”, ya que el método de fabricación capa por capa (layer by layer) produce un escalonado en la superficie de la pieza. Además, podemos encontrar porosidades y otros daños microestructurales difíciles de detectar que pueden llegar a generar fallos. Así pues, se puede incrementar el coste de fabricación, ya que dependiendo de la tecnología utilizada, pueden ser necesarios procesos posteriores de mejora del acabado superficial y un mayor número de procesos de control de calidad.

Aunque se están realizando investigaciones para poder controlar las variables que influyen en estos defectos, hoy en día es muy difícil poder asegurar la repetibilidad de una pieza, ya que incluso dos piezas fabricadas en una misma máquina de fabricación aditiva pueden presentar distintas características, debido a la falta de estabilidad en el proceso.

A causa del aumento del control de calidad, se están desarrollando técnicas de control metrológico, como la tomografía computarizada (TC), que consiste en la reconstrucción 3D del volumen de la pieza mediante un conjunto de radiografías 2D en rayos X, tomadas al rotar la pieza cada determinado número de grados. Esta tecnología presenta grandes ventajas respecto a otras técnicas convencionales, gracias a la posibilidad de realizar mediciones internas y externas de forma simultánea y sin contacto, siendo capaz incluso de caracterizar la porosidad del material. La FA y la TC son tecnologías directamente relacionadas, ya que la FA obtiene una gran libertad de fabricación y se verá favorecida por la capacidad de medición de la TC, por lo tanto se beneficiarán mutuamente de su desarrollo. Es por ello, que el

estudio a realizar en el presente trabajo, se engloba en el proyecto de realizar patrones para la calibración de máquinas de TC, ya que estos patrones se utilizan debido a la falta de normativa específica para calibrar estas máquinas.

Actualmente, existen patrones realizados para el análisis dimensional de piezas creadas por fabricación aditiva, por ejemplo, el patrón “CT Tetrahedron” [4], fabricado por la Universidad de Padua en Italia, para verificar los diámetros y longitud que separan las esferas de dicho diseño. Otro ejemplo que se puede encontrar, es el “Dog Bone” [4], fabricado en la Universidad de Dinamarca para la medición de espesores y longitudes. La mayoría de los patrones que se desarrollan hoy en día, están centrados en el análisis dimensional de las piezas creadas con fabricación aditiva y existen pocos patrones creados para el estudio de la calidad superficial, además, la mayoría de ellos no están diseñados para la investigación de piezas poliméricas.

Por todo ello, surge la necesidad de realizar un estudio de la calidad superficial en piezas creadas con distintas tecnologías de fabricación aditiva, para poder analizar su reproducibilidad y, además, realizar comparaciones entre ellas.

### 1.3 Objetivo y alcance

Gracias a la necesidad descrita en el apartado anterior, se puede determinar el objetivo y el alcance del presente trabajo.

El objetivo general consiste en diseñar y construir patrones de rugosidad de diferente magnitud, mediante diferentes técnicas de fabricación aditiva (FA) para polímeros. Para realizar el estudio se aprovechará el efecto de escalonado generado por el propio proceso de fabricación. Se analiza experimentalmente la reproducibilidad y calidad superficial de los patrones fabricados mediante instrumentos metrológicos.



Figura 2. Esquema de la metodología del proyecto

Como se puede ver en el esquema anterior, la metodología general para llevar a cabo este trabajo comienza con un análisis del estado del arte, después, se elabora un estudio para estimar la rugosidad teórica, lo que condiciona la fabricación y el diseño de algunas características de las piezas. Una vez finalizado el estudio teórico, se realiza el diseño de una serie de piezas patrón con distintas geometrías mediante el uso del software CAD Solid Edge, se fabrican en diferentes tecnologías y se efectúan las medidas experimentales para el posterior análisis de las rugosidades, además, se comparan los datos obtenidos con las distintas tecnologías de fabricación. Finalmente, se extraen conclusiones a partir de los resultados obtenidos.

Las tres técnicas de FA que se estudian son FDM, Polyjet y SLS. Estas tecnologías están basadas en principios diferentes, como se puede ver en el **Anexo 1**, lo que se traduce en distinta calidad en los

acabados superficiales, y permite realizar una comparación entre las distintas tecnologías de FA utilizadas.

El proyecto es de carácter experimental, se realiza en el laboratorio de metrología del departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

En dicho laboratorio se llevan a cabo las mediciones pertinentes con el microscopio de variación focal y con un rugosímetro. Además, las piezas son fabricadas en las impresoras disponibles en dicho departamento.

Con toda la información adquirida, se generan conclusiones para el estudio de superficies en piezas de FA. Además, como se ha explicado en el apartado anterior, este trabajo también beneficia al ámbito de estudio de la rugosidad en la tomografía computarizada, ya que los datos del estudio realizado pueden servir de base para posteriores estudios de la TC.

## 2. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se exponen diferentes investigaciones que se han revisado para sentar las bases del presente trabajo.

### 2.1 Patrones actuales para el análisis de la superficie

Se ha realizado un estudio sobre patrones diseñados para el análisis de la calidad superficial. En concreto, estos patrones están contruidos en la Universidad de Huddersfield [5], y están diseñados para el análisis de piezas realizadas con fabricación aditiva de metales. Este apartado resume el estudio desarrollado en el **Anexo 2**, en el que se explica la forma y propósito de estos artefactos de medición.

Los patrones están realizados en una aleación de titanio (Ti6Al4V) y los aspectos más relevantes se muestran en la Tabla 1 [5], donde también se explican las superficies de las que están compuestos.




APLICACIÓN	SUPERFICIES	FUNCIÓN
<b>AMSA 1</b> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Plana y paralela a la base</li> <li>2. Plano de gradiente 1:25</li> <li>3. Diez cilindros de diámetro 2,5 mm y de diferentes alturas</li> </ol>	<p>Medición de la superficie y caracterización del perfil</p> <p>Permitir el estudio del borde de transición de la capa de construcción</p> <p>Estudiar diferencias de altura en relación con el espesor de capa</p>
<b>AMSA 3</b> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ranuras en forma de estrella</li> <li>2. Cuña con anillos concéntricos</li> </ol>	<p>Evaluación y corrección de errores sistemáticos</p> <p>Ayuda en la ubicación visual del límite de resolución</p>
<b>AMSA 4</b> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Estructura sinusoid de longitud decreciente con amplitud constante de 800 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>2. Estructura sinusoid de longitud decreciente con amplitud constante de 400 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>3. Estructura sinusoid de longitud decreciente con amplitud constante de 200 <math>\mu\text{m}</math></li> </ol>	<p>Dar una indicación visual del límite de resolución y estudio de la desviación de construcción</p>

Tabla 1. Características de los patrones AMSA

### 2.2 Predicción de la rugosidad para superficies producidas por FDM

Para realizar un análisis sobre modelos matemáticos de predicción de la rugosidad, se estudia el artículo "Roughness prediction for FDM produced surfaces" [3], que aparece más desarrollado en el **Anexo 2**. En este estudio se exponen dos modelos, el de Pandey y el de Ahn, los cuales están basados en el cálculo de la rugosidad teniendo en cuenta la forma de las capas depositadas de la tecnología de fabricación de FDM, y además, también se tiene en cuenta el ángulo de construcción, el cual, es el ángulo con el que se construyen las superficies capa a capa respecto de la horizontal.

El modelo de Pandey se basa en tres puntos principales:

- Las dos variables más significativas son el grosor de capa y la orientación de la construcción.
- Los perfiles de la superficie de una pieza fabricada con FDM se aproximan a una parábola.
- El efecto del radio de curvatura, debido a la forma redondeada del perfil de los bordes del filamento, puede considerarse independiente de la rugosidad.

En la Tabla 2 [3] se muestran las ecuaciones de predicción de la rugosidad para distintos rangos de ángulos de construcción, donde  $\theta$  es el ángulo de construcción ( $^{\circ}$ ) y  $t$  es el espesor de la capa depositada (mm). Además,  $\omega$  es un parámetro de ajuste adimensional y se elige 0,2 para los sistemas FDM.

APLICACIÓN	FÓRMULAS
General	$Ra(\mu\text{m}) = (71 - 93) \frac{t(\text{mm})}{\cos\theta}$ (1)
$\theta$ entre $70^{\circ}$ y $90^{\circ}$	$Ra(\mu\text{m}) = \frac{1}{20} (90Ra(70^{\circ}) - 70Ra(90^{\circ}) + \theta(Ra(90^{\circ}) - Ra(70^{\circ})))$ (2) $70^{\circ} \leq \theta < 90^{\circ}$
$\theta=90^{\circ}$ ( Superficie horizontal)	$Ra(\mu\text{m}) = 112.5 * t(\text{mm})$ (3) $\theta = 90^{\circ}$
$\theta$ entre $90^{\circ}$ y $180^{\circ}$	$Ra(\mu\text{m}) = Ra(\theta - 90)(1 + \omega)$ (4) $90^{\circ} < \theta \leq 180^{\circ}$

Tabla 2. Expresiones del modelo de Pandey [3]

Se estudian tres expresiones del modelo de Ahn. La primera se basa en el efecto de escalonamiento. La rugosidad varía según los ángulos de construcción en un rango de hasta  $180^{\circ}$ , y sus parámetros corresponden a los observados en la Figura 3. La segunda expresión, además, tiene en cuenta los ángulos de las superficies anterior y posterior. Por último, la tercera tiene presente el redondeo que se forma en las capas del escalonado como se puede ver en la Figura 4.

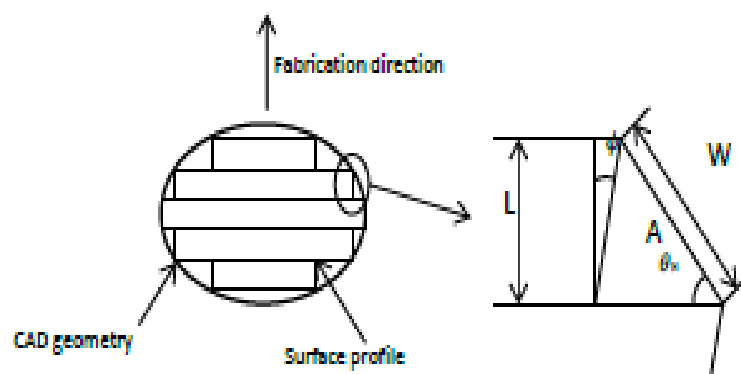


Figura 3. Parámetros de la primera expresión del modelo de Ahn [3]

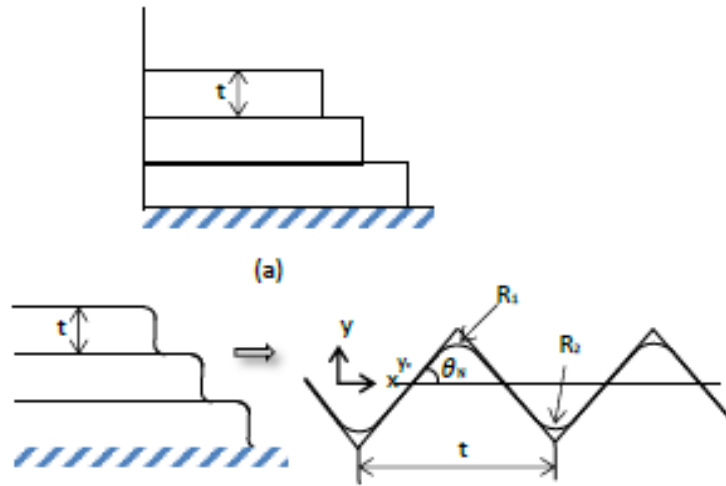


Figura 4. Parámetros de la tercera expresión del modelo de Ahn [3]

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las 3 principales expresiones del modelo matemático de Ahn para la predicción de la rugosidad.

1ª EXPRESIÓN	
$Ra = \frac{A}{W} = \frac{1000t}{2} \left  \frac{\cos((90-\theta)-\phi)}{\cos\phi} \right  \quad (5)$ $0^\circ < \theta \leq 180^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\phi</math> es el ángulo del perfil de la superficie en grados</li> <li>- A es el área del escalón</li> <li>- W es el ancho del escalón</li> </ul>
2ª EXPRESIÓN	
$R(\theta) = R(\theta_p) + \frac{R(\theta_n) - R(\theta_p)}{\theta_n - \theta_p} (\theta - \theta_p) \quad (6)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\theta_p</math> ángulo de la superficie anterior</li> <li>- <math>\theta_n</math> ángulo de la superficie siguiente</li> <li>- <math>R(\theta_p)</math> valores de rugosidad medidos en <math>\theta_p</math></li> <li>- <math>R(\theta_n)</math> valores de rugosidad medidos en <math>\theta_n</math></li> </ul>
3ª EXPRESIÓN	
$Ra = \frac{1000t}{4} \cos(90 - \theta) - \frac{\left(R\frac{2}{1} + R\frac{2}{2}\right) \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \sin(90 - \theta)}{1000t}$ $+ \frac{\left(R\frac{2}{1} + R\frac{2}{2}\right) \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)^2}{(1000t)^3} \tan(90 - \theta) \sin(90 - \theta)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- R1 es el radio de empalme (mm)</li> <li>- R2 es el radio de esquina (mm)</li> </ul>

Tabla 3. Expresiones del modelo de Ahn [3]



## 2.3 Marcos de diseño para fabricación aditiva

El presente apartado muestra un resumen del **Anexo 2**, en el que se desarrolla el estado del arte, donde se estudian las consideraciones necesarias para realizar el diseño de piezas y su posterior reproducción en tecnologías de fabricación aditiva [6].

Características geométricas	
Partes sobresalientes	Es deseable que la pieza sólo tenga características geométricas autoportantes. Se aconseja no superar los ángulos de pendiente máximos.
Voladizos	Reemplazar los voladizos horizontales por voladizos en ángulo.
Voladizos en ángulo	Dependiendo de la tecnología utilizada (como extrusión), no se pueden crear ángulos extremos ya que el material no se puede depositar.
El puente	Se debe tener en cuenta la longitud máxima que puede salvar la máquina.
Agujeros y canales	Hay que tener en cuenta la longitud de los agujeros diseñados y el espesor mínimo de pared que podrá variar según el proceso FA.
Paredes delgadas	Para la planificación de las paredes hay que tener en cuenta el espesor permitido, ya que por debajo del mismo no se podrá formar dicha pared o sufrirá deformaciones.
Características pequeñas	Para que no se generen problemas, se define un diámetro mínimo que debe ser considerado en las fases de diseño.
Parámetros del proceso	
Grosor de la capa	Afecta a la calidad de la impresión y al tiempo de construcción. A menor espesor de capa se minimiza el efecto escalera y se produce una pieza más detallada, también se pueden eliminar posibles huecos. Con capas más gruesas se reduce el tiempo de impresión, pero se consigue menos detalle.
Orientación de la construcción	Determina qué características geométricas sobresalen de las geometrías, el volumen de estructuras de soporte necesarias y establece el eje en el que las propiedades mecánicas muestran un comportamiento anisotrópico, es decir, que sus características varían dependiendo de la dirección en el espacio.
Consideraciones de diseño	
Propiedades mecánicas anisotrópicas	Orientar la pieza diseñada de tal forma que las cargas se reciban en la dirección que la tecnología FA tiene mayor resistencia mecánica. Optimizar la forma de la pieza teniendo en cuenta la anisotropía de resistencia mecánica.
Precisión (plano XY vs Z)	La precisión de la propia máquina utilizada en el plano XY y el eje Z ha de tenerse en cuenta en la fase de diseño.
Rugosidad superficial	Determina la calidad superficial de la pieza y los procesos posteriores para lograr la calidad requerida. Puede darse falta de uniformidad por los huecos resultantes de un llenado insuficiente.
Tiempo de construcción	Las velocidades en el plano XY son mayores a las del eje Z. Por lo que cambiar la orientación afectará al tiempo total. Las piezas orientadas horizontalmente se imprimirán más rápido que las orientadas verticalmente.

Área de sección transversal de la pieza	El área normal al vector de construcción afecta al proceso de fabricación de dos formas, el primero se relaciona con la base de construcción de la máquina y el segundo está relacionado con las tensiones que se desarrollan en el resto de volumen al fabricar las nuevas capas. Las primeras capas de la construcción son cruciales. La pieza debe estar sujeta en la placa de construcción. Se debe tener en cuenta la adherencia entre la superficie base de la pieza y la placa de la máquina.
---	--

Tabla 4. Consideraciones del marco de diseño [6]

## 2.4 Equipos de impresión y medida

En este apartado se exponen los diferentes equipos utilizados para la realización del proyecto. Conocer información acerca de ellos es muy importante para el desarrollo del trabajo, ya que los diseños están condicionados por algunas de sus características. Esta información se amplía en el **Anexo 3**.

Se realiza la fabricación de las piezas en tres equipos distintos:

- **FDM [7]**

La primera impresora utilizada es Witbox2 de la marca BQ (Figura 5). Las características técnicas de la impresora y el material utilizado se muestran en el **Anexo 3**.



Figura 5. Impresora FDM Witbox2 de BQ

- **Polyjet [8]**

Para esta tecnología se utiliza la impresora Objet Eden 350V realizada por la empresa Stratasys (Figura 6). Las características técnicas más destacadas de la impresora y del material (Polipropileno simulado Rigur™) vienen detalladas en el **Anexo 3**.

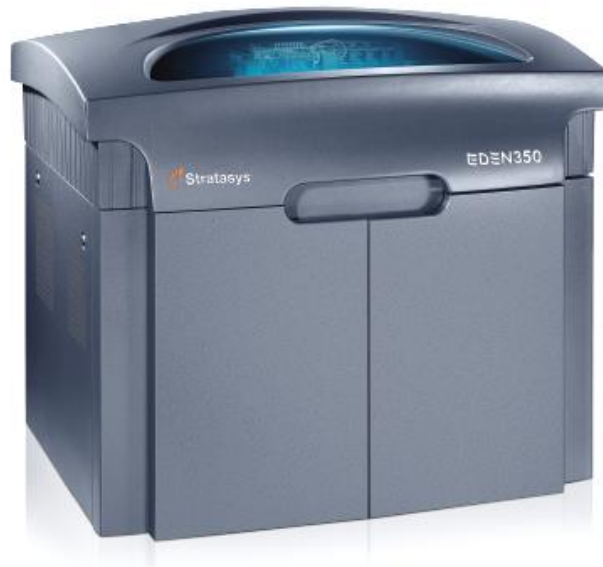


Figura 6. Impresora Objet Eden 350 V de Stratasys

- SLS [9]

El modelo de la última impresora utilizada es Lisa Pro, llevada a efecto por la empresa Sinterit (Figura 7). El material usado para esta impresión es PA12 Smooth, que se trata de Nylon 12, y todas las características técnicas se pueden revisar al dirigirse al **Anexo 3**.



Figura 7. Impresora de SLS Lisa Pro de Sinterit

Las mediciones se realizan con dos equipos distintos:

- **Microscopio de variación focal de ALICONA [10] [11]**

Considerado el principal equipo para realizar las mediciones de rugosidad, en concreto el microscopio que se utiliza es Alicona InfiniteFocusSL (Figura 8) y sus principales características se pueden ver en el **Anexo 4**.



Figura 8. Microscopio Alicona

Se trata de un microscopio de variación focal, que consiste en realizar un movimiento relativo de la muestra con respecto al fotodetector en el eje Z de medida, para poder capturar imágenes enfocadas en cada una de las distintas posiciones. En la Figura 9 se muestra un ejemplo del principio de funcionamiento de variación de foco. En primer lugar, el microscopio enfoca la parte más alta de la pirámide y obtiene una imagen; en segundo lugar, cambia su posición y consigue enfocar una parte más baja, y en último lugar consigue enfocar la base de la pirámide.

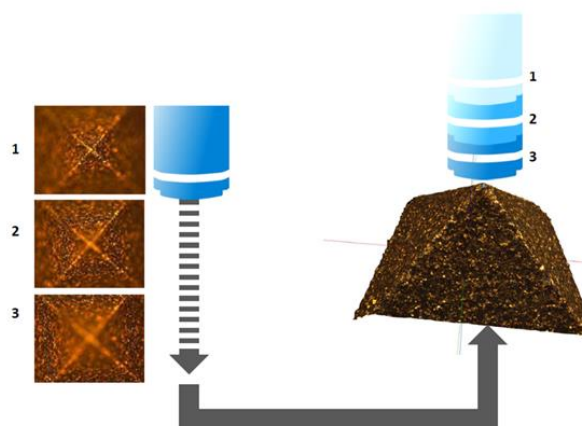


Figura 9. Funcionamiento de variación de foco

Destaca una restricción que impone la medición con el microscopio Alicona, ya que hay que respetar una distancia mínima entre el objeto a medir y la lente. Esta profundidad mínima de trabajo es de 17,5 mm para la lente de aumento x10, como se puede observar en la Figura 10.

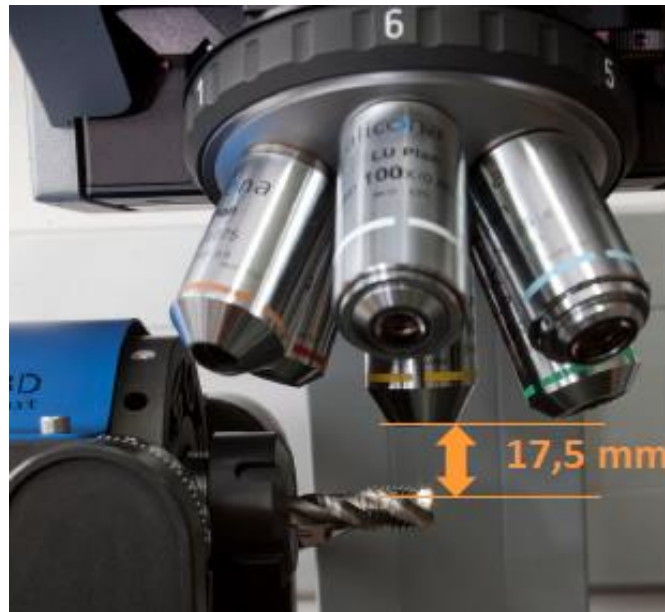


Figura 10. Profundidad mínima de trabajo Alicona

En la Tabla 5 se expone un resumen de las características de trabajo con Alicona para la lente usada de ampliación x10:

Distancia de trabajo	17,5 mm
Área de enfoque	2 (mm) x 2 (mm)
Resolución vertical	< 100 (nm)
Resolución lateral	~ 3 (μm)
Altura de escaneo	< 22 (mm)
Área máxima de medida	50 (mm) x 50 (mm)
Rugosidad mínima de medida (Ra)	0,3 μm

Tabla 5. Tabla resumen características del microscopio de Alicona

- **RUGOSÍMETRO [12]**

Otro equipo de medida que se utiliza es el rugosímetro táctil, y sus principales características vienen detalladas en el **Anexo 4**.



**Figura 11. Rugosímetro Mitutoyo SJ-201**

El equipo del que se dispone en el departamento es el rugosímetro “Mitutoyo SJ-201”, cuyas especificaciones y guía de funcionamiento se ven detalladas en [13].

### 3. CÁLCULO TEÓRICO

En este apartado se pretende obtener un modelo teórico para conseguir unos resultados de partida, con los que poder definir el diseño. Se tiene en cuenta el estudio en la sección anterior y en el **Anexo 2** del estado del arte, donde se analizan algunos modelos de predicción teórica de la rugosidad en la fabricación aditiva.

#### 3.1 Efecto de escalonamiento

Como se puede ver en el **Anexo 1**, la fabricación aditiva FDM consiste en la extrusión de un filamento (polimérico en este caso), que va formando las piezas capa a capa. Por otra parte, la tecnología POLYJET permite la construcción de piezas mediante una deposición de capas, que son polimerizadas con la aplicación posterior de luz ultravioleta (UV). De la misma manera, la tecnología SLS es un método cuyo principio de funcionamiento se basa en la sinterización de capas de polvo mediante un láser. Las tres tecnologías coinciden en la forma de construir las piezas capa sobre capa, que trae consigo una problemática en lo que a calidad superficial se refiere, ya que se genera una rugosidad inherente a este proceso llamada efecto de escalonamiento (Figura 12).

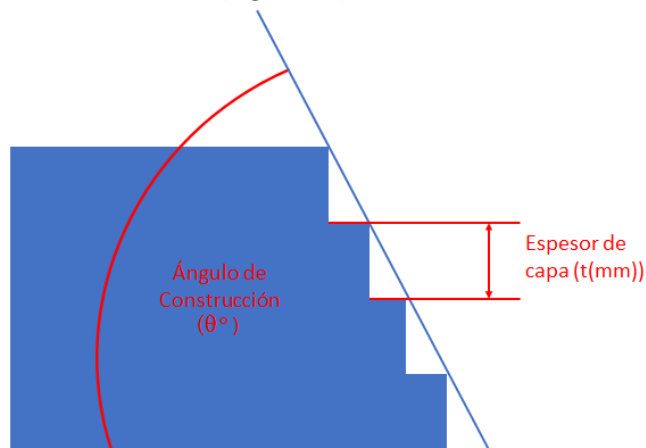


Figura 12. Efecto de escalonamiento (ángulo mayor de  $45^\circ$ )

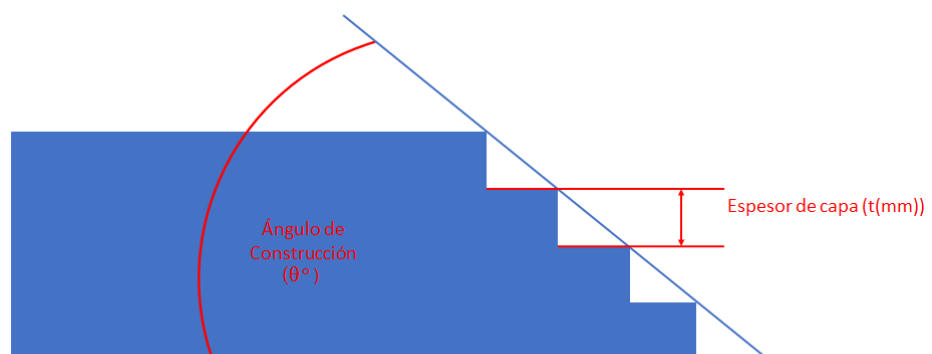


Figura 13. Efecto de escalonamiento (ángulo menor de  $45^\circ$ )

En las Figuras 12 y 13 se muestra el ángulo de construcción ( $\theta$ ), el cual está definido por ser el ángulo que tiene la superficie a caracterizar respecto del plano horizontal de construcción. En dicha figura,

también se observa el espesor de capa ( $t$ ), que es el espesor de capa que la impresora puede aplicar a las capas que deposita.

Se puede observar que la rugosidad propia de este efecto varía con el ángulo de construcción con el que está fabricada la superficie a medir respecto del plano horizontal, ya que el escalonado cambiará de forma. Se advierte que la rugosidad se incrementa cuando el ángulo de la superficie es menor. Esto se puede explicar ya que el espesor de capa se trata de un parámetro constante que se define en el proceso de fabricación y, al disminuir el ángulo, el escalonado se vuelve más ancho (Figura 13).

### 3.2 Elección del parámetro de rugosidad

A la hora de realizar un estudio del cálculo teórico, en primer lugar, se debe elegir el parámetro de rugosidad que se va a calcular, para ello, algunos de los más importantes se han definido en el **Anexo 5**. Según la normativa ISO 5436 [14], se define el estándar de medición de rugosidad para superficies tipo D1, que se trata de perfiles irregulares unidireccionales, en el que se indica que este estándar de medición, está caracterizado por los parámetros de rugosidad  $R_a$  y  $R_z$ . Además,  $R_a$  es uno de los parámetros más utilizados porque proporciona resultados estables, ya que no se ve alterado significativamente por datos debidos a daños en la superficie o por el ruido en las mediciones. Por todo ello, se elige  $R_a$  para definir el cálculo.

### 3.3 Cálculo teórico general

La primera aproximación del cálculo teórico de  $R_a$  que se realiza, está basada en este efecto de escalonado explicado en el apartado 3.1, ya que este efecto, es inherente a la fabricación aditiva y siempre se encuentra en este modelo de piezas. Además, actualmente existen varias aproximaciones para predecir la rugosidad obtenida en este tipo de procesos y también tienen en cuenta el efecto de escalonado como se puede consultar en el **Anexo 2**.

Para realizar esta primera aproximación de cálculo, y que sea compatible con las tres tecnologías que se estudian, se ha de tener en consideración que se desprecia la curvatura del filamento en el caso de la tecnología FDM, y también se desestima el hueco que quedaría entre capa y capa, por lo que se entiende la superficie como una escalera recta y con escalones iguales entre sí, como se puede apreciar en la Figura 12. Gracias a estas hipótesis, las formas geométricas a calcular quedarán simplificadas como triángulos (Figura 14).

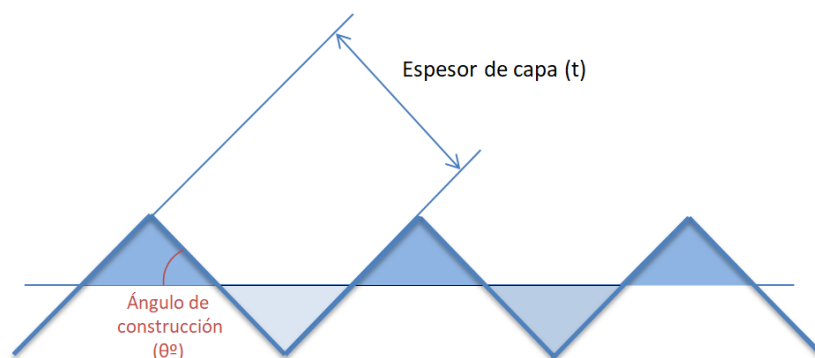


Figura 14. Ejemplo de escalón con ángulo de  $45^\circ$



Ra es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

Para realizar el cálculo de Ra, se suma el área de todas las superficies desviadas del perfil y se divide entre la longitud de medición, que, en este caso, son las áreas de las geometrías triangulares sombreadas en azules (Figura 14).

Para definir el escalonado se proponen varios ángulos de construcción, desde 15° a 75° y también se proponen varios espesores de capa, para las tecnologías de FDM y SLS, de 0,1 mm a 0,2 mm y 16 μm, 96 μm y 192 μm para la tecnología Polyjet.

- **Resultados teóricos.**

En la Tabla 6 se exponen los resultados de Ra (μm) obtenidos con este primer cálculo general, para un rango de espesor de capa entre 0,2 mm y 0,016 mm y para ángulos de 15°, 30°, 45°, 60° y 75°.

Los espesores de capa de 0,1 mm y 0,2 mm corresponden a los utilizados en la tecnología SLS. Para FDM además de los anteriores, se calcula la rugosidad obtenida con 0,15 mm. El espesor de capa de 0,016 mm (16 μm) corresponde al espesor de la tecnología Polyjet, que resulta notablemente menor que los espesores de FDM y SLS, lo que proporciona una calidad superficial excelente. No obstante, para acercarse a los espesores de capa de las otras tecnologías de fabricación y poder realizar la comparación entre ellas, se realizan los cálculos para 0,096 mm (96 μm), lo que es equivalente a 6 capas de 16 μm y también para 0,192 mm (192 μm), que son 12 capas.

Espesor de capa (mm)	Θ=15°	Θ=30°	Θ=45°	Θ=60°	Θ=75°
0,016	3,86 μm	3,464 μm	2,82 μm	2,00 μm	1,03 μm
0,096	23,18 μm	20,784 μm	16,97 μm	12,00 μm	6,21 μm
0,1	24,14 μm	21,65 μm	17,67 μm	12,50 μm	6,47 μm
0,15	36,22 μm	32,47 μm	26,51 μm	18,75 μm	9,70 μm
0,192	46,364 μm	41,56 μm	33,44 μm	24,00 μm	12,42 μm
0,2	48,29 μm	43,30 μm	35,35 μm	25,00 μm	12,94 μm

Tabla 6. Resultados de rugosidad del cálculo teórico general

En la siguiente gráfica, se representan de forma visual los datos obtenidos en la Tabla 6:

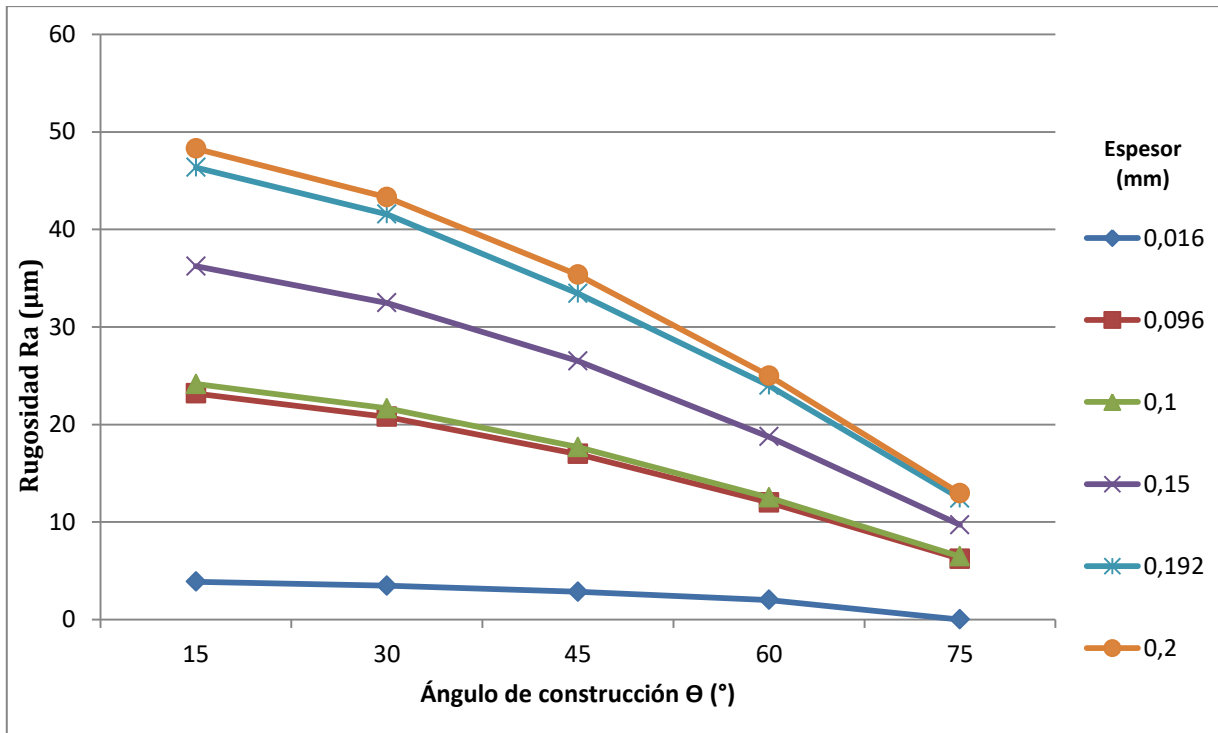


Figura 15. Comparación de los resultados del cálculo teórico general

En la gráfica anterior se comparan todos los espesores de capa utilizados con las distintas tecnologías. Para las piezas de Polyjet de 0,192 mm y 0,096 mm, se observan unos valores de rugosidad muy cercanos a los valores obtenidos con 0,2 mm y 0,1 mm, ya que las piezas se diseñan específicamente para comparar los resultados. En la gráfica también se nota que los resultados obtenidos para cada espesor en la superficie de 15°, se distancian más entre sí que los ángulos mayores, esto se debe al efecto de escalonamiento, ya que el factor del espesor de capa es constante, lo que hace que el escalón se vuelva más prolongado para ángulos más pequeños, y esto, afecta más a la rugosidad Ra ( $\mu\text{m}$ ) cuanto menor es el ángulo. Además, como era esperable, se aprecia de forma general y en todas las piezas, una rugosidad mayor cuanto mayor es el espesor y una rugosidad menor cuanto mayor es el ángulo.

### 3.4 Cálculo optimizado para FDM

Para la tecnología FDM se realiza un segundo cálculo teórico con el que se pretende optimizar los datos obtenidos en el caso anterior, consiguiendo así, unos resultados más fiables y próximos a la realidad. En este caso la superficie a caracterizar es más similar a la deposición del filamento de FDM de la Figura 16 y la Figura 17.

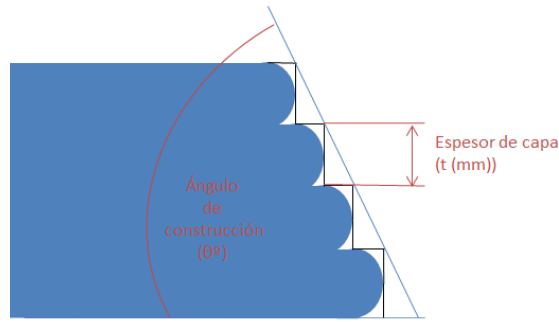


Figura 16. Efecto de escalonamiento con curvatura de los filamentos (ángulo mayor de  $45^\circ$ )

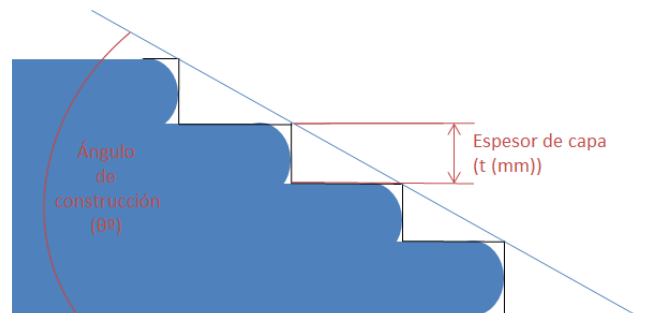


Figura 17. Efecto de escalonamiento con curvatura de los filamentos (ángulo menor de  $45^\circ$ )

Para realizar esta aproximación, el cálculo se basa en las medidas obtenidas de las áreas definidas en un modelo geométrico que intenta imitar la deposición del filamento en FDM y se realiza gracias al software de Solidworks. La explicación de este proceso se recoge en el **Anexo 6**. Este procedimiento se definió en un estudio realizado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Barcelona [15] y en él, se plantean dos suposiciones principales: se tiene en cuenta la forma redondeada del filamento al ser depositado en capas, y que no hay superposición entre ellas.

El principio del cálculo se basa en dibujar lo más próximo a la realidad dos de los filamentos contiguos (uno encima del otro), para cada ángulo de construcción. Para ello se genera el siguiente croquis.

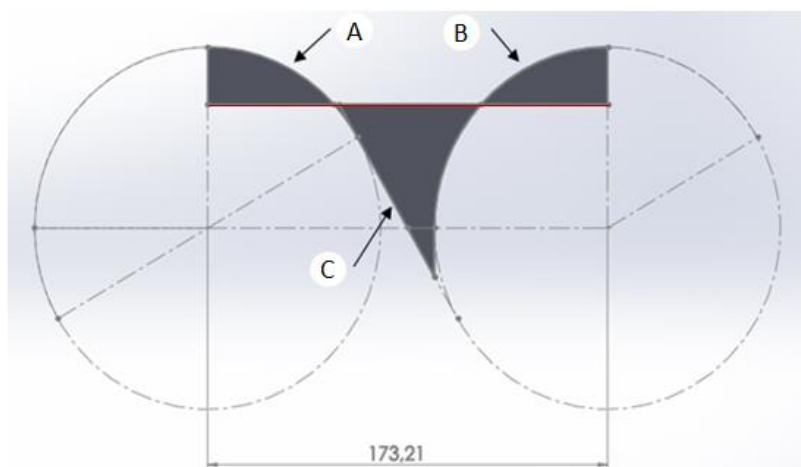


Figura 18. Superficies A, B y C

Se crean distintas superficies que dependen de la altura a la que se encuentre la línea media que las separa. Se realizan iteraciones modificando el valor de la altura de la línea media, hasta que el área de la zona superior (A y B) y de la zona inferior (C) sean iguales.

Con la altura conocida, se recopilan dos datos: La longitud de la línea media y el área total (de las tres zonas).

Y con la fórmula del artículo [15] se obtiene que:

$$Ra = \frac{1}{L} * A = \frac{A}{L}$$

- **Resultados y comparación entre modelos de cálculo de FDM**

Los resultados de Ra ( $\mu\text{m}$ ) obtenidos con ambos modelos de cálculo se visualizan en la Tabla 7. Se ha tenido en cuenta unos rangos de espesor de capa de 0,2 mm, 0,15 mm y 0,1 mm, y una variación para ángulos entre  $15^\circ$  y  $75^\circ$ .

Ángulo de la superficie creada ( $^\circ$ )	t= 0,1 mm		t= 0,15 mm		t= 0,2 mm	
	Cálculo teórico general	Cálculo teórico optimizado	Cálculo teórico general	Cálculo teórico optimizado	Cálculo teórico general	Cálculo teórico optimizado
75 $^\circ$	6,47 $\mu\text{m}$	10,37 $\mu\text{m}$	9,70 $\mu\text{m}$	15,56 $\mu\text{m}$	12,94 $\mu\text{m}$	20,75 $\mu\text{m}$
60 $^\circ$	12,50 $\mu\text{m}$	13,86 $\mu\text{m}$	18,75 $\mu\text{m}$	20,80 $\mu\text{m}$	25,00 $\mu\text{m}$	27,73 $\mu\text{m}$
45 $^\circ$	17,67 $\mu\text{m}$	17,98 $\mu\text{m}$	26,51 $\mu\text{m}$	26,98 $\mu\text{m}$	35,35 $\mu\text{m}$	35,97 $\mu\text{m}$
30 $^\circ$	21,65 $\mu\text{m}$	21,22 $\mu\text{m}$	32,47 $\mu\text{m}$	31,84 $\mu\text{m}$	43,30 $\mu\text{m}$	42,45 $\mu\text{m}$
15 $^\circ$	24,14 $\mu\text{m}$	23,46 $\mu\text{m}$	36,22 $\mu\text{m}$	35,19 $\mu\text{m}$	48,29 $\mu\text{m}$	46,92 $\mu\text{m}$

Tabla 7. Comparación de resultados teóricos del cálculo general y del cálculo optimizado

Se advierte la tendencia de aumento de la rugosidad cuanto mayor es el espesor de capa y cuanto menor es el ángulo de construcción de la superficie.

En la Figura 19 se han comparado los valores obtenidos con ambos cálculos teóricos.

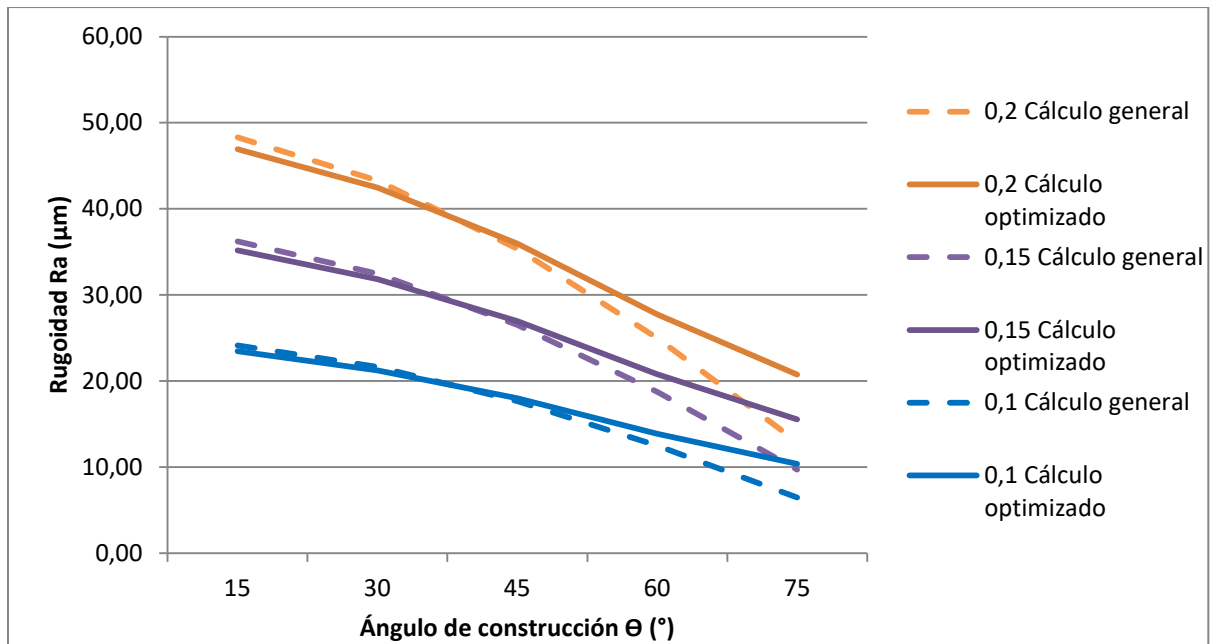


Figura 19. Comparación entre cálculos teóricos

Se analizan todos espesores de capa por separado y se comparan los iguales entre sí. Como era esperable, en ambos métodos de cálculo se denota que la rugosidad disminuye al usar espesores de capa más pequeños. Además, según lo previsto, se observa que en ambos casos la rugosidad experimenta una disminución conforme aumenta el ángulo de construcción, esto se debe a la propia forma del escalonado.

