

Trabajo Fin de Máster

Análisis de la influencia de los parámetros de impresión en la geometría y aspecto superficial obtenidos mediante impresión 3D FDM

Analysis of the influence of printing parameters on the geometry and surface appearance obtained by FDM 3D printing

Autor

Jorge Larrosa Portas

Directores

Jorge Santolaria Mazo

Jesús Velázquez Sancho

Titulación del autor

Máster Universitario en Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Curso 2021 - 2022

Análisis de la influencia de los parámetros de impresión en la geometría y aspecto superficial obtenidos mediante impresión 3D FDM

RESUMEN

El presente proyecto consistirá en, como indica su título, analizar la influencia de los parámetros de impresión de dos máquinas FDM en la geometría y el aspecto superficial de piezas obtenidas con las mismas. Las impresoras 3D de tipo FDM empleadas han sido una "Anet A8" y una "Ultimaker S5". Conocidas las características de estas máquinas de fabricación aditiva, se han determinado los parámetros de impresión a variar más relevantes, seleccionando de forma adecuada sus valores en base a sus condiciones de funcionamiento recomendadas. Se han determinado los mismos parámetros con los mismos valores y combinaciones para ambas máquinas, permitiendo reproducir, en la mayor medida posible, las mismas condiciones de impresión para establecer comparativas concluyentes.

Para realizar este análisis, previamente ha sido necesario definir una pieza estándar o patrón. En esta pieza se ha tratado de alcanzar el equilibrio entre una geometría con gran cantidad de elementos a medir, pero sin una excesiva complejidad o tamaño para facilitar su fabricación, medición e inspección.

Posteriormente, se ha realizado un diseño de experimentos para establecer el orden de impresión en todas las combinaciones de los parámetros de impresión a variar.

Una vez se han establecido todos los valores en los parámetros de impresión a emplear y sus respectivas combinaciones junto con la geometría de la pieza definida, se han trasladado al software de impresión 3D "Ultimaker Cura", con el objetivo de generar los archivos con el código adecuado para ser interpretado por cada impresora y realizar la fabricación de las piezas.

A continuación, se han fabricado todas las piezas definidas anteriormente en el orden establecido mediante el diseño del experimento con una impresora "Anet A8" modificada y con una impresora "Ultimaker S5" original.

Obtenidas todas las piezas, se ha realizado su medición mediante una máquina de medir por coordenadas (MMC) para determinar los planos que componen sus caras, las aristas y los vértices a partir de puntos de palpado discretos.

Por otro lado, se han seleccionado una serie de piezas representativas de determinadas combinaciones de parámetros para realizar una inspección cualitativa de sus acabados superficiales mediante un equipo de microscopía óptica de enfoque variable, permitiendo apreciar las rugosidades de las superficies.

Con todos estos resultados de medición e inspección, se han obtenido conclusiones experimentales sobre precisión geométrica y tolerancias, relacionando los resultados con los parámetros empleados.

Índice

1. Objeto	4
2. Alcance	6
3. Antecedentes	7
3.1. Impresoras 3D FDM	7
3.2. Material de fabricación empleado	9
3.3. Máquina de medir por coordenadas "ZEISS WMM850"	10
3.3. Microscopio óptico de enfoque variable "Alicona InfiniteFocus SL"	10
4. Metodología	11
4.1. Definición una pieza patrón	11
4.2. Parámetros de impresión seleccionados	15
4.3. Generación de los archivos en código G y fabricación de las piezas	16
4.4. Mediciones en la máquina de medir por coordenadas	18
4.5. Mediciones en el microscopio óptico	20
5. Resultados finales de las mediciones en MMC	21
5.1 Resultados de las mediciones – Ensayo de repetibilidad	23
5.2 Resultados de las mediciones – Cotas directas	26
5.3 Resultados de las mediciones – Cotas indirectas	30
5.3.1 Cotas indirectas – Aristas	30
5.3.2 Cotas indirectas – Vértices	32
5.4 Resultados de las mediciones – Media de las cotas directas e indirectas	35
5.5 Resultados de las mediciones – Distancias relativas	43
5.6 Resultados de las mediciones – Elementos geométricos	49
5.6.1 Elementos geométricos – Planitud	50
5.6.2 Elementos geométricos – Paralelismo relativo	53
5.6.3 Elementos geométricos – Perpendicularidad	56
5.6.4 Elementos geométricos – Cilindricidad	58
6. Resultados finales de las inspecciones en microscopio óptico de enfoque variable	61
7. Conclusiones	64
8. Bibliografía y referencias	67
Anexo I: Índice de ilustraciones	69
Anexo II: Modificaciones sobre la máquina FDM "Anet A8" empleada	73
Anexo III: Procedimiento de medición en la MMC "ZEISS WMM850"	78

Anexo IV: Procedimiento de medición en el microscopio óptico de enfoque variable “Alicona InfiniteFocus SL”	81
Anexo V: Ejemplos de resultados de las inspecciones realizadas con el microscopio “Alicona InfiniteFocus SL”	88
Anexo VI: Resultados numéricos medios de las mediciones obtenidas con la MMC “ZEISS WMM850”	99
Anexo VII: Gráficas de interacción obtenidas a partir de los resultados de las mediciones .	131

1. Objeto

Como se ha indicado en el resumen, el objeto de este proyecto es determinar la influencia de los parámetros de impresión en la geometría de las piezas obtenidas, tanto en sus cotas generales como en su aspecto y rugosidad superficiales.

Para ello, primero se ha definido una pieza o probeta con una geometría adecuada para el resto del proceso, es decir, que permita una adecuada medición con una máquina de medir por coordenadas con palpador vertical y una correcta visualización de sus superficies mediante un microscopio óptico de enfoque variable. Posteriormente, se han seleccionado algunos de los parámetros más importantes en un proceso de fabricación aditiva, como son la temperatura, la velocidad de desplazamiento del cabezal y el espesor de capa.

Una vez seleccionados estos parámetros, se imprimirán todas las combinaciones posibles de los valores determinados mediante las máquinas FDM “Anet A8” y “Ultimaker S5”.

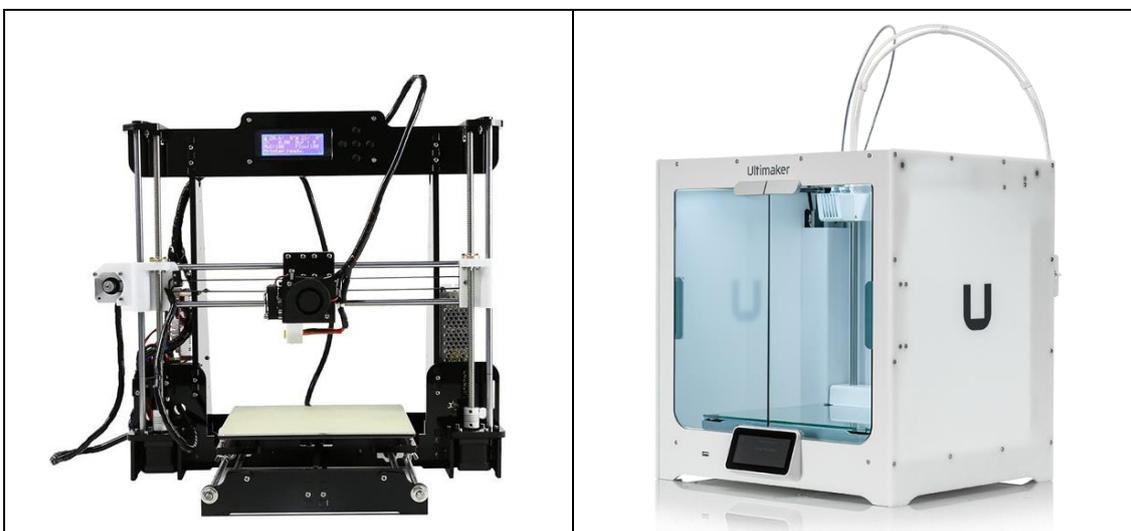


Ilustración 1 - Anet A8 (izquierda) y Ultimaker S5 (derecha)

Posteriormente, se realizará su medición e inspección ya mencionadas en la máquina de medir por coordenadas “WMM 850” del fabricante “ZEISS”. De este modo, se podrán relacionar las cotas reales obtenidas y realizar su comparación con las cotas nominales definidas en el diseño original de la probeta.

Uno de los objetivos principales del presente proyecto es poder identificar la desviación en la posición de diferentes elementos de la pieza (caras, aristas y vértices), convirtiéndose un parámetro muy importante su orientación respecto al sistema de coordenadas de cada máquina FDM. Por ello, será posible identificar en qué eje o dirección se alcanza la mayor precisión geométrica y en cuál la menor, además de su variabilidad respecto a sus valores medios. Al identificar la precisión en cada eje, será posible relacionar estos resultados con la geometría constructiva de cada máquina.

Otro objetivo de este proyecto es observar en mayor detalle las condiciones de las superficies a nivel microscópico. Para ello, se ha empleado el microscopio óptico de enfoque variable "InfiniteFocus SL", del fabricante "Alicona".



Ilustración 2 – ZEISS WMM850 (izquierda) y Alicona InfiniteFocus SL (derecha)

Con este equipo se han podido observar determinadas superficies de un número de probetas seleccionadas, con la finalidad de realizar una reconstrucción tridimensional de estas superficies. A partir de esta reconstrucción, el software específico de este microscopio "MeasureSuite" permite determinar la rugosidad y la forma de estas superficies tanto a nivel cualitativo como cuantitativo. Sin embargo, el enfoque principal en este aspecto será cualitativo con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con los diferentes parámetros de impresión empleados.

De este modo, se esperan diferentes resultados en las caras superiores (normal paralela al eje Z) y las caras laterales (normal paralela a los ejes X e Y), quedando influenciados por las condiciones constructivas de cada máquina y los parámetros de impresión ya mencionados anteriormente.

2. Alcance

En este apartado se va a definir el alcance del proyecto, es decir, su extensión y hasta qué punto se profundizará en detalle en los aspectos analizados y las conclusiones esperadas con la metodología aplicada.

En primer lugar, como se ha mencionado anteriormente, se ha definido una pieza o probeta con unas dimensiones y una geometría adecuadas para ser analizadas correctamente. Esta pieza ha de contar con el mayor número de elementos geométricos diferenciados y con el mínimo tiempo de fabricación posible, para maximizar el número de probetas obtenidas por unidad de tiempo.

En cada una de las dos impresoras mencionadas se realizará primero un análisis de repetibilidad. Este análisis consistirá en fabricar y medir 10 veces la misma pieza con los mismos parámetros de impresión. De este modo, se podrá determinar la variabilidad de cada impresora debida a condiciones aleatorias no analizadas como las ambientales, la calibración, etc.

Una vez concluido este análisis de repetibilidad y determinados sus resultados, se va a realizar el análisis principal de este proyecto, que es la influencia de los parámetros de temperatura, velocidad de desplazamiento y espesor de capa en las piezas obtenidas. Entenderemos estos parámetros de la siguiente manera:

- Temperatura: Corresponderá a la temperatura de extrusión, es decir, la temperatura a la que saldrá el material fundido (PLA) por la boquilla del extrusor. Este no será el valor exacto de la temperatura del material a la salida de la boquilla, sino que será la temperatura detectada por el sensor situado justo al lado, en un orificio del bloque de aluminio del extrusor. Sin embargo, consideraremos que esta temperatura es, aproximadamente, la misma que la del material extruido debido a la alta conductividad térmica del bloque de aluminio.
- Velocidad de desplazamiento: Será el módulo de la velocidad de desplazamiento en dirección horizontal, es decir, en direcciones X, Y o en su combinación. El cabezal se desplazará a esta velocidad mientras el extrusor esté depositando material sobre la superficie de impresión.
- Espesor de capa: Será la distancia en dirección vertical (eje Z) que se separará la placa de impresión de la boquilla del cabezal al pasar de una capa a la siguiente. Este desplazamiento se realiza en vacío antes de comenzar cada capa y su valor será constante en todas las capas de impresión a excepción de la primera que, para facilitar su adhesión a la placa de impresión, lo habitual es que cuente con un espesor levemente superior.

Aclarado el significado de los parámetros de impresión que se van a variar durante este análisis, se realizará un diseño de experimentos (DOE) para analizar su influencia en las cotas geométricas y su rugosidad superficial. De este modo, se desarrollará un diseño de experimentos factorial en el que se obtendrán 3 repeticiones para cada combinación posible en los valores de estos parámetros. Existiendo 27 tipos de piezas (variaciones de 3 parámetros con 3 valores en cada uno de ellos), darán lugar a 81 piezas. Estas 81 piezas se van a fabricar en cada una de las dos impresoras seleccionadas, por lo tanto, obtendremos 162 piezas propias de este análisis de parámetros. Añadiendo los análisis de repetibilidad de 10 piezas en cada impresora, la cifra total de piezas empleadas en este proyecto asciende a 182 unidades.

3. Antecedentes

Antes de avanzar en mayor detalle con el contenido principal del proyecto, conviene aclarar algunos aspectos previos para comprender el desarrollo del mismo.

3.1. Impresoras 3D FDM

En primer lugar, una máquina de impresión 3D FDM (Fused Deposition Manufacturing) consiste en un equipo que extruye filamento de un termoplástico o similar a alta temperatura a través de una boquilla con un diámetro determinado. El desplazamiento controlado de esta boquilla permite depositar el material en posiciones y direcciones previamente definidas, dando lugar a la geometría deseada. Este tipo de máquinas pueden ser cartesianas (ejes X, Y y Z separados) o de tipo "delta", siendo actualmente las primeras las más comunes debido a su simplicidad y la calidad obtenida en las piezas.

Los elementos principales de una impresora FDM son el extrusor, la boquilla y la plataforma de impresión. Una disposición general de estos elementos es la mostrada a continuación:

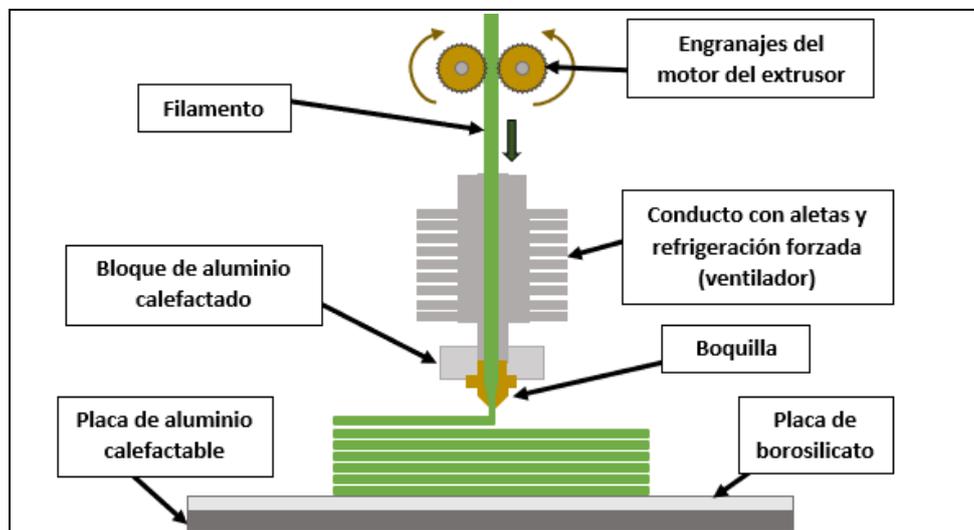


Ilustración 3 – Esquema de extrusión en una impresora 3D FDM

En ocasiones, se emplea un sistema de extrusión directa, que consiste en situar el motor del extrusor lo más próximo posible a la boquilla. Esta configuración permite controlar las fuerzas de empuje del filamento transmitidas por el extrusor de una forma más eficiente, continua y precisa. Sin embargo, su principal desventaja es que el cabezal gana un peso considerable al incluir el motor, por lo que son necesarias unas mayores fuerzas para su movimiento y se pueden producir pérdidas de precisión ante aceleraciones relativamente altas.

Por otro lado, el sistema de extrusión opuesto al descrito anteriormente se denomina de tipo "bowden". Esta técnica consiste en ubicar el motor del extrusor fuera del cabezal, generalmente en una parte fija y estable de la máquina. Para ello, se suele guiar el filamento hasta el cabezal mediante un tubo de teflón del tamaño adecuado. De este modo, las fuerzas necesarias para mover el cabezal son muy inferiores, permitiendo mayores aceleraciones conservando una alta precisión. El principal problema de esta metodología es que reduce el control sobre las fuerzas de extrusión en la boquilla y pueden variar levemente en función de la zona de trabajo de la máquina, siendo de vital importancia minimizar la distancia entre el motor del extrusor y el cabezal.

Las impresoras 3D FDM empleadas son una "Anet A8" y una "Ultimaker S5". Un aspecto a considerar es que previamente se han realizado modificaciones sobre la máquina "Anet A8" con el objetivo de mejorar la calidad en las impresiones y facilitar su mantenimiento respecto a su configuración original. A continuación, se muestra un resumen de las características principales de cada una de las impresoras 3D empleadas:

Característica	Ultimaker S5	Anet A8	Anet A8 (modificada)
Volumen de impresión	330 x 240 x 300 mm	220 x 220 x 240 mm	220 x 220 x 240 mm
Plataforma de impresión	Placa de borosilicato y placa de aluminio (intercambiables)	Placa de aluminio	Placa de borosilicato
Temperatura de la plataforma de impresión	Hasta 140°C	Hasta 100°C	Hasta 100°C
Cabezales	1 con 2 extrusores	1 con 1 extrusor	1 con 1 extrusor
Diámetro de la boquilla	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm
Tipo de extrusión	Bowden	Directa	Directa
Temperatura del extrusor	Hasta 280°C	Hasta 240°C	Hasta 240°C
Velocidad de impresión	Hasta 300 mm/s	Hasta 100 mm/s	Hasta 110 mm/s
Diámetro del filamento	2,85 mm	1,75 mm	1,75 mm
Autocalibración	Sí	No	No
Potencia	500 W	240 W	240 W
Materiales de impresión	PLA, PLA resistente, Nylon, ABS, CPE, CPE+, PC, TPU 95A, PP, PVA	ABS, PLA, HIPS, PETG, TPU	ABS, PLA, HIPS, PETG, TPU
Precio estimado	≈ 5000 €	170 €	220 €

Tabla 1 - Comparativa características principales de las impresoras 3D

Como se ha justificado anteriormente, la propia geometría constructiva de cada máquina FDM condicionará las tolerancias y la precisión dimensional obtenidas en las diferentes zonas de la pieza.

En el caso de la "Anet A8", el movimiento del eje X se obtiene desplazando el cabezal mientras que, en el eje Y, el movimiento se obtiene desplazando la placa calefactable en dirección perpendicular a la anterior. Además, el movimiento en el eje Z se obtiene desplazando el eje X completo en dirección vertical, es decir, el cabezal, las guías y el motor del eje X. Estas diferencias tan claras en masas e inercias para los movimientos de las direcciones principales provocan que sea muy probable percibir las diferencias en la precisión geométrica de los elementos de la pieza.

Por otro lado, en la máquina FDM "Ultimaker S5" todo apunta a que será menos probable apreciar unas diferencias tan acentuadas en los ejes X e Y. Esto es debido a que el movimiento de ambos ejes se obtiene de manera muy similar, mediante el desplazamiento de rodamientos axiales sobre varillas. Además, el movimiento en Z (eje vertical) se produce desplazando la placa calefactable hacia abajo. Sin embargo, un aspecto a tener en cuenta en esta máquina es que su superficie útil de trabajo es rectangular. Por lo tanto, si se aprecia alguna diferencia entre los ejes X e Y es posible que sea debida a que el eje X tiene una mayor longitud.

3.2. Material de fabricación empleado

Otro aspecto de gran relevancia para cualquier proceso de fabricación aditiva es el material empleado. En el caso de impresoras FDM, como es el caso de este proyecto, se empleará filamento de ácido poliláctico (PLA) en ambos casos. En un proyecto de estas características lo ideal sería tener exactamente el mismo filamento para las dos máquinas empleadas. Sin embargo, debido a las características de cada impresora, ha resultado imposible emplear el mismo filamento.

Para empezar, como se ha mencionado anteriormente, la impresora "Anet A8" sólo puede ser alimentada con filamento de 1,75 mm de diámetro, mientras que la "Ultimaker S5" solo puede emplear filamento de 2,85 mm de diámetro.

Además, no ha sido posible encontrar filamentos de diferente diámetro del mismo fabricante. La mayoría de fabricantes se centran en un único tamaño o tienen problemas de disponibilidad en caso de contar con diferentes tamaños. Por ello, se ha optado por emplear filamentos de diferente tamaño y de diferente fabricante.

Característica	Filamento Ultimaker S5	Filamento Anet A8
Fabricante	BASF	GEEETECH
Material	Ácido poliláctico	Ácido poliláctico
Peso neto	0,75 kg	1 kg
Color	Verde	Gris
Diámetro	2,85 mm	1,75 ± 0,02 mm
Temperatura de trabajo recomendada	180 – 220 °C	180 – 210 °C
Precio	29,95 €	25,99 €

Tabla 2 - Comparativa características principales de los filamentos empleados

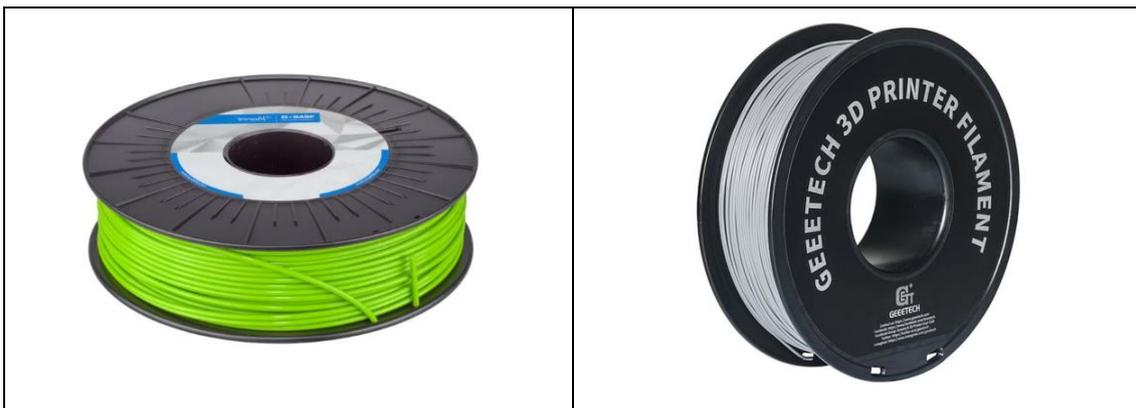


Ilustración 4 – Filamento BASF (izquierda) y filamento GEEETECH (derecha)

Por ello, conviene aclarar que la comparativa entre impresoras será cualitativa, pero en ningún momento se podrán extraer conclusiones exactas respecto a qué factor provoca las diferencias entre una máquina y la otra.

3.3. Máquina de medir por coordenadas "ZEISS WMM850"

El dispositivo empleado para medir las cotas principales de las piezas es la máquina de medir por coordenadas ZEISS WMM850. Sus características principales son las siguientes:

ZEISS WMM850	
Dimensiones generales	3000 x 2500 x 3000 mm
Rango en los ejes (X, Y, Z)	1200 mm, 700 mm, 600 mm
Altura de la mesa de medición	850 mm
Temperatura de operación	18 – 30 °C
MPE (aproximado)	0,8-1,2 + L/500 μm
Alimentación	230 V // 50 Hz
Otras características	Panel de control numérico con joystick

Tabla 3 - Características principales de la MMC "ZEISS WMM850"

Además, los últimos ensayos de verificación general con patrones de esferas proporcionaron valores de errores de medición de unos 1,5 μm.

En este equipo se pueden emplear gran cantidad de palpadores con diferentes configuraciones en cuanto a su orientación, posición y tamaño. Para este proyecto se emplearán exclusivamente dos palpadores verticales cuyos vástagos se encuentran orientados en dirección paralela al eje Z.

3.3. Microscopio óptico de enfoque variable "Alicona InfiniteFocus SL"

Este equipo compensa la limitación común en los microscopios ópticos (enfoque a una distancia fija) desplazando con un motor la lente de enfoque. De esta manera, para una sección a analizar determinada, el microscopio realiza gran cantidad de enfoques a múltiples distancias dentro de un rango definido (eje Z). Además, este microscopio contiene motores en los ejes horizontales (X e Y). De este modo, se pueden capturar imágenes en una región mucho más amplia de la pieza, desplazando la misma en las direcciones necesarias.

Posteriormente, el algoritmo del software propio de este dispositivo selecciona a qué distancia se ha enfocado mejor cada región de la muestra, permitiendo realizar una reconstrucción tridimensional de la superficie visualizada.

Alicona InfiniteFocus SL	
Aumento de la lente empleada	10x
Distancia de trabajo	17,5 mm
Resolución vertical	100 nm
Máxima superficie medible	2500 mm ²
Rugosidad mínima medible	0,3 μm

Tabla 4 - Características principales del microscopio "Alicona InfiniteFocus SL"

4. Metodología

4.1. Definición una pieza patrón

En este subapartado se va a especificar la pieza patrón o estándar a emplear en el proyecto, cuya geometría facilite su medición e inspección.

Después de contrastar con numerosos artículos científicos en los que se han realizado estudios similares (aunque habitualmente aportan un enfoque más centrado en las propiedades mecánicas del material), se ha definido la siguiente probeta:

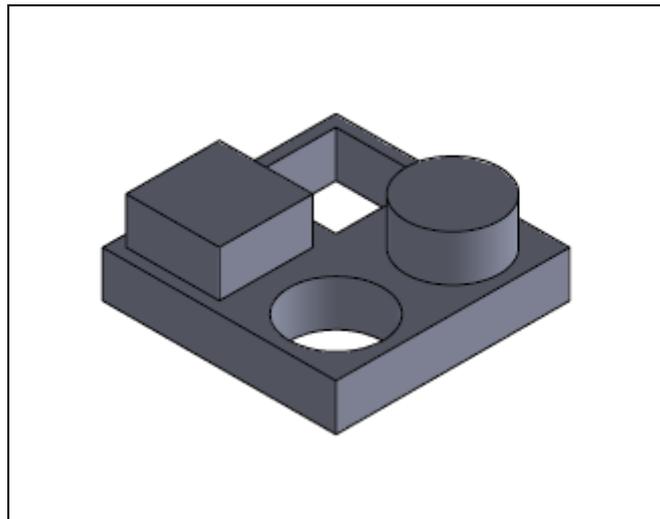


Ilustración 5 – Modelado 3D de la probeta principal

Dimensiones máximas	25 x 25 x 10 mm
Diámetro del agujero cilíndrico	10 mm
Diámetro del saliente cilíndrico	10 mm
Lado del agujero cuadrado	10 mm
Lado del saliente cuadrado	10 mm
Altura de los agujeros	5 mm
Altura de los salientes	5 mm

Tabla 5 – Dimensiones principales de la probeta definida

En un estudio más extenso sería ideal definir numerosas piezas para poder apreciar diferentes efectos más concretos. Sin embargo, se ha seleccionado esta por las ventajas que proporciona, pese a contar con desventajas al mismo tiempo.

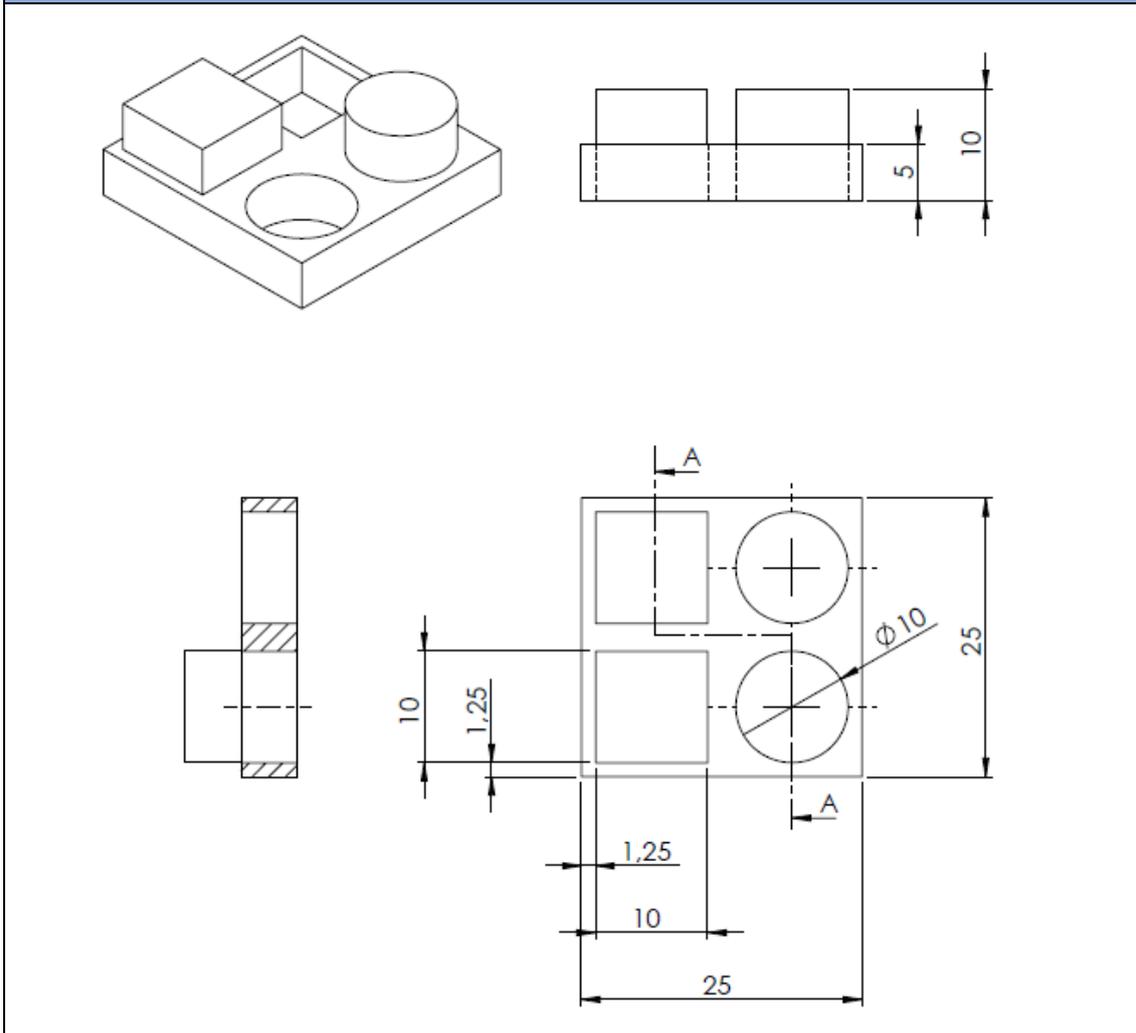
Ventajas:

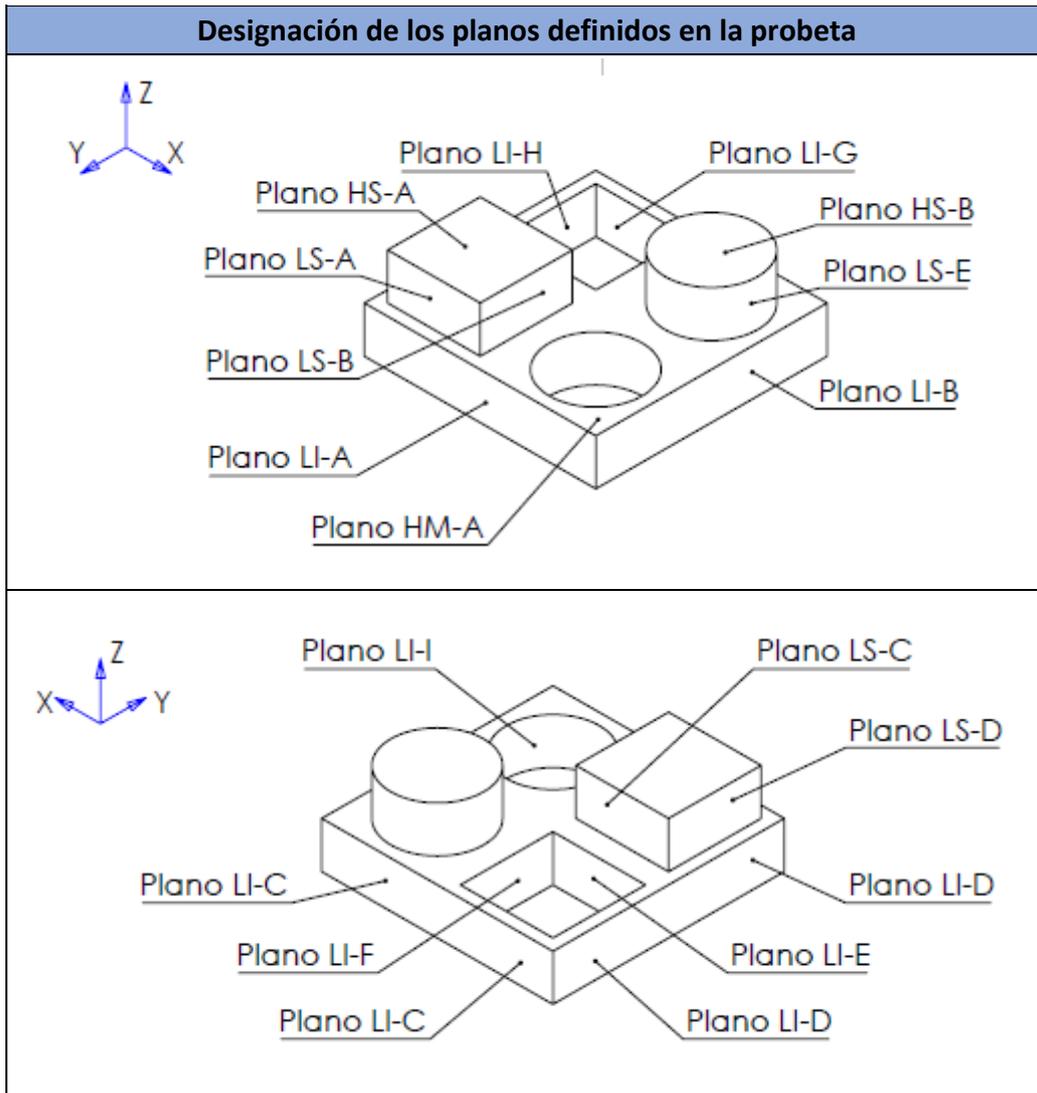
- Proporciona medidas sobre agujeros y salientes cilíndricos y cuadrados
- Tiempo medio de fabricación relativamente bajo (\approx 34 minutos/pieza de media)

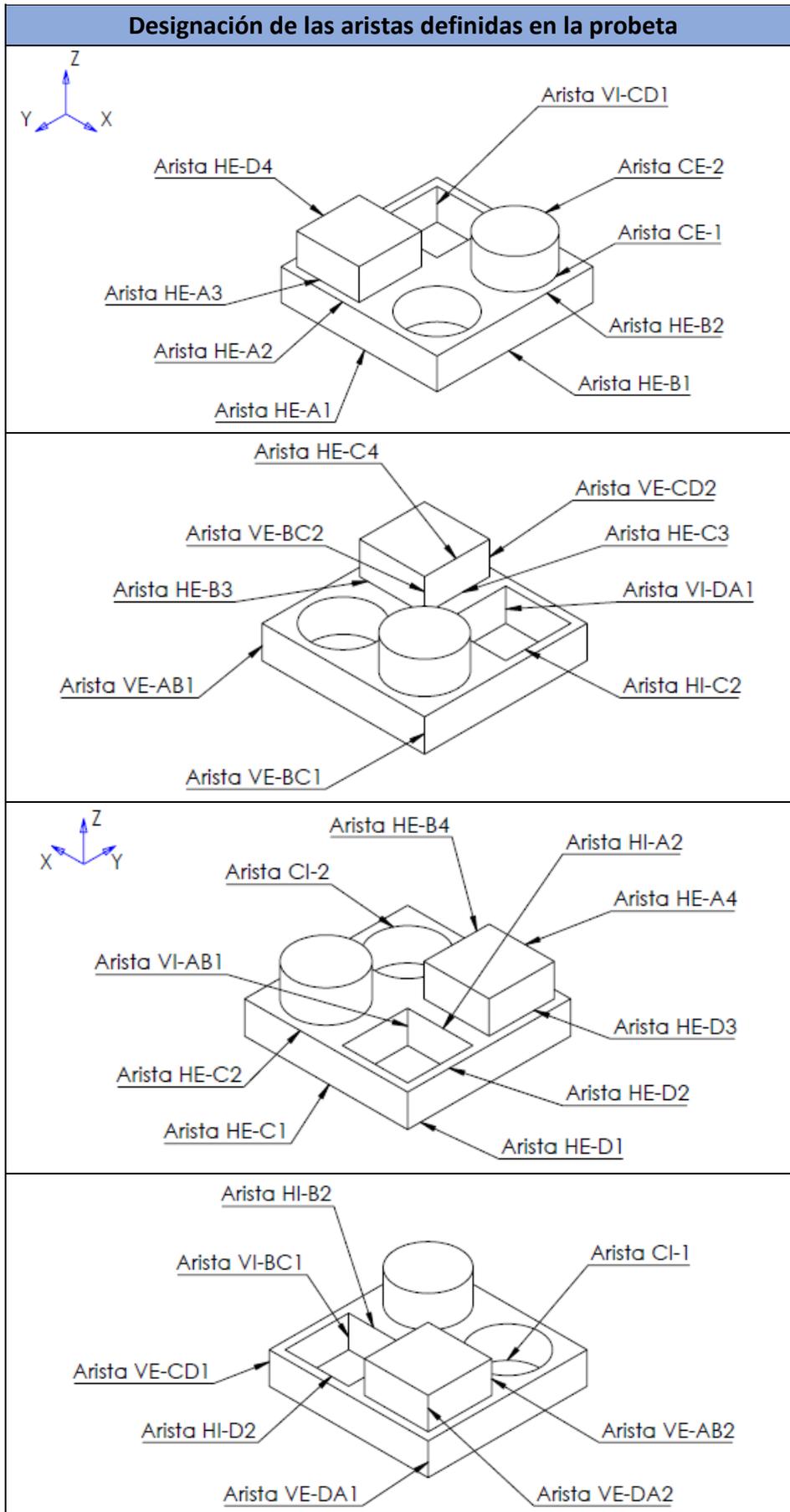
Desventajas:

- Geometría más baja (impide ver variaciones en altura)
- Solo permite ver salientes y agujeros alineados con el eje Z

Plano de la probeta







4.2. Parámetros de impresión seleccionados

Como se ha indicado en apartados anteriores, los parámetros seleccionados son la temperatura del extrusor, la velocidad de desplazamiento y el espesor de capa. Sin embargo, no se ha detallado qué valores se van a emplear para cada uno de sus 3 niveles, y van a ser los siguientes:

- Temperatura del extrusor: 185°C, 195°C y 205°C. La temperatura de impresión del PLA se suele encontrar entre 180°C y 230°C. Por lo tanto, se han seleccionado 3 valores situados en la zona baja del rango para centrar el estudio en opciones de bajo consumo energético.
- Velocidad de desplazamiento: 10 mm/s, 20 mm/s y 30 mm/s. En este caso, se han seleccionado 3 velocidades relativamente bajas, pero dentro de las recomendadas para este material con la Anet A8. En cuanto a las velocidades, la Ultimaker S5 podría ir más rápido, pero la Anet A8 es la máquina que limita técnicamente esta selección.
- Espesor de capa: 0,1 mm, 0,2 mm y 0,3 mm. Son valores dentro del rango más común y recomendado para el PLA (0,1 - 0,3 mm), que es emplear valores inferiores a al valor del diámetro de boquilla del extrusor (0,4 mm).

