



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD SUPERFICIAL DE PIEZAS OBTENIDAS POR FABRICACIÓN ADITIVA

Autor/es

RICARDO MARTÍNEZ SANMARTÍN

Director/es

JOSÉ ANTONIO ALBAJEZ GARCÍA

Universidad de Zaragoza
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2016



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Ricardo Martínez Sanmartín

con nº de DNI 17762052A en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Grado _____, (Título del Trabajo)

Caracterización y evaluación de la calidad superficial de piezas obtenidas por
fabricación aditiva

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada
debidamente.

Zaragoza, 16 de Septiembre de 2016

Fdo: Ricardo Martínez Sanmartín

Resumen

La fabricación aditiva son una serie de tecnologías entre las cuales se encuentra la famosa impresión 3D. Estas tecnologías permiten la fabricación “directa” de objetos 3D a partir de datos o modelos CAD. Nuestro trabajo se centra en el estudio de la calidad superficial de las piezas fabricadas mediante fabricación aditiva y en cómo es afectada por distintos parámetros de impresión.

La calidad superficial en el diseño industrial es un factor muy importante, en concreto cuando el producto final está fabricado mediante tecnologías aditivas. Esta no solo afecta a la apariencia visual de una pieza, sino que también influye significativamente en las propiedades mecánicas y en la aerodinámica. Por tanto es importante tener un buen control sobre ella y tener modelos y recomendaciones fiables que nos permitan determinar la calidad superficial deseada antes de su fabricación, al igual que se hace con otras propiedades físicas en programas de Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE).

Unas buenas recomendaciones de diseño que tengan en cuenta la rugosidad dan la posibilidad de optimizar al máximo nuestra pieza, únicamente modificando los parámetros de impresión en función de nuestras necesidades.

Con este trabajo se pretende generar unas recomendaciones de diseño que permitan al usuario configurar el proceso de impresión en función de la calidad superficial que se desee alcanzar.

Para la elaboración de estas recomendaciones se ha realizado un estudio bibliográfico previo de multitud de artículos científicos y estudios relacionados con el tema tratado.

Después se ha hecho un primer estudio el cual pretende establecer una relación entre los parámetros de operación en una impresora 3D con la calidad superficial de una pieza fabricada con la misma.

Estos parámetros de operación son: temperatura del extrusor, velocidad y espesor de capa.

Posteriormente se ha realizado un segundo estudio el cual profundiza en los parámetros de rugosidad y evalúa el comportamiento de unos perfiles de impresión del software de laminado *Cura*, según su ángulo y parámetros de operación. Además hace una valoración visual de las muestras impresas.

Los resultados revelan la importancia de la relación entre temperatura y velocidad del extrusor o como la elección de un espesor de capa adecuado puede influir en la calidad final.

Contenido

Resumen	2
Índice de Figuras	6
Índice de Tablas	7
Índice de Gráficas.....	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Estado del arte	9
1.1.1 Presentación fabricación aditiva	9
1.1.2 Calidad superficial.....	9
1.2 Justificación del proyecto.	11
1.3 Objetivo y alcance.....	12
1.4 Ámbito del proyecto	12
1.5 Metodología.....	12
2. DESARROLLO DE PROYECTO	13
2.1 Planteamiento	13
2.2 Material y Equipo.....	13
2.2.1 Materiales.....	13
2.2.2 Impresora	14
2.3 Estudio 1	15
2.3.1 Metodología	15
2.3.2 Objetivos del estudio	15
2.3.4 Elección de parámetros y diseño experimento	16
2.3.5 Diseño de las muestras.....	19
2.3.6 Proceso de impresión	20
2.3.7 Medida de la superficie	23
2.3.8 Resultados	25
2.3.9. Conclusiones.....	37
2.4 Estudio 2	39
2.4.1 Metodología.....	39
2.4.2 Objetivos	39
2.4.3 Elección de parámetros	40
2.4.4 Diseño de las muestras	41
2.4.5 Proceso de impresión.....	42
2.4.6 Medida de la superficie.....	43
2.4.7 Datos de medición	45

2.4.8 Resultados.....	46
2.4.9 Conclusiones	55
3. ANÁLISIS MICROSCÓPICO	56
4. RECOMENDACIONES DE DISEÑO.....	59
5. BIBLIOGRAFÍA.....	61
6. ANEXOS	65
6.1 Anexo 1 : Estudio Bibliográfico.....	*
6.2 Anexo 2 : Cálculos, Gráficas	*
6.3 Anexo 3 : Configuraciones de impresión y software utilizado.....	*
6.4 Anexo 4 : Problemas de impresión.....	*
6.5 Anexo 5 : Fotografías	*
6.6 Anexo 6 : Planos.....	*

Índice de Figuras

Figura 1: Bobina Bq de PLA, 1 kg de material	13
Figura 2: Laca para ayudar a la fijación de la pieza.....	13
Figura 3: Prusa i3 utilizada para la realización del proyecto.....	14
Figura 4: Metodología para el Estudio 1.....	15
Figura 5: Tipo de adhesión “brim”	17
Figura 6: Pieza modelada en Solidworks 2015 de 18x14x13mm.....	20
Figura 7: Muestra número 12. Espesor 0.050 mm	21
Figura 8: Muestra número 17. Espesor 0.175.....	21
Figura 9: Muestra número 4. Espesor 0.300 mm	22
Figura 10: Plantilla con todas las piezas del estudio con su correspondiente marca.....	22
Figura 11: Rugosímetro Mitutoyo empleado para la medición de las muestras del estudio.	23
Figura 12: Cara a 90º.....	23
Figura 13: Cara a 0º.....	23
Figura 14: Cara a 45º.....	23
Figura 15: Dirección de la aguja palpadora del rugosímetro a lo largo de la superficie de la pieza...24	24
Figura 16: Medición de una de las muestras con el rugosímetro	24
Figura 17: Metodología para el Estudio 2.....	38
Figura 18: Diferentes diseños estudio 2	40
Figura 19: Diseño final del estudio 2.....	40
Figura 20: Estimación de tiempo material y dimensiones.....	41
Figura 21: Pantalla LED de Prusa i3.....	41
Figura 22: Piezas impresas Estudio 2	42
Figura 23: Impresora externa.....	42
Figura 24: Caras estudio 2.....	43
Figura 25: Medición de la muestra	44
Figura 26: Pinza de amarre	45
Figura 27: Pieza de baja calidad.....	46
Figura 28: Pieza de calidad ultra	47
Figura 29: FDM. Arista de la cara de 90º con 45º. SEM	56
Figura 30: FDM. Patrón de relleno cara de 0º. SEM	57
Figura 31: FDM. Efecto escalera cara de 45º. SEM.....	57
Figura 32: FDM. Cara 90º.SEM.....	58
Figura 33: Polyjet Cara 90º. SEM	58
Figura 34: SLA Cara 90º. SEM.....	58

Índice de Tablas

Tabla 1: Configuración de impresión constante	16
Tabla 2: Factores y dominio experimental.....	17
Tabla 3: Matriz de experimentos.....	18
Tabla 4: Tiempos de fabricación de las piezas según su espesor.	20
Tabla 5: Matriz de experimento con los datos obtenidos de la medición de las caras.	25
Tabla 6: Matriz de experimentos de los resultados de las réplicas.	26
Tabla 7: Errores experimentales.	26
Tabla 8: Análisis de Varianza para Ra en cara de 90º	27
Tabla 9: Análisis de Varianza para Ra en cara de 0º	31
Tabla 10: Análisis de Varianza para Ra en cara de 45º”	32
Tabla 11: Parámetros fijos estudio 2.	39
Tabla 12: Parámetros variables estudio 2.mm	39
Tabla 13: Tiempos de impresión estudio 2	41
Tabla 14: Resultados de Ra	45
Tabla 15: Resultados de Rz	45
Tabla 16: Resultados de Rq.....	45
Tabla 17: Resultados de Rt.....	46

Índice de Gráficas

Gráfica 1: Efectos principales para medias en cara de 90º.....	28
Gráfica 2: Interacción de Ra en cara de 90º.....	28
Gráfica 3: Probabilidad normal de los puntos de los residuos para cara de 90º.....	29
Gráfica 4: Observado vs Predicho. Modelo completo de predicción de Ra en cara de 90º.....	30
Gráfica 5: Observado vs Predicho. Modelo simplificado de predicción de Ra en cara de 90º.....	30
Gráfica 6: Matriz de experimentos de los resultados de las réplicas.	32
Gráfica 7: Efectos principales para Ra en las caras a 45º.....	33
Gráfica 8: Interacción de Temperatura y Espesor para las caras de 45º.....	33
Gráfica 9: Interacción de Velocidad y Temperatura para las caras de 45º.....	34
Gráfica 10: Gráfica 10. Superficie de respuesta Ra vs Temperatura; Velocidad.....	35
Gráfica 11: Superficie de respuesta de Ra vs. Temperatura; Espesor.....	36
Gráfica 12: Residuos de Ra para cara de 45º modelo cuadrático.....	36
Gráfica 13: 5 gráficas escaneadas de la impresora externa.....	45
Gráfica 14: Perfil Calidad Baja 90º.....	48
Gráfica 15: Perfil Calidad Baja 30º.....	48
Gráfica 16: Perfil Calidad Baja 60º.....	48
Gráfica 17: Perfil Calidad Baja 0º.....	48
Gráfica 18: Perfil Calidad Media 90º.....	49
Gráfica 19: Perfil Calidad Media 30º.....	49
Gráfica 20: Perfil Calidad Media 60º.....	49
Gráfica 21: Perfil Calidad Media 0º.....	49
Gráfica 22: Perfil Calidad Alta 90º.....	50
Gráfica 23: Perfil Calidad Alta 30º.....	50
Gráfica 24: Perfil Calidad Alta 60º.....	50
Gráfica 25: Perfil Calidad Alta 0º.....	50
Gráfica 26: Perfil Calidad Ultra 90º.....	51
Gráfica 27: Perfil Calidad Ultra 30º.....	51
Gráfica 28: Perfil Calidad Ultra 60º.....	51
Gráfica 29: Perfil Calidad Ultra 0º.....	51
Gráfica 30: Comparación de perfiles Calidad media 90º y Calidad Alta 90º.....	52
Gráfica 31: Comparación de perfiles Calidad baja 30º y 60º.....	52
Gráfica 32: Comparación de perfiles Calidad media 0º calidad Ultra 30º.....	53
Gráfica 33: Comparación todos los perfiles en cara 30º.....	54
Gráfica 34: Recomendación velocidad y temperatura PLA.....	55

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del arte

1.1.1 Presentación fabricación aditiva

La Fabricación aditiva se define como “proceso de unión de materiales para crear objetos, usualmente capa por capa, a partir de datos 3D de un modelo, de forma opuesta a las técnicas de fabricación sustractiva.”[40] Estas tecnologías permiten la fabricación “directa” de objetos 3D a partir de datos o modelos CAD.

Presentan una serie de ventajas [40]:

- Disminución del proceso de fabricación, desarrollo y puesta en el mercado del producto.
- Fabricación de piezas sin casi limitaciones geométricas y personalizables.
- Ahorro máximo de material.
- Ausencia de moldes y disminución casi total de errores humanos.
- Se pueden producir piezas totalmente funcionales y sin porosidad residual.
- Fabricación de estructuras cerradas con libertad de diseño. Es posible fabricar piezas con una gran complejidad de forma, con canales internos o estructuras reticulares aligeradas.
- Posibilidad de desarrollar productos multimaterial y multicolor.

También presenta inconvenientes [33]:

- Las propiedades y el comportamiento de los materiales no están suficientemente estudiados en este tipo de fabricación y requieren mayor caracterización. Las propiedades de los materiales pueden ser distintas en función de la dirección de fabricación. A su vez, estas propiedades dependen del espesor de la capa, la tecnología empleada y los parámetros del proceso.
- La calidad superficial y la precisión dimensional es insuficiente en algunos casos. Dependiendo de la tecnología empleada puede ser necesario realizar un mayor número de post-procesos y acabados superficiales incrementando el coste del producto.

1.1.2 Calidad superficial

La calidad superficial de las piezas es una de las mayores limitaciones en las tecnologías de fabricación aditiva, especialmente en la tecnología FDM¹. Esto es debido al llamado efecto escalera² el cual tiene un gran efecto en la rugosidad de la misma. Este problema está directamente relacionado con la altura de la capa o espesor, por tanto reduciendo la altura se minimiza el problema y por consiguiente la rugosidad disminuye.

Cuando hablamos de rugosidad y calidad superficial en el ámbito de la fabricación aditiva no nos referimos exactamente a la rugosidad tradicional que se define en las piezas mecanizadas metálicas. El concepto es muy similar y por ello utilizamos los mismos parámetros y algunas consideraciones generales de la rugosidad, pero la naturaleza de las imperfecciones superficiales es de origen muy distinto a las de las piezas mecanizadas.

¹ Modelado por deposición fundida, o *Fused deposition modeling* en inglés

² Del inglés o “stair-stepping effect”

Se han hecho diversos estudios para determinar los principales efectos causantes de la rugosidad de las piezas fabricadas mediante AM, según estos estudios los factores que más afectan son:

- Altura y espesor de capa[1]
- Ángulo de fabricación (Peores ángulos, 20°-70°, 110°-160°)[13]
- Relleno parcial[1]
- Velocidad de extrusión[21]

La temperatura no es un factor decisivo para la rugosidad y apenas tiene efectos en ella [21], aunque se abre la posibilidad a estudiarla en relación con otras variables de impresión como la velocidad.

1.2 Justificación del proyecto.

Dentro del ámbito de las tecnologías aditivas, el uso más extendido hasta hoy se localiza en el prototipado rápido. Estas tecnologías ofrecen la posibilidad de fabricar prototipos de piezas a partir de modelos 3D diseñados por ordenador sin necesidad de construir caros moldes o matrices, esto acorta y abarata el proceso de diseño y fabricación de un nuevo prototipo. Como resultado de esta reducción temporal y económica en la construcción de un prototipo, se permite un mayor número de iteraciones.

Aunque este tipo de fabricación presente multitud de ventajas, también tiene inconvenientes. Entre ellos que la calidad superficial y la precisión dimensional es insuficiente en algunos casos. Dependiendo de la tecnología empleada puede ser necesario realizar un mayor número de post-procesos y acabados superficiales incrementando el coste del producto.

Además puesto que este tipo de tecnologías han avanzado a pasos agigantados, cada vez es más importante tener un mejor resultado de las propiedades físicas de las piezas que se fabrican. Se han realizado multitud de estudios relacionados con sus propiedades mecánicas pero pocos con su calidad superficial.

La calidad superficial en el diseño industrial es un factor muy importante. Esta afecta a muchas propiedades físicas de la pieza final, tales como sus propiedades mecánicas y aerodinámicas. Además también afecta significativamente a su calidad visual.

Por todo esto, surge la necesidad de realizar un estudio sobre cómo mejorar y predecir esta calidad superficial en las tecnologías aditivas, con el fin de generar unas buenas recomendaciones de diseño que tengan en cuenta la rugosidad, para poder optimizar al máximo la pieza, únicamente modificando los parámetros de impresión en función de nuestras necesidades.

1.3 Objetivo y alcance

Se pretende estudiar la relación entre la calidad superficial como parámetro que condiciona la apariencia estética de piezas fabricadas mediante tecnologías de fabricación aditiva (FDM SLA) según distintos parámetros de operación como puedan ser: tamaño de capa, orientación de las superficies, velocidad de impresión, etc. Con esa información se generarán recomendaciones de diseño (que pueden ser diferentes según la tecnología empleada) que permitan al usuario configurar el proceso de impresión en función de la calidad superficial que se desee alcanzar.

Se realizarán dos estudios con el fin de generar unas conclusiones que nos lleven a estas recomendaciones.

1.4 Ámbito del proyecto

El proyecto se lleva a cabo en el departamento de Ingeniería y Diseño de Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

En dicho departamento se utilizará la impresora 3D con la que realizaremos nuestras pruebas pertinentes. Además utilizaremos diversas herramientas del taller del departamento de fabricación y el laboratorio de metrología.

1.5 Metodología

Para la elaboración de la memoria y el alcance de los objetivos se van a seguir los siguientes pasos.

- Investigación bibliográfica sobre el tema propuesto.
- Diseño de diferentes muestras/patronos que nos servirán para nuestros estudios, realizados mediante el programa CAD SolidWorks.
- Fabricación de las piezas según diferentes parámetros de impresión
- Análisis y medición de la calidad superficial de las muestras con tecnologías ópticas y por contacto.
- Generación de conclusiones a partir de los resultados obtenidos para la creación de recomendaciones de diseño.

2. DESARROLLO DE PROYECTO

2.1 Planteamiento

Para el alcance de los objetivos se han propuesto dos estudios diferentes con el fin de que las conclusiones nos ayuden para generar las recomendaciones de diseño. Además se ha hecho un estudio bibliográfico previo con el fin de asentar una base para la realización del proyecto. El resumen del estudio bibliográfico puede ser consultado en el **Anexo 1**.

En un primer estudio se pretende establecer una relación entre los parámetros de operación en una impresora FDM con la calidad superficial de una pieza fabricada con la misma impresora. En el segundo estudio se quiere dotar al usuario de unas recomendaciones de impresión del software Cura basadas en la calidad superficial. Donde pueda hacer la elección en función de sus prioridades de relación entre rugosidad, tiempo de fabricación y calidad visual.

En el segundo estudio se analiza las configuraciones de impresión predeterminadas que propone el fabricante y en el primero se hace un análisis detallado para comprobar si los valores que este propone son realmente acertados desde el punto de vista de su calidad superficial. La razón por la que se ha invertido el orden de los estudios es para que sea más sencillo de valorar y contextualizar los valores del fabricante en la segunda parte.

Para la realización de los estudios se han realizado una serie de apartados comunes tales como materiales, equipo parámetros de impresión constantes.

2.2 Material y Equipo

2.2.1 Materiales

Aunque es muy habitual en las impresoras FDM el uso de material ABS, en nuestro caso no ha sido posible ya que la impresora no dispone de cama calefactada.

Es por ello que para la elaboración de nuestras muestras se ha utilizado una bobina de PLA azul³ y blanco⁴, marca *Bq* de 1.75 mm de diámetro, cuyas propiedades más destacables y su ficha técnica completa se puede encontrar en [47]

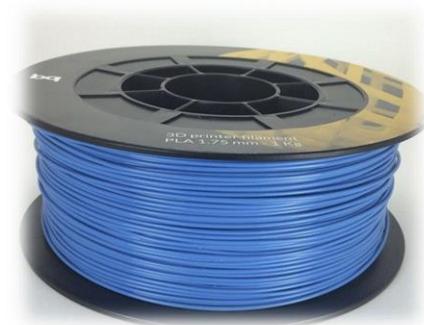


Figura 1. Bobina Bq de PLA, 1 kg de material.



Figura 2. Laca para ayudar a la fijación de la pieza.

³ Para el estudio 1

⁴ Para el estudio 2. Cuando el color es blanco o transparente el punto de fusión disminuye, ya que el material presenta menos impurezas

También se ha utilizado “*laca Nelly*” figura 33, la cual ayuda a la fijación de la pieza a la cama de impresión para evitar posibles problemas futuros de adhesión.

2.2.2 Impresora

Para la fabricación de las piezas se ha utilizado una impresora de FDM auto replicable o RepRap “*BQ Prusa i3 Hephestos*”. Este tipo de impresoras están diseñadas de tal manera que sus piezas estructurales están fabricadas por otras impresoras del mismo modelo. Esto permite un abaratamiento de costes que hace que este tipo de impresoras sean mucho más asequibles.

Las especificaciones detalladas de dicha impresora están disponibles en [46].

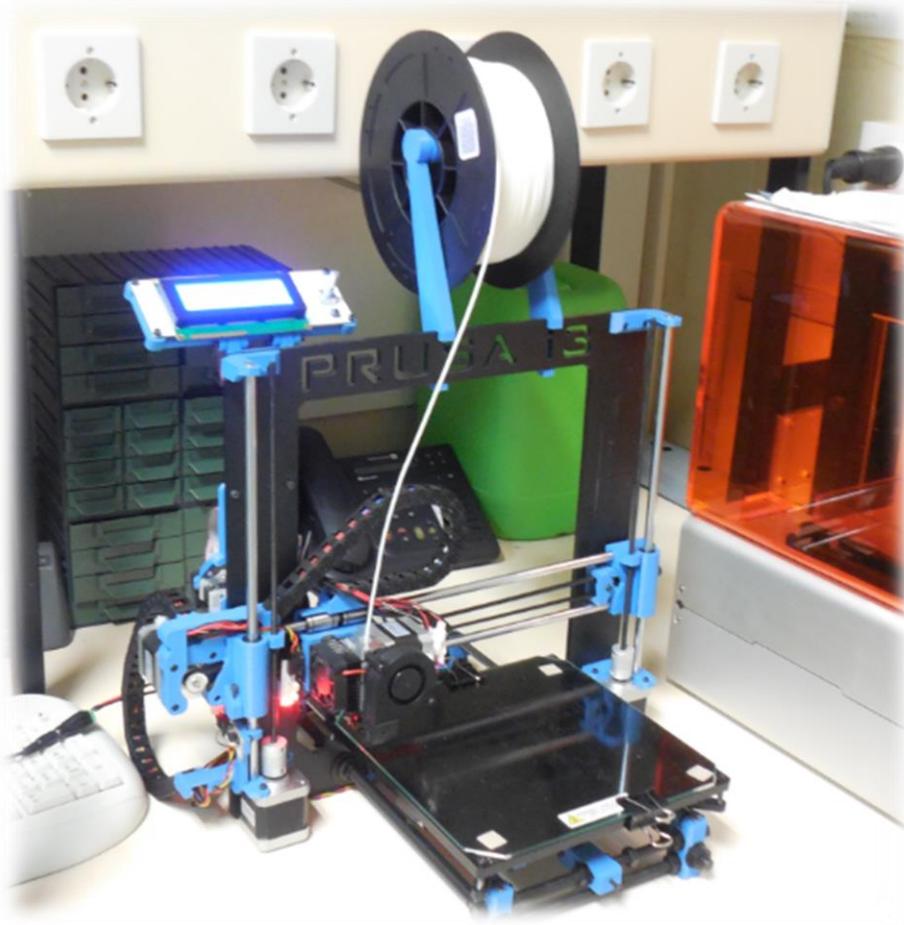


Figura 3. Prusa i3 utilizada para la realización del proyecto. (el filamento utilizado fue el azul)

2.3 Estudio 1

2.3.1 Metodología

El proceso seguido para nuestro estudio es el representado en la *figura 28* donde se partió de unos objetivos y se siguió los pasos para alcanzarlos con éxito por medio de un experimento.



Figura 4. Metodología para el Estudio 1.