Como pasaba en el cálculo general, se observa que la diferencia de rugosidad entre capas es más notable en el ángulo más pequeño ( $15^\circ$ ), no obstante, esta vez, la diferencia global entre resultados según el espesor de capa se hace más equitativa.

En líneas generales los datos son similares con ambos métodos, aunque los resultados del cálculo teórico general tienden a ser mayores para ángulos más pequeños. A partir de  $45^\circ$  se observa que la rugosidad es mayor para la aproximación realizada con el modelo optimizado, lo que se hace más relevante conforme va aumentando el ángulo de construcción. En el ángulo de  $75^\circ$ , se puede ver que los resultados teóricos se distancian notablemente. Esta cuestión, puede deberse a que la aproximación optimizada tiene en cuenta más parámetros que la primera. Este aspecto se hace más relevante en la cara de  $75^\circ$ , donde el cálculo general obtiene resultados de rugosidad demasiado bajos, por lo que se puede pensar que están demasiado idealizados, ya que existen más parámetros que tienen participación en el proceso de fabricación de este tipo de piezas y repercuten en la calidad superficial de éstas. Además, la rugosidad teórica creada por los escalones es menor según se acerca a  $90^\circ$ , y en la superficie de  $75^\circ$  tiene más peso el efecto del redondeo del filamento.

Como conclusión, se quiere definir rangos esperables de rugosidad con un modelo sencillo, no obstante, en el cálculo optimizado los resultados son más precisos ya que se tienen en cuenta algunos factores, como la forma curvada de las capas y el hueco entre ellas, que se desprecian en la primera aproximación. Por ello, se justifica el uso del cálculo optimizado y para la comparación con

las medidas reales de FDM, se usan de aquí en adelante los datos obtenidos con este último modelo de cálculo.

### 3.5 Resultados teóricos para perfil sinusoidal y patrón de triángulos.

Por otro lado, se realiza un cálculo teórico de la rugosidad para los perfiles de dos piezas distintas a las anteriormente estudiadas. La forma de estas piezas y su rugosidad no está relacionada con el espesor de capa como en los casos anteriores.

- El primer perfil (Figura 20) se trata de una forma sinusoidal de 0,5 mm de amplitud y 4 mm de periodo.

En este caso se entiende el propio perfil senoidal de la pieza como una rugosidad, por lo que, para efectuar el cálculo de ésta, se realiza la integral definida que determina el valor de las áreas bajo la curva, y así, poder calcular la rugosidad suponiendo una longitud de más de 40 mm como se indica en la normativa ISO 4288 para perfiles periódicos.

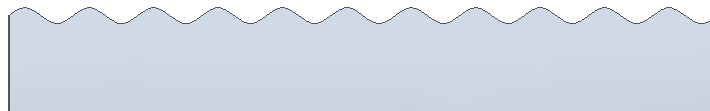


Figura 20. Pieza de forma sinusoidal

- El segundo perfil se trata de un patrón de repetición con formas triangulares que se puede ver en la Figura 21 y en la Figura 22. Al ser un patrón singular, dependiendo en que zona se mide, se obtienen resultados distintos de Ra. En este caso, se calculan las áreas de su propio perfil realizando un corte ficticio en la mitad de la pieza y se suman las superficies que sobresalen o se hunden a partir de una línea media trazada. Con las áreas calculadas, se procede al cálculo de Ra.

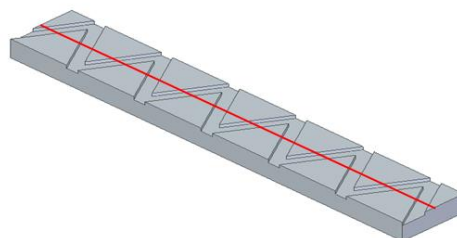


Figura 21. Perfil de patrón triangular



Figura 22. Detalle de sección del patrón triangular

En la Tabla 8 se pueden ver los resultados obtenidos para estas dos figuras:

Piezas	Ra teórica ( $\mu\text{m}$ )
Forma sinusoidal	276,78
Patrón triangular	300,00

Tabla 8. Resultados teóricos de rugosidad para las piezas singulares

## 4. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS

En este apartado se muestran los distintos puntos necesarios para llevar a cabo el diseño de las piezas y las conclusiones finales que llevan a su fabricación.

### 4.1 Condiciones iniciales de diseño

Teniendo en cuenta el **Anexo 2**, que corresponde al estudio del estado del arte, donde se han analizado patrones existentes para la inspección de la calidad superficial en piezas realizadas con fabricación aditiva, y también se tiene presente un estudio sobre aspectos de un adecuado marco de diseño. Para realizar un correcto diseño de las piezas se han de cumplir ciertas condiciones, algunas de ellas están relacionadas con las tecnologías y las máquinas en las que van a ser impresas o con los equipos de medida en los que van a ser evaluadas y en el método de medición, otras condiciones a cumplir se basan en realizar un diseño acorde al estudio teórico realizado en el apartado 3 y, también, en seguir la normativa. A continuación, se muestran las condiciones que se establecen inicialmente para realizar el diseño de las piezas:

- En primer lugar, se tiene en cuenta que las piezas van a ser realizadas con tres tecnologías diferentes (FDM, Polyjet y SLS), por lo que han de ser aptas para su fabricación en las tres impresoras. Se debe cumplir con las especificaciones de cada una de las tecnologías, como el uso del material adecuado para cada una de ellas o el límite de espesor de capa, pero la restricción más importante que se exige, viene dada por la limitación de tamaño impuesta en cada máquina. Se consultan las características técnicas de cada impresora en el **Anexo 3** y se observa que para el caso de la SLS es la limitación más restrictiva, y se dispone de 110 mm x 160 mm x 230 mm. Por lo tanto, las piezas deberán ser más pequeñas.
- De la misma manera que las piezas han de cumplir con las características impuestas por las tecnologías de fabricación, también tienen que ser aptas para su análisis en los distintos equipos de medición. Los equipos a los que deben adaptarse las piezas son: El microscopio de variación focal InfinitefocusSL de Alicona y el rugosímetro. Estos equipos imponen medidas más restrictivas que los anteriores, ya que el tamaño de las piezas debe reducirse al volumen de medición de estos, el área máxima de trabajo en el plano XY de Alicona es de 50 mm x 50 mm y su altura de escaneo es menor a 22 mm, además, el microscopio cuenta con una limitación, y es que las piezas no podrán tener partes que sobresalgan en la superficie de medida de más de 17,5 mm en el eje Z, ya que esa es su distancia mínima de trabajo. La pieza debe poder ser medida en todas sus caras por el rugosímetro, luego se tiene que permitir el acceso a las distintas superficies, orientándolas paralelas al instrumento. Otra restricción del uso del rugosímetro es que el palpador debe ser capaz de introducirse en la pieza, lo que limita la medición de estructuras periódicas de elevada amplitud. Además, como objetivo secundario, las piezas se diseñan teniendo en cuenta un futuro uso en máquinas de TC. En cualquier caso, una ventaja del estudio de la calidad superficial es que no se necesita de grandes dimensiones para la evaluación de la rugosidad.
- Otra condición relevante que impone el microscopio de Alicona, es el color de la pieza a medir, ya que el color blanco refleja mucho la luz del microscopio y no permite caracterizar bien las



superficies. En el **Anexo 13** se desarrolla el estudio experimental realizado para evaluar la influencia del color de la pieza en su medición.

- Las mediciones de las piezas deben realizarse de forma perpendicular entre el instrumento de medida y la superficie que se desea medir y dichas superficies deben permanecer paralelas al plano horizontal. Como las piezas a diseñar van a contener distintos ángulos, es conveniente realizar un apoyo que permita una correcta posición de la pieza y mayor comodidad a la hora de realizar las mediciones. Estos apoyos irán contrapuestos y paralelos a las superficies de medición, en la parte inferior de la pieza. De forma que cuando se apoyen, la superficie de medida quedará paralela al plano horizontal.
- Gracias al cálculo teórico realizado en el apartado 3, se decide diseñar piezas que incluyan distintos ángulos, buscando el estudio de este tipo de superficies y para poder comparar las mediciones reales con las aproximaciones teóricas. Se decide prescindir del ángulo de  $15^\circ$ , ya que no aporta gran diferencia con el ángulo de  $30^\circ$ , por lo que se escogen ángulos desde  $30^\circ$  hasta  $75^\circ$  para definir intervalos de  $15^\circ$  en  $15^\circ$  y poder observar las diferencias entre ellas, siendo  $30$  el más rugoso y  $75$  el que menos.
- En la fabricación SLS no se necesitan estructuras de soporte, ya que el propio lecho de polvos sirve de sustentación para las piezas. En las otras dos tecnologías sí podría ser necesario, no obstante, para facilitar la fabricación se pretende diseñar piezas que no tengan la necesidad de incluir estructuras de soporte, ya que estas estructuras podrían poner en riesgo la integridad de la calidad superficial.
- Se pretende realizar varias superficies con distintos ángulos de inclinación, pero sería conveniente integrar todas las superficies posibles en una pieza, para no tener que realizar varias fabricaciones y para facilitar las mediciones.
- La parte inferior de la pieza no será evaluada, ya que presentará problemas adicionales de calidad superficial debido al propio proceso de fabricación. Asimismo, la propia impresora de la que se dispone realiza un pequeño desplazamiento al principio de la impresión que compromete la primera parte de la construcción. Además, esta parte inferior debe permitir un despegado adecuado de la cama de impresión.
- Para asegurarse de realizar un diseño adecuado y enfocado al estudio de la rugosidad, se aplica normativa asociada a este tipo de casos. Para ello se consulta la norma ISO 4288 sobre especificación de productos geométricos, reglas y procedimientos para la evaluación de superficies de textura [16].

Para realizar la evaluación de rugosidad del perfil hay que tener en cuenta la longitud de muestreo y la longitud total de la superficie a medir. Para ello, se consultan las tablas que pertenecen a dicha normativa. Debido a la necesidad de diseñar piezas de pequeñas magnitudes, se realiza la elección de dimensionar las superficies de las piezas con 16 mm de longitud de evaluación. No obstante, se sobredimensiona el largo de las áreas de medición, para asegurar que se va a contar con esos 16 mm de longitud, por si se viera comprometida la superficie de los contornos, debido a fallos de impresión.

## 4.2 Presentación de las piezas diseñadas

Teniendo en cuenta todas las condiciones impuestas en el apartado anterior, se realiza un diseño en el programa de diseño asistido por computadora (CAD), Solid Edge. Los planos de las piezas con las medidas se pueden consultar en el **Anexo 7** y todas las características de las piezas están recogidas en el **Anexo 14**. A la hora de realizar el diseño, también se tiene en cuenta que las caras han que tener una longitud mínima de 16 mm, para poder asegurar las longitudes de corte a la hora de realizar las mediciones.

En total se han diseñado 6 tipos de piezas, que se presentan a continuación:

- Una pieza con 4 superficies de medición.

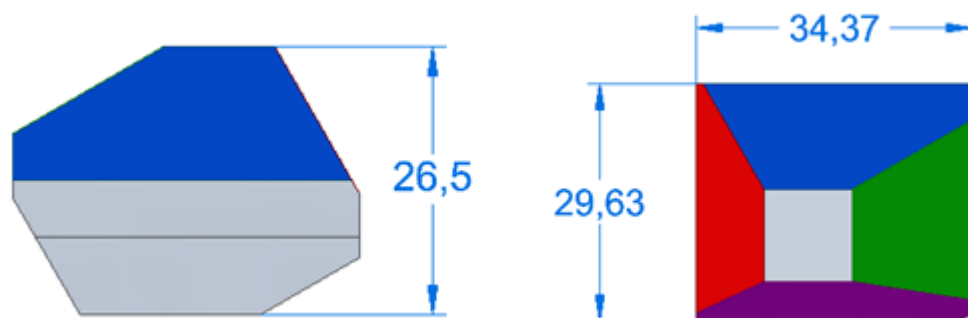


Figura 23. Alzado y planta de la pieza de 4 superficies

- Piezas con 2 superficies:
  - Una pieza de dos caras de 45° y 75°.

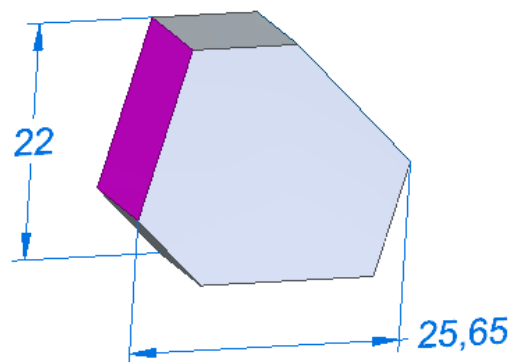


Figura 24. Medidas de la pieza 45°-75°

- Una pieza de dos caras de 30° y 60°.

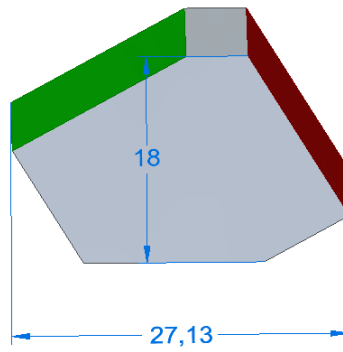


Figura 25. Medidas de la pieza 30°-60°

- Pieza con forma sinusoidal.

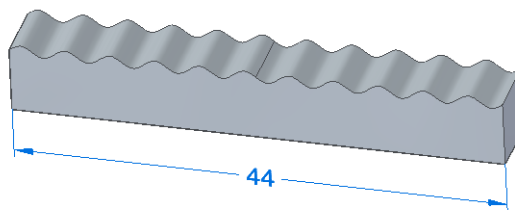


Figura 26. Medidas de la pieza con forma sinusoidal

- Pieza del patrón triangular.

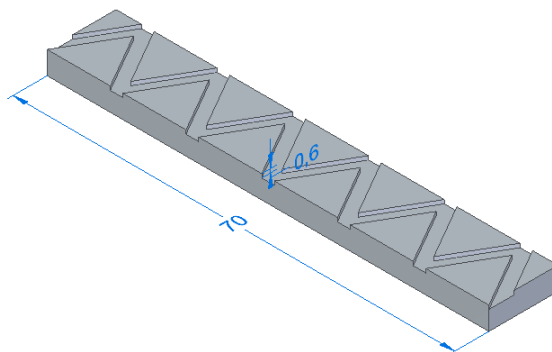


Figura 27. Medidas de la pieza de patrón triangular

- Esfera con soporte. En este caso, el interés de realizar el diseño es meramente cualitativo, ya que la esfera permite generar de manera local múltiples valores de rugosidad diferentes.

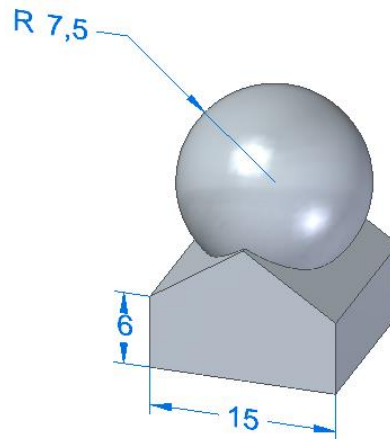


Figura 28. Medidas de la pieza esférica

- Por último, se presentan dos piezas que se realizan especialmente para la impresora Polyjet. Esta tecnología presenta un espesor de capa de  $16\ \mu\text{m}$  y para realizar una comparación de la superficie entre las distintas tecnologías, se decide crear unas piezas nuevas, con los mismos ángulos, pero simulando el escalonado con un espesor de capa similar a los anteriores (Figura 29). Se diseña un modelo con escalones de  $96\ \mu\text{m}$  (6 capas de  $16\ \mu\text{m}$ ) y también se crea otro modelo de pieza con escalones de  $192\ \mu\text{m}$  (12 capas). Para realizar el diseño de dichas piezas, se tiene en cuenta las dimensiones de cada escalonado, y se adjuntan en la Tabla 9.

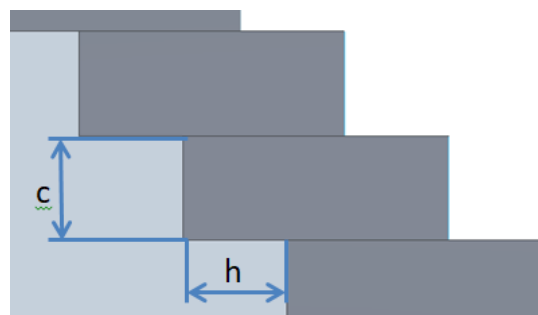


Figura 29. Detalle del escalonado

Esesor de capa c (mm)	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=75^\circ$
	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)
c = 0,096	0,166	0,096	0,055	0,025
c = 0,192	0,332	0,192	0,110	0,051

Tabla 9. Medidas del escalonado de las piezas de Polyjet

- Dos piezas de dos caras de  $30^\circ$  y  $60^\circ$ .

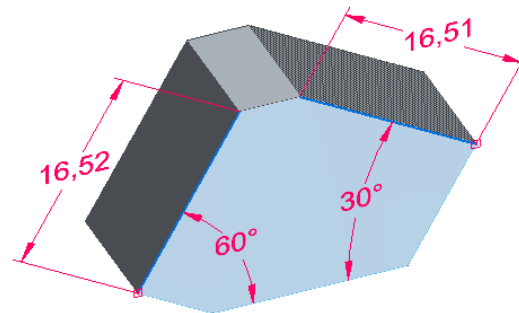


Figura 30. Medidas de la pieza  $30^\circ$ - $60^\circ$  de Polyjet y  $96 \mu\text{m}$

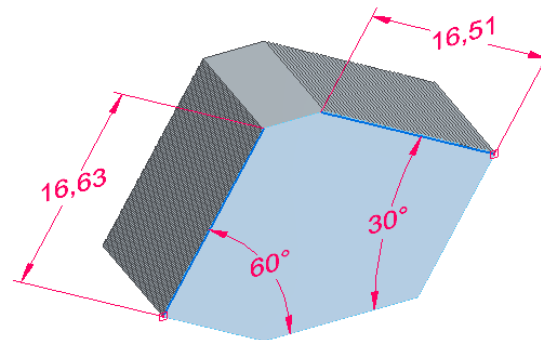


Figura 31. Medidas de la pieza  $30^\circ$ - $60^\circ$  de Polyjet y  $192 \mu\text{m}$

- Dos piezas de dos caras de  $45^\circ$  y  $75^\circ$ .

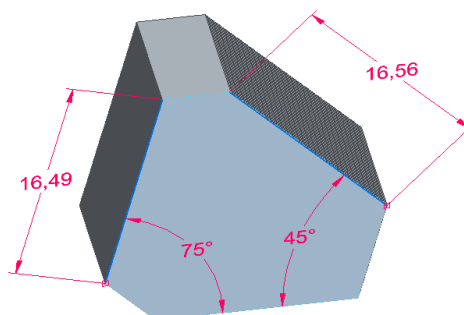


Figura 32. Medidas de la pieza  $45^\circ$ - $75^\circ$  de Polyjet y  $96 \mu\text{m}$

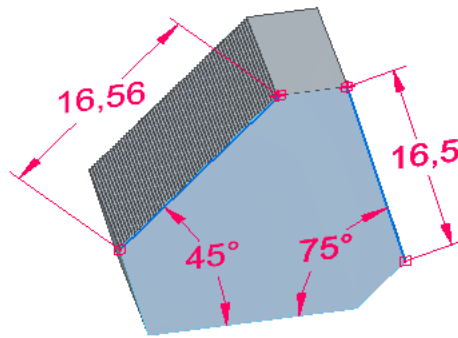


Figura 33. Medidas de la pieza 45°-75° de Polyjet y 192  $\mu$ m

### 4.3 Presentación de las piezas fabricadas

Las piezas fabricadas se realizan en las tres tecnologías de impresión de las que se dispone y para los espesores de capa que se quieren estudiar. Es posible observar las piezas más detalladamente en el **Anexo 8**.

- **FDM**

Se muestran las piezas fabricadas con la tecnología FDM y cada pieza creada con tres espesores de capa distintos. El conjunto general de estas piezas se puede ver en la Figura 34.



Figura 34. Conjunto de piezas FDM

- **SLS**

En la Figura 35 se muestran las piezas fabricadas con la tecnología SLS.

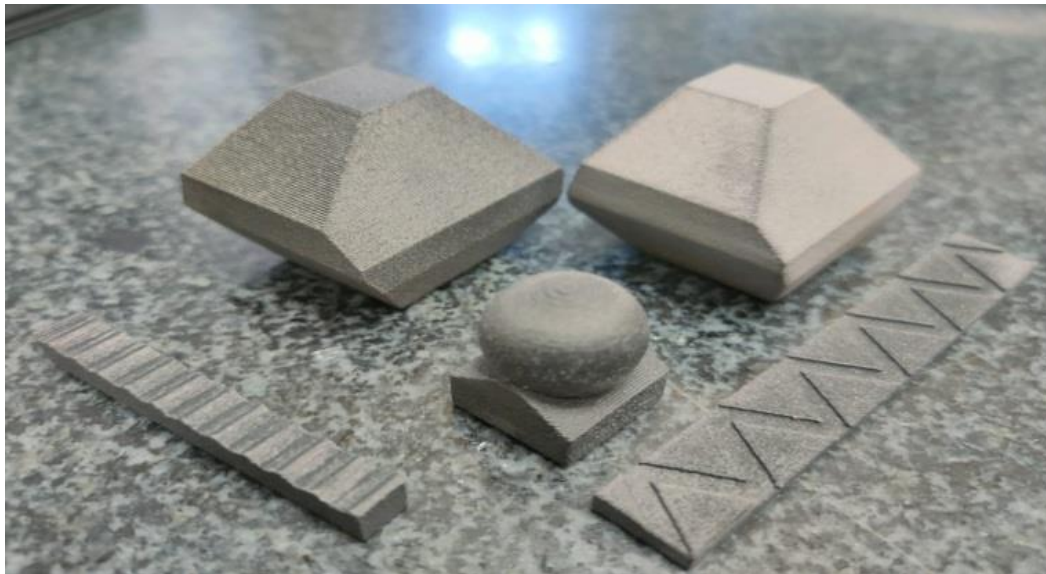


Figura 35. Conjunto de piezas SLS

- **Polyjet**

En la siguiente imagen se muestran las piezas fabricadas con la tecnología de Polyjet.



Figura 36. Conjunto de piezas Polyjet

## 5. MEDICIÓN EXPERIMENTAL

En este apartado se expone cómo se ha realizado la fase de medición y los resultados obtenidos. Los datos de las piezas que no dependen del ángulo de construcción se analizan en el punto 5.6.

### 5.1 Elección de la longitud de corte

Como se ha descrito en el apartado 4.1, es necesaria la elección de longitudes de corte para la realización de las mediciones. En este apartado se explica el proceso de selección más detalladamente.

El procedimiento a seguir viene explicado según la normativa ISO 4288 [16], comienza gracias a los datos teóricos calculados en el apartado 3, con ellos se parte de la base de una suposición teórica de la rugosidad  $Ra$  que se va a encontrar en la superficie de las piezas. Teniendo en cuenta este parámetro estimado de  $Ra$ , se elige la longitud de corte ( $l_c$ ) de las tablas 1, 2 y 3 de dicha norma, según las características del perfil que se quiera estudiar. Dichas tablas se adjuntan en las Figuras 37, 38 y 39.

$Ra$	Roughness sampling length $l_r$	Roughness evaluation length $l_n$
$\mu\text{m}$	mm	mm
$(0,006) < Ra \leq 0,02$	0,08	0,4
$(0,02) < Ra \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$	8	40

Figura 37. Tabla 1 de longitudes de muestreo de rugosidad para la medida de  $Ra$ , para perfiles no periódicos [16]

$Rz^a$ $Rz1max.^b$	Roughness sampling length $l_r$	Roughness evaluation length $l_n$
$\mu\text{m}$	mm	mm
$(0,025) < Rz, Rz1max. \leq 0,1$	0,08	0,4
$0,1 < Rz, Rz1max. \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,5 < Rz, Rz1max. \leq 10$	0,8	4
$10 < Rz, Rz1max. \leq 50$	2,5	12,5
$50 < Rz, Rz1max. \leq 200$	8	40
<sup>a</sup> $Rz$ is used when measuring $Rz, Rv, Rp, Rc$ and $Rt$ . <sup>b</sup> $Rz1max.$ is used only when measuring $Rz1max., Rv1max., Rp1max.$ and $Rc1max.$		

Figura 38. Tabla 2 de longitudes de muestreo de rugosidad para la medida de  $Rz$  y  $Rz1max$ , para perfiles no periódicos [16]



$RSm$  $\mu m$	Roughness sampling length  $l_r$  mm	Roughness evaluation length  $l_n$  mm
$0,013 <^* RSm \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40

\*Se realiza una corrección de la norma ISO 4288:1996, en la que se indica que Rsm cambia  $\mu m$  por mm.

Figura 39. Tabla 3 de longitudes de muestreo de rugosidad para la medida de Rsm, para perfiles periódicos [16]

Con los instrumentos de medición, se obtiene un resultado representativo de Ra, Rz o Rsm, usando la longitud de muestreo elegida de las tablas. A continuación, se compara el resultado obtenido con los valores para la longitud de muestreo estimada. En el caso de que el valor obtenido esté fuera del rango que se propone, se debe ajustar el instrumento de medida a una nueva longitud de corte inferior o superior, acorde con el resultado obtenido y se realiza de nuevo este procedimiento.

En este caso, según la tabla 1, las mediciones se realizan con una longitud de corte de 8 mm, ya que los datos teóricos aportan rugosidades de Ra en el rango entre 10  $\mu m$  y 80  $\mu m$ . Además, atendiendo a que la rugosidad está formada por los bordes de las capas que están repetidos a lo largo de la superficie, también se puede suponer que se trata de perfiles periódicos y elegir una nueva longitud de corte a partir de la tabla 3 de la norma ISO 4288.

## 5.2 Resultados experimentales de FDM obtenidos con el microscopio

A continuación, se muestran y analizan los resultados obtenidos con el microscopio de Alicona para la tecnología de FDM. Como se ha explicado en el apartado 5.1, los resultados de las mediciones realizadas en este punto se dividen en los obtenidos para la elección de Lc de la tabla 1, y para la Lc de la tabla 3.

### 5.2.1 Resultados obtenidos para Lc de tabla 1

Según la normativa, la longitud de corte elegida de la tabla 1 es de 8000  $\mu m$ .

Pieza de 4 caras (30-60-45-75) Lc 8000 $\mu m$	0,2 mm	0,15 mm	0,1 mm
30°	44,76 $\mu m$	33,63 $\mu m$	25,14 $\mu m$
45°	37,11 $\mu m$	27,39 $\mu m$	22,27 $\mu m$
60°	33,56 $\mu m$	30,30 $\mu m$	23,40 $\mu m$
75°	30,49 $\mu m$	21,08 $\mu m$	20,16 $\mu m$

Pieza de 2 caras (30-60) Lc 8000 μm	0,2 mm	0,15 mm	0,1 mm
30°	45,64 μm	33,02 μm	24,10 μm
60°	24,72 μm	21,05 μm	18,35 μm
Pieza de dos caras (45-75) Lc 8000 μm	0,2 mm	0,15 mm	0,1 mm
45°	31,02 μm	29,35 μm	23,67 μm
75°	28,67 μm	26,70 μm	23,57 μm

Tabla 10. Resultados experimentales obtenidos con el microscopio para Lc según tabla 1

Para analizar la tendencia de los datos de las piezas con superficies inclinadas, se realizan modelos de regresión lineal para ajustar los resultados y se obtienen las siguientes ecuaciones:

Para espesor de capa 0,2:  $Ra (\mu m) = -0,2622 \theta + 53,4$

Para espesor de capa 0,15:  $Ra (\mu m) = -0,1411 \theta + 38,26$

Para espesor de capa 0,1:  $Ra (\mu m) = -0,0465 \theta + 26,241$

Donde  $\theta(^{\circ})$  es el ángulo de construcción de las superficies y  $Ra (\mu m)$  la rugosidad medida.

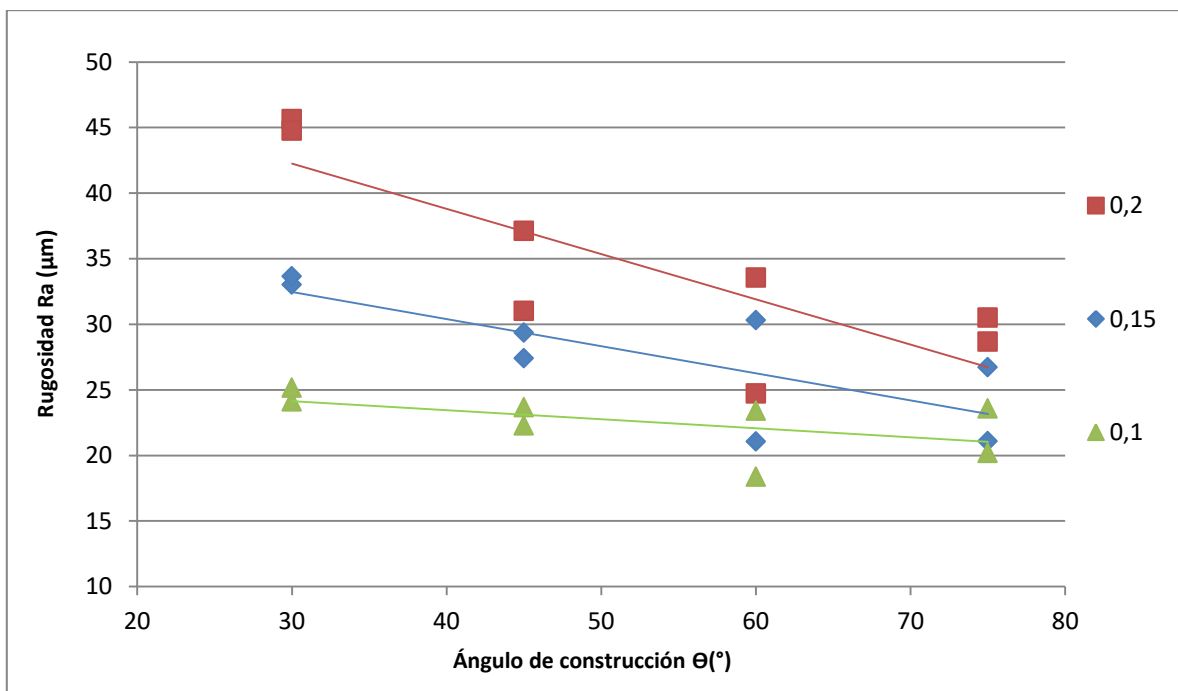


Figura 40. Regresión lineal de los datos experimentales obtenidos con el microscopio (FDM)

En la Figura 40 se puede observar que los datos experimentales siguen la misma tendencia que los obtenidos teóricamente. Como se puede ver en los cálculos teóricos, se comprueba que existe relación

entre la rugosidad y el ángulo de construcción, la rugosidad tiende a disminuir cuando el ángulo de construcción aumenta. Además, como era de esperar, también se observa que, a mayor espesor de capa, mayor es la rugosidad.

- **Comparación de los resultados teóricos con los experimentales**

Surge la necesidad de comparar el cálculo teórico realizado con las medidas experimentales obtenidas en la medición con el microscopio, para comprobar la fiabilidad de los resultados teóricos. Para ello, se realizan las siguientes gráficas, donde se puede observar los resultados de rugosidad frente a los ángulos de construcción para distintos espesores de capa.

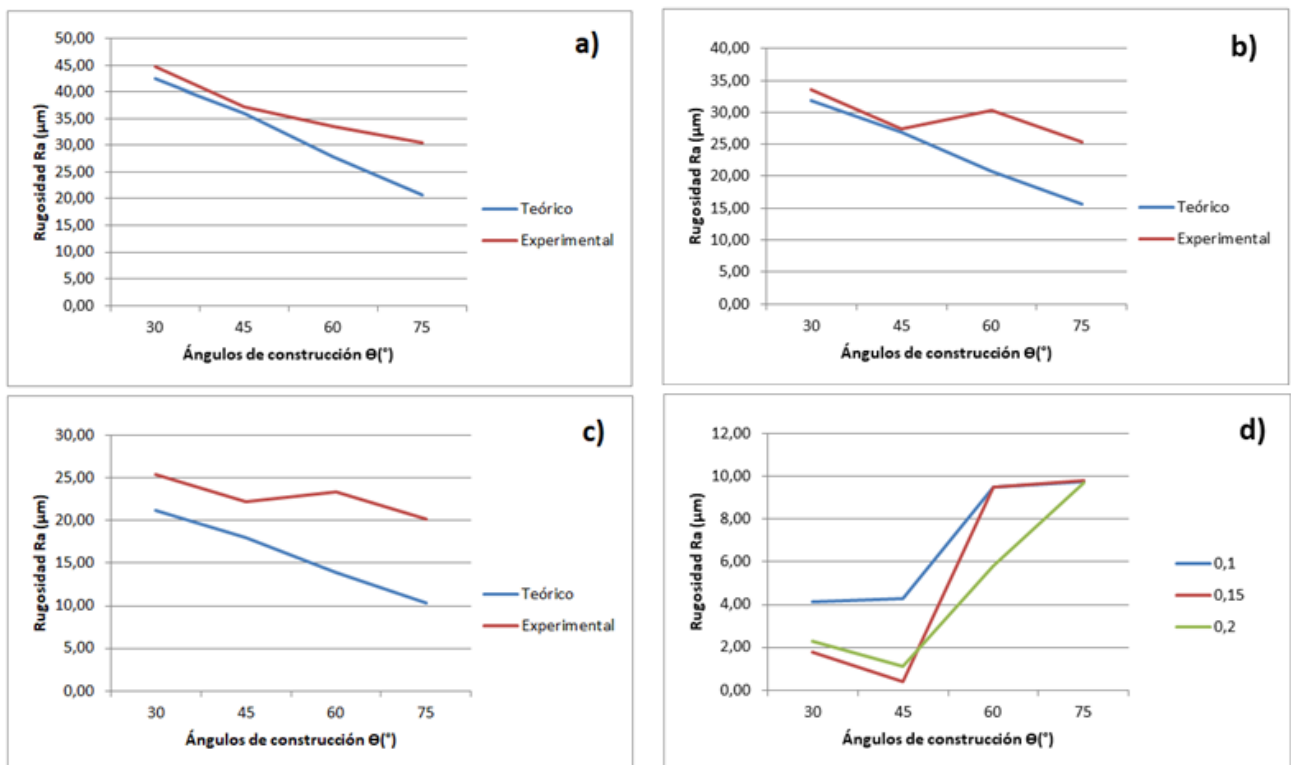


Figura 41. Gráficas de comparación de los resultados teóricos de Ra ( $\mu\text{m}$ ) con los experimentales: a) Espesor de capa de 0,2 mm. b) Espesor de capa de 0,15 mm. c) Espesor de capa de 0,1 mm. d) Comparación de las desviaciones teórico/experimental en los distintos espesores de capa.

Gracias a la visualización de estas gráficas, se observa que el espesor de capa de 0,1 mm obtiene las desviaciones más altas entre los datos teóricos y los hallados experimentalmente. Además, se puede observar que estas diferencias se hacen más relevantes para ángulos mayores de 45°, se puede apreciar en los ángulos de 60° y 75°, donde se observan las mayores desviaciones, que llegan casi hasta 10  $\mu\text{m}$ . Al ser menor la rugosidad causada por el escalonado en dichos ángulos, tienen más peso los posibles errores de fabricación que se añaden a los resultados de rugosidad que vemos.

### 5.2.2 Resultados obtenidos para Lc de Tabla 3.

Como se ha tratado en el apartado 5.1, la longitud de corte también se puede definir de la tabla 3 de la norma ISO 4288. Para ello, se halla el parámetro Rsm, que es el periodo del perfil y está explicado en el **Anexo 5**. En las siguientes tablas (Tabla 11, 12 y 13) se muestra el parámetro Rsm para cada espesor de capa y para cada ángulo, y los resultados de elección de longitud de corte.

Espesor de capa: 0,1 mm Inclinación:	Rsm (mm)	Lc (μm)
30°	0,200	800
45°	0,141	800
60°	0,115	250
75°	0,103	250

Tabla 11. Parámetro Rsm y Lc para espesor 0,1 mm

0,15 mm	Rsm (mm)	Lc (μm)
30°	0,300	800
45°	0,212	800
60°	0,173	800
75°	0,155	800

Tabla 12. Parámetro Rsm y Lc para espesor 0,15 mm

0,2 mm	Rsm (mm)	Lc (μm)
30°	0,400	2500
45°	0,282	800
60°	0,230	800
75°	0,207	800

Tabla 13. Parámetro Rsm y Lc para espesor 0,2 mm

Gracias a la clasificación anterior, se realiza una tabla nueva (Tabla 14) donde se reflejan los nuevos resultados obtenidos realizando las mediciones con las longitudes de corte (Lc) elegidas según la tabla 3 de la norma ISO 4288.

Pieza de 4 caras (30-60-45-75)	0,2 mm	0,15 mm	0,1 mm
30°	Lc 2500 $\mu\text{m}$ 43,58 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 30,94 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 22,59 $\mu\text{m}$
45°	Lc 800 $\mu\text{m}$ 31,35 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 24,46 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 18,52 $\mu\text{m}$
60°	Lc 800 $\mu\text{m}$ 22,85 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 20,70 $\mu\text{m}$	Lc 250 $\mu\text{m}$ 10,69 $\mu\text{m}$
75°	Lc 800 $\mu\text{m}$ 20,94 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 18,16 $\mu\text{m}$	Lc 250 $\mu\text{m}$ 9,80 $\mu\text{m}$

Tabla 14. Resultados experimentales obtenidos con el microscopio para Lc según tabla 3

- Comparación de los resultados teóricos con los experimentales entre Lc de tabla 1 y Lc de tabla 3

Los resultados experimentales hallados en este apartado se comparan con los resultados teóricos que se han calculado en el apartado 3.

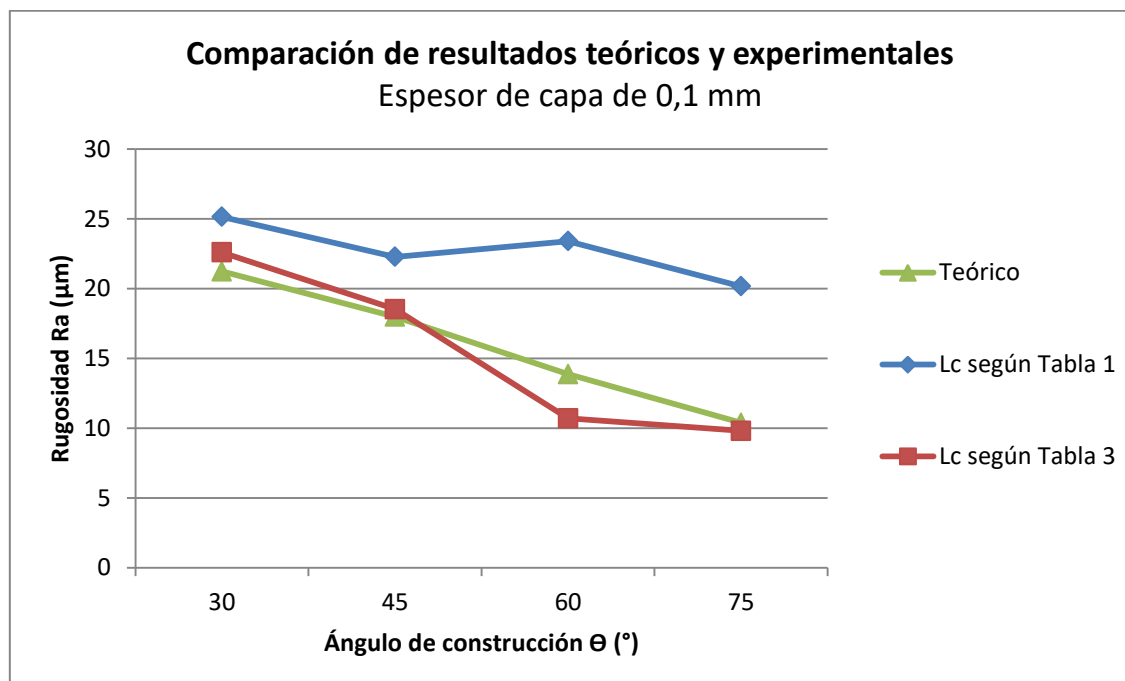


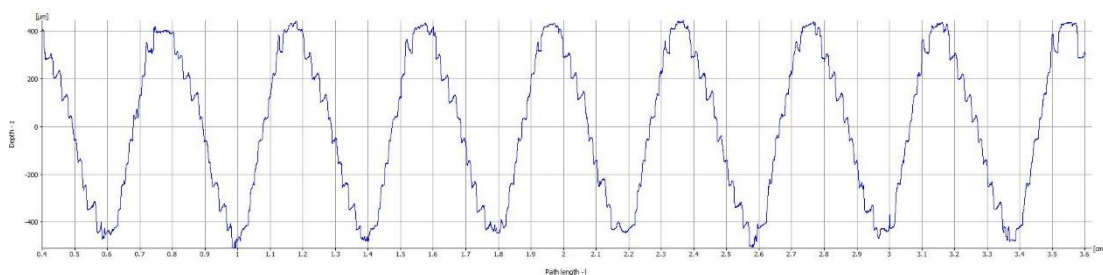
Figura 42. Ejemplo de comparación de valores teóricos y experimentales de distintas LC

En el **Anexo 9** se realiza la comparación gráfica completa de los datos de rugosidad y de las desviaciones porcentuales resultantes según las distintas  $L_c$  usadas.

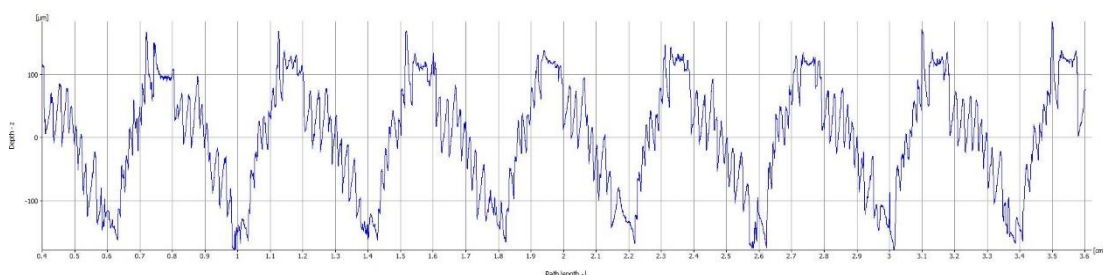
Como se puede ver en la Figura 42, para los tres espesores de capa distintos, se muestra que los resultados logrados con la longitud de corte para perfiles periódicos (tabla 3), tienen unas desviaciones mucho menores que los resultados con la longitud de corte según la tabla 1 (8000  $\mu\text{m}$ ).

En conclusión, la elección de la  $L_c$  con la tabla 3 permite unos resultados en las mediciones más próximos a los teóricos. Esta mejora tiene una explicación, el cálculo teórico tiene en cuenta la forma del perfil, y es la rugosidad que se busca evaluar con los instrumentos de medida para acercarse a ese valor teórico. Con 8000  $\mu\text{m}$ , los resultados obtenidos aportan demasiada información, es decir, no es capaz de separar correctamente la propia rugosidad del perfil, creada por algunos defectos de fabricación, de la ondulación del mismo. Por ello, al ajustar las  $L_c$  se produce un filtrado, y se puede observar cómo cambia el perfil al ser evaluado en el microscopio con diferentes longitudes de corte (Figuras 43, 44, 45, 46 y 47).