Como se ha mencionado anteriormente, se van a realizar todas las combinaciones posibles de estos parámetros mediante un diseño de experimentos factorial:

Combinaciones de los parámetros en el análisis principal							
T ^a ≡ Temperatura del extrusor				V ≡ Velocidad de desplazamiento			
e ≡ Espesor de capa							
Probeta	T ^a [°C]	V [mm/s]	e [mm/capa]	Probeta	T ^a [°C]	V [mm/s]	e [mm/capa]
1	185	10	0,1	15	195	20	0,3
2	185	10	0,2	16	195	30	0,1
3	185	10	0,3	17	195	30	0,2
4	185	20	0,1	18	195	30	0,3
5	185	20	0,2	19	205	10	0,1
6	185	20	0,3	20	205	10	0,2
7	185	30	0,1	21	205	10	0,3
8	185	30	0,2	22	205	20	0,1
9	185	30	0,3	23	205	20	0,2
10	195	10	0,1	24	205	20	0,3
11	195	10	0,2	25	205	30	0,1
12	195	10	0,3	26	205	30	0,2
13	195	20	0,1	27	205	30	0,3
14	195	20	0,2				

Tabla 6 – Resumen de combinaciones de parámetros con un diseño de experimentos factorial

Sin embargo, cuando se obtengan los resultados de cada probeta, será posible diferenciar entre las cotas y/o posiciones de los elementos en los ejes X, Y y Z. Con las consideraciones descritas anteriormente en las que se ha justificado la influencia de las características constructivas de cada máquina en la precisión en cada eje, sería un error no considerar los resultados obtenidos en función de los mismos.

Por lo tanto, dentro del diseño factorial general descrito, se añadiría 1 parámetro más de 3 niveles discretos: el eje en el que está posicionada cada cota (X, Y o Z). De este modo, se obtendrá un diseño de experimentos factorial de 4 parámetros de 3 niveles.

4.3. Generación de los archivos en código G y fabricación de las piezas

Una vez definida la geometría correctamente, se ha diseñado en el software CAD 3D “SolidWorks” debido a su disponibilidad para estudiantes, pero la simplicidad en su geometría no habría impedido su diseño en cualquier otro software similar. Posteriormente, se ha exportado su modelado a un archivo “.stl”.

Una vez obtenido el archivo con esta extensión, se ha empleado el software “Ultimaker Cura” para obtener los archivos “.gcode” o “.ufp” con el código G interpretable por la máquina. La extensión “.gcode” (más genérica) se empleará con las probetas para la Anet A8 y la extensión “.ufp” (optimizada para productos de la marca Ultimaker), con las piezas para la Ultimaker S5.

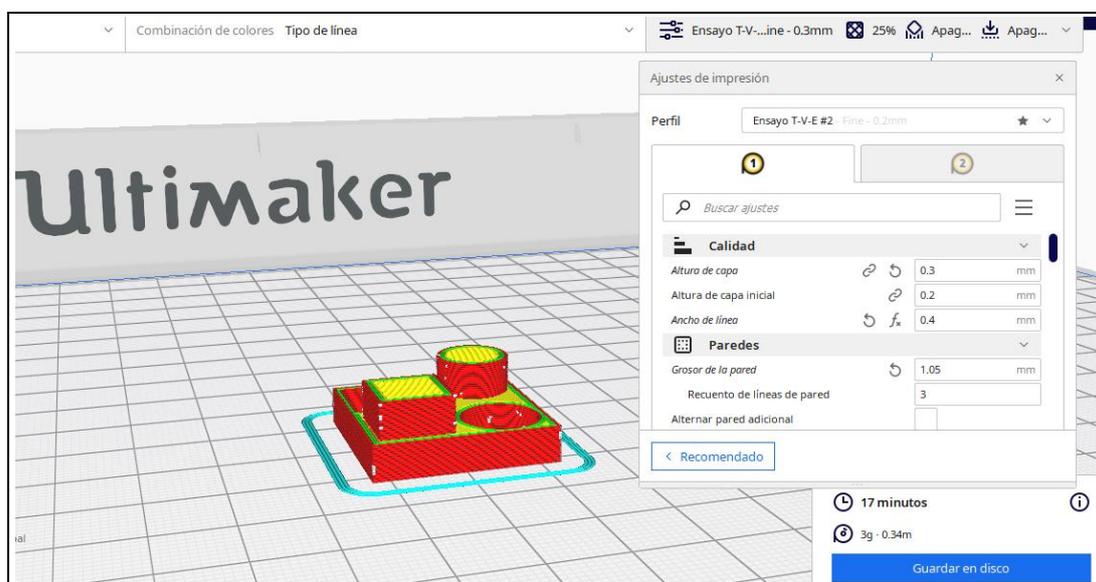


Ilustración 6 – Ejemplo de preparación del archivo en “G code” de una probeta

En el software “Ultimaker Cura” podremos configurar gran cantidad de parámetros de impresión, permitiendo obtener fácilmente las trayectorias y características de funcionamiento de cada máquina para todas las condiciones especificadas anteriormente.

Una vez generados los archivos para todas las combinaciones posibles, se copian en una unidad de almacenamiento extraíble (USB o tarjeta SD, según puerto de impresora) y se trasladan a cada máquina para la fabricación de las piezas.

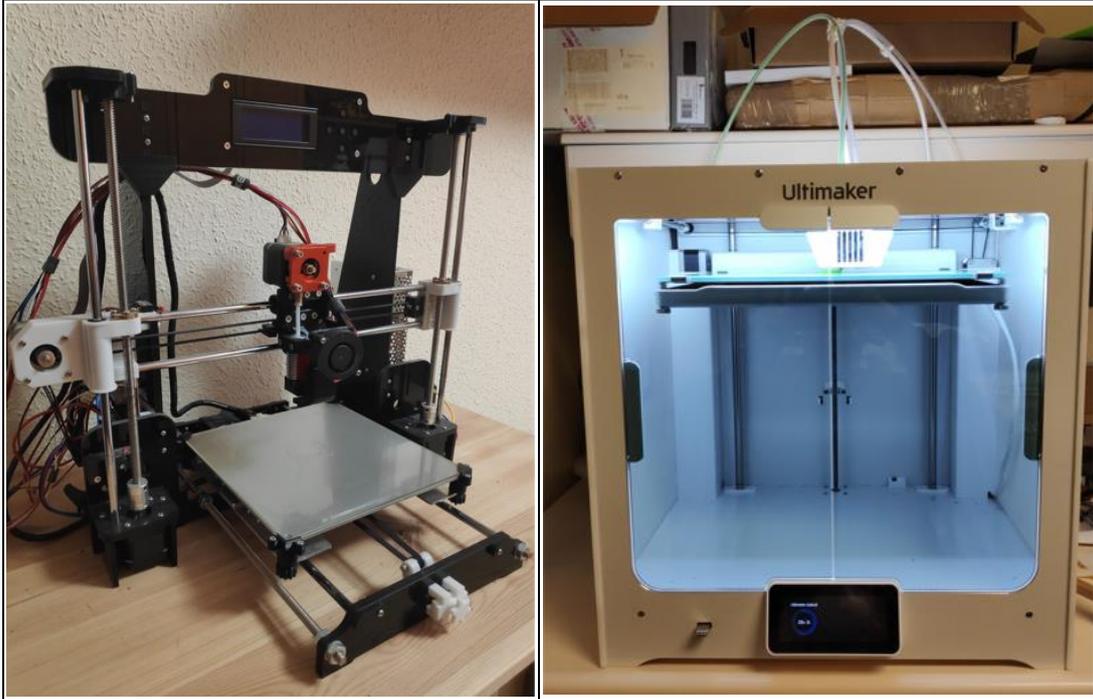


Ilustración 7 – Anet A8 modificada (izquierda) y Ultimaker S5 (derecha)

Es conveniente destacar que la calidad de la Ultimaker S5 se ha notado en gran medida durante la fabricación de todas estas piezas, facilitando la calibración de la máquina y sin generar ni un solo problema de adhesión con la plataforma de impresión. Estos problemas sí que han aparecido de forma puntual en la Anet A8.

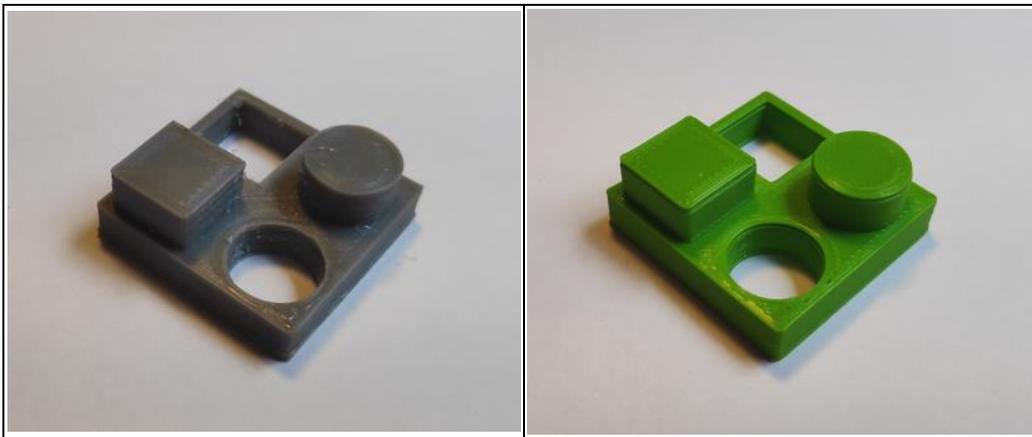


Ilustración 8 – Pieza obtenida en Anet A8 modificada (izquierda) y en Ultimaker S5 (derecha)

4.4. Mediciones en la máquina de medir por coordenadas

Como se ha mencionado en apartados anteriores, las mediciones de todas las piezas se van a realizar en la máquina de medir por coordenadas “ZEISS WMM850” empleando palpadores verticales.



Ilustración 9 – Palpador de calibración (izquierda) y palpador para las mediciones (derecha)

El primer palpador vertical será el de calibración, con una esfera en su punta de 8 mm de diámetro. Este palpador se emplea para calibrar la máquina mediante una esfera patrón posicionada en un lateral de la zona de trabajo.

Una vez calibrada la máquina y establecida la posición del sistema de referencia global de la misma, se extrae este primer palpador y se coloca el palpador que se va a emplear para las mediciones. Este palpador tendrá una geometría muy similar, pero con una esfera en su punta de 1,5 mm de diámetro.

Después de repetir el proceso de calibración con la esfera patrón en este segundo palpador, la MMC estará lista para realizar las mediciones.

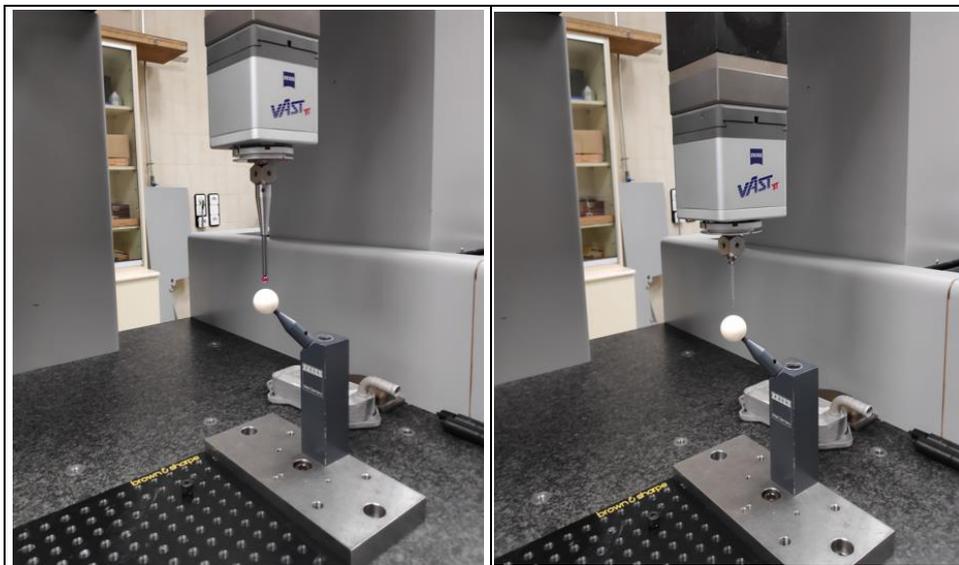


Ilustración 10 – Calibración con el palpador de calibración (izquierda) y con el palpador para las mediciones (derecha)

Una vez calibrada la máquina con el palpador de medición preparado, se procede a realizar las mediciones. Para ello, se van a realizar las mediciones de forma manual manipulando los controles de la máquina solamente una vez, registrando y guardando todos los puntos palpados. Estos puntos palpados dan lugar a planos, cuya posición coincidirá con las caras principales de la pieza.



Ilustración 11 – Mando de controles de la MMC

Además, para sujetar las piezas correctamente en el momento de realizar las mediciones, se ha diseñado un utillaje básico que posteriormente se ha fabricado con la Anet A8.

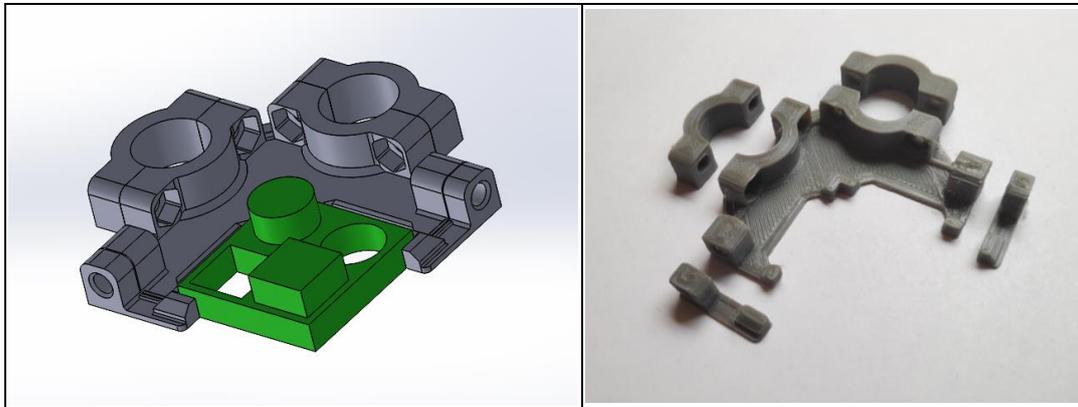


Ilustración 12 – Modelado 3D del utillaje con una pieza (izquierda) y piezas del utillaje fabricado (derecha)

Este utillaje aprovecha los posicionadores cilíndricos de la MMC y se ha empleado el mismo en absolutamente todas las mediciones. Se ha añadido un poco de plastilina para asegurar la sujeción.

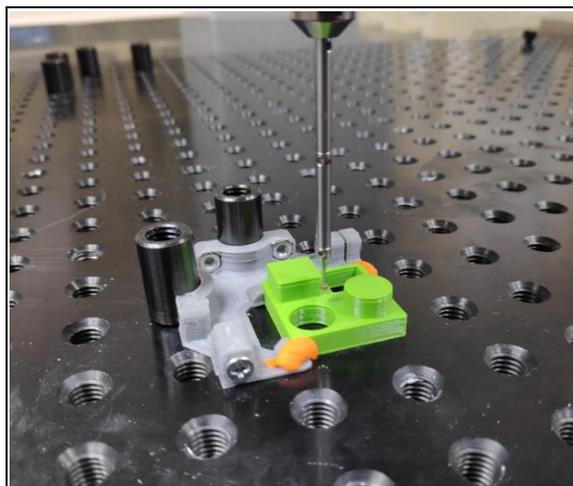


Ilustración 13 – Pieza posicionada con su sujeción en la MMC

Es importante aclarar que todas las mediciones se han realizado sobre un sistema de referencia local definido en cada pieza. De este modo, todas las cotas son relativas a la propia pieza, facilitando la comparación entre ellas y el tratamiento de estos datos.

4.5. Mediciones en el microscopio óptico

Como se ha indicado en apartados anteriores, se va a realizar la inspección de algunas de las piezas fabricadas con el microscopio “Alicona InfiniteFocus SL”. En este caso, no se han analizado todas las piezas debido a los largos tiempos de procesado de este dispositivo y la disponibilidad del mismo en el laboratorio. Por ello, se han analizado las siguientes piezas:

Código probeta	Temperatura del extrusor [°C]	Velocidad de desplazamiento [mm/s]	Espesor de capa [mm]
5	185	20	0,2
11	195	10	0,2
13	195	20	0,1
15	195	20	0,3
17	195	30	0,2
23	205	20	0,2

Tabla 7 – Probetas analizadas con el microscopio “Alicona InfiniteFocus SL”

Con esta selección de probetas, siempre se está analizando el valor máximo o el mínimo de uno de los parámetros mientras el resto se mantienen en sus valores intermedios. De este modo, se puede analizar la influencia de variar cada parámetro por separado, permitiendo comparar piezas con el resto de parámetros en las mismas condiciones.

Por otro lado, para realizar las mediciones en el microscopio óptico se han empleado bloques de aluminio para apoyar y orientar la pieza y poder observar la superficie deseada en cada momento.

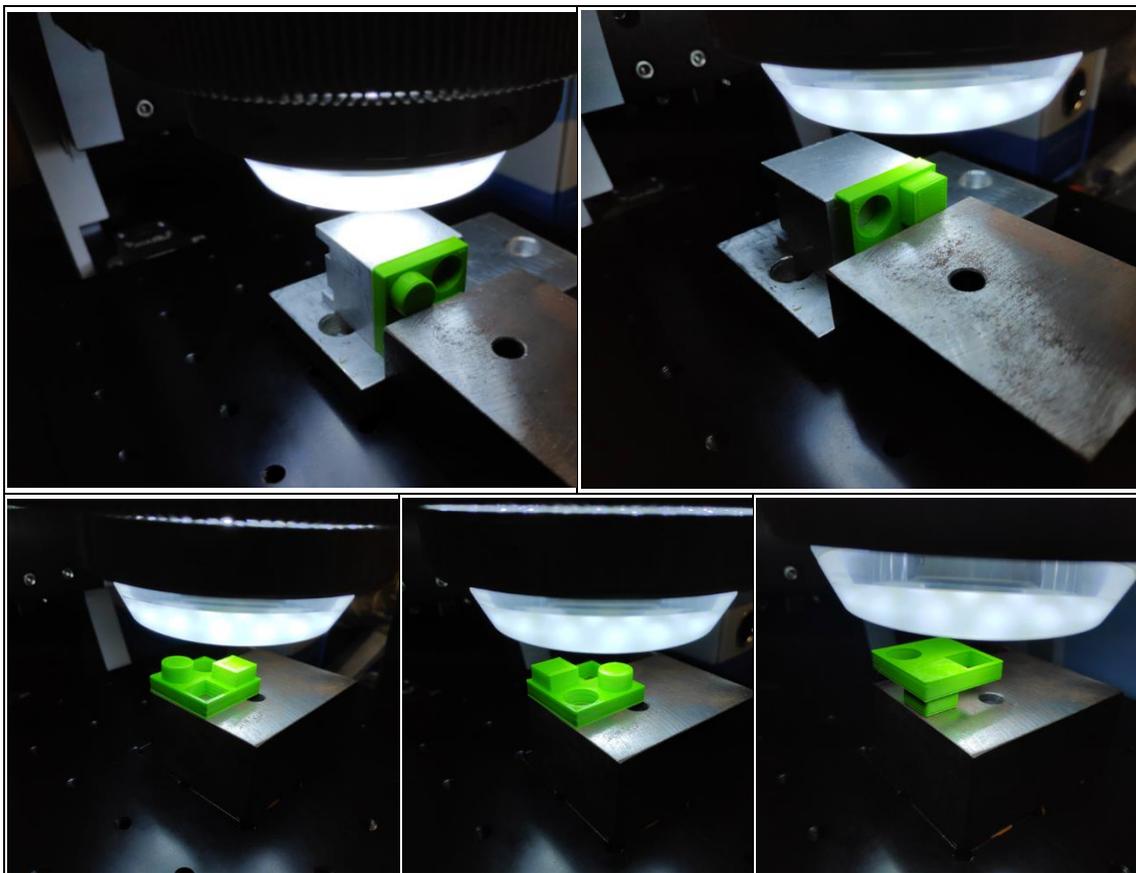


Ilustración 14 – Posiciones de las probetas en el microscopio

5. Resultados finales de las mediciones en MMC

En este apartado se van a presentar y analizar los resultados obtenidos en las mediciones realizadas de todas las probetas con la máquina de medir por coordenadas descrita anteriormente (ZEISS WMM 850). Estas mediciones se clasificarán en diferentes tipos y, dentro de cada una de ellas, se mostrarán de forma gráfica los resultados obtenidos para las dos máquinas FDM empleadas (Anet A8 y Ultimaker S5). Clasificaremos las mediciones de la siguiente manera:

- Cotas directas: Corresponderán a todos los planos medidos directamente, es decir, determinados mediante el palpado de su superficie. De este modo, se podrá determinar la posición media del plano de cada superficie por un ajuste de mínimos cuadrados que realiza automáticamente el software específico de medición.

- Cotas indirectas: A partir de las posiciones de los planos medidos directamente (cotas directas), se han definido sus intersecciones en el software de medición. De este modo, el corte entre dos planos queda definido como una línea. Consideraremos estas líneas como una aproximación de las aristas de cada pieza.

Además, si se define la intersección de estas líneas con otros planos, se obtendrán los puntos. Se considerarán las coordenadas de estos puntos como una aproximación de la posición de los vértices correspondientes de la pieza.

Es necesario tener en cuenta que estas cotas se obtienen a partir de las mediciones de las cotas directas, es decir, se obtienen mediante un tratamiento matemático que realiza el software. Por ello, estos resultados no se pueden considerar como la posición real de estos elementos, sino como una aproximación. El error cometido en la aproximación por mínimos cuadrados obtenidos en las cotas directas se transmitirá a los resultados de estos elementos.

- Media de cotas directas e indirectas: Se realizará el promedio de los resultados obtenidos para las cotas directas e indirectas en cada una de las piezas. Este promedio dará lugar a una aproximación de la precisión obtenida en las posiciones de los elementos principales de la pieza. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, al incluir los resultados obtenidos en las mediciones indirectas, hay que tener en cuenta que son una aproximación. No obstante, esta estimación puede dar lugar a resultados representativos adecuados.

- Distancias relativas: A partir de las posiciones de los planos obtenidos por medición directa, se puede determinar la distancia media entre dos de ellos. De este modo, se ha definido la distancia entre la mayoría de los planos obtenidos. Una vez obtenido el vector que corresponde a la distancia media entre los mismos, se seleccionará la componente correspondiente a la cota nominal en la pieza. Por ello, todas las distancias determinadas corresponden a las direcciones principales en el sistema de referencia definido.

- Elementos geométricos: A modo de ampliación, el software de medición permite determinar diferentes aspectos en las superficies medidas. Los aspectos que se han definido son: planitud, paralelismo, perpendicularidad y cilindridad. En este caso, pese a existir otros elementos geométricos, se han determinado estos parámetros exclusivamente para las superficies obtenidas por medición directa.

Dentro de cada tipo de medición, se determinarán diversos factores:

- Media del valor de la desviación respecto a las cotas nominales: Se ha calculado la desviación media obtenida para cada uno de los elementos analizados de cada tipo de medición, diferenciando los resultados obtenidos en cada eje.
- Media del valor absoluto de la desviación respecto a las cotas nominales: Se ha realizado el mismo cálculo que en el factor anterior, con la principal diferencia de que previamente se ha determinado el valor absoluto de cada una de las desviaciones y, posteriormente, se ha calculado su media. De este modo, se eliminan los valores próximos a 0 por la compensación entre desviaciones positivas y negativas.
- Desviación media de los puntos palpados respecto al valor de las cotas: Este parámetro cuantifica la dispersión de los puntos palpados necesarios para determinar cada uno de los planos. Por ello, esta desviación solo tendrá sentido visualizarla con los resultados de las cotas directas, puesto que son un resultado directo de estas mediciones.

Y, recordando lo ya mencionado, cada uno de estos 3 factores se expondrá para cada una de las impresoras 3D empleadas.

Antes de mostrar los resultados, conviene recordar la combinación de los parámetros temperatura del extrusor, velocidad de desplazamiento y espesor de capa empleada en cada una de las piezas:

Probeta	Tª [°C]	V [mm/s]	e [mm/capa]	Probeta	Tª [°C]	V [mm/s]	e [mm/capa]
1	185	10	0,1	15	195	20	0,3
2	185	10	0,2	16	195	30	0,1
3	185	10	0,3	17	195	30	0,2
4	185	20	0,1	18	195	30	0,3
5	185	20	0,2	19	205	10	0,1
6	185	20	0,3	20	205	10	0,2
7	185	30	0,1	21	205	10	0,3
8	185	30	0,2	22	205	20	0,1
9	185	30	0,3	23	205	20	0,2
10	195	10	0,1	24	205	20	0,3
11	195	10	0,2	25	205	30	0,1
12	195	10	0,3	26	205	30	0,2
13	195	20	0,1	27	205	30	0,3
14	195	20	0,2				

Tabla 8 – Resumen de combinaciones de parámetros con un diseño de experimentos factorial

5.1 Resultados de las mediciones – Ensayo de repetibilidad

Antes de mostrar los resultados obtenidos y analizar sus variaciones como consecuencia del procedimiento de cambio de parámetros de impresión, será esencial en este proyecto determinar la variabilidad en la impresión de las piezas sin cambiar ningún parámetro.

Es decir, para poder determinar si un cambio en una medición al variar algún parámetro de impresión es concluyente, será necesario registrar la variabilidad en las cotas medidas de una pieza por el simple hecho de ser fabricada en las máquinas FDM empleadas. De este modo, se definirá un intervalo de confianza en el que se encontrarán todas las medidas realizadas con exactamente los mismos parámetros de impresión. Todas las variaciones que posteriormente superen ese intervalo de confianza se considerarán representativas, mientras que, si estas variaciones proporcionan valores que están dentro de este intervalo, no se podrán considerar influyentes.

En resumen, si la variación en las mediciones debida a un cambio en uno de los parámetros de impresión no genera un cambio superior a la propia variabilidad de la pieza, no se podrá considerar representativo.

De este modo, el análisis de repetibilidad se ha realizado con 10 repeticiones de la misma probeta y en cada una de las dos impresoras. Los parámetros de impresión elegidos para este análisis de variabilidad serán los valores intermedios, con el objetivo de obtener un valor medio que pueda representar a toda la población de la muestra:

Parámetro	Valor
Temperatura del extrusor	195°C
Velocidad de desplazamiento	20 mm/s
Espesor de capa	0,2 mm
Refrigeración ventilador de capa	50%
Relleno en todas las piezas	50%
Ubicación de la pieza sobre la placa	Centro

Tabla 9 - Parámetros principales de impresión en el ensayo de repetibilidad

Esta combinación de parámetros coincide con el código 14 de pieza, justamente el número situado en la parte central de cada serie de 27 piezas.

Por lo tanto, se ha realizado la medición completa de 10 piezas hechas en la Anet A8 y otras 10 piezas fabricadas en la Ultimaker S5, todas con los mismos parámetros de impresión. Posteriormente, se ha definido la desviación respecto a la cota nominal (en su correspondiente eje). Por ejemplo, en caso de ser un “Plano A” cuya posición nominal esté en el eje X:

$$Desviación_{Plano A} = X_{Plano A \text{ medido}} - X_{Cota nominal Plano A}$$

Obtenidas las desviaciones en las posiciones de los elementos principales de cada pieza, se ha determinado su media y su desviación estándar por ejes, para posteriormente determinar el intervalo de confianza de cada cota. Conviene aclarar que estos cálculos se han realizado exclusivamente con los elementos que hemos identificado anteriormente como “cotas directas”.

Dentro de cada pieza y según los ejes en los que están definidas sus posiciones, estos son los elementos que se han medido como cotas directas:

Eje X	Eje Y	Eje Z
Plano_LI_A	Plano_LI_B	Plano_HM_A
Plano_LI_C	Plano_LI_D	Plano_HI_A
Plano_LS_A	Plano_LS_B	Plano_HS_A
Plano_LS_C	Plano_LS_D	Plano_HS_B
Plano_LI_G	Plano_LI_H	
Plano_LI_E	Plano_LI_F	
Cilindro_LS_E	Cilindro_LS_E	
Cilindro_LI_I	Cilindro_LI_I	

Tabla 10 – Elementos medidos como “cotas directas”

Por lo tanto, si determinamos el intervalo de confianza en cada eje, tendremos la siguiente población de medidas:

- Eje X → 8 elementos en 10 piezas, dando lugar a 80 medidas.
- Eje Y → 8 elementos en 10 piezas, dando lugar a 80 medidas.
- Eje Z → 4 elementos en 10 piezas, dando lugar a 40 medidas.

De este modo, se determinan la media, la desviación estándar y el intervalo de confianza al 95% en las mediciones de cada eje:

Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza (95%)
$\bar{x} = \frac{\sum_i^N x_i}{N}$	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$	$I. C. (95\%) = \bar{x} \mp Z_{0,05/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$

Tabla 11 – Definición matemática de media, desviación estándar e intervalo de confianza (95%)

Dando lugar a los siguientes resultados en cada impresora:

Ensayo de repetibilidad – Anet A8			
Parámetro determinado	Desviaciones eje X [mm]	Desviaciones eje Y [mm]	Desviaciones eje Z [mm]
Media	-0,01917	0,12590	-0,12777
Desv. estándar	0,12057	0,10967	0,09859
Int. Confianza 95%	$\bar{x} \pm 0,02642$	$\bar{x} \pm 0,02403$	$\bar{x} \pm 0,03055$
Rango (95%)	0,05284	0,04806	0,06110

Tabla 12 – Resultados ensayo repetibilidad Anet A8

Ensayo de repetibilidad – Ultimaker S5			
Parámetro determinado	Desviaciones eje X [mm]	Desviaciones eje Y [mm]	Desviaciones eje Z [mm]
Media	0,01476	0,06892	-0,04266
Desv. estándar	0,09939	0,10074	0,05997
Int. Confianza 95%	$\bar{x} \pm 0,02178$	$\bar{x} \pm 0,02207$	$\bar{x} \pm 0,01858$
Rango (95%)	0,04356	0,04415	0,03717

Tabla 13 – Resultados ensayo repetibilidad Ultimaker S5

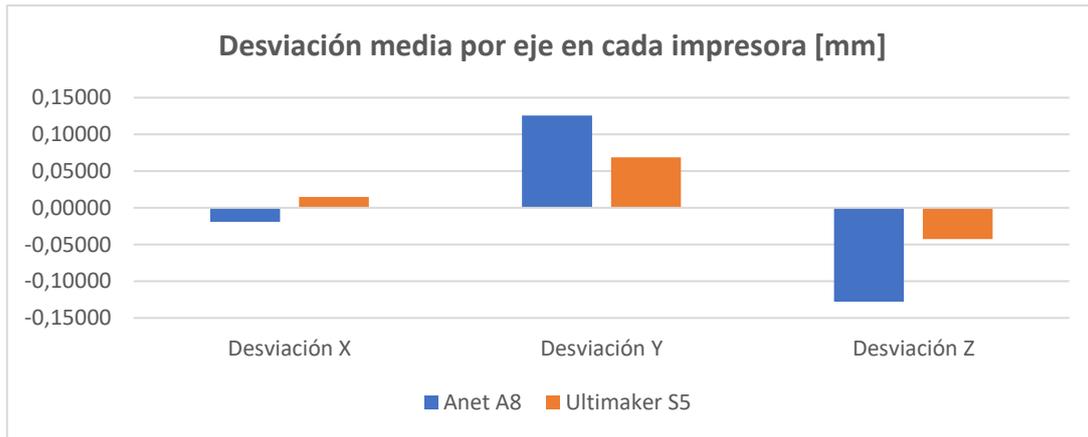


Ilustración 15 – Desviación media por eje en cada impresora

Se puede observar que el valor absoluto de las desviaciones siempre es mayor en la Anet A8. Además, en la Anet A8 las mayores desviaciones se obtienen en los ejes Y y Z, con valores absolutos muy similares. En la Ultimaker S5 la mayor desviación se obtiene en el eje Y.

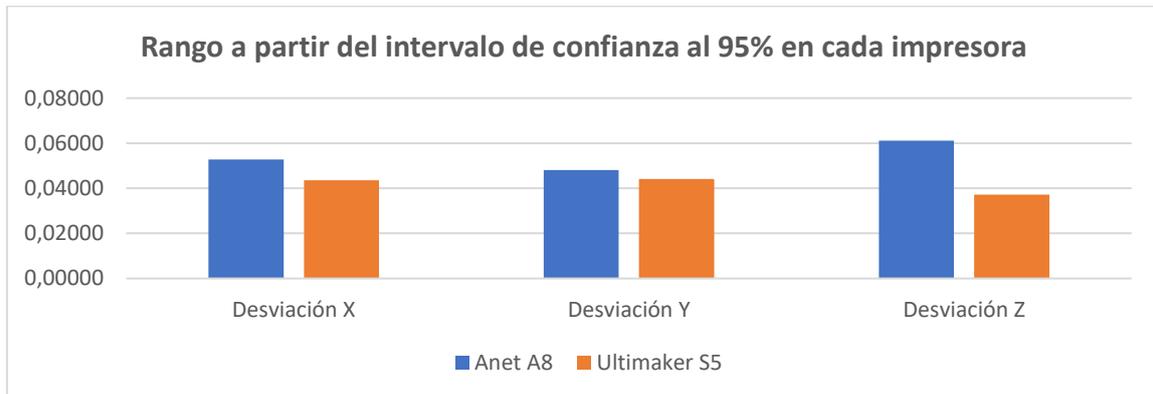


Ilustración 16 – Rango a partir del I.C. definido en cada impresora

Como se puede apreciar en la gráfica, el rango que consideraremos para juzgar si una variación es valorable o no respecto a la variabilidad en la fabricación de cada pieza será siempre superior en la máquina Anet A8 (sobre todo, en el eje Z).

Por lo tanto, para confirmar si la variación de un parámetro está influenciando suficientemente los resultados, verificaremos si tiene un efecto sobre la medida final superior a los mencionados.

Impresora	Rango eje X [mm]	Rango eje Y [mm]	Rango eje Z [mm]
Anet A8	0,05284	0,04806	0,06110
Ultimaker S5	0,04356	0,04415	0,03717

Tabla 14 – Resumen rangos de variabilidad según eje e impresora

5.2 Resultados de las mediciones – Cotas directas

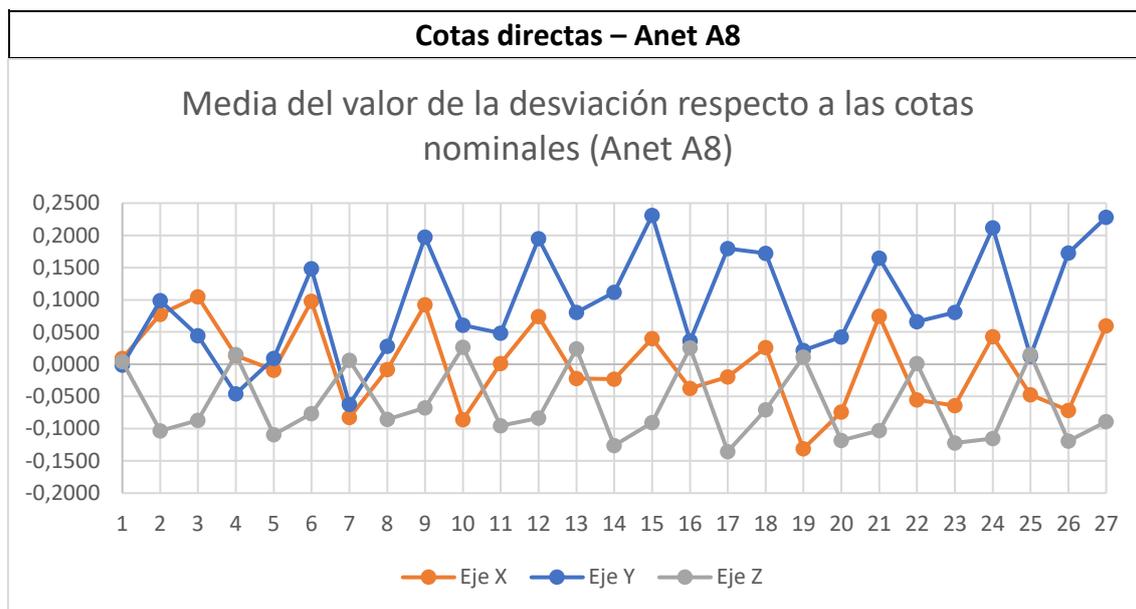


Ilustración 17 - Desviación de las cotas directas por ejes (Anet A8)

Como se puede observar en la representación gráfica, la desviación en los ejes X e Y tiene una forma y unas proporciones muy similares. Sin embargo, se comprueba que el valor obtenido en el eje Y siempre es superior.

El primer hecho a destacar es que se puede apreciar una cierta periodicidad en los resultados cada 3 mediciones. Este fenómeno coincide con lo esperado respecto a la variación del espesor en cada capa, es decir, este es el parámetro que varía continuamente en cada pieza (ejemplo: piezas 1, 2 y 3 con espesores de 0,1 mm, 0,2 mm y 0,3 mm; respectivamente). Por ello, en los ejes X e Y es coherente apreciar variaciones en grupos de 3 piezas, donde los valores mínimos se obtienen para las dos primeras (0,1 y 0,2 mm de espesor de capa) y los máximos, generalmente, en la tercera (0,3 mm de espesor de capa). En el eje Z se puede apreciar como el valor más cercano a 0 se obtiene con el espesor de capa más bajo (0,1 mm), mientras que el valor más alejado (negativo) se suele obtener con el valor intermedio del espesor (0,2 mm).

Respecto a la velocidad de desplazamiento del cabezal, esta varía cada 3 piezas (ejemplo: grupos de piezas 1-3, 4-6 y 7-9 con velocidades de 10 mm/s, 20 mm/s y 30 mm/s; respectivamente). Se puede apreciar su interacción con el espesor, viendo que en cada grupo de 3 piezas (cada una con diferente espesor de capa) va incrementando el rango de estas desviaciones conforme aumenta la velocidad de desplazamiento. Es decir, la diferencia entre la desviación mínima y máxima a 10 mm/s es menor que esta misma diferencia entre otro grupo de 3 piezas fabricadas a 30 mm/s.

Otro aspecto que puede llamar la atención es que en el eje X el valor medio de las desviaciones es menos variable, es decir, en todas las piezas analizadas los resultados se encuentran por encima y por debajo del valor 0 de desviación. Sin embargo, en los ejes Y y Z se aprecia una mayor influencia de la temperatura. En las probetas 1-9 (185°C), los resultados obtenidos se encuentran alrededor del 0. Por otro lado, conforme aumenta la temperatura en las probetas 10-18 (195°C) y 19-27 (205°C), se puede ver claramente que su media en el eje Y se sitúa en valores positivos.