2.3.2 Objetivos del estudio

Se pretende establecer una relación entre los parámetros de operación en una impresora FDM con la calidad superficial de una pieza fabricada con la misma impresora. Con esa información se generarán unas conclusiones, que nos ayudarán más tarde a realizar unas recomendaciones de diseño que permitan al usuario configurar el proceso de impresión en función de la calidad superficial que se desee alcanzar.

2.3.4 Elección de parámetros y diseño experimento

2.3.4.1 Elección de variables

Se pretende analizar el efecto conjunto de diferentes parámetros de operación en las distintas muestras que obtengamos.

Se creyó conveniente llevar a cabo un diseño factorial de experimentos, ya que este tipo de diseño se usa ampliamente en casos donde intervienen varios factores y se quiere estudiar el efecto conjunto de los mismos sobre una determinada respuesta.

Los factores para el experimento se han elegido siguiendo los criterios de varios estudios incluidos en la bibliografía [21], los cuales dicen que los factores más influyentes en la fabricación mediante tecnología FDM son:

- **Espesor de capa**
- Orientación de fabricación
- Angulo de la superficie
- **Temperatura de la extrusión**
- Temperatura de la cama
- **Velocidad de la extrusión**
- Resolución del movimiento del extrusor
- Tipo de adhesión

Tras un análisis de la importancia de los diferentes factores se han seleccionado los destacados en negrita, los cuales estudiaremos con un dominio experimental de 3 niveles. Por tanto nuestro diseño de experimento constará de 3^3 (3 factores y 3 niveles)

Esto dará lugar a un total de **27** combinaciones, más 2 piezas repetidas en el punto central del experimento lo cual nos ayudara a ver el error experimental. Por tanto obtendremos un total de 29 piezas para analizar.

2.3.4.2 Parámetros de impresión constantes.

Para la impresión de las piezas se han seleccionado una serie de parámetros constantes, los cuales vienen dados en algunos casos por la configuración de la impresora y otros pueden ser modificados mediante software.

A continuación se muestra una tabla con la configuración de los parámetros constantes que se utilizaron en todas las piezas. La configuración completa con todos sus parámetros se encuentra en el *Anexo 3*.

Diámetro del extrusor	0.4
Densidad de relleno	20 %
Ventiladores	Activados
Tipo de Adhesión	Sí, Tipo Brim
Tipo de cama	Fría

Tabla 1. Configuración de impresión constante.

El diámetro de 0.4 es el más utilizado en las impresoras FDM y el que mejores resultados suele dar, por tanto se decidió no modificar este parámetro. Según un estudio de otra universidad española [44] la densidad de relleno afecta fundamentalmente a la resistencia a tracción de la pieza y no influye significativamente en la rugosidad de la misma, por tanto se optó por fijarla en el mínimo para que la pieza aguante, de esta forma reduciremos el tiempo de fabricación y el material consumido. Puesto que no disponemos de una cama calefactada en nuestro estudio se ha establecido una fijación a la base tipo “brim”. Este tipo de adhesión consiste en una primera capa de material en la cama de impresión que rodea a la pieza, esto evita que la pieza se curve cuando se empiezan a fabricar las capas superiores.

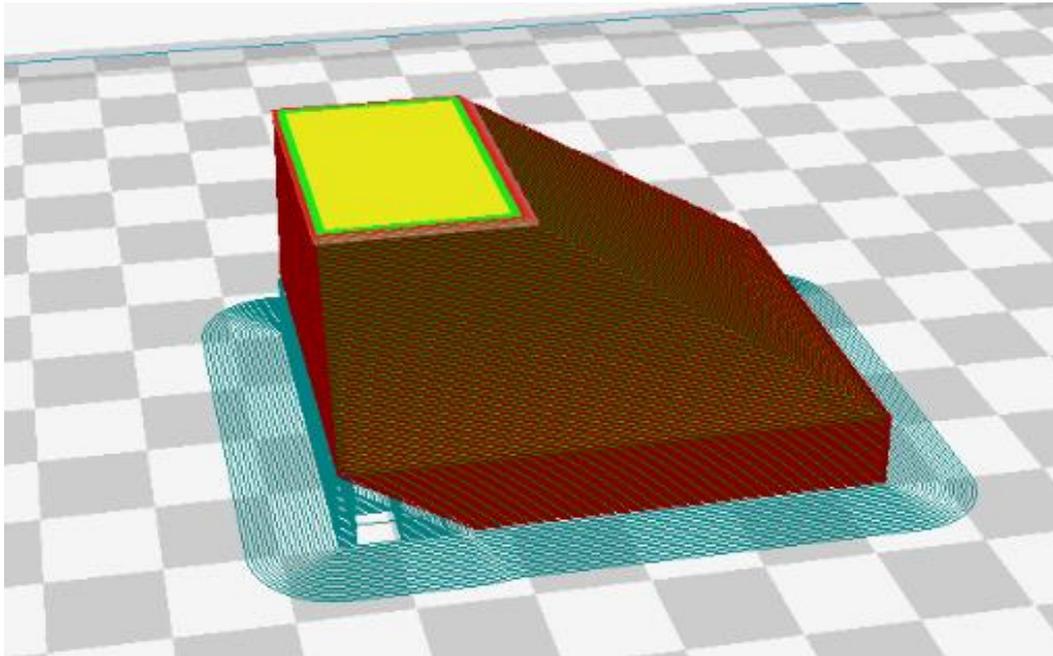


Figura 5. En azul, el tipo de adhesión “brim”, rodeando la primera capa de la pieza.

2.3.4.3 Diseño del experimento

2.3.4.3.1 Factores y niveles

Tal y como se ha mencionado anteriormente se va a realizar un diseño de experimento factorial 3^3 , con 3 repeticiones en su punto central. Estas repeticiones reducen los errores aleatorios no sistemáticos y permiten calcular el porcentaje de error experimental, ayudando a detectar posibles efectos de falta de linealidad.

Los factores seleccionados y su dominio experimental o niveles se muestran en la *tabla 5*.

Factores	Unidades	Dominio experimental		
		Nivel Bajo	Nivel Medio	Nivel Alto
Espesor de capa	mm	0.05	0.175	0.3
Velocidad Extrusor	mm/s	40	55	70
Temperatura Extr.	C°	210	220	230

Tabla 2. Factores y dominio experimental.

2.3.4.3.2 Matriz de experimentos

Se ha creado una matriz (*tabla 3*) con todas las combinaciones posibles de los factores y sus niveles. La primera columna muestra la identificación de la pieza. La segunda columna es el orden en el que se fabricarán, el cual está generado aleatoriamente, esto evitará que se introduzcan errores sistemáticos. Las últimas tres columnas son las combinaciones posibles de los 3 factores con sus respectivos niveles.

Nº Experimento	Orden de Fabricación	Pieza	Factores		
			A:Espesor	B:Velocidad	C:Temperatura
			mm	mm/s	°C
#1	16	Block 1	0.300	70.00	210.00
#2	4	Block 1	0.175	70.00	210.00
#3	26	Block 1	0.050	70.00	210.00
#4	3	Block 1	0.300	55.00	210.00
#5	5	Block 1	0.175	55.00	210.00
#6	20	Block 1	0.050	55.00	210.00
#7	9	Block 1	0.300	40.00	210.00
#8	10	Block 1	0.175	40.00	210.00
#9	27	Block 1	0.050	40.00	210.00
#10	11	Block 1	0.300	70.00	220.00
#11	12	Block 1	0.175	70.00	220.00
#12	7	Block 1	0.050	70.00	220.00
#13	18	Block 1	0.300	55.00	220.00
#14*	24	Block 1	0.175	55.00	220.00
#15	13	Block 1	0.050	55.00	220.00
#16	14	Block 1	0.300	40.00	220.00
#17	1	Block 1	0.175	40.00	220.00
#18	21	Block 1	0.050	40.00	220.00
#19	8	Block 1	0.300	70.00	230.00
#20	6	Block 1	0.175	70.00	230.00
#21	17	Block 1	0.050	70.00	230.00
#22	19	Block 1	0.300	55.00	230.00
#23	25	Block 1	0.175	55.00	230.00
#24	22	Block 1	0.050	55.00	230.00
#25	15	Block 1	0.300	40.00	230.00
#26	2	Block 1	0.175	40.00	230.00
#27	23	Block 1	0.050	40.00	230.00

Tabla 3. Matriz de experimentos.

- *Pieza replicada 3 veces.

La matriz servirá para su posterior análisis una vez obtenidos los diferentes valores de la rugosidad media R_a para cada una de las combinaciones. Estos efectos se calculan haciendo un análisis de varianza o ANOVA, del inglés "Analysis of variance" de varios factores para R_a . En nuestro estudio, los cálculos se realizaron con ayuda del software "Minitab" y "STATGRAPHICS Centurion XVII".

Este procedimiento realiza varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre R_a . También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores, si es que hay suficientes datos.

Con los resultados obtenidos, se pueden extraer las conclusiones pertinentes dependiendo del valor que tome cada efecto, como se verá en el apartado de resultados⁵. Para ello, es necesario conocer qué indica cada efecto.

El valor medio indica alrededor de qué valor han variado las respuestas. Los efectos principales miden cómo afecta cada factor a la respuesta. Asimismo, existen efectos de interacción si el efecto que tiene un factor sobre una determinada respuesta depende del nivel al que se encuentre otro factor. Es por ello que antes de interpretar los efectos principales, hay que considerar si existen efectos de interacción significativos. Si es así, no se puede interpretar individualmente el valor de cada efecto principal.

Por otro lado, con los efectos calculados, podemos ajustar un modelo de regresión múltiple por el método de mínimos cuadrados.

2.3.5 Diseño de las muestras

2.3.5.1 Modelado

Nuestro diseño viene condicionado por los siguientes requisitos de diseño:

- La pieza debe ser medida con un rugosímetro en 3 de sus caras, formando estas; 0°, 90° y 45 ° grados con la horizontal respectivamente.
 - Tiene que tener al menos 15 mm^2 de superficie para que el rugosímetro tenga suficiente recorrido de medida.
 - Las caras tienen que ser medidas horizontalmente.
- Dada la cantidad de piezas a fabricar, se deben hacer en el menor tiempo posible sin modificar parámetros que afecten a su rugosidad.
- Se debe poder despegar de la plataforma de impresión con facilidad para no dañar la pieza.
- La altura no puede sobrepasar los 60 mm

La pieza ha sido diseñada siguiendo estos requisitos, el tamaño se ha reducido al mínimo posible para poder medirlo, así como el relleno interior, gracias a esto se ha conseguido ahorrar gran cantidad de tiempo y material. La pieza será fabricada siguiendo los pasos del diagrama de flujo explicado anteriormente en la *figura 6*.

⁵ Apartado 2.3.8

El modelado de la pieza en 3D se ha realizado con el software “SolidWorks 2015” tal y como muestra la *figura 30* .Se ha reducido al máximo posible su tamaño, pero dejando unas dimensiones lo suficientemente grandes (**18x14x13 mm**), para que haya espacio suficiente y el rugosímetro pueda medir en todo su recorrido a lo largo de las caras de la pieza. En el *ANEXO 6* se detallan los planos con las dimensiones de la pieza para el experimento. Además se ha diseñado un pequeño chaflán en su base para evitar problemas de despegue de cama de impresión. El paso previo entre el modelado y la impresión de las piezas puede ser consultado en el Anexo 3

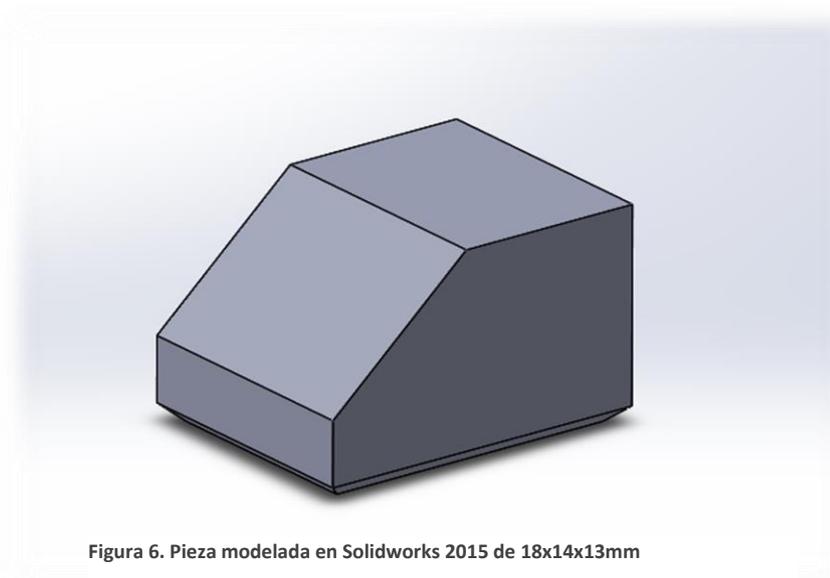


Figura 6. Pieza modelada en Solidworks 2015 de 18x14x13mm

2.3.6 Proceso de impresión

2.3.6.1 Tiempo de fabricación

El tiempo total para la impresión de todas las muestras fue de 13 horas. Se ha generado una tabla completa con todos los tiempos de impresión de cada pieza, la cual puede ser consultada en el *Anexo 2*. Como los tiempos de impresión estaban directamente relacionados con el espesor se ha elaborado una tabla resumen de los tiempos.

Como se puede comprobar en la tabla hay tres grupos, los cuales están directamente relacionados con el espesor. La velocidad apenas es relevante para el tiempo final de la pieza, solo afecta en las piezas con espesores menores, difiriendo unos pocos minutos entre ellas.

Espesor	Tiempo fabricación
mm	minutos
0.050	9
0.175	11-14
0.300	43-46

Tabla 4. Tiempos de fabricación de las piezas según su espesor.

2.3.6.2 Piezas finales

Una vez impresas todas las piezas se documentaron y se señalaron con su correspondiente marca. Se puede apreciar a simple vista los diferentes espesores en las muestras.



Figura 7. Muestra número 12. Espesor 0.050 mm

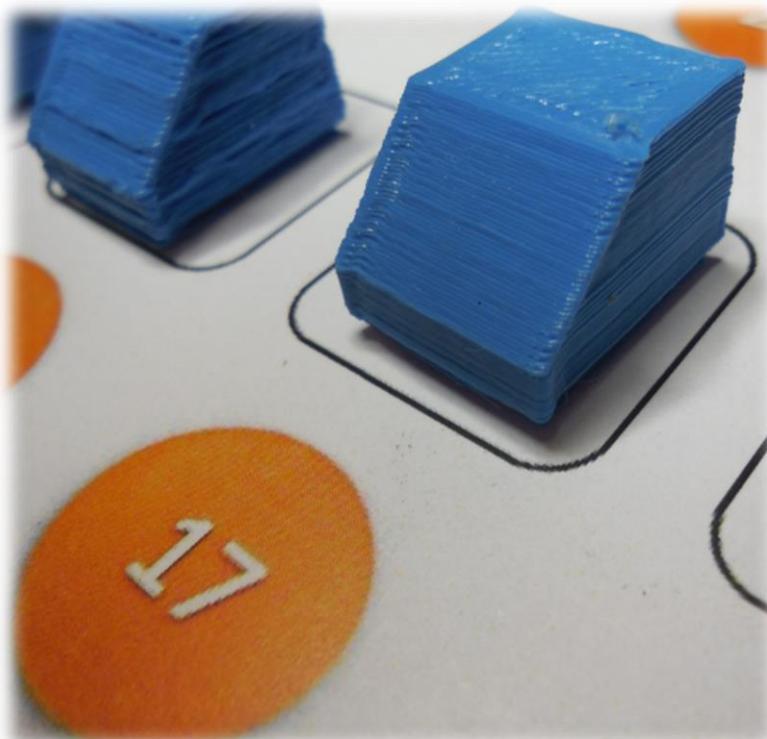


Figura 8. Muestra número 17. Espesor 0.175

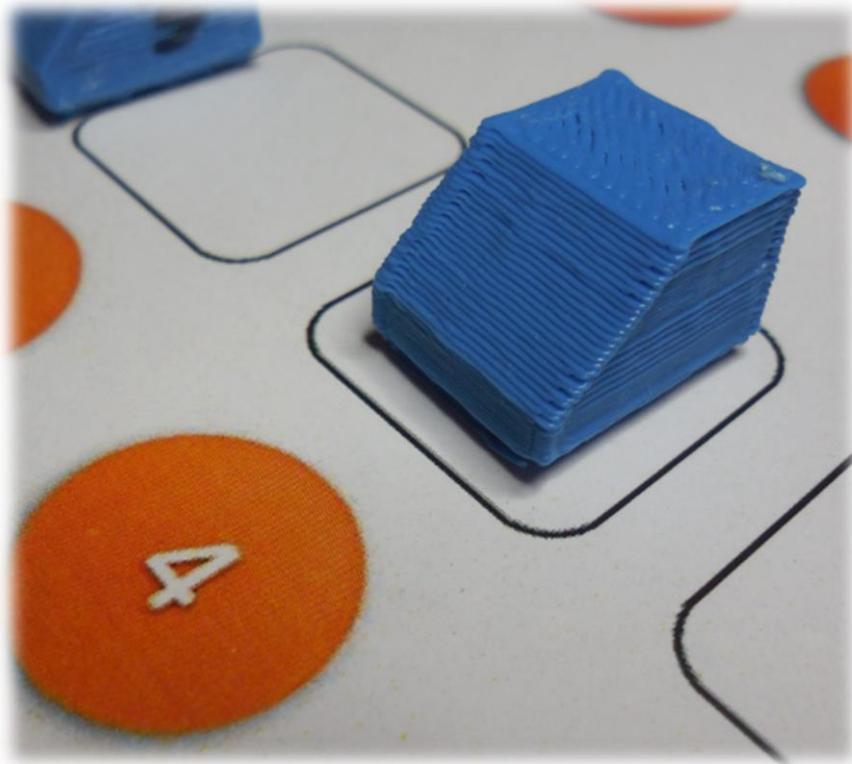


Figura 9. Muestra número 4. Espesor 0.300 mm

Estas muestras se preparan para ser medidas con sus correspondientes soportes y se distribuyen conforme a su marca.



Figura 10. Plantilla con todas las piezas del estudio con su correspondiente marca.

El resto de fotografías de cada una de las piezas impresas se pueden consultar en el Anexo 5. También pueden consultarse los problemas de impresión ocurridos en el Anexo 4.

2.3.7 Medida de la superficie

2.3.7.1 Equipos de medida

Para la medición de las muestras se ha utilizado un rugosímetro táctil “Mitutoyo SJ-201” cuyas especificaciones detalladas pueden ser consultadas en [48].



Figura 11. Rugosímetro Mitutoyo empleado para la medición de las muestras del estudio.

2.3.7.2 Elección de caras

Como se ha mencionado anteriormente se han elegido 3 caras distintas de la pieza para ser evaluadas.

- **90°:** Las caras verticales son idóneas para estudiar el efecto de los distintos parámetros de impresión ya que no están condicionadas por defectos derivados del efecto escalera, reduciendo así el número de variables a tener en cuenta.
- **0°:** Las caras horizontales suelen ser las que mejores resultados de rugosidad se obtienen ya que el extrusor tiende a rellenar todos los huecos para alisar la superficie. Por el contrario estas caras también suelen presentar mayor número de irregularidades.
- **45°:** Se quiere estudiar cómo afecta el efecto escalera a las caras oblicuas y hacer una comparación con otras caras que no sufren este efecto.

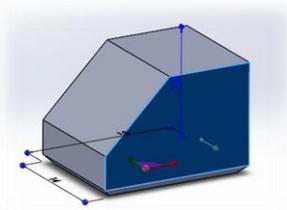


Figura 12. En azul la cara a 90°.

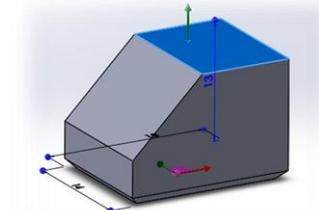


Figura 13. En azul la cara a 0°

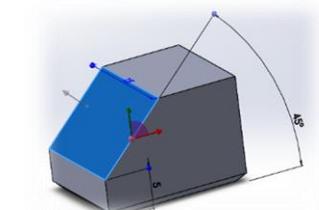


Figura 14. En azul la cara a 45°

2.3.7.3 Datos de medición

Todas las medidas que tomemos con el rugosímetro se realizan perpendicular a la dirección de las capas de material que se van depositando en el proceso de fabricación tal y como se muestra en la figura 42.

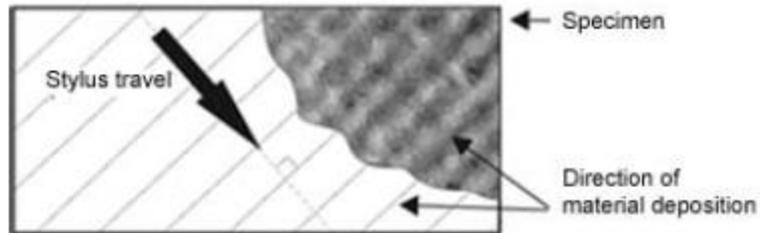


Figura 15- Dirección de la aguja palpadora del rugosímetro a lo largo de la superficie de la pieza.[21]

El Cut-off utilizado es de $\lambda_c = 0.8 \times 3 \text{ mm}$ en todas las mediciones tomadas, esta longitud de corte se ha elegido acorde con las dimensiones y la rugosidad esperada de la pieza. Se ha utilizado un filtro digital para evitar problemas de ondulación.

Todas las mediciones se han realizado 3 veces con el fin de obtener un valor más real de R_a y detectar posibles anomalías [8]. El número total de medidas realizadas en este estudio es de 261⁶. También hay que tener en cuenta las medidas fallidas y desechadas que suponen alrededor de un 10% del total. Estos fallos se deben principalmente a surcos en la superficie de la pieza o mal posicionamiento del rugosímetro.



Figura 16. Medición de una de las muestras con el rugosímetro.

⁶ 29 piezas x 3 caras x 3 mediciones = 261 mediciones

2.3.8 Resultados

2.3.8.1 Tabla resultados

Una vez medidas todas las piezas se ha generado una tabla con la matriz del diseño de experimento con los resultados de las medias de Ra para cada cara y pieza. Un total de 81 respuestas de medidas. Estos datos se han distribuido en 3 columnas situadas al final de la tabla, cada columna es una cara de la pieza representada por el ángulo que forma con la horizontal. El resto de columnas se han explicado anteriormente en la *tabla 6*.

Se han desechado algunas medidas anómalas cuya rugosidad media era muy elevada debido a fallos en la pieza y en el proceso de medida.