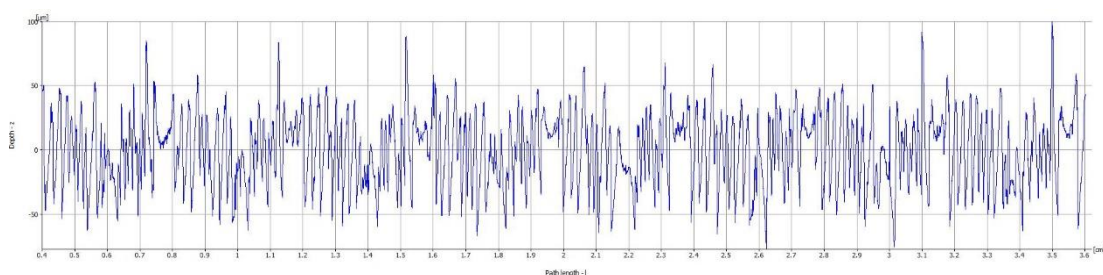
Para explicar este filtrado, como ejemplo, se muestra el perfil de rugosidad de la pieza con forma senoidal para las distintas longitudes de corte. Además, en el **Anexo 10** también se pueden encontrar imágenes del perfil de una pieza con pendiente para distintas  $L_c$ .



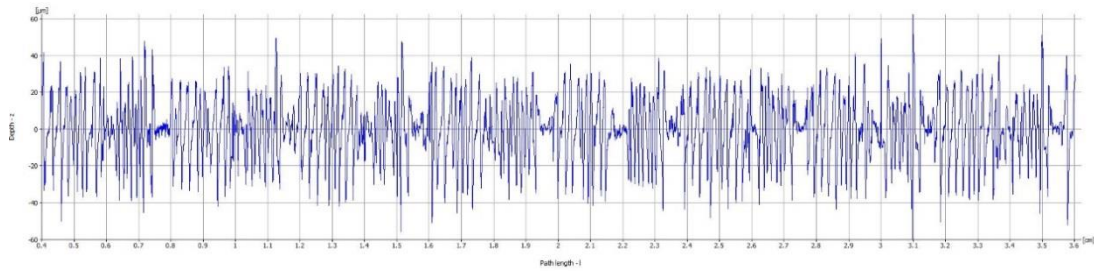
**Figura 43. Perfil de rugosidad para  $L_c$  de 8000  $\mu\text{m}$**



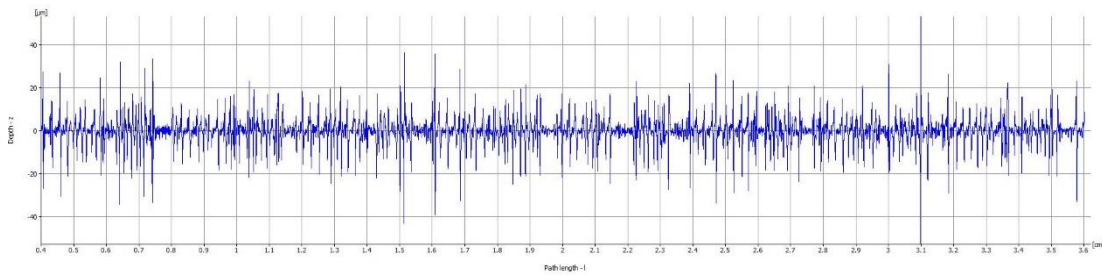
**Figura 44. Perfil de rugosidad para  $L_c$  de 2500  $\mu\text{m}$**



**Figura 45. Perfil de rugosidad para Lc de 800  $\mu\text{m}$**



**Figura 46. Perfil de rugosidad para Lc de 250  $\mu\text{m}$**

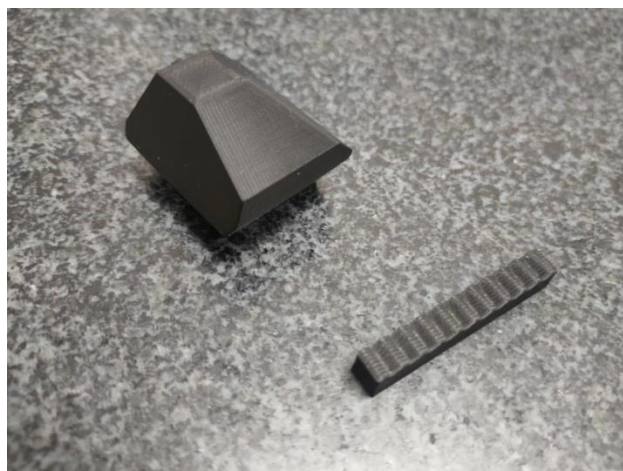


**Figura 47. Perfil de rugosidad para Lc de 80  $\mu\text{m}$**

Como se puede observar, el perfil de Lc de 8000  $\mu\text{m}$  deja ver la forma completa de la senoide, ya que tiene en cuenta más parámetros que los demás perfiles obtenidos con Lc más pequeñas. Esto también se percibe en que los valores de rugosidad son mayores para longitudes de corte mayores. Mientras que en el otro extremo, con Lc de 80  $\mu\text{m}$ , no se percibe la forma de la senoide, ya que se produce un filtrado de los parámetros que se llegan a ver.

### 5.2.3 Resultados de piezas de FDM con segunda impresora

Adicionalmente, se fabrican piezas con una segunda impresora de FDM (Figura 48), y se estudian para poder realizar una comparación con las anteriores (Figura 49).



**Figura 48. Piezas fabricadas con la impresora Ultimaker S5**



Figura 49. Comparación visual de pieza fabricada con Ultimaker y la fabricada con la impresora BQ

En la Tabla 15 se muestran los resultados de rugosidad experimentales obtenidos con el microscopio.

Pieza de 4 caras (30-60-45-75)	0,1 mm Lc según tabla 1	0,1 mm Lc según tabla 3
30°	Lc 8000 $\mu\text{m}$ 20,733 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 20,171 $\mu\text{m}$
45°	Lc 8000 $\mu\text{m}$ 15,8827 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 15,678 $\mu\text{m}$
60°	Lc 8000 $\mu\text{m}$ 11,3425 $\mu\text{m}$	Lc 250 $\mu\text{m}$ 9,9185 $\mu\text{m}$
75°	Lc 8000 $\mu\text{m}$ 8,3387 $\mu\text{m}$	Lc 250 $\mu\text{m}$ 6,790 $\mu\text{m}$
Pieza Senoidal	0,1 mm Lc según tabla 1	
	Lc 8000 $\mu\text{m}$ 282,4345 $\mu\text{m}$	

Tabla 15. Resultados obtenidos con las s piezas de FDM de la segunda impresora



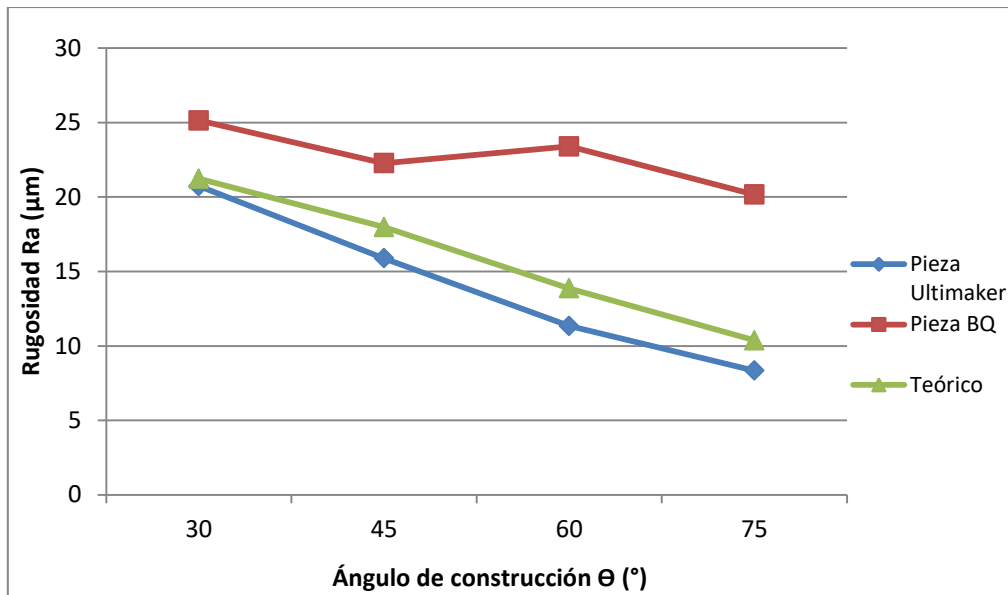


Figura 50. Comparación de resultados de ambas impresoras

El análisis completo de estas piezas se encuentra en el **Anexo 16**, y se puede observar que se acercan más a los resultados teóricos que las piezas creadas con la impresora BQ (Figura 50), por lo que se concluye, que algunas desviaciones de las piezas anteriores son debidas al propio proceso de fabricación.

### 5.3 Resultados experimentales de SLS obtenidos con el microscopio

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la tecnología SLS. En este caso, la rugosidad únicamente se muestra para la longitud de corte de la tabla 1 (8000 µm), ya que debido a las irregularidades de la zona de medición no se puede considerar una superficie periódica.

En la siguiente tabla se resumen los resultados experimentales obtenidos en las mediciones realizadas con el microscopio para 0,2 mm y 0,1 mm de espesor. Se pueden consultar las mediciones completas en el **Anexo 11**.

Pieza de 4 caras (30-60-45-75) Lc 8000 µm	0,2 mm	0,1 mm
30°	30,53 µm	16,77 µm
45°	28,41 µm	13,08 µm
60°	16,42 µm	13,59 µm
75°	16,74 µm	14,41 µm

Tabla 16. Resultados experimentales obtenidos con el microscopio para las piezas de SLS

Para analizar la tendencia de los datos de las piezas con superficies inclinadas, se realizan modelos de regresión lineal para ajustar los resultados y se obtienen las siguientes ecuaciones:

Para espesor de capa 0,2:  $Ra (\mu\text{m}) = -0,3556 \theta + 41,698$

Para espesor de capa 0,1:  $Ra (\mu\text{m}) = -0,0437 \theta + 16,764$

Donde  $\theta$  ( $^\circ$ ) es el ángulo de construcción de las superficies y  $Ra$  ( $\mu\text{m}$ ) la rugosidad medida.

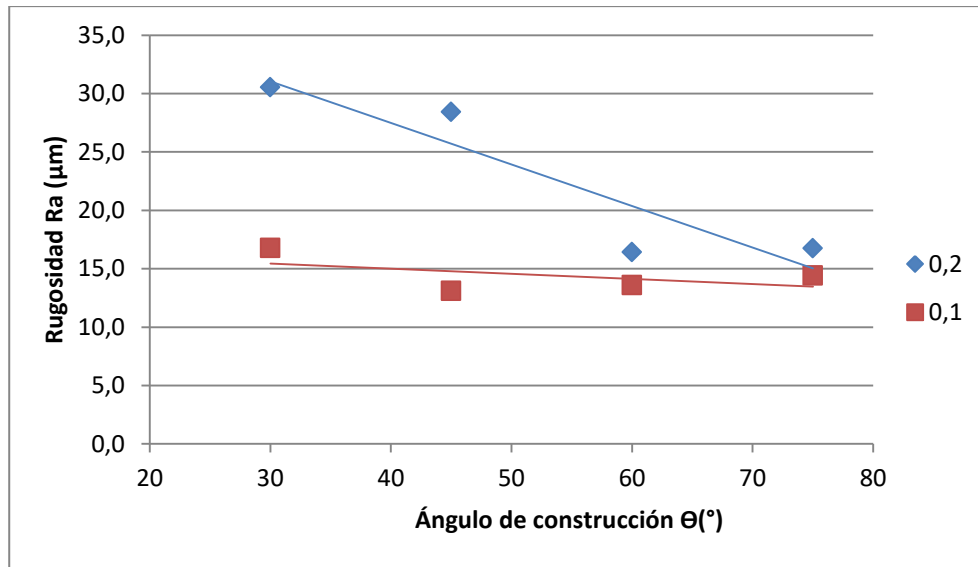


Figura 51. Regresión lineal de los datos experimentales obtenidos con el microscopio (SLS)

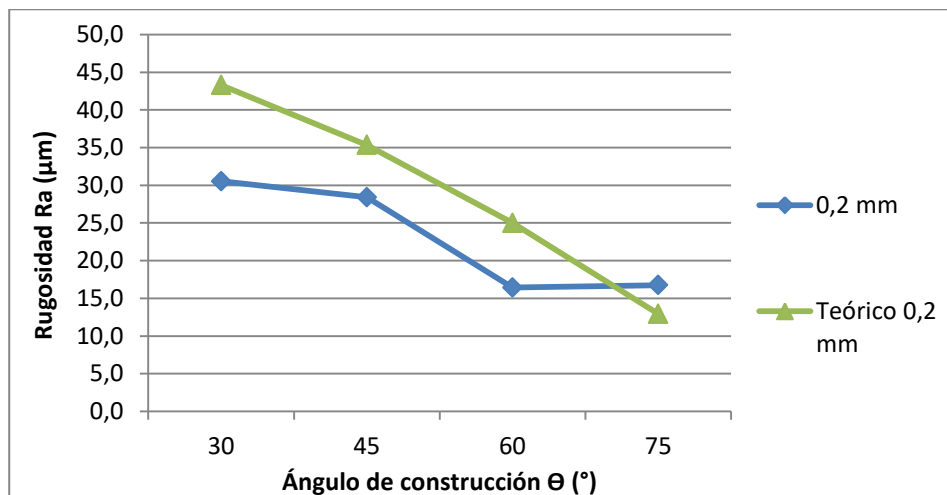


Figura 52. Ejemplo de comparación de los datos teóricos y los experimentales Polyjet (0,2 mm de espesor de capa)

Se puede observar que la tendencia que siguen los resultados es la misma que se ha observado anteriormente con la tecnología FDM, no obstante, los resultados de rugosidad obtenidos con las medidas experimentales son mucho menores a los esperados teóricamente (Figura 52). Esto puede deberse al propio sistema de fabricación de las piezas. La tecnología de fabricación SLS se basa en la

sinterización selectiva de material polimérico en polvo que se puede quedar atrapado en las superficies. Después de la fabricación, se debe realizar un limpiado de las superficies de las piezas para eliminar el polvo sobrante. En este caso, la primera limpieza se realiza con aire a presión, aun así, los resultados obtenidos muestran unos valores de rugosidad más reducidos que los teóricamente esperados. Esto es debido al polvo que queda adherido a la superficie que suaviza el escalonado.

Se muestra un ejemplo de la superficie de una pieza de SLS (Figura 53), en la que se puede observar que se difumina el efecto de escalonado y se pierde la periodicidad esperada del perfil, debido al polvo que se encuentra acumulado en la superficie de forma aleatoria.



Figura 53. Superficie de 30° y 0,2 mm de espesor de capa tras la primera limpieza con aire a presión

Se decide realizar una segunda limpieza para liberar la superficie del polvo sobrante. Esta vez la limpieza se realiza de forma más profunda, con aire a presión y con una sustancia abrasiva. Los resultados de las mediciones obtenidos tras esta segunda limpieza se muestran en la Tabla 17.

Pieza de 4 caras (30-60-45-75) Lc 8000 $\mu\text{m}$	0,2 mm	0,1 mm
	30°	59,40 $\mu\text{m}$
45°	20,55 $\mu\text{m}$	7,60 $\mu\text{m}$
60°	14,50 $\mu\text{m}$	7,43 $\mu\text{m}$
75°	12,10 $\mu\text{m}$	6,85 $\mu\text{m}$

Tabla 17. Resultados experimentales obtenidos con el microscopio tras la limpieza con abrasivo

Tras esta segunda etapa de limpieza, los resultados obtenidos se alejan aún más de los resultados teóricos calculados. Se analiza la superficie de la pieza, y se comprueba que este cambio se debe a que el

abrasivo ha desgastado la superficie de forma irregular y se ha suavizado significativamente la forma del efecto escalonado con la que se quería comparar.

El cambio más brusco se da para el ángulo de 30° de la pieza de 4 caras (Figura 54), por ello se analiza el área de medición de la pieza y se ve que el abrasivo ha producido alteraciones en la superficie y se ha quedado una zona poco uniforme.

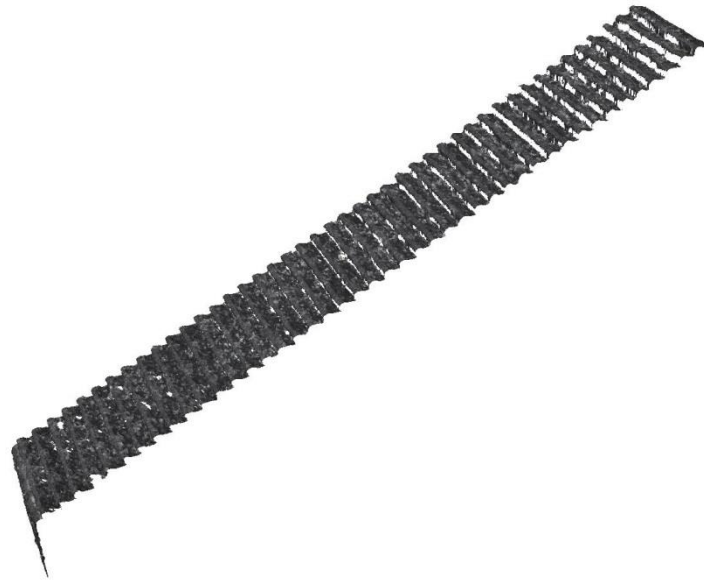


Figura 54. Superficie de 30° y 0,2 mm de espesor de capa tras la limpieza con abrasivo

#### 5.4 Resultados experimentales de Polyjet obtenidos con el microscopio

Se muestran los resultados hallados para las piezas fabricadas con la tecnología Polyjet. Como ocurre en el apartado anterior, la pieza se examina con longitud de corte de 8000  $\mu\text{m}$ , ya que debido a irregularidades en la superficie de medición, no puede considerarse un perfil periódico.

Piezas de 4 caras Lc 8000 $\mu\text{m}$	16 $\mu\text{m}$	96 $\mu\text{m}$	192 $\mu\text{m}$
30°	5,91 $\mu\text{m}$	10,50 $\mu\text{m}$	24,82 $\mu\text{m}$
45°	10,89 $\mu\text{m}$	16,70 $\mu\text{m}$	10,65 $\mu\text{m}$
60°	14,10 $\mu\text{m}$	16,42 $\mu\text{m}$	19,02 $\mu\text{m}$
75°	19,00 $\mu\text{m}$	18,92 $\mu\text{m}$	19,25 $\mu\text{m}$

Tabla 18. Resultados obtenidos con el microscopio para las piezas de Polyjet

Al examinar los datos de la Tabla 18, en primer lugar, destaca que la rugosidad general ha disminuido con respecto a las tecnologías anteriores y respecto a los cálculos teóricos.

Comparando los resultados de esta tecnología con lo teóricamente esperado, la pieza realizada con el espesor de capa de 16  $\mu\text{m}$  obtiene resultados algo mayores que los calculados con el modelo teórico. Como sucedía en el modelo de FDM para la cara de 75°, los resultados calculados para la predicción de la rugosidad resultan demasiado bajos e idealizados, ya que no tienen en cuenta algunos factores de fabricación que repercuten en la rugosidad de la superficie.

Sin embargo, las piezas que fueron diseñadas especialmente con un escalonado de espesor de capa de 0,192 mm y 0,096 mm, tienen más rugosidad que la esperada con el cálculo teórico.

Para analizar la tendencia de los datos de las piezas con superficies inclinadas, se realizan modelos de regresión lineal para ajustar los resultados y se obtienen las siguientes ecuaciones:

Para el espesor de capa de 16  $\mu\text{m}$ :  $Ra (\mu\text{m}) = 0,2833 \theta - 2,3967$

Para espesor de capa 96  $\mu\text{m}$ :  $Ra (\mu\text{m}) = 0,1666 \theta + 6,8957$

Para espesor de capa de 192  $\mu\text{m}$ :  $Ra (\mu\text{m}) = -0,0555 \theta + 21,351$

Donde  $\theta$  (°) es el ángulo de construcción de las superficies y  $Ra$  ( $\mu\text{m}$ ) la rugosidad medida.

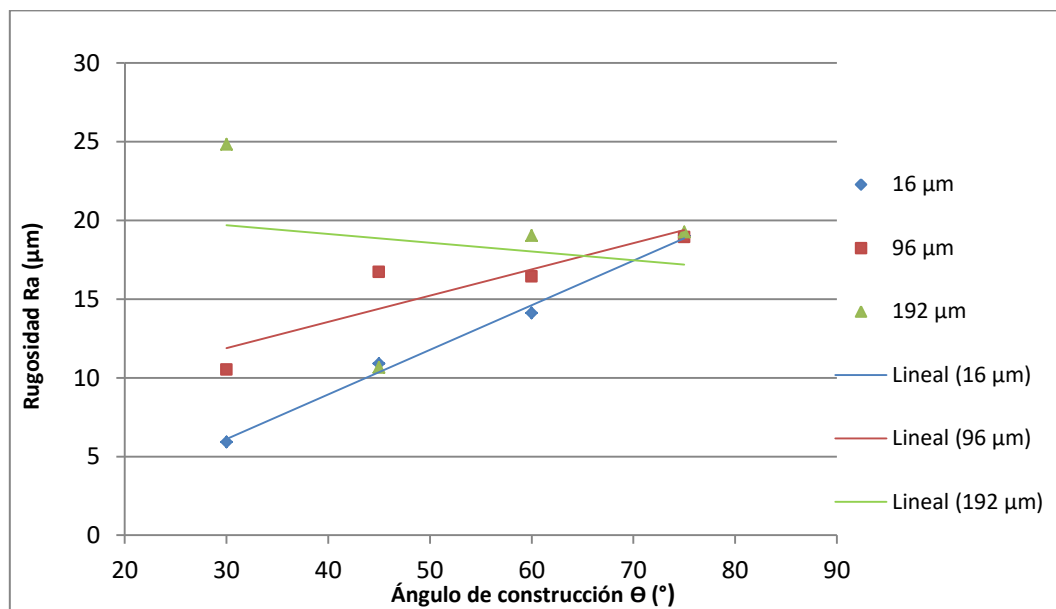


Figura 55. Regresión lineal de los datos experimentales obtenidos con el microscopio (Polyjet)

Esta vez, la tendencia no obedece al patrón que se define con las tecnologías anteriores, sino que la rugosidad para las piezas de 16  $\mu\text{m}$  y 96  $\mu\text{m}$  tienen una tendencia inversa, y se muestra que a mayor ángulo supone mayor rugosidad, algo que no ocurría anteriormente.

Esta problemática se debe al proceso de fabricación de la tecnología Polyjet, aunque las piezas se han limpiado con agua, la resina (material de fotopolímero) que se usa en su fabricación, se queda adherida a la superficie y no permite ver el escalonado correctamente definido, como se esperaría teóricamente. Este suceso, también explica que los resultados de rugosidad sean menores, ya que el material sobrante difumina el escalonado y suaviza el perfil.



Figura 56. Detalle de la superficie de la pieza creada con Polyjet (60° y 192  $\mu\text{m}$ )

### 5.5 Resultados obtenidos con el rugosímetro

Los valores que aparecen en este apartado son la media de 5 mediciones realizadas para cada resultado. Los datos completos pueden encontrarse en el **Anexo 11**.

Esta vez no se puede realizar la medición de las piezas del patrón triangular, de la pieza senoidal y de la esférica, ya que las superficies no son planas como se requiere en la medición con este equipo.

- **Resultados de FDM**

Para realizar la medición de las piezas con el rugosímetro, también se tiene en cuenta la normativa explicada en el apartado 5.1, por lo que para la tabla 1 la longitud de corte es de 8 mm y para la tabla 3 se eligen distintas  $L_c$  según su parámetro  $R_{sm}$  antes calculado.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 19 y la Tabla 20.

<i>Pieza de 4 caras (30-60-45-75) Lc 8000 <math>\mu\text{m}</math></i>	0,2 mm	0,15 mm	0,1 mm
30°	44,85 $\mu\text{m}$	33,93 $\mu\text{m}$	27,65 $\mu\text{m}$
45°	35,03 $\mu\text{m}$	27,37 $\mu\text{m}$	21,34 $\mu\text{m}$
60°	29,58 $\mu\text{m}$	32,03 $\mu\text{m}$	24,73 $\mu\text{m}$
75°	30,12 $\mu\text{m}$	28,15 $\mu\text{m}$	19,23 $\mu\text{m}$

Tabla 19. Resultados experimentales medios obtenidos con el rugosímetro para Lc según tabla 1

<i>Pieza de 4 caras (30-60-45-75) Lc según tabla 3</i>	0,2 mm	0,15 mm	0,1 mm
30°	Lc 2500 $\mu\text{m}$ 41,87 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 29,25 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 21,08 $\mu\text{m}$
45°	Lc 800 $\mu\text{m}$ 26,40 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 23,64 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 17,93 $\mu\text{m}$
60°	Lc 800 $\mu\text{m}$ 23,46 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 25,35 $\mu\text{m}$	Lc 250 $\mu\text{m}$ 13,73 $\mu\text{m}$
75°	Lc 800 $\mu\text{m}$ 22,76 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 21,02 $\mu\text{m}$	Lc 250 $\mu\text{m}$ 9,59 $\mu\text{m}$

Tabla 20. Resultados experimentales medios obtenidos con el rugosímetro para Lc según tabla 3

Gracias a la realización de estas mediciones con otro equipo distinto al microscopio se puede afianzar los resultados obtenidos anteriormente, ya que los datos hallados en las dos tecnologías de medición (rugosímetro y microscopio) ofrecen resultados similares y siguen la misma tendencia, lo que se puede observar en las siguientes gráficas.

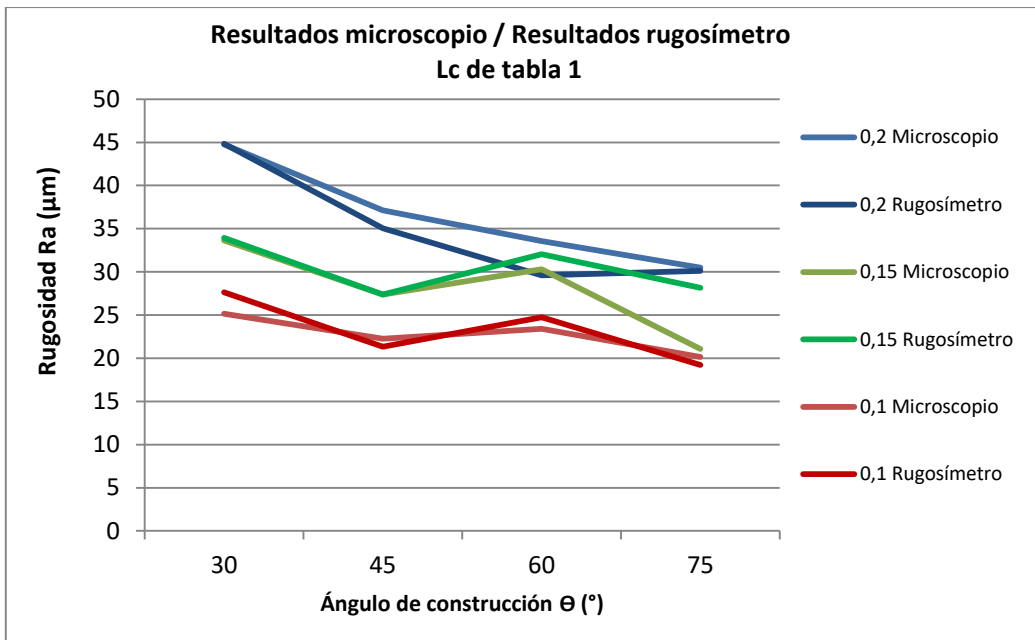


Figura 57. Comparación de los resultados de los dos equipos de medición (Lc según tabla 1)

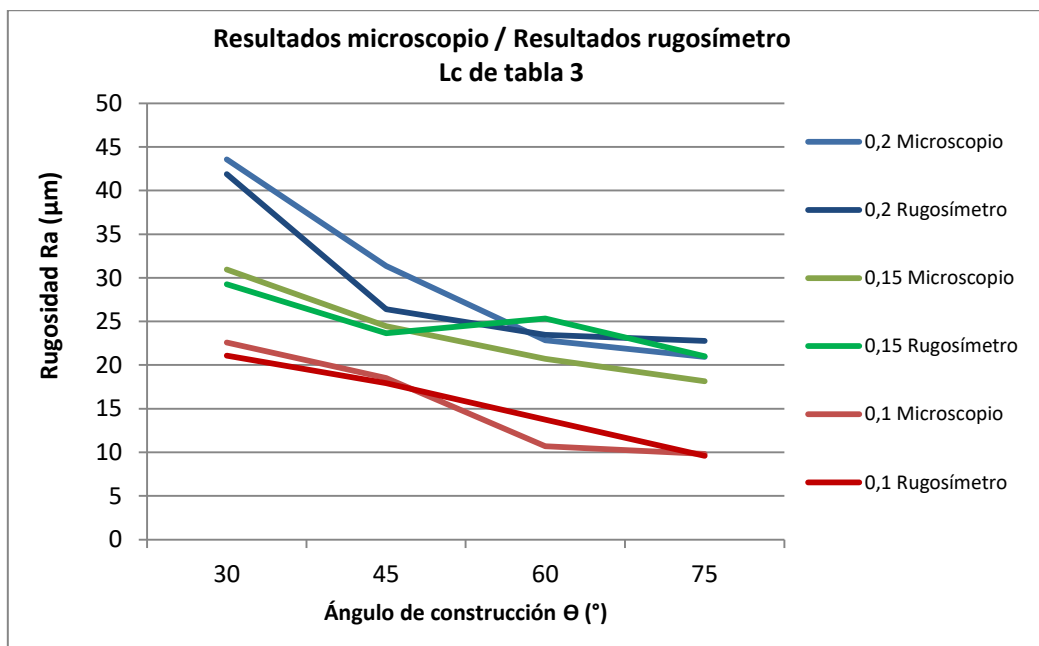


Figura 58. Comparación de los resultados de los dos equipos de medición (Lc según tabla 3)

- Resultados de SLS

En este apartado se muestran los resultados de las piezas de SLS medidas con el rugosímetro.



Pieza de 4 caras (30-60-45-75) Lc 8000 $\mu\text{m}$	0,2 mm	0,1 mm
30°	48,85 $\mu\text{m}$	11,91 $\mu\text{m}$
45°	14,27 $\mu\text{m}$	7,31 $\mu\text{m}$
60°	14,31 $\mu\text{m}$	7,07 $\mu\text{m}$
75°	12,54 $\mu\text{m}$	6,70 $\mu\text{m}$

Tabla 21. Resultados experimentales medios obtenidos con el rugosímetro para las piezas limpias con abrasivo SLS

De nuevo los resultados obtenidos con el rugosímetro son similares a los obtenidos con el microscopio Alicona como se puede apreciar en la siguiente gráfica.

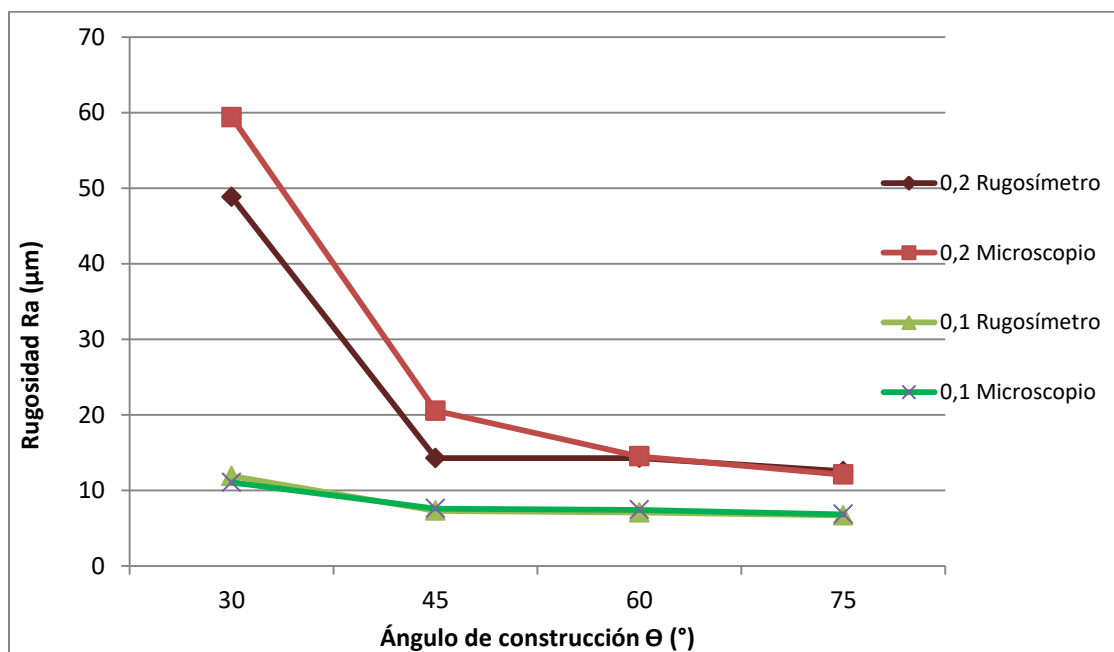


Figura 59. Comparación de los resultados de los dos equipos de medición(SLS)

Se comprueba que existe gran similitud entre los resultados logrados con ambos métodos de medición, no obstante, existe un pico de rugosidad para el ángulo de 30°, que como se ha dicho antes, es una superficie que se ha visto dañada por el abrasivo de forma irregular, por lo que la medición de la rugosidad varía según la parte de la superficie en la que se trabaje.

- **Resultados de Polyjet**

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para la tecnología de Polyjet.

Piezas de 4 caras Lc 8000 $\mu\text{m}$	16 $\mu\text{m}$	96 $\mu\text{m}$	192 $\mu\text{m}$
30°	6,14 $\mu\text{m}$	10,86 $\mu\text{m}$	25,60 $\mu\text{m}$
45°	10,35 $\mu\text{m}$	17,01 $\mu\text{m}$	11,36 $\mu\text{m}$
60°	13,94 $\mu\text{m}$	16,04 $\mu\text{m}$	19,09 $\mu\text{m}$
75°	16,68 $\mu\text{m}$	18,35 $\mu\text{m}$	19,13 $\mu\text{m}$

Tabla 22. Resultados experimentales medios obtenidos con el rugosímetro para las piezas Polyjet

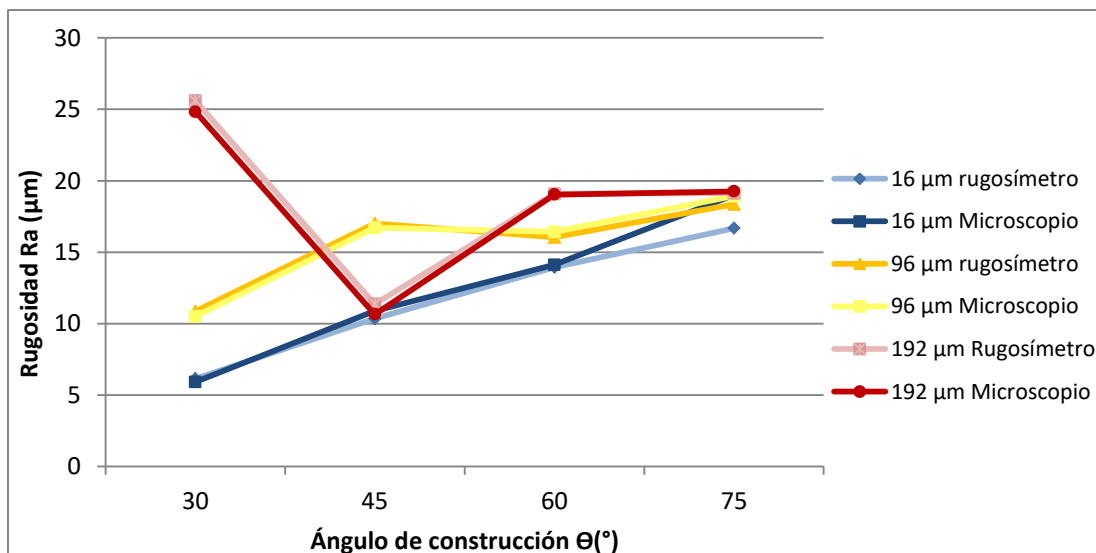


Figura 60. Comparación de los resultados de los dos equipos de medición (Polyjet)

Como se puede ver en la gráfica anterior, los resultados obtenidos con ambos equipos de medición son muy similares, lo que ocurre también con las otras tecnologías. Este hecho, sirve de apoyo a la validación de las medidas anteriores realizadas con el microscopio.

## 5.6 Comparación de piezas que no dependen del ángulo de construcción

Se realiza la comparación de unas piezas más complejas y que no se basan en el efecto de escalonamiento como las anteriores. En el **Anexo 15** se observa que la rugosidad hallada para la pieza senoidal es similar a la teórica para todos los casos, la pieza esférica obtiene valores parecidos para todas las tecnologías y la pieza del patrón triangular obtiene resultados experimentales de rugosidad

más pequeños de los esperados, debido a defectos en la fabricación que no permiten conseguir los 0,6 mm de profundidad de los triángulos. El análisis completo de estas figuras se muestra en el **Anexo 15** y los resultados completos de las mediciones se encuentran en el **Anexo 11**.

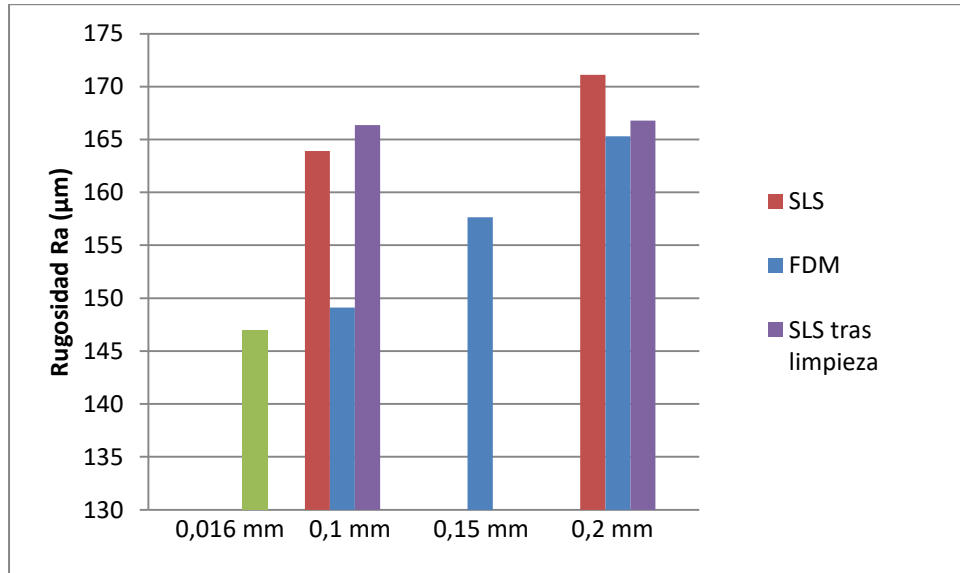


Figura 61. Comparación de resultados de piezas esféricas

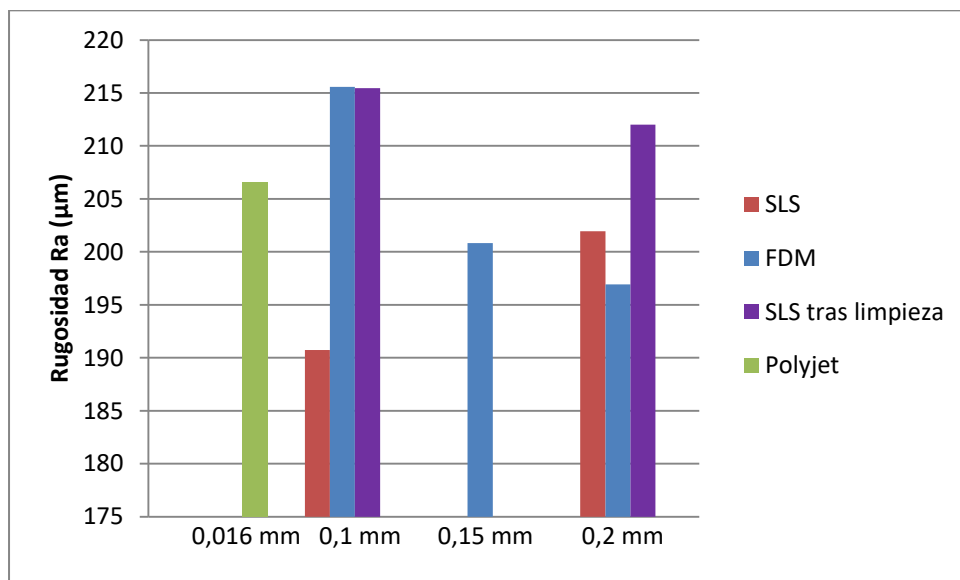


Figura 62. Comparación de resultados de piezas de patrón triangular

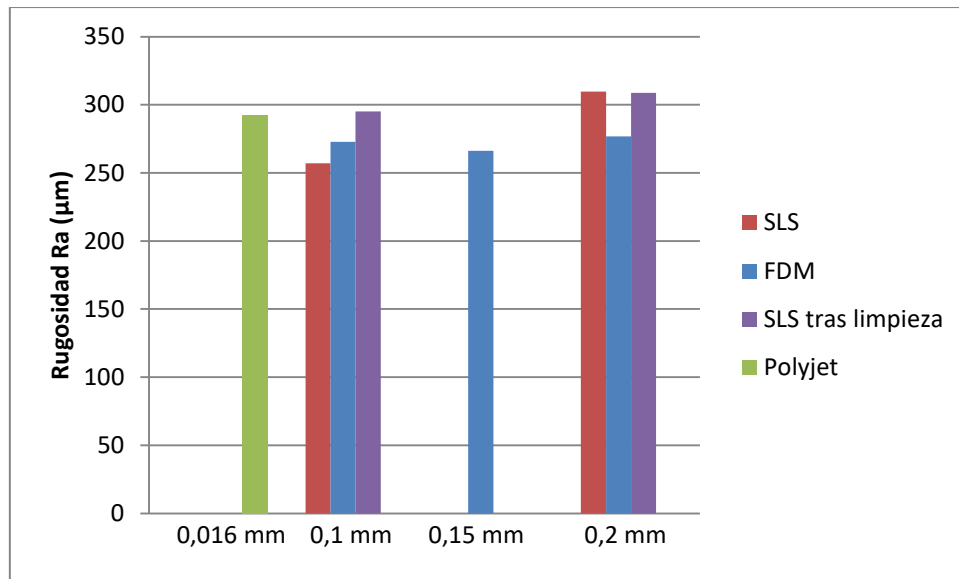


Figura 63. Comparación de resultados de piezas de forma senoidal

## 5.7 Comparación entre tecnologías de fabricación

Como se ha visto en los apartados anteriores, los resultados de rugosidad experimentales obtenidos de FDM siguen una tendencia muy clara, ya que la forma de su perfil se parece mucho al escalonado que se calcula teóricamente. La tecnología SLS comparte la misma tendencia anterior, aunque el perfil del escalonado se encuentra difuminado por culpa del polvo que queda adherido en la superficie. Para la tecnología de Polyjet no se puede describir una tendencia similar a las anteriores, ya que se pierde el escalonado a consecuencia de la resina que queda acumulada en la superficie.

Por todo ello, la comparación entre los resultados de las piezas fabricadas con las distintas tecnologías de fabricación (FDM, SLS y Polyjet) no aporta información útil para este estudio, ya que las superficies resultan aleatorias para las piezas de SLS y Polyjet, debido en ambos casos al material sobrante que no permite distinguir la rugosidad del escalonado buscado. Para observar si estos defectos superficiales se deben a picos o valles y para entender mejor el efecto del postprocesado se realiza un análisis de las curvas de Abbot-Firestone (**Anexo 12**) para los ángulos de 45°.