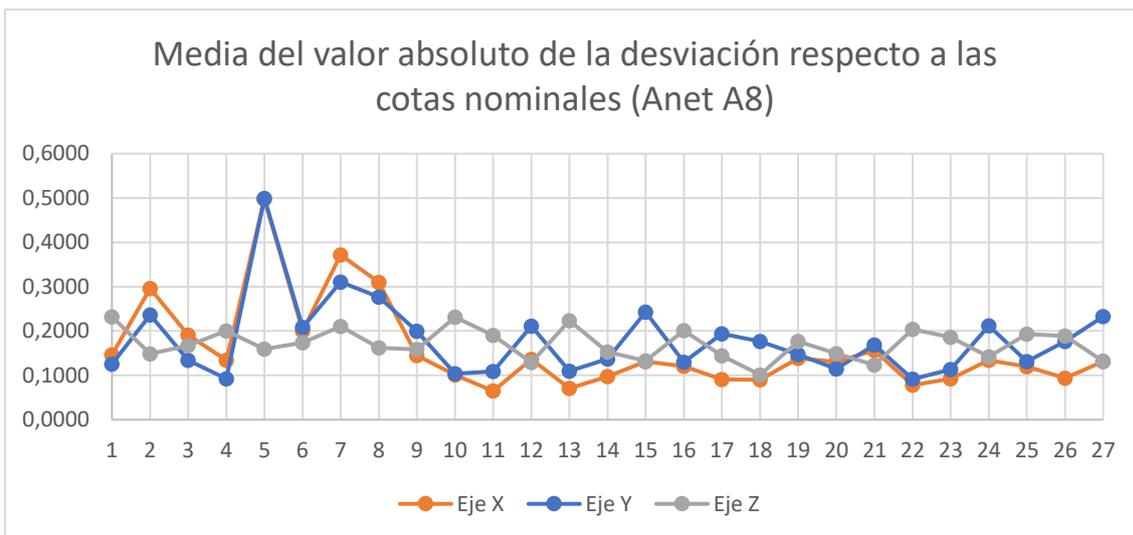


Ilustración 18 - Desviación de las cotas directas por ejes en valor absoluto (Anet A8)

En la gráfica anterior se pueden visualizar las mismas desviaciones, pero en valor absoluto. De este modo, podemos desprestigiar la influencia del sentido en el que se produce cada desviación en cada eje, centrándonos exclusivamente en su módulo.

Al obtener esta representación, se puede ver claramente la influencia negativa en los resultados obtenidos en los ejes X e Y al emplear la temperatura de fabricación más baja (185°C) y los valores intermedios de espesor (0,2 mm) y velocidad (20 mm/s). Este fenómeno se considera un hecho puntual, puesto que no se mantiene para el resto de temperaturas (piezas 10-18 y 19-27, con 195°C y 205°C, respectivamente), en las que no se aprecia una tendencia clara y repetitiva.

En el eje Z el único fenómeno que se puede apreciar es que para valores de temperatura más altos (195°C y 205°C), la desviación absoluta es inversamente proporcional con el espesor de capa. Sin embargo, con la temperatura más baja no se cumple esta proporción.

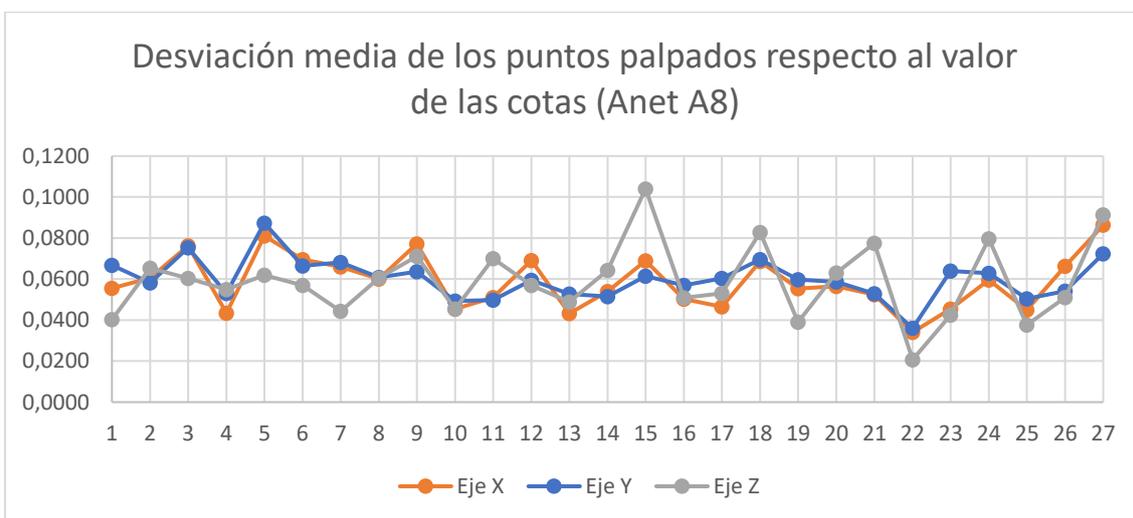


Ilustración 19 - Desviación media de los puntos palpados (Anet A8)

Finalmente, se visualiza la desviación o dispersión de los puntos palpados en las cotas directas.

En este caso, se puede apreciar la influencia de la temperatura en la dispersión de los puntos palpados en el eje Z, viendo que su rango va aumentando conforme aumenta la temperatura. En el resto de ejes, no se ve ninguna tendencia a simple vista.

Cotas directas – Ultimaker S5

Media del valor de la desviación respecto a las cotas nominales (Ultimaker S5)

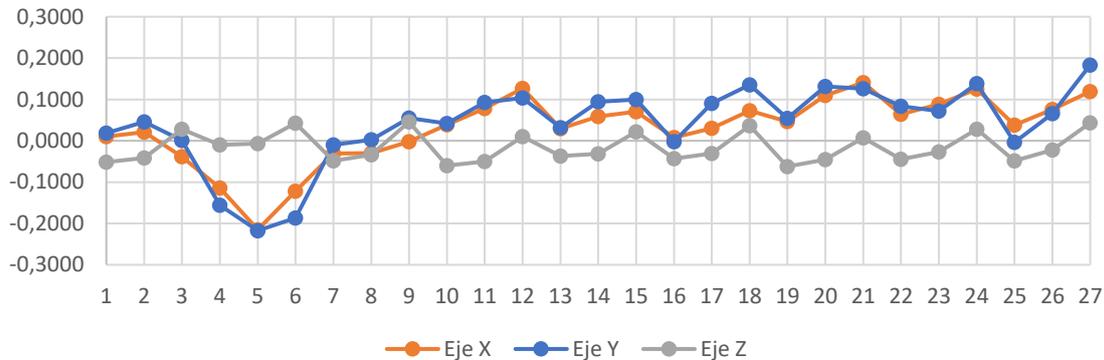


Ilustración 20 - Desviación de las cotas directas por ejes (Ultimaker S5)

Lo primero que se puede observar es que las diferencias entre los ejes X e Y son mucho más reducidas que en la otra impresora. En este caso, ambas líneas adoptan valores muy próximos en la mayoría de las probetas medidas. El eje Z, al tener un movimiento muy diferente respecto a los dos anteriores, adopta valores muy distintos y en diferente proporción.

Como se puede comprobar, en los ejes X e Y el valor máximo (negativo) en la desviación ocurre con la temperatura mínima (185°C) y los valores intermedios de velocidad (20 mm/s) y de espesor de capa (0,2 mm). Sin embargo, este es un hecho puntual que ocurre con una interacción concreta entre estos 3 parámetros. En cualquier caso, una conclusión que se puede extraer es la fuerte influencia en el signo de los valores con la temperatura, siendo la mayoría de ellos negativos para 185°C y, por el contrario, el resto suelen ser positivos para temperaturas de 195°C y 205°C.

Por otro lado, se puede comprobar como las desviaciones en el eje Z no parecen mostrar una dependencia con la temperatura. Sin embargo, se ve la dependencia que tienen estos resultados con el espesor de capa, obteniéndose siempre valores positivos con un espesor de 0,3 mm, mientras que en el resto de los casos son negativos. Además, se aprecia como los valores máximos en este eje siempre se obtienen con espesores de 0,3 mm y velocidades de 30 mm/s.

Media del valor absoluto de la desviación respecto a las cotas nominales (Ultimaker S5)

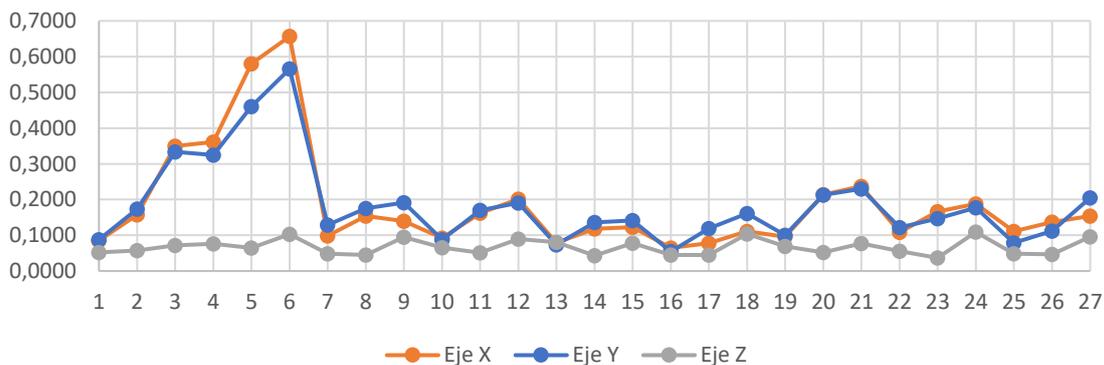


Ilustración 21 - Desviación absoluta de las cotas directas por ejes (Ultimaker S5)

Como se ha explicado anteriormente, en esta representación se desprecia el sentido de las desviaciones, centrando los resultados en su módulo.

En este caso, todavía se ve con más claridad el solapamiento en los resultados de los ejes X e Y, tal y como se ha indicado anteriormente. Además, destaca que, en la mayoría de ocasiones en estos ejes, las desviaciones más alejadas del 0 se obtienen con un espesor de capa de 0,3 mm. Por otro lado, a excepción de los resultados a 185°C, las desviaciones son mayores cuanto menor es la velocidad de desplazamiento.

En el eje Z las desviaciones son mucho menores para todas las combinaciones posibles de parámetros. Dentro de estos resultados, se aprecia levemente que, en general, las menores desviaciones aparecen con espesores de capa de 0,2 mm.

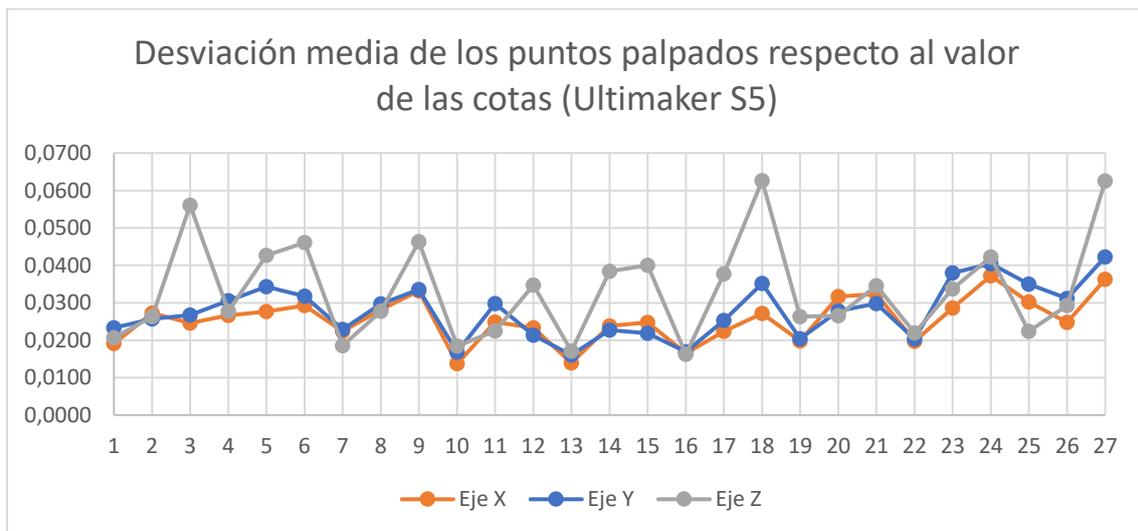


Ilustración 22 - Desviación media de los puntos palpados (Ultimaker S5)

Respecto a la desviación o dispersión de los puntos palpados, se mantienen las mismas similitudes entre los ejes X e Y. Al igual que ocurre en todos los casos anteriores, se aprecia la periodicidad cada 3 valores en todos los ejes, que coincide con la variación del espesor de capa.

En este caso, los 3 ejes siguen proporciones similares. Sin embargo, la influencia del espesor de capa en el eje Z es mucho más notoria, alcanzando valores mayores conforme aumenta este parámetro.

Los valores más bajos de dispersión de los puntos de palpado se obtienen con la temperatura intermedia (195°C), el espesor mínimo (0,1 mm) y una velocidad de desplazamiento media-baja (10-20 mm/s).

5.3 Resultados de las mediciones – Cotas indirectas

5.3.1 Cotas indirectas – Aristas

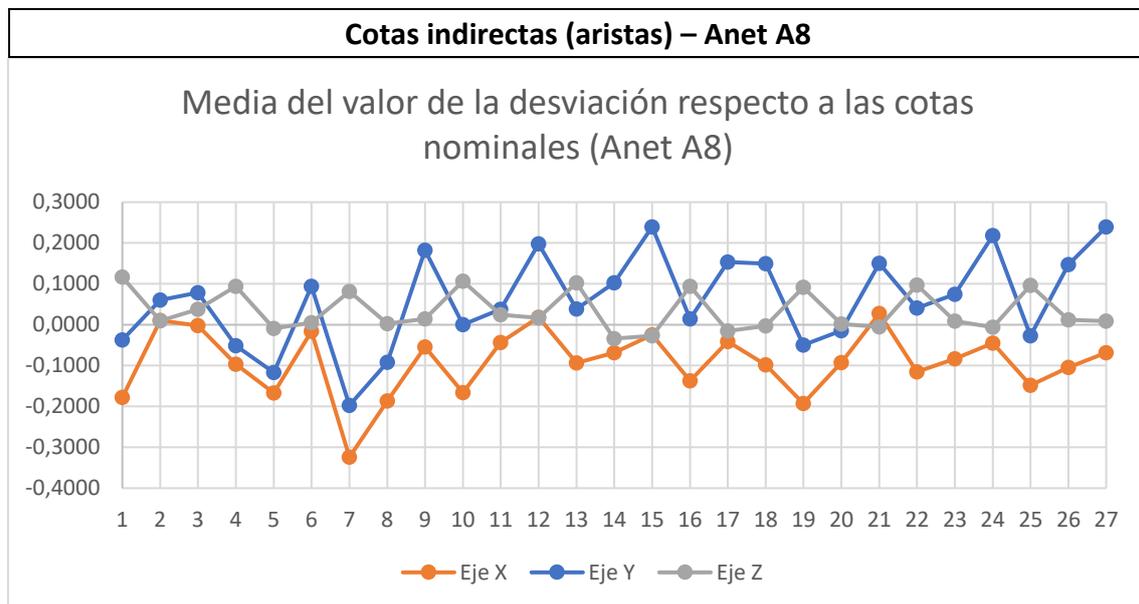


Ilustración 23 - Desviación de las cotas de las aristas por ejes (Anet A8)

Como se ha podido apreciar con las cotas directas, los ejes X e Y siguen formas y proporciones similares. Al igual que ocurría en esas medidas, las desviaciones en el eje Y siempre son superiores (teniendo en cuenta el signo del valor). También se aprecia que, con la temperatura inferior (185°C), las diferencias entre estos dos ejes son menores. Sin embargo, conforme aumenta la temperatura, sus valores se comienzan a separar, pero varían en proporciones similares. En el eje Z no se aprecia ninguna influencia de la temperatura.

En esta representación gráfica se sigue apreciando la periodicidad en los resultados debida a la variación en el espesor de capa en cada pieza.

En cuanto a la velocidad de desplazamiento del cabezal, se aprecia una leve influencia, pero en esta representación no es posible obtener unas conclusiones claras.

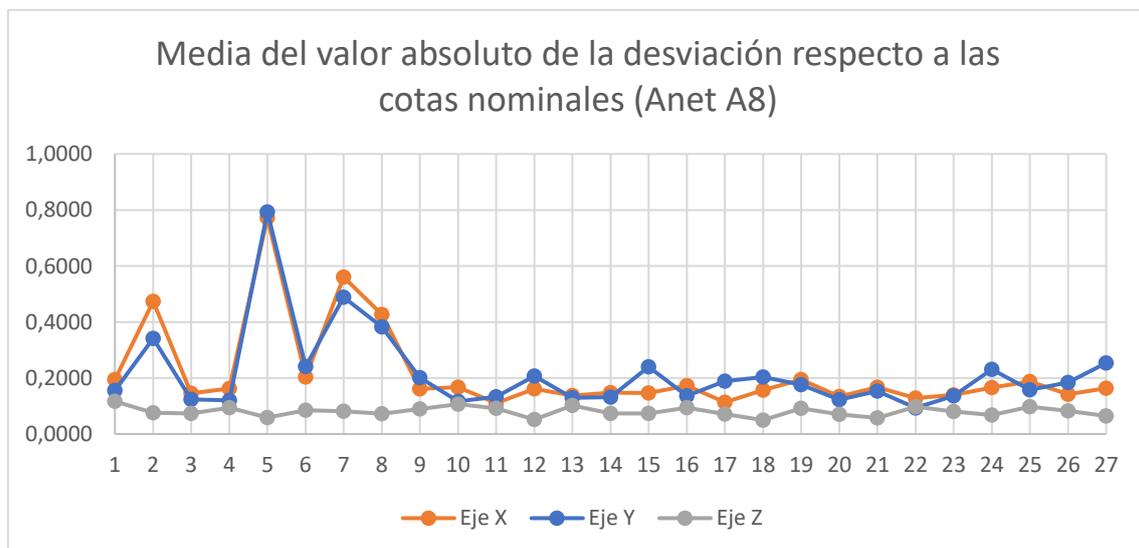


Ilustración 24 - Desviación absoluta de las cotas de las aristas por ejes (Anet A8)

Como en los casos anteriores, en esta representación se puede ver con más claridad la desviación respecto a la cota nominal, pero despreciando el sentido en el que ocurre.

Se puede observar que, a baja temperatura (185°C), estas desviaciones son muy superiores, alcanzando el máximo con una velocidad de 20 mm/s y un espesor de capa de 0,2 mm. Para el resto de temperaturas, la desviación en el eje Y suele ser superior con el mayor espesor de capa, mientras que en los ejes X y Z no se aprecia una dependencia clara ni con la velocidad ni con el espesor.

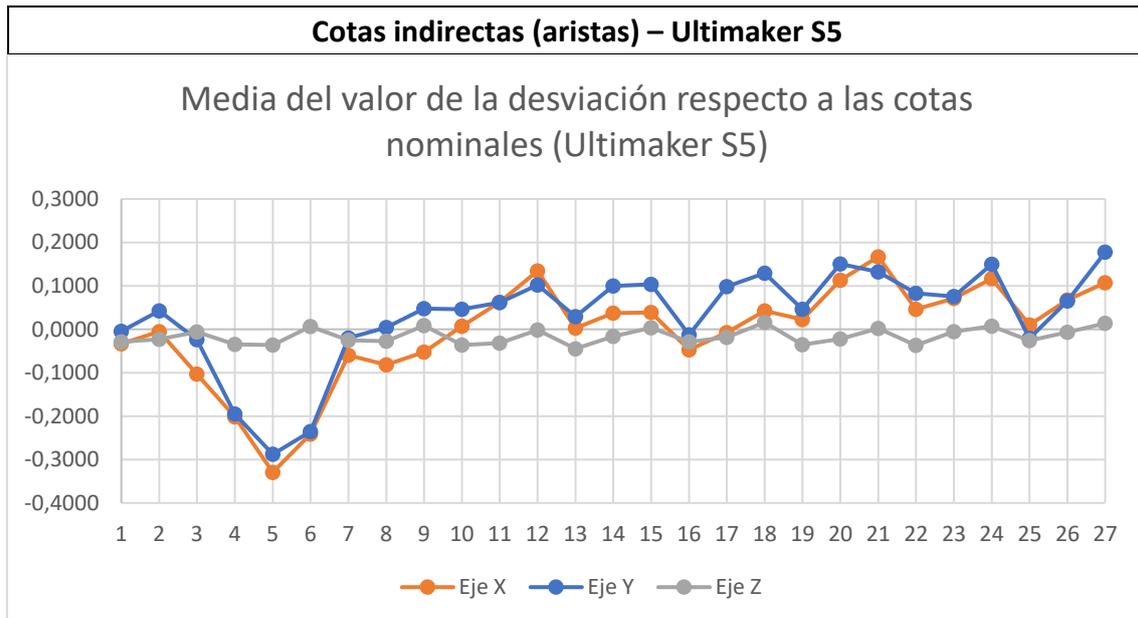


Ilustración 25 - Desviación de las cotas de las aristas por ejes (Ultimaker S5)

Como era de esperar, al representar la desviación media de las cotas indirectas, se puede comprobar que las variaciones son muy similares que con las cotas directas.

Al igual que ocurría anteriormente, las diferencias entre los ejes X e Y son mucho más reducidas y siguen proporciones muy similares. El eje Z adopta valores muy diferentes y mucho más reducidos.

Se puede comprobar que los valores medios de desviación son negativos (en su mayoría) a 185°C y positivos en el resto de temperaturas, mostrando su clara dependencia. Este fenómeno ocurre solamente en los ejes X e Y. Además, en los ejes X e Y el valor máximo (negativo) en la desviación ocurre con la temperatura mínima (185°C) y los valores intermedios de velocidad (20 mm/s) y de espesor de capa (0,2 mm).

En el eje Z no se aprecia una dependencia clara con la temperatura y la velocidad de desplazamiento, pero sí se comprueba la cierta periodicidad en los resultados con el cambio de espesor.

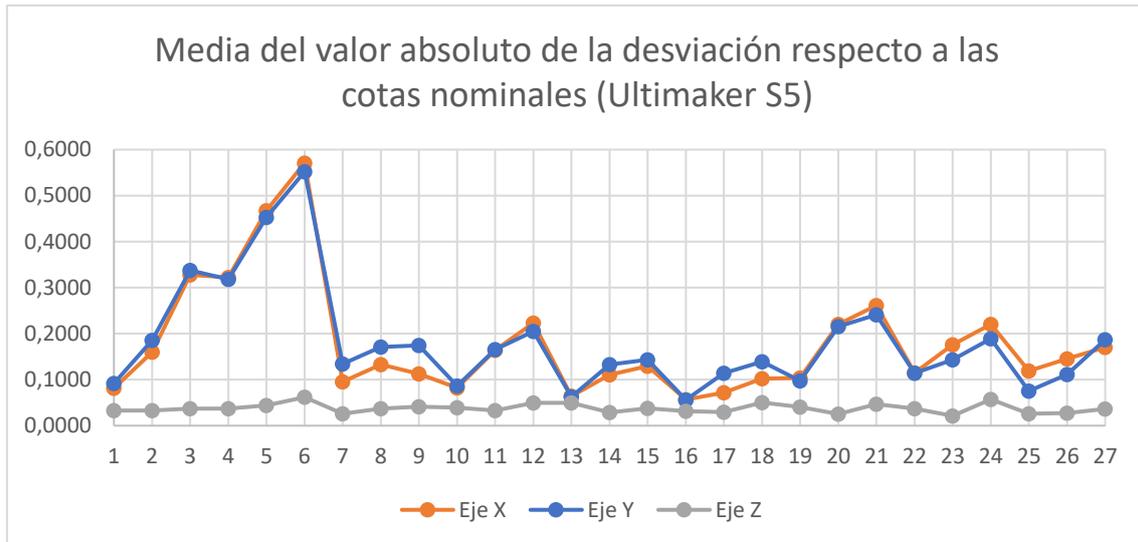


Ilustración 26 - Desviación absoluta de las cotas de las aristas por ejes (Ultimaker S5)

Al representar los valores absolutos de estas desviaciones se observa un solapamiento mucho más claro entre los resultados obtenidos en los ejes X e Y, siendo siempre considerablemente superiores a los obtenidos en el eje Z.

Como se apreciaba anteriormente, se comprueba el fuerte aumento de las desviaciones en X e Y a 185°C con una velocidad de 20 mm/s y con el máximo espesor de capa (0,3 mm). Además, es habitual ver que los valores máximos de desviación en estos ejes ocurren siempre con el mayor espesor (0,3 mm). En general, los valores más bajos se obtienen con el espesor de capa más bajo (0,1 mm) y a la temperatura intermedia (195°C).

En el eje Z no se aprecia ninguna interacción clara con los parámetros de impresión.

5.3.2 Cotas indirectas – Vértices

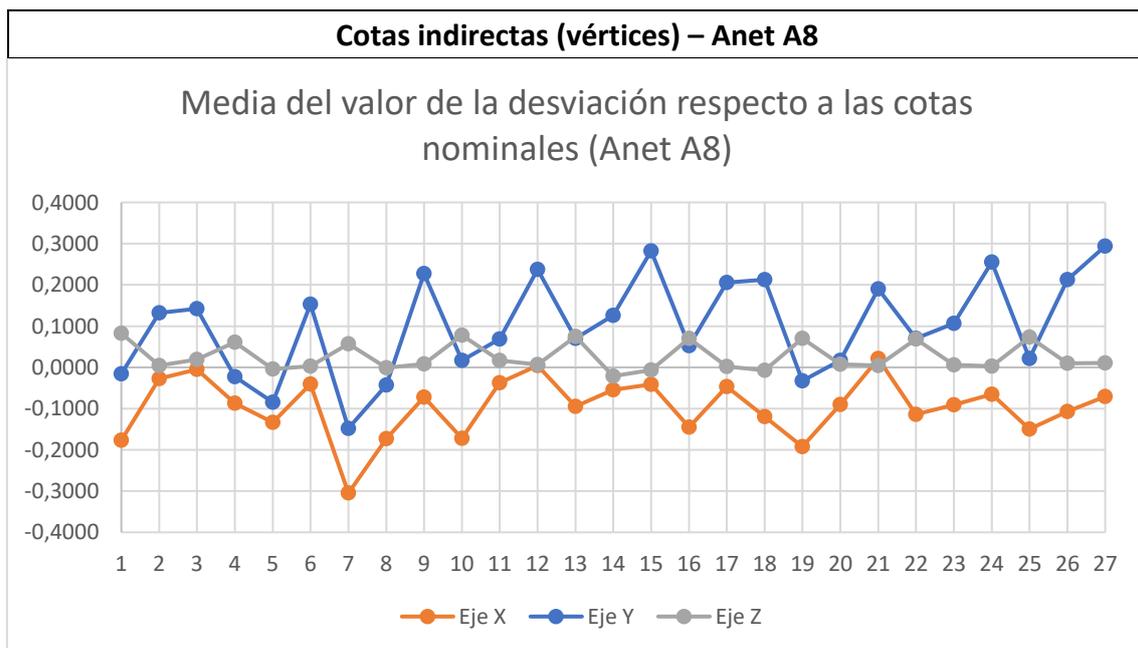


Ilustración 27 - Desviación de las cotas de los vértices por ejes (Anet A8)

Al representar las desviaciones para los vértices determinados a partir de las cotas directas e indirectas, se puede comprobar que se obtienen resultados muy similares, puesto que son consecuencia de los mencionados.

La principal diferencia es que, en este caso, parece que la temperatura posee una menor influencia. Anteriormente, se podía ver como los valores obtenidos en los ejes X e Y se iban distanciando conforme aumentaba la temperatura. Sin embargo, en estos resultados esta variación en el distanciamiento es mucho más reducida.

Otro aspecto a destacar es que prácticamente todos los valores de desviación en el eje X son negativos, mientras que en los ejes Y y Z la mayoría son positivos.

En cuanto al resto de elementos, los resultados son muy similares a los ya comentados en las cotas directas.

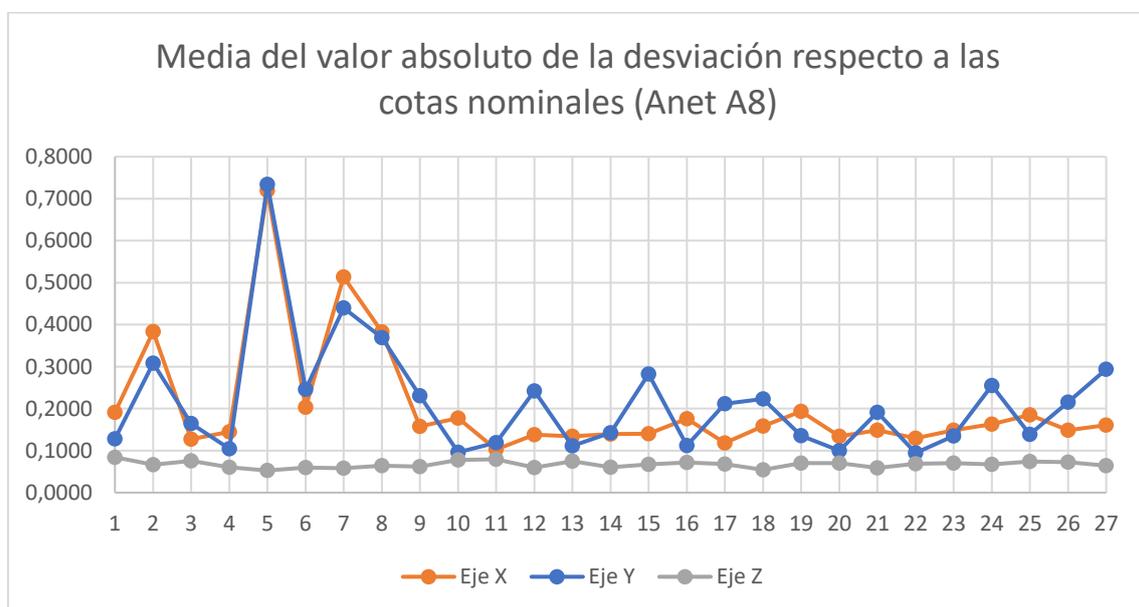


Ilustración 28 – Desviación absoluta de las cotas de los vértices por ejes (Anet A8)

Al considerar los valores absolutos de estas desviaciones, se sigue apreciando la gran influencia a la temperatura más baja (185°C) en los ejes X e Y. Al resto de temperaturas, no se ve una clara tendencia en las variaciones con la velocidad de desplazamiento.

Sin embargo, el espesor de capa influye notablemente en el eje Y, dando lugar a mayores desviaciones cuanto mayor es el valor de este parámetro. Por otro lado, no se aprecia una influencia tan clara del espesor de capa en el eje X.

En el eje Z no se aprecia ninguna interacción clara con los parámetros de impresión, dando lugar a unos valores de desviación mucho más estables y reducidos.

En general, los valores de las desviaciones son algo superiores a los obtenidos en las cotas directas. Esto tiene sentido por lo que se ha mencionado anteriormente, y es que estos resultados se obtienen a partir de las cotas directas e indirectas, por lo que sus errores de posición se van acumulando al determinar estos valores.

Cotas indirectas (vértices) – Ultimaker S5

Media del valor de la desviación respecto a las cotas nominales (Ultimaker S5)

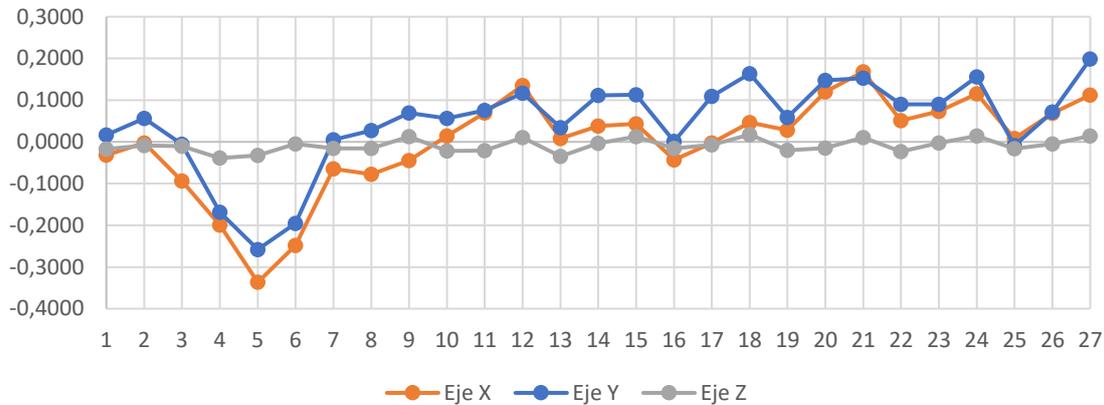


Ilustración 29 - Desviación de las cotas de los vértices por ejes (Ultimaker S5)

Al representar las desviaciones en la posición de los vértices, se puede comprobar que los resultados obtenidos son muy similares que los mostrados con las cotas directas.

Vuelve a aparecer la máxima desviación a 185°C, 20 mm/s y 0,2 mm/capa, además de apreciarse cierta periodicidad en los resultados debida al cambio de espesor. A las temperaturas de 195°C y 205°C los valores mayores de desviación se suelen alcanzar con espesores de capa de 0,3 mm, mientras que no se aprecia una influencia clara de la velocidad de desplazamiento.

Al igual que ocurre en casos anteriores, en el eje Z se aprecia de forma muy leve una cierta periodicidad, pero no se ve una clara influencia con los parámetros de impresión.

Media del valor absoluto de la desviación respecto a las cotas nominales (Ultimaker S5)

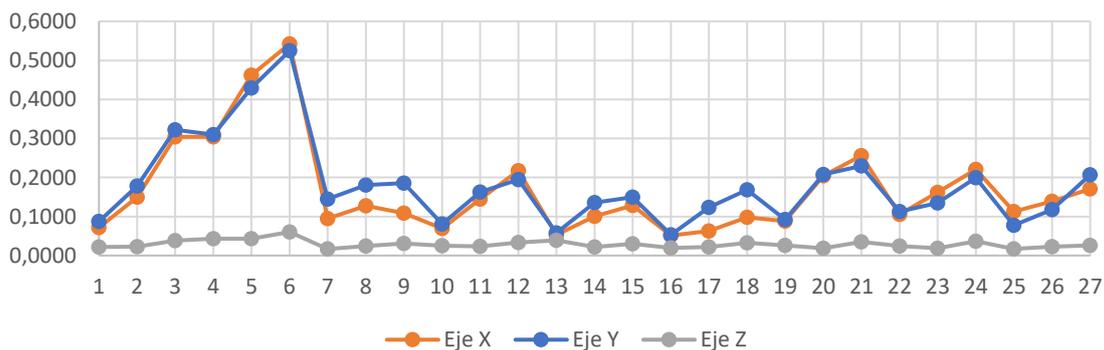


Ilustración 30 – Desviación absoluta de las cotas de los vértices por ejes (Ultimaker S5)

Al contrario que ocurre con la impresora Anet A8, en este caso las desviaciones absolutas no son superiores a las obtenidas con las cotas directas, de hecho, son muy similares.

En cuanto a la forma y los valores obtenidos con estos resultados, son muy similares a los obtenidos a partir de las cotas directas con la Ultimaker S5. Por lo tanto, las conclusiones obtenidas en ese análisis son extrapolables a estos resultados.

5.4 Resultados de las mediciones – Media de las cotas directas e indirectas

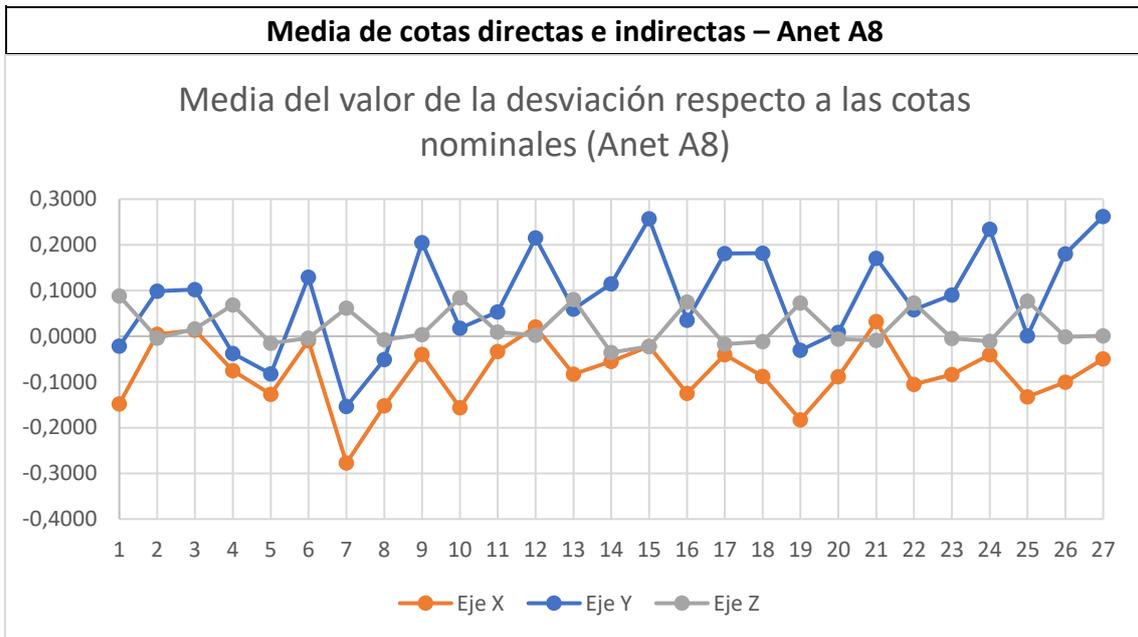


Ilustración 31 - Desviación de las cotas directas e indirectas por ejes (Anet A8)

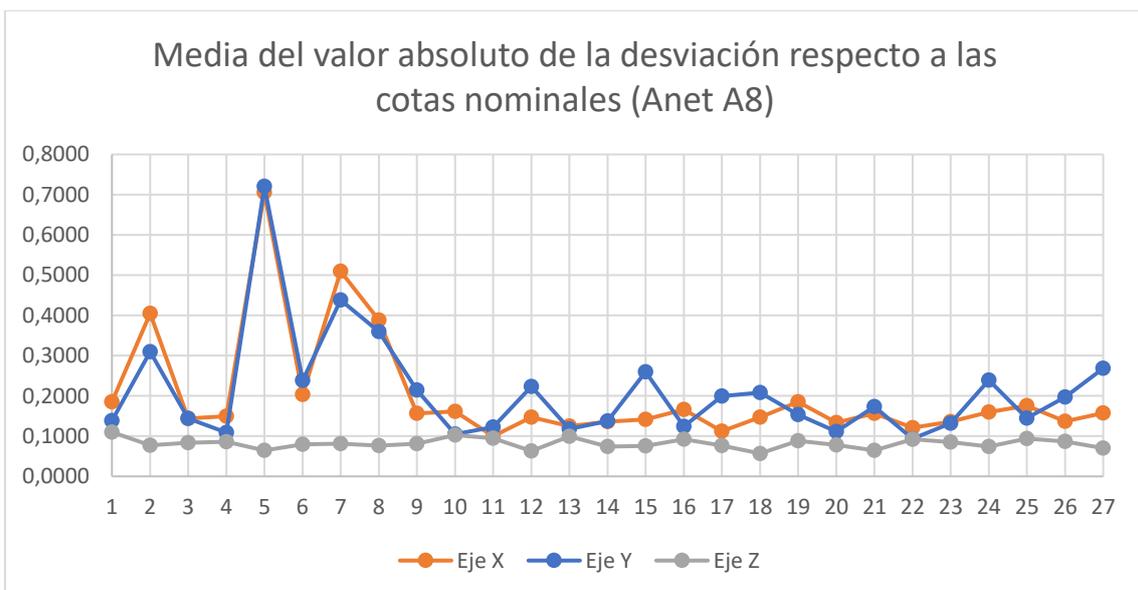


Ilustración 32 – Desviación absoluta de las cotas directas e indirectas por ejes (Anet A8)

Como se puede ver en las gráficas sobre las desviaciones respecto a las cotas nominales, los resultados obtenidos son muy similares en forma, proporciones y valores a los determinados para las cotas directas e indirectas.

Anteriormente se ha mencionado que, con esta impresora, las desviaciones habían aumentado en las cotas indirectas respecto a las directas. Esto era debido a la acumulación de los errores de aproximación en la geometría de sus elementos. En este caso, al considerar las cotas directas y las indirectas, se puede apreciar claramente que las desviaciones adoptan un valor medio.