Std	Run	Block	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Respuesta (Ra)		
			A:Espesor mm	B:Velocidad mm/s	C:Temperatura °C	90° um	0° um	45° um
1	16	Block 1	0.300	70.00	210.00	23,48	16,78	43,41
2	4	Block 1	0.175	70.00	210.00	18,18	11,96	25,46
3	26	Block 1	0.050	70.00	210.00	9,35	5,56	10,87
4	3	Block 1	0.300	55.00	210.00	22,97	16,81	42,36
5	5	Block 1	0.175	55.00	210.00	16,55	12,21	25,26
6	20	Block 1	0.050	55.00	210.00	9,02	5,45	10,87
7	9	Block 1	0.300	40.00	210.00	21,70	17,39	41,03
8	10	Block 1	0.175	40.00	210.00	16,47	10,54	24,58
9	27	Block 1	0.050	40.00	210.00	7,91	4,32	10,17
10	11	Block 1	0.300	70.00	220.00	22,55	19,63	42,22
11	12	Block 1	0.175	70.00	220.00	15,57	10,53	25,20
12	7	Block 1	0.050	70.00	220.00	8,62	3,99	11,48
13	18	Block 1	0.300	55.00	220.00	20,72	14,60	38,97
14*	24	Block 1	0.175	55.00	220.00	14,88	11,46	23,23
15	13	Block 1	0.050	55.00	220.00	6,44	4,84	9,81
16	14	Block 1	0.300	40.00	220.00	22,18	21,73	39,67
17	1	Block 1	0.175	40.00	220.00	15,47	9,87	23,95
18	21	Block 1	0.050	40.00	220.00	6,84	3,74	9,84
19	8	Block 1	0.300	70.00	230.00	19,33	15,80	39,12
20	6	Block 1	0.175	70.00	230.00	14,41	10,43	22,70
21	17	Block 1	0.050	70.00	230.00	5,54	3,55	8,20
22	19	Block 1	0.300	55.00	230.00	19,80	18,21	39,20
23	25	Block 1	0.175	55.00	230.00	15,33	12,25	22,94
24	22	Block 1	0.050	55.00	230.00	5,64	2,71	8,35
25	15	Block 1	0.300	40.00	230.00	22,17	21,82	39,79
26	2	Block 1	0.175	40.00	230.00	15,36	6,60	23,46
27	23	Block 1	0.050	40.00	230.00	6,00	3,68	9,82

Tabla 5. Matriz de experimento con los datos obtenidos de la medición de las caras.

14* Muestra replicada 3 veces.

2.3.8.2 Error experimental

Como se ha mencionado en el apartado anterior se han fabricado 3 repeticiones de la muestra 14, la cual se encuentra en el punto central del experimento con el fin de permitir al software estadístico calcular el error experimental.

Es imposible saber el valor real de Ra ya que en el propio proceso de medición se cometen errores sistemáticos y accidentales, estos últimos son aquellos que se deben a las pequeñas variaciones que aparecen entre observaciones sucesivas realizadas por el mismo observador y bajo las mismas condiciones. Las variaciones no son reproducibles de una medición a otra y se supone que sus valores están sometidos tan sólo a las leyes del azar y que sus causas son completamente incontrolables para un observador. [49] Los errores accidentales poseen, en su mayoría, un valor absoluto muy pequeño y si se realiza un número suficiente de medidas se obtienen tantas desviaciones positivas como negativas. Aunque con los errores accidentales no se pueden hacer correcciones para obtener valores más concordantes con los reales, sí pueden emplearse métodos estadísticos, mediante los cuales se pueden llegar a algunas conclusiones relativas al valor más probable en un conjunto de mediciones. [49]

Para ello hemos replicado nuestra muestra y medido todas sus caras. Con los resultados se ha generado una tabla que nos servirá como partida para calcular el error experimental.

		Factor 1	Factor 2	Factor 3	Respuesta (Ra)		
Std	Orden	A:Espesor	B:Velocidad	C:Temperatura	90º	0º	45º
		mm	mm/s	ºC	um	um	um
14	1	0.175	55.00	220.00	14,75	11,60	23,07
14	2	0.175	55.00	220.00	14,91	11,64	23,37
14	3	0.175	55.00	220.00	14,98	11,13	23,24

Tabla 6. Matriz de experimentos de los resultados de las réplicas.

Una vez obtenida Ra, calculamos los porcentajes de dispersión para cada cara, es decir la diferencia de los valores extremos de las medidas dividido por la media con lo que tenemos:

Error Exp	%
e_{90°	$\pm 1,57$
e_{0°	$\pm 4,51$
e_{45°	$\pm 1,51$

Tabla 7. Errores experimentales.

2.3.8.3 Análisis de las caras

Con los datos de la *tabla 5* se realizará un análisis de varianza (ANOVA) mediante el software estadístico; *StatGraphics XVII* y *Minitab 7*.

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para Ra. Realiza varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Ra. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores, si es que hay suficientes datos. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permitirán identificar los factores significativos. La gráfica de medias y la gráfica de interacciones ayudarán a interpretar los efectos significativos y cómo se comportan entre ellos.

Además se realizará un modelo de regresión lineal múltiple si existe una relación estadísticamente significativa entre los factores que afectan a Ra, esto nos ayudará a predecir cuál será la rugosidad media esperada en función de dichos factores.

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Ra en contribuciones debidas a varios factores. La contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores, ya que se ha elegido un análisis de suma de cuadrados tipo III.

Los valores-P situados en la última columna prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Si el valor P es menor que 0,05 significa que ese factor o combinación de factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Ra, ya que queremos una seguridad del 95%.

Cara 90° con la horizontal

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Espesor	943,083	2	471,542	1342,01	0,0000
B:Velocidad	1,79296	2	0,896478	2,55	0,1390
C:Temperatura	27,1433	2	13,5716	38,62	0,0001
INTERACCIONES					
AB	1,21438	4	0,303594	0,86	0,5248
AC	1,9088	4	0,4772	1,36	0,3294
BC	9,04178	4	2,26044	6,43	0,0128
ABC	*	*	*	*	*
RESIDUOS	2,81096	8	0,351369		
TOTAL (CORREGIDO)	986,996	26			

Tabla 8 "Análisis de Varianza para Ra en cara de 90° - Suma de Cuadrados Tipo III"

*Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Puesto que 3 valores-P son menores que 0,05, estos factores, representados en color verde en la *tabla 9*, tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Ra con un 95,0% de nivel de confianza.

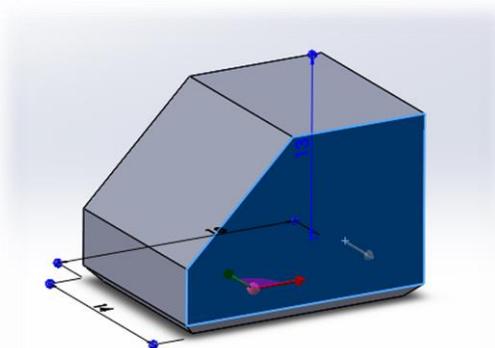
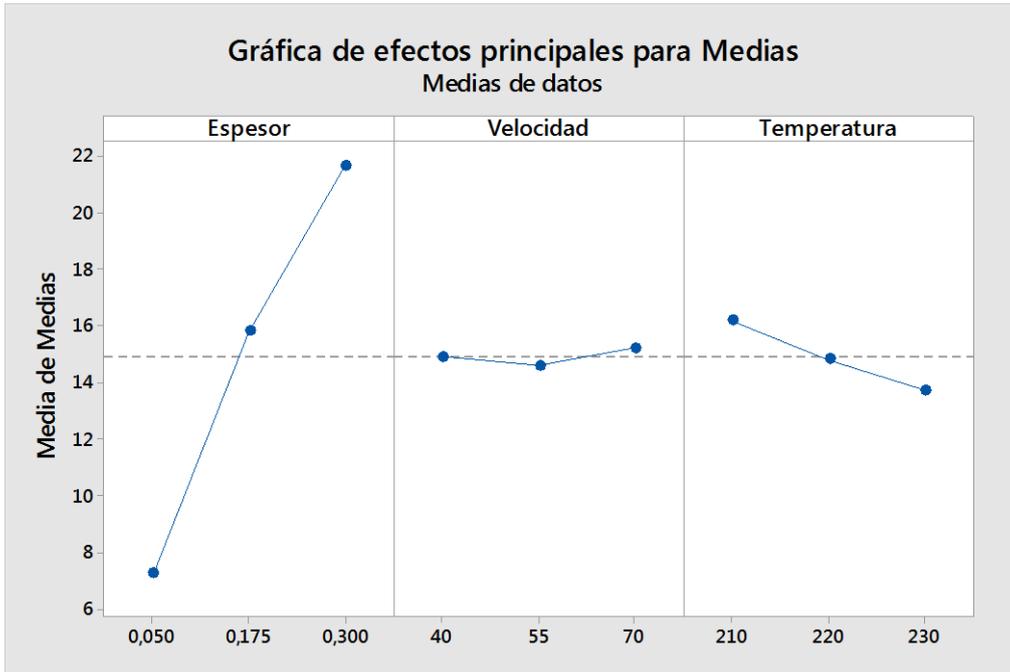
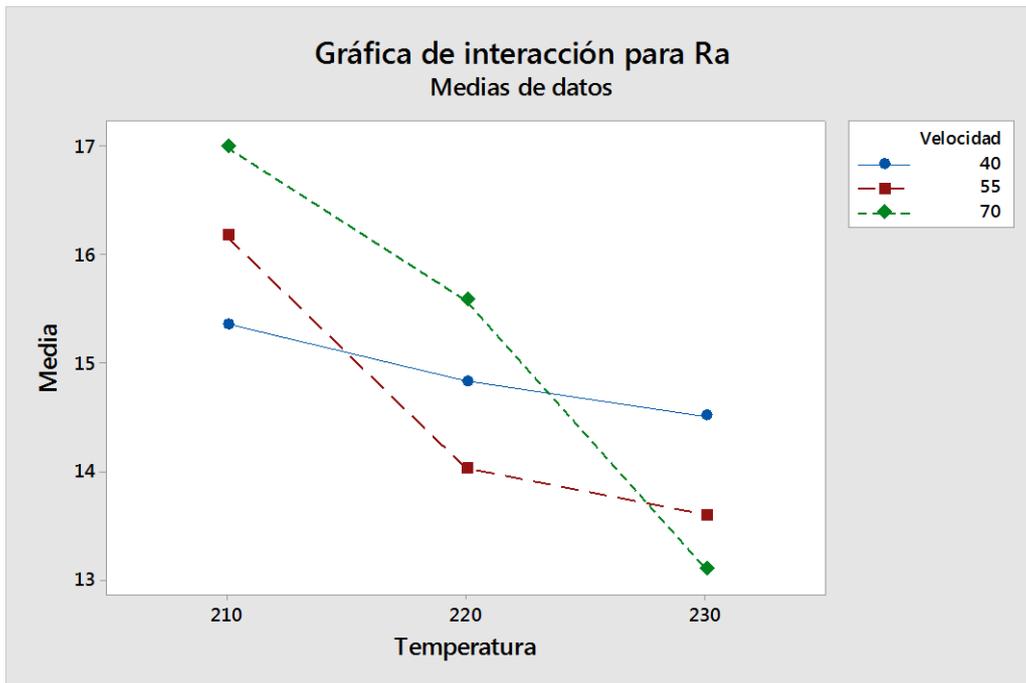


Figura 42. En azul la cara de 90°

Se ha representado gráficamente los efectos principales y las interacciones entre los factores que tienen relevancia estadística. El resto de gráficas se pueden consultar en el Anexo 2.



Gráfica 1. Efectos principales para medias en cara de 90°.



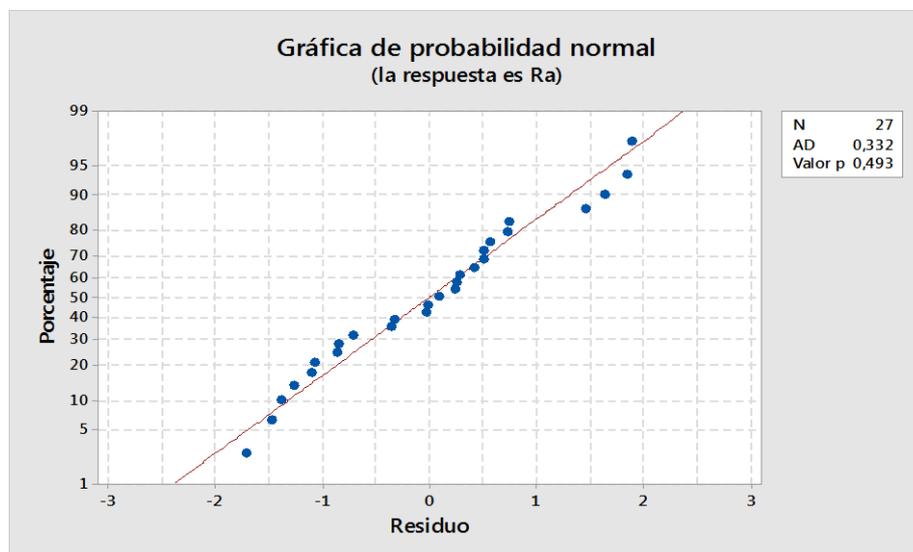
Gráfica 2. Interacción de Ra en cara de 90°

A continuación se analizan los resultados de los factores más significativos siempre desde la perspectiva de su relación con las caras que forman 90° con la horizontal.

- **A: Espesor:** Según los datos recogidos el espesor o altura de capa es el factor que más afecta a Ra. Este resultado era esperado ya que cuanto menor sea la altura del filamento depositado, menor será la rugosidad de la superficie. Puesto que el espesor de capa está íntimamente relacionado con el tiempo de fabricación, suele intentar optimizarse y aumentarse lo máximo posible para acortar tiempos. En la gráfica de efectos principales se puede observar la gran significancia que tiene en la rugosidad media.
- **C: Temperatura:** El factor temperatura es el segundo que más afecta a Ra en las caras que forman 90° con la horizontal, aunque este está condicionado por la velocidad como se explicará más adelante. Como se puede comprobar en la gráfica el PLA azul se comporta ligeramente mejor con temperaturas cercanas a los 230°C que a temperaturas más bajas como 210°C.
- **BC: Velocidad y Temperatura:** Aunque la velocidad por sí sola no tiene un efecto significativo sobre Ra cuando está combinada con la temperatura sí lo tiene. Como se puede comprobar en la gráfica de interacciones la temperatura tiene mayor impacto sobre Ra cuanto mayor es la velocidad. Por tanto para conseguir un mejor resultado a nivel de calidad superficial se deberá aumentar la temperatura siempre que se aumente la velocidad. Además, la gráfica muestra sinergia en temperaturas más elevadas como 230°C y velocidades del orden de 70 mm/s. No ocurre lo mismo con velocidades y temperaturas inferiores.

También se realizó un modelo cuadrático, ya que hay variables interrelacionadas. Finalmente nos decantamos por el lineal ya que los residuos del cuadrático no seguían una probabilidad normal. Este modelo se puede ver en el ANEXO 2.

Se ha realizado un modelo de regresión múltiple lineal a partir de los resultados obtenidos para predecir la relación entre Ra y 3 variables independientes, el cual explica el 97,239% de la variabilidad, ya que $R^2 = 97,239\%$. Es importante comprobar que los residuos (los errores entre el valor medido y lo que el modelo predice), son aleatorios. Esto se puede comprobar mediante una gráfica de probabilidad normal y comprobar si los puntos de los residuos siguen esta distribución.



Gráfica 3. Probabilidad normal de los puntos de los residuos para cara de 90°.

La información completa de este modelo se encuentra en el *Anexo 2*.

La ecuación del modelo ajustado es:

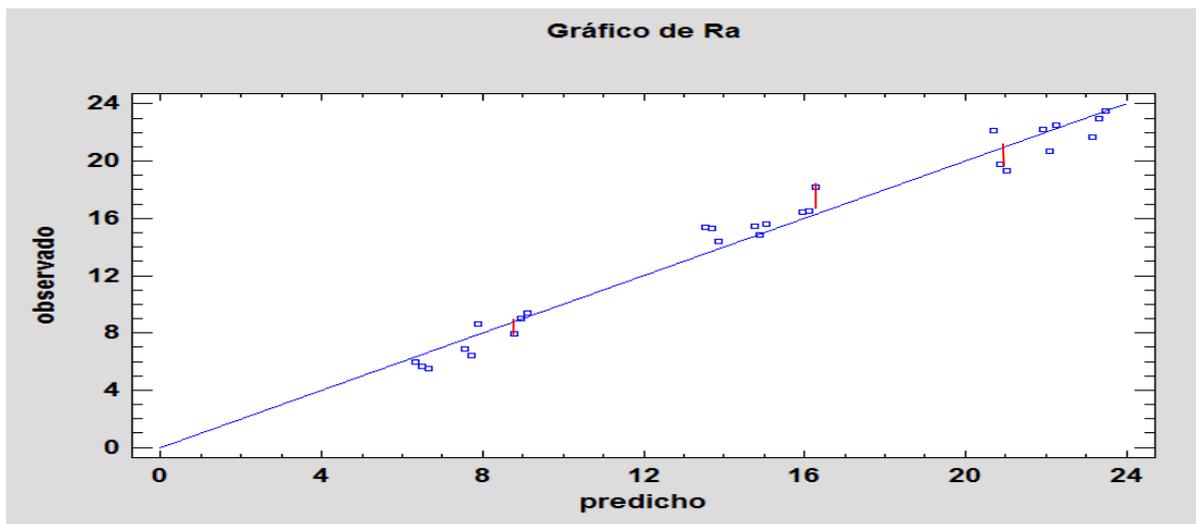
$$Ra = 31,1845 + 57,5733t + 0,0108519v_e - 0,1225T$$

Donde;

R_a = Rugosidad media en μm , t = Espesor o altura de capa en μm

v_e = Velocidad del extrusor , T = Temperatura en $^{\circ}C$

El siguiente gráfico muestra los datos de nuestro estudio posicionados en puntos sobre la ecuación lineal de nuestro modelo. Comparando lo observado con lo predicho.

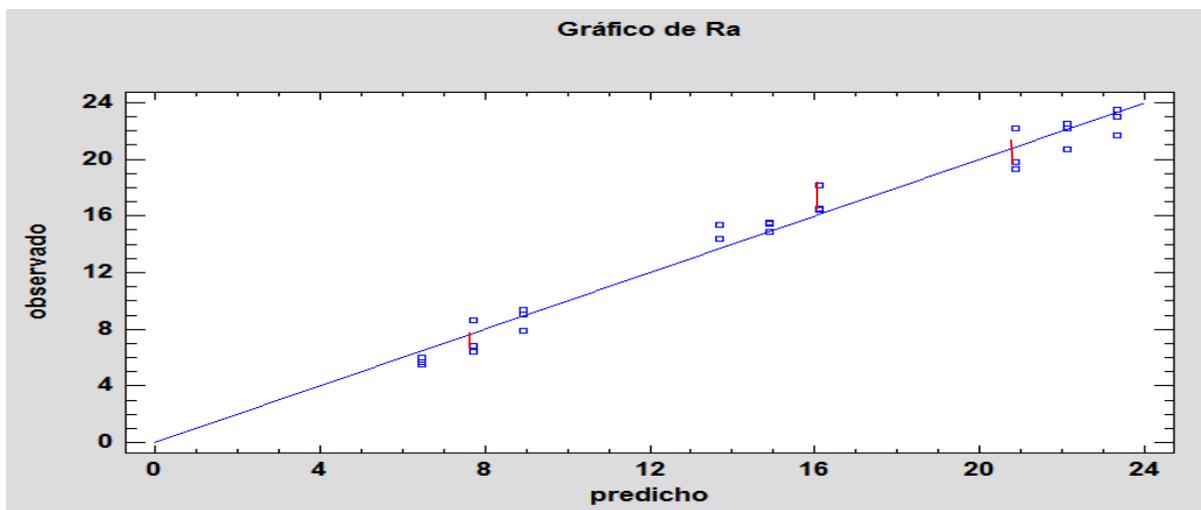


Gráfica 4. Observado vs Predicho. Modelo completo de predicción de Ra en cara de 90°.

Se ha creído conveniente realizar otro modelo suprimiendo la variable *velocidad del extrusor* (v) de la ecuación, ya que no era significativa estadísticamente por sí sola con un 99 % de confianza. Donde la ecuación del modelo es:

$$Ra = 31,7813 + 57,5733t - 0,1225T$$

Este nuevo modelo tiene como resultado de $R^2 = 97,191\%$.



Gráfica 5. Observado vs Predicho. Modelo simplificado de predicción de Ra en cara de 90°.

Se puede comprobar que el modelo simplificado difiere muy poco del primer modelo completo, pero el último sigue siendo más preciso como se puede observar comparando la gráfica 3 y 4. La gráfica 4 muestra unos errores mayores, donde los puntos que representan las medidas reales se alejan más de la línea recta la cual representa el modelo predicho. Estos errores se han representado con líneas rojas verticales en la gráfica para 3 de los valores medidos elegidos aleatoriamente. Finalmente se ha desechado el modelo simplificado ya que aunque su variable velocidad no sea significativa por sí sola, sí lo es con relación a las demás. Por tanto se elegirá el modelo completo.

También se realizó un modelo cuadrático, ya que hay variables interrelacionadas. Finalmente nos decantamos por el lineal ya que los residuos del cuadrático no seguían una probabilidad normal. Este modelo se puede ver en el ANEXO 2.