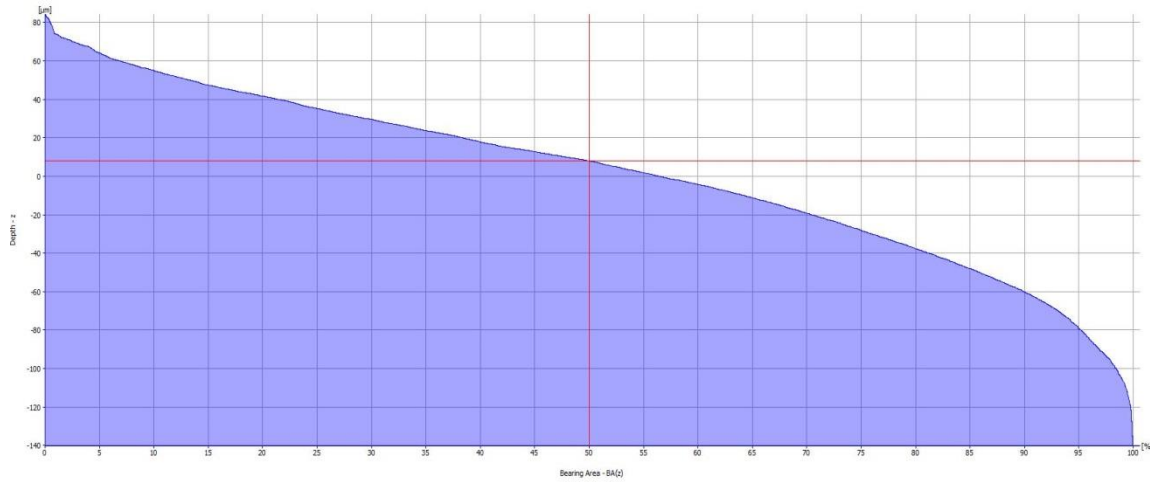


Figura 64. Curva de Abbot-Firestone para FDM (45° y 0,2 mm de espesor de capa)

Parámetros de la curva (Figura 64):	
Rk: 113,48 $\mu\text{m}$	Rpk: 14,01 $\mu\text{m}$ Rvk: 49,09 $\mu\text{m}$
Rmr1: 4,89%	Rmr2: 85,5%
Longitud: 1,6 cm	Lc: 8 mm

Tabla 23. Parámetros de la curva de FDM

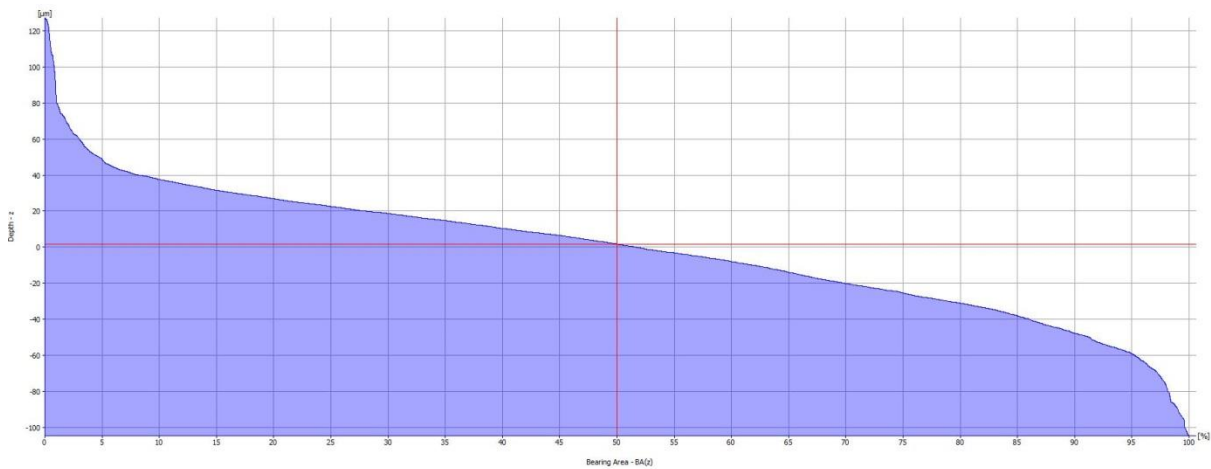


Figura 65. Curva de Abbot-Firestone para SLS antes de la limpieza (45° y 0,2 mm de espesor de capa)

Parámetros de la curva (Figura 65):	
Rk: 86,19 $\mu\text{m}$	Rpk: 45,57 $\mu\text{m}$ Rvk: 36,14 $\mu\text{m}$
Rmr1: 6,01%	Rmr2: 86,86 %
Longitud: 1,60 cm	Lc: 8,00 mm

Tabla 24. Parámetros de la curva de SLS antes de la limpieza

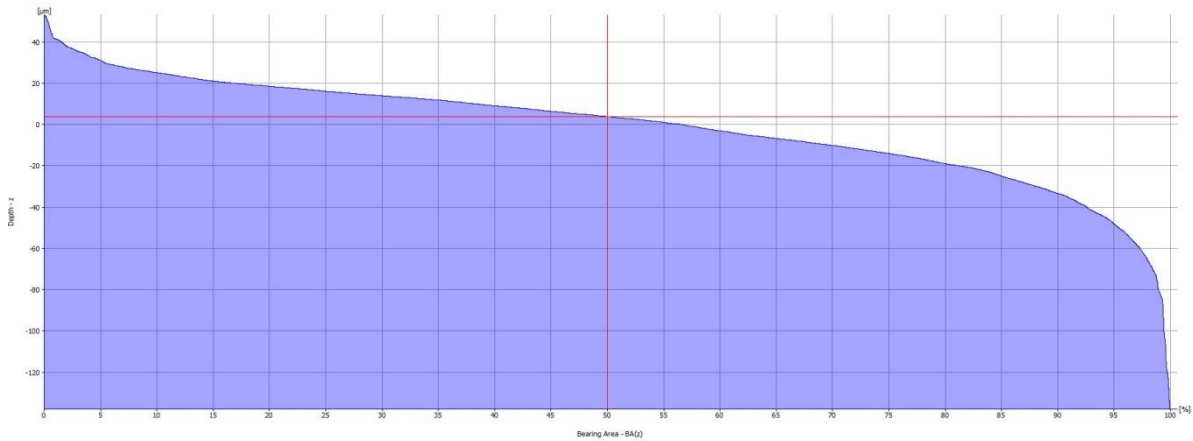


Figura 66. Curva de Abbot-Firestone para SLS después de la limpieza (45° y 0,2 mm de espesor de capa)

Parámetros de la curva (Figura 66):	
Rk: 49,72 $\mu\text{m}$	Rpk: 15,37 $\mu\text{m}$ Rvk: 42,97 $\mu\text{m}$
Rmr1: 6,36%	Rmr2: 82,48%
Longitud: 1,60 cm	Lc 8,00 mm

Tabla 25. Parámetros de la curva de SLS después de la limpieza

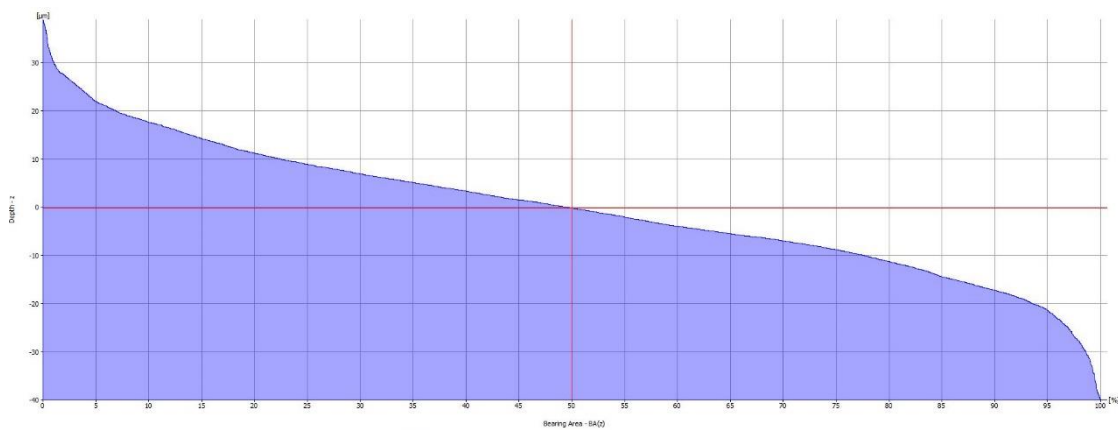


Figura 67. Curva de Abbot-Firestone para Polyjet (45° y 0,2 mm de espesor de capa)

Parámetros de la curva (Figura 67):	
Rk: 34,51 $\mu\text{m}$	Rpk: 11,62 $\mu\text{m}$ Rvk: 12,35 $\mu\text{m}$
Rmr1: 10,8%	Rmr2: 90,09%
Longitud: 1,60 cm	Lc: 8,00 mm

Tabla 26. Parámetros de la curva de Polyjet

Cualquier parámetro de rugosidad condensa la información de un perfil 2D en un número. La curva de Abbot-Firestone reordena la información de las alturas de los perfiles, por lo tanto, aporta mucha información.

Si se comparan los parámetros de las tres tecnologías, se observa que  $R_k$  es el parámetro de mayor magnitud en todas ellas, y mayor para la tecnología FDM, ya que  $R_k$  indica la altura entre los picos y valles del núcleo, que son los producidos por el escalonado y este hecho era de esperar, ya que las superficies se aproximan a perfiles periódicos. Los valles y picos que sobresalen del núcleo, son los debidos a los defectos.

En la tecnología Polyjet los valores en general resultan más pequeños, por lo que se puede decir que se trata de una superficie más suave, debido a la resina que queda adherida a la superficie.

En la curva de la tecnología SLS antes de realizar la limpieza, destaca que existe un valor de  $R_{pk}$  mayor que después de la limpieza, y sucede alrevés con  $R_{vk}$ , esto se debe a que la limpieza con abrasivo provoca impactos en la superficie de las crestas y al quitar material de la superficie aumenta la profundidad de los valles.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se busca comparar la rugosidad definida en un cálculo teórico basado en el efecto de escalonado, creado por la formación de capas inherente a los procesos de fabricación aditiva. En general, todas las piezas obtienen resultados experimentales de rugosidad similares, aunque diferentes a los esperados, ya que el cálculo teórico idealiza el concepto de que la superficie de las piezas son un escalonado perfecto y no tiene en cuenta todos los factores que entran en juego en el proceso de fabricación, puesto que algunos de ellos no se pueden predecir. No obstante, la tecnología que obtiene resultados más cercanos a los teóricos y que más se aproxima a la forma escalonada en la que se basan los cálculos de predicción, es la FDM. Además, para esta tecnología, el cálculo optimizado que tiene en cuenta el redondeamiento de los filamentos obtiene resultados más próximos a la realidad.

Destaca que las piezas impresas con las tecnologías de fabricación de FDM y SLS siguen la misma tendencia; su rugosidad es mayor cuanto mayor es el espesor de capa y también cuanto menor es el ángulo de construcción. Sin embargo, las piezas fabricadas con tecnología Polyjet cambian de tendencia. Este cambio de tendencia de Polyjet y la diferencia de resultados de rugosidad con los teóricamente esperados, tanto de Polyjet como de SLS, es debido a los propios procesos de fabricación, que dejan material sobrante sobre las superficies, polvo en un caso y resina en el otro. Este suceso difumina el perfil de las rampas y no deja apreciar el escalonado. Para poder eliminar el polvo polimérico en las piezas de SLS, se usa un abrasivo de limpieza que permite eliminar el material sobrante de la superficie, ésta puede resultar perjudicada de forma irregular y aleatoria, lo que impide la predicción de la rugosidad.

Otra de las conclusiones obtenidas en el proceso de medición de las piezas, es la dificultad de elección de la longitud de corte para realizar las mediciones experimentales, se hace de diferentes formas dependiendo del tipo de superficie: atendiendo a la tabla 1 o a la tabla 3, en función de si se consideran perfiles periódicos, ambas tablas pertenecientes a la norma ISO 4288. Para los perfiles de rugosidad de FDM se obtienen resultados más próximos a los teóricos cuando se considera la superficie un perfil periódico y se utilizan las longitudes de corte elegidas de la tabla 3. Sin embargo, las superficies de las otras dos tecnologías no pueden considerarse periódicas debido a la acumulación de material excedente, y para éstas se analizan los resultados con la longitud de corte de la tabla 1 (8000  $\mu\text{m}$ ).

A la hora de comparar los resultados teóricos y los experimentales, las mayores desviaciones siempre se encuentran en los espesores de capa más pequeños y para los ángulos mayores. Esto es debido a que el cálculo teórico obtiene resultados de rugosidad más pequeños para estos casos, y se puede pensar que están siendo demasiado idealizados, ya que existen más parámetros del proceso de fabricación que no se están teniendo en cuenta.

Resumiendo, las conclusiones obtenidas hacen ver que las mayores rugosidades se obtienen con la tecnología FDM, aunque también son las más predecibles y más fáciles de equiparar al modelo. Por otro lado, la SLS y la Polyjet consiguen una rugosidad mucho menor a la esperada, y además la calidad superficial de las piezas fabricadas con Polyjet es excelente para su espesor de capa de 16  $\mu\text{m}$ .

Este trabajo puede servir de base para futuras investigaciones sobre la calidad superficial y la rugosidad obtenida en distintas tecnologías de fabricación aditiva.



## 7. Bibliografía

- [1] Fabricación aditiva, Mizzar alcor grupo, DOI:, «<https://mizaradditive.com/que-es-fabricacion-aditiva/>».
- [2] 3D PRINTING TWI, DOI:, «<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons#Consof3DPrinting>».
- [3] Dzullijah Ibrahim, Songlin Ding y Shoujin Sun, «Roughness Prediction for FDM Produced Surfaces,» de *International Conference Recent trends in Engineering & Technology (ICRET 2014)*, Batam (Indonesia), 2014.
- [4] J.A. Yagüe-Fabra, S. Ontiveros, R. Jiménez, S. Chitchian, G. Tosello, S. Carmignato, «A 3D edge detection technique for surface extraction in computed tomography for dimensional metrology applications,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, p. 532, 2013.
- [5] Townsend, Andrew, «Surface-specific additive manufacturing test artefacts,» University of Huddersfield, United Kingdom, 2018.
- [6] H.Bikas, A.K.Lianos, P.Stavropoulos, «A design framework for additive manufacturing,» de *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019.
- [7] BQ DOI:, «<http://impresorad3d.com/bq-witbox-2/>».
- [8] STRATASYS, «Especificaciones Impresora OBJET EDEN 350V».
- [9] SINTERIT, «Especificaciones Impresora LISA PRO».
- [10] «Práctica de modelado y análisis de sistemas de medición,» Universidad de Zaragoza.
- [11] «Manual Alicona. Installation Training, InfiniteFocusSL,» 5-01-2017.
- [12] «Guión de prácticas. Rugosímetro. Asignatura de Ingeniería de fabricación. Universidad de Zaragoza».
- [13] MitutoyoSJ-201, DOI:, «[https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/mitutoyo-sj-201p\\_manual.pdf](https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/mitutoyo-sj-201p_manual.pdf)».
- [14] ISO 5436, «Geometrical Product Specifications (GPS), Surface texture: Profile method; Measurement standards».
- [15] Irene Buj-Corral, Alejandro Domínguez-Fernández y Ramón Durán-Llucià, «Influence of Print Orientation on Surface Roughness in Fused Deposition Modeling (FDM) Processes,» 2019.
- [16] ISO 4288:1998, «Geometric Product Specification (GPS) - Surface texture \_ Profile method: Rules and procedures for the assessment of surface texture».

- [17] T. G. Gawel, «Review of Additive Manufacturing Methods,» University of Silesia in Katowice, 2020.
- [18] DOI, « <https://educacion.bq.com/pla/>».
- [19] T. 3. P. S. STRATASYS COMPANY™, «Material para impresión 3D RIGUR».
- [20] SINTERIT, «Especificaciones material LISA PRO PA12 Smooth».
- [21] DOI, «[https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms\[focus\]=007](https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms[focus]=007)».
- [22] DOI, «<https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/terms-and-standards>».
- [23] S. DOI, «<https://www.skf.com/es/products/industrial-seals/hydraulic-seals/general-technical-information/counter-surface-finish-properties>».
- [24] D. M. Metrology, «<https://michmet.com/surface-roughness-analysis-blog-stylus-xy-parameters.htm>».
- [25] D. M. metrology, «[https://michmet.com/3d\\_s\\_functional\\_parameters.htm](https://michmet.com/3d_s_functional_parameters.htm)».

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN [17].....	64
ANEXO 2. ESTADO DEL ARTE .....	71
1. Patrones para el estudio de la superficie [5].....	71
2. Predicción de la rugosidad para superficies producidas por FDM [3].....	73
3. Marco de diseño para fabricación aditiva [6].....	76
ANEXO 3. EQUIPOS DE IMPRESIÓN Y MATERIALES.....	80
ANEXO 4. EQUIPOS DE MEDICIÓN.....	85
ANEXO 5. PARÁMETROS DE MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD [21] [22].....	88
ANEXO 6. CÁLCULO TEÓRICO .....	94
ANEXO 7. PLANOS DE LAS PIEZAS.....	96
ANEXO 8. IMÁGENES DE LAS PIEZAS FABRICADAS.....	104
ANEXO 9. COMPARACIÓN DE DESVIACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES CON TEÓRICOS (VARIAS LC) .....	114
ANEXO 10. IMÁGENES DE FILTRADO SEGÚN LA LONGITUD DE CORTE .....	119
ANEXO 11. MEDIDAS COMPLETAS .....	121
ANEXO 12. PARÁMETROS DE LA CURVA DE ABBOTT-FIRESTONE.....	130
ANEXO 13. JUSTIFICACIÓN PROBLEMÁTICA PIEZAS BLANCAS .....	133
ANEXO 14. PRESENTACIÓN DE LAS PIEZAS DISEÑADAS.....	134
ANEXO 15. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE PIEZAS SINGULARES .....	141
ANEXO 16. COMPARACIÓN DE PIEZAS DE FDM CON SEGUNDA IMPRESORA .....	144

## ANEXO 1. TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN [17]

En el ámbito de la Fabricación Aditiva (FA) existen diferentes tipos de tecnologías que se pueden clasificar dependiendo del tipo de material de entrada (sólido, pasta, líquido o polvo) y del proceso de unión empleado (Figura 1).

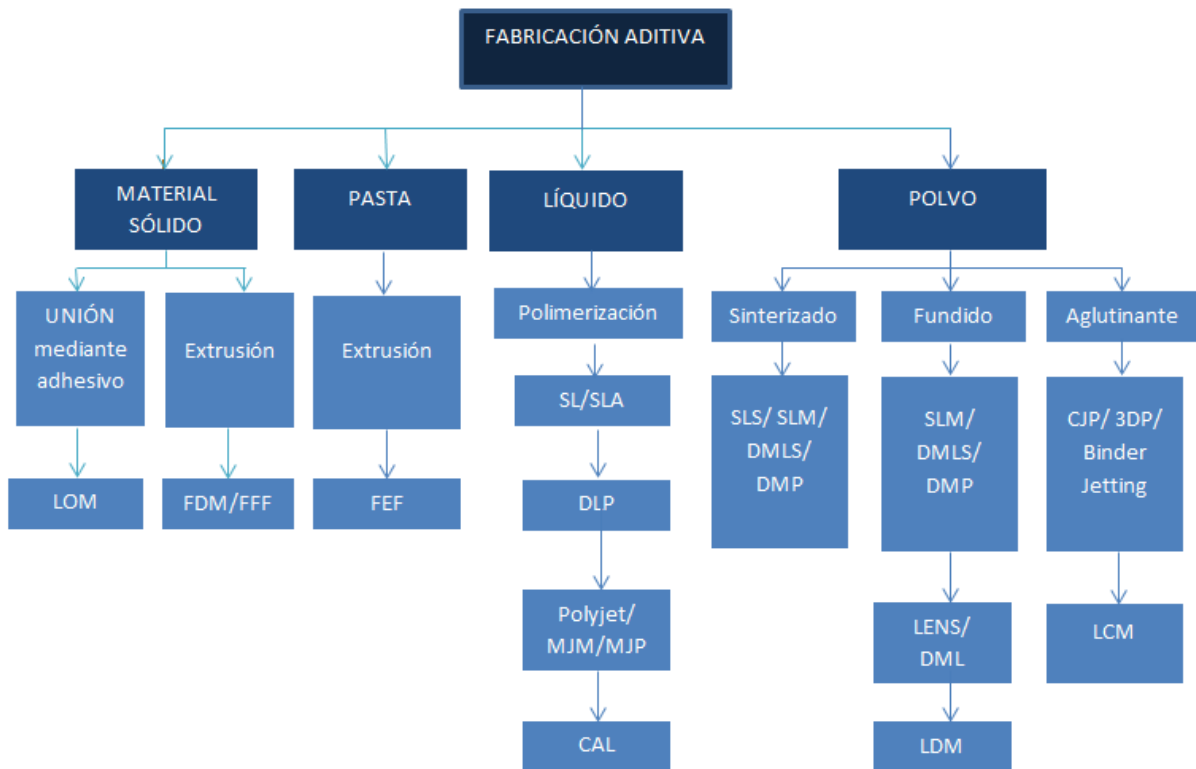


Figura 1. Esquema de clasificación de tecnologías de fabricación aditiva [17]

Como resumen, los procesos que usan un material líquido de entrada implican un proceso de fotocurado (polimerización mediante una fuente de luz). Si se usa un material sólido o en forma de pasta, se trata de procesos de unión o fusión y si el material de entrada es polvo, el proceso a llevar a cabo será de sinterización y fusión.

- **Método FDM**

El método Fused Deposition Model (FDM) o Fused Filament Fabrication permite fabricar piezas a partir de materiales termoplásticos. El principio operativo del método FDM se muestra en la Figura 2. Actualmente es la tecnología de fabricación aditiva más común y disponible.

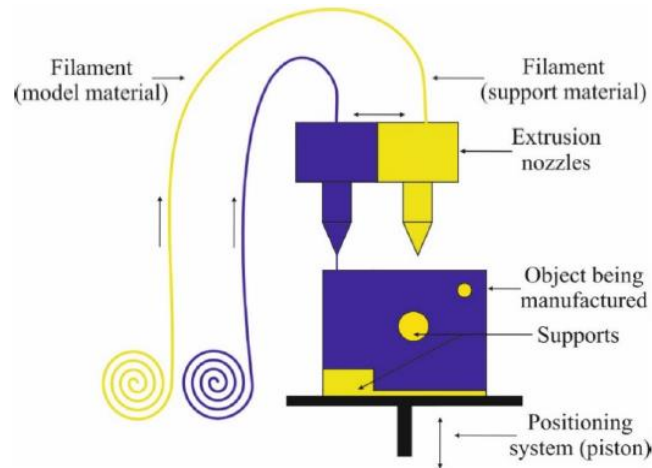


Figura 2. Esquema del proceso FDM [17]

En la actualidad, la tecnología FDM se utiliza para fabricar prototipos funcionales y modelos conceptuales de alta calidad, a partir de diversos materiales termoplásticos. Esta tecnología permite la aplicación de dos materiales en una construcción, este hecho resulta útil ya que el material de soporte normalmente tiene propiedades mecánicas más bajas que el resto de material que forma la pieza.

- **Métodos SL / SLA**

Stereolithography/Stereolithography Apparatus (SL / SLA), se trata de la tecnología más antigua de fabricación aditiva. El principio básico trata de la deposición de una capa de resina o fotorpolímero, posteriormente un láser de baja potencia polimeriza el contorno y el interior de la pieza fabricada. A continuación, se realiza el movimiento de la mesa de trabajo, que permite depositar las siguientes capas creando un proceso cíclico. El proceso de polimerización se debe al uso de una luz de longitud de onda específica.

En el método SLA el proceso se realiza de forma similar, con la diferencia de que la plataforma se eleva y entra en contacto con el tanque de resina o fotorpolímero fotosensible. Se construye un modelo capa por capa en la interfaz de la superficie de resina con la mesa de trabajo.

El esquema de funcionamiento de SL se muestra en la siguiente imagen (Figura 3).

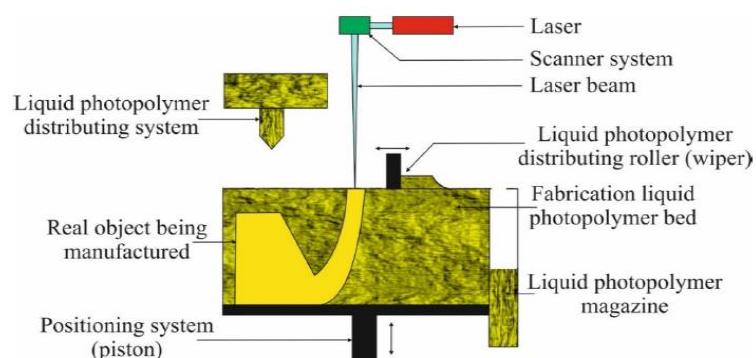


Figura 3. Esquema del proceso SL [17]

- **Métodos DLP**

Digital Light Processing (DLP) es una técnica muy similar al método SL, consiste en la polimerización de materiales fotosensibles (polímeros/resinas), pero se diferencia en la fuente de luz. En los métodos anteriores se utiliza un láser y en este caso se sustituye por un proyector DLP.

Una característica sobresaliente de este método es su extrema precisión dimensional (varias decenas de micrómetros), lo que proporciona una superficie muy fina. La precisión viene determinada por el tamaño de pixel, cuanto más pequeñas sean las dimensiones del píxel, mayor será la precisión geométrica. Este método posee algunas desventajas: la baja resistencia mecánica de las piezas fabricadas y la relación entre la distancia del proyector a la mesa de trabajo y la precisión; cuanto más lejos, más grande es el tamaño de pixel y peor es la calidad superficial. Actualmente, como solución a las desventajas antes mencionadas, los fabricantes aumentan la cantidad de proyectores para conseguir una mayor precisión geométrica.

- **Métodos PolyJet / MJM / MJP**

Polyjet, Multijet Modeling (MJM), Multijet Printing (MJP), son métodos muy semejantes. El método MJM se basa en la deposición de capas de fotopolímero mediante un cabezal de impresión con múltiples boquillas. A continuación se utiliza luz ultravioleta (UV) para realizar la polimerización de la capa. En este método es posible utilizar soportes solubles para estabilizar la pieza fabricada y también es posible usar varios materiales al mismo tiempo.

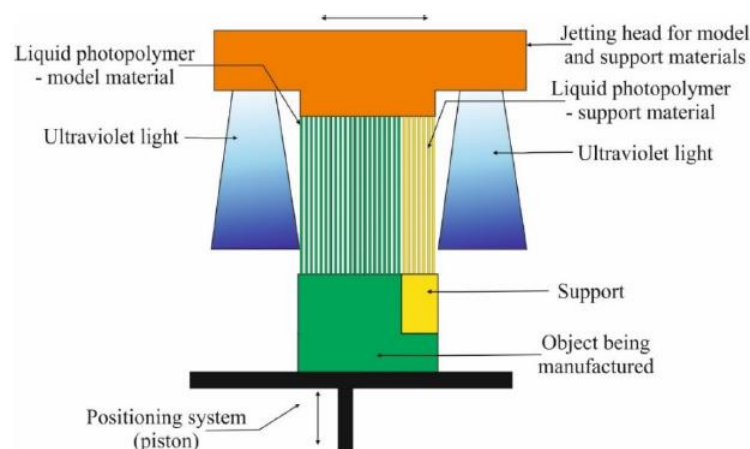


Figura 4. Esquema del proceso Multijet [17]

- **Métodos LOM**

Laminated Object Manufacturing (LOM) es un método cuyo principio de funcionamiento se muestra en la Figura 5. El proceso se realiza utilizando una lámina sobre la que se ha aplicado el laminado (pegamento activado por calor), después se suelda esta lámina a la mesa de trabajo mediante un rodillo caliente, el láser recorta el contorno de la pieza y parte en trozos más pequeños la parte exterior del contorno para poder eliminar el material sobrante de forma más fácil. Seguidamente la mesa de trabajo desciende y se procede a aplicar la siguiente capa. Se itera varias veces el proceso hasta ser completado.

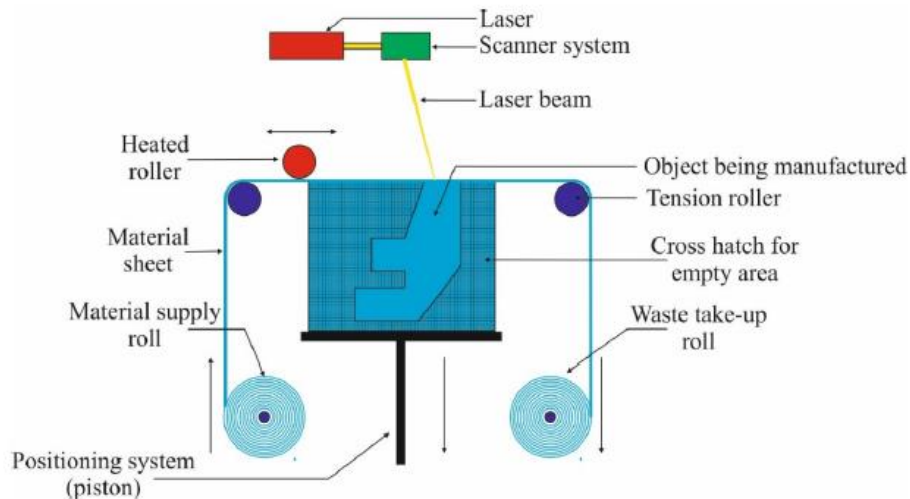


Figura 5. Esquema del proceso LOM [17]

- **CAL Method**

Computed Axial Lithography (CAL). En este método la pieza no se fabrica capa a capa como el método DLP, pero utiliza su proyector como fuente de luz. El método CAL fue inspirado en la tomografía computarizada. El principio de funcionamiento de esta tecnología se basa en la rotación de un cilindro con resina que se ve expuesto por el proyector DLP de forma continua y el ángulo de incidencia de la luz es calculado por el algoritmo. Los fotopolímeros que se usan en este método deben tener una alta viscosidad para minimizar el movimiento relativo entre la pieza y el precursor. Este método permite la impresión de piezas complejas sin soportes e imprimir piezas en objetos ya existentes, además, es mucho más rápido que otros métodos.

El principio de operación de la litografía axial computarizada se muestra en la Figura 6.

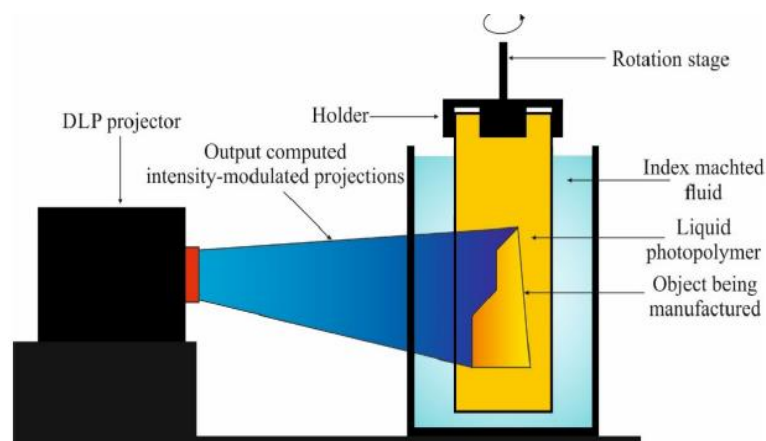


Figura 6. Esquema del proceso CAL [17]

- **Métodos SLS / SLM / DMLS / DMP / DML**

Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Direct Metal Printing (DMP), Direct Laser Melting (DML) son métodos que tienen un principio de funcionamiento muy similar, su principio básico es la sinterización o fusión de polvo capa por capa usando un láser. La Figura 7 muestra un diagrama del proceso SLS / SLM.

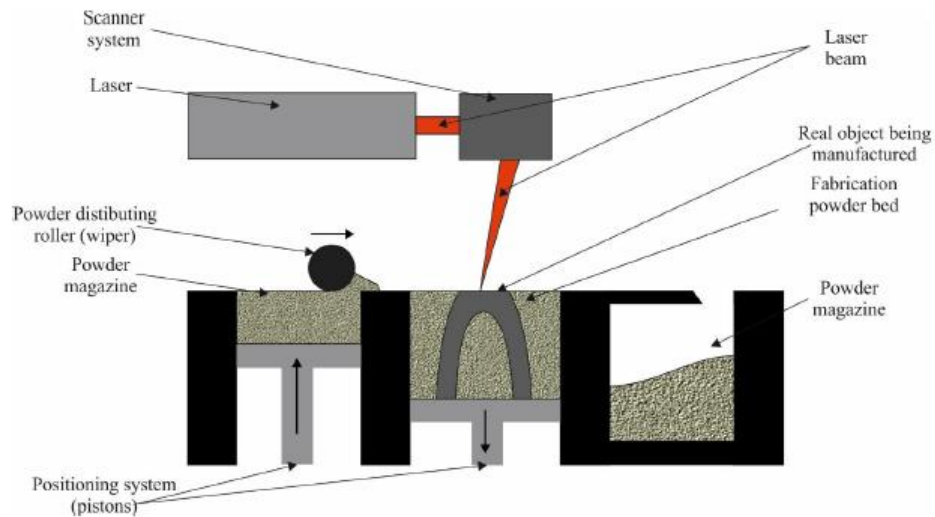


Figura 7. Esquema del proceso SLS/SLM [17]

El láser es el encargado de sinterizar o fundir el polvo según la potencia aplicada. Algunos parámetros importantes del proceso son: el tamaño, la velocidad y potencia del láser. El proceso se lleva a cabo en una atmósfera protectora (por ejemplo nitrógeno o argón).

El proceso sigue una dirección ascendente. En primer lugar, la plataforma se encuentra abajo y vacía, pero poco a poco se va llenando uniformemente de polvo desde el cajón adyacente, mientras se van sinterizando las distintas capas. Si existiera un exceso de polvo, se eliminaría a través del rodillo limpiador. Una vez completado el proceso, el polvo es tamizado y puede recuperarse para ser usado en una siguiente impresión.

- **Método EBM**

Electron Beam Melting (EBM) o Fusión por haz de electrones es un método en el cual, el polvo metálico se derrite gracias a la energía térmica creada por un haz de electrones, que proviene de un cañón de electrones equipado con un cátodo de fibra de tungsteno. Este proceso se realiza en vacío y en dirección ascendente. El principio operativo del método EBM se muestra en la Figura 8.

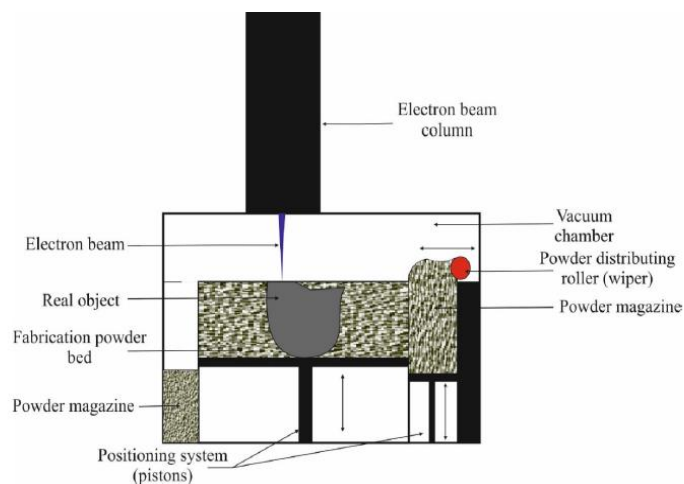


Figura 8. Esquema del proceso EBM [17]



- **Método de inyección CJP / 3DP / Binder Jetting Method**

Los métodos Color Jet Printing (CJP) o impresión por chorro de color, Three Dimensional Printing (3DP) o impresión tridimensional y Binder Jetting, utilizan un método operativo muy similar. Se trata de un proceso en el que se combina material en polvo, con aglutinantes depositados mediante una boquilla en las áreas transversales de la pieza fabricada y de forma ascendente, capa a capa hasta conseguir el modelo final. Posteriormente se calienta la pieza para eliminar el aglomerante residual y por último se sinteriza. El principio de funcionamiento del método 3DP se muestra en la Figura 9.

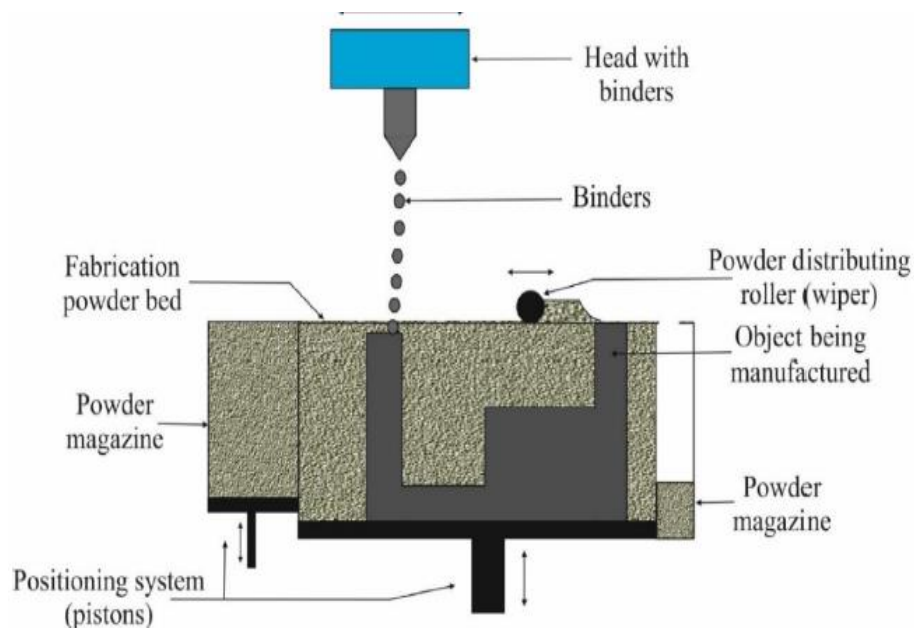


Figura 9. Esquema del proceso 3DP [17]

- **Métodos LENS / LMD**

Los métodos Laser Engineered Net Shaping (LENS) o modelado de redes con tecnología láser y Laser Metal Deposition (LMD) deposición de metales por láser comparten características en su método de funcionamiento, sin embargo, LMD tiene una precisión menor. Su principio de funcionamiento se muestra en la Figura 10.

El material de entrada de este método es polvo fundido, suministrado por una boquilla que se deposita capa sobre capa en la mesa de trabajo, la cual es la responsable del movimiento.

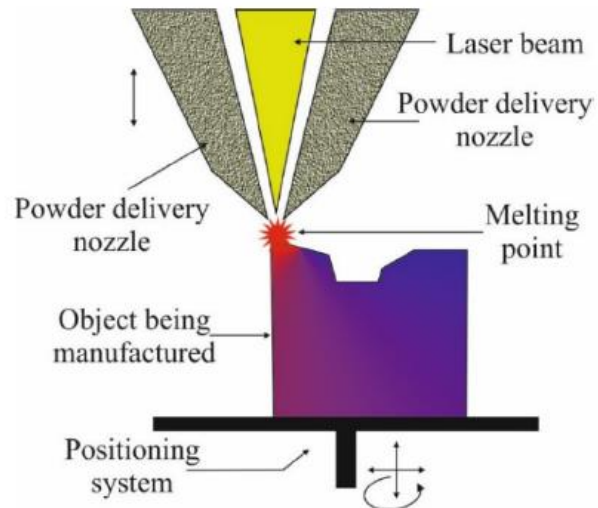


Figura 10. Esquema del proceso LMD [17]

- **Método LCM**

The Lithography-based Ceramics Manufacturing (LCM) o método de fabricación de cerámica basado en la litografía tiene un funcionamiento similar al método SLA. Utiliza un láser como fuente térmica y permite la fabricación de piezas de cerámica. Este método resulta complicado debido a las propiedades del material cerámico y se encuentran dificultades a la hora de conseguir la precisión dimensional adecuada por la porosidad y las contracciones térmicas.

## ANEXO 2. ESTADO DEL ARTE

### 1. Patrones para el estudio de la superficie [5]

Hoy en día existen diversos diseños de dispositivos de evaluación de elementos realizados con fabricación aditiva (AM). Estos artefactos se han diseñado principalmente para la evaluación de la forma y las dimensiones. Los patrones fabricados en la Universidad de Huddersfield son de los pocos que se han diseñado para la evaluación específica de la superficie en piezas de fabricación aditiva de metales [5]. A continuación, se realiza un estudio de los mismos.

Los patrones presentados en [5], están diseñados para proporcionar el acceso a las superficies de comprobación y pueden tener medidas más compactas ya que no requieren de las grandes dimensiones necesarias para la precisión en medidas dimensionales y de forma. Se han tenido en cuenta los límites de tamaño para facilitar mediciones más precisas, también se han diseñado considerando las restricciones impuestas por las distintas técnicas de medición convencionales, como por ejemplo, microscopía de variación focal, perfilometría con palpador, microscopía confocal y electrónica de barrido.

Estos patrones han sido construidos para suministrar más información de la que puede ser proporcionada por una superficie plana simple, pudiendo obtener resultados de distintas geometrías. Además, se han fabricado con orientación tanto horizontal como vertical para poder estudiar sus diferencias.

Se trata de una serie de tres artefactos de evaluación creados por la tecnología Powder Bed Fusion (PBF). Estos artefactos están diseñados para proporcionar información perteneciente a la superficie fabricada. Además, permiten varias posibilidades de medida, como el análisis de la desviación, generación de datos de los parámetros de textura de superficie y resolución. Pueden utilizarse individualmente o en grupo dependiendo de la aplicación específica.

Los artefactos son:

- **AMSA1**

Es el primer artefacto (Figura 1) e incluye tres áreas de medición:

- La primera se trata de un área de superficie plana y paralela a la base, diseñada para la medición de la superficie y caracterización del perfil.
- La segunda es un área que incluye un plano de gradiente 1:25. Está diseñada para permitir el estudio del borde de transición de la capa de construcción.
- La tercera es un área que incluye una serie de diez cilindros de diámetro 2,5 mm y de diferentes alturas. La diferencia de altura entre cilindros consecutivos es equivalente al espesor de capa de construcción. Se reproduce la diferencia entre las alturas sucesivas y se estudian las diferencias de altura en relación con el espesor de capa.

Gracias a este primer artefacto se puede realizar una inspección metalográfica de cada superficie, examinar la porosidad y la calidad después de un grabado y pulidos adecuados.



Figura 1. AMSA1 [5]

- **AMSA3**

Incluye ranuras en forma de estrella en la superficie superior (Figura 2).

Ha sido diseñado específicamente para la evaluación y corrección de errores sistemáticos. Los rayos de la estrella se vuelven indistinguibles a cierta distancia radial del centro cuando se alcanza el límite de resolución lateral. También se incluye una sección de cuña con anillos concéntricos para la ayuda en la ubicación visual del límite de resolución.



Figura 2. AMSA3 [5]

- **AMSA4**

Este artefacto (Figura 3) incluye tres secciones y cada una cuenta con una estructura sinusoidal de longitud de onda decreciente y con amplitud constante. Las ecuaciones de las formas sinusoides son:

(1) Amplitud 800  $\mu\text{m}$  pk-pk

$$Y = \frac{\sin\left(\left(\frac{x}{4}\right)^2\right)}{2.5} \text{ mm}$$

(2) Amplitud 400  $\mu\text{m}$  pk-pk

$$Y = \frac{\sin\left(\left(\frac{x}{2}\right)^2\right)}{5} mm$$

(3) Amplitud 200  $\mu m$  pk-pk

$$Y = \frac{\sin(x^2)}{10} mm$$

Este artefacto está diseñado para dar una indicación visual del límite de resolución y la desviación de construcción cuando se comparan con el modelo CAD.



Figura 3. AMSA4 [5]

Los dispositivos propuestos son pequeños y económicos de construir por lo que se podrían incluir en cada construcción de AM. Incluyen una trazabilidad de fabricación incorporada y han sido diseñados para una fácil medición en equipos de metrología estándar. Aunque se realicen cambios en el proceso, el diseño del artefacto se puede adaptar a aplicaciones específicas para producir piezas con mayor precisión.

Tienen múltiples usos, como la evaluación de la orientación óptima en una construcción, la verificación del proceso, y la generación de datos sobre la cantidad y ubicación de material adicional para obtener información sobre el postprocesado necesario, con el fin de realizar la limpieza completa de las superficies.