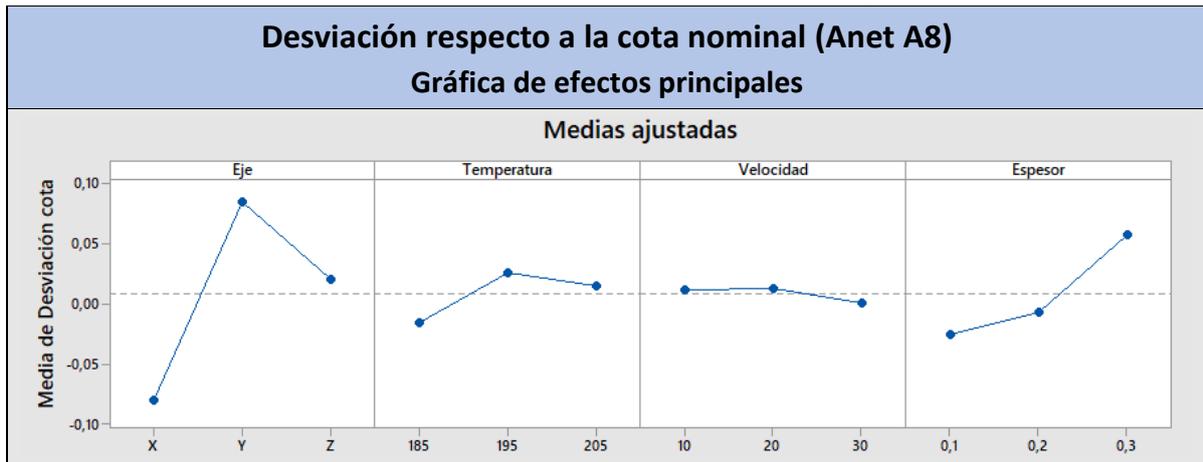


Ilustración 33 – Gráfica de efectos principales en la desviación de las cotas directas e indirectas (Anet A8)

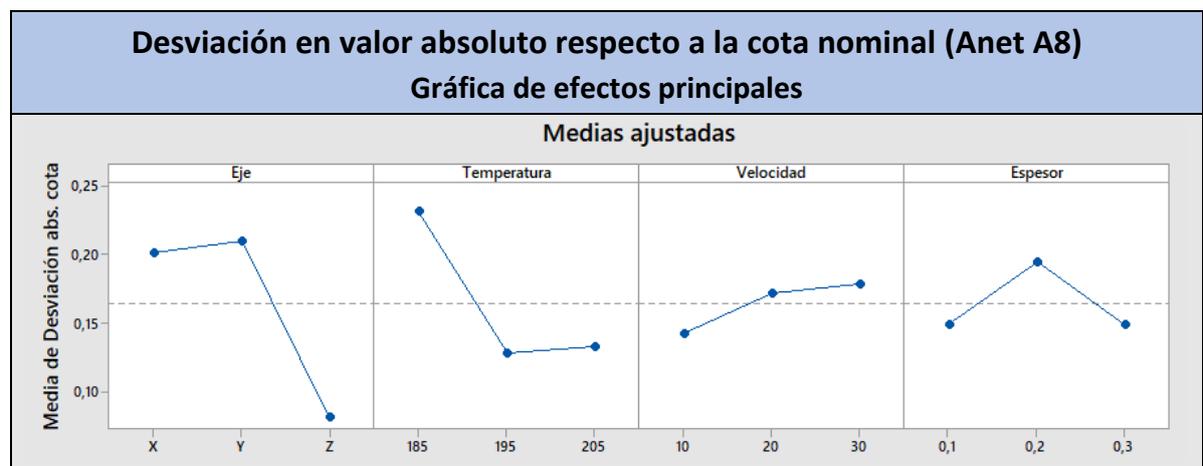


Ilustración 34 – Gráfica de efectos principales en la desviación absoluta de las cotas directas e indirectas (Anet A8)

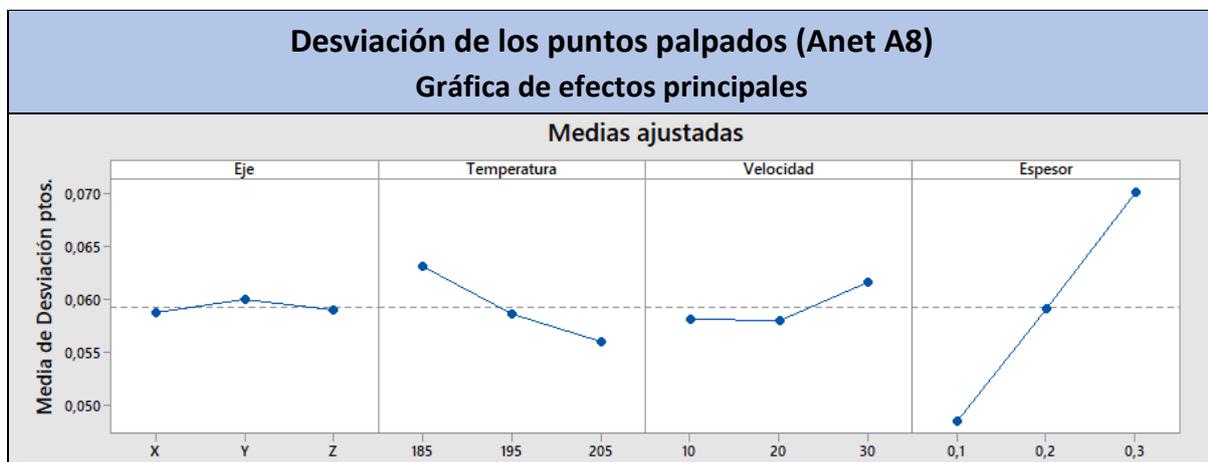


Ilustración 35 – Gráfica de efectos principales en la desviación de los puntos palpados de las cotas directas e indirectas (Anet A8)

Como se puede observar en las gráficas de efectos principales, se confirma claramente la influencia del eje de desplazamiento en los resultados de las desviaciones en valor nominal y en valor absoluto. En cuanto a la temperatura, al ceñirnos al valor absoluto se comprueba el fuerte incremento a 185°C y una cierta indiferencia entre trabajar a 195°C o 205°C. Respecto a la velocidad, no se aprecian cambios significativos teniendo en cuenta el ensayo de repetibilidad. Finalmente, tanto en el valor nominal de la desviación como en la dispersión de sus puntos, se distingue una clara influencia del espesor de capa.

Desviación respecto a la cota nominal (Anet A8)

Diagrama de Pareto de los efectos ($\alpha = 0,05$)

A = Espesor B = Velocidad C = Temperatura

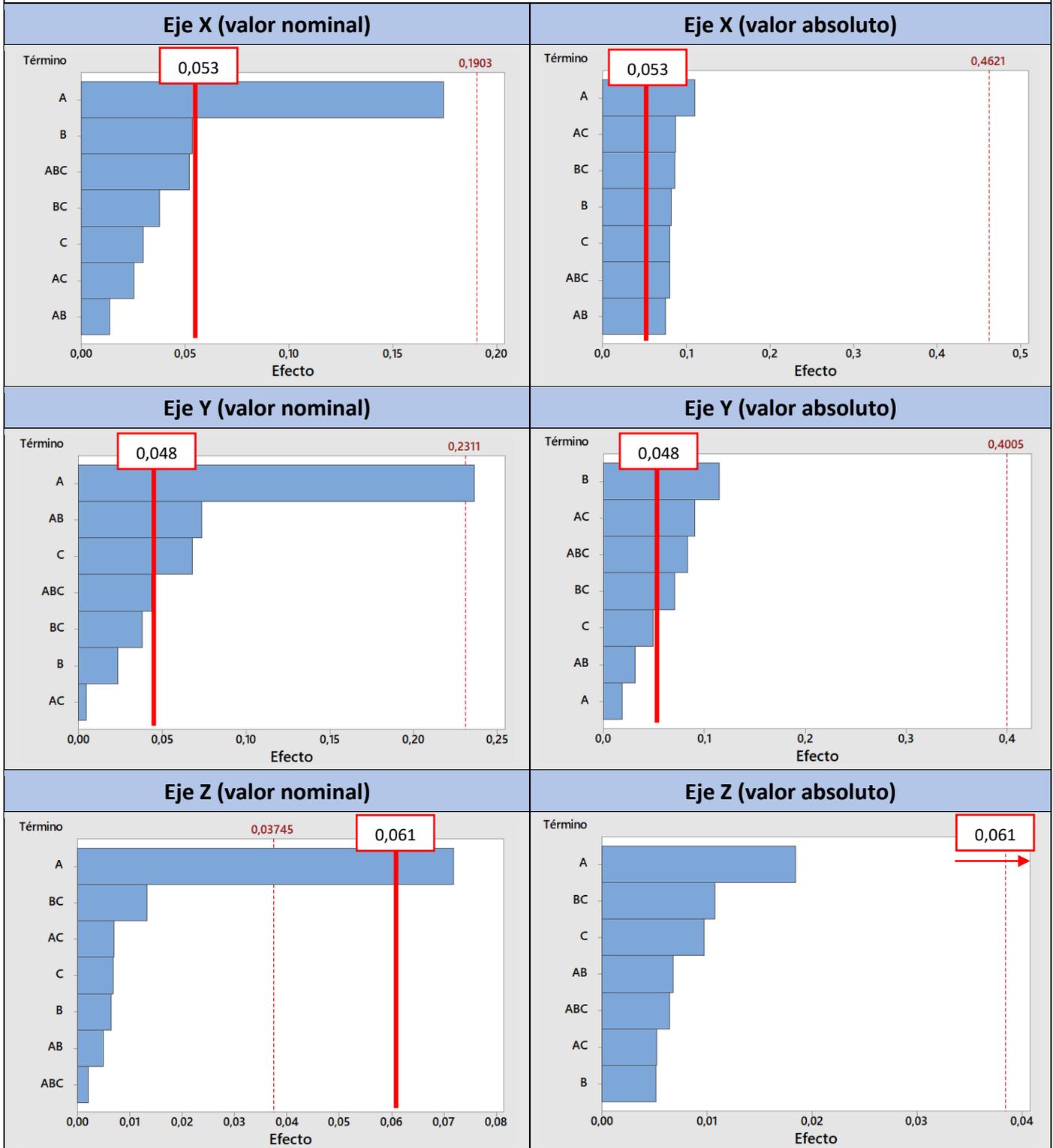


Ilustración 36 – Diagramas de Pareto de los efectos en las desviaciones de las cotas directas e indirectas (Anet A8)

Se puede observar la alta influencia del espesor en el valor nominal de todos los ejes. En el valor absoluto de la desviación se aprecian mayores influencias, principalmente debidas a interacciones de la temperatura con el espesor y/o con la velocidad de desplazamiento en los ejes X e Y. En el valor absoluto de las desviaciones en el eje Z no se aprecia ninguna influencia clara (a pesar de ver que predomina el espesor de capa).

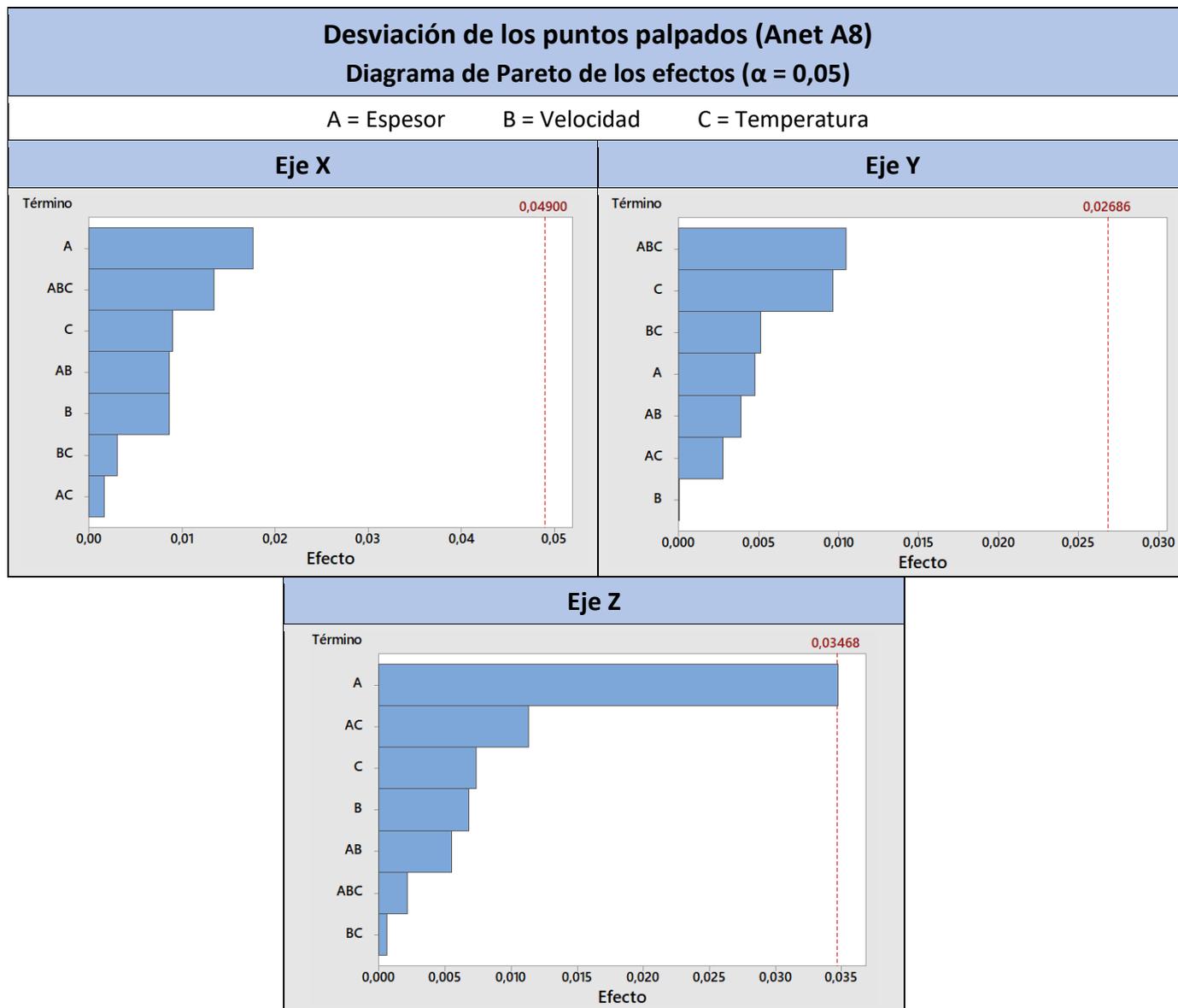


Ilustración 37 – Diagramas de Pareto de los efectos en la desviación de los puntos palpados de las cotas directas e indirectas (Anet A8)

En estas representaciones es posible valorar a nivel cualitativo cuáles son las principales causas en la dispersión de los puntos palpados de cada eje. Conviene aclarar que estos resultados corresponden exclusivamente a las mediciones directas, puesto que son las únicas en las que se han palpado los puntos físicamente.

En primer lugar, destaca la alta influencia del espesor de capa empleado en el eje Z. En un nivel de importancia inferior, la interacción de la temperatura con el espesor o con la velocidad no es despreciable. En cuanto al resto de parámetros, no se aprecia ninguna influencia en la dispersión de los puntos, como se podía ver en la gráfica de efectos.

Media de cotas directas e indirectas – Ultimaker S5

Media del valor de la desviación respecto a las cotas nominales (Ultimaker S5)

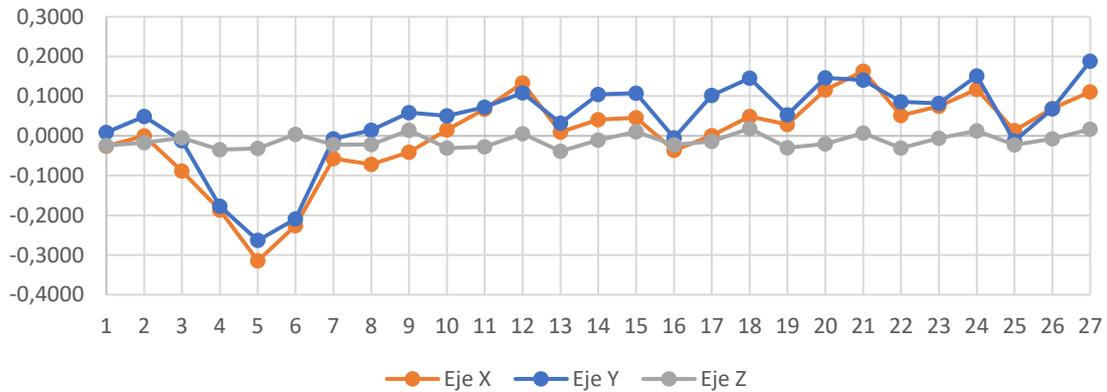


Ilustración 38 - Gráfica de efectos principales en la desviación de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5)

Media del valor absoluto de la desviación respecto a las cotas nominales (Ultimaker S5)

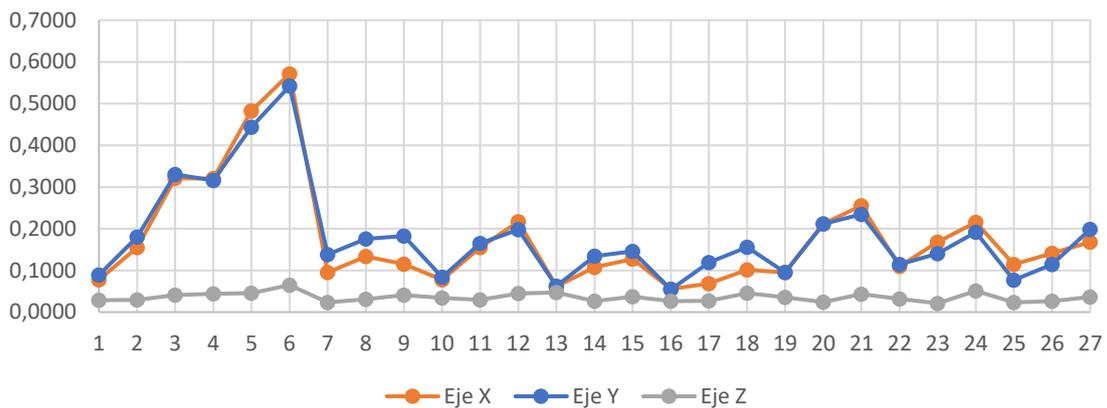


Ilustración 39 – Gráfica de efectos principales en la desviación absoluta de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5)

Al igual que se podía observar con estas mismas representaciones para la Anet A8, los resultados obtenidos son muy similares en forma, proporciones y valores a los determinados para las cotas directas e indirectas.

En el caso de esta impresora, anteriormente se ha indicado que las diferencias en los resultados de las cotas directas e indirectas eran más reducidas que con la Anet A8. Por lo tanto, en estos resultados de la media entre las cotas directas y las indirectas se observan valores muy similares.

De este modo, mediante estas representaciones gráficas se puede obtener una estimación de las posiciones de todos los elementos principales en las piezas.

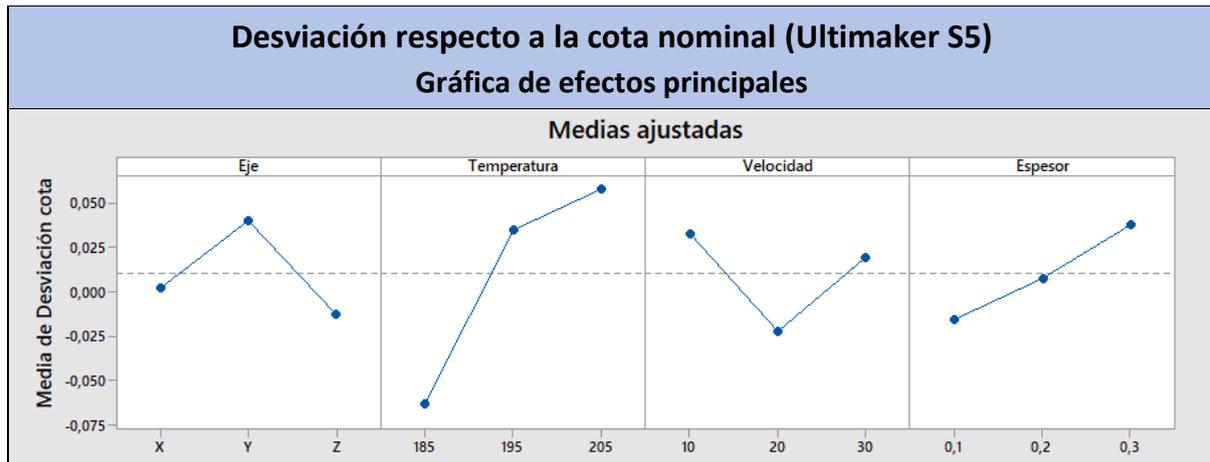


Ilustración 40 – Gráfica de efectos principales en la desviación de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5)

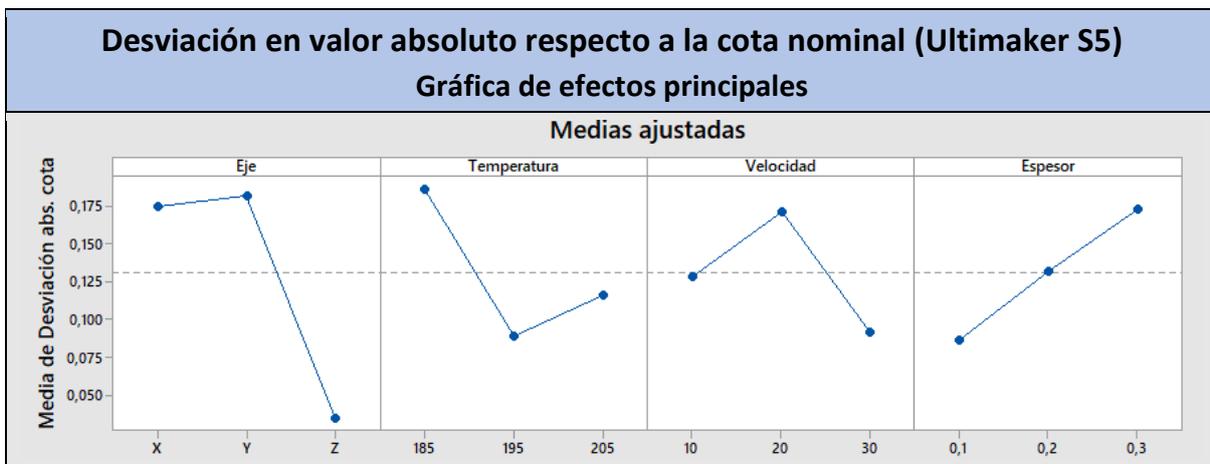


Ilustración 41 – Gráfica de efectos principales en la desviación absoluta de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5)

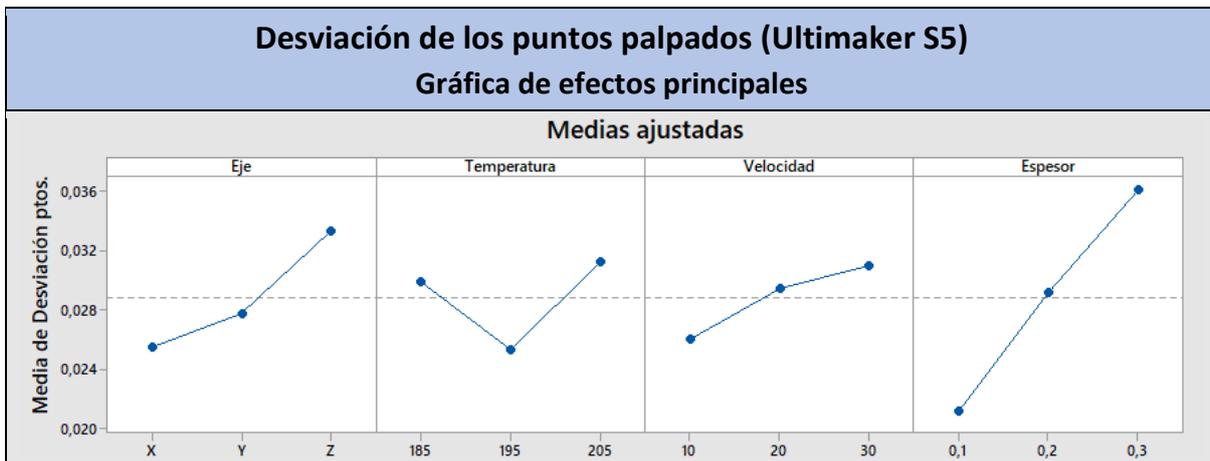


Ilustración 42 – Gráfica de efectos principales en la desviación de los puntos palpados de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5)

En estas gráficas de efectos principales para la impresora Ultimaker S5 se verifica la influencia del eje de desplazamiento en el valor absoluto de las desviaciones, siendo muy similar en los ejes X e Y y mucho menor en el eje Z. Respecto a la temperatura, se puede comprobar el incremento en las desviaciones nominales (negativas) y en valor absoluto al trabajar a una temperatura de 185°C. En cuanto a la velocidad, se aprecia una leve influencia tanto en las desviaciones nominales como absolutas, obteniendo los mejores resultados para 30 mm/s. Por

otro lado, también se aprecia la proporcionalidad directa entre el espesor de capa, las desviaciones y la dispersión de los puntos palpados.

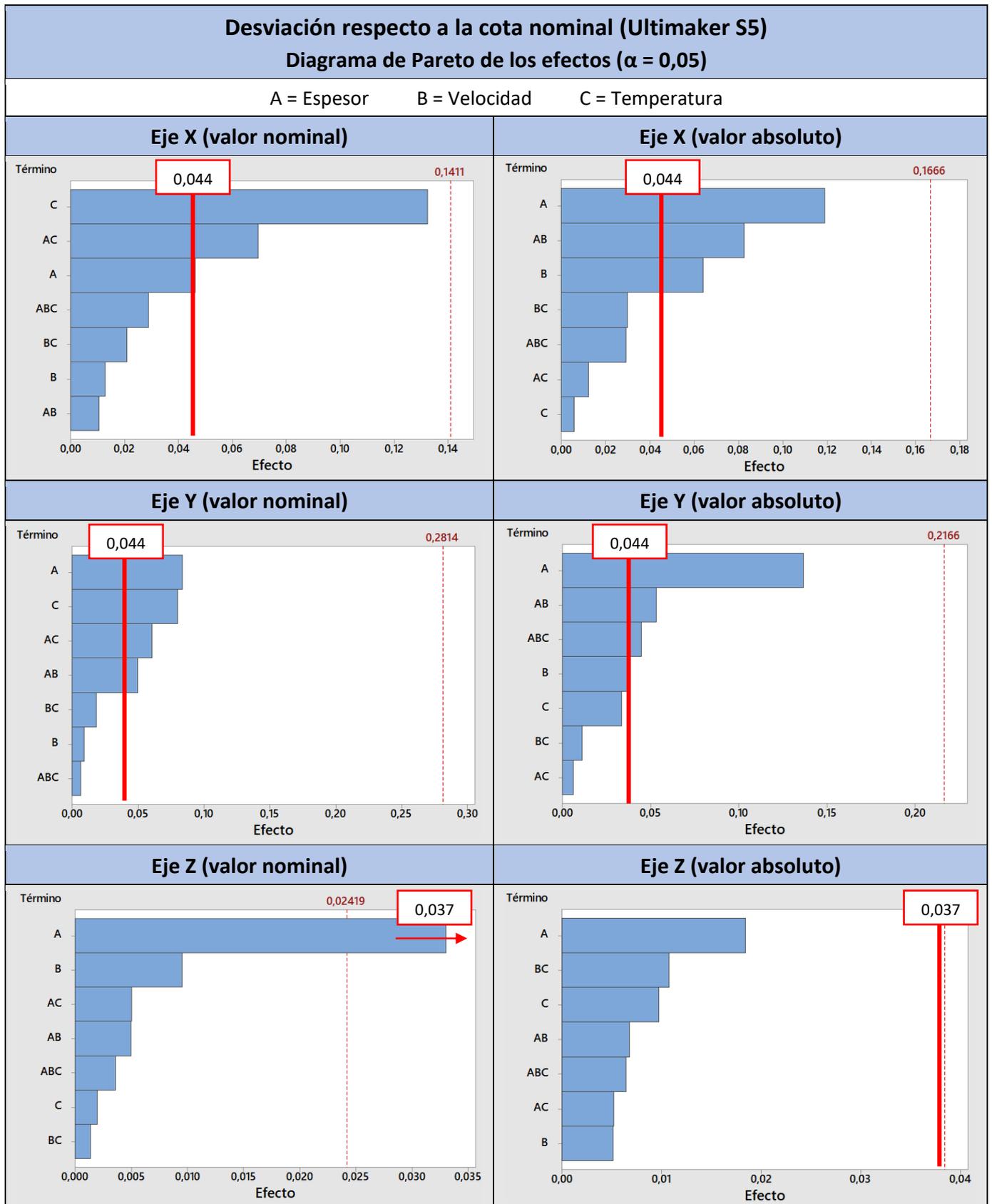


Ilustración 43 – Diagramas de Pareto de los efectos en las desviaciones de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5)

En estos diagramas de Pareto de los efectos por ejes se verifican algunas de las conclusiones anteriores. En primer lugar, la influencia de la temperatura en las desviaciones nominales en los ejes X e Y. Por otro lado, en el valor absoluto de las desviaciones en los ejes X e Y, destaca la clara influencia del espesor de capa, además de su interacción con la velocidad de desplazamiento. Conviene destacar también la relativa importancia de la velocidad de desplazamiento del cabezal en el valor absoluto de las desviaciones en el eje X. Respecto al eje Z, no se aprecia ninguna influencia significativa teniendo en cuenta el resultado del ensayo de repetibilidad.

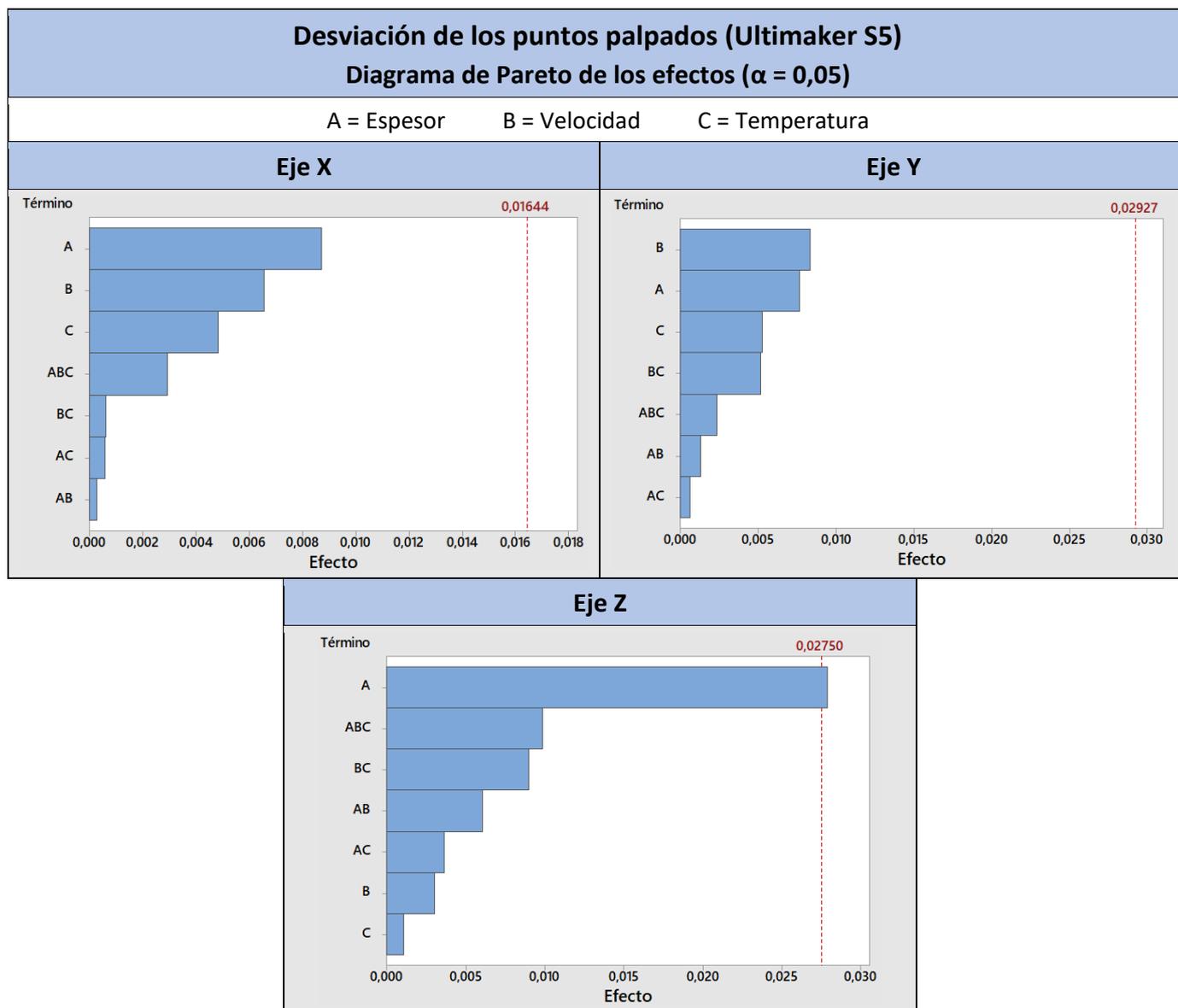
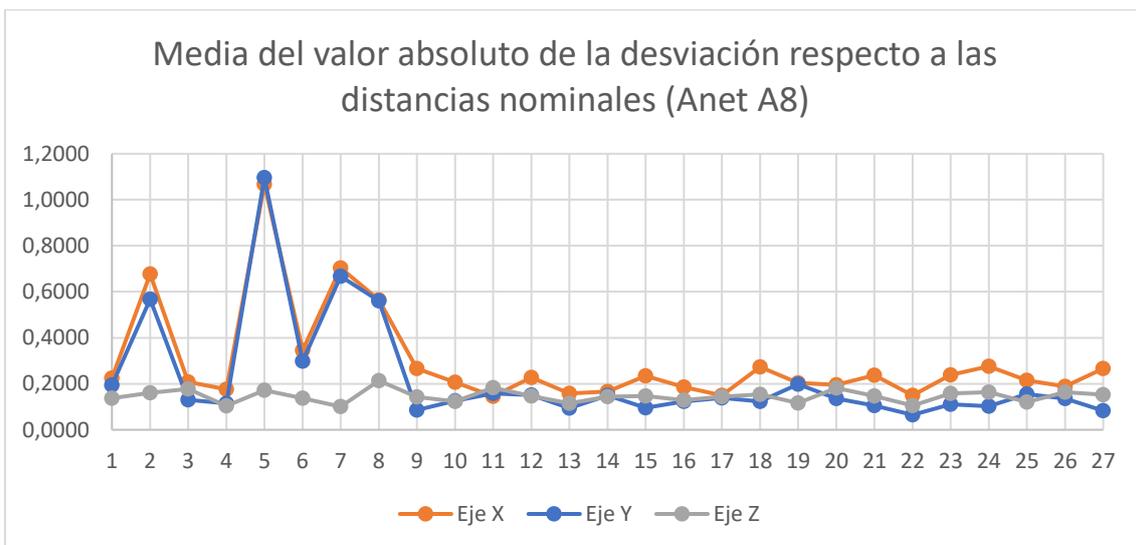
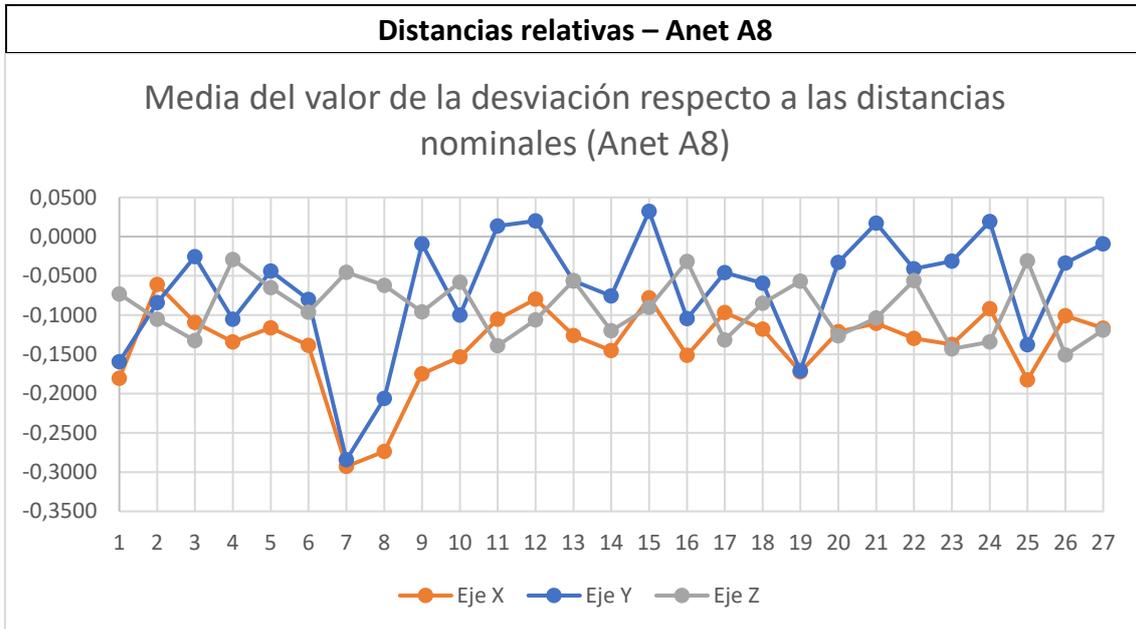


Ilustración 44 – Diagramas de Pareto de los efectos en la desviación de los puntos palpados de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5)

Al igual que con la Anet A8, en estas representaciones es posible valorar a nivel cualitativo cuáles son las principales causas en la dispersión de los puntos palpados en cada eje.

Los parámetros de mayor influencia en los ejes X e Y son el espesor y la velocidad, sin ser despreciable la inferior influencia de la temperatura en esta dispersión. Por otro lado, en el eje Z el espesor de capa es el parámetro claramente dominante.

5.5 Resultados de las mediciones – Distancias relativas



Si se representan las distancias relativas determinadas entre los planos palpados directamente, se obtienen resultados con forma y proporciones similares a los obtenidos en las cotas directas. Sin embargo, lo primero que llama la atención es que la gran mayoría de los resultados son negativos, es decir, se obtienen distancias inferiores a las definidas en las cotas nominales.

Si nos ceñimos a la desviación media teniendo en cuenta el signo de la misma, el caso más desfavorable se obtiene a 185°C, con una velocidad de 30 mm/s y un espesor de capa de 0,1 mm. Sin embargo, si nos centramos en el valor absoluto de las mismas, se puede comprobar que el caso más desfavorable sigue ocurriendo a 185°C, pero a una velocidad de 20 mm/s y un espesor de capa de 0,2 mm. En cualquier caso, estos hechos son indicativos de que la temperatura de trabajo más desfavorable es la de 185°C.