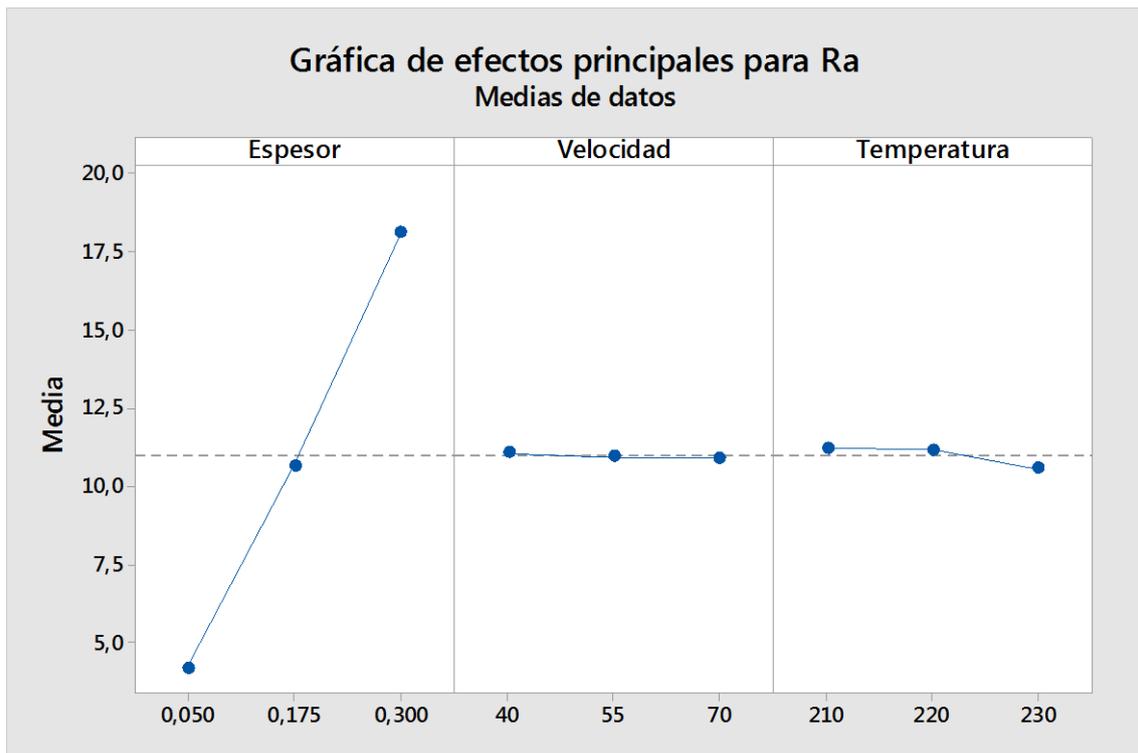
Cara 0º con la horizontal

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Espesor	868,554	2	434,277	149,78	0,0000
B:Velocidad	0,131489	2	0,0657444	0,02	0,9776
C:Temperatura	2,39087	2	1,19543	0,41	0,6754
INTERACCIONES					
AB	37,4048	4	9,35121	3,23	0,0745
AC	12,7414	4	3,18534	1,10	0,4197
BC	6,40978	4	1,60244	0,55	0,7032
ABC	*	*	*	*	*
RESIDUOS	23,1949	8	2,89936		
TOTAL (CORREGIDO)	950,827	26			

Tabla 9 "Análisis de Varianza para Ra en cara de 0º - Suma de Cuadrados Tipo III"

**Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual*

Puesto que un valor-P es menor que 0,05, este factor, representado en verde en la tabla 10, tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Ra con un 95,0% de nivel de confianza.



Gráfica 6. Efectos principales para Ra en la cara a 0°.

- A: Espesor:** Como se puede comprobar en la gráfica de efectos principales el espesor es el único factor relevante que afecta en las caras a 0°. Hubo algunos problemas en la toma de medidas de estas caras ya que presentaban bastantes irregularidades. Los datos no tienen una relación significativa siendo muy variados entre ellos.

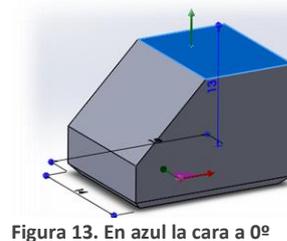


Figura 13. En azul la cara a 0°

Esto puede ser debido a que las medidas están tomadas sobre la última capa de impresión. El proceso de relleno que realiza el software en esta última capa es distinto a los patrones de relleno que utiliza para la fabricación del resto de la pieza, por tanto es más difícil establecer unos factores comunes que expliquen el comportamiento de R_a en esta superficie.

La falta de relación entre estos factores puede ser objeto de estudio en futuros experimentos. No se ha realizado un modelo de regresión por falta de interrelaciones entre las variables.

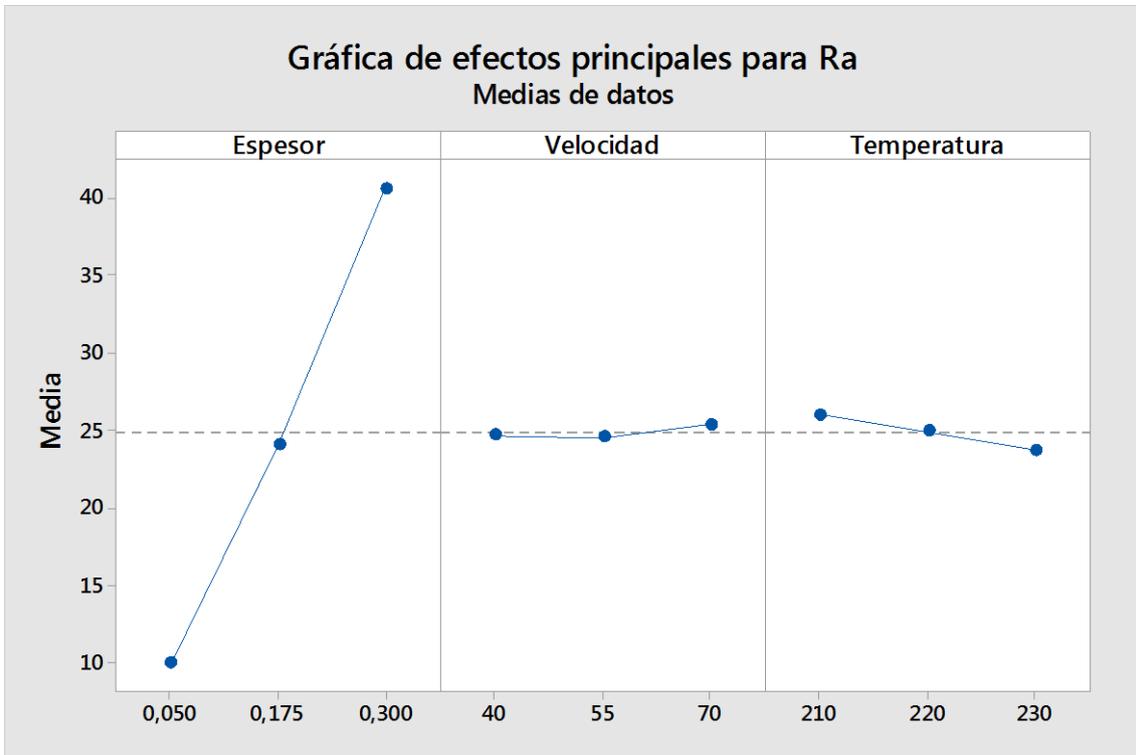
Cara 45° con la horizontal

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Espesor	4251,7	2	2125,85	21053,63	0,0000
B:Velocidad	3,73681	2	1,8684	18,50	0,0010
C:Temperatura	23,2125	2	11,6063	114,94	0,0000
INTERACCIONES					
AB	1,30117	4	0,325293	3,22	0,0746
AC	2,34797	4	0,586993	5,81	0,0171
BC	9,58944	4	2,39736	23,74	0,0002
RESIDUOS	0,807785	8	0,100973		
TOTAL (CORREGIDO)	4292,7	26			

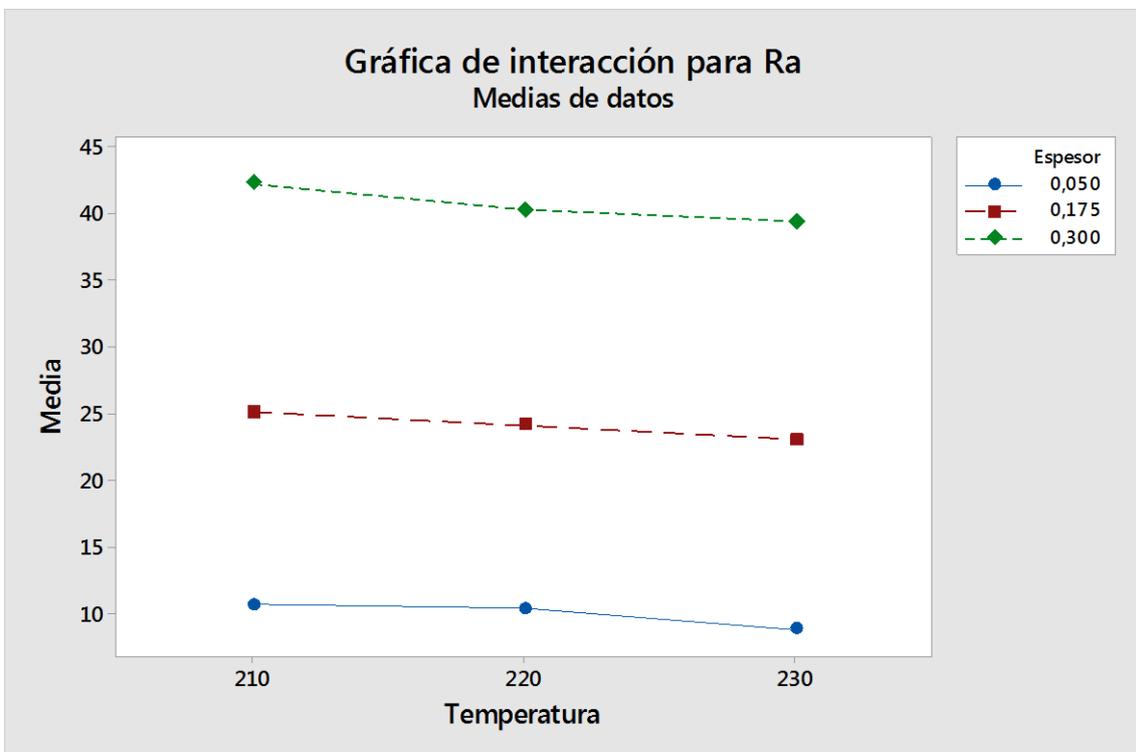
Tabla 9 "Análisis de Varianza para Ra en cara de 45° - Suma de Cuadrados Tipo III"

*Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

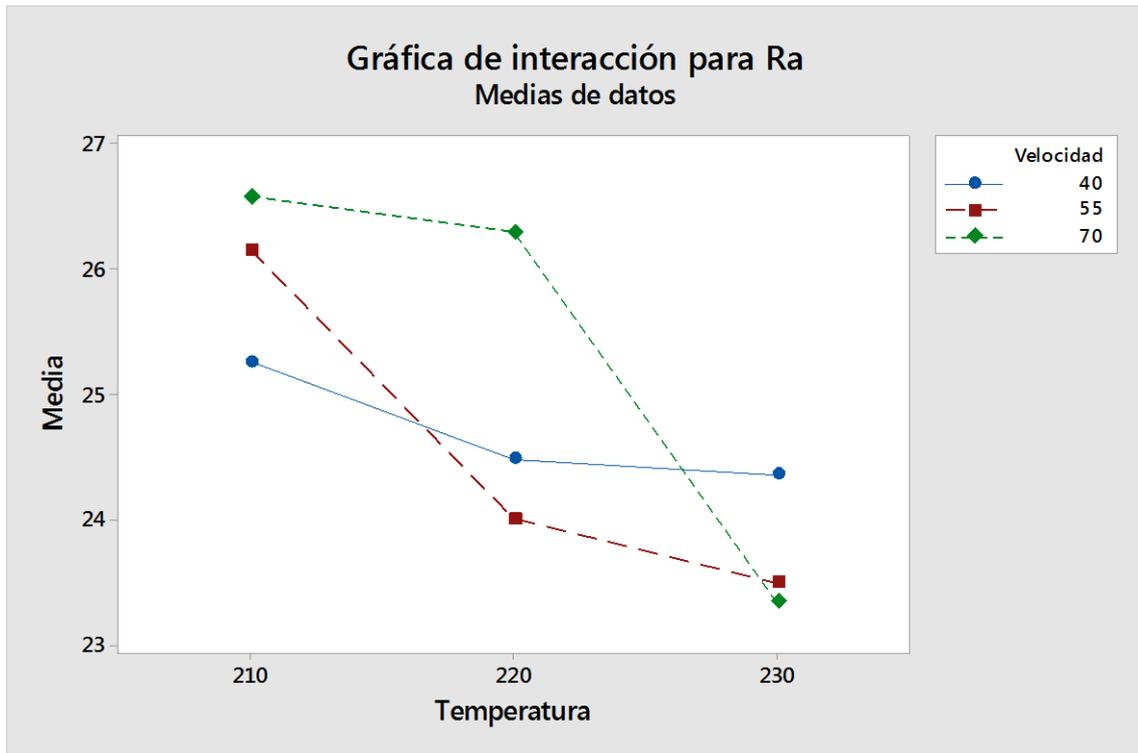
Puesto que 5 valores-P son menores que 0,05, estos factores, representados en verde en la *tabla 11*, tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Ra con un 95,0% de nivel de confianza.



Gráfica 7. Efectos principales para Ra en las caras a 45°.



Gráfica 8. Interacción de Temperatura y Espesor para las caras de 45°.

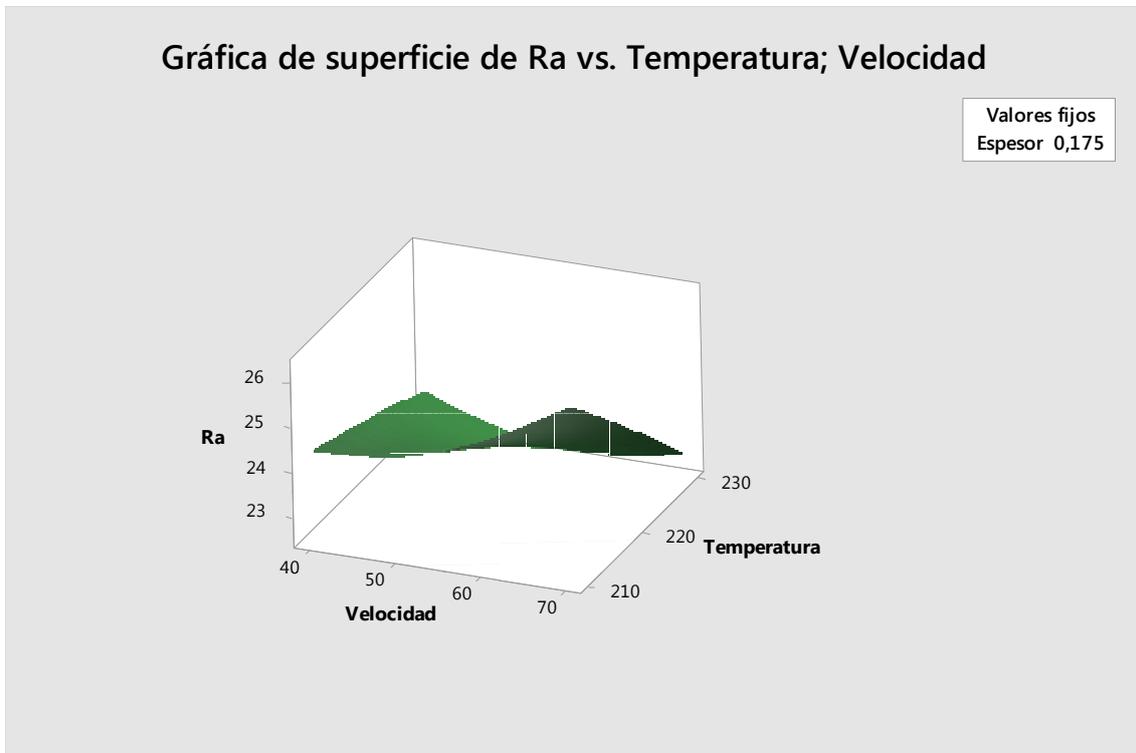


Gráfica 9. Interacción de Velocidad y Temperatura para las caras de 45°.

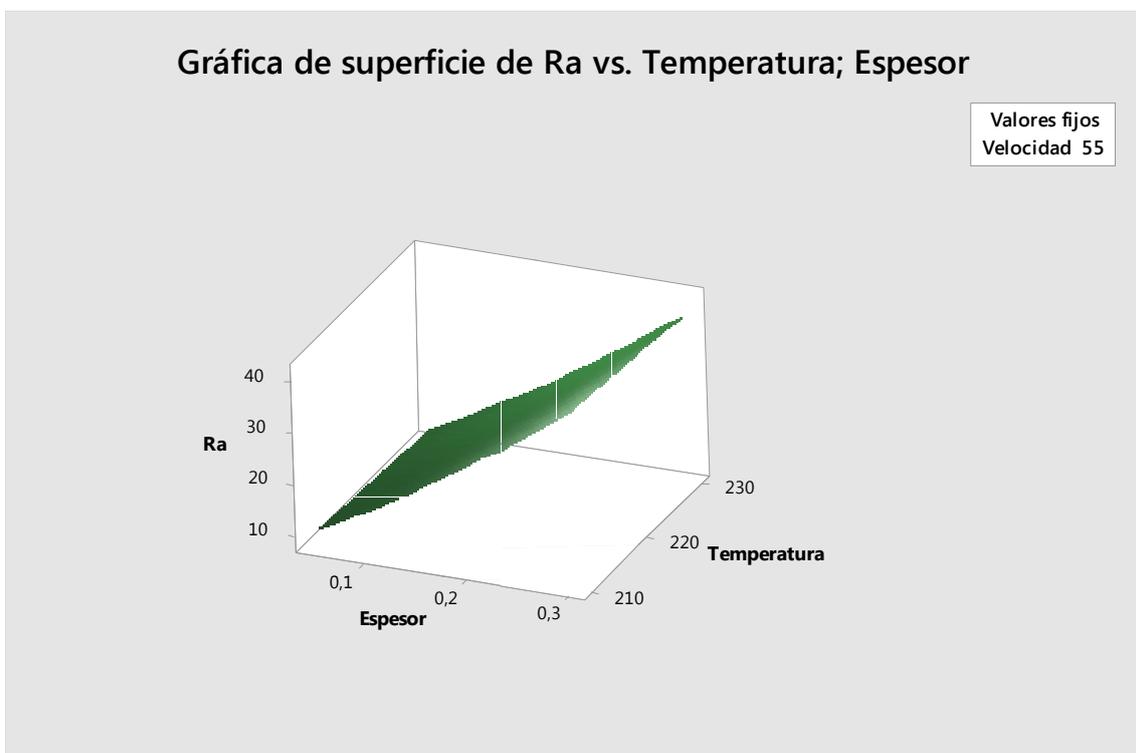
A continuación se analizan los resultados de los factores más significativos siempre desde la perspectiva de su relación con las caras que forman 45° con la horizontal.

- **A: Espesor:** Como ocurría en los estudios anteriores, el espesor de capa es el factor que más afecta a Ra. En el caso de las caras inclinadas a 45° grados con la horizontal, este factor tiende a ser más relevante, ya que influye directamente en el llamado *efecto escalera*, explicado anteriormente y por tanto en su rugosidad final.
- **C: Temperatura:** Este factor también es influyente en Ra. Las propiedades del material empleado pueden tener un punto óptimo de extrusión cercano a 230°, ya que esta temperatura es la que mejor resultados reporta.
- **AC: Espesor y Temperatura:** Cuanto mayor es la temperatura, más tarda el material en solidificarse y en algunos casos puede depositarse en las capas inferiores de la cara oblicua ya que este no está del todo sólido. Este defecto puede convertirse en una ventaja en las caras oblicuas disminuyendo el efecto escalera, ya que tiende a rellenar y suavizar esos huecos entre capas. Esto puede explicar el efecto positivo en Ra de una temperatura mayor en las capas a 45°.
- **BC: Velocidad y Temperatura:** Aunque la velocidad por sí sola no tiene un efecto significativo sobre Ra cuando está combinada con la temperatura sí lo tiene. Como se puede comprobar en la gráfica de interacciones la temperatura tiene mayor impacto sobre Ra cuanto mayor es la velocidad. Por tanto para conseguir un mejor resultado a nivel de calidad superficial se deberá aumentar la temperatura siempre que se aumente la velocidad.

Puesto que hay una gran interrelación entre sus variables se ha propuesto un modelo cuadrático el cual intentará predecir la respuesta Ra. Se ha calculado otro análisis de varianza cuadrático y se ha generado 3 gráficas de superficie de respuesta (Ra), aunque solo dos de ellas son relevantes:

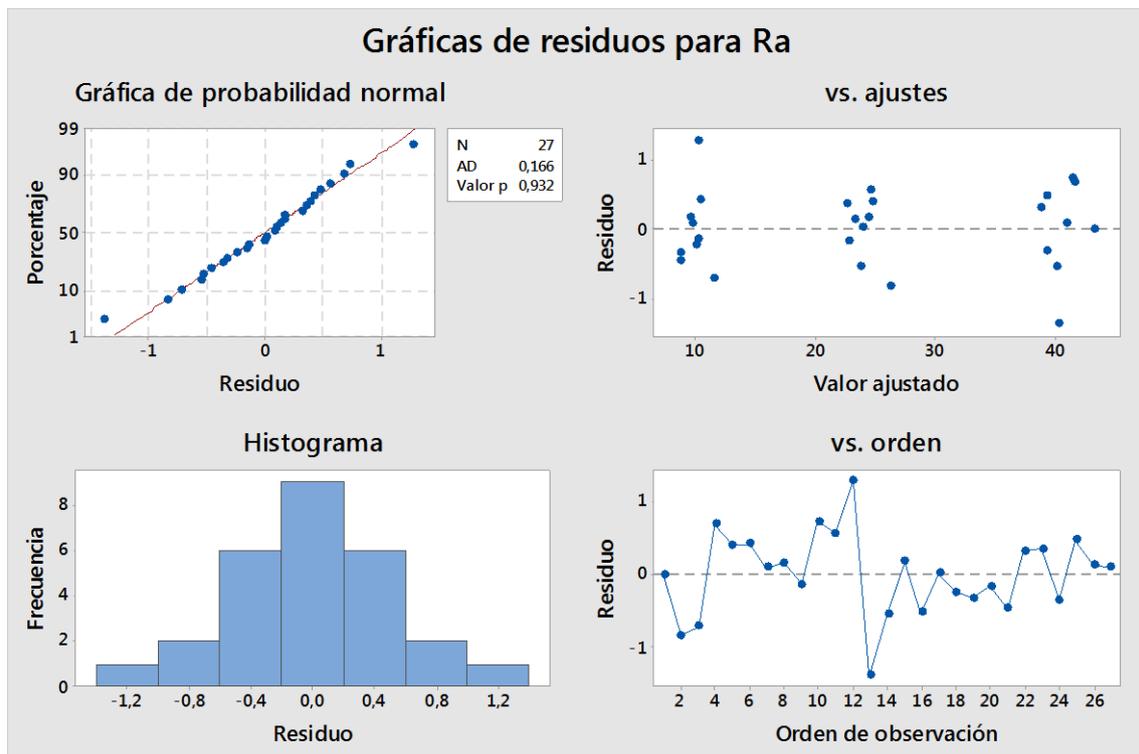


Gráfica 10. Superficie de respuesta Ra vs Temperatura; Velocidad.



Gráfica 11. Superficie de respuesta de Ra vs. Temperatura; Espesor.

Este modelo cuadrático tiene mayor fiabilidad que el lineal⁷, ya que R^2 posee un valor mayor y sus residuos siguen una distribución normal tal y como se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 12. Residuos de Ra para cara de 45º modelo cuadrático.

La ecuación del modelo viene dada por:

$$Ra = -49 + 133,6 t + 0,610 v_e + 0,41 T + 76t^2 + 0,00223 v_e^2 - 0,00063 T^2 + 0,157 t \cdot v_e - 0,210 t \cdot T - 0,00390 v_e \cdot T$$

Donde;

R_a = Rugosidad media en μm , t = Espesor o altura de capa en μm

v_e = Velocidad del extrusor, T = Temperatura en $^{\circ}\text{C}$

Se han comparado los dos modelos propuestos con cada uno de los explicados en el ANEXO 1. Nuestros modelos predicen mejor Ra. Aunque cabe destacar que los modelos del Anexo 1 están exclusivamente enfocados a medir Ra en función de su ángulo de fabricación y no tienen en cuenta otros parámetros de impresión como velocidad o temperatura.