## 2. Predicción de la rugosidad para superficies producidas por FDM [3]

La tecnología de modelado por deposición fundida (FDM) incluye muchas ventajas en aplicaciones industriales, ya que es una técnica de fabricación aditiva establecida para crear prototipos funcionales a partir de modelos CAD. El uso más generalizado en las empresas es el de prototipado rápido o Rapid manufacturing (RM), aunque requiere la mejora de la calidad de las piezas fabricadas, ya que las piezas deben cumplir con las tolerancias geométricas requeridas y la rugosidad superficial se ha convertido en el problema principal.

Para cumplir con el nivel de calidad superficial requerida, es posible que se requieran operaciones que muy a menudo se ejecutan a mano, lo que resulta en un aumento de costes y mayor consumo de tiempo. Por todo ello, se han realizado muchas guías para predecir la rugosidad de una superficie.

Predecir la calidad de la superficie es útil para determinar las estrategias de fabricación y permite el cumplimiento de las especificaciones de diseño. En este artículo se revisan algunos modelos de predicción de rugosidad superficial para el proceso FDM:

- **Modelo de Pandey**

Gracias a sus observaciones se identificaron tres puntos principales:

- El grosor de la capa y la orientación de la construcción son las dos variables más significativas que afectan al acabado superficial.
- Los perfiles del borde de una pieza fabricada capa a capa con el sistema FDM, son parabólicos.
- El efecto del radio de curvatura sobre la rugosidad de la superficie puede considerarse independiente, ya que varía dentro del 5% en un amplio rango de valores de curvatura.

Pandey propuso un método semi-empírico basado en estas observaciones. Aproximando el perfil del borde de la capa mediante una parábola y la altura de 30-35% de la longitud base. La expresión resultante para Ra viene dada por la ecuación:

$$Ra(\mu m) = (71 - 93) \frac{t(mm)}{\cos\theta} \quad (1)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de construcción en grados y t es el espesor de la capa depositada en mm.

Para las piezas con una orientación de construcción entre  $70^\circ$  y  $90^\circ$ , la rugosidad de la superficie se calculó asumiendo una variación lineal entre Ra ( $70^\circ$ ) y Ra ( $90^\circ$ ) que viene dada por la ecuación:

$$Ra(\mu m) = \frac{1}{20} (90Ra(70^\circ) - 70Ra(90^\circ) + \theta(Ra(90^\circ) - Ra(70^\circ))) \quad (2)$$

$$70^\circ \leq \theta < 90^\circ$$

La rugosidad para la superficie horizontal ( $\theta=90^\circ$ ) se idealizó mediante un semicírculo con una longitud de base t y una altura de  $0.5*t$  representada por la siguiente ecuación:

$$Ra(\mu m) = 112.5 * t(mm) \quad (3)$$

$$\theta = 90^\circ$$

Para las superficies orientadas hacia abajo en un rango entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , se requiere la aplicación de estructuras de soporte y la rugosidad de la superficie está representada por la siguiente ecuación:

$$Ra(\mu m) = Ra(\theta - 90)(1+\omega) \quad (4)$$

$$90^\circ < \theta \leq 180^\circ$$

Donde  $\omega$  es un parámetro de ajuste adimensional y se elige 0,2 para los sistemas FDM.

- **Modelo de Ahn**

Para varios procesos de RM, la rugosidad de la superficie varía según el rango de ángulos de la superficie. En la siguiente ecuación se expresa la distribución de la rugosidad de la superficie en términos de ángulo de la superficie:

$$Ra = \frac{A}{W} = \frac{1000t}{2} \left| \frac{\cos((90-\theta)-\phi)}{\cos\phi} \right| \quad (5)$$

$$0^\circ < \theta \leq 180^\circ$$

Donde  $\phi$  es el ángulo del perfil de la superficie en grados, A el área del escalón y W el ancho del escalón como se muestra en la siguiente imagen.

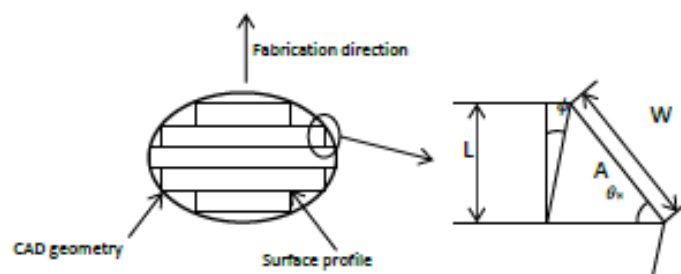


Figura 4. Parámetros del modelo de Ahn [3]

Sin embargo, la distribución real de la rugosidad superficial es diferente de la rugosidad teórica. Esto se debe a varios factores, como el efecto de escalonamiento, las rebabas del soporte, las propiedades del material y los atributos del proceso.

Por lo tanto, la rugosidad de la superficie real se puede calcular mediante la ecuación:

$$R_{\text{actual}} = R_{\text{step}} + R_{\text{burr}} + R_{\text{material}} + R_{\text{process}}$$

Donde  $R_{\text{step}}$  representa la parte de la rugosidad real debida al efecto escalera,  $R_{\text{burr}}$  debido a las rebabas formadas en el área de soporte,  $R_{\text{material}}$  la rugosidad debida a las diferentes propiedades del material de construcción y  $R_{\text{process}}$  debido a las características debidas al proceso de construcción.

Por lo tanto, Ahn propuso la siguiente expresión:

$$R(\theta) = R(\theta_p) + \frac{R(\theta_n) - R(\theta_p)}{\theta_n - \theta_p}(\theta - \theta_p) \quad (6)$$

Donde  $R(\theta_p)$  y  $R(\theta_n)$  son los valores de rugosidad medidos en el ángulo de la superficie anterior y de la siguiente,  $\theta_p$  y  $\theta_n$  respectivamente.

Otra expresión para el cálculo de la rugosidad del perfil:

$$Ra = \frac{1000t}{4} \cos(90 - \theta) - \frac{(R_1^2 + R_2^2)(1 - \frac{\pi}{4})\theta}{1000t} + \frac{(R_1^2 + R_2^2)(1 - \frac{\pi}{4})^2}{(1000t)^3} \tan(90 - \theta) \sin(90 - \theta) \quad (7)$$

Donde  $R_1$  es el radio de empalme y  $R_2$  es el radio de esquina, ambos en milímetros, como se muestra en la siguiente figura:

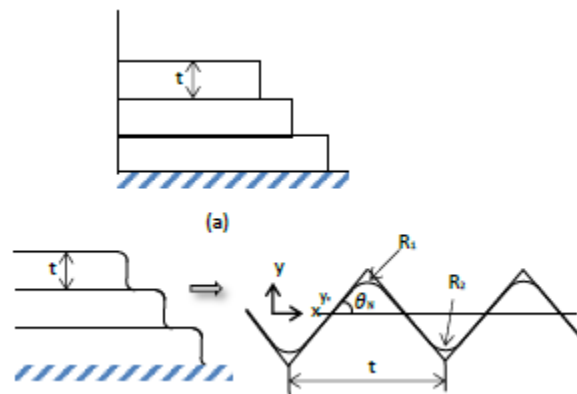


Figura 5. Radio de empalme y radio de esquina del modelo de Ahn [3]

En conclusión, algunos modelos de rugosidad superficial pueden reemplazar los métodos de prueba y error que son necesarios en la predicción de la calidad de la superficie y permiten un ahorro de tiempo y costes en la fabricación del producto.

### 3. Marco de diseño para fabricación aditiva [6]

Las numerosas ventajas de la fabricación aditiva (FA) conducen a una mayor flexibilidad geométrica y una mayor libertad de diseño, no obstante, se encuentran algunas limitaciones, por lo tanto, es muy importante cumplir algunas reglas, a la hora de realizar un diseño CAD para poder garantizar el éxito en la construcción y poder conseguir un uso completo de las capacidades de la FA.

Para realizar un marco de diseño de FA correcto hay que tener en cuenta varios aspectos que se presentan a continuación y se organizan en dos categorías principales: características geométricas de la pieza y parámetros del proceso.



## **1. Características geométricas**

### **1.1 Geometrías con partes sobresalientes.**

Dependiendo de la tecnología utilizada, se debe establecer una longitud máxima del voladizo y un ángulo de pendiente máximo, aun así, se pueden fabricar con éxito geometrías arriesgadas añadiendo estructuras de soporte. Sin embargo, un soporte compromete la calidad superficial de la pieza y disminuye la eficiencia del tiempo de construcción.

Por lo tanto, para aumentar la capacidad de fabricación, es deseable que la pieza solo tenga características geométricas autoportantes.

### **1.2 Voladizos.**

Los voladizos son cambios geométricos abruptos unilaterales, el límite de su longitud se ve afectado por numerosos factores como la naturaleza de la tecnología utilizada, el material e incluso la propia máquina. La forma más sencilla de resolver un voladizo horizontal, es reemplazarlo por voladizos en ángulo. Si no resultara factible, se podría recurrir a soportes.

### **1.3 Los voladizos en ángulo.**

Dependiendo de la tecnología utilizada, como en la de extrusión, no se pueden crear ángulos extremos ya que el material no se puede depositar en el aire. Para las tecnologías de fusión de lecho en polvo, el polvo que le rodea actúa como un soporte que le permite realizar ángulos más pronunciados. Aunque encontraremos inconvenientes de calidad superficial.

### **1.4 El Puente.**

En relación con las restricciones anteriores, se debe tener en cuenta la longitud máxima que puede salvar la máquina.

### **1.5 Agujeros y canales.**

Algunos parámetros importantes a tener en cuenta en los diseños de agujeros y canales es la longitud de estos y el espesor mínimo de pared, que puede variar según el proceso de FA usado.

### **1.6 Paredes delgadas.**

Otro parámetro a tener en cuenta es la planificación de las paredes. Por debajo del límite inferior del espesor permitido, la pared no se puede formar o, cuando se forma, sufrirá deformaciones, además para el diseño se debe utilizar un múltiplo entero del ancho fundamental de la trayectoria de la herramienta. Es conveniente introducir un indicador de llenado que asegure la densidad suficiente de una pared.

### **1.7 Algunas características pequeñas.**

Este tipo de detalles también puede generar problemas, por ello se define un diámetro mínimo que debe ser considerado en las fases de diseño.

## **2. Parámetros de proceso**

El diseño de FA tiene en cuenta la orientación de la construcción y el grosor de la capa.

### **2.1 El grosor de la capa.**

Es un factor que afecta tanto a la calidad de la impresión, como al tiempo de construcción necesario para completar la pieza. Con un espesor de capa más pequeño, se produce una pieza más detallada y se minimiza el efecto escalera. Además, se pueden eliminar posibles huecos ya que el archivo CAD se corta con más precisión. Por el contrario, con capas más gruesas, se reduce el tiempo de impresión, pero se consigue menos detalle. En cuanto al efecto escalera, otro factor que lo está provocando es el ángulo de inclinación. A medida que aumenta el ángulo, el coseno aumenta proporcionalmente el tamaño de la escalera. Una solución propuesta a este asunto es el corte adaptativo. Las áreas donde se necesita detalle se cortan con una altura de capa delgada, mientras que las áreas en las que su calidad no se ve afectada se cortan con una altura de capa más gruesa para contribuir a una construcción efectiva en cuanto al consumo de tiempo y de energía.

### **2.2 La orientación de la construcción.**

Es uno de los parámetros más cruciales. Determina qué características geométricas sobresalen de las geometrías, el volumen de estructuras de soporte necesarias y establece el eje en el que las propiedades mecánicas muestran un comportamiento anisotrópico, es decir, que sus características varían dependiendo de la dirección en el espacio.

## **3. Consideraciones de diseño**

A continuación, se muestran las consideraciones de diseño más importantes:

### **3.1 Propiedades mecánicas anisotrópicas.**

Existen dos enfoques para diseñar una pieza con un caso de soporte de una carga. La primera es orientar la pieza diseñada de tal forma que las cargas se reciban en la dirección que la tecnología FA tiene mayor resistencia mecánica. El otro enfoque es más sofisticado; optimizar la forma de la pieza teniendo en cuenta la anisotropía de resistencia mecánica.

### **3.2 Precisión (plano XY vs eje Z).**

La precisión de la propia máquina utilizada en el plano XY y el eje Z ha de tenerse en cuenta en la fase de diseño.

### **3.3 Rugosidad superficial.**

Es muy importante ya que determina la calidad superficial de la pieza y los procesos posteriores para lograr la calidad requerida. Además, ha de tenerse en cuenta que la rugosidad de la superficie no será uniforme en toda la pieza, debido al ángulo de inclinación de la geometría y la sinterización involuntaria bajo algunos voladizos. Otra razón de la falta de uniformidad son los huecos resultantes de un llenado insuficiente.

### **3.4 Tiempo de construcción.**

El tiempo está muy relacionado con la orientación, ya que las velocidades en el plano XY son mayores a las del eje Z. Por lo que cambiar la orientación afectará al tiempo total necesario para

completar la pieza. Las piezas orientadas horizontalmente por norma general se imprimirán más rápido que las orientadas verticalmente.

### **3.5 Área de sección transversal de la pieza.**

El área normal al vector de construcción afecta al proceso de fabricación de dos formas dependiendo de la tecnología utilizada, el primero se relaciona con la base de construcción de la máquina y el segundo está relacionado con las tensiones que se desarrollan en el resto de volumen al fabricar las nuevas capas. Las primeras capas de la construcción son cruciales. La pieza debe estar sujeta en la placa de construcción. Es por eso que se debe tener en cuenta la adherencia entre la superficie base de la pieza y la placa de la máquina. Además, a través de esa superficie se consigue la disipación del calor. Para las tecnologías que desarrollan tensiones residuales es conveniente mantener un área de sección transversal pequeña.

Para mejorar la eficiencia de la producción de FA, es aconsejable establecer un marco de diseño adecuado, ya que asegura la creación de un diseño óptimo y permite evitar iteraciones innecesarias.

## ANEXO 3. EQUIPOS DE IMPRESIÓN Y MATERIALES

- **IMPRESORAS UTILIZADAS**

### **IMPRESORA FDM [7]**

La primera impresora utiliza la tecnología de fabricación de modelado por deposición fundida o Fused Deposition Model (FDM), cuyo funcionamiento se basa exclusivamente en la extrusión de material polimérico.

Para la realización de las piezas creadas con la tecnología FDM, se utiliza la impresora Witbox2 de BQ que se puede ver en la Figura 1.



Figura 1. Impresora FDM Witbox2 de BQ

De esta impresora se puede destacar que cuenta con tres elementos principales: una cama de impresión, que en este modelo no es calefactada, un cabezal extrusor y una bobina de PLA, cuyo filamento es de 1,75 mm de diámetro.

Algunas características de la impresora se muestran en la siguiente tabla:

Información general	
<b>Volumen de impresión</b>	297 mm x 210 mm x 200 mm
<b>Resolución de capa</b>	20 $\mu$ m
<b>Velocidad de impresión</b>	200 mm/segundo
<b>Material</b>	PLA
<b>Otros materiales</b>	Corcho, bronce o madera
<b>Cama calefactada</b>	No
<b>Diámetro de filamentos</b>	1,75 mm

Tabla 1. Características de la impresora Witbox2 de BQ

### **IMPRESORA POLYJET [8]**

Se utiliza la impresora Objet Eden 350V de la empresa Stratasys para la realización de las piezas con la tecnología de polyjet. Se puede observar una imagen de la impresora en la Figura 2. Esta impresora

trabaja en base a la tecnología de Polyjet. El funcionamiento de esta tecnología de impresión se basa en la deposición de fotorpolímero en una bandeja de impresión y su posterior polimerización mediante luz ultravioleta (UV).

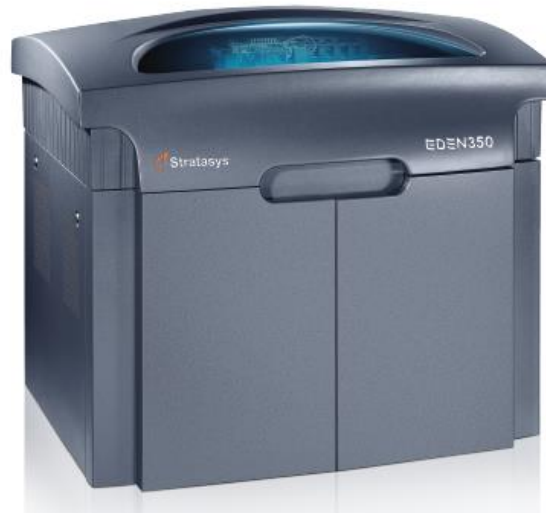


Figura 2. Impresora Polyjet Objet Eden 350 V de Stratasys

Algunas características de la impresora se muestran en la siguiente tabla:

Información general	
<b>Volumen de impresión</b>	350 mm x 350 mm x 200 mm
<b>Resolución de capa</b>	16 (µm)
<b>Material</b>	Polipropileno simulado Rigur™
<b>Otros materiales</b>	Material similar al caucho, Material de alta temperatura (RGD525), material rígido opaco, material transparente (RGD720).
<b>Generación automática de soporte</b>	Sí
<b>Tamaño de grano</b>	18 – 90 (µm)

Tabla 2. Características de la impresora Objet Eden 350 V de Stratasys

## IMPRESORA SLS [9]

Para la realización de las piezas creadas con la tecnología SLS, se utiliza la impresora Lisa Pro de la empresa Sinterit y se puede ver en la figura.

Esta impresora se basa en la tecnología SLS, cuyo principio de funcionamiento es la sinterización de polvo capa a capa mediante un láser.



Figura 3. Impresora SLS Lisa Pro de Sinterit

Algunas características de la impresora se muestran en la siguiente tabla:

Información general	
<b>Volumen máximo de impresión con alta calidad</b>	110 mm x 160 mm x 230 mm
<b>Sistema láser</b>	Diodo láser de infrarrojos 5 (W) $\lambda = 808$ (nm)
<b>Tamaño máximo de impresión en diagonal</b>	301 (mm)
<b>Cámara de gas</b>	Nitrógeno
<b>Resolución de capa</b>	20 $\mu$ m
<b>Tamaño de la cama de impresión</b>	150 x 200 x 260 (mm)
<b>Mínimo espesor de pared</b>	Desde 0,4 (mm)
<b>Mínimo tamaño de detalle</b>	Desde 0,1 (mm)

Tabla 3. Características de la impresora Lisa Pro de Sinterit

- **MATERIALES USADOS EN LA IMPRESIÓN**

Para realizar la fabricación de las piezas se cuenta con distintos materiales según la tecnología de impresión utilizada.

**Material usado en la impresora de FDM [18]**

Para realizar la impresión con la tecnología FDM se usará PLA (poli-ácido láctico), ya que la impresora no posee cama calefactada. El filamento es de 1,75 mm de diámetro y de la marca BQ. Se trata de un material biodegradable y compostable, en cuya producción no se usan derivados del petróleo, ya que se genera por polimerización del ácido láctico procedente de la fermentación de azúcares derivados de vegetales. Es un material adecuado para el uso doméstico ya que resulta fácil manipularlo. El PLA cuenta con gran adherencia y solidifica rápidamente.

Su rango de temperatura de fusión comienza a partir de 180°C, aunque se aconseja imprimir por encima de los 210°C porque puede haber variaciones según la impresora utilizada y se ha constatado que mejora la relación velocidad/calidad de impresión.

### Material usado en la impresora de Polyjet [19]

La impresión de la máquina de Polyjet se realiza con Rigur™ (RGD450), es un fotopolímero de polipropileno simulado avanzado con dureza mejorada, mayor estabilidad dimensional y excelente acabado superficial.

Rigur™ es una solución óptima para diversas aplicaciones, como envases reutilizables, contenedores, carcasas con ajuste de presión, cierres flexibles y piezas de electrodomésticos, ya que se trata de un material flexible, capaz de ajustarse a presión y cuenta con una alta tenacidad.

Algunas características que adquieren las piezas fabricadas con este material, en comparación con otros métodos son:

- Mayor resistencia al impacto
- Alcance de mayor temperatura
- Mayor estabilidad dimensional
- Excelente acabado superficial

En la siguiente tabla se resumen algunas propiedades de este material:

<b>Propiedades físicas</b>	
<b>Densidad de la pieza sinterizada</b>	1,2 - 1,21 (g/ cm <sup>2</sup> )
<b>Propiedades mecánicas</b>	
<b>Resistencia a tracción</b>	40 - 45 (MPa)
<b>Alargamiento a rotura</b>	20 – 35 (%)
<b>Resistencia a flexión</b>	52 - 59 (MPa)
<b>Propiedades térmicas</b>	
<b>Punto de transición vítrea</b>	48 - 52 (°C)

Tabla 4. Características del material Rigur™ [19]

### Material usado en la impresora de SLS [20]

El material usado en la impresión de SLS, es PA12 Smooth, se trata de un material que proporciona una alta calidad superficial, alta resistencia química y permite un alto nivel de detalle, además cuenta con una buena relación calidad-precio. Algunas características relevantes se muestran en la Tabla 5.

Información general	
Tipo de material	Nylon 12
Granulación	18 – 90 (µm)
Color	Gris marino
Tasa de refresco del material	30 (%)
Compatible con	Lisa y Lisa Pro
Parámetros	
Resistencia a la tracción	41 (MPa)
Alargamiento ante rotura	13 (%)
Resistencia al impacto (Prueba Charpy/sin muescas)	15 – 20 (KJ/m <sup>2</sup> )
Dureza Shore en escala tipo D	74
Propiedades térmicas	
Punto de ablandamiento	172 / 155 (°C)
Punto de fusión	182 (°C)
Densidad de impresión	1,00 (g/cm <sup>3</sup> )

Tabla 5. Características del material PA12 Smooth [20]



## ANEXO 4. EQUIPOS DE MEDICIÓN

### MICROSCOPIO DE VARIACIÓN FOCAL ALICONA [10],[11]

Para realizar las mediciones de rugosidad en la superficie de las piezas se utiliza un microscopio de variación focal, que pertenece al departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza. Es considerado el principal equipo, en concreto el microscopio que se utiliza es Alicona InfiniteFocusSL (Figura 1), se trata de un instrumento de medida que permite medir formas y superficies con microestructuras, es usado principalmente en laboratorios de metrología, pero también se podría incorporar a procesos productivos como herramienta de control de la calidad.

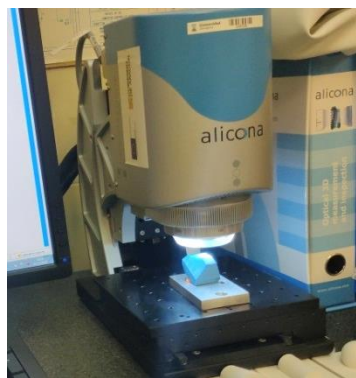


Figura 1. Microscopio Alicona InfiniteFocus SL

El principio de funcionamiento de Alicona es la variación de foco, que consiste en realizar un movimiento relativo de la muestra con respecto al fotodetector en el eje Z de medida, para poder capturar imágenes enfocadas en cada posición.

El software es capaz de identificar qué puntos están enfocados en cada posición en Z del fotodetector, y así reconstruir la superficie como una nube de puntos en 3D. En la Figura 2 se muestra un ejemplo del principio de funcionamiento de variación de foco. En primer lugar el microscopio enfoca la parte más alta de la pirámide y obtiene una imagen, en segundo lugar cambia su posición y consigue enfocar una parte más baja y en último lugar consigue enfocar la base de la pirámide.

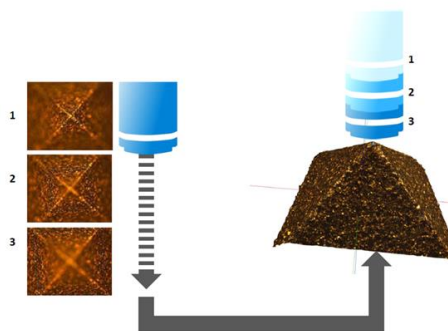


Figura 2. Funcionamiento de variación de foco [11]

Las medidas en Alicona se realizan con su propio software Alicona IF, el cual nos permite ajustar diversos parámetros como la exposición o el contraste para obtener mediciones más rápidas o con mejor resolución. Además, dentro del propio software, se indican los límites de escaneo de la pieza que queremos medir. Una vez finalizado el escaneo, el resultado de la medición se muestra por pantalla como una superficie creada con una nube de puntos que se puede analizar.

El microscopio de Alicona InfiniteFocusSL cuenta con una mesa móvil en los ejes X e Y con una carrera de 50 mm cada uno, a su vez, el cabezal puede realizar un movimiento en Z del propio microscopio de recorrido máximo 155 mm. Además, también cuenta con dos anillos de luz regulables para la iluminación de la zona de medida, ya que es necesario que la luz se refleje en las superficies para que el sensor pueda recoger la mayor cantidad de información posible. Las paredes verticales de las piezas y, en ocasiones, las zonas muy profundas, no reciben la luz suficiente por lo que no pueden ser caracterizadas, esto también puede ocurrir con el uso de materiales transparentes. Gracias a un histograma del propio software se conoce de antemano la cantidad de puntos que el sistema está recibiendo, para así, poder variar los parámetros en busca de una mayor captación de estos.

Alicona posee un juego de lentes intercambiables para ampliar la muestra que se desea medir, cada una de ellas cuenta con unas características distintas. En este caso, se usará una lente que aumenta el tamaño 10 veces. Con esta lente se consigue una superficie de enfoque de 2 mm X 2 mm en el plano formado por los ejes X e Y, si bien, el propio software realiza ensamblajes de las distintas áreas de trabajo para poder realizar mediciones de superficie más grandes.

Se debe destacar una restricción que impone la medición con el microscopio Alicona, esta limitación se trata de respetar una distancia mínima entre el objeto a medir y la lente. Esta profundidad mínima de trabajo es de 17,5 mm para la lente de aumento x10 como se puede observar en la Figura 3. Por lo tanto, se debe tener en cuenta a la hora de realizar el diseño de la pieza.



Figura 3. Profundidad mínima de trabajo [11]

Con lo anteriormente dicho, se expone la siguiente tabla resumen de las características de trabajo con Alicona, para la lente usada de ampliación x10 [11]:

CARACTERÍSTICAS	
Distancia de trabajo	17,5 mm
Área de enfoque (X,Y)	2 mm x 2 mm
Resolución vertical	< 100 nm
Resolución lateral	~ 3 $\mu$ m
Altura de escaneo	< 22 mm
Área máxima de medida	50 mm x 50 mm
Rugosidad mínima de medida (Ra)	0,3 $\mu$ m

Tabla 1. Resumen de características de Alicona para lente x10 [11]

## RUGOSÍMETRO [12]

Otro equipo de medida que se utiliza es el rugosímetro táctil, se trata de un instrumento de medida de la calidad superficial, que está basado en la amplificación eléctrica de la señal generada por su palpador, que cuando percibe las irregularidades de la superficie medida, las traduce en parámetros de rugosidad. En este caso, la aguja del palpador deforma elásticamente un material piezoeléctrico, que responde a esta deformación con la generación de una señal eléctrica.



Figura 4. Rugosímetro Mitutoyo SJ-201

El equipo del que se dispone en el departamento es el rugosímetro “Mitutoyo SJ-201”, cuyas especificaciones y guía de funcionamiento se ven detalladas en [13].

Las medidas con el rugosímetro se realizarán a nivel y perpendiculares a la dirección formada por las capas de material depositado en la fabricación de las piezas. Para que el palpador pueda acceder a la superficie que se desea medir, es necesario realizar un ajuste de la altura del instrumento y así, se podrá crear un buen contacto entre pieza-palpador. Además, se considera necesario elegir en cada medida las longitudes de muestreo y la longitud de evaluación estándar, que son establecidas por la norma ISO 4288 [16].

## ANEXO 5. PARÁMETROS DE MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD [21] [22]

En primer lugar, se definen los siguientes términos:

➤ **Perfil primario**

Se trata del perfil total de la superficie medida, que se obtiene al aplicar un filtro de paso bajo con un valor límite de longitud de onda  $\lambda_s$ , el cual designa el umbral entre el componente de rugosidad y los componentes de onda más corta. A este perfil pertenecen los parámetros del perfil primario (P).

➤ **Perfil de rugosidad**

Este perfil, deriva del primario usando un filtro de paso alto, con límite  $\lambda_c$ , que designa el umbral entre los componentes de rugosidad y los de ondulación. En este perfil se calculan los parámetros del perfil de rugosidad (R).

➤ **Perfil de ondulación**

Este perfil, deriva también del perfil primario, pero estableciendo dos filtros,  $\lambda_c$  y  $\lambda_f$ . A este perfil pertenecen los parámetros de ondulación (W).

Una vez definidos los términos anteriores, se muestran algunos de los parámetros más importantes a la hora de caracterizar un perfil de rugosidad en la siguiente tabla.

Parámetros de amplitud (pico y valle) (ISO4287: 1997)	Símbolo	Parámetros de superficie
Altura máxima	Rz	Sz
Altura máxima de pico	Rp	Sp
Profundidad máxima de valle	Rv	Sv
Altura media	Rc	-
Altura total	Rt	-
Parámetros promedio de la amplitud (ISO4287: 1997)	Símbolo	Parámetros de superficie
Desviación media aritmética	Ra	Sa
Desviación media cuadrática	Rq	Sq
Parámetros de espaciado (ISO4287: 1997)	Símbolo	Parámetro de superficie
Anchura media	Rsm	-

Tabla 1. Parámetros de medición de la rugosidad

Algunos de los parámetros más utilizados se explican a continuación:

- **Altura máxima (Rz)**

En la longitud de muestreo, Rz es la suma de la altura máxima de pico (Rp) y la profundidad máxima de valle (Rv), como se representa en la siguiente figura.

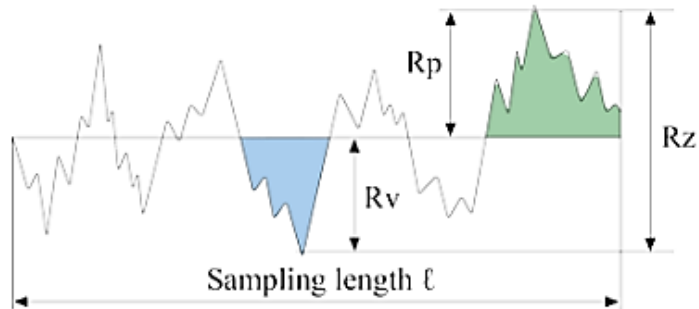


Figura 1. Altura máxima (Rz) [21]

$$Rz = Rp + Rv$$

La altura máxima puede estar influenciada de forma significativa si la superficie se contamina o se ve dañada, ya que depende de los valores absolutos máximos.

Pz es la altura máxima del perfil primario.

Wz es la altura máxima de ondulación.

- **Altura máxima de pico (Rp)**

En la longitud de muestreo, Rp representa la altura Zp máxima de los picos del perfil como se puede ver en la siguiente figura.

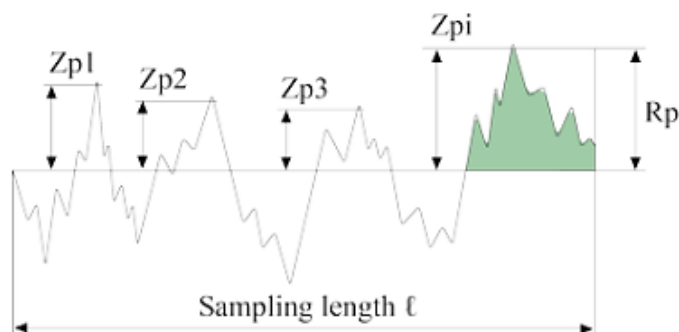


Figura 2. Altura máxima de pico (Rp) [21]

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

**El pico de perfil parte por encima de la línea media del perfil (eje X).**

Pp es la altura máxima de pico del perfil primario.

Wp es la altura máxima de ondulación.

- **Profundidad máxima de valle (Rv)**

Representa la altura máxima de pico  $Z_v$  en los valles del perfil, como se puede ver en la siguiente figura.

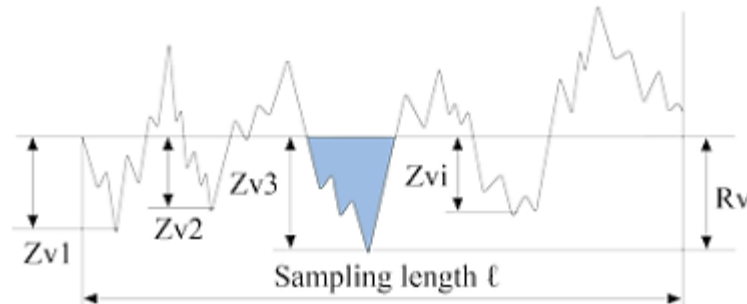


Figura 3. Profundidad máxima de valle (Rv) [21]

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

**El valle del perfil parte por debajo de la línea media del perfil (eje X).**

$P_v$  es la altura máxima del pico del perfil primario.

$W_v$  es la altura máxima del pico del perfil de ondulación.

- **Altura media (Rc)**

En la longitud de muestreo, es la media de la altura  $Z_t$  de las distintas alturas que componen el perfil, como se representa en la siguiente figura.

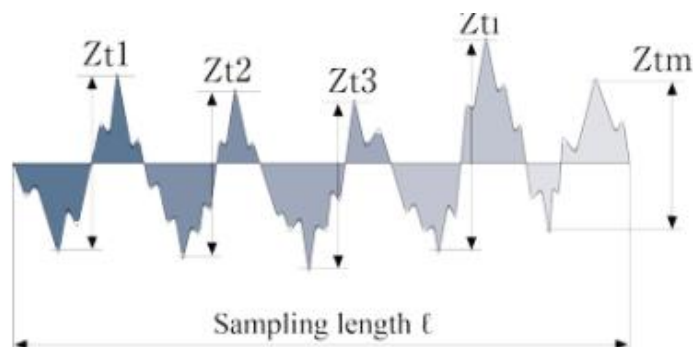


Figura 4. Altura media [21]

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

Las alturas totales se miden entre los picos y valles adyacentes. Existen unos límites de discriminación de medidas, siendo la de altura mínima del 10% del valor de  $R_z$  y discriminación de longitud mínima del 1% de la longitud de referencia.

$P_c$  es la altura media del elemento de perfil principal.

$W_c$  es la altura media del elemento de perfil de ondulación.

- **Altura total (Rt)**

El parámetro (Rt) es la suma de la altura máxima de pico  $Z_p$  y la profundidad máxima de valle  $Z_v$  en un perfil, pero en la longitud de evaluación y no en la longitud de muestreo. Se representa en la siguiente figura.

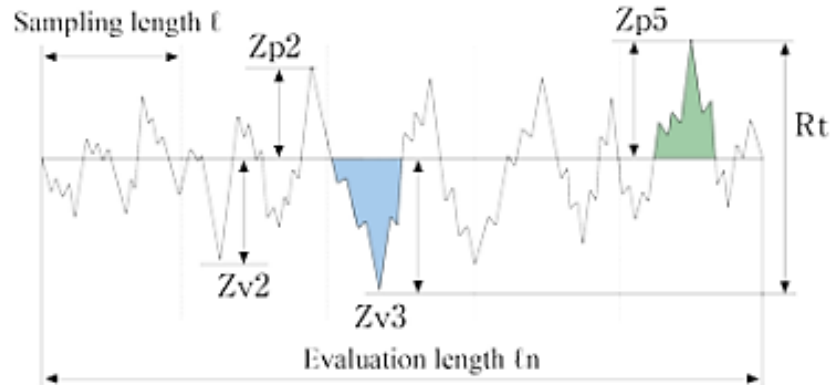


Figura 5. Altura total [21]

$$R_t = \max(Z_{pi}) + \max(Z_{vi})$$

Siempre se cumple la relación  $R_t \geq R_z$ .

$R_t$  es un estándar más preciso que  $R_z$  debido a que la medición se lleva a cabo en función de la longitud de evaluación del perfil completo. Aunque como se ha dicho en  $R_z$ , este parámetro se puede ver afectado por daños en la superficie, por contaminación de esta o por ruido en la medición.

$P_t$  es la altura máxima total del perfil

$W_t$  es la altura máxima total de la ondulación

- **Desviación media aritmética (Ra)**

Es la media aritmética de la ordenada absoluta  $Z(x)$  perteneciente a la longitud de muestreo, como se puede ver en la siguiente figura.

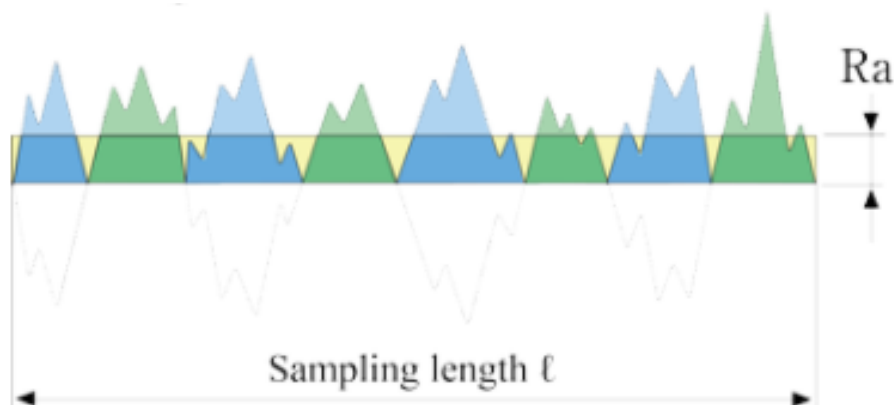


Figura 6. Desviación media aritmética (Ra) [21]

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

Pa es la altura media aritmética calculada en el perfil primario.

Wa es la media aritmética de la ondulación.

- **Desviación media cuadrática (Rq)**

Se trata de la raíz cuadrada media de la ordenada absoluta  $Z(x)$  perteneciente a la longitud de muestreo, como se puede ver en la siguiente figura.

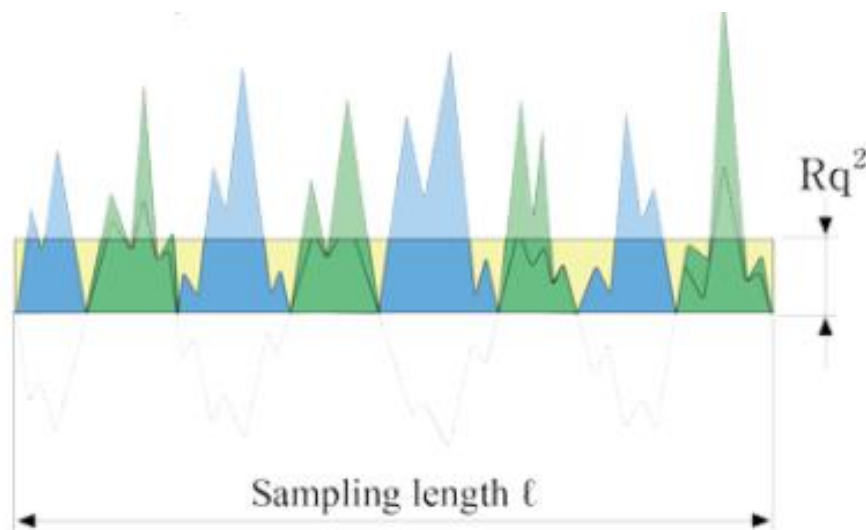


Figura 7. Desviación media cuadrática (Rq) [21]

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}$$

Rq, se representa como la desviación estándar de la distribución de alturas. Se trata de uno de los parámetros más usados ya que facilita el manejo estadístico y permite resultados estables, ya que no se ve afectado significativamente por daños de la superficie ni el ruido de la medición.

Pq es la altura media cuadrática del perfil primario.

Wq es la ondulación media cuadrática.

- **Anchura media (Rsm)**

Rsm, es la media de la longitud de los elementos del perfil en la longitud de muestreo y sirve para poder analizar el tamaño horizontal de surcos y elevaciones que son paralelos, en vez de analizarlos con parámetros verticales de altura.



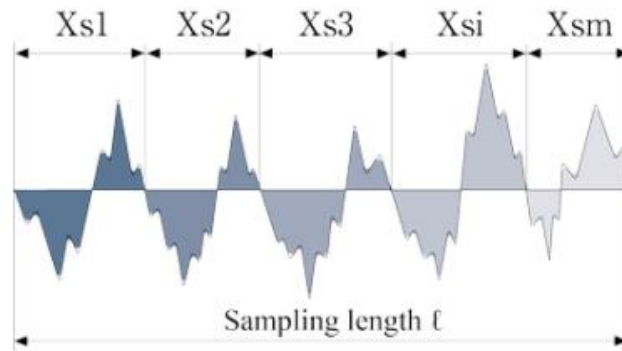


Figura 8. Anchura media ( $R_{sm}$ ) [21]

$$R_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{si}$$

## ANEXO 6. CÁLCULO TEÓRICO

### CALCULO OPTIMIZADO

El principio de los modelos realizados se basa en dibujar lo más próximo a la realidad, dos de los filamentos contiguos (uno encima del otro), para cada ángulo de construcción. Para realizar la representación de este modelo teórico [15], se generan las líneas básicas mediante un croquis:

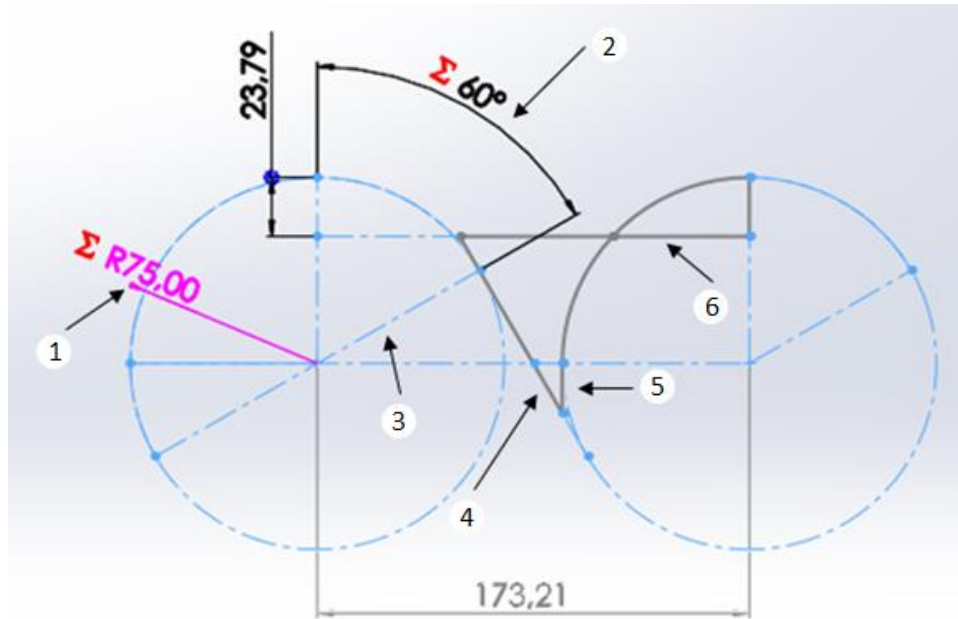


Figura 1. Croquis del modelo teórico

En la Figura 1 se muestran los parámetros más importantes para realizar el croquis. En primer lugar, se incluyen dos circunferencias que poseen el mismo radio (1) y corresponde a la mitad del espesor de capa. El segundo parámetro a indicar es el ángulo de la rampa (2), gracias al cual se crea una recta auxiliar (3). Perpendicular a esta recta auxiliar y tangente a ambos círculos, se traza una recta (4). La recta vertical (5) se ha creado como se indica en el artículo de la universidad de Barcelona [15], ya que se trata del factor de corrección necesario para evitar que el resultado de la integral de negativo. Por último, se traza la línea media (6), siendo su distancia a la parte superior de la circunferencia el parámetro que variará al realizar el cálculo.

Gracias a las líneas creadas, se distinguen 3 superficies, como se ve en la Figura 2: La A y la B, que pertenecen a la parte superior del croquis, y la C que es la parte inferior.