Desviación respecto a la distancia nominal (Anet A8) Gráfica de efectos principales

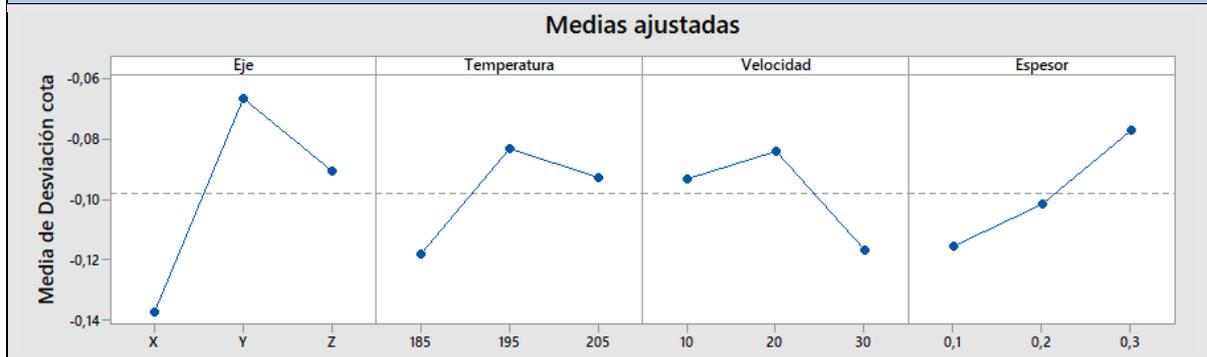


Ilustración 47 – Gráfica de efectos principales en las desviaciones de las distancias relativas (Anet A8)

Desviación en valor absoluto respecto a la distancia nominal (Anet A8) Gráfica de efectos principales

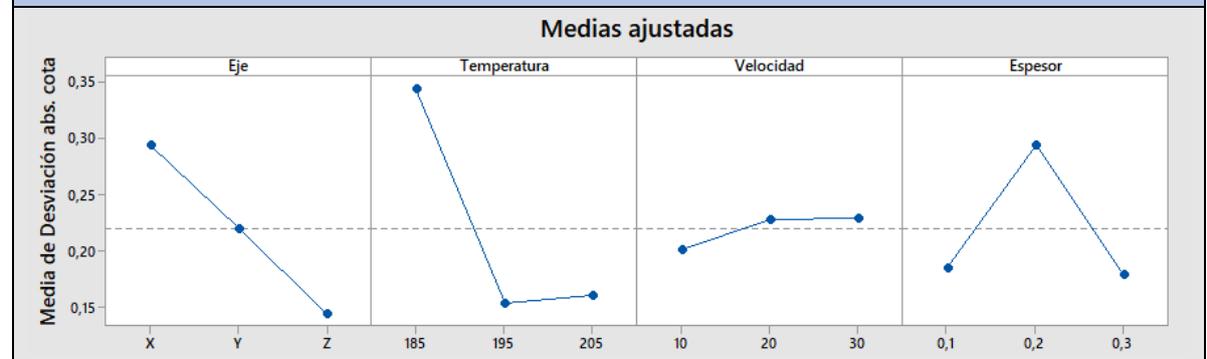


Ilustración 48 – Gráfica de efectos principales en las desviaciones absolutas de las distancias relativas (Anet A8)

En estas gráficas de efectos principales se verifica la influencia del eje en el que se está desplazando la máquina, dando lugar a los mejores resultados en valor nominal en el eje Y y, en valor absoluto, en el eje Z. Por otro lado, se distingue perfectamente el aumento en las desviaciones en valor absoluto al emplear la temperatura de 185°C. En cuanto a la velocidad, no se aprecia una tendencia clara al tener en cuenta la repetibilidad de las piezas. Respecto al espesor de capa, se aprecian variaciones a considerar al observar el valor absoluto de las desviaciones.

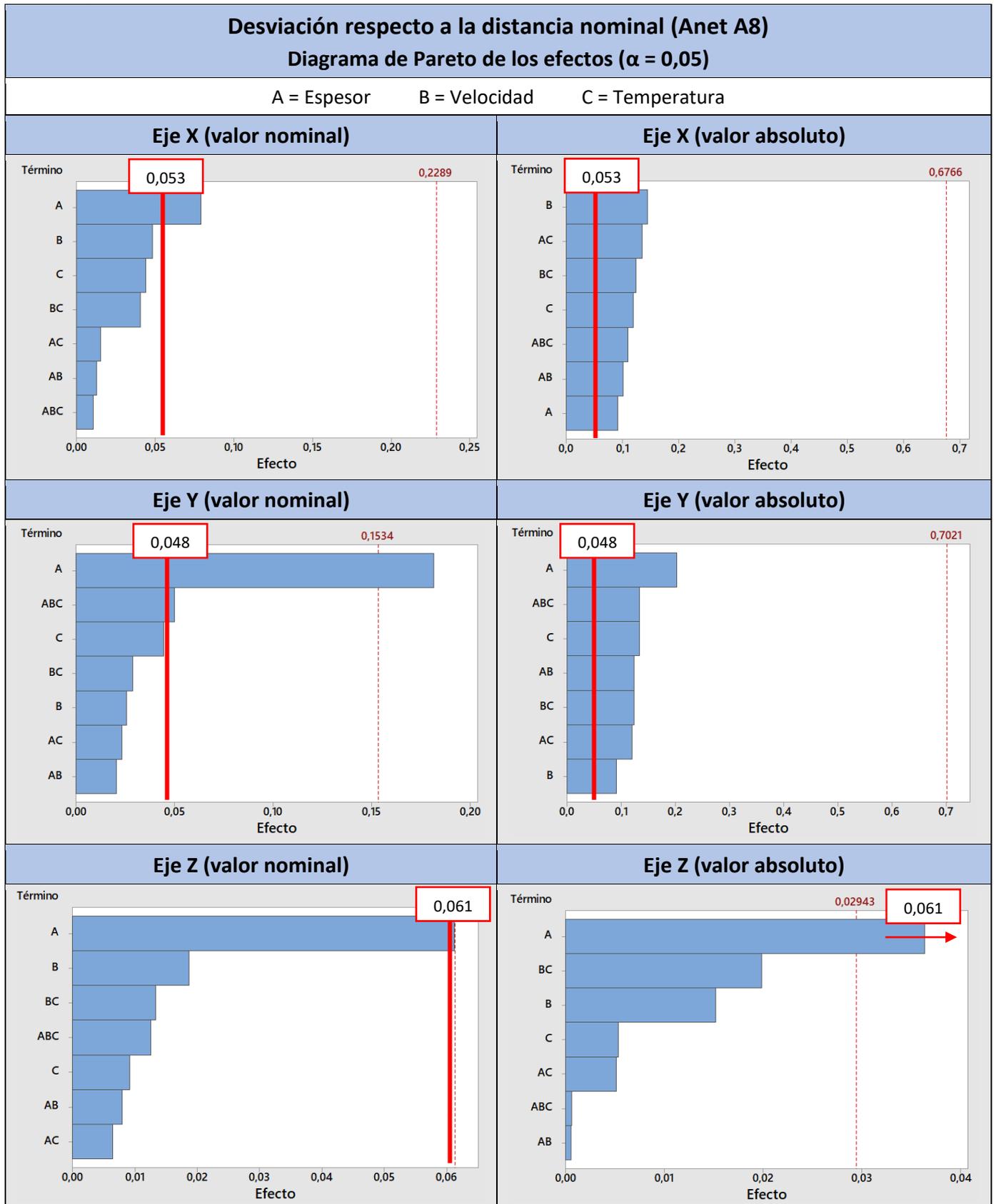


Ilustración 49 – Diagramas de Pareto de los efectos en las desviaciones de las distancias relativas (Anet A8)

En estas representaciones se pueden verificar algunos de los resultados mencionados. En primer lugar, destacar la influencia del espesor de capa en el valor nominal de las desviaciones en todos los ejes. Además, destaca la influencia de todos los parámetros y sus combinaciones al determinar los efectos sobre las desviaciones en valor absoluto en los ejes X e Y. En este caso, no hay ningún parámetro que destaque con claridad sobre el resto.

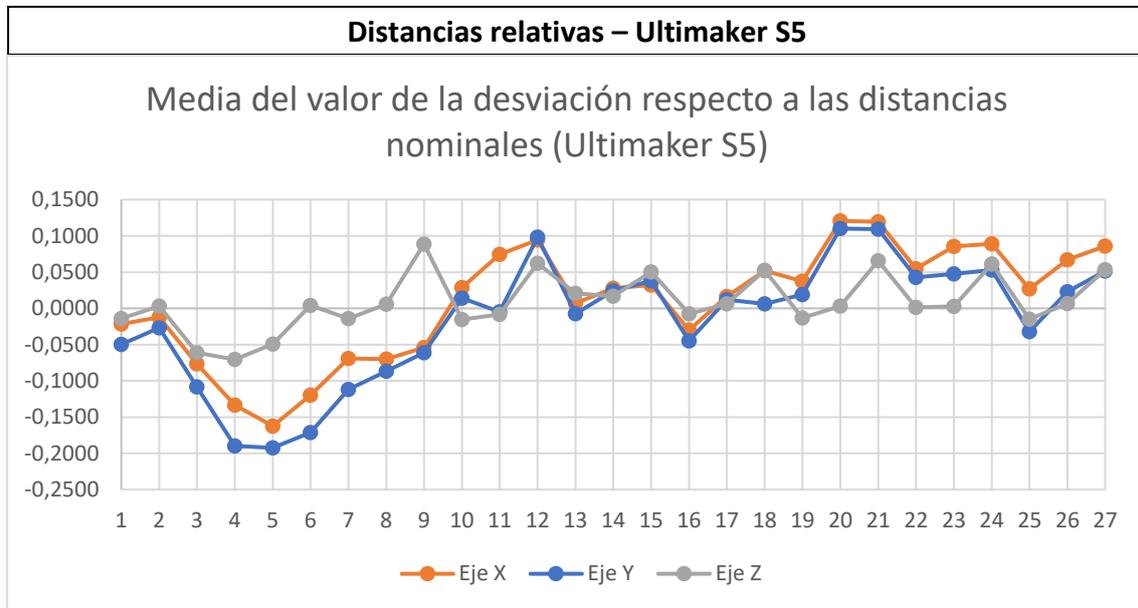


Ilustración 50 - Desviación de las distancias relativas por ejes (Ultimaker S5)

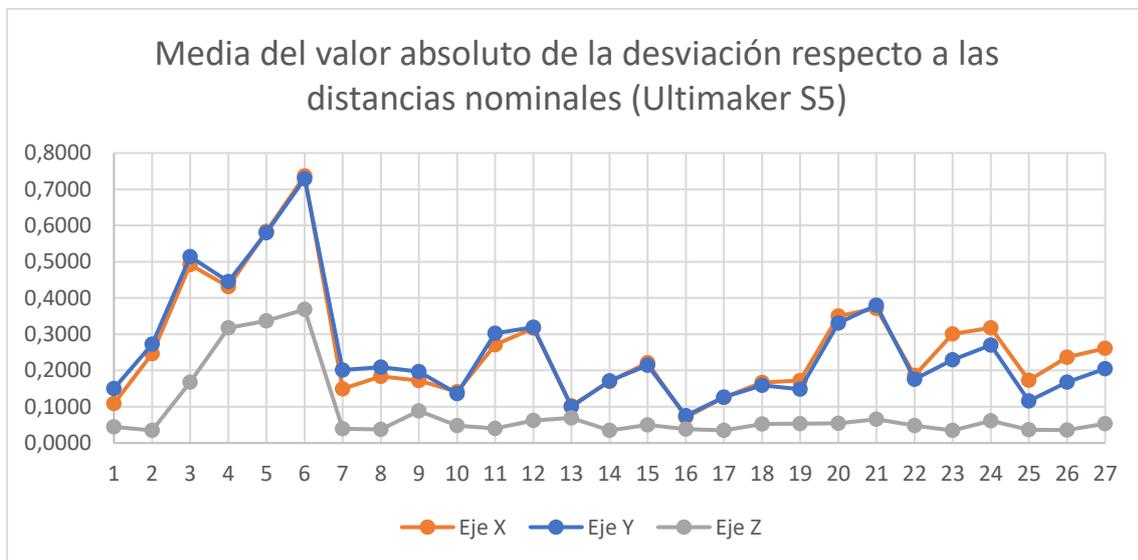


Ilustración 51 – Desviación absoluta de las distancias relativas por ejes (Ultimaker S5)

Con la representación de la desviación de las distancias relativas respecto a las nominales, se puede ver un comportamiento diferente de la Ultimaker S5 en comparación con la Anet A8.

En primer lugar, una coincidencia que se aprecia en el comportamiento de ambas impresoras es que las mayores desviaciones (negativas) aparecen con la temperatura más baja (185°C). Sin embargo, a diferencia de la Anet A8, a 195°C y 205°C estas desviaciones adoptan valores mayoritariamente positivos. En resumen, a 185°C las distancias medidas entre los planos son

inferiores a las nominales, mientras que, a 195°C y 205°C estas distancias son superiores a las nominales.

Al igual que ocurre con las cotas directas, en la Ultimaker S5 se puede apreciar la periodicidad debida a las variaciones del espesor de capa. Este fenómeno se ve claramente en la representación de los valores absolutos de estas desviaciones. Además, en los ejes X e Y se comprueba que, al incrementar el espesor de capa, aumenta el valor absoluto de la desviación.

Por otro lado, se verifica que en los ejes X e Y (a 195°C y 205°C), el incremento en la velocidad de desplazamiento se traduce en una reducción del valor absoluto de las desviaciones.

Añadir que en el eje Z no se aprecia una influencia clara de la velocidad de desplazamiento. En cambio, la temperatura afecta claramente, puesto que a 185° aparece un incremento en el valor absoluto de las desviaciones.

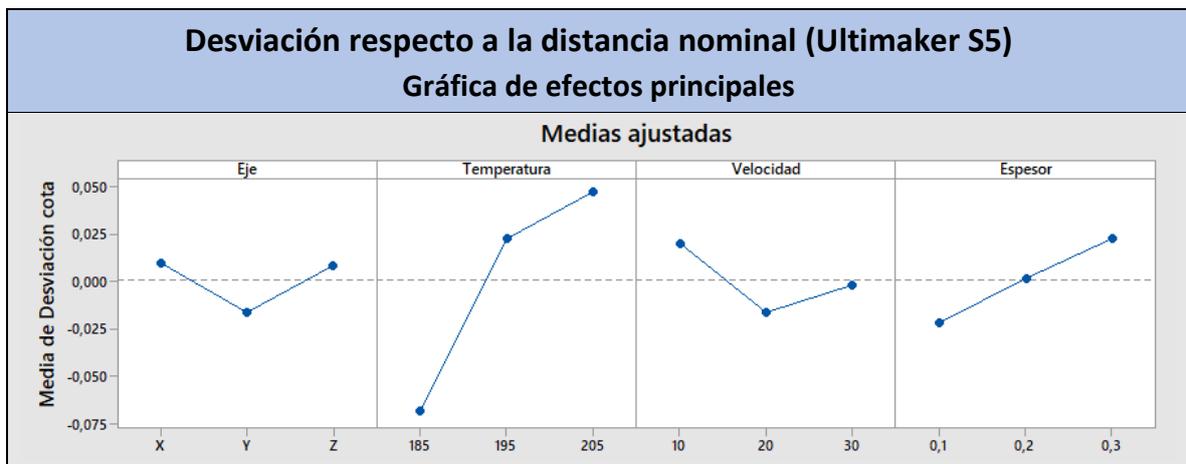


Ilustración 52 – Gráfica de efectos principales en las desviaciones de las distancias relativas (Ultimaker S5)

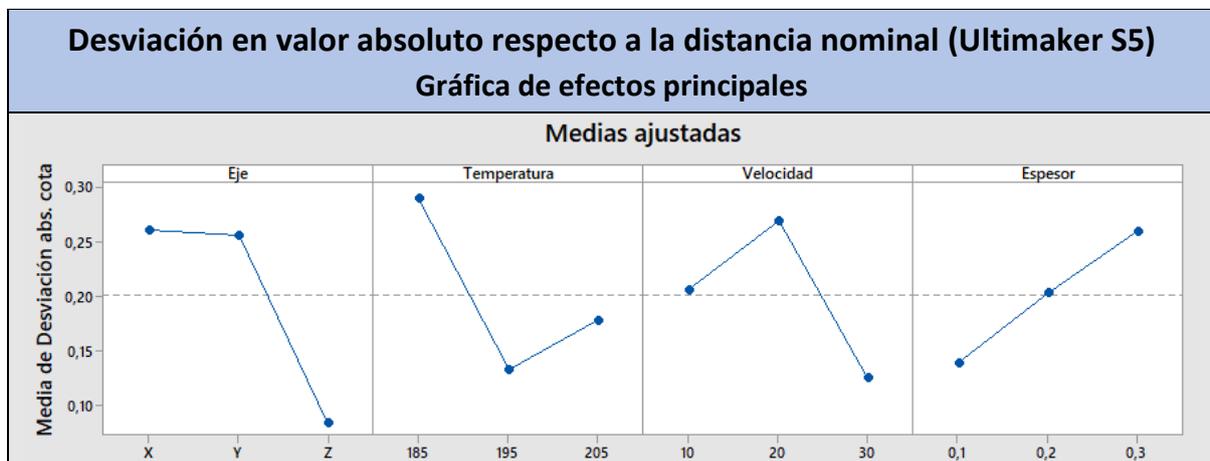


Ilustración 53 – Gráfica de efectos principales en las desviaciones absolutas de las distancias relativas (Ultimaker S5)

Al representar los efectos principales de las desviaciones de las distancias relativas en la Ultimaker S5, se pueden extraer algunas conclusiones. Destaca la reducción en el valor absoluto de las mismas en el eje Z. También se comprueba cómo influye negativamente trabajar a 185°C, incrementando las desviaciones. Además, se aprecia la significativa importancia de la velocidad, que da lugar a las menores desviaciones a mayor velocidad. Finalmente, en cuanto al espesor, se ve claramente la proporcionalidad de su valor con las desviaciones.

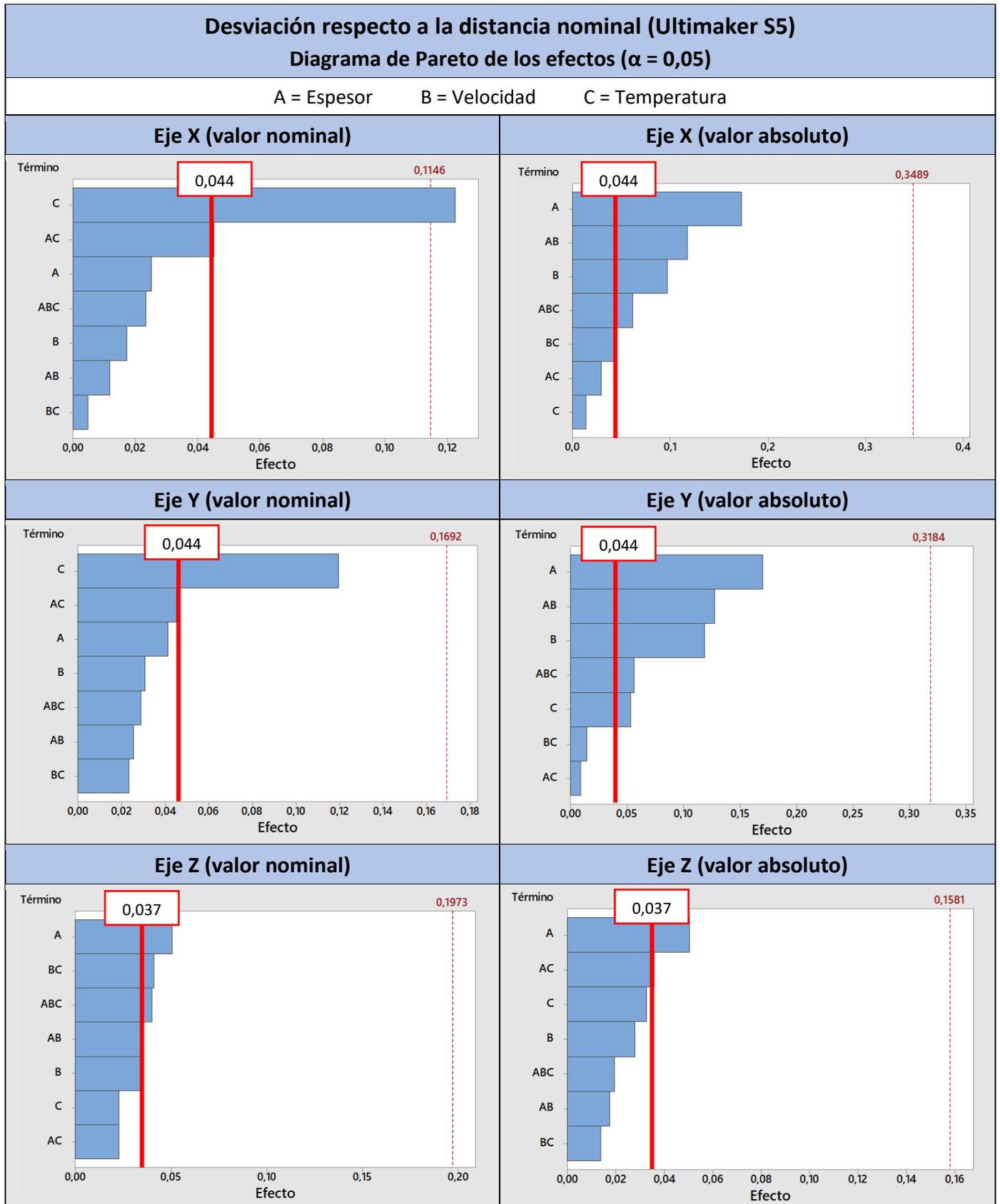


Ilustración 54 – Diagramas de Pareto de los efectos en las desviaciones de las distancias relativas (Ultimaker S5)

Con el diagrama de Pareto de los efectos se puede observar cómo la temperatura es el parámetro dominante en las desviaciones nominales en los ejes X e Y. Por otro lado, en cuanto a los parámetros más influyentes para las desviaciones en valor absoluto en los ejes X e Y, destaca el espesor de capa, la velocidad de desplazamiento y la interacción de ambos.

Por otro lado, en el eje Z se observa que el parámetro principal tanto en valor nominal como en absoluto de las desviaciones es el espesor de capa.

5.6 Resultados de las mediciones – Elementos geométricos

Como se ha mencionado anteriormente, los elementos geométricos que se van a analizar son los siguientes:

- Planitud respecto a cada eje (dirección normal del plano medido). La determinará la desviación de los puntos palpados.
- Paralelismo relativo respecto a cada eje (dirección normal del plano medido). Se considera relativo puesto que todos los resultados se han obtenido a partir de determinar el paralelismo entre dos planos paralelos según el diseño nominal.
- Perpendicularidad global entre planos que se cortan en las aristas ya mencionadas de las cotas indirectas.
- Cilindricidad global, aunque corresponderá exclusivamente a la media de los valores obtenidos en el saliente cilíndrico y en el agujero cilíndrico, ambos poseen su eje de revolución paralelo al eje Z.

5.6.1 Elementos geométricos – Planitud

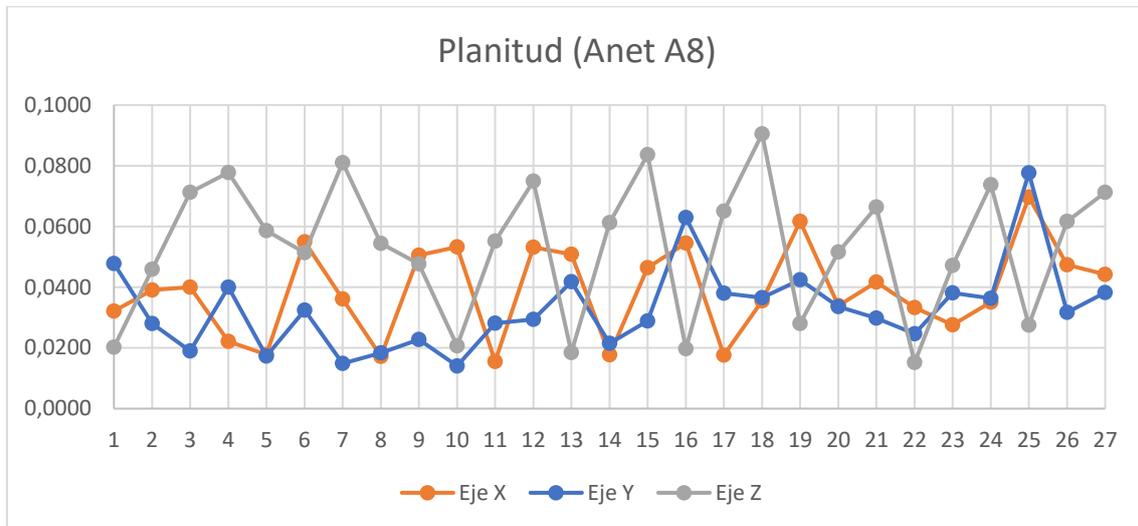


Ilustración 55 - Planitud por ejes (Anet A8)

En esta representación gráfica de la planitud en la Anet A8 es más complicado determinar tendencias claras en los resultados respecto a los casos anteriores. Se puede ver que los mejores valores de planitud (los más bajos) en todos los ejes se obtienen a la temperatura intermedia (195°C). Sin embargo, dentro de cada eje, el valor mínimo se alcanza con diferentes condiciones:

- Eje X: 195°C; 10 mm/s; 0,2 mm/capa
- Eje Y: 195°C; 10 mm/s; 0,1 mm/capa
- Eje Z: 195°C; 20 mm/s; 0,1 mm/capa

Por lo tanto, estos resultados muestran una clara variabilidad entre ejes que impide extraer unas conclusiones precisas como en los apartados anteriores.

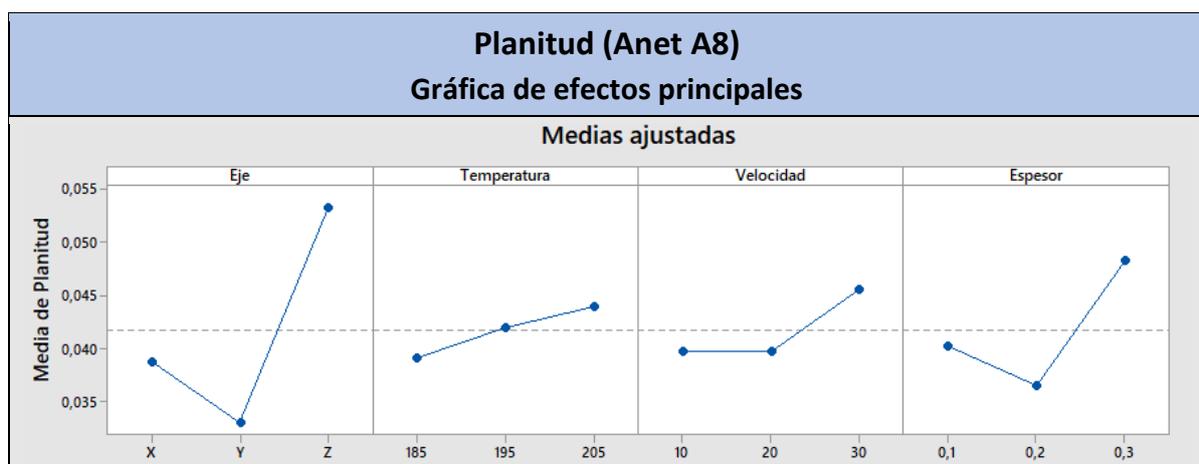


Ilustración 56 – Gráfica de efectos principales en la planitud (Anet A8)

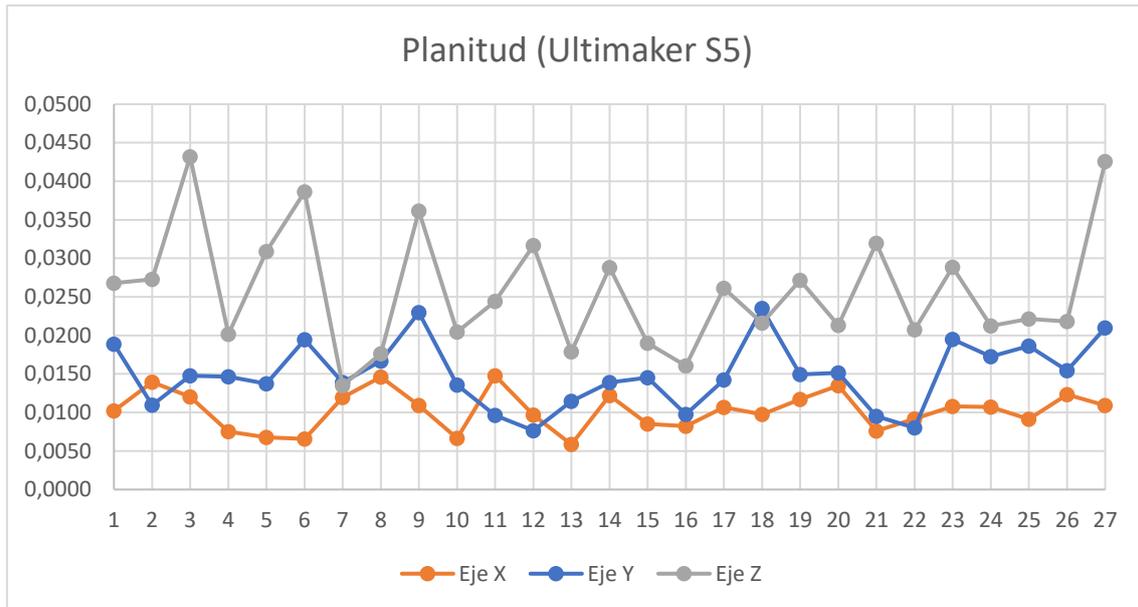


Ilustración 57 - Planitud por ejes (Ultimaker S5)

Al representar la planitud de las superficies medidas en las piezas fabricadas con la Ultimaker S5, tampoco se pueden apreciar influencias relevantes de los parámetros.

Una conclusión clara es que en los ejes X e Y se obtienen valores de planitud mucho mejores que en el eje Z. Además, dentro de los valores en los ejes X e Y, los mejores resultados se suelen obtener en el eje X, que parece tener una menor variabilidad a 205°C.

En cualquier caso, los resultados obtenidos en esta impresora son mucho mejores que los mostrados en la Anet A8.

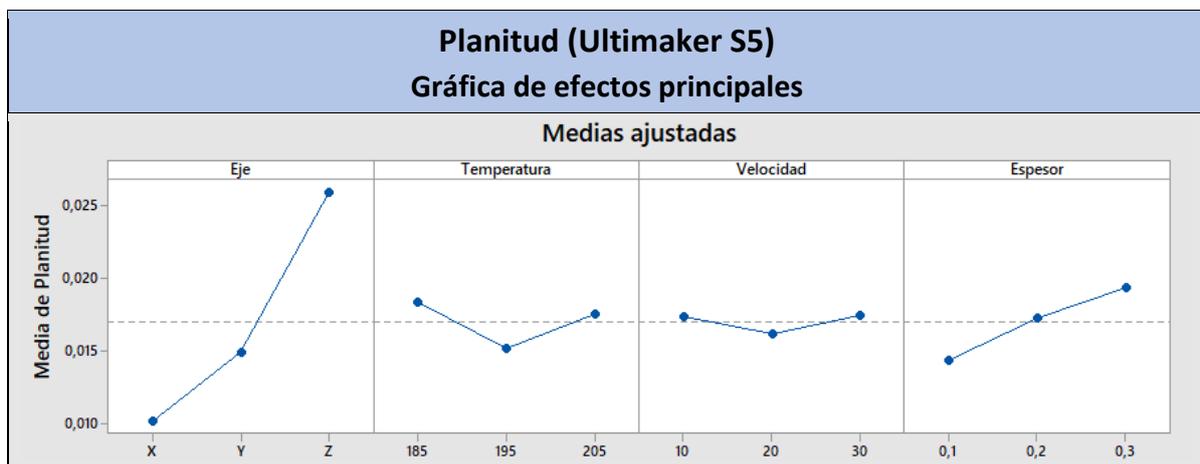


Ilustración 58 – Gráfica de efectos principales en la planitud (Ultimaker S5)

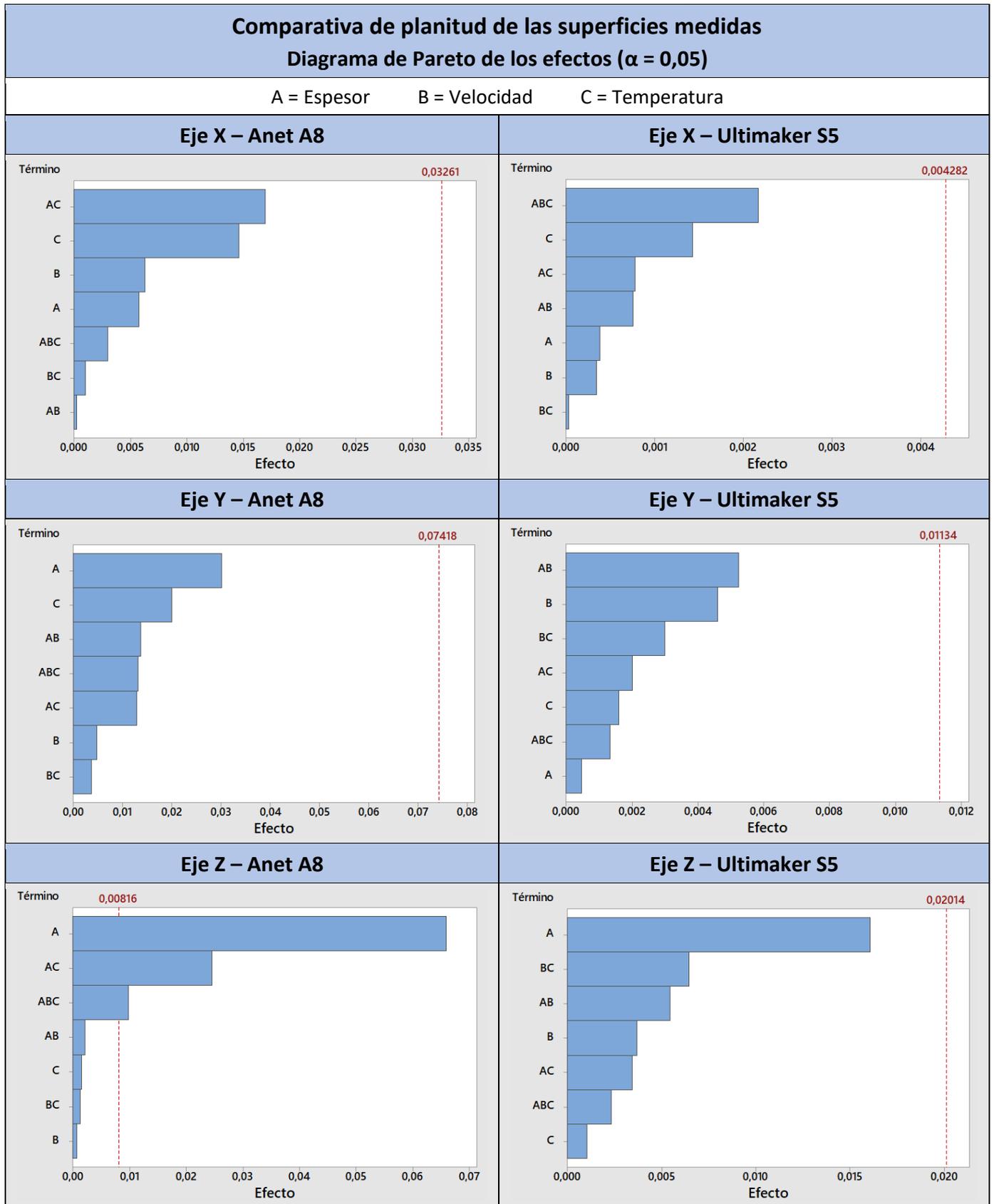


Ilustración 59 – Diagramas de Pareto de los efectos en la planitud (Anet A8 y Ultimaker S5)

5.6.2 Elementos geométricos – Paralelismo relativo

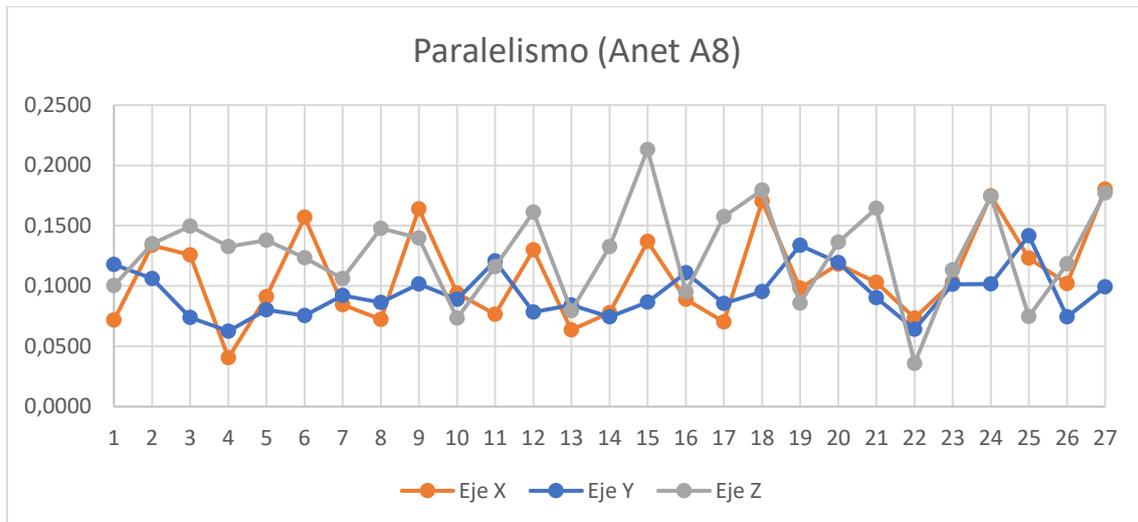


Ilustración 60 - Paralelismo por ejes (Anet A8)

Representando el paralelismo relativo de los planos palpados en cada eje con la Anet A8, se pueden extraer algunas conclusiones.

En los ejes X y Z, los mejores resultados se obtienen para los valores de espesor de capa más bajos (generalmente, con 0,1 mm). Mientras tanto, en el eje Y las variaciones en los resultados son mucho más reducidas, impidiendo determinar cualquier influencia de los parámetros de impresión.

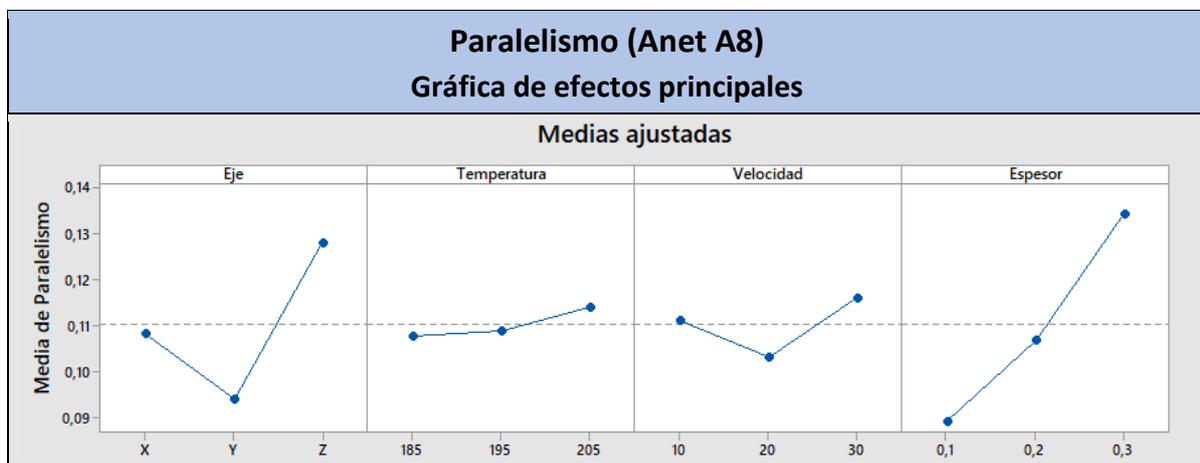


Ilustración 61 – Gráfica de efectos principales en el paralelismo (Anet A8)

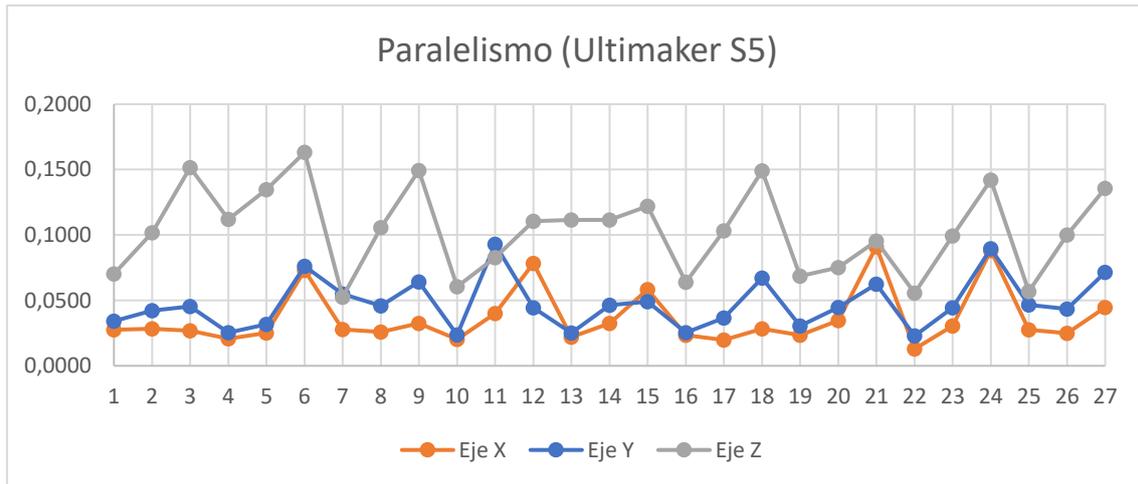


Ilustración 62 - Paralelismo por ejes (Ultimaker S5)

Representando el paralelismo relativo de los planos palpados en cada eje con la Ultimaker S5, se aprecian unas tendencias más claras que con la Anet A8.