Al ser más genéricos tienen mayor margen de error, ya que los propuestos solo pueden ser válidos bajo ciertas circunstancias, por ejemplo que el material de impresión sea PLA

⁷ Puede ser consultado en el ANEXO 2

2.3.9. Conclusiones

- **El espesor es el factor más influyente en Ra.**

Es un factor común en todas las caras. Como se ha comentado anteriormente es un resultado previsible ya que existen numerosos estudios que relacionan ambos factores. El espesor con mejores resultados es 0.05 mm. El espesor afecta también directamente al tiempo de fabricación, por tanto será un factor que se tienda a optimizar entre calidad superficie y tiempo de fabricación valorando prioridades.

- **La velocidad del extrusor no ha sido un factor relevante por sí solo.**

Esto puede ser debido al pequeño tamaño de las probetas, lo cual ha podido dificultar un recorrido del extrusor más continuo que permite valorar más profundamente como afecta la velocidad a la rugosidad.

- **La temperatura óptima para conseguir menor Ra es de 230 °C⁸.**

La temperatura ha tenido mayor relevancia en las caras de 90° que el resto. Parece ser que una temperatura cercana a los 230°C trabaja mejor que una a 210°C. Según el fabricante Bq, la temperatura ideal para su filamento blanco es de 220°C. Pero algunos estudios revelan que si el filamento tiene color, como en nuestro caso azul, necesita entre 5 y 10 grados más para tener una extrusión óptima [46].

- **Existe una relación directa entre temperatura y velocidad del extrusor.**

Para conseguir una rugosidad óptima se debe ajustar la temperatura acorde con la velocidad, cuanto mayor sea la temperatura mayor será la velocidad de trabajo. Los mejores resultados se han conseguido con una velocidad alta a una temperatura alta (70mm/s – 230° C), pero paradójicamente los peores resultados también se han conseguido con una velocidad alta con una temperatura baja (70mm/s - 210°C). Estos resultados nos demuestran la importancia de modificar los dos parámetros proporcionalmente entre sí.

- **Las caras a 0° se comportan de manera distinta al resto.**

Esto puede ser debido a que la capa estudiada a 0° es también la última capa o capa de cierre. Puesto que en nuestro estudio solo se ha rellenado el 20 % de la pieza interiormente el software tiende a cerrar y rellenar la última capa de manera diferente. Por tanto la velocidad y la forma que se comporta el material al solidificarse cambian. Además el error experimental medido en estas caras es superior a las otras.

- **Las caras a 45° tienen mayor Ra que el resto.**

Esto es debido al efecto escalera analizado anteriormente en el estudio. En las caras completamente verticales u horizontales no existe este efecto y la rugosidad disminuye notablemente. Además su error experimental es el más bajo de todos.

⁸ *En el rango de 210-230 °C para el material PLA azul 1.75 del fabricante bq.

- **Los modelos de regresión tienen alta fiabilidad.**

Se han medido nuevas piezas con los mismos parámetros de impresión con el fin de comprobar los modelos de regresión lineal múltiple obtenidos en el estudio y se han verificado que cumplen con más de un 90% de seguridad.

- **El modelo más complejo es el de la cara de 45°.**

El hecho de combinarse la rugosidad propia del proceso con el efecto escalera hace que esta cara sea mucho más compleja de predecir y estudiar. Se han tenido que realizar varios modelos para conseguir una predicción adecuada de Ra. Finalmente el modelo cuadrático ha dado buenos resultados.

2.4 Estudio 2

2.4.1 Metodología

El proceso seguido para nuestro estudio es el representado en la *figura 44* donde se partieron de unos objetivos y se siguió los pasos para alcanzarlos con éxito por medio de un experimento.

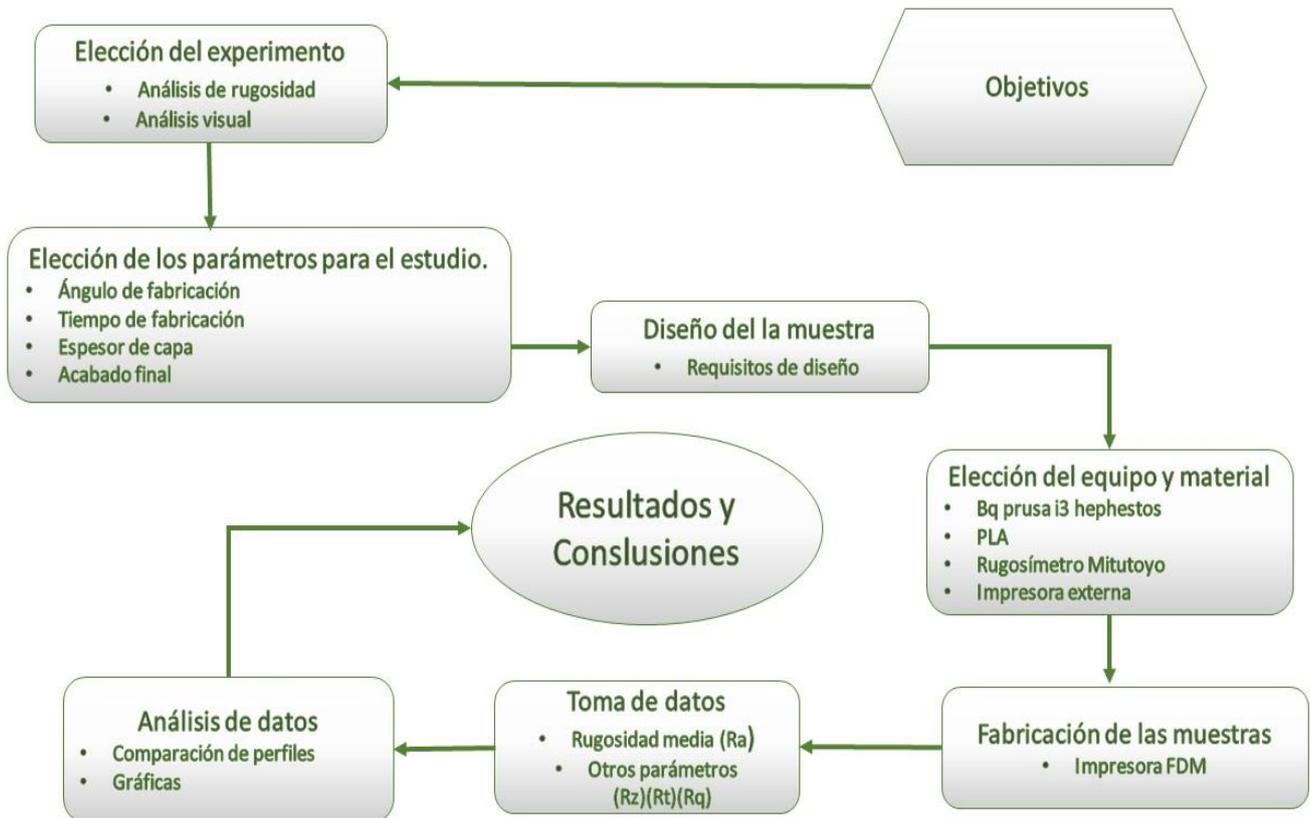


Figura 17. Metodología para el Estudio 2.

2.4.2 Objetivos

Se pretende dotar al usuario de unas recomendaciones de impresión del software Cura basadas en la calidad superficial. Donde pueda hacer la elección en función de sus prioridades de relación entre rugosidad, tiempo de fabricación y calidad visual. Estas recomendaciones se pretenden extrapolar a los demás programas de laminado.

También se quiere comparar las medidas tomadas con los diferentes modelos estudiados tanto en el estudio bibliográfico como en el *estudio 1*.

Con las conclusiones de este estudio se pretende conseguir unas recomendaciones de diseño.

2.4.3 Elección de parámetros

2.4.3.1 Parámetros de medición

Con este segundo estudio se pretende profundizar más en los distintos resultados de la calidad superficial obtenidos mediante el rugosímetro. [50]

Para ello se han elegido 4 parámetros de medición; Ra, Rz, Rq y Rz. Estos parámetros se obtendrán de cada una de las medidas y después se estudiará cuáles de ellos son relevantes para cada análisis. Para la información completa de estos parámetros consultar el Anexo 1.

2.4.3.2 Parámetros de impresión

Para la elección de los parámetros de impresión se utilizarán unos perfiles de configuración predefinidos del software Cura 2.1.0. Estos están caracterizados según su calidad general final (Perfil baja, media, alta y ultra calidad) estos perfiles tienen una serie de parámetros fijos y otros que varían según el perfil como: velocidad o espesor.

Las siguientes tablas muestran los distintos parámetros fijos para todos los perfiles y variables:

2.4.3.3 Fijos

Parámetros fijos	
Diámetro del extrusor	0,4
Densidad de relleno	20 %
Ventiladores	Activados
Tipo de Adhesión	Sí, Tipo Brim
Tipo de cama	Fría
Temperatura Extrusor	220°C

Tabla 30. Parámetros fijos estudio 2.

Cabe resaltar que en este estudio la temperatura del extrusor se mantiene constante ya que el desarrollador del software Cura no ha creído oportuno modificarla en sus perfiles de impresión. En las conclusiones se estudiará si es importante mantenerla constante o no.

2.4.3.4 Variables

Parámetros	Valores				Unidades
CALIDAD PERFIL	BAJA	MEDIA	ALTA	ULTRA	
Espesor de capa	0.3	0.2	0.1	0.05	mm
Veloci. Impresión	70	60	40	40	mm/s
Veloci. Relleno	70	60	40	40	mm/s
Veloci. Trayecto	130	130	130	130	mm/s
Veloci. Capa Inicial	20	20	20	20	mm/s

Tabla 11. Parámetros variables estudio 2.

A su vez se pretende estudiar cómo afecta el ángulo en el que se depositan las capas a los distintos resultados de medición y a su calidad visual final.

2.4.4 Diseño de las muestras

2.4.4.1 Modelado

El diseño de las muestras vendrá condicionado por una serie de requisitos de diseño.

- La muestra debe ser lo suficientemente grande como para ser medida por todas sus caras y no tener problemas con el recorrido del extrusor.
 - Tiene que tener al menos 15 mm^2 de superficie para que el rugosímetro tenga suficiente recorrido de medida.
 - Las caras tienen que ser medidas horizontalmente.
- Debe tener al menos las siguientes caras:
 - Dos caras verticales con un ángulo a 90° con la horizontal
 - Dos caras horizontales con un ángulo a 0° grados con la horizontal
 - Una cara con un ángulo comprendido entre 0° - 45° .
 - Una cara con un ángulo comprendido entre 45° — 90° .
- Cada cara debe tener una cara opuesta y paralela con el fin de poder ser sujeta con facilidad para su medición.
- La altura no puede sobrepasar los 60 mm.

El modelado de la pieza en 3D se ha realizado con el software "SolidWorks 2015". Se han realizado un total de 5 diseños distintos hasta que se ha conseguido el diseño óptimo. Las primeras piezas diseñadas eran demasiado grandes o resultaban bastante aparatosas para su medición.

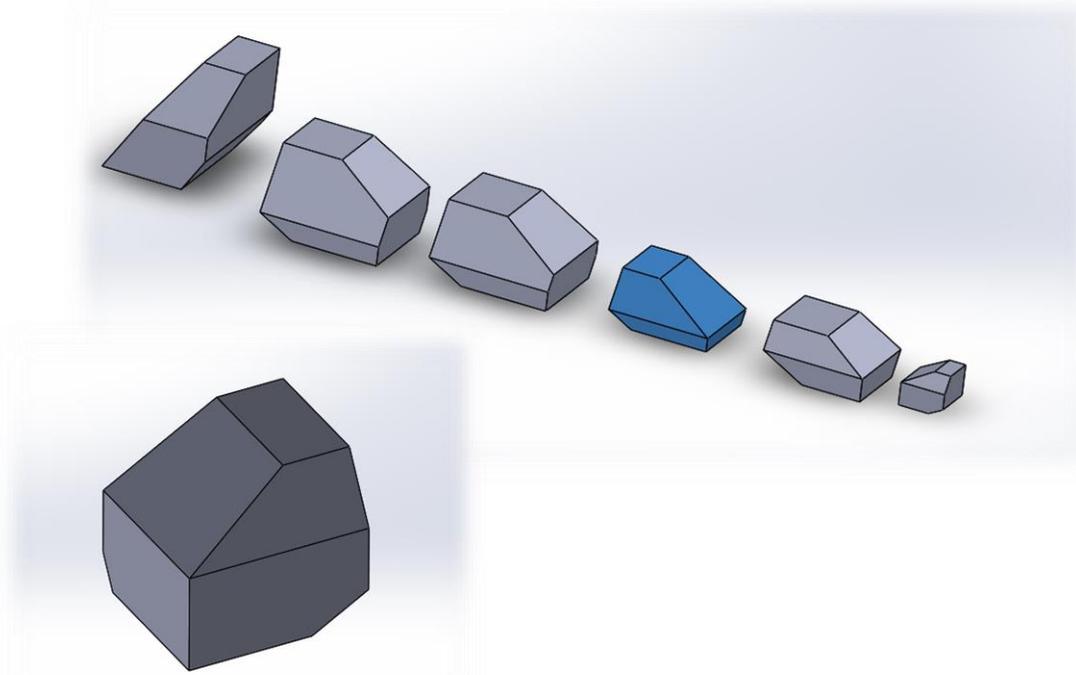


Figura 18. En la parte superior las distintas versiones de las muestras diseñadas. En azul la probeta que se utilizó para una primera prueba.

Figura 19. En la parte inferior izquierda el diseño final del estudio 2.

Las dimensiones de la pieza seleccionada son de **22x20x20 mm**. Esta pieza cumple todos los requisitos de diseño adaptándose perfectamente a nuestro estudio. En el *Anexo 6* se pueden ver los planos de todas las piezas estudiadas. El paso previo entre el modelado y la impresión de las piezas y la justificación de la elección del software Cura 2.1.0 puede ser consultado en el *Anexo 3*.

2.4.5 Proceso de impresión

2.4.5.1 Tiempo de fabricación

El tiempo total de fabricación de las muestras fue de aproximadamente 6 horas, 4 horas para las piezas finales y 2 horas para pruebas y piezas desechadas.⁹Cabe destacar que el software *Cura* hace una estimación bastante aproximada de tiempo y cantidad de material empleado para la impresión.



Figura 20. Estimación de tiempo material y dimensiones.

Aunque la estimación de material será empleada para el presupuesto¹⁰, el tiempo de impresión usaremos el real, el cual aparece en el display de la impresora Prusa al terminar la pieza.

Estos tiempos de impresión están directamente relacionados con el espesor de capa y cada uno va asociado a un perfil de impresión.

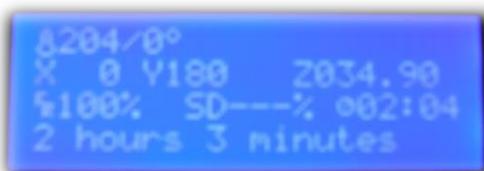


Figura 21. Pantalla LED de Prusa i3

La siguiente tabla recoge los tiempos para cada pieza con su perfil de impresión.

CALIDAD PERFIL	Valores				Unidades
	BAJA	MEDIA	ALTA	ULTRA	
Tiempo de impresión	18	25	35	111	minutos

Tabla 12. Tiempos de impresión estudio 2.

Puede comprobarse como el perfil Ultra tarda significativamente más en imprimirse que el resto. Esta diferencia será estudiada más adelante.

⁹ El tiempo de fabricación hace referencia solamente al tiempo de impresión, los tiempos muertos para limpieza preparación y calibración no están incluidos en esa estimación.

¹⁰ ANEXO 7.

2.4.5.2 Piezas finales

Una vez impresas todas las piezas se documentaron y se señalaron con su correspondiente marca. Se puede apreciar a simple vista las diferencias entre las piezas con distinto perfil de impresión.



Figura 22. Piezas impresas Estudio 2

2.4.6 Medida de la superficie

2.4.6.1 Equipos de medida

Para la medición de las muestras se ha utilizado un rugosímetro táctil "Mitutoyo SJ-201" cuyas especificaciones detalladas pueden ser consultadas en [48].

Además se han utilizado dos accesorios del rugosímetro para profundizar en la evaluación de la superficie:

- Impresora externa Nº 178-420 D: Genera los perfiles de la superficie medida a partir de los datos obtenidos con el rugosímetro. Estos perfiles solo pueden ser obtenidos en formato de papel.[48]



Figura 23. Impresora externa.

- Cable XMS2-09: Conecta el rugosímetro con el ordenador y mediante un software genera los perfiles en formato digital.

Los perfiles generados por estos accesorios se analizaran en la fase de resultados.

2.4.6.2 Elección de caras

Puesto que se quiere analizar cómo afecta el ángulo de impresión a la rugosidad final se ha propuesto la medida de las siguientes caras.

- **90°:** Las caras verticales son idóneas para estudiar el efecto de los distintos parámetros de impresión en nuestros perfiles ya que no están condicionadas por defectos producidos por el ángulo de impresión¹¹. Se han evaluado las dos caras de 90°.
- **0°:** Las caras horizontales suelen ser las que mejores resultados de rugosidad se obtienen ya que el extrusor tiende a rellenar todos los huecos para alisar la superficie. Por el contrario estas caras también suelen presentar mayor número de irregularidades.
- **30°:** Se ha elegido este ángulo porque se quiere estudiar los efectos producidos por el ángulo en caras con un ángulo inferior a 45°. La cara de 30° con el plano horizontal es idóneo si también se estudia su homólogo a 60°.
- **60°:** Se ha elegido este ángulo porque se quiere estudiar los efectos producidos por el ángulo en caras con un ángulo superior a 45°. La cara de 60° con el plano horizontal es idóneo si también se estudia su homólogo a 30°.

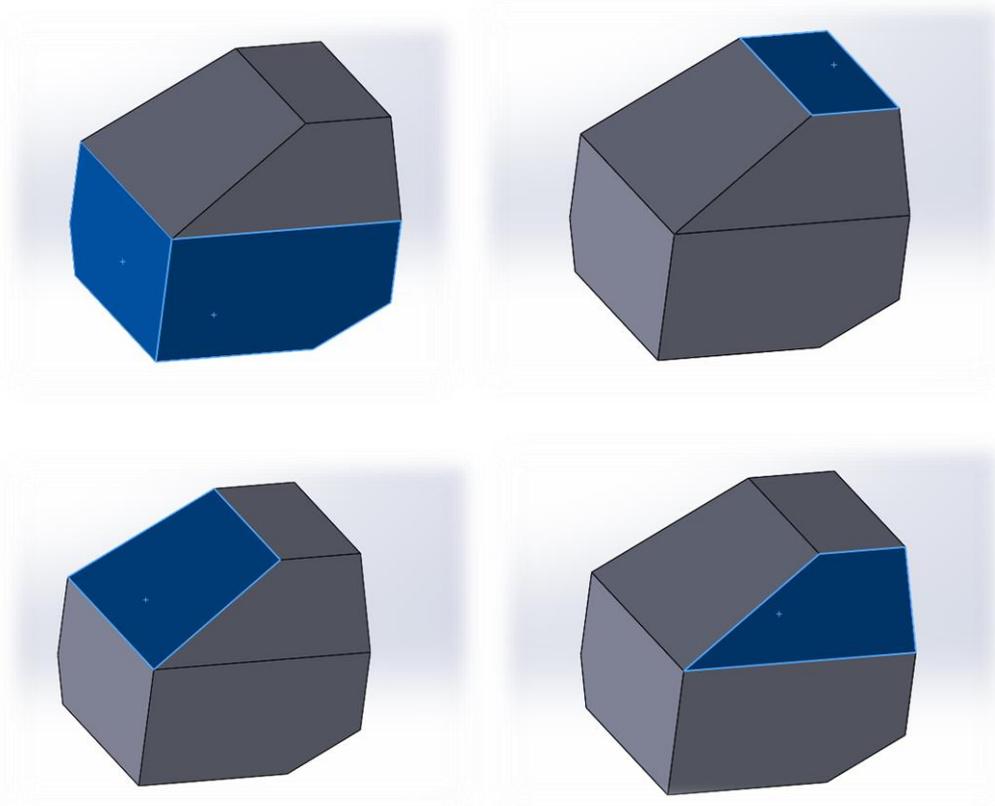


Figura 24. Esquina superior izquierda caras de 90°. Esquina superior derecha cara de 0°. Esquina inferior izquierda cara 30°. Esquina inferior derecha cara 60°.

¹¹ Ejemplo: Efecto escalera “star-case error” [17]

2.4.7 Datos de medición

La longitud de corte I_c o Cut-off utilizado es de $\lambda_c = 0.8 \times 5 \text{ mm}$ menos en la pieza de perfil "ultra" tomándose $\lambda_c = 0.25 \times 5 \text{ mm}$, esta longitud de corte se ha elegido acorde con las dimensiones y la rugosidad esperada de la pieza. Se realizaron pruebas con un cut-off de 2.5 pero la longitud de evaluación era demasiado grande para las muestras impresas. Se ha utilizado un filtro digital PC50 para evitar problemas de ondulación.

Con el fin de hacer un análisis completo de la rugosidad de la pieza se han evaluado los distintos parámetros de rugosidad explicados en el Anexo 1.

Todas las mediciones se han realizado 3 veces en cada cara y pieza con el fin de obtener un valor más real de los distintos parámetros R [8]. Además se han realizado otras 3 medidas extra en cada cara con el fin de obtener un perfil de la superficie medida. Con las 3 medidas iniciales obtendremos la media de cada *parámetro R* los cuales utilizaremos para nuestros análisis, con la medida extra generaremos el perfil.

Algunas de esas 6 medidas se han repetido en alguna ocasión por errores de medición y anomalías en el resultado. Se han tomado un total de 150 medidas¹², más 15 en una pieza de prueba inicial. La información completa y análisis de la muestra de prueba puede consultarse en el *Anexo 2*.