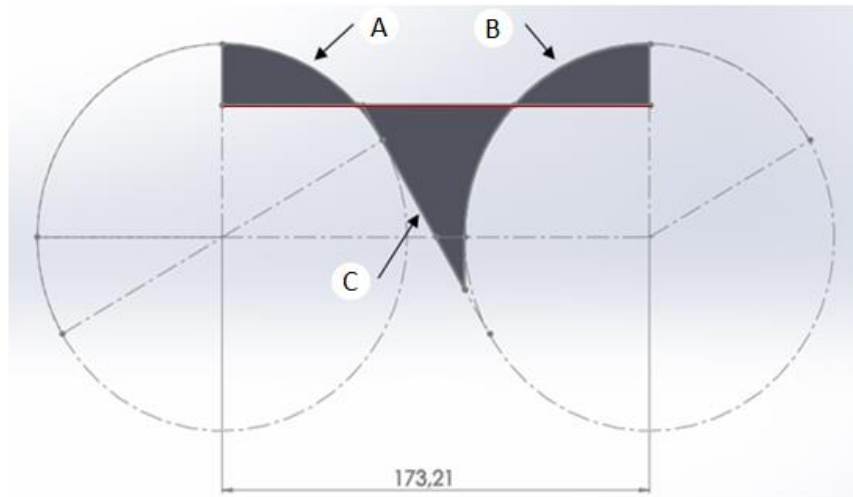


Figura 2. Superficies A, B y C

El área de las distintas superficies depende de la altura a la que se encuentre la línea media, mediante un estudio de diseño se va a modificar este valor, con el objetivo de que el área de la zona superior (A y B) y de la zona inferior (C) sean iguales.

Variables			
Altura	Intervalo con	Mín: 23.787mm	Máx: 23.788mm
Haga clic aquí para agregar Variabl			Paso: 0.0001mm

Restricciones	
S1-2(+45)	Sólo monitoreo
S3(+45)	Sólo monitoreo
Haga clic aquí para agregar Restric	

Figura 3. Estudio de diseño

Este estudio de diseño se genera con la altura de la línea media como variable, la monitorización de la medida de cada área y un objetivo arbitrario. Se realizan iteraciones del estudio de diseño, cada vez añadiendo un decimal hasta que se igualan las áreas.

Con la altura conocida, se recopilan dos datos:

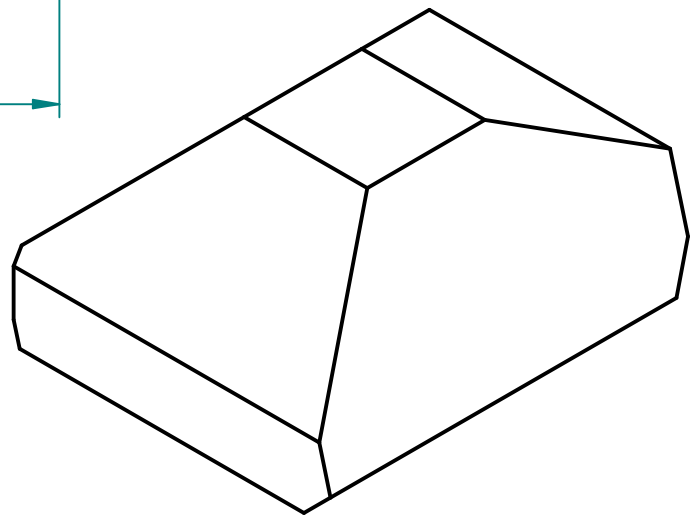
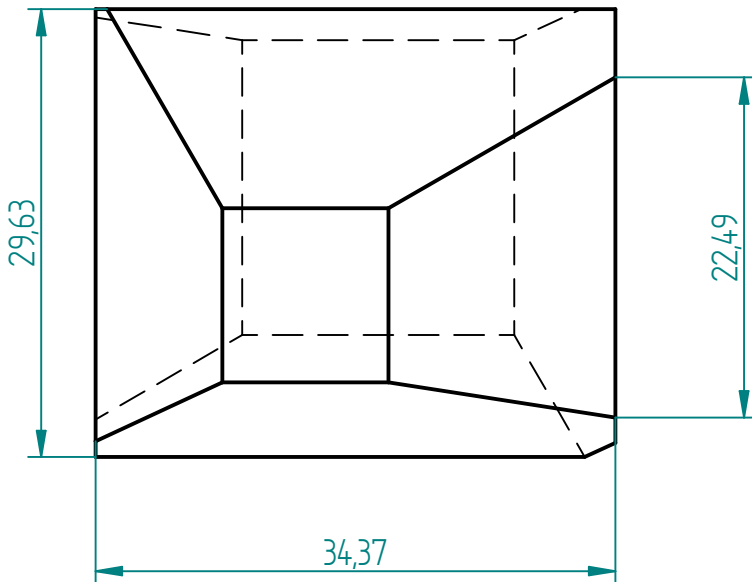
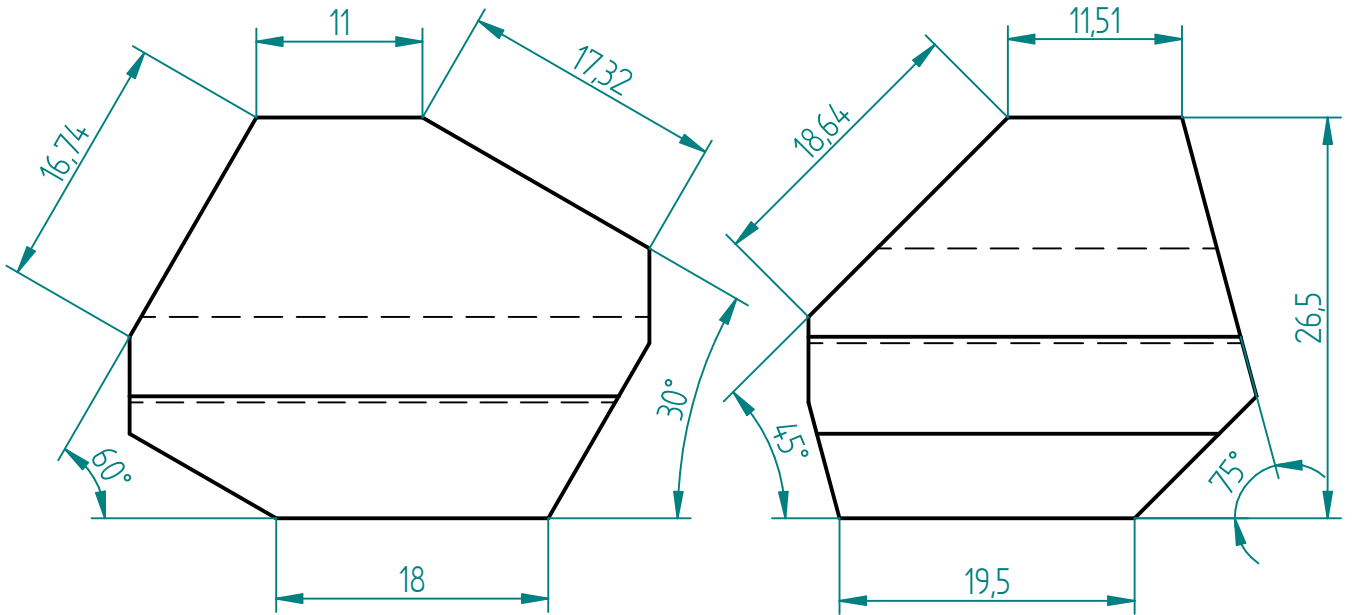
Longitud de la línea media L (distancia entre centros de circunferencias, obtenida por la propia geometría al generar el croquis).

Área total A (de las tres zonas).

Y con la fórmula del artículo [15] se obtiene que:

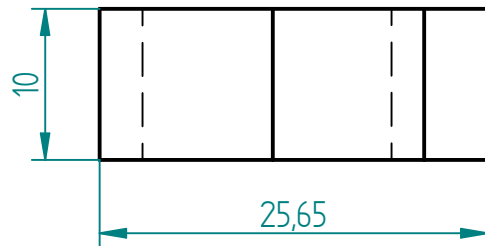
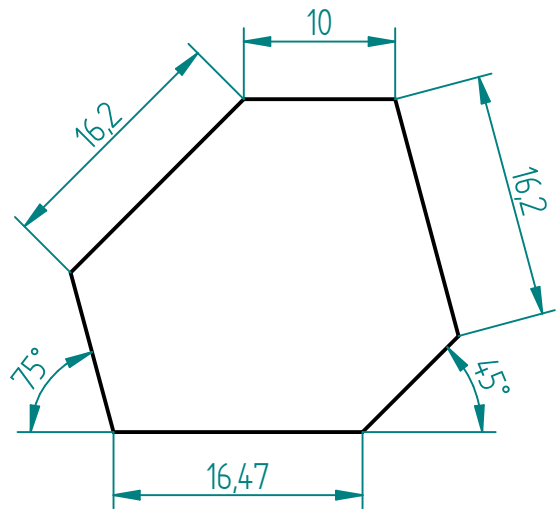
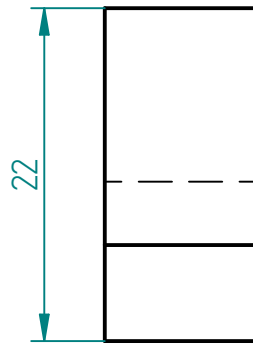
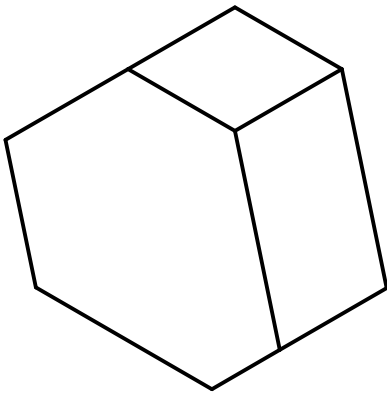
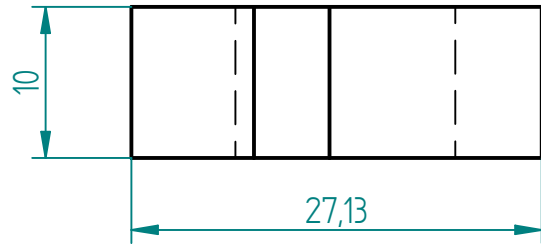
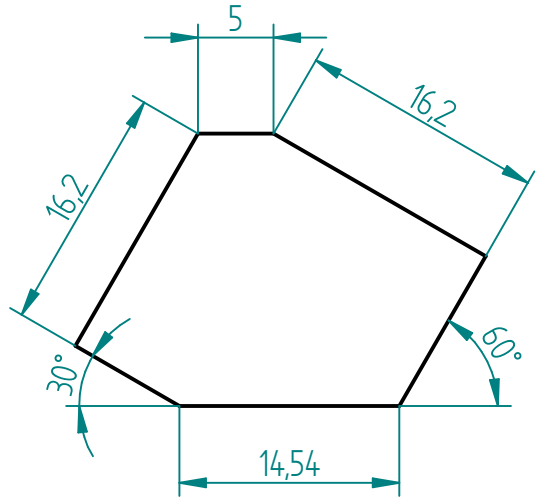
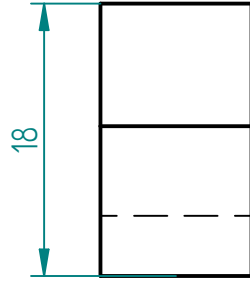
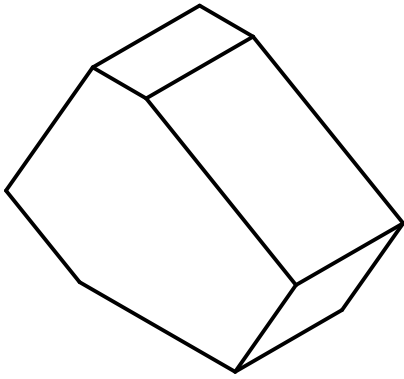
$$Ra = \frac{1}{L} * A = \frac{A}{L}$$


## **ANEXO 7. PLANOS DE LAS PIEZAS**

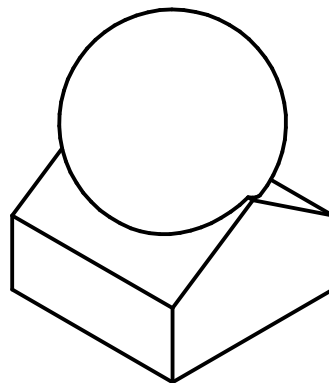
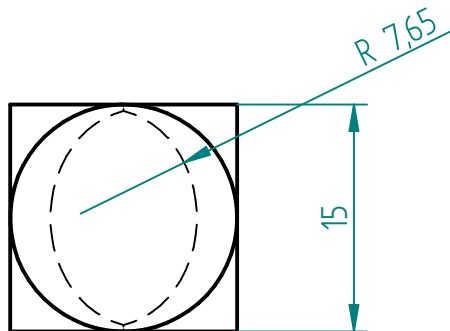
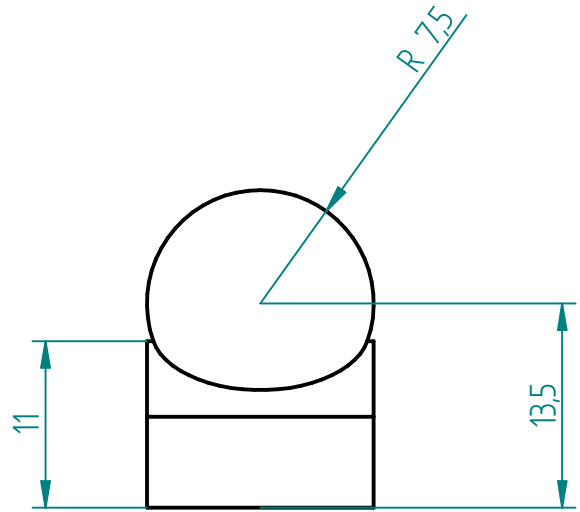
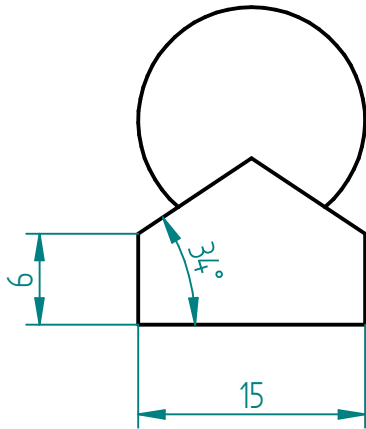


Nombre	Mercedes	Título: Pieza de 4 caras (30-45-60-75)		
Apellidos	Concha Rivera			
Fecha	20.06.22			
Escala	2:1	VI	Tamaño A4	Hoja I

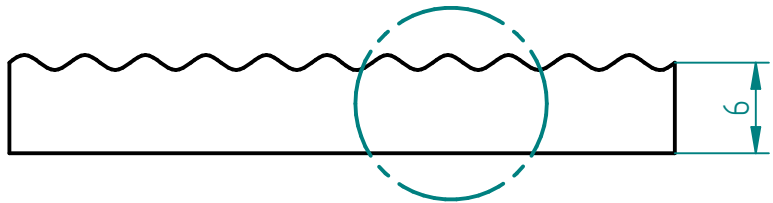
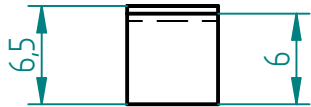




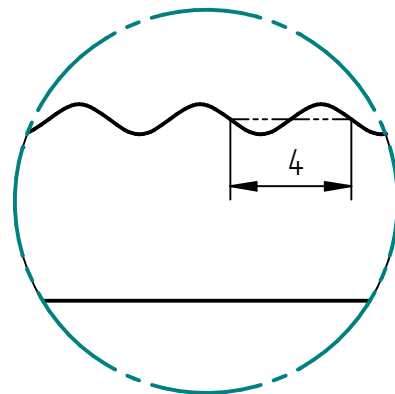
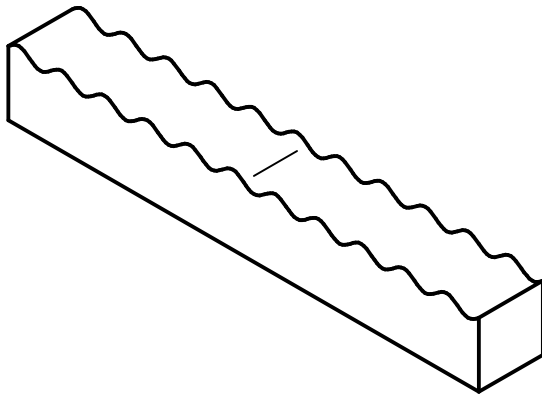
Nombre	Mercedes	Título: Piezas de 2 caras (30-60) y (45-75)  <b>Universidad</b> Zaragoza		
Apellidos	Concha Rivera			
Fecha	20.06.22			
Escala	2:1	VI	Tamaño A4	Hoja I




Nombre	Mercedes	Título: Pieza esférica  <b>Universidad</b> Zaragoza		
Apellidos	Concha Rivera			
Fecha	20.06.22			
Escala	2:1	VI	Tamaño A4	Hoja I



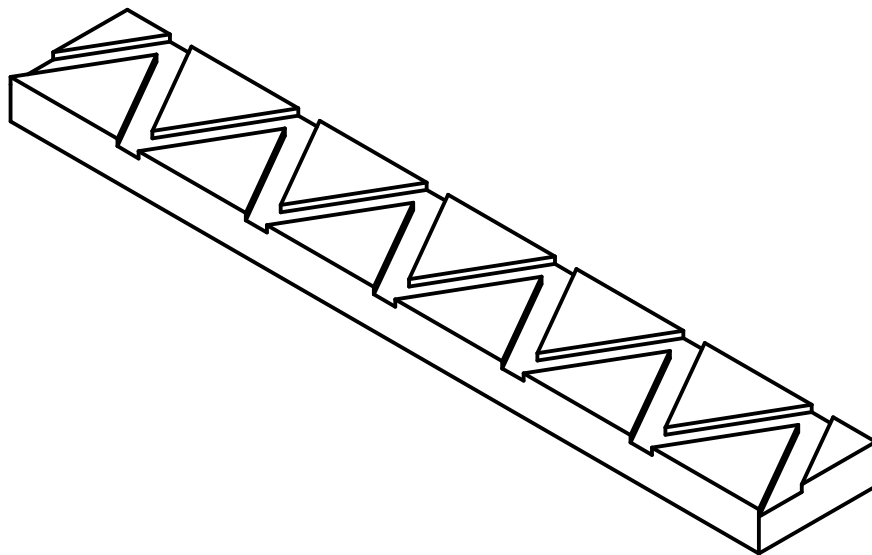
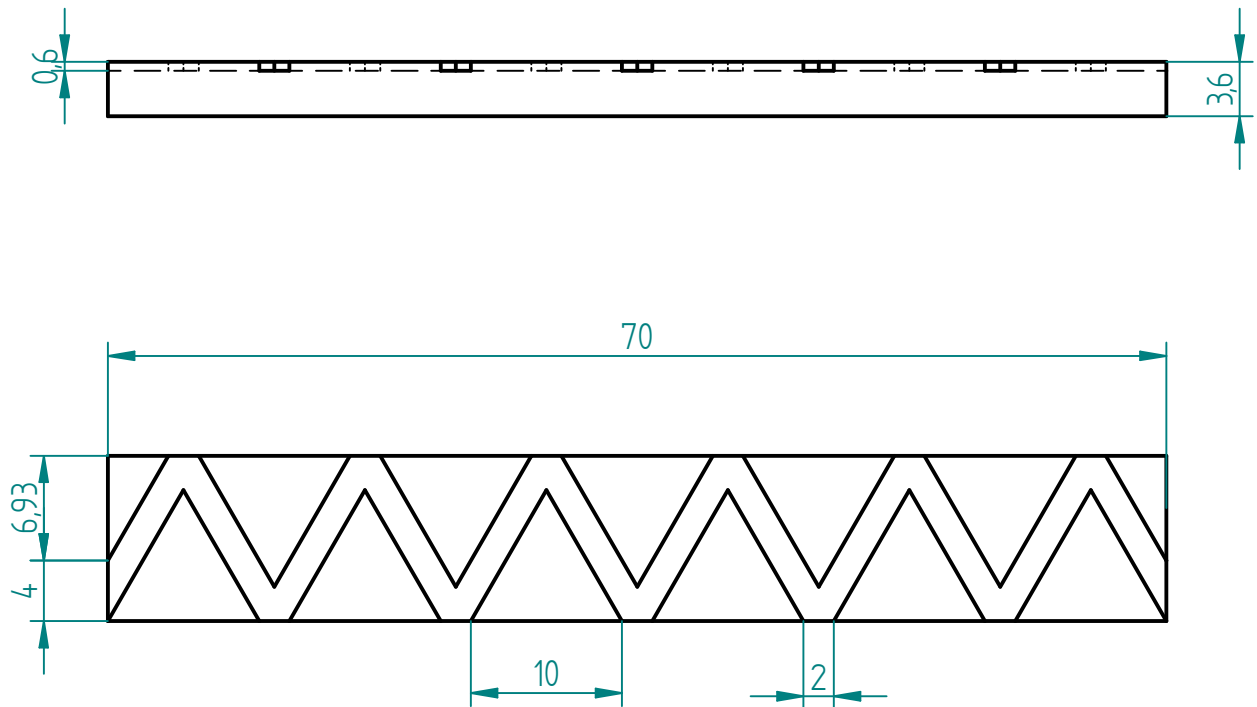
A




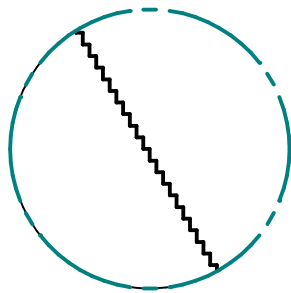
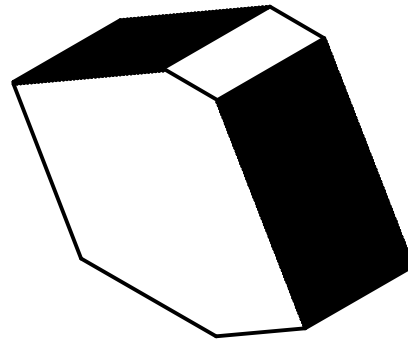
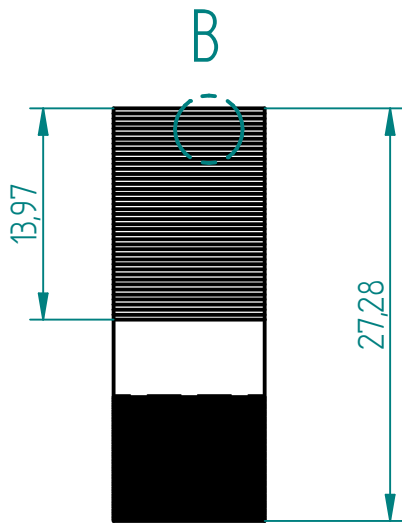
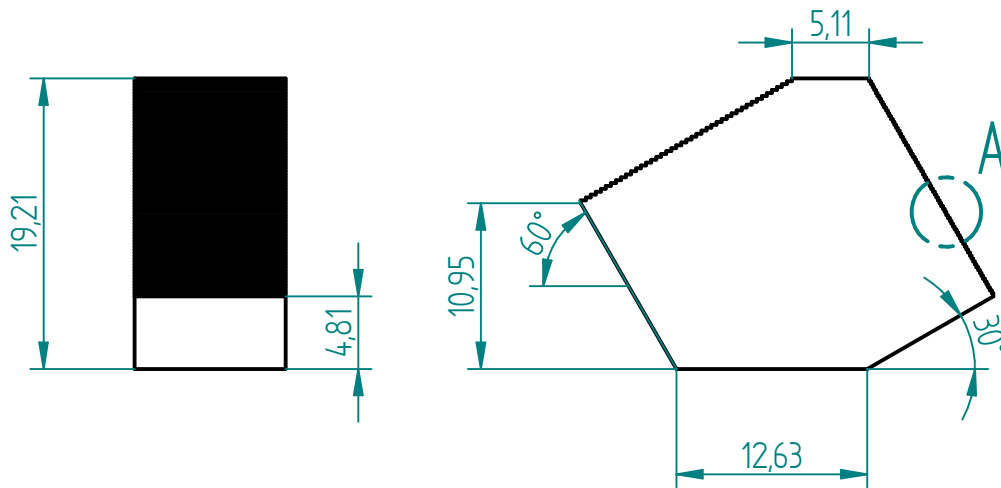
DETALLE A

Nombre	Mercedes	Título: Pieza con forma senoidal  <b>Universidad</b> Zaragoza		
Apellidos	Concha Rivera			
Fecha	20.06.22			
Escala	2:1	VI	Tamaño A4	Hoja I

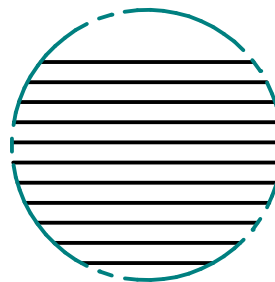





Nombre	Mercedes	Título: Pieza patrón triangular  <b>Universidad Zaragoza</b> <small>1542</small>		
Apellidos	Concha Rivera			
Fecha	20.06.22			
Escala	2:1	VI	Tamaño A4	Hoja I

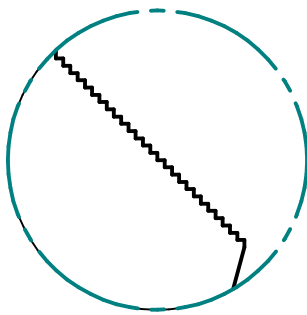
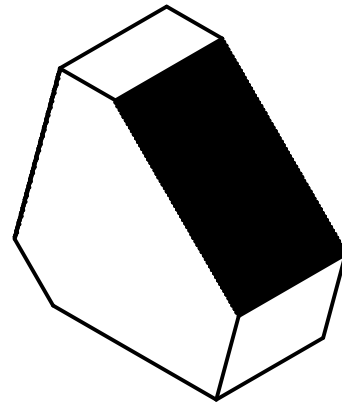
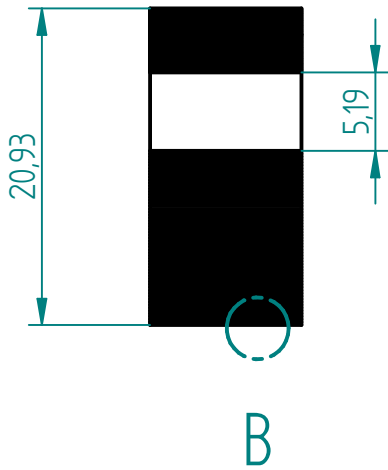
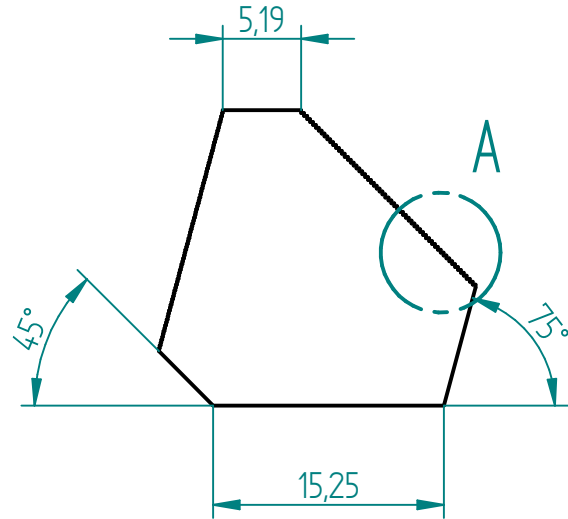
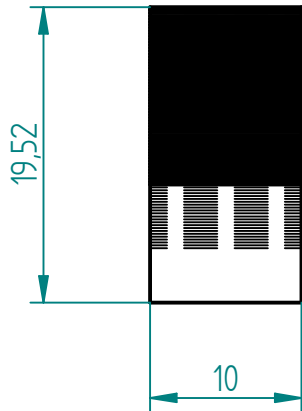


DETALLE A

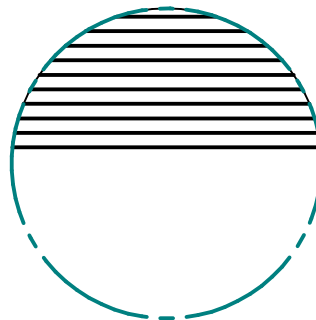


DETALLE B


Nombre	Mercedes	Título: Pieza de 2 caras PJ (30-60)  <b>Universidad</b> Zaragoza		
Apellidos	Concha Rivera			
Fecha	20.06.22			
Escala	2:1	VI	Tamaño A4	Hoja I



DETALLE A



DETALLE B

Nombre	Mercedes	Título: Pieza de 2 caras PJ (45-75)		
Apellidos	Concha Rivera			
Fecha	20.06.22	 <b>Universidad</b> Zaragoza 1542		
Escala	2:1			

## ANEXO 8. IMÁGENES DE LAS PIEZAS FABRICADAS

### 1. PIEZAS FABRICADAS FDM

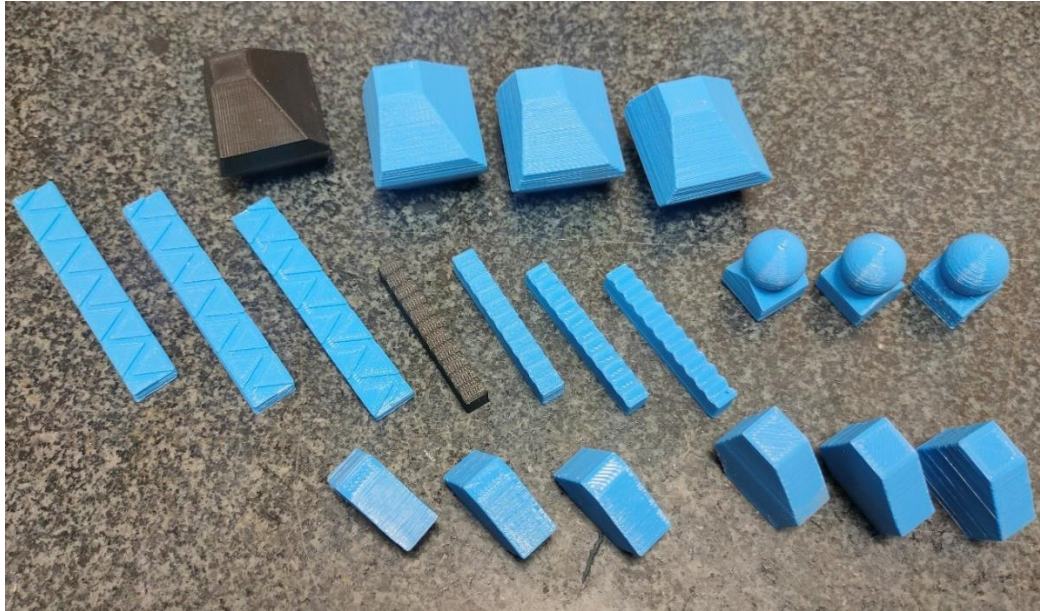


Figura 1. Conjunto de piezas FDM.

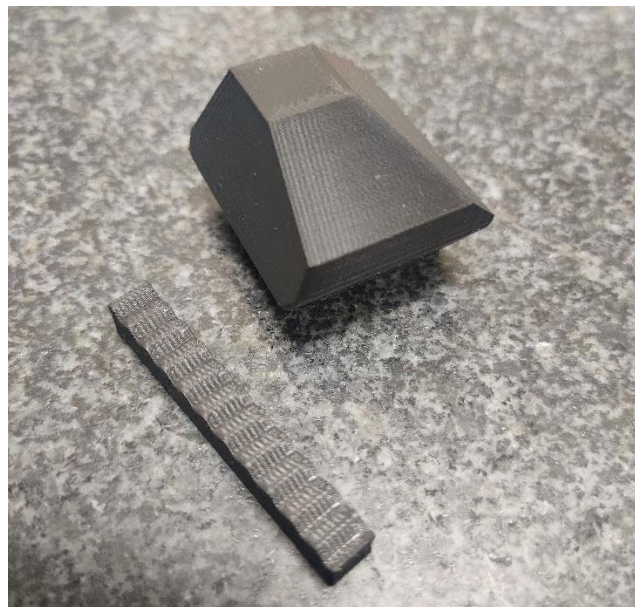


Figura 2. Pieza de 4 caras y senoide (Ultimaker), espesor de capa 0,1 mm.



Figura 3. Piezas de 2 caras con distintos ángulos ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $75^\circ$ ) y distintos espesores de capa (0,1 mm, 0,15 mm y 0,2 mm)



Figura 4. Piezas de 4 caras con distintos ángulos ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $75^\circ$ ) y distintos espesores de capa (0,1 mm, 0,15 mm y 0,2 mm)



Figura 5. Piezas esféricas con distintos espesores de capa (0,1 mm, 0,15 mm y 0,2 mm, de izquierda a derecha)

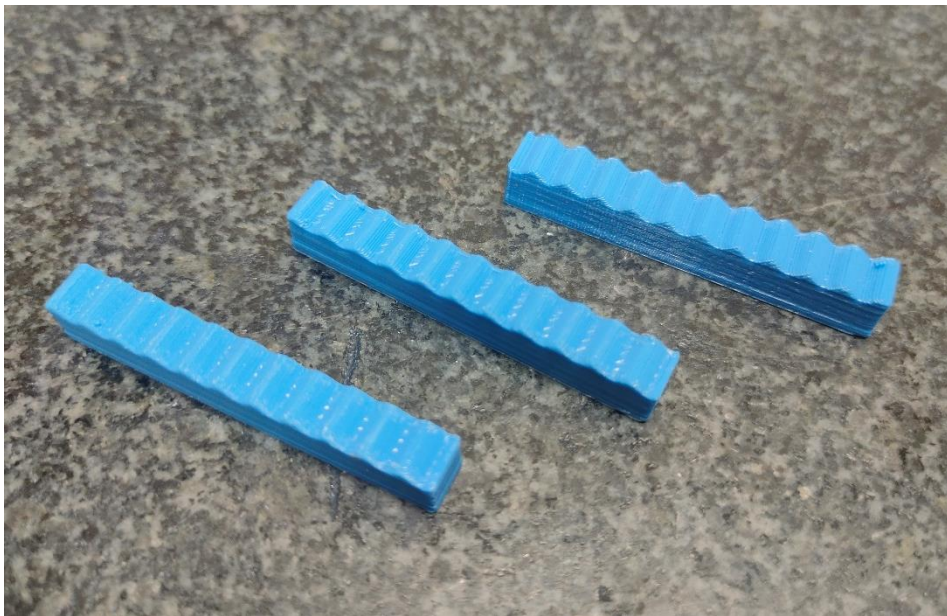


Figura 6. Piezas con forma senoidal con distintos espesores de capa (0,1 mm, 0,15 mm y 0,2 mm, de izquierda a derecha)

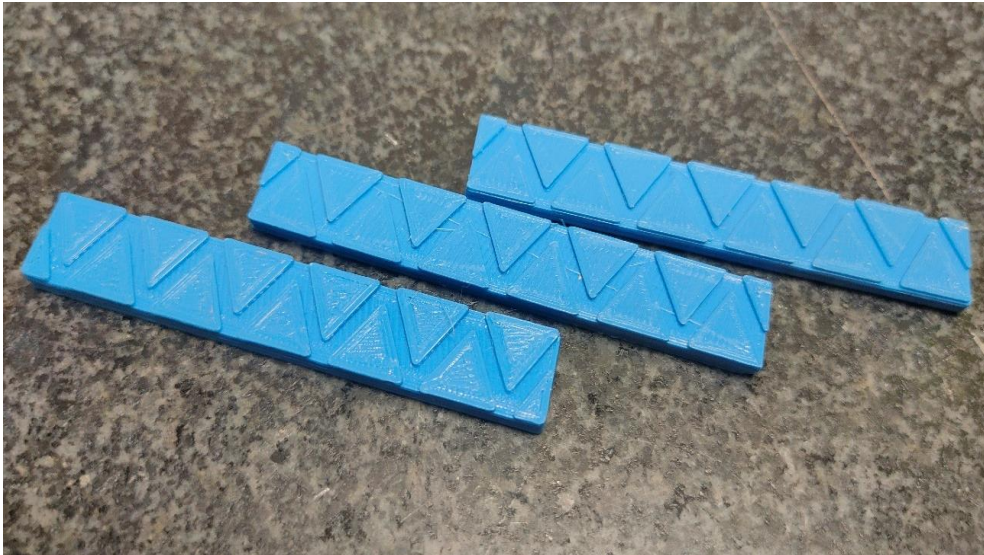


Figura 7. Pieza de patrón triangular con distintos espesores de capa (0,1 mm, 0,15 mm y 0,2 mm, de izquierda a derecha)

## 2. PIEZAS FABRICADAS SLS

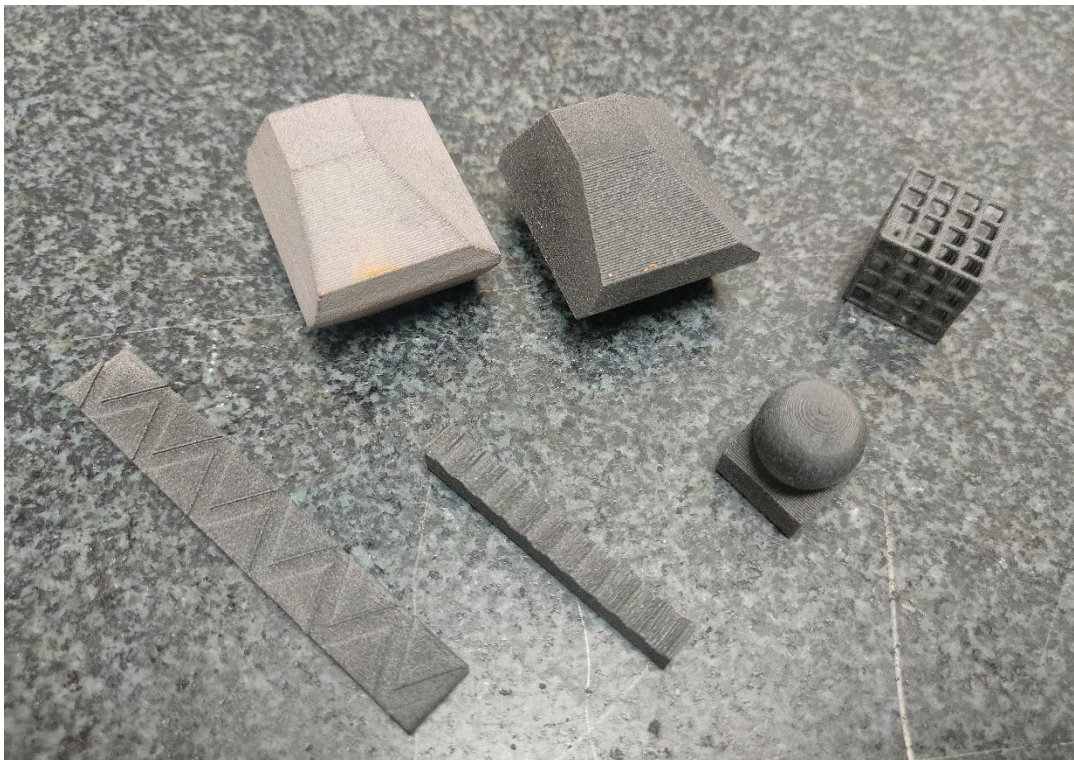


Figura 8. Conjunto de piezas fabricadas con SLS

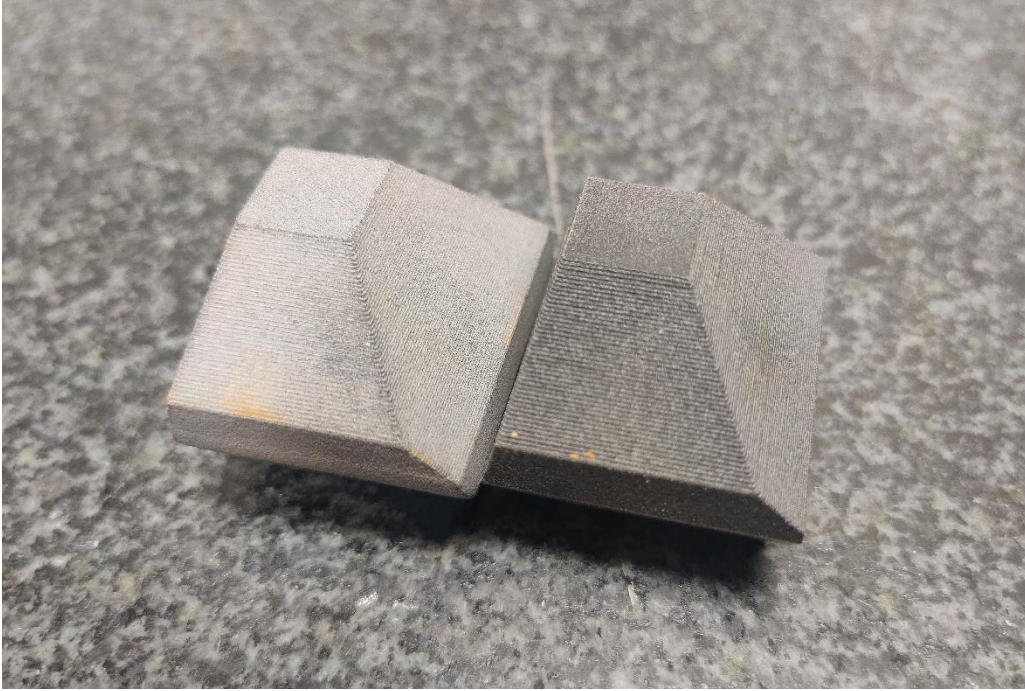


Figura 9. Comparación entre las piezas antes y después de la limpieza con abrasivo



Figura 10. Piezas de 4 caras con distintos ángulos (30°, 45°, 60° y 75°) y espesores de capa (0,1 mm y 0,2 mm)





Figura 11. Pieza de patrón triangular SLS



Figura 12. Pieza esférica SLS



Figura 13. Pieza con forma senoidal SLS

### 3. PIEZAS FABRICADAS POLYJET



Figura 14. Conjunto de piezas Polyjet



Figura 15. Piezas de 2 caras (30-60 y 45-75) diseñadas especialmente para espesor de capa de  $96\ \mu\text{m}$  y  $192\ \mu\text{m}$

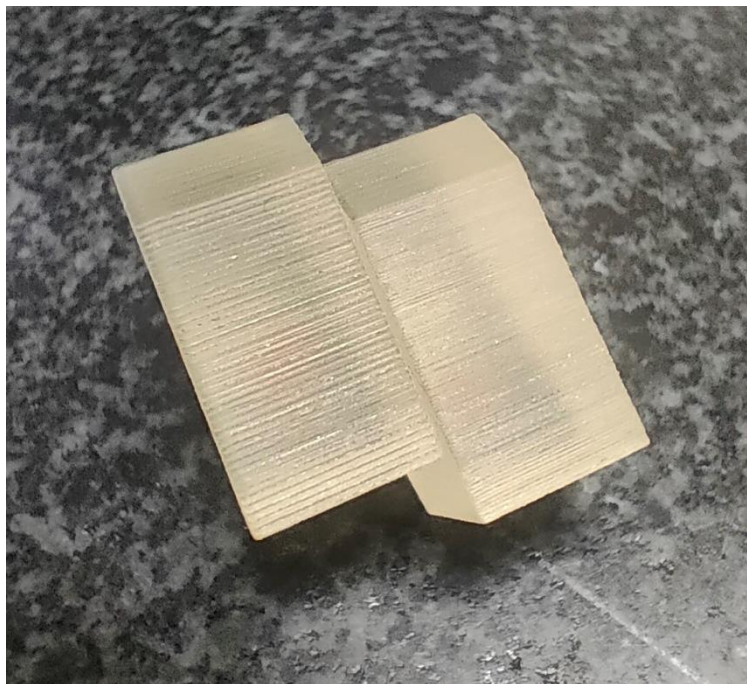


Figura 16. Detalle de los escalones creados para permitir la comparación con otras tecnologías



Figura 17. Pieza de 4 caras (30-45-60-75) con espesor de capa de 16  $\mu\text{m}$



Figura 18: Pieza patrón triangular y espesor de 16  $\mu\text{m}$



Figura 19. Pieza con forma senoidal y espesor de capa de 16  $\mu\text{m}$



Figura 20. Pieza esférica y espesor de capa de 16  $\mu\text{m}$

## ANEXO 9. COMPARACIÓN DE DESVIACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES CON TEÓRICOS (VARIAS LC)

Los resultados experimentales hallados se comparan con los resultados teóricos que se han calculado en el apartado 3 de la memoria y se muestran en la tabla 1.