Lo primero que se puede comprobar es que los valores de paralelismo son mucho mejores en los ejes X e Y que en el eje Z. Además, los valores obtenidos en los ejes X e Y son muy similares entre sí, tanto en valor como en proporciones.

En ninguno de los ejes se aprecia una clara influencia de la temperatura del extrusor o de la velocidad de desplazamiento del cabezal. Sin embargo, en todos los ejes y para la mayoría de combinaciones de temperatura y velocidad, los mejores valores de planitud se obtienen con el espesor de capa más bajo (0,1 mm).

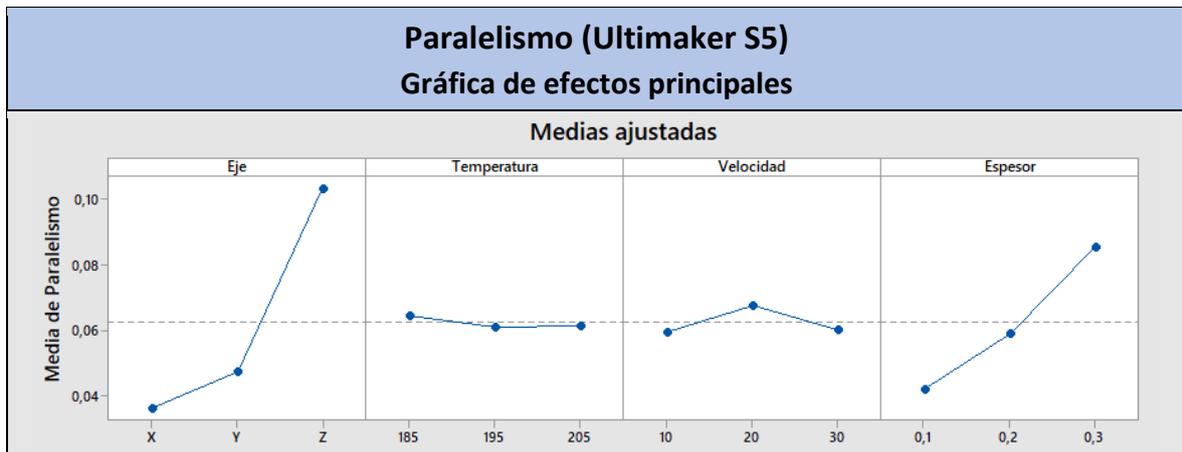


Ilustración 63 – Gráfica de efectos principales en la planitud (Ultimaker S5)

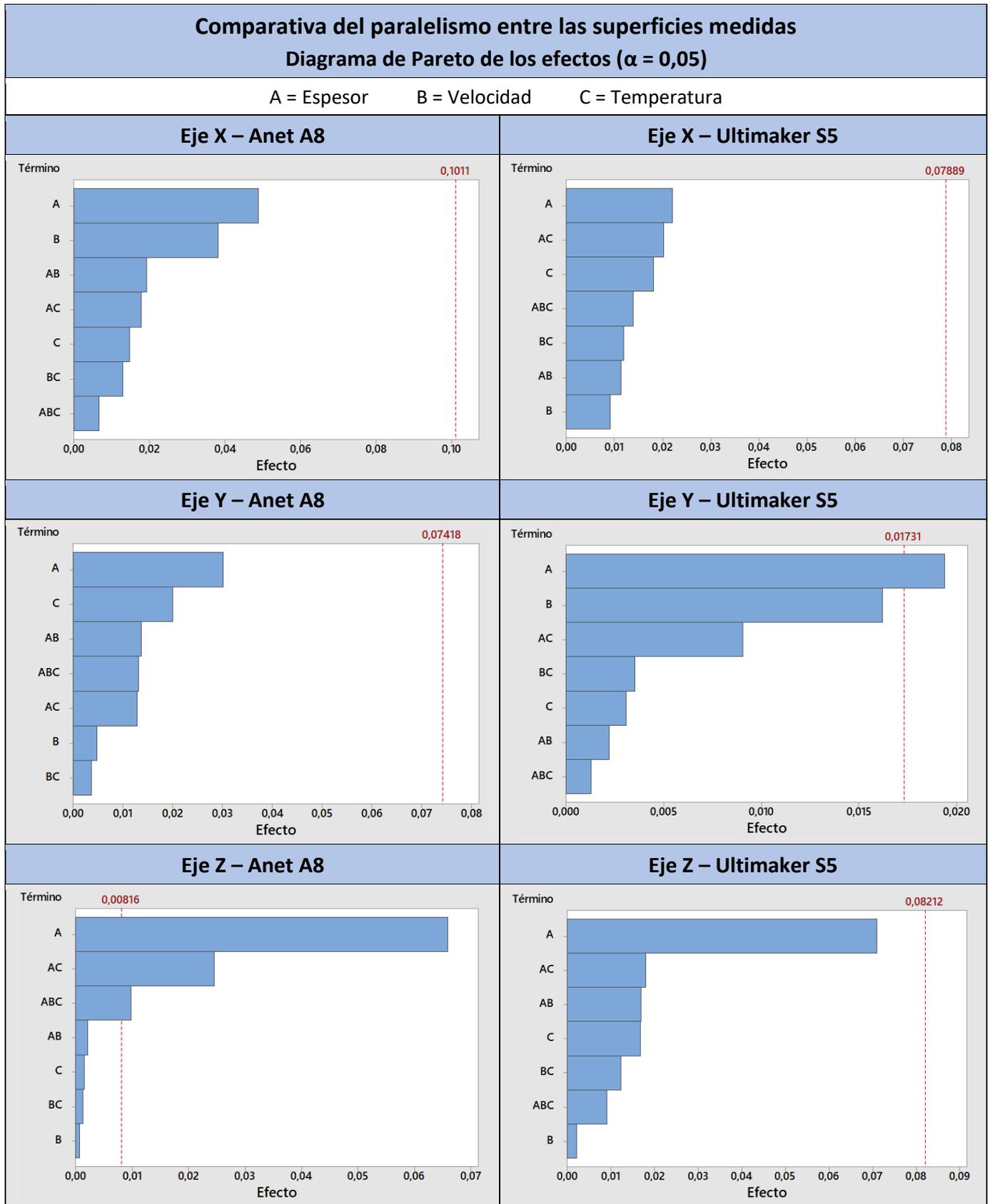


Ilustración 64 – Diagramas de Pareto de los efectos en el paralelismo (Anet A8 y Ultimaker S5)

5.6.3 Elementos geométricos – Perpendicularidad

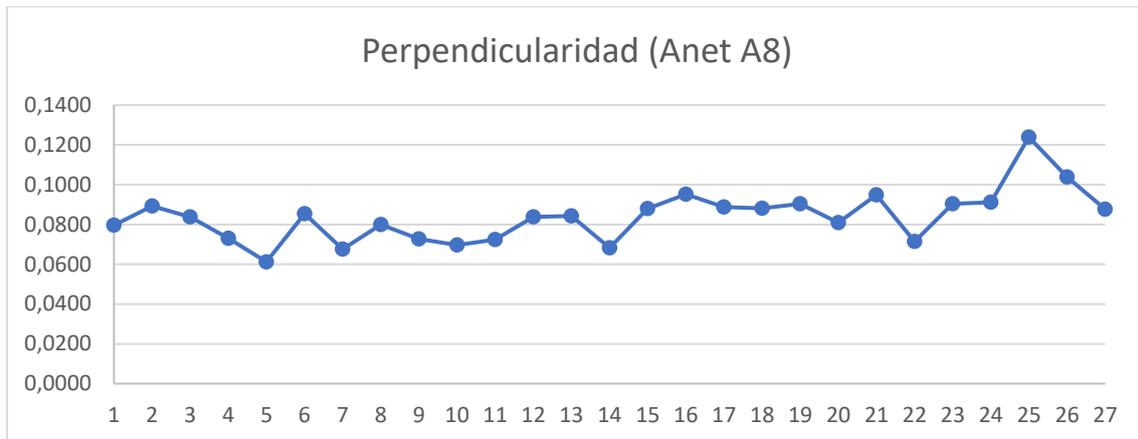


Ilustración 65 – Perpendicularidad general (Anet A8)

Al representar la perpendicularidad entre los planos principales de las probetas obtenidas con la Anet A8, no se aprecia ninguna influencia clara en los resultados con los parámetros de impresión.

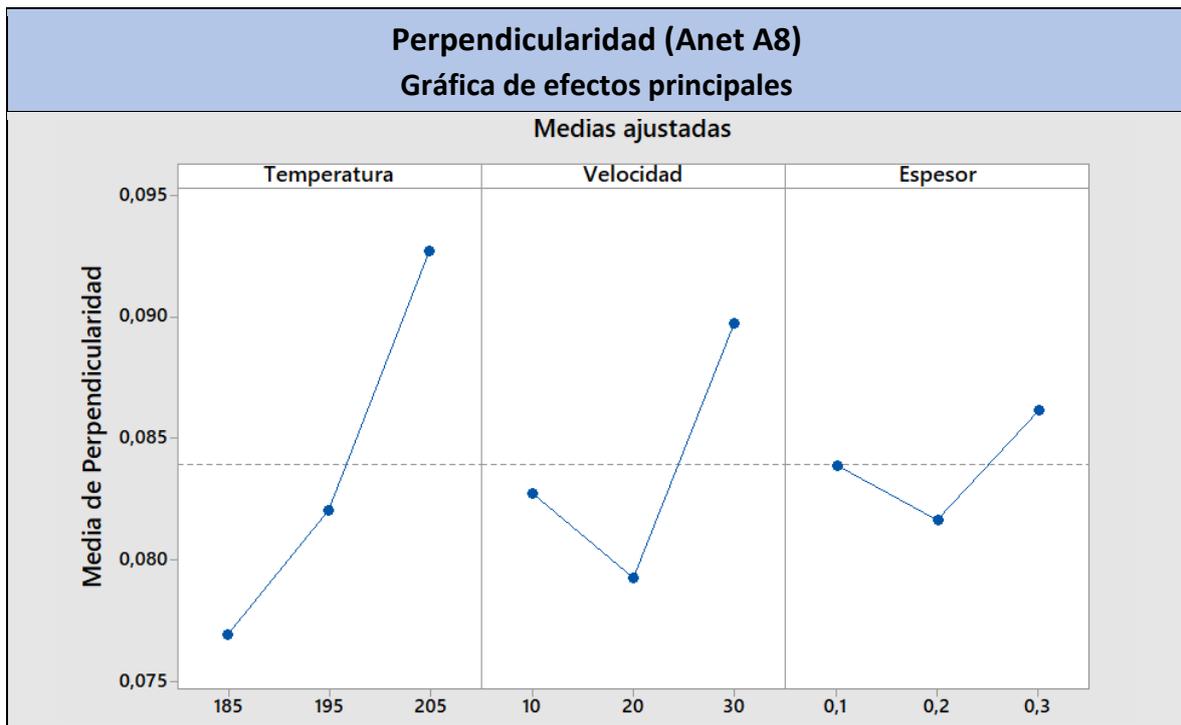


Ilustración 66 – Gráfica de efectos principales en la perpendicularidad (Anet A8)

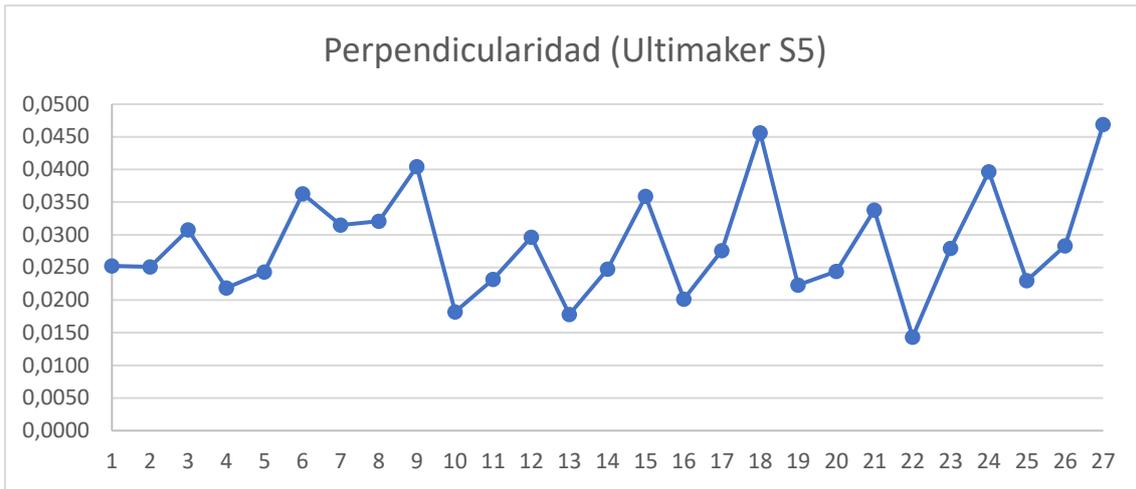


Ilustración 67 – Perpendicularidad general (Ultimaker S5)

Respecto a la perpendicularidad de los planos principales en las probetas obtenidas con la Ultimaker S5, se pueden extraer algunas conclusiones más claras.

En primer lugar, se aprecia la periodicidad en los resultados, obteniendo los mejores valores para el valor más bajo de espesor (0,1 mm) en la mayoría de combinaciones de velocidad y de temperatura.

Además, se ve a simple vista la influencia de la velocidad en los resultados obtenidos. Salvo alguna excepción puntual, cuanto menor es la velocidad de desplazamiento, mejores valores se obtienen.

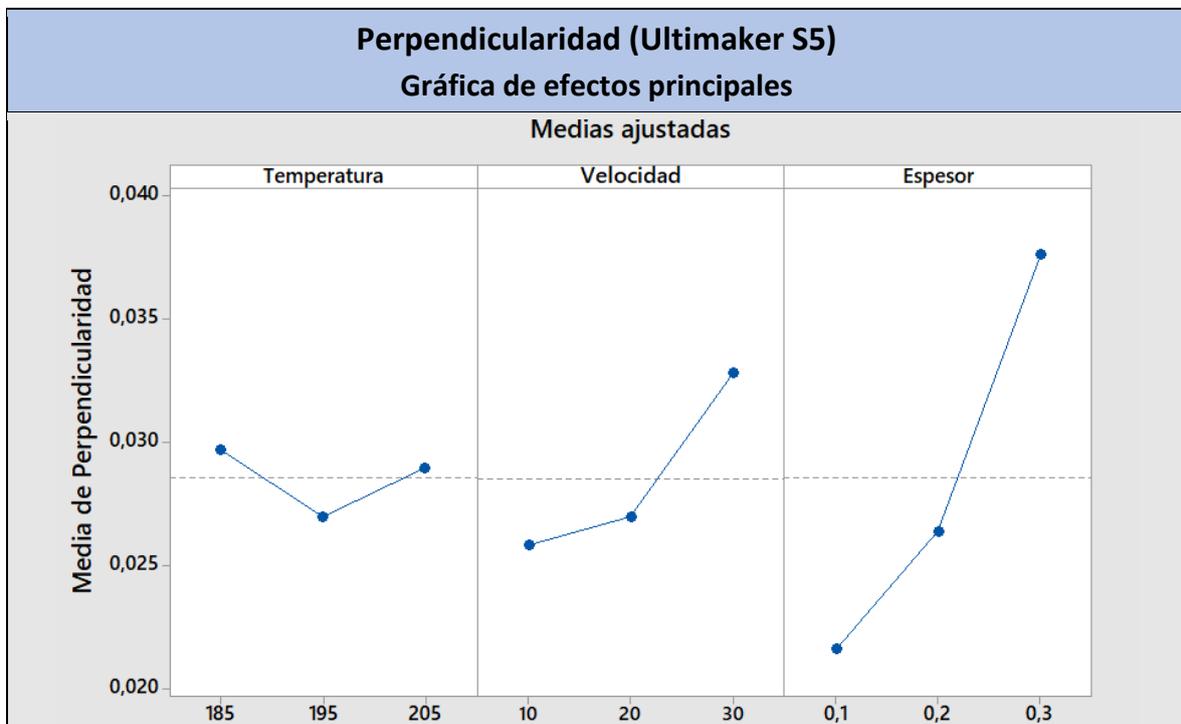


Ilustración 68 – Gráfica de efectos principales en el paralelismo (Ultimaker S5)

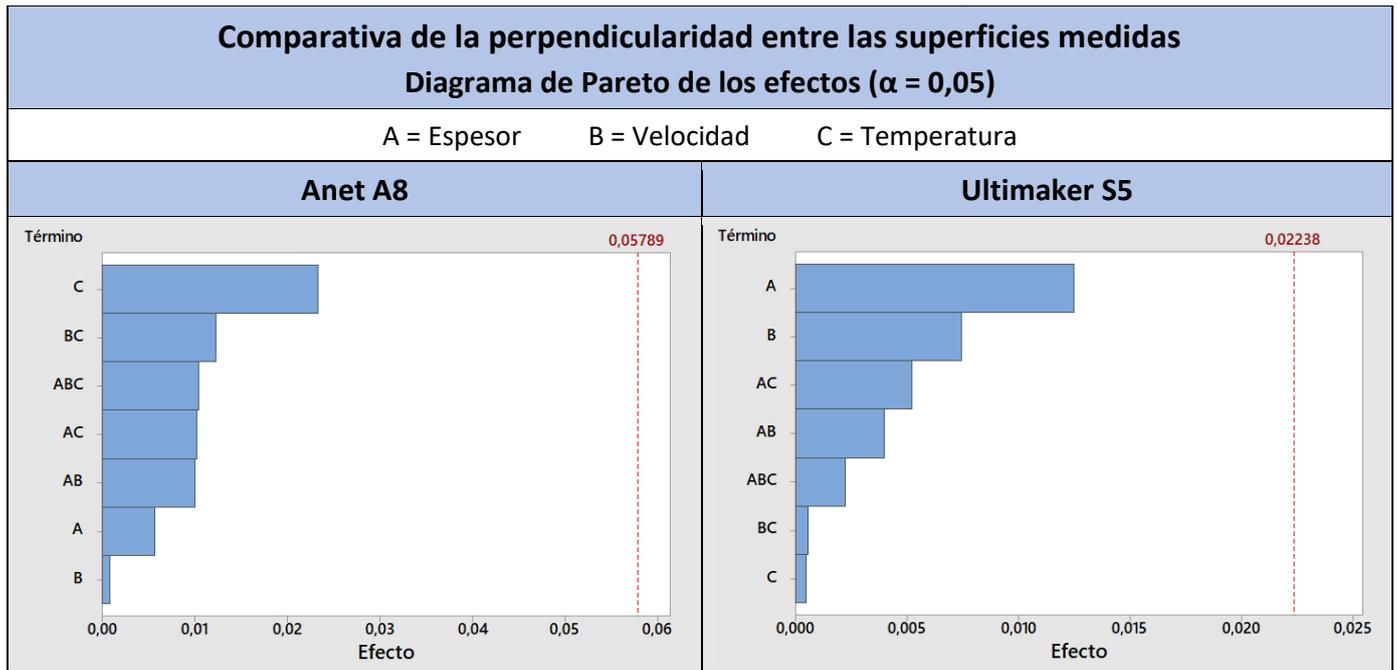


Ilustración 69 – Diagramas de Pareto de los efectos en la perpendicularidad (Anet A8 y Ultimaker S5)

5.6.4 Elementos geométricos – Cilindricidad

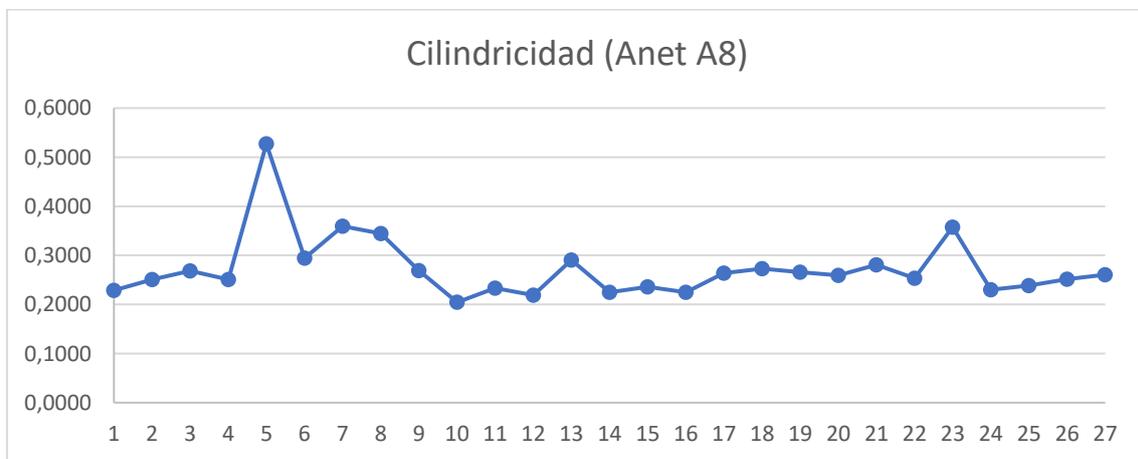


Ilustración 70 – Cilindricidad general (Anet A8)

Al representar la cilindruidad en las probetas obtenidas con la Anet A8, no se aprecia ninguna tendencia clara en los resultados con los parámetros de impresión a excepción de un ligero aumento a 185°C.

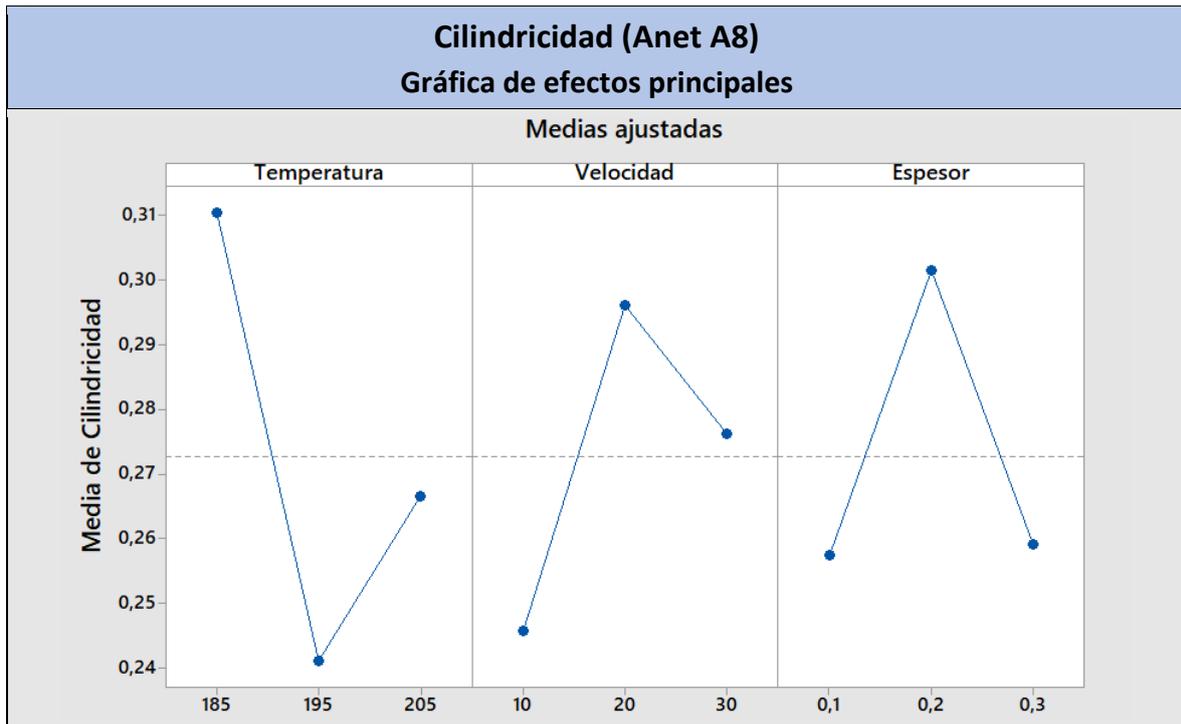


Ilustración 71 – Gráfica de efectos principales en la cilindridad (Anet A8)

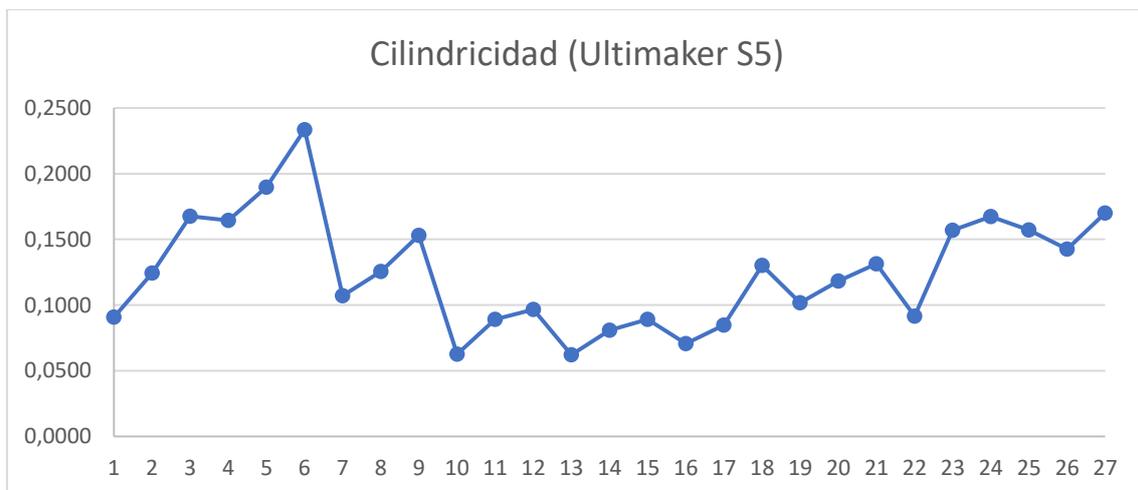


Ilustración 72 – Cilindricidad general (Ultimaker S5)

En cuanto a la cilindridad en las probetas obtenidas con la Ultimaker S5, se pueden extraer algunas conclusiones.

Como ocurre con las cotas directas, los valores más desfavorables aparecen a 185°C, en concreto, con la velocidad intermedia (20 mm/s).

Al igual que ocurre en el análisis de otros elementos, los mejores valores se suelen obtener para el valor más bajo de espesor (0,1 mm) en la mayoría de combinaciones de velocidad y de temperatura.

Además, por regla general, los mejores valores de cilindridad se obtienen a la temperatura intermedia de 195°C.

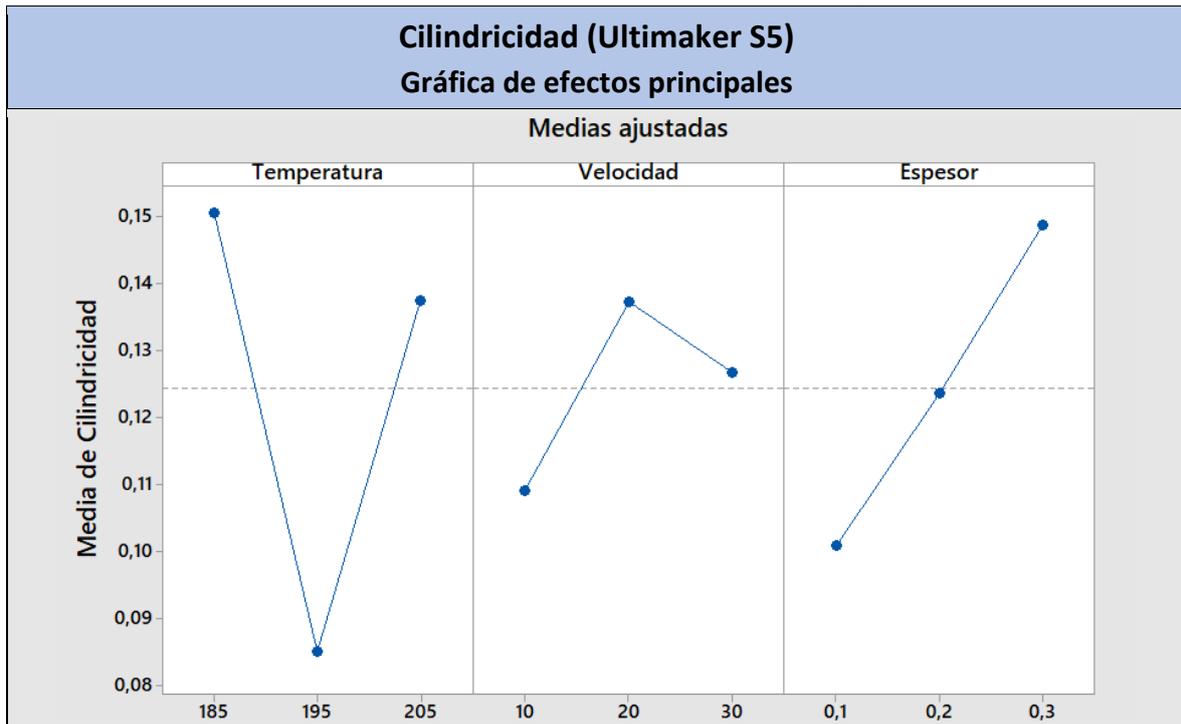


Ilustración 73 – Gráfica de efectos principales en la cilindridad (Ultimaker S5)

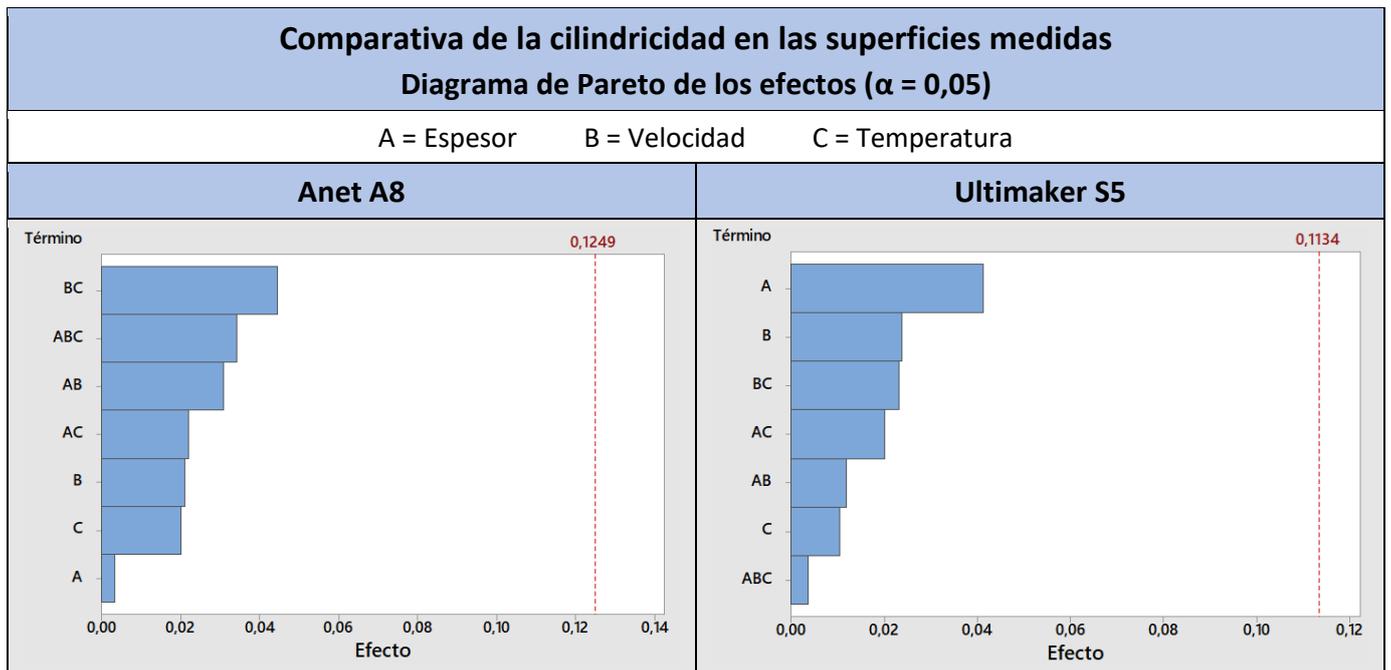


Ilustración 74 – Diagramas de Pareto de los efectos en la cilindridad (Anet A8 y Ultimaker S5)

6. Resultados finales de las inspecciones en microscopio óptico de enfoque variable

Para finalizar con los resultados mostrados en este proyecto, se van a exponer los valores de rugosidad obtenidos en varias superficies de una selección de probetas. En cada superficie se van a realizar 3 mediciones arbitrarias de rugosidad separadas entre sí una distancia suficiente como para considerarlas representativas de valores medios de toda esa área. Se van a realizar mediciones en las siguientes caras:

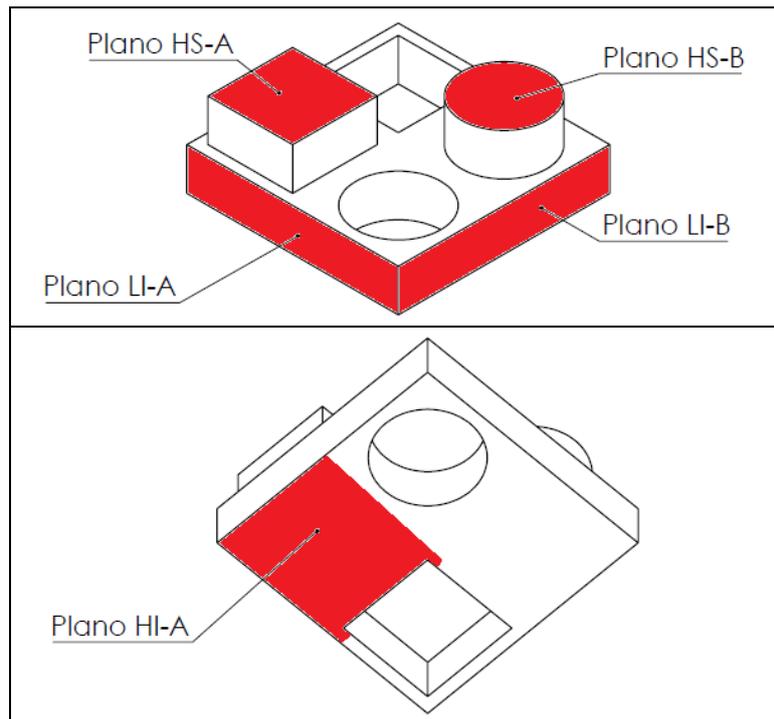


Ilustración 75 – Superficies de la probeta sobre las que se van a realizar mediciones de rugosidad

Como se puede observar en esta imagen, las mediciones de rugosidad con el microscopio óptico de enfoque variable se realizarán capturando los perfiles completos de los planos HS-A, HS-B, LI-A, LI-B y una región (marcada en rojo) del plano HI-A. Estas mediciones se han realizado en la selección de probetas mencionada en el apartado “4.5. Mediciones en el microscopio óptico”.

Todas ellas pertenecen a la segunda repetición del ensayo de interacción de temperatura, velocidad y espesor. Como se ha indicado, son las probetas con los valores máximos y mínimos en cada parámetro, mientras el resto se encuentran en su valor medio.