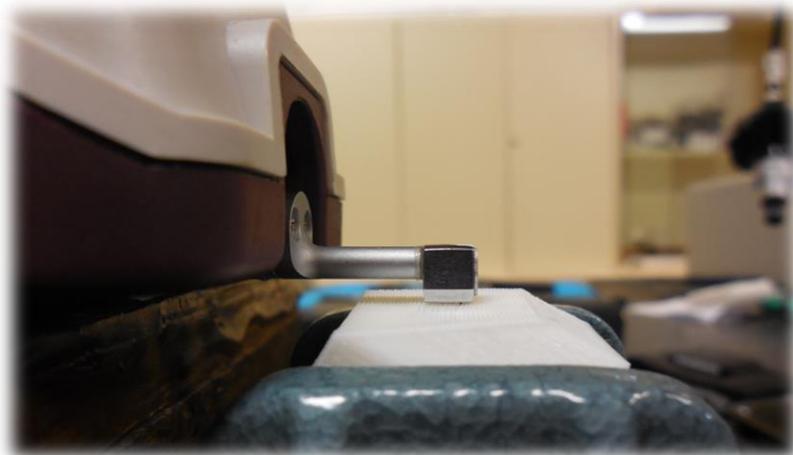


Figura 25. Medición de la muestra

Para la sujeción y la medición de caras con ángulo de inclinación entre 0° y 90°, se han utilizado una serie de soportes y agarres para su correcta medición, en la dirección del recorrido de la aguja palpadora.



Figura 26. Pinza de agarre

¹² 6 medidas por cada cara x 5 caras por pieza x 5 piezas = 4x5x5=150.

2.4.8 Resultados

2.4.8.1 Tablas de resultados rugosidad

Una vez medidas todas las piezas se han generado una serie de tablas resumen con las medias de todos los parámetros de Rugosidad que se quieren analizar. Los datos se han distribuido por caras y perfiles de impresión para cada uno de los parámetros de rugosidad. Los datos de todas las medidas realizadas para calcular la media mostrada en la tabla pueden ser consultados en el ANEXO 2. Se han desechado algunas medidas anómalas cuya rugosidad media era muy elevada debido a fallos en la pieza y en el proceso de medida.

Ra					
PERFIL IMPR. /CALIDAD	BAJA	MEDIA	ALTA	ULTRA	Unidades
90º Posterior	21,67	17,20	16,66	5,50	μm
90º Lateral Izquierdo	21,10	15,62	16,80	5,36	μm
30º Frontal	31,54	36,75	35,38	9,32	μm
60º Lateral Derecha	27,03	18,36	20,30	5,74	μm
0º Posterior	17,71	9,35	6,29	0,99	μm
TIEMPO Impresión	18	25	35	111	minutos

Tabla 13. Resultados de Ra.

Rz					
PERFIL IMPR. /CALIDAD	BAJA	MEDIA	ALTA	ULTRA	Unidades
90º Posterior	102,03	81,55	81,98	25,73	μm
90º Lateral Izquierdo	96,08	74,45	80,87	24,27	μm
30º Frontal	128,83	131,63	126,93	34,43	μm
60º Lateral Derecha	125,47	94,58	102,65	29,21	μm
0º Posterior	85,04	44,63	38,69	4,56	μm
TIEMPO Impresión	18	25	35	111	minutos

Tabla 14. Resultados de Rz.

Rq					
PERFIL IMPR. /CALIDAD	BAJA	MEDIA	ALTA	ULTRA	Unidades
90º Posterior	26,21	20,19	19,88	6,52	μm
90º Lateral Izquierdo	25,31	18,15	20,20	6,45	μm
30º Frontal	36,86	41,44	39,91	10,55	μm
60º Lateral Derecha	32,44	22,36	24,81	7,03	μm
0º Posterior	22,28	11,60	8,42	1,19	μm
TIEMPO Impresión	18	25	35	111	minutos

Tabla 15. Resultados de Rq

Rt					
PERFIL IMPR. /CALIDAD	BAJA	MEDIA	ALTA	ULTRA	Unidades
90º Posterior	109,80	98,90	94,01	37,61	µm
90º Lateral Izquierdo	103,00	82,51	93,31	32,05	µm
30º Frontal	140,63	140,63	133,50	37,18	µm
60º Lateral Derecha	134,07	125,70	119,57	35,95	µm
0º Posterior	119,10	85,15	63,32	7,37	µm
TIEMPO Impresión	18	25	35	111	minutos

Tabla 16. Resultados de Rt

2.4.8.2 Calidad Visual

Se ha querido cuantificar mediante una calificación del 1 al 10 la calidad visual de las piezas, teniendo en cuenta tres factores:

- Comportamiento de las aristas.
 - Se ha valorado el comportamiento de las capas en las aristas. Cuando la velocidad es excesiva, la temperatura inadecuada o el espesor de capa muy grande las aristas tienden a redondearse y a perder precisión dimensional.
- Percepción de las capas a simple vista en las caras horizontales y verticales
 - Se ha valorado la percepción de los surcos y cambios de una capa a otra, puntuando positivamente la continuidad y suavidad de la superficie.
- Percepción de las capas a simple vista en las caras oblicuas
 - Se ha valorado la percepción del efecto escalera y los pasos entre capas, puntuando positivamente la continuidad y suavidad de la superficie.



Figura 27. Pieza de baja calidad, se puede apreciar las capas a simple vista.



Figura 28 Pieza de calidad ultra, no se aprecian las caras a simple vista.

Calidad Visual				
PERFIL IMPR. /CALIDAD	Baja	Media	Alta	Ultra
Aristas	3	6	7	10
Caras verticales y horizontales	5	5	7	9
Caras oblicuas	3	6	7	9
Total	11	17	21	28
Media Total	3,67	5,67	7,00	9,33

Tabla 17. Ponderación calidad visual.

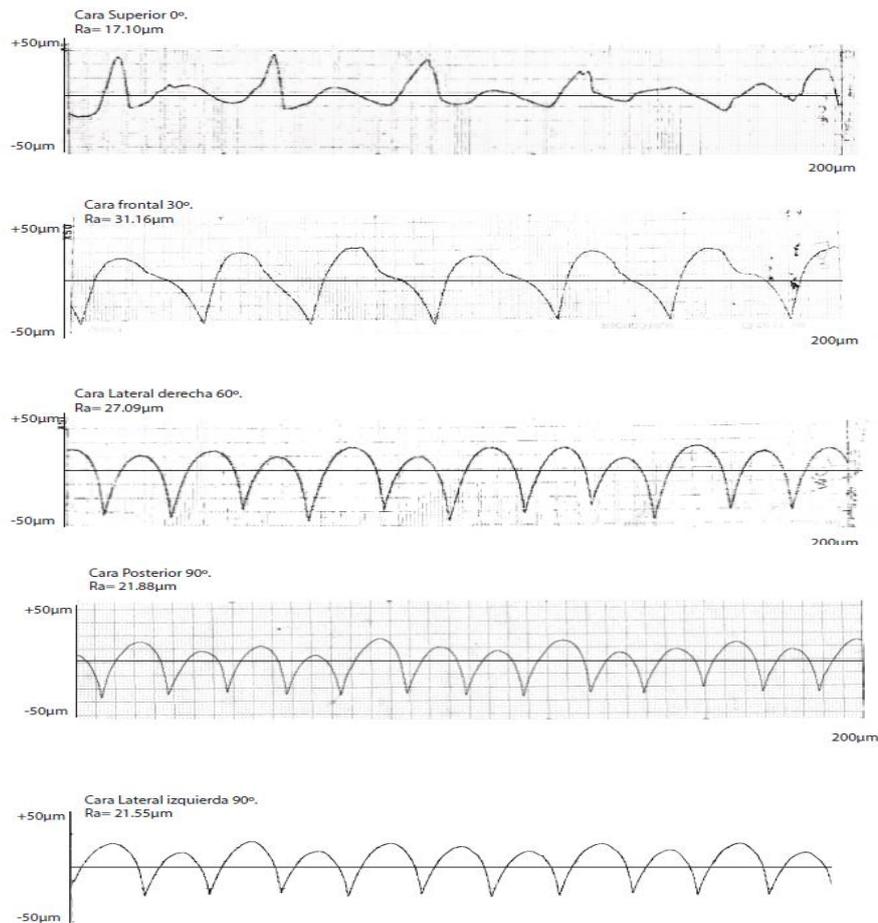
Las valoraciones son subjetivas según lo observado en la pieza.

2.4.8.3 Perfiles de rugosidad de la superficie

Según los resultados observados, en algunos casos los datos de los distintos parámetros de rugosidad son insuficientes para saber cómo es la superficie medida. Por ello se han generado también una serie de perfiles de la superficie con los dos accesorios del rugosímetro antes mencionados¹³, los cuales nos permitirán ver de una forma más gráfica la superficie de la pieza.

Cabe destacar la diferencia entre perfiles o configuración de impresión del software Cura¹⁴ a los perfiles de la superficie¹⁵

En primer lugar, se generaron los perfiles de la superficie con la impresora externa en formato analógico para su posterior digitalización en un escáner.



Gráfica 13. 5 gráficas escaneadas de la impresora externa. Finalmente se desecharon.

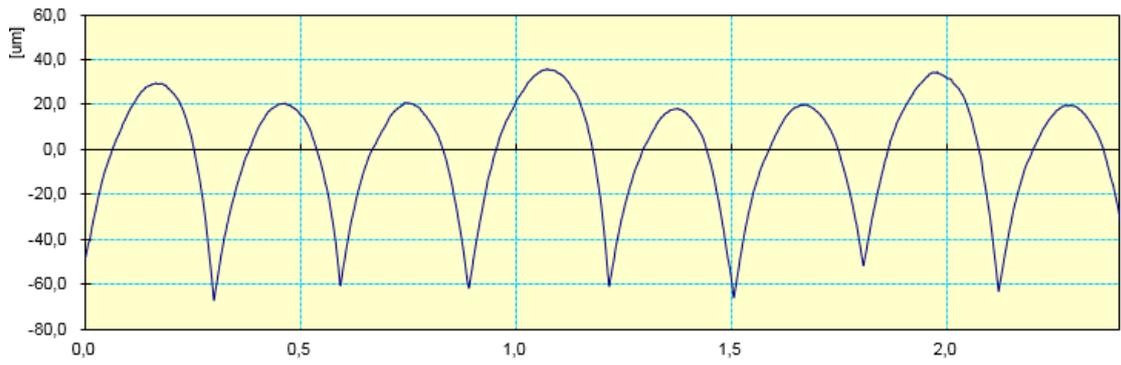
Estos perfiles impresos en una pequeña bobina de papel son muy difíciles de comparar entre ellos y su manipulación es tediosa. Por lo que se decidió analizar los perfiles mediante el cable XMS2-09, consiguiendo disponer de ellos en formato digital. Los perfiles mostrados a continuación están previamente filtrados por un filtro PC50. Se han obtenido perfiles de cada una de las caras para cada una de las calidades. Los perfiles completos sin filtrar, así como los parámetros completos de medición se encuentran en el *Anexo 2*

¹³ Impresora externa Nº 178-420 D y Cable XMS2-09.

¹⁴ Conjunto de datos y parámetros que caracterizan la impresión de la pieza.

¹⁵ Representación del relieve de la superficie evaluada en dos dimensiones. Microtopografía.

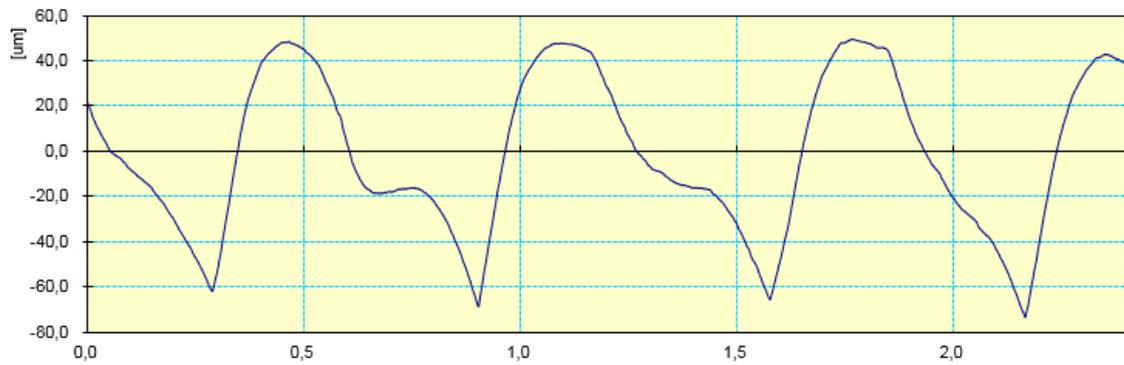
CALIDAD BAJA 90°



Gráfica 14. Perfil Calidad Baja 90°

[mm]

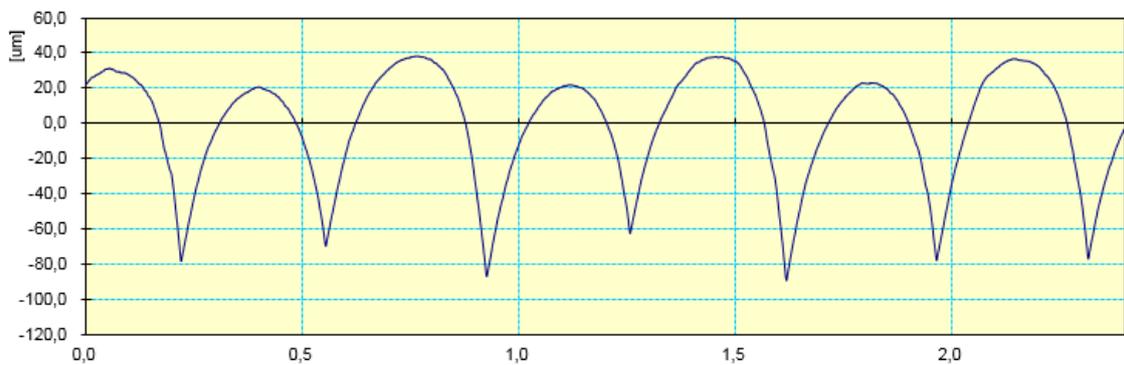
CALIDAD BAJA 30°



Gráfica 15. Perfil Calidad Baja 30°

[mm]

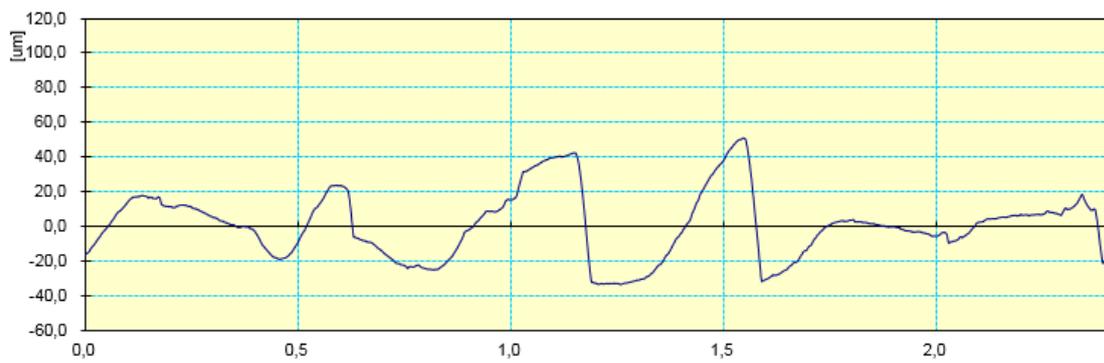
CALIDAD BAJA 60°



Gráfica 16. Perfil Calidad Baja 60°

[mm]

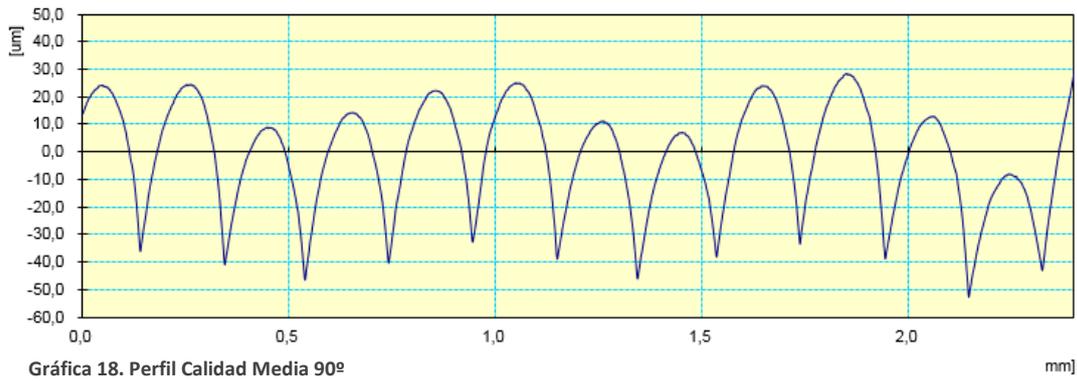
CALIDAD BAJA 0°



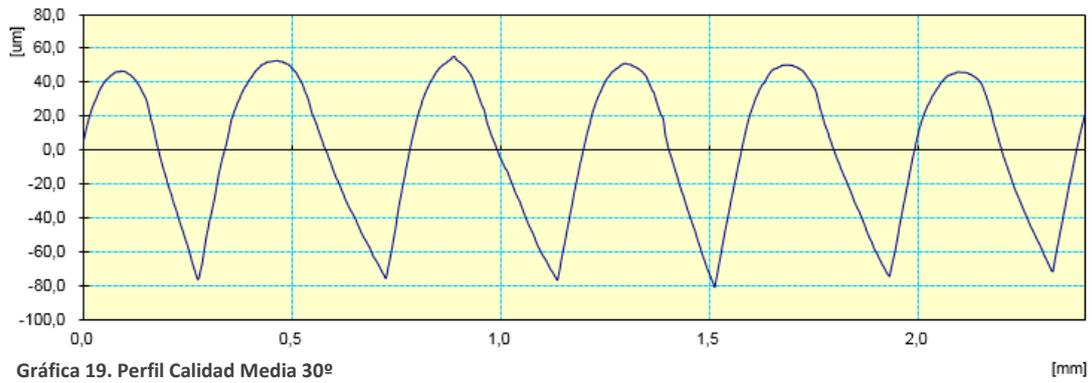
Gráfica 17. Perfil Calidad Baja 0°

[mm]

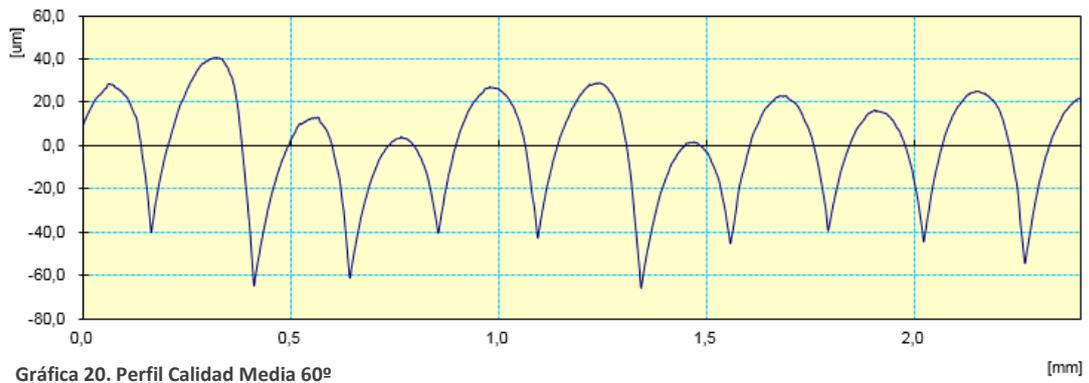
CALIDAD MEDIA 90º



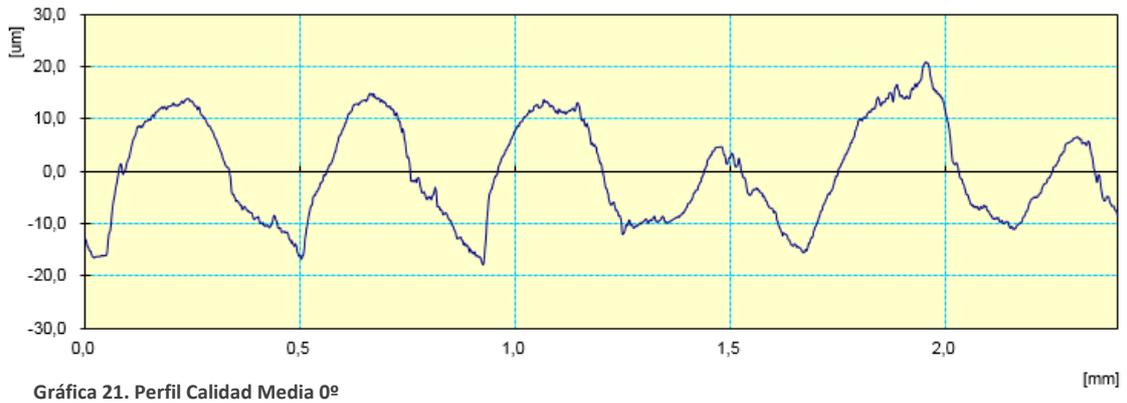
CALIDAD MEDIA 30º



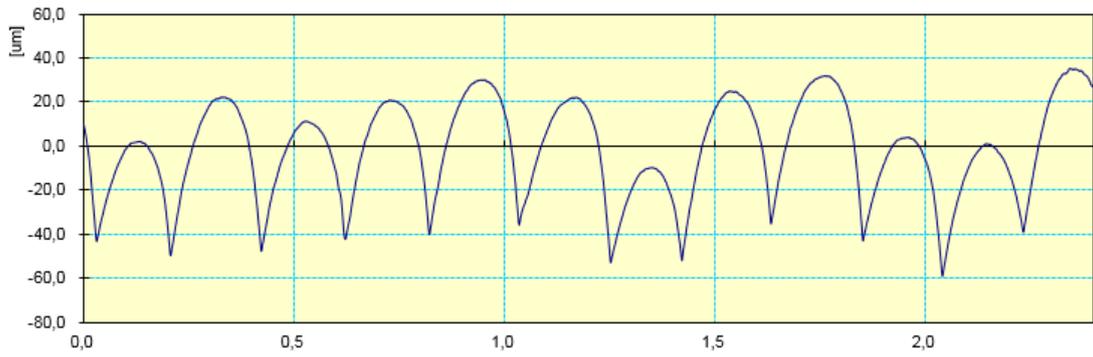
CALIDAD MEDIA 60º



CALIDAD MEDIA 0º



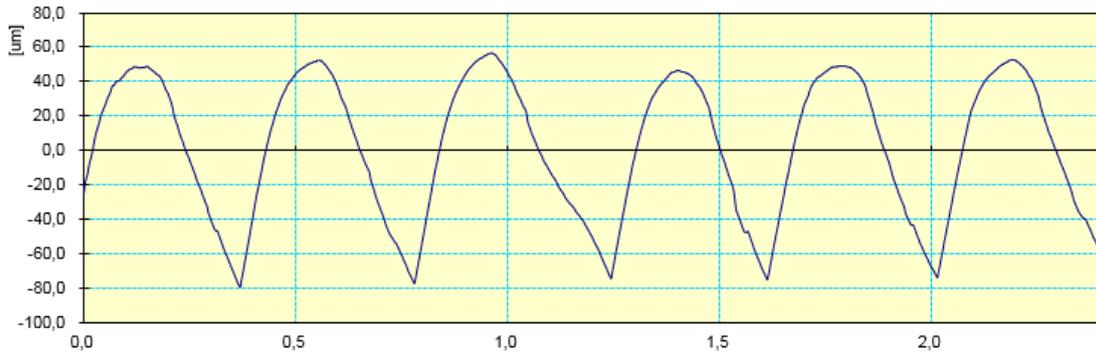
CALIDAD ALTA 90°



Gráfica 22. Perfil Calidad Alta 90°

[mm]