Ángulo de la Superficie creada (°)	t= 0,1 mm	t= 0,15 mm	t= 0,2 mm
75°	10,37 $\mu\text{m}$	15,56 $\mu\text{m}$	20,75 $\mu\text{m}$
60°	13,86 $\mu\text{m}$	20,80 $\mu\text{m}$	27,73 $\mu\text{m}$
45°	17,98 $\mu\text{m}$	26,98 $\mu\text{m}$	35,97 $\mu\text{m}$
30°	21,22 $\mu\text{m}$	31,84 $\mu\text{m}$	42,45 $\mu\text{m}$

Tabla 127. Resultados experimentales obtenidos con el microscopio para Lc según tabla 3

Se comparan los datos teóricos con los experimentales para el espesor de capa de 0,1 mm (Figura 1).

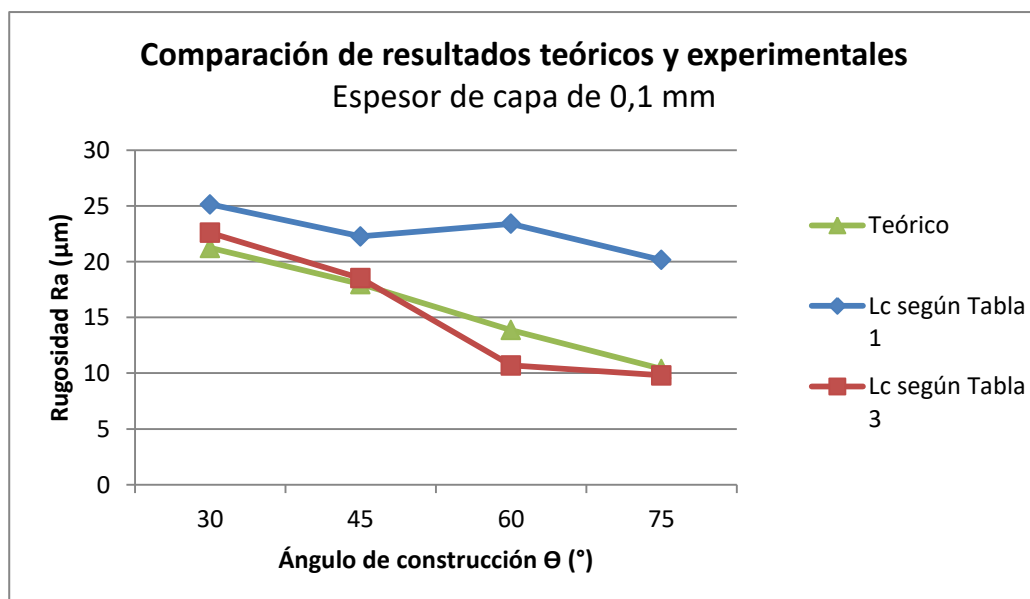


Figura 1. Comparación de resultados para 0,1 mm de espesor de capa

Se puede ver que los datos obtenidos según la Lc para perfiles periódicos de la tabla 3 (Lc variable para los distintos perfiles) se acercan mucho más a los datos teóricos que los datos obtenidos con Lc obtenida de la tabla 1 (Lc igual para todos los perfiles, 8000  $\mu\text{m}$ ).

De nuevo se realiza una representación gráfica de los resultados teóricos y las medidas del microscopio para el espesor de capa de 0,15 mm.

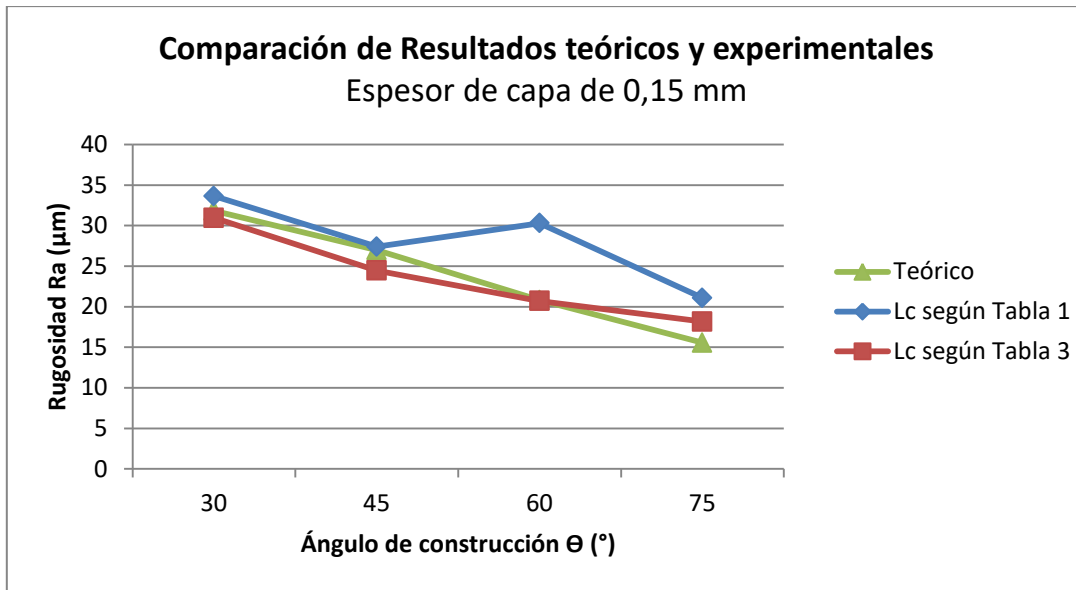


Figura 2. Comparación de resultados para 0,15 mm de espesor de capa

Como se puede observar, los perfiles llegan a ser muy similares. Casi se solapan entre sí, lo que denota una buena aproximación para la Lc obtenida para perfiles periódicos de la tabla 3. Aunque se aprecia un alejamiento de unos micrómetros en 45° y 75°.

En la siguiente gráfica se realiza la comparación de los resultados con espesor de capa de 0,2 mm y se puede observar una gran similitud de los valores de rugosidad en los ángulos de 30° y 75°.

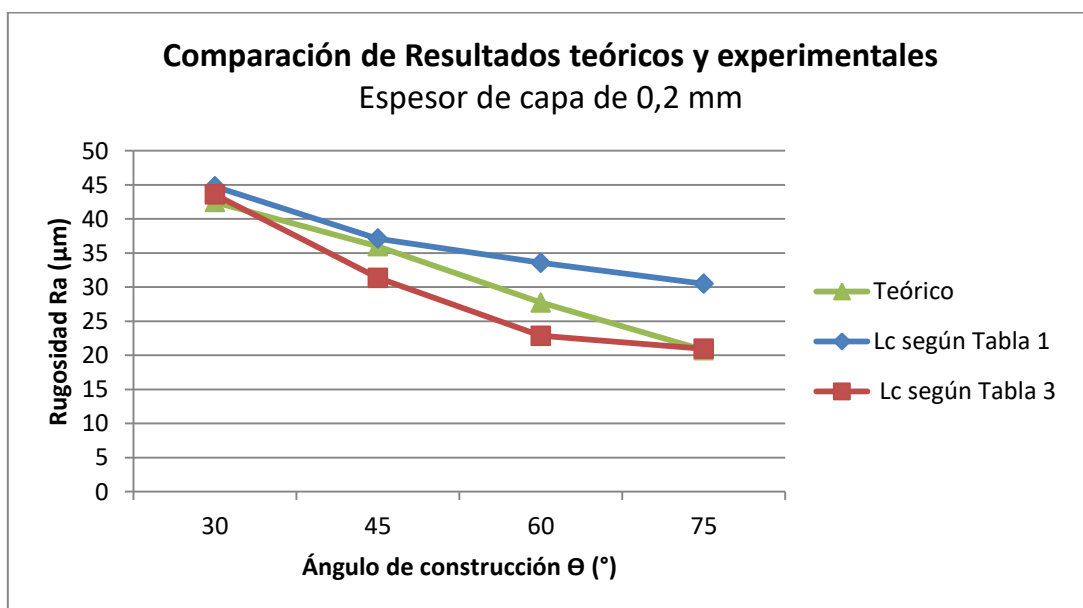


Figura 3. Comparación de resultados para 0,2 mm de espesor de capa

En esta comparación y para los tres espesores de capa distintos, se muestra que los resultados logrados con la longitud de corte para perfiles periódicos (tabla 3), se acercan mucho más que los resultados con la longitud de corte según la tabla 1 (8000  $\mu\text{m}$ ).

- **Desviaciones porcentuales**

También se comparan las desviaciones de los datos teóricos con los resultados obtenidos para Longitud de Corte (Lc) según la tabla 3 para perfiles periódicos y según la tabla 1 para perfiles no periódicos, ambas de la norma ISO 4288. Para ello se calculan las desviaciones en forma porcentual entre los datos teóricos y los datos experimentales obtenidos con las longitudes de corte según ambas tablas, y se comprueba qué resultados son más acertados.

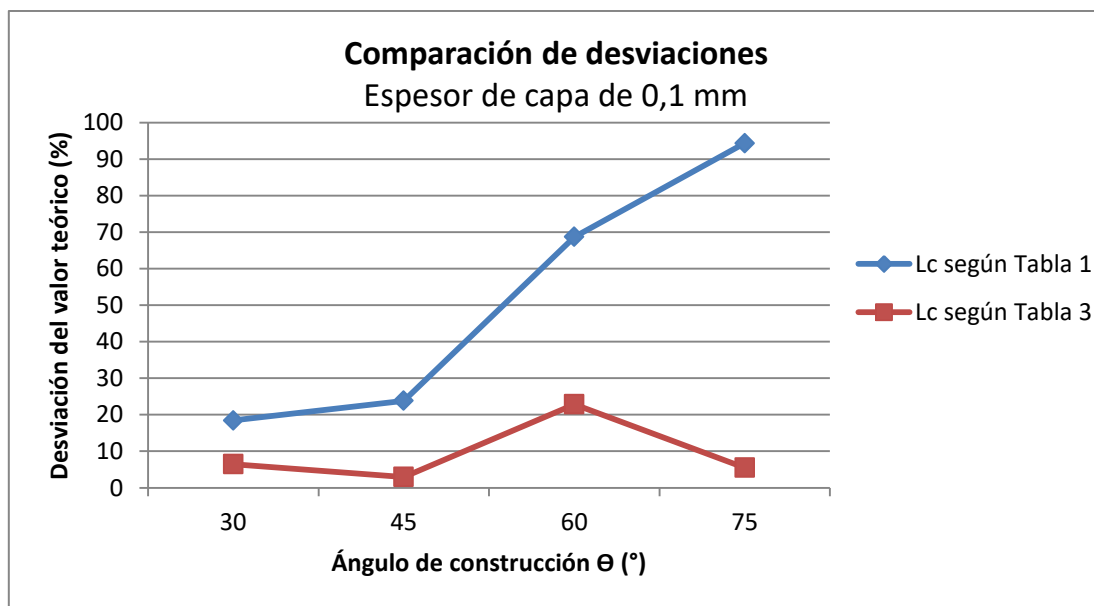


Figura 4. Comparación de desviaciones para 0,1 mm espesor de capa

Se observan menores desviaciones para los resultados obtenidos con la Lc elegida de la tabla 3. El dato más destacado es la notable disminución de la desviación de la medida en el ángulo de 75°. Dicho ángulo de 75° teóricamente obtiene una rugosidad muy pequeña e idealizada, ya que el propio proceso de fabricación incluye defectos que afectan en la evaluación de la superficie y que no se tienen en cuenta en el modelo teórico, no obstante, al ajustar su longitud de corte, algunos de esos defectos son omitidos en la medición del microscopio.

Nuevamente se observan las desviaciones de los resultados experimentales para longitud de corte de la tabla 1 y se comparan con las desviaciones para las nuevas longitudes de corte (tabla 3), pero esta vez para el espesor de capa de 0,15 mm.



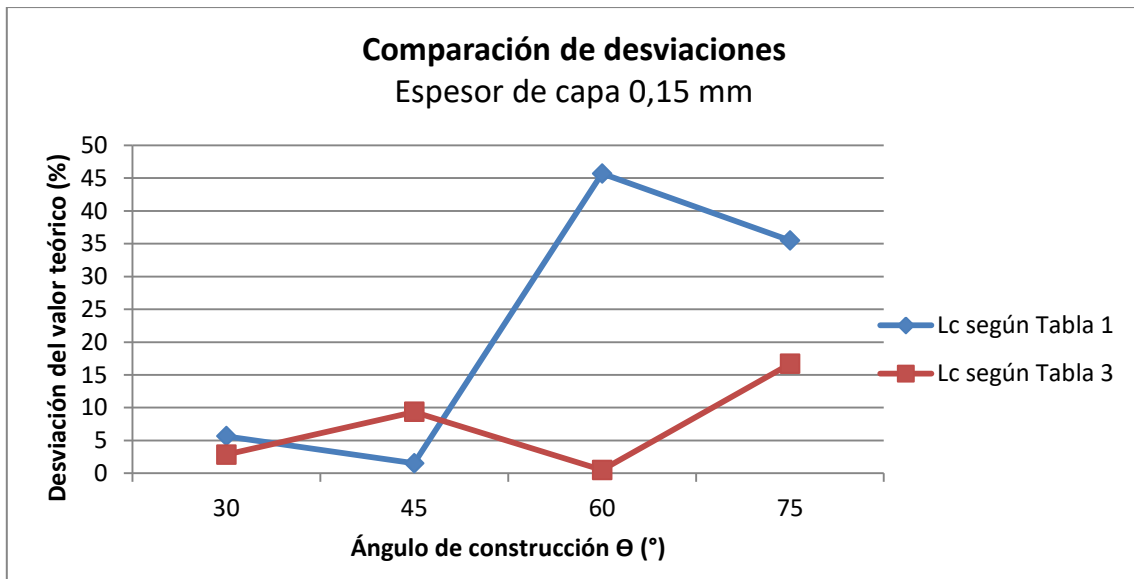


Figura 5. Comparación de desviaciones para 0,15 mm espesor de capa

Las desviaciones vuelven a disminuir notablemente para la Lc de la tabla 3, y donde más se hace presente la mejoría, es en los ángulos de 60° y 75°, que pasan a tener unas desviaciones cercanas al 1% y al 15%. Aun así, destaca que el ángulo de 45° ha aumentado su desviación, es el único ángulo para el cual los resultados anteriores se acercan más al cálculo teórico.

Por último, se repite el proceso de análisis gráfico con el espesor de capa de 0,2 mm.

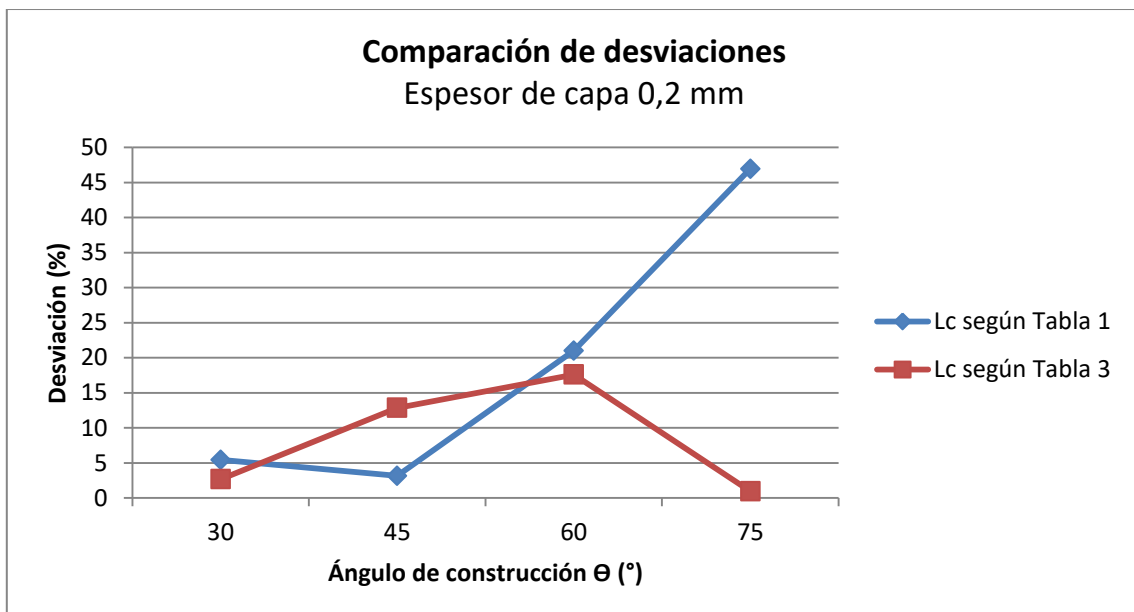


Figura 6. Comparación de desviaciones para 0,2 mm espesor de capa

Igual que en el caso anterior, los resultados mejoran para la  $L_c$  elegida para perfiles periódicos, aunque el ángulo de  $45^\circ$  obtiene una desviación mayor para las nuevas longitudes de corte, lo que resulta un contrapunto a tener en cuenta.

El dato más destacado es la disminución del valor de la medida en el ángulo de  $75^\circ$ . Dicho ángulo de  $75^\circ$ , teóricamente obtiene una rugosidad muy pequeña e idealizada, ya que el propio proceso de fabricación incluye defectos que afectan en la evaluación de la superficie y que no se tienen en cuenta en el modelo teórico, no obstante, al ajustar su longitud de corte, algunos de esos defectos son omitidos en la medición del microscopio. Cabe destacar para los espesores de capa de 0,15 mm y 0,2 mm, que el ángulo de  $45^\circ$  aumenta su desviación respecto a la teoría para los resultados de  $L_c$  de perfil periódico, aunque sigue siendo una desviación pequeña, de alrededor del 10 %.

## ANEXO 10. IMÁGENES DE FILTRADO SEGÚN LA LONGITUD DE CORTE

En las siguientes imágenes se muestra un ejemplo del filtrado producido según la longitud de corte usada en el perfil obtenido en Alicona, para una pieza de cuatro caras fabricada con la tecnología de FDM, con ángulo de  $30^\circ$  y espesor de capa de  $0,2\text{ mm}$ . Además de observar el filtrado que se produce, también se denota una rugosidad mayor para la  $L_c$  de  $8000\text{ }\mu\text{m}$  ya que tiene en cuenta más parámetros que las otras  $L_c$ . Lo que se busca teóricamente es encontrar la rugosidad que produce el escalonado de la pieza y en este caso, se puede observar que para longitudes de corte pequeñas ya no se aprecian los escalones.

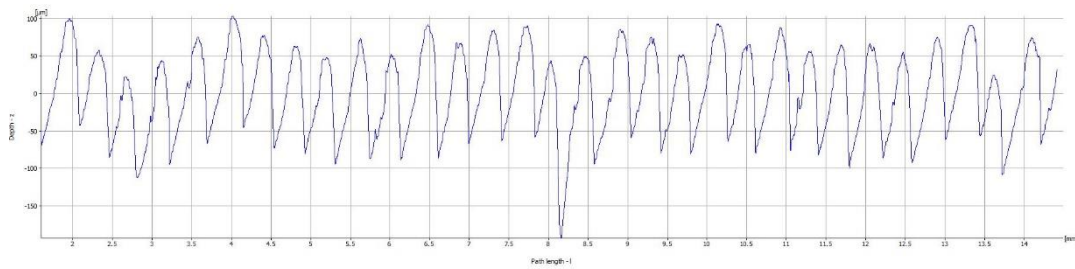


Figura 1. Perfil de rugosidad para  $L_c$  de  $8000\text{ }\mu\text{m}$ .

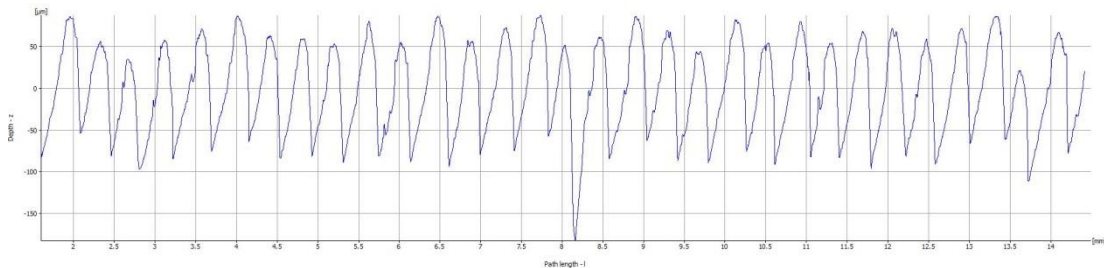


Figura 2. Perfil de rugosidad para  $L_c$  de  $2500\text{ }\mu\text{m}$ .

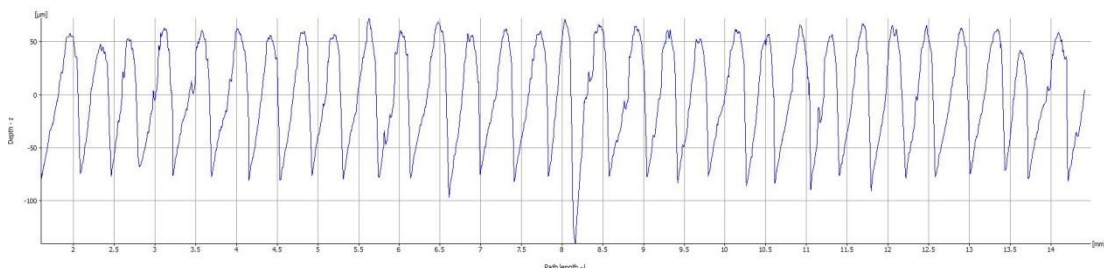


Figura 3. Perfil de rugosidad para  $L_c$  de  $800\text{ }\mu\text{m}$ .

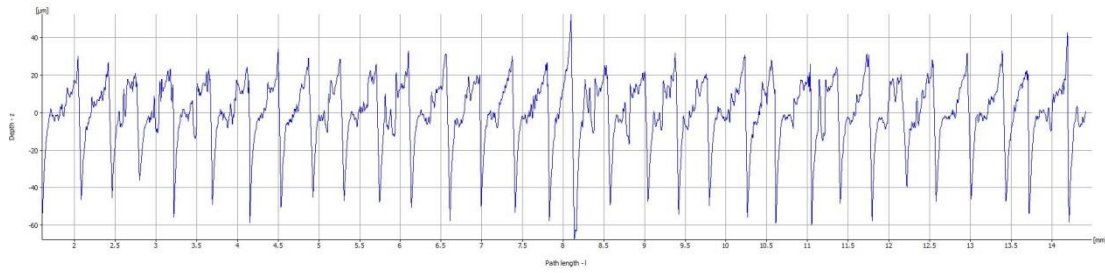


Figura 4. Perfil de rugosidad para  $L_c$  de 250  $\mu\text{m}$ .

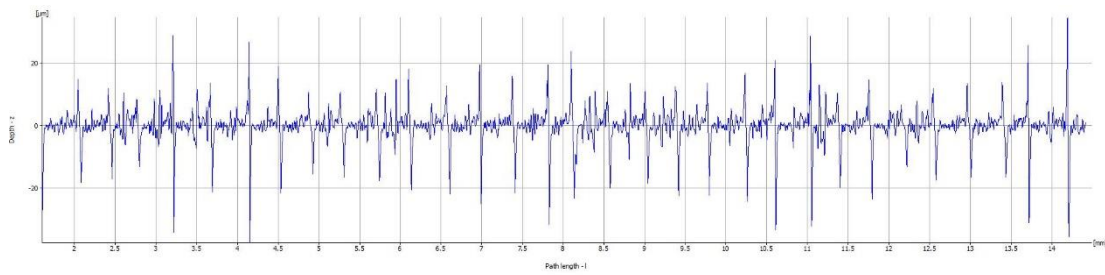


Figura 5. Perfil de rugosidad para  $L_c$  de 80  $\mu\text{m}$ .

## ANEXO 11. MEDIDAS COMPLETAS

### 1. Medidas completas microscopio

Las medidas de rugosidad (Ra) y las longitudes de corte (Lc) representadas en las siguientes tablas están en  $\mu\text{m}$ .

#### Tecnología FDM

PIEZA DE 4 CARAS (30-45-60-75)				
0,2 mm	30°	45°	60°	75°
8000 $\mu\text{m}$	44,76	37,11	33,56	30,49
2500 $\mu\text{m}$	43,58	34,63	29,23	26,77
800 $\mu\text{m}$	39,08	31,35	22,85	20,94
250 $\mu\text{m}$	---	---	---	---

PIEZA DE DOS CARAS (30-45-60-75)				
0,2 mm	30°	45°	60°	75°
8000 $\mu\text{m}$	45,64	31,02	24,72	28,67
2500 $\mu\text{m}$	44,01	29,92	23,51	24,72
800 $\mu\text{m}$	40,30	27,93	20,39	19,66
250 $\mu\text{m}$	---	---	---	---

PIEZA DE 4 CARAS (30-45-60-75)				
0,15 mm	30°	45°	60°	75°
8000 $\mu\text{m}$	33,63	27,39	30,30	21,08 25,35
2500 $\mu\text{m}$	33,29	26,15	26,77	23,00
800 $\mu\text{m}$	30,94	24,46	20,70	18,16
250 $\mu\text{m}$	---	---	---	11,64

PIEZA DE 2 CARAS (30-45-60-75)				
0,15 mm	30°	45°	60°	75°
8000 $\mu\text{m}$	33,02	29,35	21,05	26,70
2500 $\mu\text{m}$	32,69	28,08	21,04	21,39
800 $\mu\text{m}$	31,11	25,58	15,09	17,25
250 $\mu\text{m}$	---	---	---	11,07

PIEZA DE 4 CARAS (30-45-60-75)				
0,1 mm	30°	45°	60°	75°
8000 $\mu\text{m}$	25,14	22,27	23,40	20,16
2500 $\mu\text{m}$	24,68	21,25	20,90	18,89
800 $\mu\text{m}$	22,59	18,52	17,61	15,42
250 $\mu\text{m}$	---	---	10,69	9,80

PIEZA DE 2 CARAS (30-45-60-75)				
0,1 mm	30°	45°	60°	75°
8000 µm	24,10	23,67	18,35	23,57
2500 µm	23,25	22,86	17,79	21,39
800 µm	21,80	20,22	16,01	16,30
250 µm	---	---	10,10	9,89

### Tecnología SLS

PIEZA DE 4 CARAS (30-45-60-75), antes de la limpieza con abrasivo				
0,1 mm	30°	45°	60°	75°
8000 µm	16,77	13,08	13,59	14,41
2500 µm	16,47	13,46	13,22	13,15
800 µm	14,92	12,00	11,99	11,85
250 µm	10,81	8,45	8,84	8,98
80 µm	4,84	4,14	4,55	4,44

PIEZA DE 4 CARAS nº 1 (30-45-60-75), antes de la limpieza con abrasivo				
0,2 mm	30°	45°	60°	75°
8000 µm	31,24	28,61	16,14	17,82
2500 µm	30,55	27,81	15,24	16,15
800 µm	27,98	26,21	13,68	14,58
250 µm	13,24	15,06	10,01	9,97
80 µm	5,65	6,17	4,74	4,83

PIEZA DE 4 CARAS nº 2 (30-45-60-75), antes de la limpieza con abrasivo				
0,2 mm	30°	45°	60°	75°
8000 µm	30,53	28,41	16,42	16,74
2500 µm	29,81	27,19	15,34	15,24
800 µm	27,54	25,42	13,49	13,79
250 µm	13,26	14,28	9,75	9,76
80 µm	5,38	6,03	4,82	4,85

SENOIDES (antes de la limpieza con abrasivo)			
Espesor de capa:	0,1 mm		0,2 mm
8000 µm	309,69		256,94
2500 µm	81,47		72,67
800 µm	25,03		33,29
250 µm	14,61		17,47
80 µm	6,46		7,62

TRIANGULARES (antes de la limpieza con abrasivo)		
Espesor de capa:	0,1 mm	0,2 mm
8000 $\mu\text{m}$	201,95	190,74
2500 $\mu\text{m}$	64,12	76,09
800 $\mu\text{m}$	21,57	28,09
250 $\mu\text{m}$	8,92	13,47
80 $\mu\text{m}$	3,89	5,48

ESFERAS (antes de la limpieza con abrasivo)		
Espesor de capa:	0,1 mm	0,2 mm
8000 $\mu\text{m}$	171,07	163,92
2500 $\mu\text{m}$	26,55	32,10
800 $\mu\text{m}$	14,41	17,43
250 $\mu\text{m}$	9,63	12,42
80 $\mu\text{m}$	4,01	6,47

PIEZA DE 4 CARAS (30-45-60-75), después de la limpieza con abrasivo				
0,1 mm	30°	45°	60°	75°
8000 $\mu\text{m}$	11,06	7,60	7,43	6,85
2500 $\mu\text{m}$	10,45	6,90	6,78	5,82
800 $\mu\text{m}$	8,60	4,97	4,99	4,52
250 $\mu\text{m}$	4,80	6,90	2,04	2,01
80 $\mu\text{m}$	1,63	0,79	0,67	0,70

PIEZA DE 4 CARAS (30-45-60-75), después de la limpieza con abrasivo				
0,2 mm	30°	45°	60°	75°
8000 $\mu\text{m}$	59,40	20,55	14,50	12,10
2500 $\mu\text{m}$	58,84	19,88	14,02	11,16
800 $\mu\text{m}$	54,78	18,20	11,18	7,96
250 $\mu\text{m}$	18,26	8,39	5,49	2,91
80 $\mu\text{m}$	4,35	1,92	1,38	0,78

SENOIDES (después de la limpieza con abrasivo)		
Espesor de capa:	0,1 mm	0,2 mm
8000 $\mu\text{m}$	295,21	308,80
2500 $\mu\text{m}$	78,66	82,29
800 $\mu\text{m}$	16,30	25,93
250 $\mu\text{m}$	6,17	9,93
80 $\mu\text{m}$	2,33	2,73

TRIANGULARES (después de la limpieza con abrasivo)		
Espesor de capa:	0,1 mm	0,2 mm
8000 $\mu\text{m}$	215,45	212,01
2500 $\mu\text{m}$	75,67	72,82
800 $\mu\text{m}$	26,21	24,77
250 $\mu\text{m}$	8,57	7,57
80 $\mu\text{m}$	2,68	2,19

ESFERAS (después de la limpieza con abrasivo)		
Espesor de capa:	0,1 mm	0,2 mm
8000 $\mu\text{m}$	166,79	166,36
2500 $\mu\text{m}$	22,07	23,53
800 $\mu\text{m}$	6,06	8,78
250 $\mu\text{m}$	2,72	4,52
80 $\mu\text{m}$	0,91	1,40

### Tecnología Polyjet

192 $\mu\text{m}$	30°	45 °	60°	75 °
8000 $\mu\text{m}$	24,82	10,65	19,02	19,25
2500 $\mu\text{m}$	24,51	10,05	18,00	18,94
800 $\mu\text{m}$	22,83	8,34	15,34	16,69
250 $\mu\text{m}$	7,50	5,15	9,02	9,75
80 $\mu\text{m}$	2,00	1,82	3,20	4,18

96 $\mu\text{m}$	30°	45 °	60°	75 °
8000 $\mu\text{m}$	10,50	16,70	16,42	18,92
2500 $\mu\text{m}$	9,77	15,90	15,19	17,97
800 $\mu\text{m}$	8,71	13,72	12,79	14,98
250 $\mu\text{m}$	5,78	6,92	7,58	9,53
80 $\mu\text{m}$	1,72	2,06	3,05	4,18

Pieza de 4 caras 16 $\mu\text{m}$	30°	45 °	60°	75°
8000 $\mu\text{m}$	5,91	10,89	14,10	19,00
2500 $\mu\text{m}$	5,38	9,79	13,26	18,22
800 $\mu\text{m}$	4,48	8,11	11,14	15,63
250 $\mu\text{m}$	2,82	4,80	6,75	10,46
80 $\mu\text{m}$	1,08	1,85	2,74	4,94



ESFERA		
	8000 $\mu\text{m}$	146,92
	2500 $\mu\text{m}$	25,24
	800 $\mu\text{m}$	16,83
	250 $\mu\text{m}$	11,84
	80 $\mu\text{m}$	5,74

TRIÁNGULOS		
	8000 $\mu\text{m}$	206,61
	2500 $\mu\text{m}$	61,42
	800 $\mu\text{m}$	15,41
	250 $\mu\text{m}$	3,94
	80 $\mu\text{m}$	1,37

SENOIDE		
	8000 $\mu\text{m}$	292,56
	2500 $\mu\text{m}$	73,69
	800 $\mu\text{m}$	10,78
	250 $\mu\text{m}$	4,25
	80 $\mu\text{m}$	1,67

## 2. Medidas completas rugosímetro

Las medidas de rugosidad (Ra) y las longitudes de corte (Lc) representadas en las siguientes tablas están en  $\mu\text{m}$ .

### Tecnología FDM

PIEZA DE DOS CARAS 45/75, espesor de capa: 0,2mm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	30,63	27,07	27,42	13,81		30,67	27,95	21,55	12,58
	30,66	29,68	27,31	13,81		30,72	27,98	21,48	12,04
	30,63	30,40	27,30	13,80		30,64	27,95	21,70	11,31
	30,60	27,70	27,19	13,82		30,65	27,93	21,50	12,45
	30,14	27,68	27,18	13,81		30,62	27,96	21,73	12,72
MEDIA	30,53	28,50	27,28	13,81	MEDIA	30,66	27,95	21,59	12,22

PIEZA DE DOS CARAS PIEZA 45/75, espesor de capa: 0,15 mm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	28,02	27,48	25,69	15,69		22,90	21,34	18,81	10,83
	28,06	27,39	25,74	15,69		22,80	21,32	18,47	10,59
	27,91	27,14	26,07	15,68		22,80	21,40	19,05	10,60
	27,89	27,15	26,28	15,70		22,73	21,45	17,88	10,55
	27,94	27,19	26,43	15,69		22,73	21,33	18,46	10,71
MEDIA	27,96	27,27	26,04	15,69	MEDIA	22,79	21,36	18,53	10,65

PIEZA DE DOS CARAS 45/75, espesor de capa: 0,1 mm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	25,05	24,18	20,40	10,87		19,73	16,96	13,96	8,73
	25,05	24,17	20,40	10,86		19,70	16,81	14,47	8,71
	25,03	24,19	20,41	10,90		19,82	16,95	14,54	8,67
	25,03	24,16	20,43	10,98		19,70	16,97	14,61	8,70
	25,04	24,17	20,40	10,88		19,72	16,80	13,03	8,75
MEDIA	25,04	24,17	20,40	10,89	MEDIA	19,73	16,89	14,12	8,71

PIEZA DE DOS CARAS 30/60, espesor de capa: 0,2 mm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	41,16	39,66	37,27	12,16		26,16	22,39	20,21	12,73
	41,12	39,55	37,26	12,18		26,09	22,28	20,74	12,72
	41,14	39,54	37,26	12,17		26,20	22,31	20,54	12,75
	41,30	39,70	37,28	12,15		26,15	22,29	20,35	12,72
	41,15	39,63	37,27	12,14		26,10	22,35	20,15	12,73
MEDIA	41,17	39,61	37,27	12,16	MEDIA	26,14	22,32	20,39	12,73

PIEZA DE DOS CARAS 30/60, espesor de capa: 0,15 mm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	31,71	29,92	27,54	11,19		23,12	21,45	16,36	11,12
	31,21	29,80	27,54	11,19		23,29	21,46	16,35	11,13
	31,17	30,26	27,54	11,20		23,30	21,44	16,32	11,12
	31,26	30,25	27,54	11,21		23,31	21,43	16,35	11,11
	31,54	30,50	27,56	11,17		23,34	21,43	16,34	11,12
MEDIA	31,37	30,14	27,54	11,19	MEDIA	23,27	21,44	16,34	11,12

PIEZA DE DOS CARAS 30/60, espesor de capa: 0,1 mm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	24,79	22,79	20,04	11,98		18,26	17,11	14,34	10,85
	24,79	21,70	19,94	11,99		18,20	17,03	14,37	10,85
	24,83	21,51	20,02	11,98		17,67	17,00	14,50	10,86
	24,91	21,65	19,99	11,98		18,03	16,98	14,40	10,87
	24,86	21,61	20,05	11,98		18,30	17,00	14,20	10,86
MEDIA	24,83	21,85	20,00	11,98	MEDIA	18,09	17,02	14,36	10,85



PIEZA DE CUATRO CARAS (45/75)									
Espesor de capa: 0,2 mm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	35,01	34,88	26,40	13,04		29,99	27,38	22,75	10,28
	34,95	34,96	26,40	13,05		30,17	27,31	22,74	10,15
	35,12	35,01	26,43	13,04		30,20	27,31	22,76	10,30
	35,02	34,99	26,42	13,03		30,05	27,37	22,75	10,26
	35,06	34,92	26,37	13,04		30,20	27,37	22,78	10,12
MEDIA	35,03	34,95	26,40	13,04	MEDIA	30,12	27,34	22,76	10,22

PIEZA DE CUATRO CARAS (45/75)									
Espesor de capa: 0,15 mm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	26,57	25,94	23,64	14,03		28,27	27,30	20,97	14,01
	27,78	25,95	23,64	14,03		27,94	27,29	21,10	11,37
	27,52	25,94	23,65	14,01		28,20	27,28	20,80	11,93
	27,40	25,96	23,65	14,03		28,02	27,37	20,85	12,40
	27,61	25,95	23,62	14,05		28,32	27,29	21,37	12,59
MEDIA	27,37	25,94	23,64	14,03	MEDIA	28,15	27,30	21,02	12,46

PIEZA DE CUATRO CARAS (45/75)									
Espesor de capa: 0,1 mm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	21,34	20,71	19,13	11,13		19,25	16,49	9,82	9,60
	21,36	20,71	17,85	11,14		19,23	16,49	9,56	9,58
	21,35	20,71	17,88	11,14		19,23	16,48	8,57	9,60
	21,34	20,71	18,08	11,15		19,27	16,48	9,57	9,58
	21,32	20,71	16,71	11,14		19,27	16,48	10,91	9,59
MEDIA	21,34	20,71	17,93	11,14	MEDIA	19,23	16,48	9,68	9,59

PIEZA DE CUATRO CARAS (30/60)									
Espesor de capa: 0,2 mm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	44,80	41,80	36,40	6,69		30,51	27,77	23,46	10,60
	44,89	41,86	36,40	6,70		29,00	27,76	23,47	10,61
	44,80	41,92	36,40	6,71		29,59	27,50	23,45	10,60
	44,87	41,96	36,40	6,71		29,23	27,77	23,47	10,62
	44,89	41,80	36,40	6,69		29,60	27,64	23,45	10,62
MEDIA	44,85	41,87	36,40	6,70	MEDIA	29,58	27,68	23,46	10,61

PIEZA DE CUATRO CARAS (30/60)									
Espesor de capa: 0,15 mm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	33,27	29,87	29,25	9,34		30,39	31,57	25,42	11,25
	34,11	29,88	29,25	9,34		32,33	31,59	25,40	000
	34,12	29,90	29,25	9,33		32,49	31,58	25,00	000
	34,05	29,85	29,25	9,33		32,47	31,59	25,48	000
	34,10	29,88	29,25	9,36		32,49	31,60	25,46	000
MEDIA	33,93	29,87	29,25	9,34	MEDIA	32,03	31,58	25,35	11,25

PIEZA DE CUATRO CARAS (30/60)									
Espesor de capa: 0,1 mm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	27,63	25,01	20,83	-		24,30	23,50	14,28	13,73
	27,65	25,01	21,11	-		25,16	23,50	14,27	13,73
	27,67	25,98	21,45	-		24,74	23,50	13,84	13,74
	27,65	25,01	20,66	-		24,70	23,50	13,68	13,70
	27,65	25,03	21,33	-		24,75	23,50	13,82	13,75
MEDIA	27,65	25,01	21,08	-	MEDIA	24,73	23,50	13,97	13,73

## Tecnología SLS

PIEZA DE CUATRO CARAS (30/60), después de la limpieza con abrasivo. Espesor de capa 0,2 mm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	48,85	48,81	42,72	12,55		14,30	10,88	-	-
	48,85	48,82	42,72	12,55		14,31	10,88	-	-
	48,85	48,83	42,72	12,55		14,31	10,88	-	-
	48,85	48,83	42,72	12,55		14,32	10,88	-	-
	48,86	48,80	42,73	12,53		14,31	10,88	-	-
MEDIA	48,85	48,82	42,72	12,55	MEDIA	14,31	10,88	-	-

PIEZA DE CUATRO CARAS (45/75), después de la limpieza con abrasivo. Espesor de capa 0,2 mm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	14,27	13,82	-	-		12,54	8,66	-	-
	14,27	13,83	-	-		12,54	8,65	-	-
	14,27	13,82	-	-		12,52	8,68	-	-
	14,25	13,82	-	-		12,54	8,69	-	-
	14,29	13,82	-	-		12,54	8,67	-	-
MEDIA	14,27	13,82	-	-	MEDIA	12,54	8,67	-	-

PIEZA DE CUATRO CARAS (30/60), antes de la limpieza con abrasivo. Espesor de capa 0,2 mm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	41,71	39,30	37,37	11,13		12,08	12,03	10,69	7,44
	41,75	39,31	37,37	11,14		12,09	12,04	10,69	7,43
	41,73	39,29	37,37	11,12		12,08	12,02	10,69	7,43
	41,73	39,27	37,37	11,14		12,08	12,04	10,69	7,43
	41,73	39,29	37,37	11,12		12,08	12,02	10,69	7,42
MEDIA	41,73	39,29	37,37	11,13	MEDIA	12,08	12,03	10,69	7,43

PIEZA DE CUATRO CARAS (45/75), antes de la limpieza con abrasivo. Espesor de capa 0,2 mm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	29,02	28,38	24,59	9,73		11,91	11,54	-	4,91
	29,03	28,38	24,59	9,76		11,94	11,54	-	4,90
	29,04	28,38	24,59	9,76		11,90	11,53	-	4,92
	29,02	28,38	24,59	9,78		11,90	11,54	-	4,91
	29,02	28,38	24,59	9,77		11,91	11,54	-	4,91
MEDIA	29,02	28,38	24,59	9,76	MEDIA	11,91	11,54	-	4,91

PIEZA DE CUATRO CARAS (30/60), después de la limpieza con abrasivo. Espesor de capa 0,1 mm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	11,91	11,54	-	4,91		7,08	6,50	3,82	1,86
	11,90	11,54	-	4,93		7,07	6,49	3,80	1,86
	11,91	11,54	-	4,89		7,07	6,49	3,82	1,86
	11,91	11,54	-	4,89		7,05	6,51	3,82	1,86
	11,92	11,54	-	4,91		7,08	6,51	3,84	1,86
MEDIA	11,91	11,54	-	4,91	MEDIA	7,07	6,50	3,82	1,86

PIEZA DE CUATRO CARAS (45/75), después de la limpieza con abrasivo. Espesor de capa 0,1 mm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	7,31	6,53	4,80	2,76		6,70	7,13	-	1,85
	7,31	6,52	4,80	2,78		6,70	7,13	-	1,85
	7,30	6,52	4,80	2,75		6,70	7,13	-	1,85
	7,31	6,52	4,80	2,76		6,70	7,13	-	1,85
	7,32	6,52	4,80	2,75		6,70	7,13	-	1,85
MEDIA	7,31	6,52	4,80	2,76	MEDIA	6,70	7,13	-	1,85

## Tecnología POLYJET

PIEZA DE DOS CARAS (45/75) Espesor de capa 96µm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	17,01	16,57	13,74	6,08		18,35	17,02	14,40	9,86
	17,00	16,60	13,75	6,08		18,37	17,02	14,40	9,87
	17,01	16,60	13,75	6,07		18,34	17,03	14,40	9,85
	17,02	16,59	13,76	6,06		18,34	17,04	14,40	9,85
	17,01	16,59	13,75	6,06		18,35	17,04	14,40	9,87
MEDIA	17,01	16,59	13,75	6,07	MEDIA	18,35	17,03	14,40	9,86

PIEZA DE DOS CARAS (30/60) Espesor de capa 96µm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	10,86	11,09	8,57	5,30		16,04	13,63	13,31	7,49
	10,86	11,12	8,57	5,29		16,05	13,64	13,31	7,49
	10,87	11,08	8,55	5,29		16,05	13,63	13,33	7,49
	10,85	11,08	8,56	5,31		16,03	13,63	13,31	7,49
	10,86	11,08	8,55	5,31		16,03	13,62	13,29	7,49
MEDIA	10,86	11,09	8,56	5,30	MEDIA	16,04	13,63	13,31	7,49

PIEZA DE DOS CARAS (45/75) Espesor de capa 192µm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	11,37	10,71	8,26	6,20		19,13	17,32	14,09	11,83
	11,35	10,72	8,26	6,20		19,14	17,33	14,13	11,82
	11,35	10,72	8,24	6,20		19,12	17,32	14,11	11,83
	11,37	10,73	8,25	6,20		19,14	17,31	14,13	11,81
	11,36	10,72	8,24	6,21		19,12	17,32	14,09	11,81
MEDIA	11,36	10,72	8,25	6,20	MEDIA	19,13	17,32	14,11	11,82

PIEZA DE DOS CARAS (30/60) Espesor de capa 192µm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	25,61	25,41	22,28	6,26		19,09	17,30	15,71	8,68
	25,60	25,43	22,29	6,24		19,10	17,30	15,71	8,68
	25,60	25,43	22,29	6,26		19,10	17,32	15,72	8,66
	25,59	25,42	22,30	6,22		19,08	17,34	15,73	8,66
	25,60	25,41	22,29	6,22		19,08	17,34	15,73	8,67
MEDIA	25,60	25,42	22,29	6,24	MEDIA	19,09	17,32	15,72	8,67

PIEZA DE CUATRO CARAS (45/75) Espesor de capa 16µm									
45°					75°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	10,35	10,21	8,53	6,47		16,70	16,46	16,33	10,52
	10,35	10,20	8,53	6,47		16,70	16,47	16,33	10,51
	10,36	10,20	8,51	6,47		16,68	16,47	16,34	10,52
	10,35	10,20	8,49	6,47		16,66	16,47	16,35	10,50
	10,34	10,19	8,49	6,47		16,66	16,48	16,35	10,50
MEDIA	10,35	10,20	8,51	6,47	MEDIA	16,68	16,47	16,34	10,51

PIEZA DE CUATRO CARAS (30/60) Espesor de capa 16µm									
30°					60°				
MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250	MEDIDAS	Lc8000	Lc2500	Lc800	Lc250
	6,13	5,52	4,01	2,50		13,94	13,88	10,52	6,10
	6,15	5,52	4,00	2,48		13,96	13,87	10,52	6,08
	6,13	5,50	4,00	2,50		13,92	13,87	10,52	6,11
	6,15	5,50	4,02	2,52		13,92	13,89	10,52	6,11
	6,14	5,51	4,02	2,50		13,96	13,89	10,52	6,10
MEDIA	6,14	5,51	4,01	2,50	MEDIA	13,94	13,88	10,52	6,10

## ANEXO 12. PARÁMETROS DE LA CURVA DE ABBOTT-FIRESTONE

La curva de relación del material (curva Abbott-Firestone) proporciona la relación de material en el perfil a cualquier profundidad dada. En la siguiente figura se muestra un esquema explicativo de la curva de Abbott-Firestone. [23]

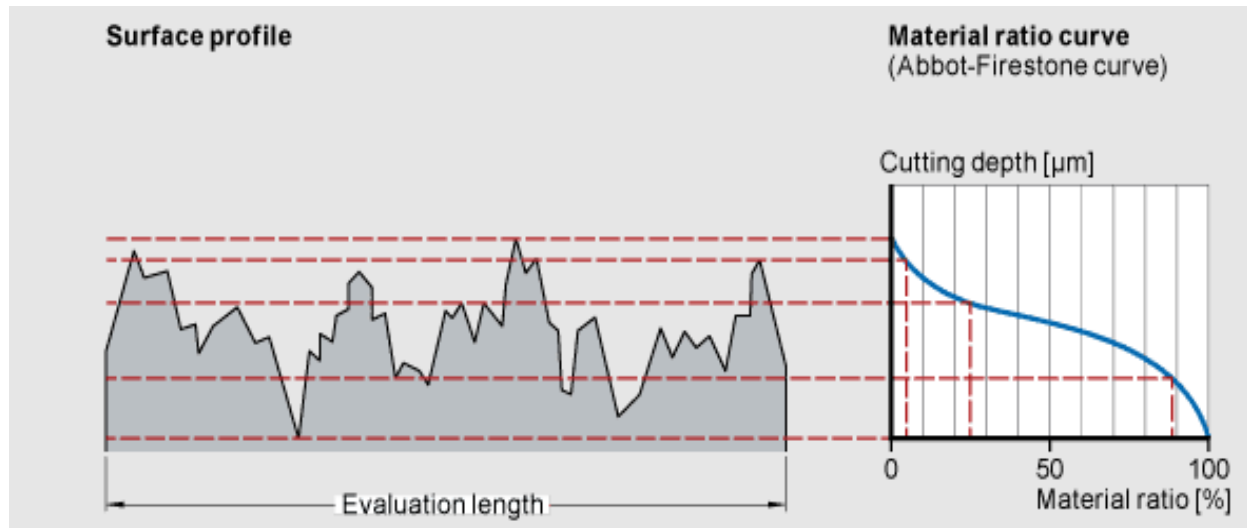


Figura 1. Curva Abbott-Firestone [23]

En el primer tramo de la curva figura una pendiente que representa los picos del perfil, mientras que la pendiente final de la curva corresponde a los valles del perfil.