Influencia de los parámetros en la rugosidad media [μm] – Planos HS-A y HS-B

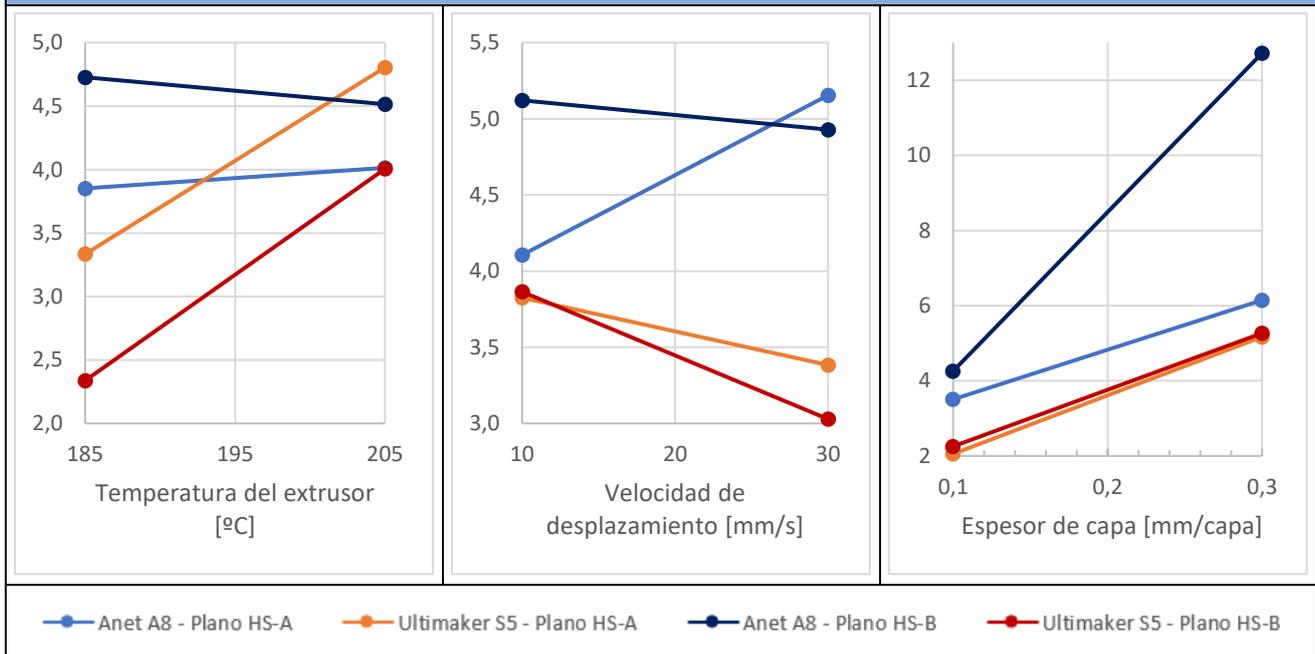


Ilustración 76 – Influencia de los parámetros en la rugosidad media (Planos HS-A y HS-B)

Influencia de los parámetros en la rugosidad media [μm] – Planos LI-A y LI-B

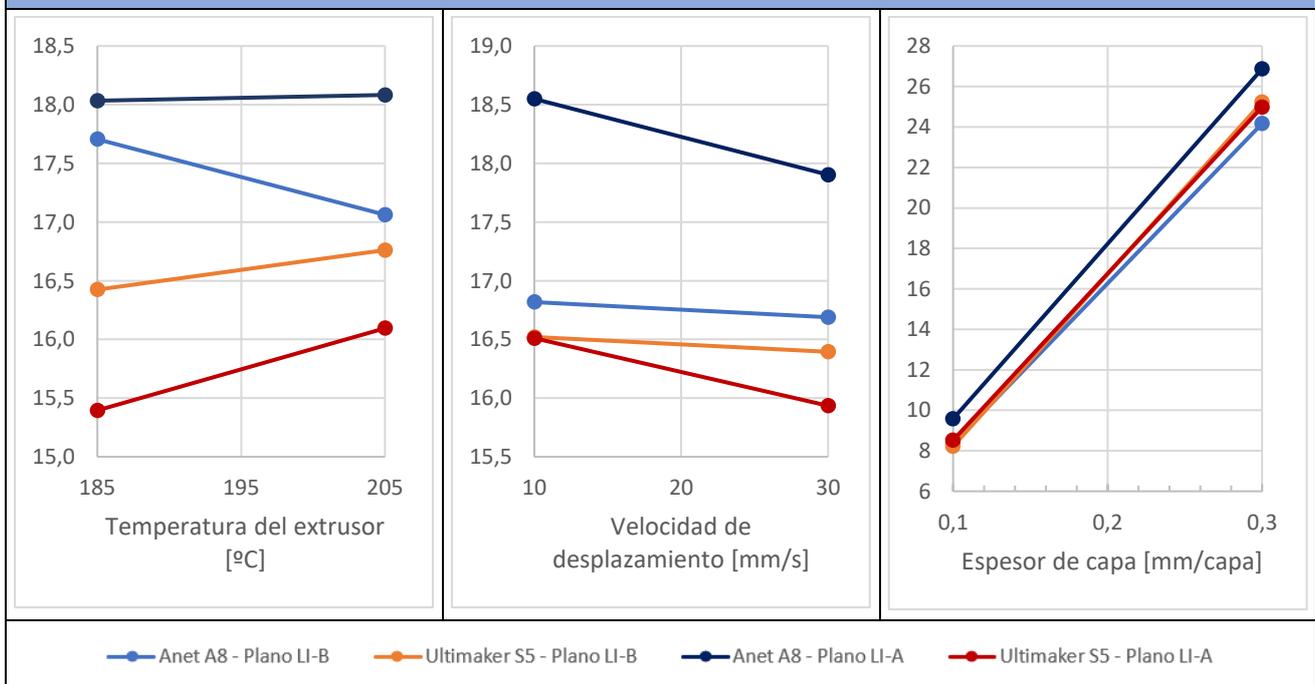


Ilustración 77 – Influencia de los parámetros en la rugosidad media (Planos LI-A y LI-B)

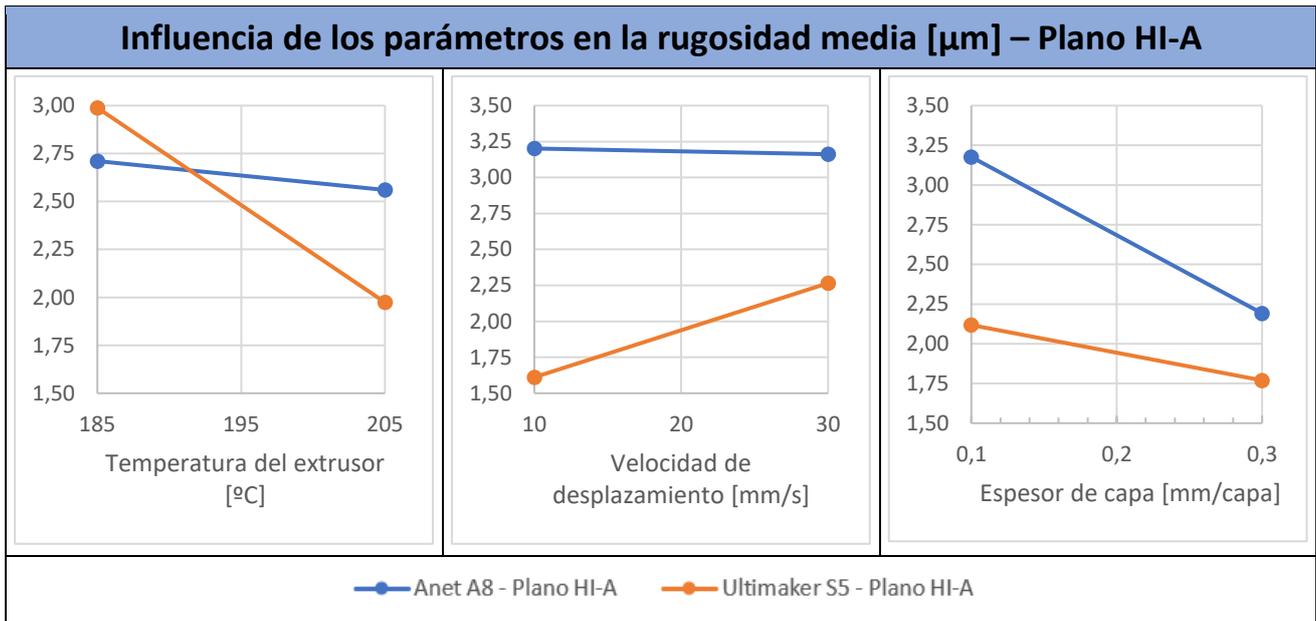


Ilustración 78 – Influencia de los parámetros en la rugosidad media (Planos HI-A)

Representando la rugosidad media en los planos HS-A, HS-B, LI-A y LI-B en las dos impresoras, se pueden extraer varias conclusiones:

- No se aprecia una influencia clara de la temperatura y la velocidad de desplazamiento en la Anet A8.
- A menor temperatura, menor rugosidad media en la Ultimaker S5.
- A mayor velocidad de desplazamiento, menor rugosidad superficial en la Ultimaker S5, llegando al mejor valor de unos 3 μm en el plano HS-B.
- Se observa una clara dependencia con el espesor de capa en ambas impresoras. A menor valor de espesor, menor rugosidad. Los mejores valores de rugosidad se obtienen con un espesor de 0,1 mm en ambas impresoras.

Respecto al plano HI-A en las dos impresoras, se ha considerado por separado al ser el único que entra en contacto directo con la plataforma de impresión:

- No se aprecia una influencia clara de la temperatura y la velocidad de desplazamiento en la Anet A8.
- A mayor temperatura, menor rugosidad media en la Ultimaker S5.
- A menor velocidad de desplazamiento, menor rugosidad superficial en la Ultimaker S5, llegando a un valor de 1,6 μm .
- Se observa una clara dependencia con el espesor de capa en ambas impresoras. A mayor valor de espesor, menor rugosidad. Los mejores valores de rugosidad se obtienen con un espesor de 0,3 mm en ambas impresoras.

7. Conclusiones

Después de realizar el proyecto completo, se han podido extraer numerosas **conclusiones generales**:

En primer lugar, respecto al funcionamiento de las impresoras 3D FDM empleadas, la Ultimaker S5 ha sido mucho más intuitiva y sencilla de emplear. Su sistema de autonivelado funciona realmente bien, es muy silenciosa, no deja ni un solo hilo al realizar las retracciones de material y no ha habido ni un solo problema de adhesión a la placa de impresión. En cambio, la Anet A8 se ha tenido que recalibrar cada 2 o 3 piezas de forma manual, hace mucho más ruido, ha dejado numerosos hilos como consecuencia de las retracciones y, en ocasiones, ha presentado problemas de adhesión del material sobre la placa de impresión.

Analizando en detalle las soluciones constructivas empleadas en la Ultimaker S5 no se aprecia ningún mecanismo o sistema de funcionamiento altamente innovador. Sin embargo, se puede observar una perfecta optimización en el uso de componentes simples, pero de gran calidad. En cualquier caso, la electrónica juega un papel fundamental en este tipo de máquinas, siendo estos los elementos menos visibles, pero en los que más destaca esta impresora.

En una situación ideal con mayor disponibilidad de tiempo, se trataría de realizar el mayor número de repeticiones posibles por pieza. En cualquier caso, debido a que cada superficie se obtiene a través del palpado de varios puntos, los resultados pueden indicar una tendencia clara que se podrá apreciar en apartados posteriores.

Respecto a los **resultados de las mediciones obtenidas en la máquina de medir por coordenadas**:

- Como era de esperar, los resultados del análisis de repetibilidad han sido más favorables en la Ultimaker S5, con una variabilidad similar en los ejes X e Y, y algo más reducida en el eje Z. Además de la variabilidad, la desviación respecto a las cotas nominales ha sido mucho más reducida en esta impresora, llegando a ser hasta 3 veces menos que en la Anet A8. Por lo tanto, no solo es más reducido el error aleatorio, sino que también lo es el sistemático.

- En el análisis de repetibilidad realizado en las probetas fabricadas con la Anet A8 se ha podido diferenciar perfectamente la geometría constructiva de la máquina. La desviación media en el eje Y es muy superior a la del eje X. Esto es debido a que en el movimiento del eje Y la masa a desplazar es mucho mayor, dando lugar a mayores imprecisiones.

- Cuando se calcula la influencia de los parámetros con la media ponderada de las cotas directas y las indirectas, aunque se empleen resultados obtenidos a partir de aproximaciones geométricas, estos valores sirven como una correcta representación global de las posiciones de los elementos principales en las piezas.

- La menor variabilidad en los resultados obtenidos con la Ultimaker S5 en todo el rango de medidas ha facilitado la identificación de un mayor número de parámetros relevantes en el proceso para cada eje de la máquina.

- A 185°C, 20 mm/s y 0,2 mm/capa las desviaciones aumentan considerablemente en las dos impresoras. Si ocurriera solo en una de ellas, podría considerarse puntual o debido a otras causas no analizadas (composición del filamento, geometría constructiva de la máquina, etc.). Sin embargo, el hecho de que este fenómeno ocurra con las dos impresoras y con PLA de diferentes fabricantes, indica una clara tendencia. Además, el valor absoluto de estas desviaciones no es, para nada, despreciable.

- Por regla general, lo más recomendable sería descartar trabajar a temperaturas próximas a 185°C. A esta temperatura, las desviaciones en los resultados se vuelven mucho más cambiantes con pequeñas variaciones en los parámetros de velocidad de desplazamiento y espesor de capa.

- La diferencia en las desviaciones obtenidas entre trabajar a 195°C y 205°C ha sido mucho más reducida que al variar otros parámetros en un nivel. Por ello, con el objetivo de reducir el consumo energético, se recomienda trabajar a una temperatura próxima a unos 195°C.

- El parámetro más influyente de los 3 analizados ha sido el espesor de capa en las piezas obtenidas con las dos impresoras. En general un valor de 0,2 mm/capa ha sido el que ha proporcionado desviaciones más reducidas en las dos máquinas.

- En la máquina Anet A8 la velocidad no suele ser un parámetro muy influyente, a excepción del valor absoluto de las desviaciones en el eje Y. En este caso, tanto la velocidad como sus interacciones con el resto de parámetros juega un papel muy relevante. Este fenómeno concuerda con el apunte que se ha realizado anteriormente sobre la geometría constructiva de esta máquina: para desplazar el eje Y, es necesario mover elementos de mayor peso. Por lo tanto, diferentes velocidades implicarán mayores cambios en las aceleraciones necesarias.

- En cuanto a los valores absolutos de las desviaciones en los ejes X e Y con la Ultimaker S5, los parámetros más relevantes han sido el espesor de capa, la velocidad y la interacción de estos dos.

- Tanto en las desviaciones nominales como en las absolutas en el eje Z con la Ultimaker S5, el parámetro más influyente ha sido el espesor de capa.

- En la máquina Ultimaker S5, en general, a mayor velocidad de desplazamiento, menores desviaciones se obtienen (tanto nominales como en valor absoluto). Este resultado es sorprendente, puesto que lo más intuitivo es pensar que la precisión aumentará al disminuir la velocidad. Sin embargo, esta máquina ha sido diseñada para ser capaz de trabajar correctamente a velocidades mucho mayores. Por lo tanto, tiene sentido obtener este resultado.

Respecto a la **rugosidad superficial media analizada**:

- Como es de esperar, los menores valores de rugosidad se obtienen en el plano de la base de la pieza (plano HI-A). Esto es debido a que, en ambas impresoras, la primera capa de material se deposita sobre una placa de borosilicato, el cual se calienta a una temperatura de 50°C para facilitar la adhesión de la capa inicial. El comportamiento de la rugosidad media en este plano es inverso al resto de los planos (menor rugosidad a mayor temperatura, menor velocidad y mayor espesor).

- En los planos de las paredes laterales (planos LI-A y LI-B) los valores de rugosidad son mucho más elevados que en el resto de los planos. La principal causa es la alta dependencia con el espesor de capa, que es prácticamente el único condicionante en este tipo de planos. Por lo tanto, para mejorar la rugosidad superficial en planos verticales, disminuir el espesor de capa será la acción más relevante. El resto de parámetros son mucho menos influyentes.
- En los planos de las superficies superiores (planos HS-A y HS-B) la rugosidad media es menor cuanto menor es la temperatura del extrusor, mayor es la velocidad de desplazamiento y menor es el espesor de capa. Los menores valores de rugosidad media se obtienen con un espesor de capa de 0,1 mm y con la impresora Ultimaker S5.
- Por regla general, en la Ultimaker S5 se obtienen menores valores de rugosidad, con valores más uniformes entre planos similares y se aprecia con una facilidad mucho mayor su dependencia con los 3 parámetros de impresión seleccionados. En la Anet A8 solo el espesor de capa se puede considerar como un parámetro determinante.

Para finalizar con las conclusiones, hay un **aspecto muy importante a tener en cuenta**. En este proyecto se ha empleado una geometría sencilla y de pequeño tamaño. Se ha diseñado una probeta de baja altura y con salientes y agujeros alineados exclusivamente con el eje Z, pero sin planos inclinados, grandes superficies ni agujeros o salientes alineados en direcciones horizontales. Es decir, estos resultados no se pueden considerar generales ni ser extrapolados a geometrías particulares con características especiales, es recomendable diseñar un patrón similar que permita determinar influencias directamente relacionadas con otras geometrías.

8. Bibliografía y referencias

La información obtenida para el desarrollo de los diferentes elementos del proyecto tiene las siguientes referencias:

A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters [Artículo] / aut. Ruben Bayu Kristiawan [y otros]. - [s.l.] : Open Engineering, 2021.

Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors [Artículo] / aut. Muammel M.Hanona, László Zsidai y Quanjin Ma. - [s.l.] : MaterialsToday: Proceedings, 2021.

Apuntes de "Estadística" [Libro] / aut. Marín Escuer Teresa Irene [y otros]. - [s.l.] : Universidad de Zaragoza, Curso 2017-2018.

Apuntes de "Fabricación Integrada" [Libro] / aut. Royo Vázquez Emilio Julián, Santolaria Mazo Jorge y Dieste Marcial José Antonio. - [s.l.] : Universidad de Zaragoza, Curso 2020 - 2021.

Apuntes de "Tecnologías de Fabricación I" [Libro] / aut. Royo Vázquez Emilio Julián, Oliveros Colay María José y Lope Domingo Miguel Ángel. - [s.l.] : Universidad de Zaragoza, Curso 2019 - 2020.

Dimensional accuracy analysis of simples printed in delta and cartesian kinematic three dimensional printers [Artículo] / aut. Erkan Incekar, Hüseyin Kaygisiz y Sebahattin Babur. - [s.l.] : JOURNAL of POLYTECHNIC, 2021.

Effect of Layer Thickness and Printing Orientation on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 3D Printed Porous Samples for Bone Tissue Engineering [Artículo] / aut. Arghavan Farzadi [y otros]. - [s.l.] : PLOS ONE, 2014.

Información del desarrollador sobre el software "Ultimaker Cura" [En línea] / aut. Ultimaker. - <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura>.

Información del fabricante sobre el microscopio "Alicona InfiniteFocus SL" [En línea] / aut. Bruker Alicona. - <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocusl/>.

Información del fabricante sobre la impresora 3D FDM "Anet A8" [En línea] / aut. Anet3D. - <https://anet3d.com/pages/a8>.

Información del fabricante sobre la impresora 3D FDM "Ultimaker S5" [En línea] / aut. Ultimaker. - https://ultimaker.com/es/3d-printers/ultimaker-s5?utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=2022_Alwayson_srengineer_traffi_c_do_ES.

Anexo I: Índice de ilustraciones

Ilustración 1 - Anet A8 (izquierda) y Ultimaker S5 (derecha).....	4
Ilustración 2 – ZEISS WMM850 (izquierda) y Alicona InfiniteFocus SL (derecha).....	5
Ilustración 3 – Esquema de extrusión en una impresora 3D FDM.....	7
Ilustración 4 – Filamento BASF (izquierda) y filamento GEEETECH (derecha).....	9
Ilustración 6 – Modelado 3D de la probeta principal.....	11
Ilustración 6 – Ejemplo de preparación del archivo en “G code” de una probeta	16
Ilustración 7 – Anet A8 modificada (izquierda) y Ultimaker S5 (derecha).....	17
Ilustración 8 – Pieza obtenida en Anet A8 modificada (izquierda) y en Ultimaker S5 (derecha)	17
Ilustración 9 – Palpador de calibración (izquierda) y palpador para las mediciones (derecha) .	18
Ilustración 10 – Calibración con el palpador de calibración (izquierda) y con el palpador para las mediciones (derecha).....	18
Ilustración 11 – Mando de controles de la MMC.....	19
Ilustración 12 – Modelado 3D del utillaje con una pieza (izquierda) y piezas del utillaje fabricado (derecha).....	19
Ilustración 13 – Pieza posicionada con su sujeción en la MMC	19
Ilustración 14 – Posiciones de las probetas en el microscopio	20
Ilustración 15 – Desviación media por eje en cada impresora	25
Ilustración 16 – Rango a partir del I.C. definido en cada impresora	25
Ilustración 17 - Desviación de las cotas directas por ejes (Anet A8).....	26
Ilustración 18 - Desviación de las cotas directas por ejes en valor absoluto (Anet A8).....	27
Ilustración 19 - Desviación media de los puntos palpados (Anet A8).....	27
Ilustración 20 - Desviación de las cotas directas por ejes (Ultimaker S5).....	28
Ilustración 21 - Desviación absoluta de las cotas directas por ejes (Ultimaker S5)	28
Ilustración 22 - Desviación media de los puntos palpados (Ultimaker S5)	29
Ilustración 23 - Desviación de las cotas de las aristas por ejes (Anet A8).....	30
Ilustración 24 - Desviación absoluta de las cotas de las aristas por ejes (Anet A8).....	30
Ilustración 25 - Desviación de las cotas de las aristas por ejes (Ultimaker S5).....	31
Ilustración 26 - Desviación absoluta de las cotas de las aristas por ejes (Ultimaker S5)	32
Ilustración 27 - Desviación de las cotas de los vértices por ejes (Anet A8)	32
Ilustración 28 – Desviación absoluta de las cotas de los vértices por ejes (Anet A8).....	33
Ilustración 28 - Desviación de las cotas de los vértices por ejes (Ultimaker S5).....	34
Ilustración 29 – Desviación absoluta de las cotas de los vértices por ejes (Ultimaker S5)	34
Ilustración 31 - Desviación de las cotas directas e indirectas por ejes (Anet A8)	35
Ilustración 31 – Desviación absoluta de las cotas directas e indirectas por ejes (Anet A8)	35
Ilustración 33 – Gráfica de efectos principales en la desviación de las cotas directas e indirectas (Anet A8)	36
Ilustración 34 – Gráfica de efectos principales en la desviación absoluta de las cotas directas e indirectas (Anet A8).....	36
Ilustración 35 – Gráfica de efectos principales en la desviación de los puntos palpados de las cotas directas e indirectas (Anet A8)	36
Ilustración 36 – Diagramas de Pareto de los efectos en las desviaciones de las cotas directas e indirectas (Anet A8).....	37
Ilustración 37 – Diagramas de Pareto de los efectos en la desviación de los puntos palpados de las cotas directas e indirectas (Anet A8)	38

Ilustración 38 - Gráfica de efectos principales en la desviación de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5).....	39
Ilustración 39 – Gráfica de efectos principales en la desviación absoluta de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5).....	39
Ilustración 40 – Gráfica de efectos principales en la desviación de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5).....	40
Ilustración 41 – Gráfica de efectos principales en la desviación absoluta de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5).....	40
Ilustración 42 – Gráfica de efectos principales en la desviación de los puntos palpados de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5).....	40
Ilustración 43 – Diagramas de Pareto de los efectos en las desviaciones de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5).....	41
Ilustración 44 – Diagramas de Pareto de los efectos en la desviación de los puntos palpados de las cotas directas e indirectas (Ultimaker S5)	42
Ilustración 45 - Desviación de las distancias relativas por ejes (Anet A8)	43
Ilustración 46 – Desviación absoluta de las distancias relativas por ejes (Anet A8).....	43
Ilustración 47 – Gráfica de efectos principales en las desviaciones de las distancias relativas (Anet A8)	44
Ilustración 48 – Gráfica de efectos principales en las desviaciones absolutas de las distancias relativas (Anet A8).....	44
Ilustración 49 – Diagramas de Pareto de los efectos en las desviaciones de las distancias relativas (Anet A8).....	45
Ilustración 50 - Desviación de las distancias relativas por ejes (Ultimaker S5).....	46
Ilustración 51 – Desviación absoluta de las distancias relativas por ejes (Ultimaker S5)	46
Ilustración 52 – Gráfica de efectos principales en las desviaciones de las distancias relativas (Ultimaker S5).....	47
Ilustración 53 – Gráfica de efectos principales en las desviaciones absolutas de las distancias relativas (Ultimaker S5).....	47
Ilustración 54 – Diagramas de Pareto de los efectos en las desviaciones de las distancias relativas (Ultimaker S5).....	48
Ilustración 55 - Planitud por ejes (Anet A8)	50
Ilustración 56 – Gráfica de efectos principales en la planitud (Anet A8)	50
Ilustración 57 - Planitud por ejes (Ultimaker S5)	51
Ilustración 58 – Gráfica de efectos principales en la planitud (Ultimaker S5)	51
Ilustración 59 – Diagramas de Pareto de los efectos en la planitud (Anet A8 y Ultimaker S5) ..	52
Ilustración 60 - Paralelismo por ejes (Anet A8).....	53
Ilustración 61 – Gráfica de efectos principales en el paralelismo (Anet A8)	53
Ilustración 62 - Paralelismo por ejes (Ultimaker S5).....	54
Ilustración 63 – Gráfica de efectos principales en la planitud (Ultimaker S5)	54
Ilustración 64 – Diagramas de Pareto de los efectos en el paralelismo (Anet A8 y Ultimaker S5)	55
Ilustración 65 – Perpendicularidad general (Anet A8)	56
Ilustración 66 – Gráfica de efectos principales en la perpendicularidad (Anet A8).....	56
Ilustración 67 – Perpendicularidad general (Ultimaker S5)	57
Ilustración 68 – Gráfica de efectos principales en el paralelismo (Ultimaker S5).....	57
Ilustración 69 – Diagramas de Pareto de los efectos en la perpendicularidad (Anet A8 y Ultimaker S5).....	58
Ilustración 70 – Cilindricidad general (Anet A8).....	58

Ilustración 71 – Gráfica de efectos principales en la cilindridad (Anet A8).....	59
Ilustración 72 – Cilindridad general (Ultimaker S5).....	59
Ilustración 73 – Gráfica de efectos principales en la cilindridad (Ultimaker S5).....	60
Ilustración 74 – Diagramas de Pareto de los efectos en la cilindridad (Anet A8 y Ultimaker S5)	60
Ilustración 75 – Superficies de la probeta sobre las que se van a realizar mediciones de rugosidad.....	61
Ilustración 76 – Influencia de los parámetros en la rugosidad media (Planos HS-A y HS-B)	62
Ilustración 77 – Influencia de los parámetros en la rugosidad media (Planos LI-A y LI-B).....	62
Ilustración 78 – Influencia de los parámetros en la rugosidad media (Planos HI-A)	63
Ilustración 79 – Interruptor de encendido (izquierda) y mosfet de regulación de la corriente (derecha)	73
Ilustración 80 – Tensor eje X (izquierda) y tensor eje Y (derecha).....	73
Ilustración 81 – Cilindros de goma y rosca en una esquina de la plataforma de impresión	74
Ilustración 82 – Cabezal rediseñado	74
Ilustración 83 – Tobera del ventilador de capa (izquierda) y demostración de su flujo con agua (derecha)	75
Ilustración 84 – Alojamientos de los rodamientos para mejorar la sujeción de las varillas roscadas del eje Z.....	75
Ilustración 85 Placa de la plataforma de impresión de borosilicato.....	76
Ilustración 86 – Piezas cónicas para facilitar el giro de la bobina de filamento	76
Ilustración 87 – Funcionamiento de las piezas cónicas en el soporte para el filamento.....	77
Ilustración 88 - Entorno Calypso y elementos definidos para la medición de las probetas	80
Ilustración 89 – Acceso programa IF-MeasureSuite	81
Ilustración 90 – Ventana principal del programa IF-MeasureSuite	81
Ilustración 91 – Acceso al módulo de medición en el programa IF-MeasureSuite.....	82
Ilustración 92 – Visualización del módulo de medición en el programa IF-MeasureSuite	82
Ilustración 93 – Campo de imágenes en el programa IF-MeasureSuite	83
Ilustración 94 – Configuración brillo-contraste en el programa IF-MeasureSuite.....	83
Ilustración 95 – Previsualización de la medición en el programa IF-MeasureSuite.....	84
Ilustración 96 – Reconstrucción 3D superficie en el programa IF-MeasureSuite	84
Ilustración 97 – Sistema de coordenadas en el programa IF-MeasureSuite	85
Ilustración 98 – Mapa de colores superficie en el programa IF-MeasureSuite	85
Ilustración 99 – Acceso al módulo de medición de rugosidad en el programa IF-MeasureSuite	86
Ilustración 100 – Visualización rugosidad en el programa IF-MeasureSuite	86
Ilustración 101 – Lc y Ra en el programa IF-MeasureSuite.....	86
Ilustración 102 – Acceso al módulo de medición de rugosidad en área en el programa IF- MeasureSuite	87
Ilustración 103 – Muestra de resultados de rugosidad en área en el programa IF-MeasureSuite	87
Ilustración 104 – Resultados del análisis en la superficie HS-A (Anet A8)	89
Ilustración 105 – Resultados del análisis en la superficie HS-B (Anet A8)	90
Ilustración 106 – Resultados del análisis en la superficie HI-A (Anet A8)	91
Ilustración 107 – Resultados del análisis en la superficie LI-A (Anet A8).....	92
Ilustración 108 – Resultados del análisis en la superficie LI-B (Anet A8)	93
Ilustración 109 – Resultados del análisis en la superficie HS-A (Ultimaker S5)	94
Ilustración 110 – Resultados del análisis en la superficie HS-B (Ultimaker S5).....	95
Ilustración 111 – Resultados del análisis en la superficie HI-A (Ultimaker S5)	96

Ilustración 112 – Resultados del análisis en la superficie LI-A (Ultimaker S5)	97
Ilustración 113 – Resultados del análisis en la superficie LI-B (Ultimaker S5)	98
Ilustración 114 – Gráfica de interacción en las desviaciones de las cotas directas (Anet A8) ..	131
Ilustración 115 – Gráfica de interacción en las desviaciones de las cotas directas (Ultimaker S5)	132
Ilustración 116 – Gráfica de interacción en las desviaciones absolutas de las cotas directas (Anet A8)	132
Ilustración 117 – Gráfica de interacción en las desviaciones absolutas de las cotas directas (Ultimaker S5).....	133
Ilustración 118 – Gráfica de interacción en las desviaciones de los puntos palpados (Anet A8)	133
Ilustración 119 – Gráfica de interacción en las desviaciones de los puntos palpados (Ultimaker S5).....	134

Anexo II: Modificaciones sobre la máquina FDM “Anet A8” empleada

Una de las dos impresoras 3D de tipo FDM a emplear va a ser la “Anet A8”, una impresora de ejes cartesianos con una geometría del tipo “Prusa i3”. Esta impresora es una máquina de bajo coste que permite obtener unos buenos resultados si se realiza un correcto montaje y calibración. Sin embargo, el hecho de que sea de bajo coste se traduce en unas prestaciones limitadas y unas funcionalidades poco optimizadas. Por ello, en esta impresora se han realizado las siguientes mejoras:

- Mejoras de seguridad: Se ha añadido un interruptor de encendido y apagado. Originalmente, la impresora se encendía en cuanto se enchufaba a la corriente. También se han añadido 2 mosfet con el objetivo de regular los posibles picos de corriente en los cables de alimentación de las resistencias que van de la placa base a la cama caliente y al extrusor.

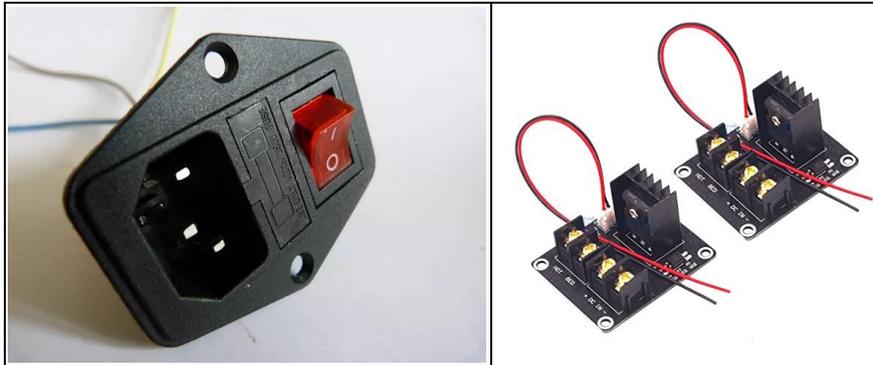


Ilustración 79 – Interruptor de encendido (izquierda) y mosfet de regulación de la corriente (derecha)

- Mejoras de calibración: Se han añadido tensores en las correas de los ejes X e Y. En ambos casos, son estructuras impresas en 3D sujetas con tornillos que permiten alargar o acortar la distancia entre poleas, permitiendo tensar las correas.

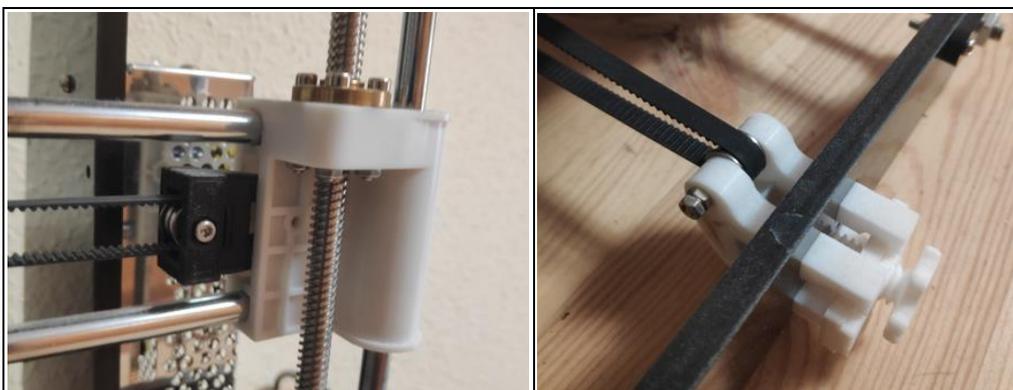


Ilustración 80 – Tensor eje X (izquierda) y tensor eje Y (derecha)

También se han sustituido los muelles que sujetaban las esquinas de la placa de impresión por unos tacos de goma que permiten mantener durante más tiempo la correcta calibración del eje Z. Además, se han añadido unas roscas más ergonómicas para estas esquinas.



Ilustración 81 – Cilindros de goma y rosca en una esquina de la plataforma de impresión

- Mejoras de calidad en las impresiones: Se ha rediseñado toda la zona del cabezal, redistribuyendo los elementos principales e instalando un tubo de extrusor “E3D V6” en lugar del original, mejorando tanto el calentamiento del filamento como la refrigeración en su zona justo anterior y en el material depositado. En esta redistribución se ha ubicado el motor del extrusor en una posición mucho más favorable que la original, centrando mucho más el peso de este elemento respecto a los apoyos del eje sobre el que se monta. Además, se ha sustituido el ventilador de refrigeración del extrusor por uno de menor tamaño y con un enfoque más efectivo y que produce menos vibraciones.

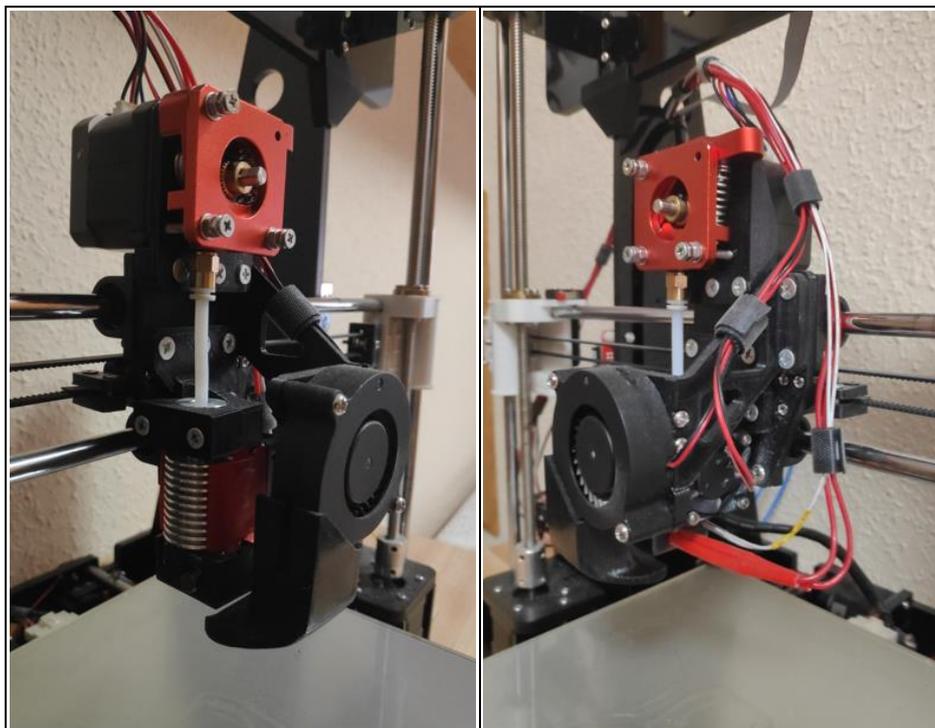


Ilustración 82 – Cabezal rediseñado

Dentro de estos cambios en el cabezal, destacar que se ha realizado un rediseño en la tobera que orienta el aire procedente del ventilador de capa. Originalmente, era una tobera con formas muy cuadradas y un estrechamiento abrupto. En este rediseño se han definido 3 canales en su interior y se han curvado las paredes al máximo para orientar, de la forma más eficiente posible, el flujo a la zona central de la boquilla.



Ilustración 83 – Tobera del ventilador de capa (izquierda) y demostración de su flujo con agua (derecha)

También se han instalado unas pequeñas estructuras con un rodamiento en la parte superior de las barras roscadas del eje Z con la finalidad de reducir desviaciones en altura en las impresiones.



Ilustración 84 – Alojamiento de los rodamientos para mejorar la sujeción de las varillas roscadas del eje Z

Además, se ha colocado una placa de borosilicato sobre la superficie de impresión que mejora en gran cantidad la calidad de la superficie inferior de las impresiones.

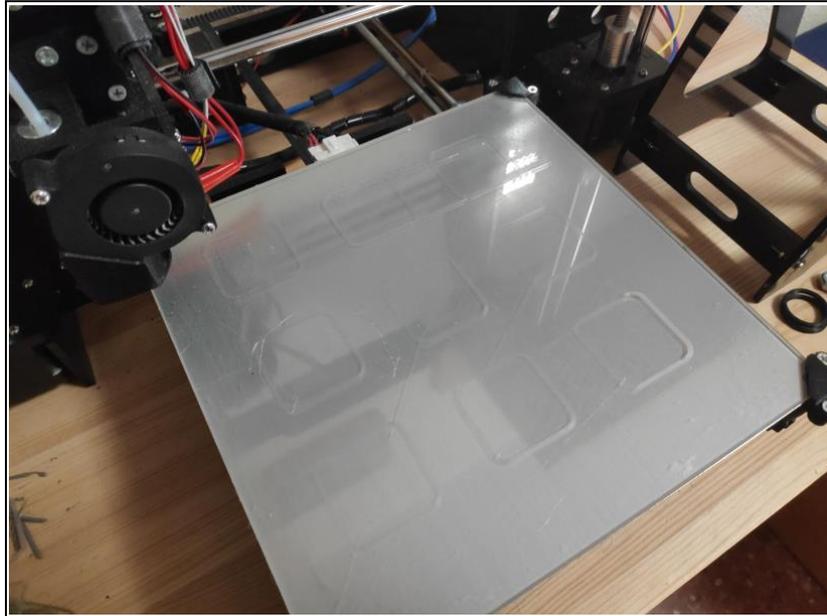


Ilustración 85 Placa de la plataforma de impresión de borosilicato

Otra mejora que es habitual subestimar consiste en facilitar el giro de la bobina de material mediante algún tipo de pieza auxiliar. En este caso, se han diseñado unos soportes cónicos con rodamientos insertados que permiten un giro mucho más suave de bobinas de diferente diámetro interior (rango de tamaños más común entre las bobinas comerciales). De este modo, se evitan tirones en el material que se traducirían en reducciones puntuales en el flujo de material extruido.



Ilustración 86 – Piezas cónicas para facilitar el giro de la bobina de filamento



Ilustración 87 – Funcionamiento de las piezas cónicas en el soporte para el filamento

Anexo III: Procedimiento de medición en la MMC “ZEISS WMM850”

En los apartados principales del proyecto se ha explicado de forma aproximada el procedimiento de medición. Por ello, con la finalidad de aclarar las fases del mismo, se va a exponer de forma completa y esquematizada:

1. Encendido de la máquina de medir por coordenadas: Parece obvio y en cualquier máquina hay que hacerlo antes de operar en ella, pero en esta es especialmente importante realizar la secuencia correctamente y esperar unos segundos a que se cargue el circuito para poder emplearla correctamente.
2. Selección del perfil de trabajo: Abrir o crear el archivo con los datos o inspecciones realizadas anteriormente en el software específico de la misma “Calypso”.
3. Si no está colocado, cambiar el palpador colocado en el cabezal por el palpador de referencia: Se coloca un palpador vertical de calibración, con una bola en su punta de 8 mm de diámetro. En caso de tener que extraer cualquier otro palpador colocado en el cabezal de la máquina, es crítico seguir las indicaciones del programa. Para ello, es muy importante colocar una o las dos manos en una posición segura para que no caiga el palpador sobre la mesa al soltarse. El programa de control emite unos pitidos y una cuenta atrás para que no ocurra ningún accidente, puesto que podría tener unas consecuencias muy negativas que cualquier elemento de tal precisión se llevara un golpe, por pequeño que pudiera parecer.
4. Calibrar la máquina con el palpador de calibración y una esfera-patrón de referencia: Se indica en el programa dónde se encuentra ubicada la esfera patrón dentro de la mesa de medición y se aproxima manualmente el palpador de referencia a la parte superior de la misma. La aproximación del palpador a la esfera se ha de realizar a una velocidad reducida y con mucho cuidado, observando en detalle el movimiento del mismo. En cuanto se realice el primer contacto sobre la parte superior de la esfera, la máquina pasará a un funcionamiento automático en el que palpará múltiples puntos de la esfera-patrón para determinar su ubicación y verificar las dimensiones del palpador.
5. Intercambiar el palpador de referencia por el de medición: Una vez haya terminado la calibración con el palpador de referencia y la esfera, acercar el cabezal a la posición de los mandos de la máquina y realizar el cambio de palpador de la misma manera que se ha descrito anteriormente. Es importante seleccionar el nombre correcto del palpador que se está colocando en la máquina de la lista desplegable.
6. Medir la esfera de referencia con el palpador de medición: De esta manera, como anteriormente ya se ha verificado la posición exacta de la esfera de referencia, comprueba la geometría del palpador de medición. El procedimiento es muy similar al que se ha realizado con el palpador de referencia pero, en este caso, hay que seleccionar la opción de “Medir palpador”. Se aproxima el palpador a la parte superior de la esfera y, en cuanto realice el primer contacto, la máquina comenzará a realizar mediciones sobre la esfera de forma automática.
7. Realizar las mediciones necesarias de forma manual: En este momento, la máquina estaría completamente lista para realizar mediciones manejando el cabezal con las palancas de mando. Estas mediciones e las caras de la pieza se deben realizar a velocidad reducida y con mucho

cuidado de no dañar el palpador ante cualquier contacto indeseado o a una velocidad indebida. Es muy importante definir un sistema de referencia local a partir de 3 planos de referencia de la pieza. De este modo, si se ha movido (por error o de forma intencionada) la pieza dentro de la zona de trabajo de la máquina, se puede solucionar simplemente volviendo a medir de forma manual estos 3 planos.