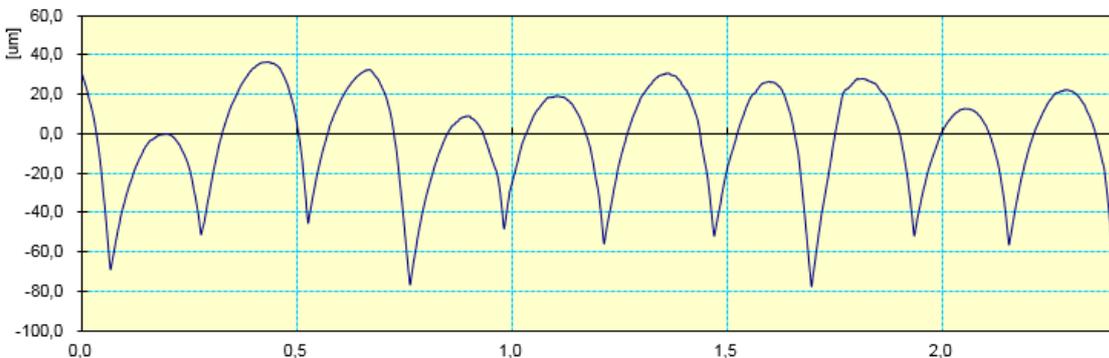
CALIDAD ALTA 30°



Gráfica 23. Perfil Calidad Alta 30°

[mm]

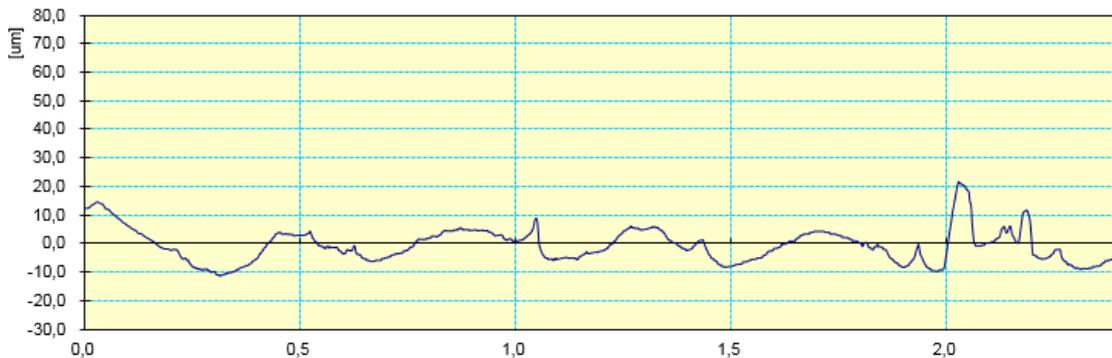
CALIDAD ALTA 60°



Gráfica 24. Perfil Calidad Alta 60°

[mm]

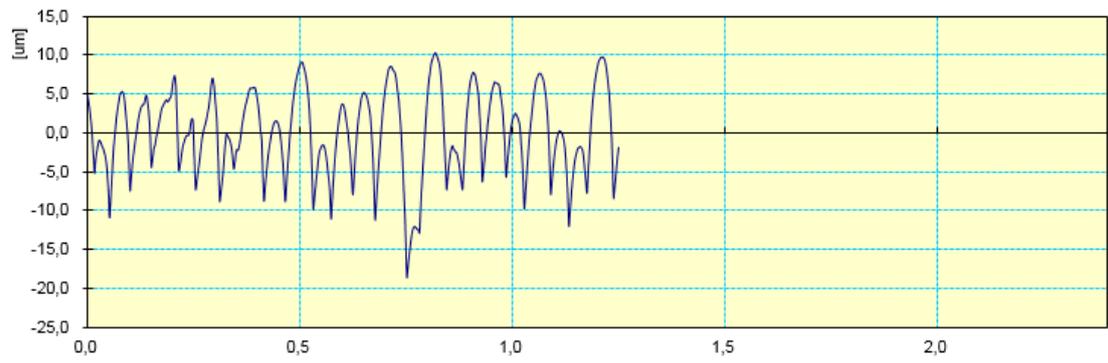
CALIDAD ALTA 0°



Gráfica 25. Perfil Calidad Alta 0°

[mm]

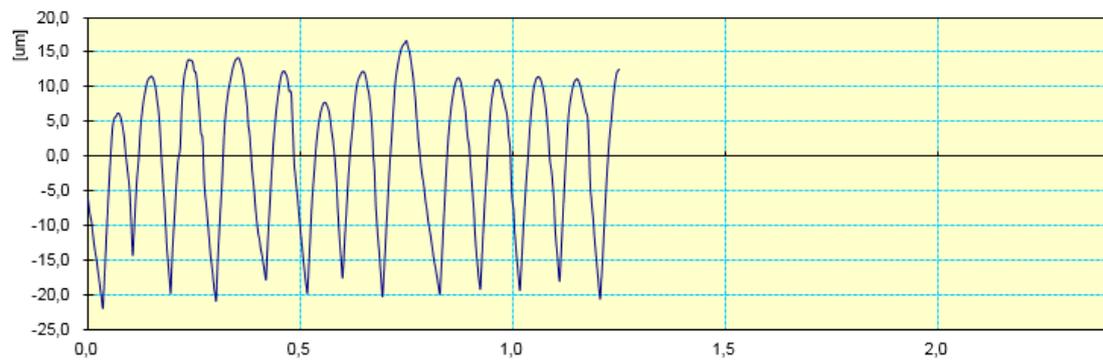
CALIDAD ULTRA 90°



Gráfica 26. Perfil Calidad Ultra 90°

[mm]

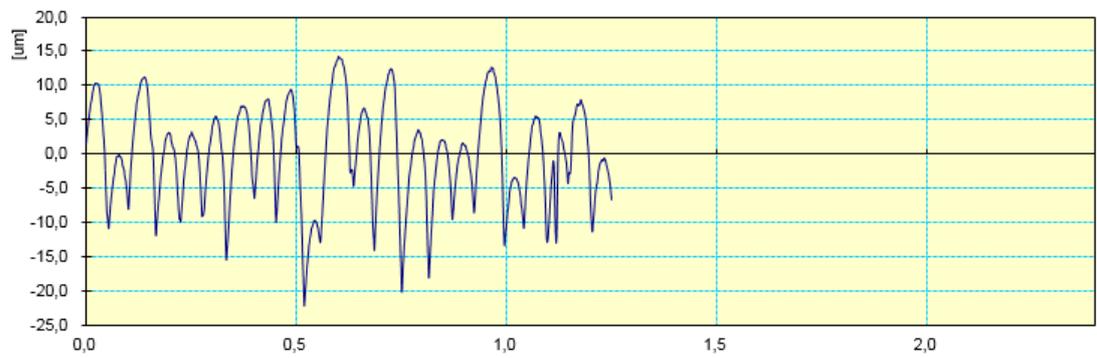
CALIDAD ULTRA 30°



Gráfica 27. Perfil Calidad Ultra 90°

[mm]

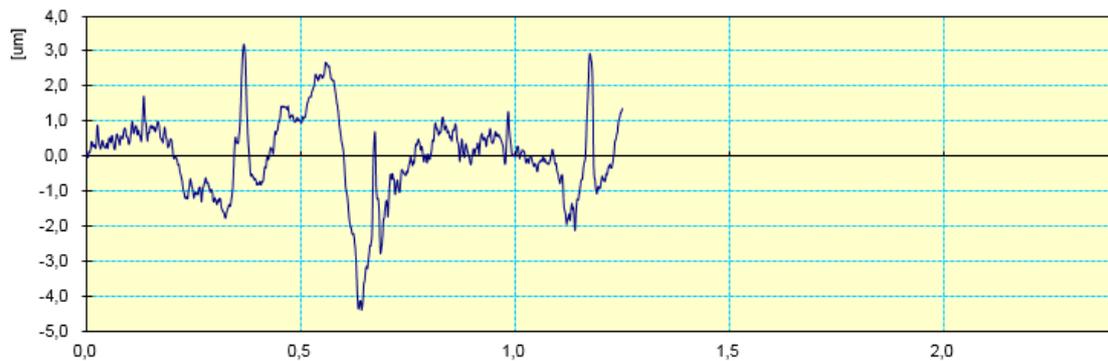
CALIDAD ULTRA 60°



Gráfica 28. Perfil Calidad Ultra 60°

[mm]

CALIDAD ULTRA 0°



Gráfica 29. Perfil Calidad Ultra 0°

[mm]

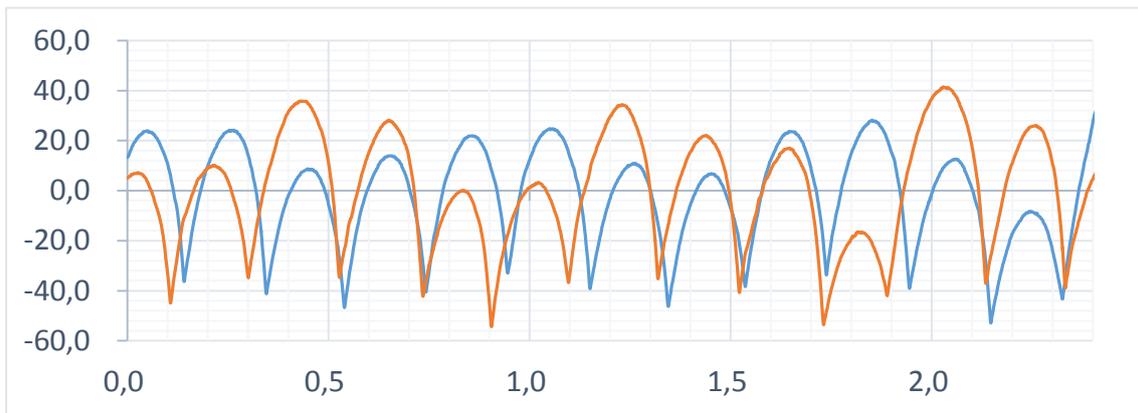
2.4.8.4 Análisis de resultados

Según lo observado en los datos se ha querido comparar una serie de perfiles con el fin de clarificar alguno de los resultados.

2.4.8.5 Comparativa de las caras verticales de calidad Media y Alta.

Ra					
PERFIL IMPR. /CALIDAD	BAJA	MEDIA	ALTA	ULTRA	Unidades
90º Posterior	21,67	17,20	16,66	5,50	µm
90º Lateral Izquierdo	21,10	15,62	16,80	5,36	µm

Puesto que no hay una gran diferencia entre la rugosidad media de la cara de 90º en las calidades Media y Alta, e incluso la rugosidad media es menor que la rugosidad alta, se ha querido hacer una comparativa gráfica de sus perfiles.



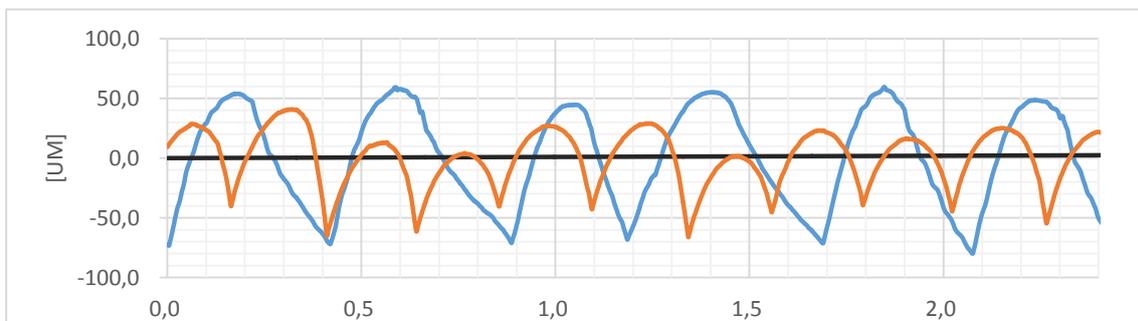
Gráfica 30. Comparación de perfiles Calidad media 90º y Calidad Alta 90º



Se comprueba que efectivamente los perfiles no difieren mucho entre ellos. Aunque la calidad alta es más irregular teniendo varios picos puntuales algo más alto que el resto y aumentando así su valor de rugosidad media. Aun así, se comprueba que los perfiles de las caras verticales siguen un patrón bastante continuo y fácil de predecir. Cada montaña representa una capa.

2.4.8.6 Comparativa de las caras verticales de calidad de una cara 30º con una de 60º de igual calidad.

Se ha detectado que las caras de 60º tiene una calidad superficial mejor que las de 30º, por ello se ha querido hacer una comparación gráfica de los sus perfiles en de una misma muestra, en este caso la de calidad baja.



Gráfica 31. Comparación de perfiles Calidad baja 30º y 60º



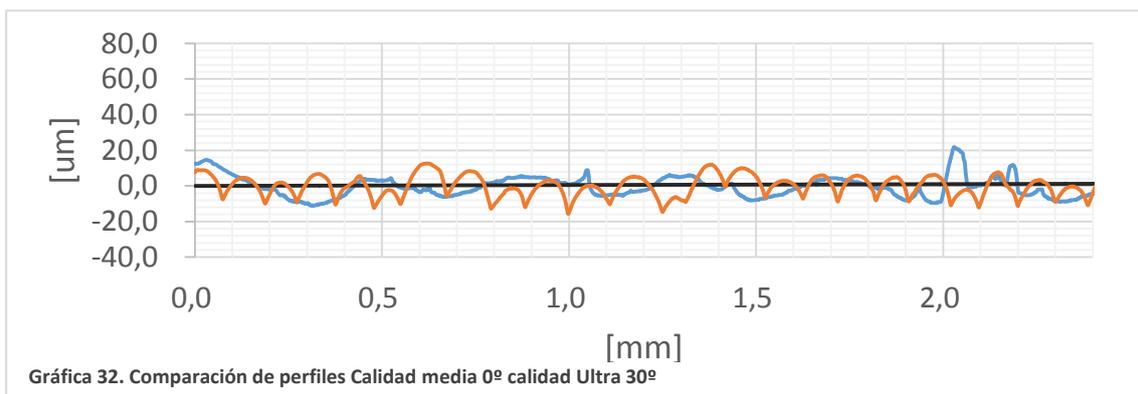
Se puede observar fácilmente el efecto escalera en el perfil de 30°. Hay una mayor distancia entre picos y una transición en sus valles. Además, la altura es mayor en la cara de 30° y por tanto la rugosidad media es mayor. Podemos afirmar por tanto que cuanto menor es el ángulo, sin llegar a 0° mayor es su rugosidad.

2.4.8.7 Comparativa de dos caras con igual Ra pero con un Rt y Rz completamente distintos

Los resultados señalaban una Ra media parecida en caras de distinto ángulo y calidad. Pero sin embargo su Rt era muy distinta. Por ello se ha querido hacer una comparación entre ellas, para ver gráficamente cómo se comportan los perfiles.

Ra					
PERFIL IMPR. /CALIDAD	BAJA	MEDIA	ALTA	ULTRA	Unidades
30° Frontal	31,54	36,75	35,38	9,32	μm
0° Posterior	17,71	9,35	6,29	0,99	μm

Rt					
PERFIL IMPR. /CALIDAD	BAJA	MEDIA	ALTA	ULTRA	Unidades
30° Frontal	140,63	140,63	133,50	37,18	μm
0° Posterior	119,10	85,15	63,32	7,37	μm



Como se comprobó en el Estudio 1, la superficie de las caras de 0° son muy irregulares pese a que sus valores de rugosidad tienden a ser inferiores. La cara a 30° sigue un patrón mientras que la de 0° es aleatorio con aparición de picos muy pronunciados. Este es debido al patrón de relleno de las caras superiores.

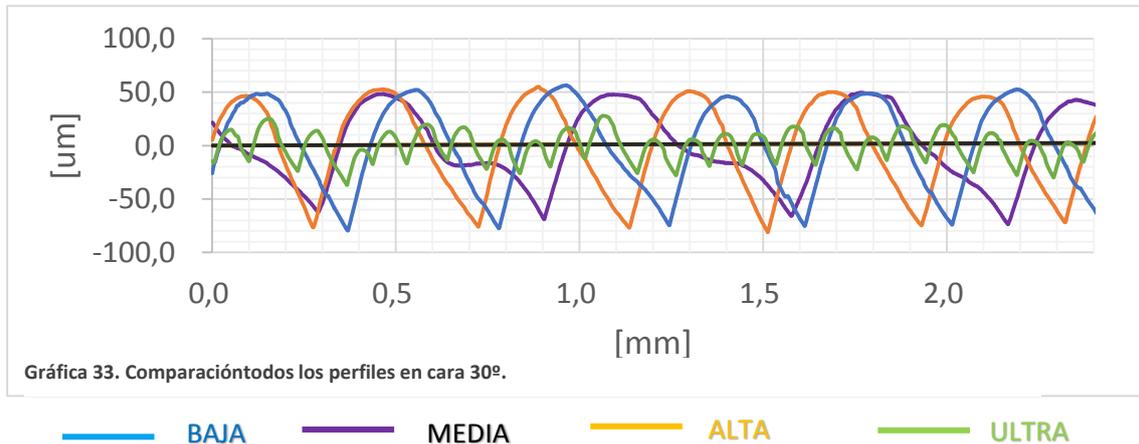
2.4.8.8 Caras de distinta calidad, pero R muy parecidas.

Se ha detectado un Ra de las caras a 30° con resultados muy similares, con excepción de la calidad ultra.

Ra					
PERFIL IMPR. /CALIDAD	BAJA	MEDIA	ALTA	ULTRA	Unidades
30° Frontal	31,54	36,75	35,38	9,32	μm

Rz					
PERFIL IMPR. /CALIDAD	BAJA	MEDIA	ALTA	ULTRA	Unidades
30º Frontal	128,83	131,63	126,93	34,43	µm

Se han comparado y se comprueba que salvo las de calidad ultra, las demás no presentan grandes diferencias entre sí.



2.4.9 Conclusiones

- **Para conseguir una calidad visual buena es suficiente con imprimir el perfil en Calidad Alta.**
 - La calidad visual de una configuración de calidad alta y una de calidad Ultra apenas es perceptible, por tanto, si la rugosidad no es importante y solo la apariencia, se elegirá el perfil Alto. Con espesores del orden de 0.1 mm
- **Para una rugosidad Alta será necesario la Calidad Ultra.**
 - La calidad Ultra es la única que sus valores de Rugosidad son significativamente menores al resto en todas sus caras, cuando la prioridad sea su calidad superficial se elegirá este perfil de impresión con espesores del orden de 0.05 mm .El tiempo de impresión será su mayor inconveniente.
- **Para una rugosidad aceptable sin tener en cuenta la calidad visual bastará con Calidad Media.**
 - Aunque la Calidad visual media es claramente inferior a la calidad alta, en términos de rugosidad no ocurre lo mismo. Puesto que el tiempo de fabricación también es menor, se tenderá a imprimir en calidad media cuando el tiempo de impresión prime sobre rugosidad y esta prime sobre calidad visual. Espesores del orden de 0.2 mm.
- **Se recomienda modificar la temperatura de serie en función de la velocidad.**
 - Los perfiles de impresión Medio y Alto tienen unas calidades superficiales similares, esto puede ser debido a que no se modifica la temperatura acorde con la velocidad tal y como vimos en el Estudio 1. Por tanto es recomendable aumentar la temperatura en el Perfil Alto.

3. ANÁLISIS MICROSCÓPICO

En algunos casos, el análisis de perfiles en dos dimensiones es insuficiente para estudiar la rugosidad y se complementa con imágenes tridimensionales que nos dan una idea exacta de la superficie. Por tanto con el fin de estudiar en mayor profundidad el relieve de la superficie de las piezas, se ha realizado un estudio a nivel microscópico con imágenes de alta resolución de un *microscopio electrónico de barrido (SEM)*

Aparte de analizar las muestras del estudio 2, también se han generado imágenes de muestras fabricadas con otras tecnologías aditivas explicadas en el **ANEXO 1**.

Las cuales son:

- FDM
- SLA¹⁶
- Polyjet¹⁷

FDM: Como se ha comentado en el apartado 2.4.8.2 *Calidad Visual*, en el proceso de fabricación suele haber problemas en las aristas de las piezas. La siguiente imagen muestra esos errores, como la superposición de capas.

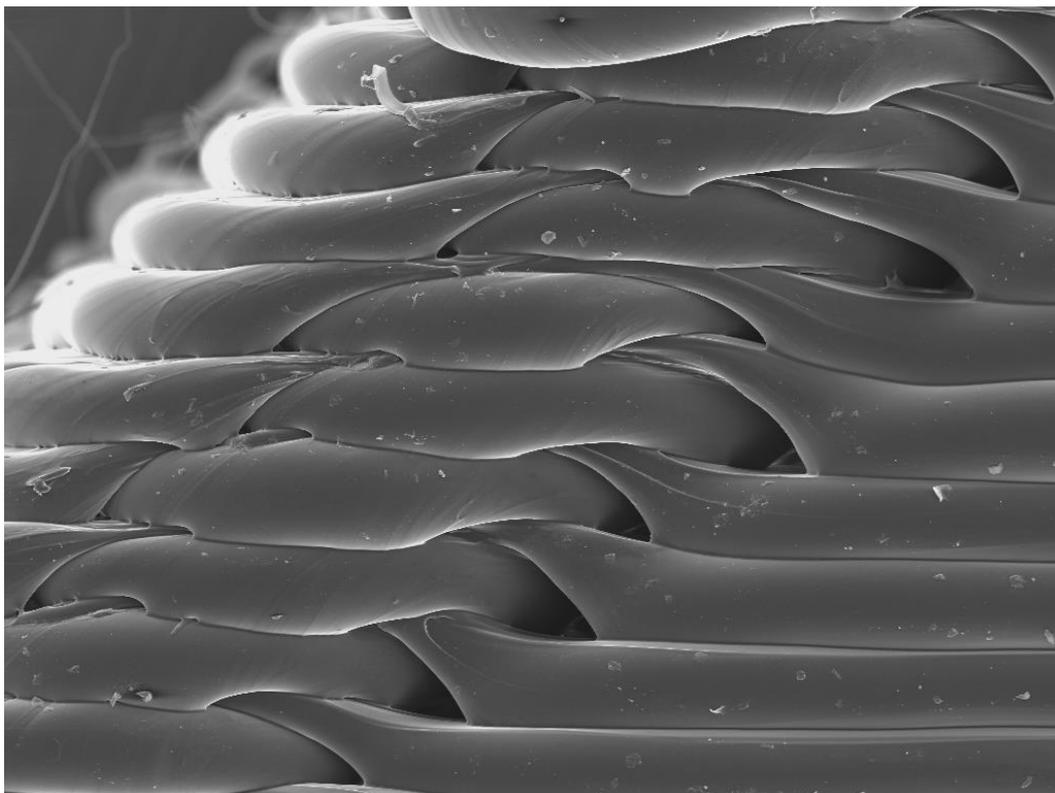


Figura 29. FDM. Arista de la cara de 90° con 45°. SEM

¹⁶ Estereolitografía. Se puede encontrar más información en el Anexo 1, en el apartado de Tecnologías de prototipado rápido.