La curva Abbott-Firestone [23], proporciona más información que los parámetros típicos de rugosidad sobre las características de la superficie, debido a este hecho, resulta importante su utilización en algunas aplicaciones como caracterizar el comportamiento de la superficie frente al desgaste, a la lubricación, a la retención de algún líquido como la tinta y al contacto. Por ejemplo, dos superficies con los mismos valores del parámetro  $R_a$ , pero con distintas características de perfil de superficie, pueden dar lugar a diferentes espesores de película de lubricación.

Los parámetros funcionales que se ven representados en la curva de Abbott-Firestone son los siguientes:

- **$R_k$ ,  $R_{pk}$  y  $R_{vk}$**  [24]  
Estos parámetros se calculan en función de la curva de Abbott-Firestone y representan la altura de los picos, de los valles y la rugosidad del núcleo.

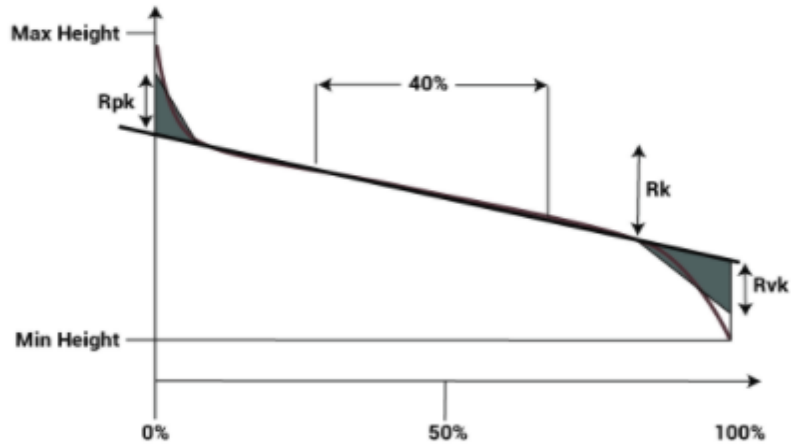


Figura 2. Parámetros de la curva Abbott-Firestone [24]

Entonces, **Rk** se define como la altura de pico a valle de la región de rugosidad del núcleo. **Rpk** es la altura de los picos por encima de la región del núcleo y **Rvk** es la profundidad de los valles por debajo de esta región.

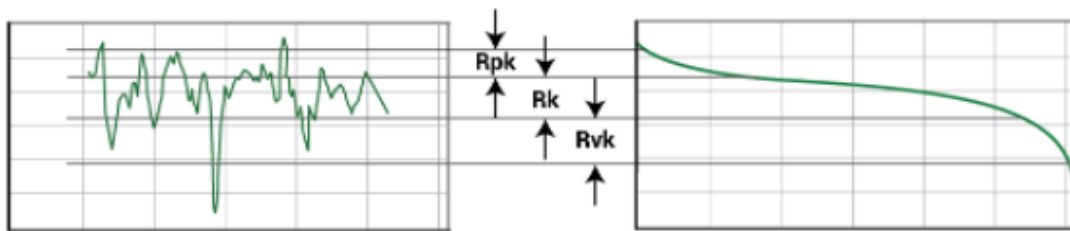


Figura 3. Representación de  $R_{pk}$ ,  $R_k$  y  $R_{vk}$  [24]

En una medición, las contrapartes 3D de estos parámetros ( $S_k$ ,  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$ ) se calculan traspasando un plano por la superficie desde el pico más alto hasta el valle más profundo y se ven representadas en la siguiente figura.

En una medición, las contrapartes 3D de estos parámetros ( $S_k$ ,  $S_{pk}$ ,  $S_{vk}$ ) se calculan traspasando un plano por la superficie desde el pico más alto hasta el valle más profundo y se ven representadas en la siguiente figura.

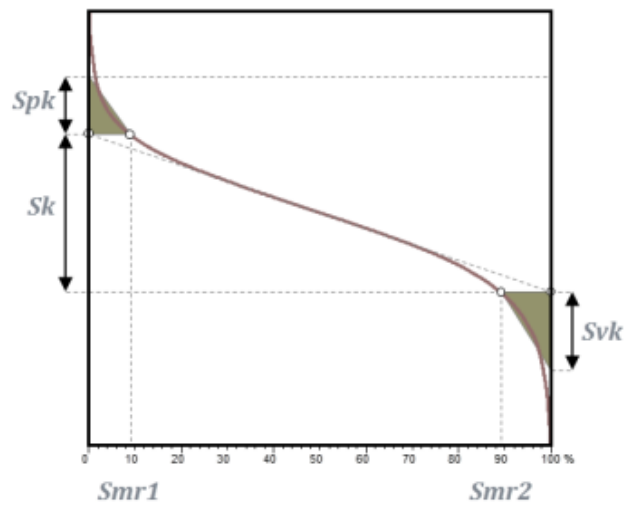


Figura 4. Representación de  $Sk$ ,  $Spk$ ,  $Svk$ ,  $Smr1$  y  $Smr2$  [24]

- **Relación de material ( $mr$ )** [25]

$mr$  es la relación entre el área de intersección de un plano (paralelo al plano medio) que atraviesa la superficie a una altura determinada y el área de la sección transversal de la región de evaluación como se puede ver en la Figura 6. Gracias a este parámetro se establece la curva de Abbot-Firestone, evaluando  $mr$  desde el pico más alto, al valle más bajo en varios niveles.

Para minimizar los valores extremos, se elimina un cierto porcentaje de los desfases de pico y de valle. Normalmente esta compensación es del 1%.

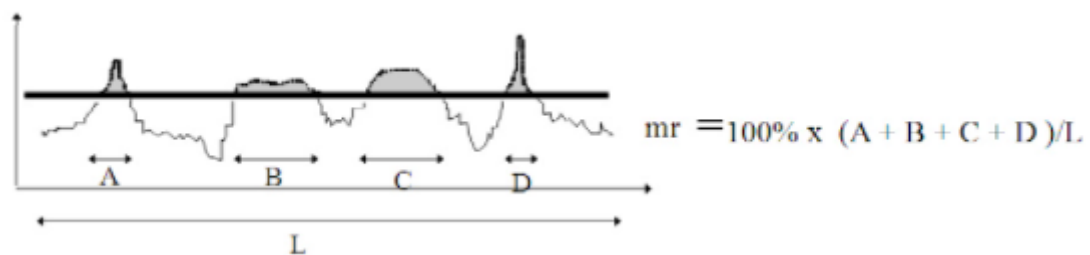


Figura 5. Relación de material ( $mr$ ) [25]

- **Proporción de material ( $Smr$ )** [25]

$Smr$  es la relación de área de la sección transversal de la superficie a una cierta altura, en relación con el área de la sección transversal de evaluación y está representada en porcentaje, como se puede ver en la Figura 4. Un uso importante de este parámetro puede ser para determinar el área de apoyo que queda después de suprimir cierta cantidad de material de la superficie.



## ANEXO 13. JUSTIFICACIÓN PROBLEMÁTICA PIEZAS BLANCAS

Las primeras piezas fueron fabricadas en material de color blanco (Figura 1), pero se tuvo que repetir el proceso ya que la luz del microscopio reflejaba y no permitía caracterizar la superficie (Figura 2), por lo que resultaba imposible conseguir las mediciones adecuadas. Debido a esta problemática, se continuó con la impresión de las piezas en otros colores dando mejor resultado el color azul.



Figura 1. Piezas FDM fabricadas en color blanco



Figura 2. Captura del software de Alicona. No se puede caracterizar la pieza

## ANEXO 14. PRESENTACIÓN DE LAS PIEZAS DISEÑADAS

Teniendo en cuenta todas las condiciones impuestas en el apartado anterior, se realiza un diseño en el programa de diseño asistido por computadora (CAD), Solid Edge. En total se han diseñado 6 tipos de piezas, que se presentan a continuación:

- Una pieza con 4 superficies de medición. Cada una con un ángulo distinto,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $75^\circ$ . Esta pieza integra todos los ángulos que se van a tener en cuenta en el estudio de las superficies y se pueden observar en la Figura 1 que muestra dos perspectivas de la pieza.

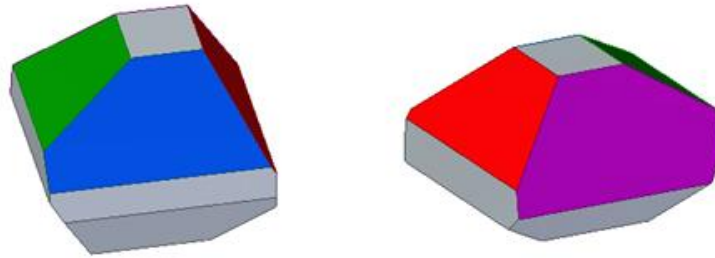


Figura 1. Perspectivas de la pieza de 4 superficies

Como se ha comentado, la pieza cuenta con distintas superficies:

- La cara azul tiene una inclinación de  $45^\circ$ .
- La cara verde corresponde al ángulo de  $30^\circ$ .
- La cara roja posee un ángulo de  $60^\circ$ .
- La cara morada corresponde a la inclinación de  $75^\circ$ .

Todos estos ángulos se refieren al ángulo de construcción entre dichas superficies y la horizontal, como se puede ver detallado en las dos perspectivas que se muestran en la Figura 2.



Figura 2. Ángulos de construcción de la pieza de 4 superficies

Se busca que el diseño de la pieza sea lo más compacto posible para facilitar el manejo y permitir que se puedan realizar las mediciones con los distintos equipos de medida, aunque este hecho, depende de la unión de todas las superficies. Por ello, se ha decidido colocar las caras de  $75^\circ$  y  $60^\circ$

opuestas a las caras de  $30^\circ$  y  $45^\circ$ , ya que estas generan una mayor longitud en el plano horizontal al tener menor ángulo. En la Figura 3 se observan el alzado y la planta de la figura y se proporcionan las medidas totales de la pieza, que son: 26,5 mm de altura, 29,63 mm de ancho y 34,37 mm de largo.

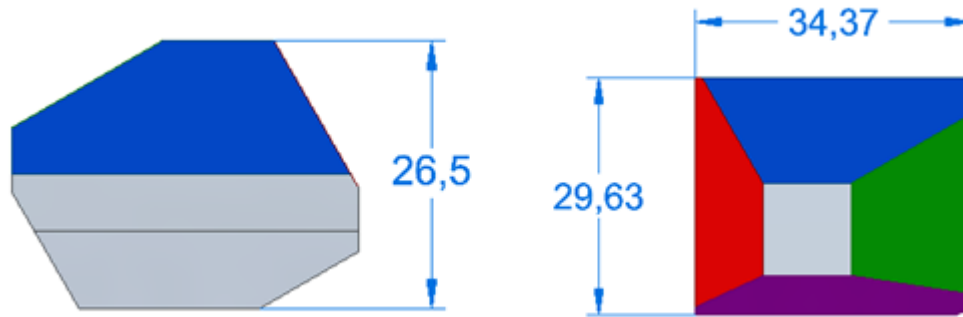
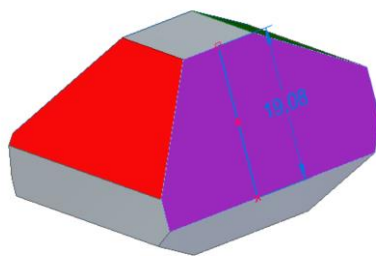
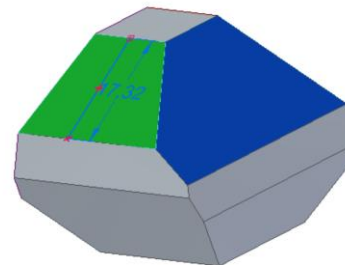


Figura 3. Alzado y planta de la pieza de 4 superficies

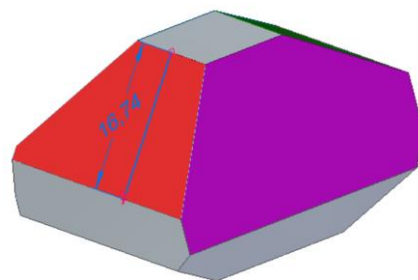
A la hora de realizar el diseño de esta pieza, también se tiene en cuenta que las caras tienen que tener una longitud mínima de 16 mm para poder asegurar las longitudes de corte, a la hora de realizar las mediciones. En las siguientes figuras se muestran las longitudes de cada cara, donde se puede ver que son mayores a 16 mm, ya que se ha considerado el hecho de que la parte final o inicial de las superficies inclinadas, se puede ver modificada por el proceso de fabricación.



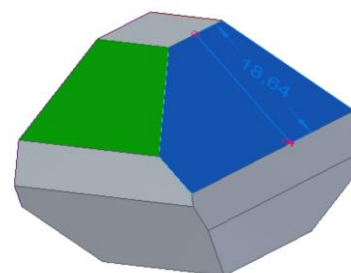
Longitud de la cara de  $75^\circ$ : 19,08 mm



Longitud de la cara de  $30^\circ$ : 17,32 mm



Longitud de la cara de  $60^\circ$ : 16,74 mm



Longitud de la cara de  $45^\circ$ : 18,64 mm

Figura 4. Longitudes de las caras de la pieza de 4 superficies

- Las siguientes piezas también están diseñadas para el estudio de los ángulos antes descritos y también se tiene en cuenta que la pieza debe ser lo más compacta posible para facilitar sus mediciones. La diferencia esta vez, es que los ángulos se realizan en dos piezas distintas por separado para compararla con la anterior:
  - Una pieza de dos caras que implementa el ángulo de  $45^\circ$  (cara de color azul) y el de  $75^\circ$  (cara de color morado), cuyas medidas generales son 22 mm de alto y 25,65 mm de ancho y se muestran en la Figura 5.

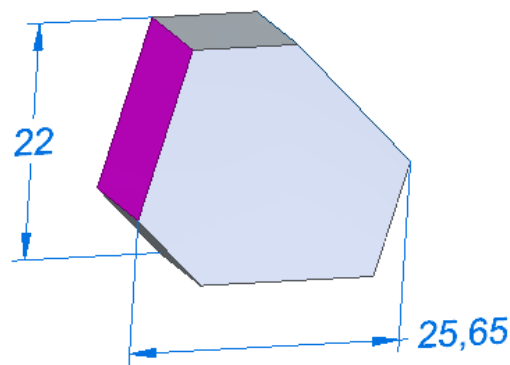


Figura 5. Medidas de la pieza  $45^\circ$ - $75^\circ$

De nuevo, un factor importante a tener en cuenta, es la longitud de medición, que es mayor de 16 mm en ambos casos, 16,2 mm en concreto para ambas caras, como se puede ver en la siguiente figura.

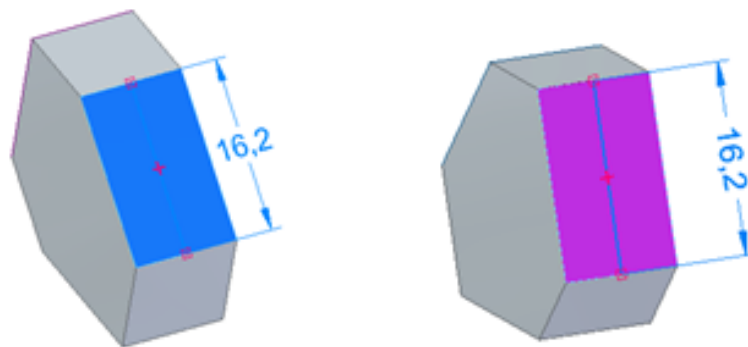


Figura 6. Longitud de las caras de la pieza  $45^\circ$ - $75^\circ$

- Una pieza de dos caras, pero esta vez, con los ángulos de  $30^\circ$  y  $60^\circ$ , cuyas medidas generales son de 18 mm de altura y 27,13 mm de ancho total y las medidas de las caras son de 16,2 mm (Figura 7 y Figura 8).

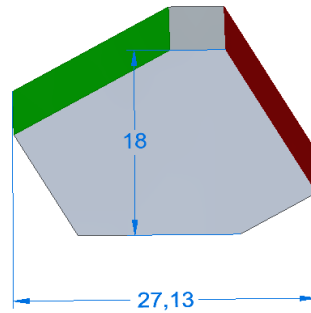


Figura 7. Medidas de la pieza 30°-60°

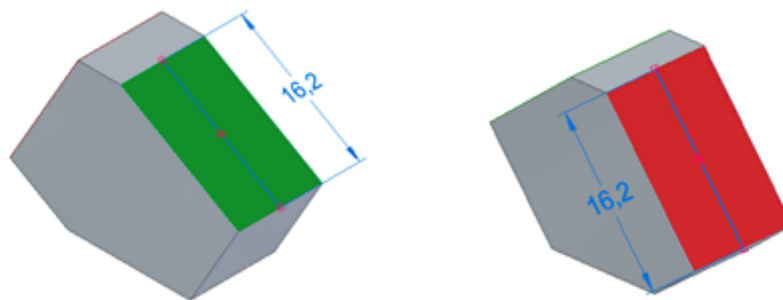


Figura 8. Longitud de las caras de la pieza 30°-60°

- Como se ha adelantado antes, también se diseña una pieza con forma sinusoidal para realizar su evaluación superficial. La amplitud de esta senoidal es de 0,5 mm y el periodo de 4 mm. Según la normativa ISO 4288, para perfiles periódicos, la longitud de corte será de 8 mm y la longitud de evaluación de 40 mm. Estos requisitos se cumplen, ya que su longitud total es de 44 mm (Figura 9).

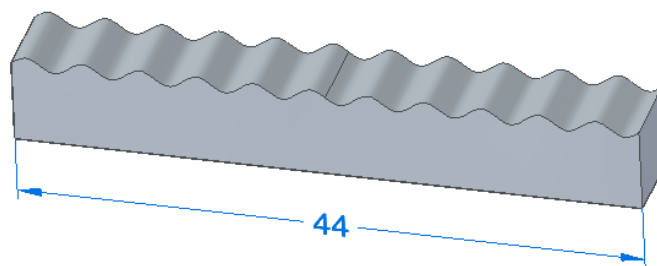


Figura 9. Longitud de la pieza con forma sinusoidal

- También, se presenta la pieza del patrón triangular (Figura 10), que está formado por una base rectangular alargada sobre la cual sobresalen triángulos equiláteros, formando un patrón de repetición. La longitud total de esta pieza también es superior a los 40 mm que dicta la norma. Cabe destacar, que la profundidad de los triángulos se ha diseñado para que sea de 6 mm, que es múltiplo de los distintos espesores de capa, para que no interfieran en su correcta construcción y modifiquen su longitud.

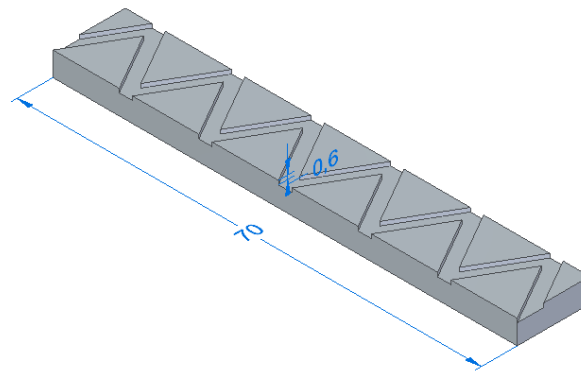


Figura 10. Medidas de la pieza de patrón triangular

- Otra pieza que se realiza para su evaluación, es una esfera con un soporte para facilitar su colocación a la hora de realizar la medición.

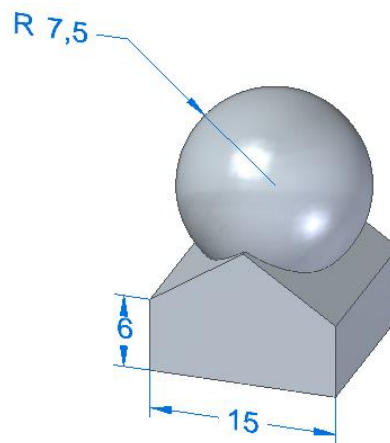


Figura 11. Medidas de la pieza esférica

- Por último, se presentan dos piezas que se realizan especialmente para la fabricación aditiva en Polyjet. Ya que esta tecnología presenta un espesor de capa en la construcción de  $16\ \mu\text{m}$ , los resultados de rugosidad esperados son mucho menores que los anteriores. Para realizar una comparación de la superficie entre las distintas tecnologías, se decide crear unas piezas nuevas, con los mismos ángulos que las anteriores, pero simulando el escalonado con un espesor de capa similar al usado en las piezas anteriores (Figura 12). Se diseña un modelo con escalones de  $96\ \mu\text{m}$  (6 capas de  $16\ \mu\text{m}$ ) y también se crea otro modelo de pieza con escalones de  $192\ \mu\text{m}$  (12 capas). Para realizar el diseño de dichas piezas, se tiene en cuenta las dimensiones de cada escalonado, y se adjuntan en la Tabla 1.

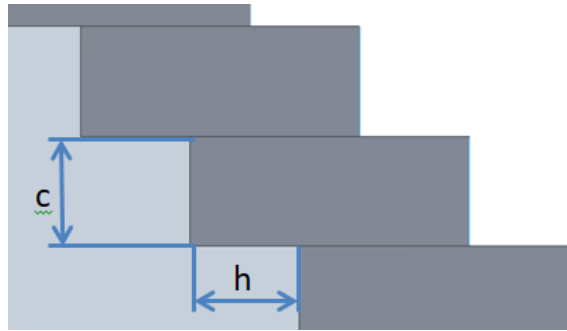


Figura 12. Detalle del escalonado

Esesor de capa c (mm)	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=75^\circ$
	h (mm)	h (mm)	h (mm)	h (mm)
c = 0,096	0,166	0,096	0,055	0,025
c = 0,192	0,332	0,192	0,110	0,051

Tabla 1. Medidas del escalonado de las piezas de Polyjet

Una vez definido el escalonado se procede a realizar el diseño, que se describe en los siguientes apartados:

- Una pieza con dos superficies con ángulos de  $30^\circ$  y  $60^\circ$ . El planteamiento de la geometría es igual a las creadas anteriormente para otras tecnologías, pero esta vez sus caras presentan el escalonado que simula la deposición de capas de 0,096 mm y 0,192 mm (Los valores más próximos a 0,1 y 0,2). Como podemos ver en la siguiente figura, la longitud de estas caras es de 16,51 mm para  $30^\circ$  y de 16,52 mm para  $60^\circ$ , para un escalonado de 0,096 mm de altura.

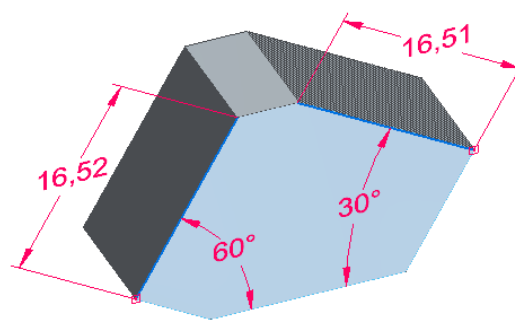


Figura 13. Medidas de la pieza  $30^\circ$ - $60^\circ$  de Polyjet y 96  $\mu$ m

- Para la pieza de  $30^\circ$  y  $60^\circ$  pero con 0,192 mm de altura de escalonado, las medidas son de 16,63 mm para  $60^\circ$  y 16,51 para  $30^\circ$ .

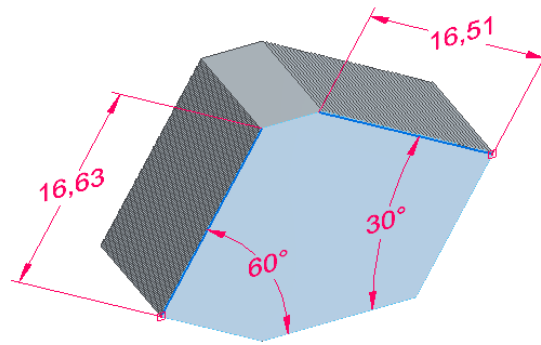


Figura 14. Medidas de la pieza 30°-60° de Polyjet y 192  $\mu$ m

- De igual modo, se diseñan dos piezas con los ángulos de 45° y 75°. Para un escalonado de 0,096 mm, las medidas son de 16,49 mm en la cara de 45° y 16,56 mm para 75°.

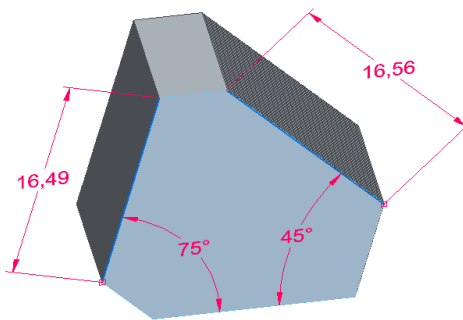


Figura 15. Medidas de la pieza 45°-75° de Polyjet y 96  $\mu$ m

- Por último se presenta la pieza de 45° y 75° con un escalonado de 0,192 mm y las medidas son de 16,49 mm en la cara de 45° y 16,56 mm para 75°.

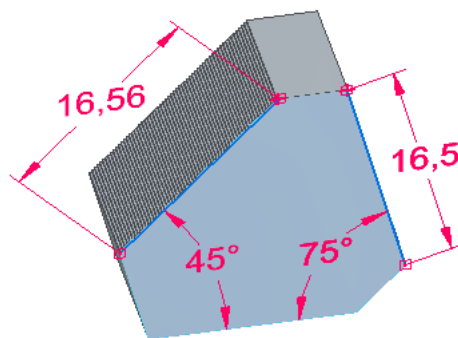


Figura 16. Medidas de la pieza 45°-75° de Polyjet y 192  $\mu$ m



## ANEXO 15. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE PIEZAS SINGULARES

En este anexo se realiza la comparación de unas piezas más complejas y que no se basan en el efecto de escalonamiento como las anteriores.

- **Pieza senoidal**

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para la rugosidad de la pieza senoidal con las distintas tecnologías de fabricación.

Pieza senoidal FDM	0,2 mm	0,15 mm	0,1 mm
Lc 8000 $\mu\text{m}$	276,78 $\mu\text{m}$	266,28 $\mu\text{m}$	272,82 $\mu\text{m}$
Pieza Senoidal SLS	0,2 mm		0,1 mm
Lc 8000 $\mu\text{m}$	256,94 $\mu\text{m}$		309,69 $\mu\text{m}$
Pieza Senoidal SLS tras limpieza con abrasivo	0,2 mm		0,1 mm
Lc 8000 $\mu\text{m}$	308,80 $\mu\text{m}$		295,21 $\mu\text{m}$
Pieza senoidal Polyjet	16 $\mu\text{m}$		
Lc 8000 $\mu\text{m}$	292,56 $\mu\text{m}$		
Pieza senoidal cálculo teórico	Independiente del espesor de capa		
	318,31 $\mu\text{m}$		

Tabla 1. Resultados de rugosidad  $R_a(\mu\text{m})$  de la pieza con forma senoidal

En este caso, el resultado teórico se basa en entender la rugosidad como la propia forma de la senoide, por lo que se utiliza la longitud de corte de 8000  $\mu\text{m}$  para que se pueda apreciar la ondulación de ésta como si fuera el propio perfil de rugosidad. En la tabla se puede observar que en general se muestran unos resultados parecidos a los teóricos, aunque menores.

- **Pieza del patrón triangular**

Para la siguiente pieza, se muestran los resultados obtenidos de rugosidad en la Tabla 2, con las distintas tecnologías de fabricación.

Pieza patrón triangular FDM	0,2 mm	0,15 mm	0,1 mm
Lc 8000 $\mu\text{m}$	196,92 $\mu\text{m}$	200,84 $\mu\text{m}$	215,56 $\mu\text{m}$
Pieza patrón triangular SLS	0,2 mm		0,1 mm
Lc 8000 $\mu\text{m}$	190,74 $\mu\text{m}$		201,95 $\mu\text{m}$
Pieza patrón triangular SLS tras limpieza con abrasivo	0,2 mm		0,1 mm
Lc 8000 $\mu\text{m}$	212,01 $\mu\text{m}$		215,45 $\mu\text{m}$
Pieza patrón triangular Polyjet		16 $\mu\text{m}$	
Lc 8000 $\mu\text{m}$		206,61 $\mu\text{m}$	
Pieza patrón triangular teórico	Independiente del espesor de capa		
	300 $\mu\text{m}$		

Tabla 2. Resultados de rugosidad Ra( $\mu\text{m}$ ) de la pieza de patrón triangular

En este perfil, el cálculo teórico se lleva a cabo obteniendo las áreas de las superficies que sobresalen o que se hunden a partir de una línea media trazada en el centro del patrón triangular.

El material sobrante y los defectos de fabricación pueden hacer que varíe el resultado de rugosidad, y en ese caso, se comprueba que no se ha construido correctamente la profundidad de las formas triangulares ya que debería ser de 0,6 mm pero es menor (Figura 1).

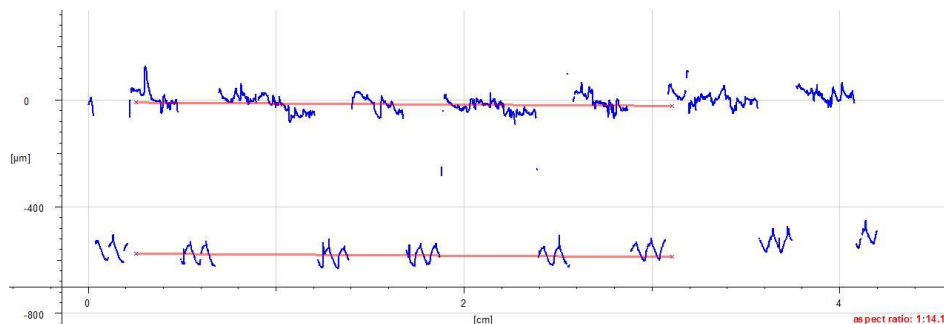


Figura 1. Ejemplo de medida de profundidad del patrón triangular: 0,55 mm (Pieza FDM 0,2 mm).

- **Pieza esférica**

Resulta interesante comprobar la rugosidad de una pieza esférica, ya que normalmente estas piezas son usadas para referenciar, y porque se trata de un caso singular en el que no se puede calcular la rugosidad teóricamente, ya que su superficie no sigue un patrón escalonado como en las superficies inclinadas, sino que varía su ángulo. En Tabla 3 se pueden ver los resultados de las rugosidades obtenidas que resultan similares entre sí para todas tecnologías.

Pieza esférica FDM	0,2 mm	0,15 mm	0,1 mm
Lc 8000 $\mu\text{m}$	149,10 $\mu\text{m}$	157,66 $\mu\text{m}$	165,29 $\mu\text{m}$
Pieza esférica SLS	0,2 mm		0,1 mm
Lc 8000 $\mu\text{m}$	163,92 $\mu\text{m}$		171,07 $\mu\text{m}$
Pieza esférica SLS tras limpieza con abrasivo	0,2 mm		0,1 mm
Lc 8000 $\mu\text{m}$	166,36 $\mu\text{m}$		166,79 $\mu\text{m}$
Pieza esférica Polyjet		16 $\mu\text{m}$	
Lc 8000 $\mu\text{m}$		146,92 $\mu\text{m}$	

Tabla 3. Resultados de rugosidad Ra( $\mu\text{m}$ ) de la pieza esférica

## ANEXO 16. COMPARACIÓN DE PIEZAS DE FDM CON SEGUNDA IMPRESORA

Adicionalmente al proceso, se fabrican nuevas piezas con FDM, para poder realizar una comparación con las piezas anteriores, pero esta vez, con una impresora diferente a la anteriormente usada. La nueva impresora FDM es la Ultimaker S5 y las piezas para comparar se han fabricado con un espesor de capa de 0,1 mm. Estas nuevas piezas (Figura 1), a simple vista se denota una calidad superficial mejor que las piezas creadas con el equipo anterior (Figura 2), y los nuevos resultados se muestran en la Tabla 1.

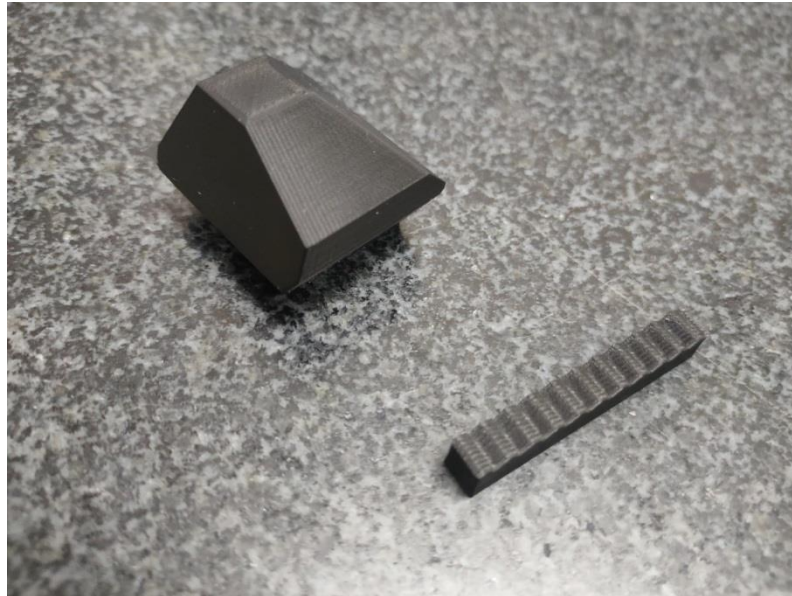


Figura 1. Piezas fabricadas con la impresora Ultimaker S5



Figura 2. Comparación visual de pieza fabricada con Ultimaker y la fabricada con la impresora BQ

En la Tabla 1 se muestran los resultados de rugosidad experimentales obtenidos con el microscopio. Atendiendo a la periodicidad del perfil, también se muestran los resultados obtenidos para las longitudes de corte variables según la tabla 3.

Pieza de 4 caras (30-60-45-75)	0,1 mm Lc según tabla 1	0,1 mm Lc según tabla 3
30°	Lc 8000 $\mu\text{m}$ 20,73 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 20,17 $\mu\text{m}$
45°	Lc 8000 $\mu\text{m}$ 15,88 $\mu\text{m}$	Lc 800 $\mu\text{m}$ 15,67 $\mu\text{m}$
60°	Lc 8000 $\mu\text{m}$ 11,34 $\mu\text{m}$	Lc 250 $\mu\text{m}$ 9,91 $\mu\text{m}$
75°	Lc 8000 $\mu\text{m}$ 8,33 $\mu\text{m}$	Lc 250 $\mu\text{m}$ 6,79 $\mu\text{m}$
Pieza Senoidal	0,1 mm Lc según tabla 1  Lc 8000 $\mu\text{m}$ 282,4345 $\mu\text{m}$	

Tabla 1. Resultados obtenidos con las nuevas piezas de FDM

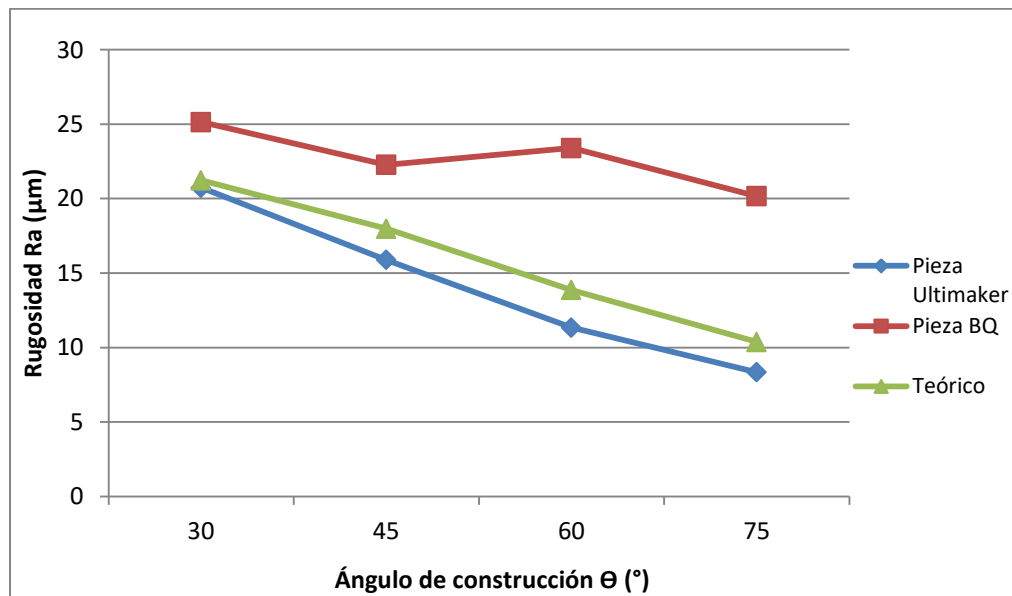


Figura 3. Comparación de las piezas fabricadas con distintas impresoras, para Lc de perfiles no periódicos

En la gráfica anterior se puede advertir que los resultados obtenidos de las piezas impresas con Ultimaker se acercan más a los resultados teóricos que los de las piezas creadas con la impresora de la marca BQ, por lo que se puede concluir, que algunas desviaciones de las piezas anteriores son debidas al propio proceso de fabricación de la impresora.

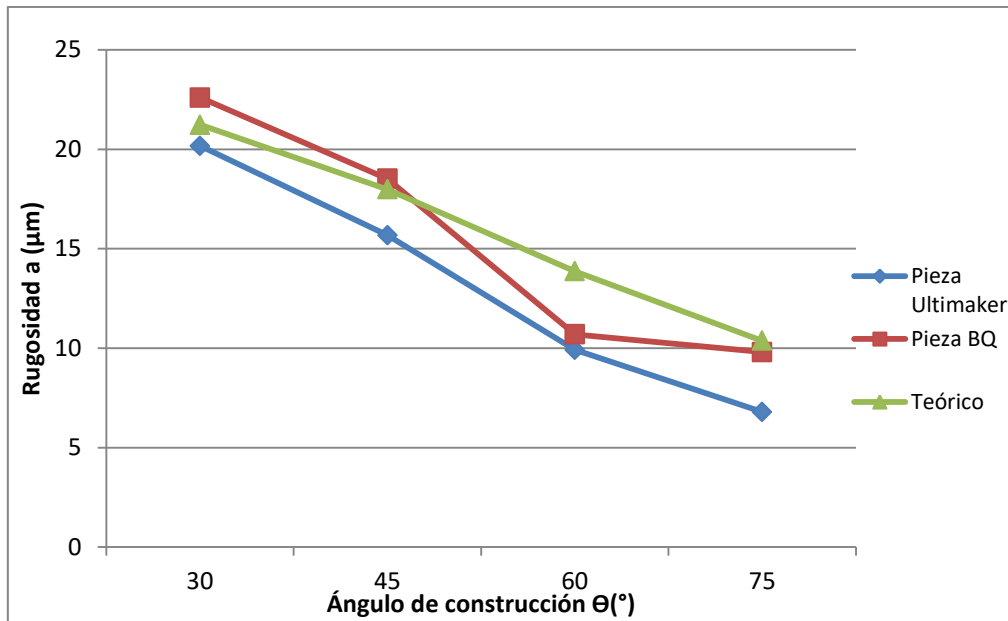


Figura 4. Comparación de las piezas fabricadas con distintas impresoras para Lc según tabla3

En la figura 4 los resultados son similares, sin embargo, se puede observar que los valores de la pieza con Lc variable según la tabla 3, son más parecidos a los teóricos en el caso de la pieza creada con la primera impresora, ya que los nuevos resultados de la impresora Ultimaker resultan demasiado bajos. Al poseer un escalonado más definido y aplicar longitudes de corte más pequeñas, se pierde información de la superficie y la rugosidad resulta más pequeña.