¹⁷ Se puede encontrar más información en el Anexo 1, en el apartado de Tecnologías de prototipado rápido.

Como se ha mencionado en el apartado 2.3.9, *las caras a 0°* se fabrican siguiendo un patrón de relleno distinto al resto, el cual genera irregularidades, la siguiente imagen muestra el comportamiento de dicho patrón. Se puede observar como realiza el relleno de la capa final, haciendo una trayectoria entre esquinas. El patrón presenta pequeños huecos vacíos los cuales generan irregularidades.

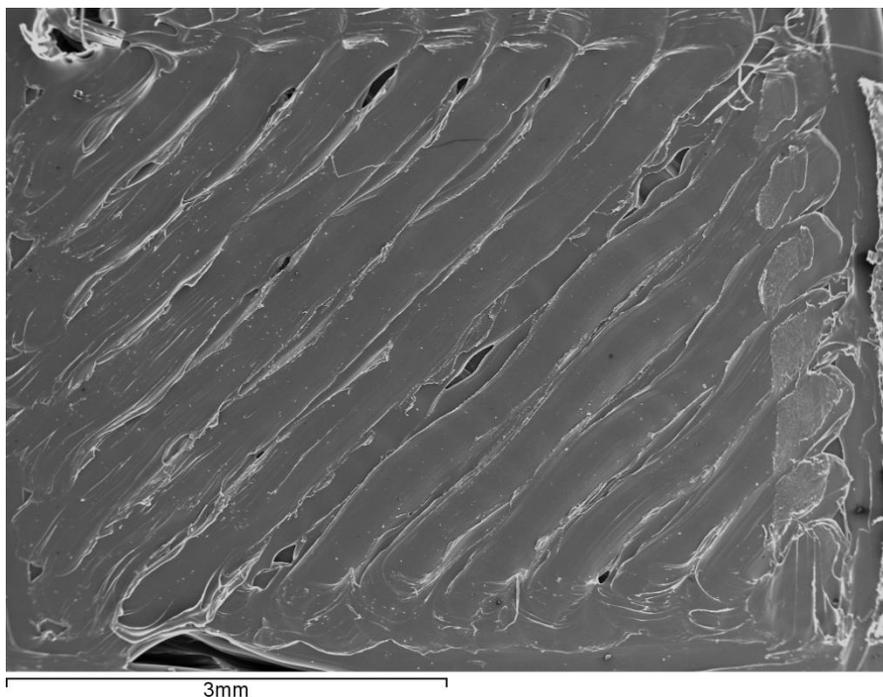


Figura 30. FDM. Patrón de relleno cara de 0°. SEM

La siguiente imagen muestra el efecto escalera en la cara de 45°

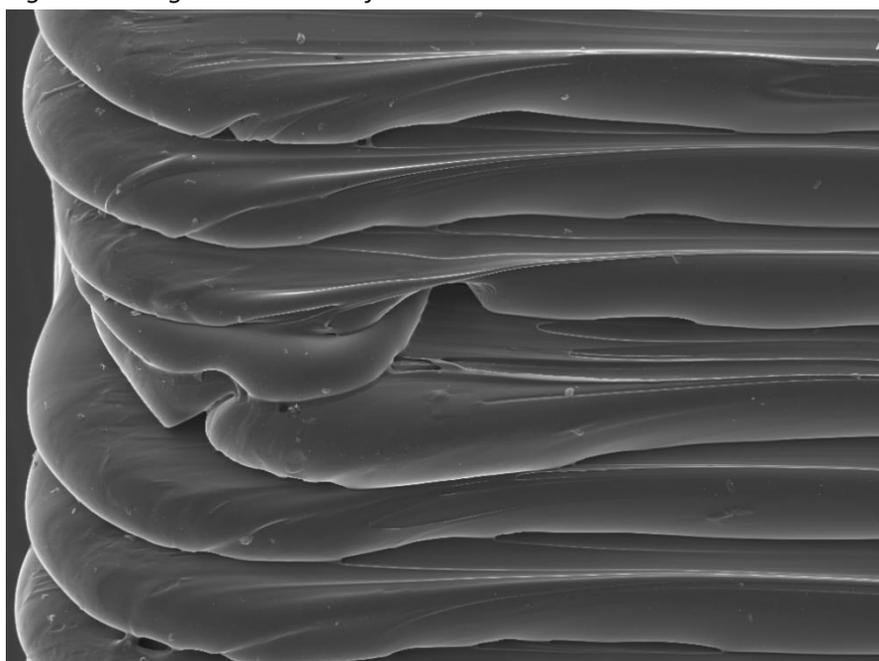


Figura 31. FDM. Efecto escalera cara de 45°. SEM

La siguiente imagen muestra el comportamiento de las capas en las caras de 90° para las 3 tecnologías. Se comprueba que la naturaleza de las capas a nivel microscópico es muy diferente unas de otras.

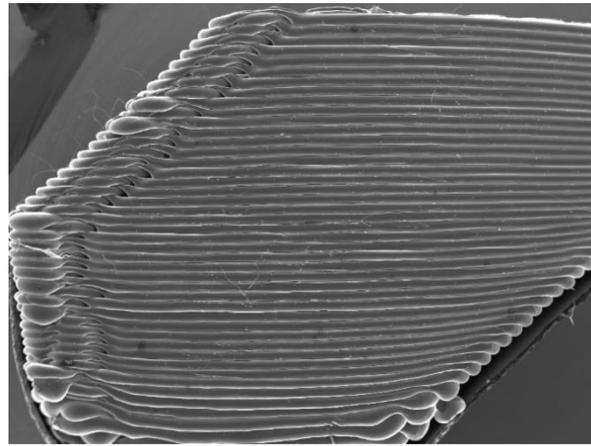


Figura 32. FDM.cara90°

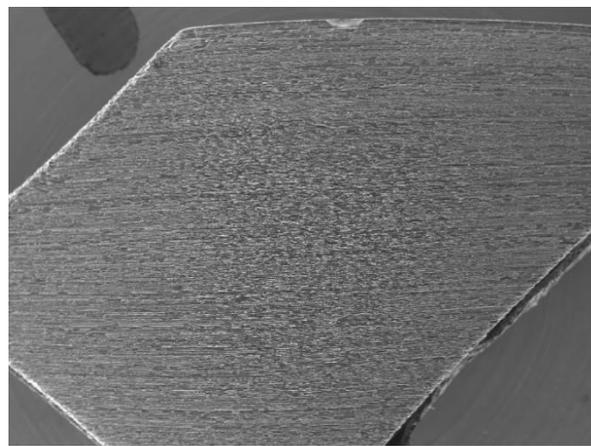


Figura 33. PolyJet.cara 90°

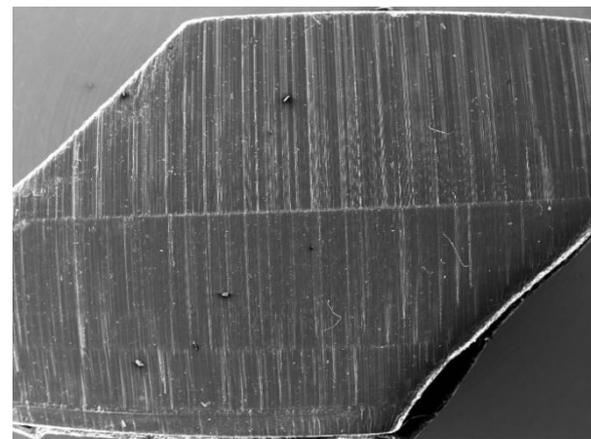


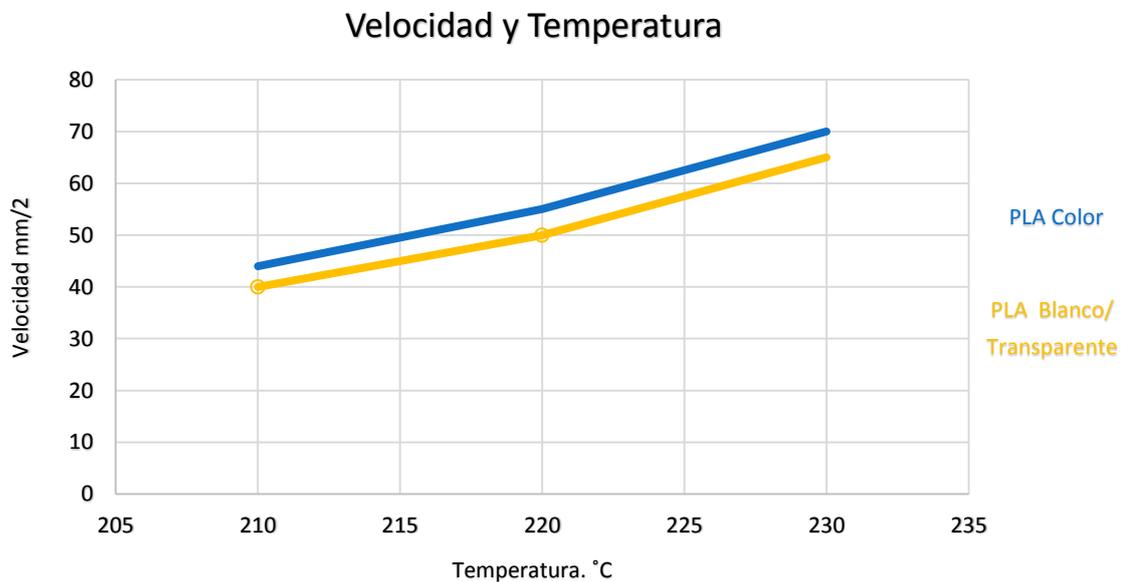
Figura 34. SLA.cara90°

Estas imágenes reafirman el hecho de que las superficies pueden llegar a ser mucho más complejas de lo que se puede llegar a imaginar. La totalidad de las imágenes se pueden consultar en el **ANEXO 5**.

4. RECOMENDACIONES DE DISEÑO

En base a nuestras conclusiones de ambos estudios se han generado unas recomendaciones de diseño que permitan al usuario mejorar y optimizar de la calidad superficial de las piezas fabricadas mediante tecnología aditiva.

- **La temperatura y velocidad del extrusor deberán modificarse conjunta y linealmente.**
Una mala relación entre ambos puede llevar a una mala calidad visual y una rugosidad deficiente.
Se ha creado una gráfica de recomendación para temperatura/ velocidad de impresión con PLA en FDM según los resultados obtenidos de nuestros estudios.



Gráfica 33. Recomendación velocidad y temperatura PLA.

- **El espesor o altura de capa será el factor más decisivo para una buena calidad superficial.**
Puesto que no siempre es posible reducir al máximo al espesor debido a los tiempos de impresión se hará una valoración de que nivel de rugosidad se pretende conseguir.

Si se quiere conseguir una calidad superficial aceptable en el menor tiempo posible, el espesor de capa no deberá bajar nunca de 0.2 mm. Pudiendo conseguir rugosidades media del orden de 15 μ m para las caras más favorables¹⁸ y 35 μ m para las más desfavorables.

Si se quiere conseguir una buena calidad superficial sin que el tiempo sea un problema, el espesor de capa no deberá ser superior a 0.05 mm. Pudiendo conseguir rugosidades del orden de 5 μ m para las caras más favorables y 10 μ m para las más desfavorables.

¹⁸ No se cuentan las caras horizontales a 0º puesto que tienen un comportamiento especial.

Nos moveremos en un rango de espesor de capa de 0.05 mm hasta 0.2 mm. Cabe destacar que el tiempo de impresión puede aumentar hasta 5 veces desde el valor mínimo al máximo, será criterio del usuario valorar que es más prioritario.

- **Intentar evitar ángulos comprendidos entre 10° y 45 °.**
Los ángulos comprendidos en este rango tienden a tener un efecto escalera mayor, el cual condicionara drásticamente la rugosidad final. Si no es posible evitar estos ángulos por requisitos de diseño se tenderá a fabricarlos con soportes angulares para reducir su ángulo respecto al extrusor o a minimizar la superficie de sus caras.

- **Utilización de modelos matemáticos para la predicción de la rugosidad.**
Se han realizado varios modelos de regresión lineal y cuadrática, los cuales pueden ser útiles para la predicción de la rugosidad final en las piezas que queramos fabricar. Esto nos permitirá saber de antemano si la pieza va a cumplir los requisitos de rugosidad sin necesidad de imprimirlas.

Ecuación para caras de 90° impresas en PLA:

- $Ra = 31,1845 + 57,5733t + 0,0108519v_e - 0,1225T$

Ecuación para caras de 45° impresas en PLA:

- $Ra = -49 + 133,6 t + 0,610 v_e + 0,41 T + 76t^2 + 0,00223 v_e^2 - 0,00063 T^2 + 0,157 t \cdot v_e - 0,210 t \cdot T - 0,00390 v_e \cdot T$

Donde;

R_a = Rugosidad media en μm , t = Espesor o altura de capa en μm

v_e = Velocidad del extrusor, T = Temperatura en °C

- **La velocidad es un parámetro importante para la calidad visual.**
Aunque está por sí sola no es demasiado relevante para la rugosidad, sí lo es para la calidad visual. En especial tiene un factor relevante en las aristas y cantos vivos de las piezas. Una velocidad elevada junto con un espesor medio o bajo puede generar fallos dimensionales importantes en el acabado final. Por ellos es importante si se quiere conseguir una buena calidad visual reducir su velocidad¹⁹. Aunque nunca menos de 40 mm/s.
- **Utilización de adhesión tipo *brim* o de *sombbrero*.**
La utilización de este tipo de adhesión impresa no daña la pieza y suele ser sencilla de despegar. Para mejorar su adhesión también es recomendable el uso de laca o pegamentos especiales. Además si el diseño lo permite se recomienda realizar un pequeño chaflán en la parte inferior de la pieza con el fin de ayudar al posterior despegue.

¹⁹ Siempre acorde a la temperatura.

5. BIBLIOGRAFÍA

5.1 Artículos Científicos

- [1] F.Ali, B. V. Chowday, J.Maharaj. "Influence of Some Process Parameters on Build Time, Material, Consumption, and Surface Roughness of FDM Processed Parts: Inferences Based on the Taguchi Design of Experiments". University of the West Indies, The Caribbean Industrial Research Institute (2014).
- [2] A.Triantaphyllou, C.L. Giusca, G.D. Macaulay, R. K.Leach, K.A. Milne. "Surface texture measurement for additive manufacture" The Manufacturing Technology Centre Coventry,UK. (2014).
- [3] Y. Zeng, K. Wang, B. C. Mello, Z. Wang, C. A. Brown. "MULTI-SCALE EVALUATIONS OF THE ROUGHNESS OF SURFACES MADE BY ADDITIVE MANUFACTURING". Worcester Polytechnic Institute Worcester, Massachusetts, USA. (2014).
- [4] S. Slikder, A.Barari, H.Kishawy."Enchancing surface finish and dimensional accuracy in additive manufacturing using global adaptive direct slicing". University of Ontario, Canada. (2014)
- [5] A.Triantaphyllou, C.L. Giusca, G.D. Macaulay, F. Roerig, M. Hoebel, R. K. Leach, B. Tomita , K. A. Milne. "Surface texture measurement for additive manufacturing". The Manufacturing Technology Centre, Coventry,UK (2015)
- [6] A. Barari, S. Jamiolahmadi. "Estimation of Surface Roughness of Additive Manufacturing Parts Using Finite Difference Method" University of Ontario, Canada. (2010)
- [7] K. V.Wong, A. Hernandez. "A Review of Additive Manufacturing" University of Miami,USA. (2012)
- [8] G. Dezsö, P.Kósa." ROUGHNESS OF PLANE FACES PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING". COLLEGE OF NYÍREGYHÁZA, Hungary. (2012)
- [9] R.I. Campbell, M.Martorelli, H. S Lee. "Surface roughness visualisation for rapid prototyping models. Loughborough University, UK. (2001)
- [10] R. Udrouiu, L. A. Mihail." Experimental determination of surface roughness of parts obtained by rapid prototyping" Transilvania University of Brasov, Romania (2010)
- [11] Y. Chen, J. Lu." RP part surface quality versus build orientation: when the layers are getting thinner" The University of Hong Kong,China. (2013)
- [12] S. Rahmati, E. Vahabli." Evaluation of analytical modeling for improvement of surface roughness of FDM test part using measurement results" Azad University, Isfahan, Iran. (2015)
- [13] K. Thrimurthulu, P. M. Pandey, N. V. Reddy." Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling". Indian Institute of Technology, Kanpur, India. (2004)
- [14] I. H. Mulyadi." STUDY OF SURFACE FINISH OF STEREOLITHOGRAPHY (SLA™) PRODUCTS". University of Andalas Padang, Indonesia. (2004)
- [15] D. Ahn, H. Kim, S. Lee." Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing" Changwon National University, Republic of Korea. (2009)

- [16] D. Ahn, J. H. Kweon, J. Choi, S. Lee. "Quantification of surface roughness of parts processed by laminated object manufacturing" Changwon National University, Republic of Korea. (2012)
- [17] C. Mendonsa, K.V. Naveen, P. Upadhyaya. "Characteristic Study of Rapid Prototyped Parts at Different Build Orientation" Manipal Institute of Technology, India. (2013)
- [18] B. Nourghassemi. "Surface Roughness Estimation for FDM Systems". Ryerson University, Canada. (2011).
- [19] K. Kumar, G.S. Kumar. "An experimental and theoretical investigation of surface roughness of poly-jet printed parts" Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India. (2015)
- [20] R. Udroi, A. Nedelcu. "Optimization of Additive manufacturing Processes Focused on 3D Printing" "Transilvania" University of Brasov, Romania. (2011)
- [21] O. Lužanin, D. Movrin, M. Plančak. "EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EXTRUSION SPEED AND TEMPERATURE EFFECTS ON ARITHMETIC MEAN SURFACE ROUGHNESS IN FDM BUILT SPECIMENS" University of Novi Sad, Faculty of technical science, Serbia. (2013)
- [22] W. Wang C. Zanni, L. Kobbelt. "Improved Surface Quality in 3D Printing by Optimizing the Printing Direction" RWTH Aachen University, Germany. Dalian University of Technology, China. (2016)
- [23] H. Bugdayci, J. Grunert, F. Keller. "Analysis of Slicing-Tools for Fused Deposition Modeling 3D-Printers and comparison of different printers" University of Stuttgart, Germany. (2014)
- [24] Andreasbastian "3D Print Finishing Technique for Improved Surface Quality" <http://www.instructables.com/id/3D-Print-Finishing-Technique-for-Improved-Surface-/?ALLSTEPS>
- [45] Vining, G., Kowalski, S., "Statistical Methods for Engineers", 3rd ed. Boston:Brooks/Cole, ISBN:978-0-538-73518-6, 2011

5.2 Páginas web

- [25] Diferencias entre FDM y SLA:

"FDM vs SLA: Explained" <https://all3dp.com/fdm-vs-sla/>

- [26] Página oficial de BQ:

"Soporte BQ Prusa i3 Hephastos" <http://www.bq.com/es/support/prusa>

- [27] "Informe sobre el crecimiento de la impresión 3D"

http://www.rm-platform.com/index.php/component/jdownloads/send/2-articles-publications/607-sasam-standardisation-roadmap-2014?option=com_jdownloads

- [28] Información variada sobre Fabricación aditiva"

<http://www.custompartnet.com/>

[35] Explicación de rugosidad:

<http://es.slideshare.net/clow/rugosidad>

[36] Explicación de rugosidad:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Rugosidad_\(mec%C3%A1nica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Rugosidad_(mec%C3%A1nica))

[37] http://web.iitd.ac.in/~pmpandey/RP_html_pdf/slice_review.pdf

[38] Propiedades ABS:

https://es.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrilo_butadieno_estireno#cite_note-Propiedades_f.C3.ADsicas_y_mec.C3.A1nicas_materiales-1

[39] Propiedades PLA:

<http://hxx.es/old/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>

[40] Tecnologías Fabricación aditiva

<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/118715-Tecnologias-y-aplicaciones-en-fabricacion-aditiva-de-materiales-metalicos.html>

[41] Guía de impresión

<http://3devo.eu/guide-fdm-printable-plastics-3d-printing-filament/>

[42] Información útil sobre impresión:

<http://www.3daddfab.com/technology/>

[43] Información Útil sobre tipos de rugosidad.

http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/745_ca.pdf , Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitate, Temario Tecnología mecánica.

[46] Información útil sobre PLA:

<http://www.matterhackers.com/articles/how-to-succeed-when-printing-in-pla>

[47] Especificaciones PLA Bq

<https://store.bq.com/es/mundo-3d/filamentos/pla/>

[48] Especificaciones Rugosímetro Mitutoyo

<http://www.mitutoyosudamerica.com/imagenes/catalogos/rugosidad.pdf>

[49] Explicación tipos de errores experimentales

<http://www.ugr.es/~andyk/Docencia/TEB/Errores.pdf>

[50] Explicación Rugosidad superficial:

<http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>

[51] Información software Cura:

http://www.reprap.org/wiki/Introducci%C3%B3n_a_Cura/es

5.3 Proyectos final de carrera /TFG / TFM

[30] L. A. M. "FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FILAMENTOS PARA IMPRESORA 3D A PARTIR DE MATERIALES RECICLADOS" Universidad de la Laguna, Spain. (2015)

[31] G. Dominguez. "MONTAJE, CALIBRADO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA IMPRESORA 3D AUTOREPLICABLE" Universidad Pontificia, Spain. (2015)

[32] A. A. Relaño "Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida" Universidad Carlos III de Madrid, Spain. (2013)

[33] M. Cobertera "DISEÑO, FABRICACIÓN Y MEDICIÓN DE PIEZAS PATRÓN PARA IMPRESORA 3D" Universidad de Zaragoza, Spain. (2014)

[34] A. J. Albuquerque. "OPTIMIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PIEZAS DE PLA FABRICADAS MEDIANTE TÉCNICAS ADITIVAS" Universidad Carlos III de Madrid, Spain. (2014)

[44] A. A. Relaño Pastor y J. Hidalgo García, *Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA Procesadas mediante modelado por deposición fundida*, Leganés: UC3M, Octubre 2013.

6. ANEXOS