8. Definir los elementos indirectos de la geometría: A pesar de que ya se está midiendo directamente, conviene especificar la toma de datos de la posición de los planos definidos (por cuestiones del software). A partir de este momento, se pueden definir otros elementos de la geometría (aristas y vértices como intersecciones, planitud, cilindricidad, perpendicularidad, paralelismo, etc.).

9. Seleccionar todos los elementos a medir y ejecutar la medición en modo automático mediante la opción “Arranque CNC”: La primera vez que se realice esta ejecución conviene ajustar una velocidad reducida de movimiento y estar encima de los controles en caso de que sea necesario parar el proceso ante un contacto inesperado del palpador. Una vez se haya verificado que se realizan todas las mediciones correctamente y de forma segura, se puede ejecutar este modo automático de medición a mayor velocidad de movimiento.

10. Guardar los resultados obtenidos: Asegurarse de que los resultados mostrados son los deseados y guardar todos los archivos necesarios.

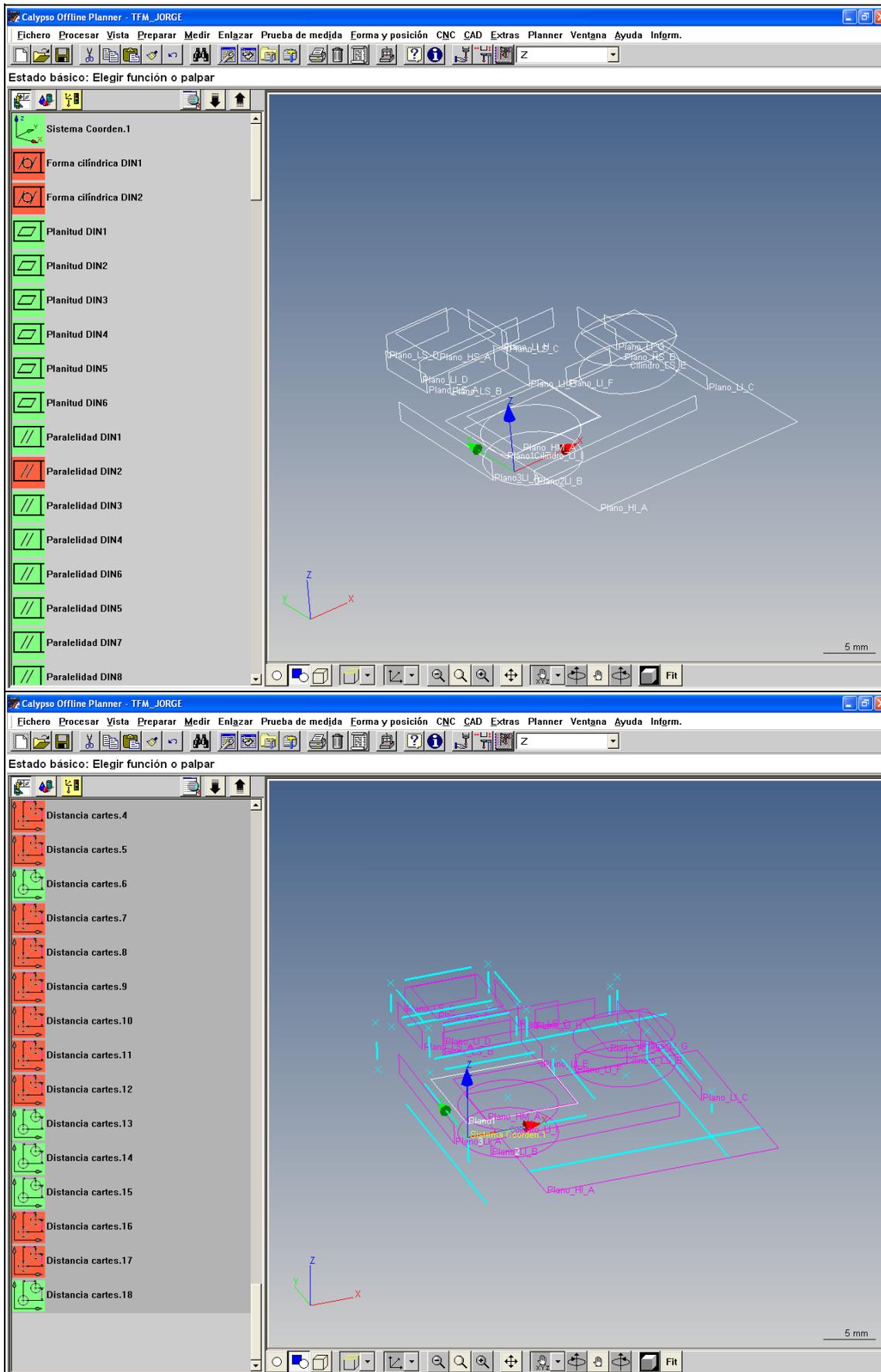


Ilustración 88 - Entorno Calypso y elementos definidos para la medición de las probetas

Anexo IV: Procedimiento de medición en el microscopio óptico de enfoque variable “Alicona InfiniteFocus SL”

Al igual que con el procedimiento de medición, en los apartados principales del proyecto se ha explicado de forma aproximada el proceso de inspección en el microscopio óptico de enfoque variable. Por ello, con la finalidad de aclarar las fases del mismo, se va a exponer de forma completa y esquematizada:

1. Acceder a la aplicación “IF-MeasureSuite” como un usuario normal (nivel de permisos estándar).

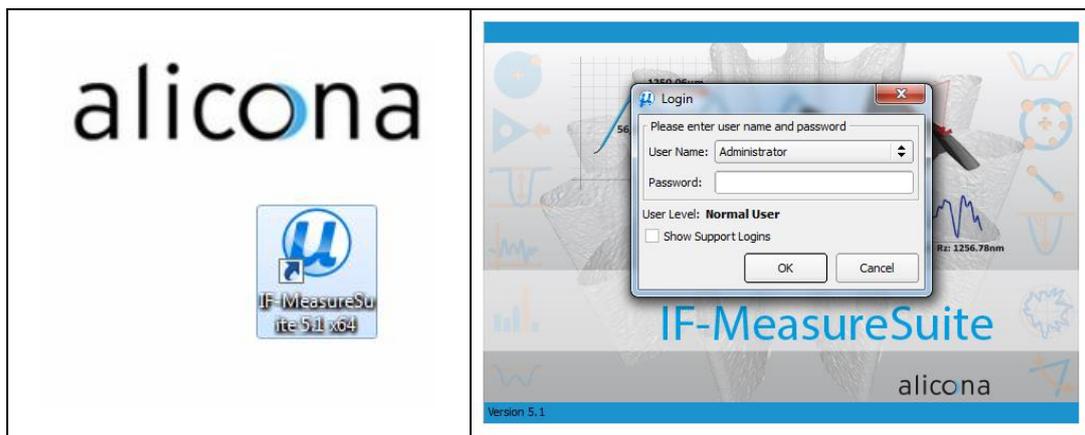


Ilustración 89 – Acceso programa IF-MeasureSuite

2. Se ejecuta y muestra la pantalla principal del mismo, donde se pueden crear carpetas y proyectos dentro de las mismas.

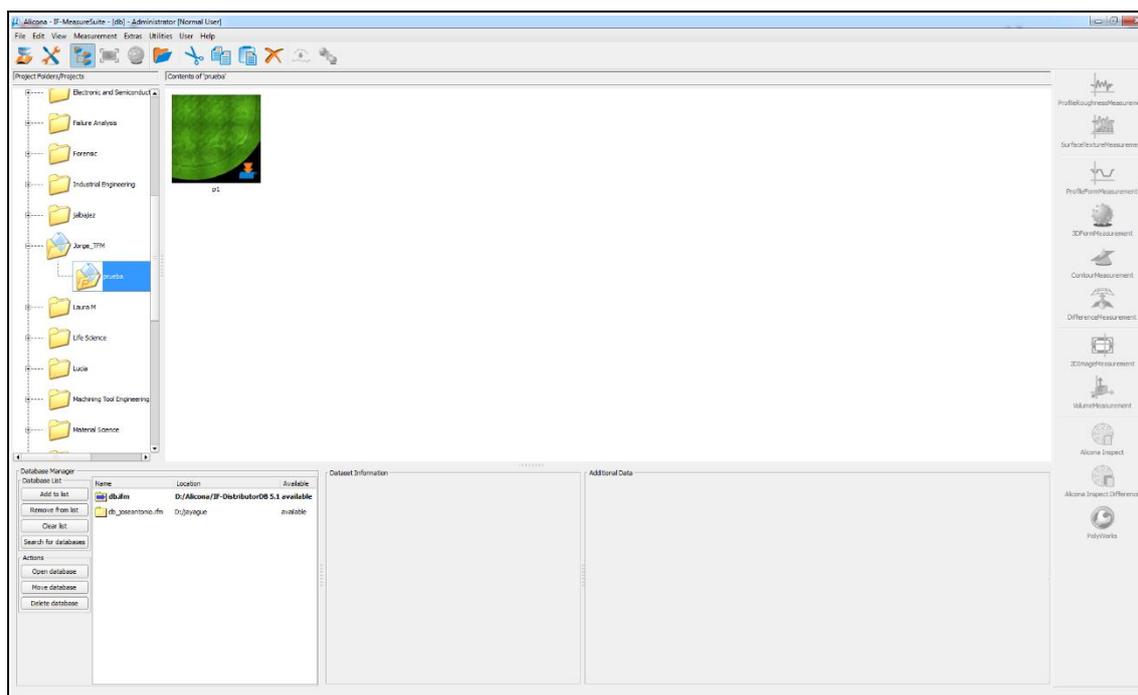


Ilustración 90 – Ventana principal del programa IF-MeasureSuite

3. Dentro de la pantalla, se selecciona el primer icono para acceder al módulo de medición del microscopio. Después de pulsar este botón, se suelen oír sonidos mientras se encienden y se apagan algunas luces del microscopio, siendo esto la calibración automática inicial del mismo.

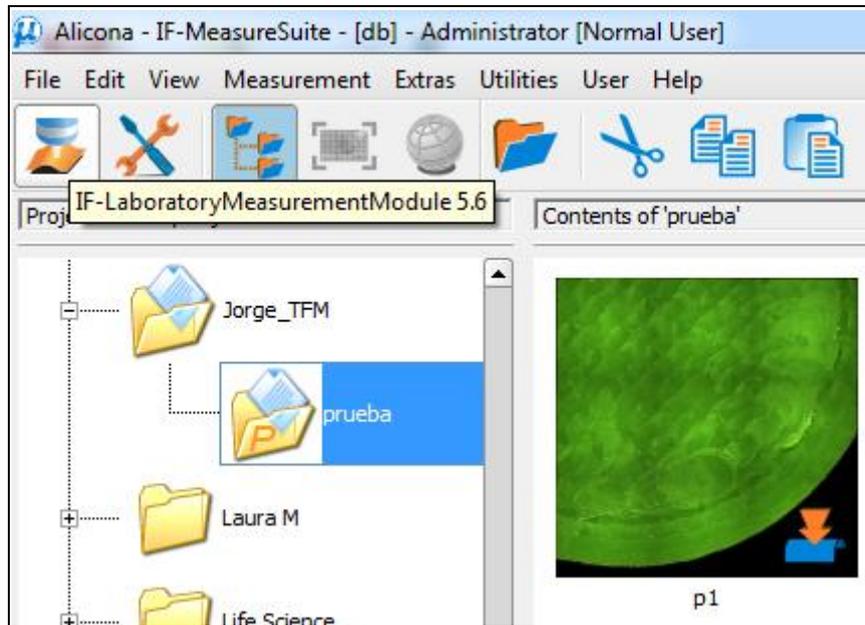


Ilustración 91 – Acceso al módulo de medición en el programa IF-MeasureSuite

4. A partir de este momento, ya se podrá visualizar en pantalla la imagen del microscopio en tiempo real. Conviene recordar que la lente que se ha empleado proporciona 10 aumentos.

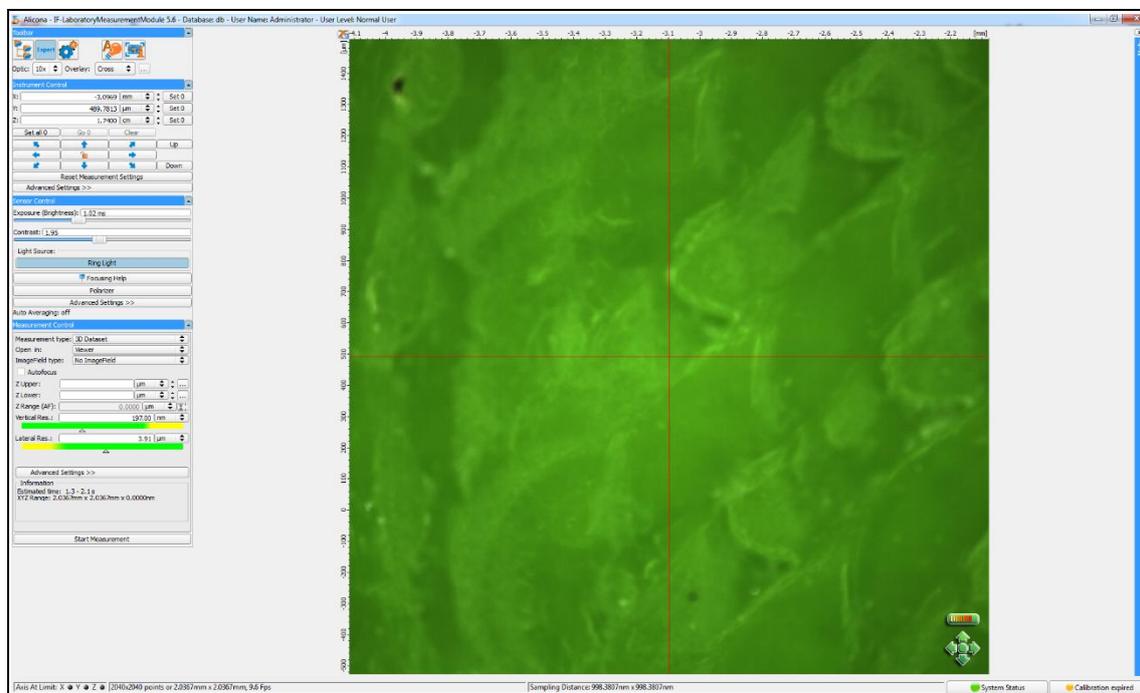


Ilustración 92 – Visualización del módulo de medición en el programa IF-MeasureSuite

5. En esta pantalla se puede mover la lente o accionar los controles de los motores de los ejes para enfocar correctamente la o las zonas que queremos visualizar. En caso de querer analizar una superficie mayor que la visualización en una pantalla, es necesario generar un campo de imágenes (“General ImageField”) y añadir las posiciones de las esquinas de la imagen (“Add position”). Además de las 4 esquinas de la imagen (rango en ejes X e Y), hay que especificar el rango de distancias de enfoque vertical (eje Z). Para ello, hay que definir como posiciones de la misma manera la distancia más alejada y la más cercana (desenfocando en las dos direcciones respecto al enfoque “correcto” en la zona central).

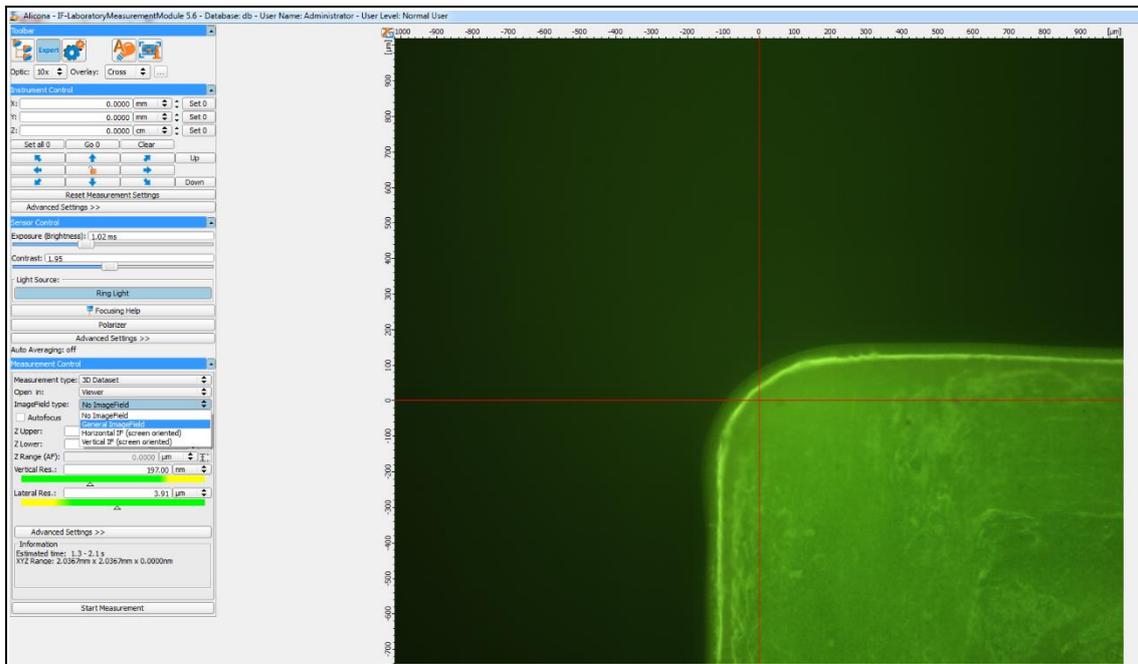


Ilustración 93 – Campo de imágenes en el programa IF-MeasureSuite

Además, nos podemos ayudar de un histograma que indica la superficie visible con las condiciones seleccionadas de exposición (brillo) y contraste. Podemos ir cambiando estos parámetros hasta obtener un histograma centrado y con la mayor anchura posible.

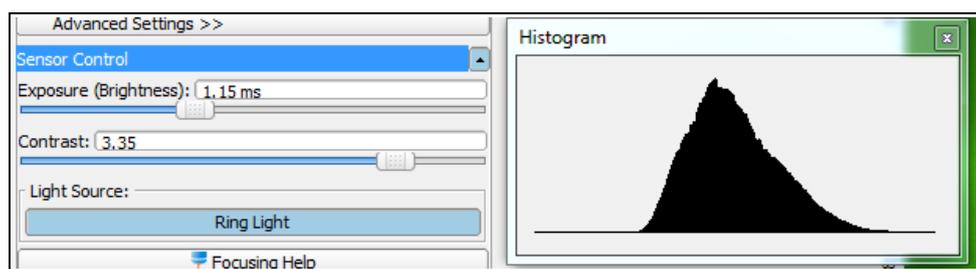


Ilustración 94 – Configuración brillo-contraste en el programa IF-MeasureSuite

En todas las probetas para cada impresora se han empleado los mismos parámetros para obtener visualizaciones lo más similares dentro de lo posible.

Parámetro	Anet A8	Ultimaker S5
Exposición (brillo)	1,80 ms	1,10 ms
Contraste	2,20	2,30

Tabla 15 – Parámetros de exposición y contraste empleados en las probetas de las dos impresoras 3D

6. Definidas todas las posiciones, se puede comenzar el proceso automático de medición. Mientras se está realizando, se puede observar el tiempo restante y una previsualización de la cuadrícula que se va generando conforme avanzan las mediciones.

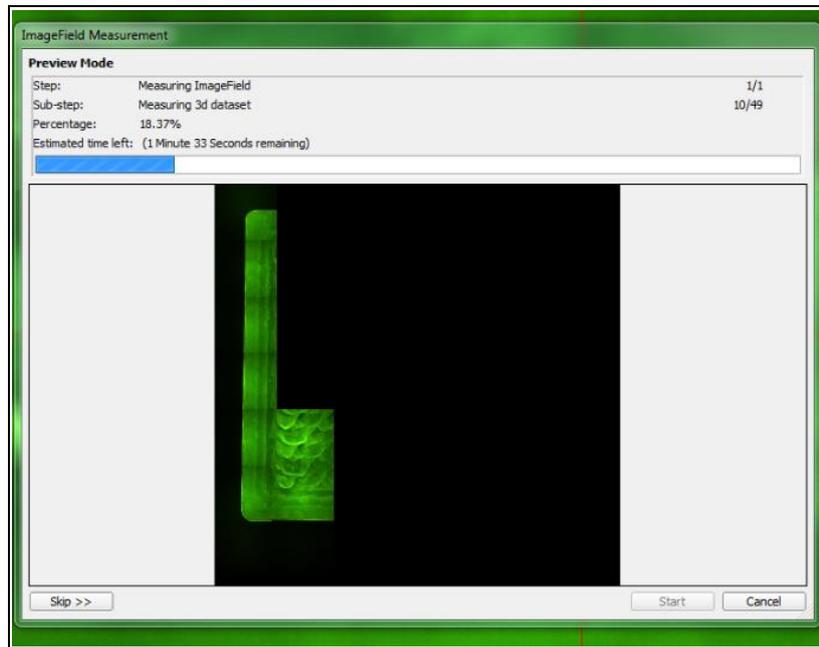


Ilustración 95 – Previsualización de la medición en el programa IF-MeasureSuite

7. Una vez haya finalizado el proceso, se podrá visualizar la reconstrucción 3D de la superficie analizada.

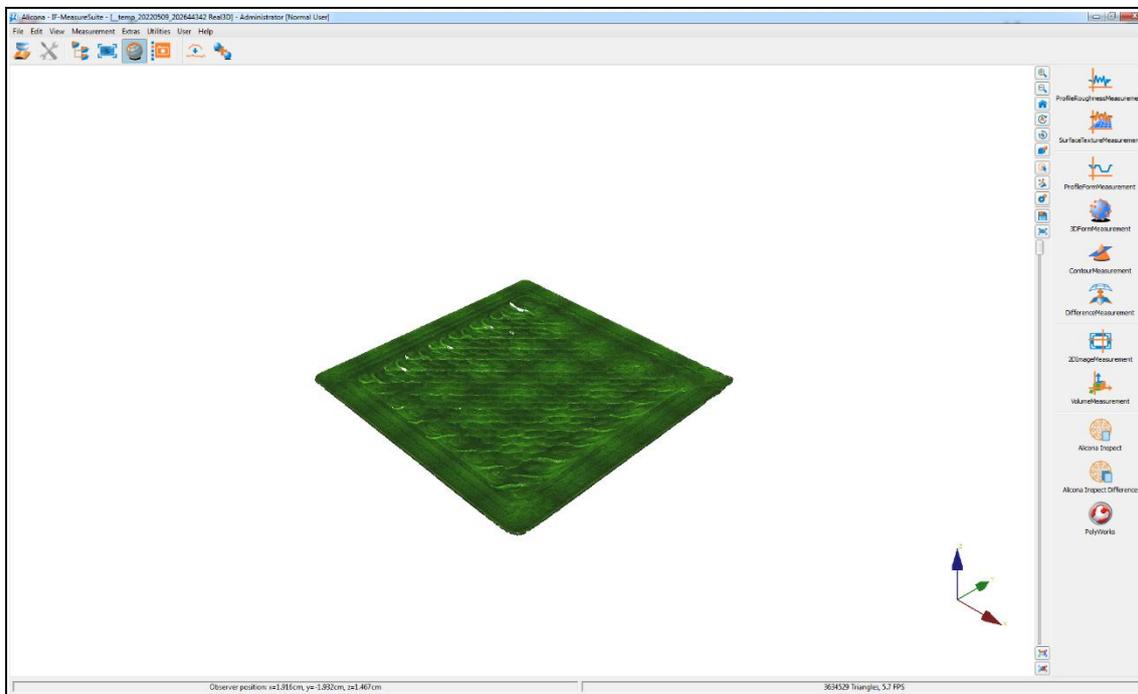


Ilustración 96 – Reconstrucción 3D superficie en el programa IF-MeasureSuite

Dentro de esta visualización, se puede configurar un sistema de referencia ubicado en la superficie generada y, posteriormente, analizar el “relieve” generado mediante un mapa de colores y una leyenda con la altura relativa de cada zona.

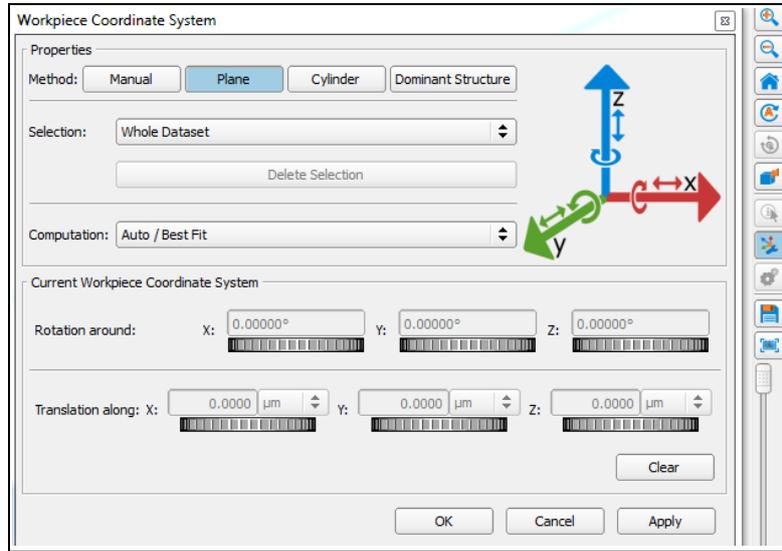


Ilustración 97 – Sistema de coordenadas en el programa IF-MeasureSuite

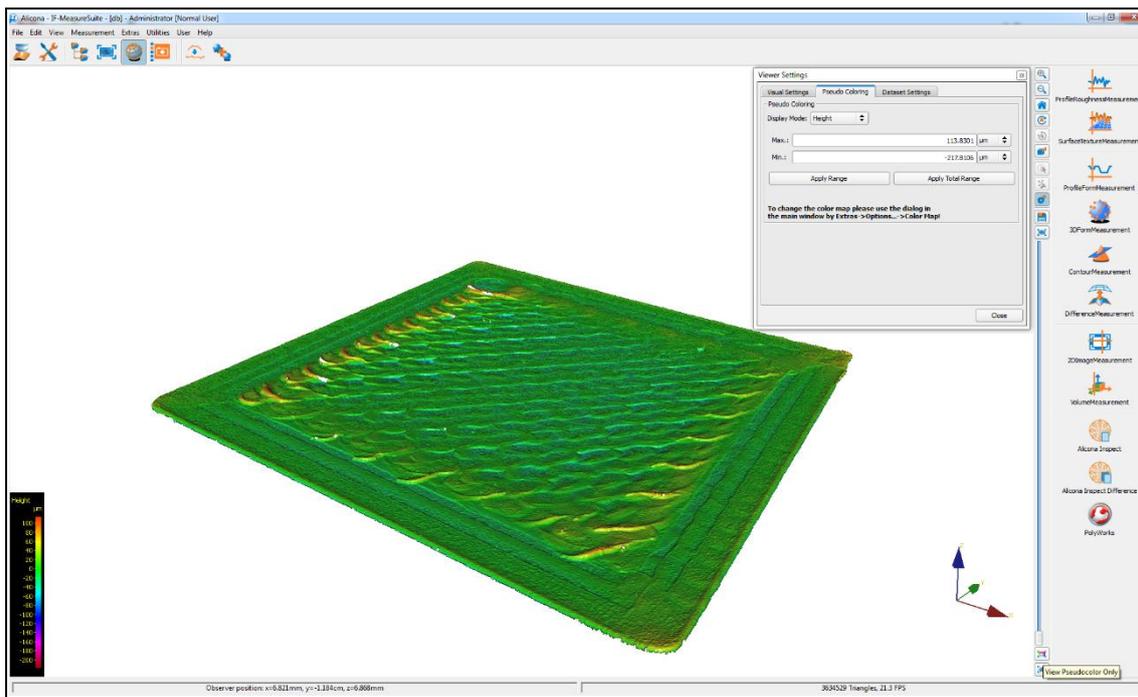


Ilustración 98 – Mapa de colores superficie en el programa IF-MeasureSuite

8. A continuación, se puede acceder al módulo “ProfileRoughnessMeasurement” para medir la rugosidad en perfiles seleccionados dentro de la superficie analizada.

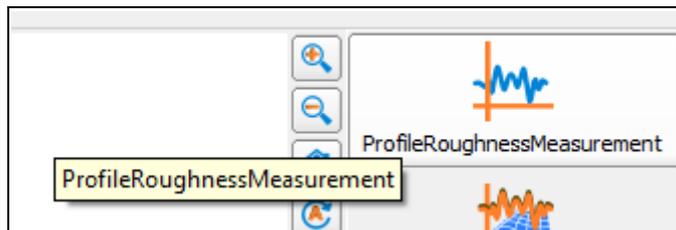


Ilustración 99 – Acceso al módulo de medición de rugosidad en el programa IF-MeasureSuite

Permitiendo dibujar en la superficie las líneas de corte por las que obtener el perfil de la superficie, la rugosidad o las ondulaciones de la misma.

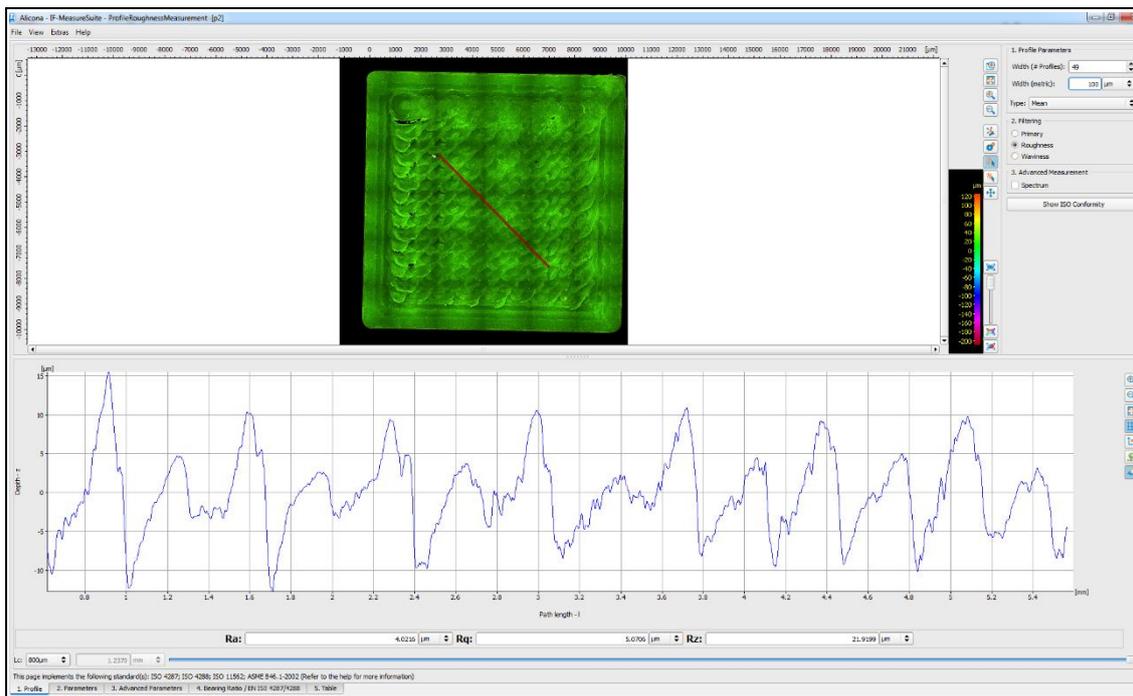


Ilustración 100 – Visualización rugosidad en el programa IF-MeasureSuite

Como se ha mencionado en los apartados principales del proyecto, el objetivo ha sido analizar la rugosidad superficial de líneas perpendiculares a las direcciones de impresión. En este caso de la imagen, las líneas de impresión van en direcciones diagonales desde arriba-derecha hasta abajo-izquierda. Por ello, las líneas para la medición de la rugosidad serán perpendiculares a estas direcciones.

Un parámetro muy importante a definir será la longitud característica (Lc). Emplearemos un valor de 800 µm, que es el recomendado por el fabricante cuando se analizan elementos con tamaños de entre 0,1 mm y 0,4 mm, aproximadamente. El espesor de capa varía en valores entre 0,1 mm y 0,3 mm y el diámetro de boquilla mide 0,4 mm. Por ello, este valor de la longitud característica es el ideal.

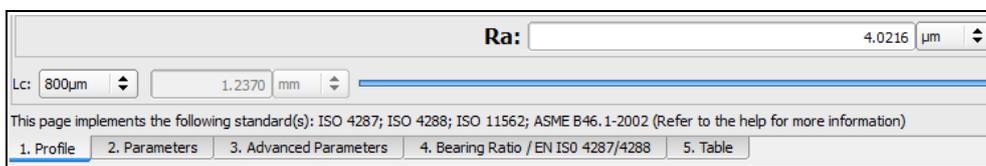


Ilustración 101 – Lc y Ra en el programa IF-MeasureSuite

9. A modo de ampliación, a pesar de que no se ha empleado en este proyecto, se puede determinar la rugosidad relativa en un área seleccionada mediante el módulo “SurfaceTextureMeasurement”.

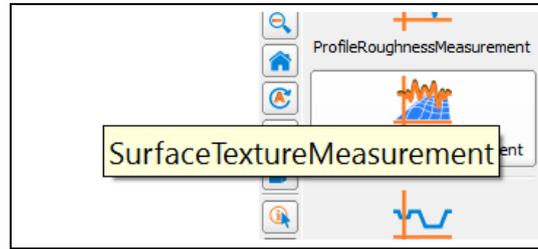


Ilustración 102 – Acceso al módulo de medición de rugosidad en área en el programa IF-MeasureSuite

Que permite seleccionar una zona de la superficie y obtener un histograma con los valores de rugosidad por unidad de superficie detectados, entre otros múltiples resultados que puede proporcionar este potente software.

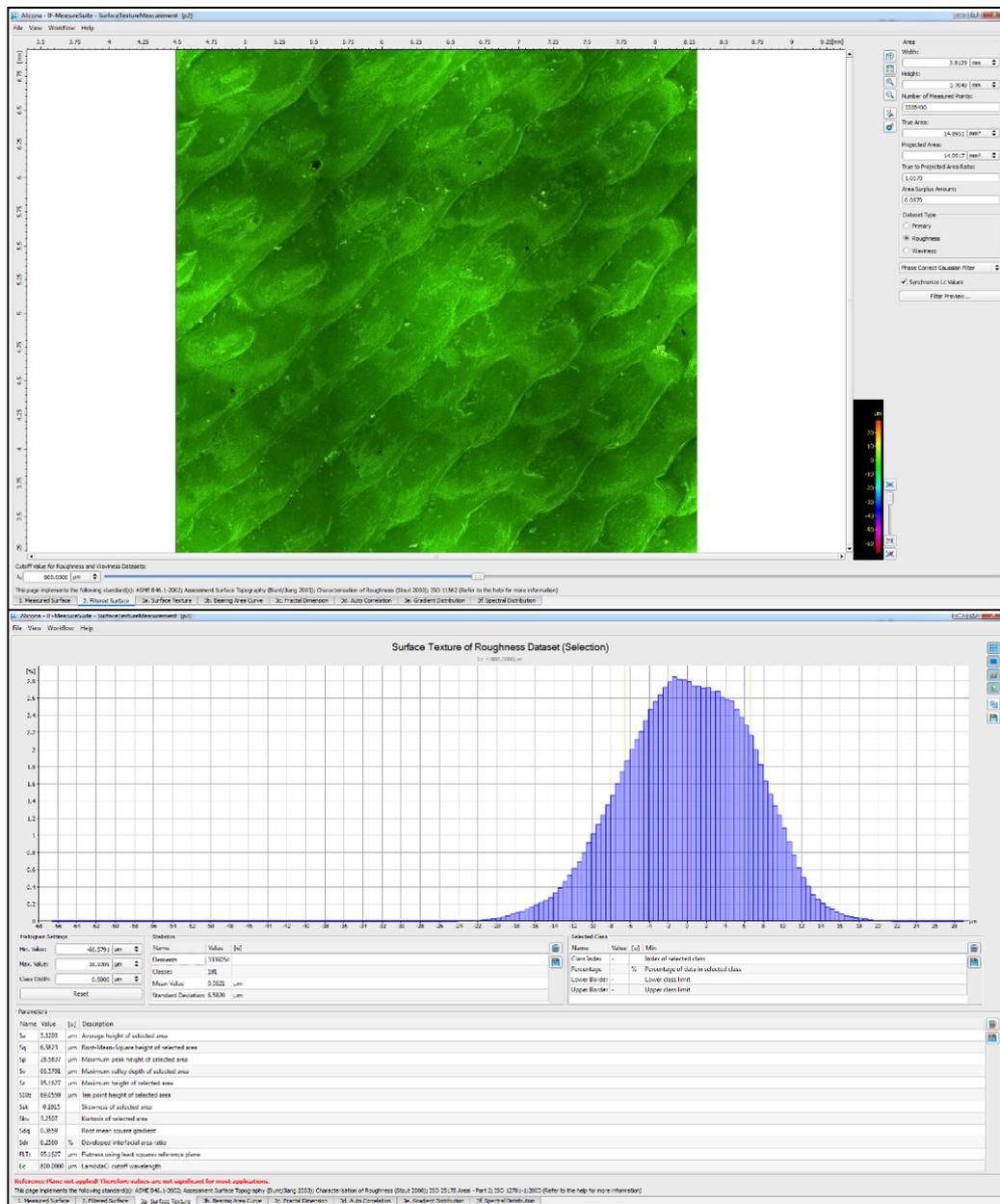


Ilustración 103 – Muestra de resultados de rugosidad en área en el programa IF-MeasureSuite

Anexo V: Ejemplos de resultados de las inspecciones realizadas con el microscopio “Alicona InfiniteFocus SL”

A continuación, se van a mostrar imágenes de los resultados obtenidos mediante el microscopio óptico de enfoque variable. Debido a la cantidad de ilustraciones que suponen y su tamaño, se incluyen en este anexo. Además, para reducir la extensión del documento, se van a incluir imágenes de los resultados de cada superficie de una probeta de cada impresora. El resto de resultados numéricos de rugosidad superficial se han incluido en el apartado “6. Resultados finales de las inspecciones en microscopio óptico de enfoque variable” y se han obtenido exactamente de la misma manera mediante el software “IF-MeasureSuite”.

Estos resultados se muestran a partir de la siguiente página.

Resultados en la superficie HS-A – Anet A8

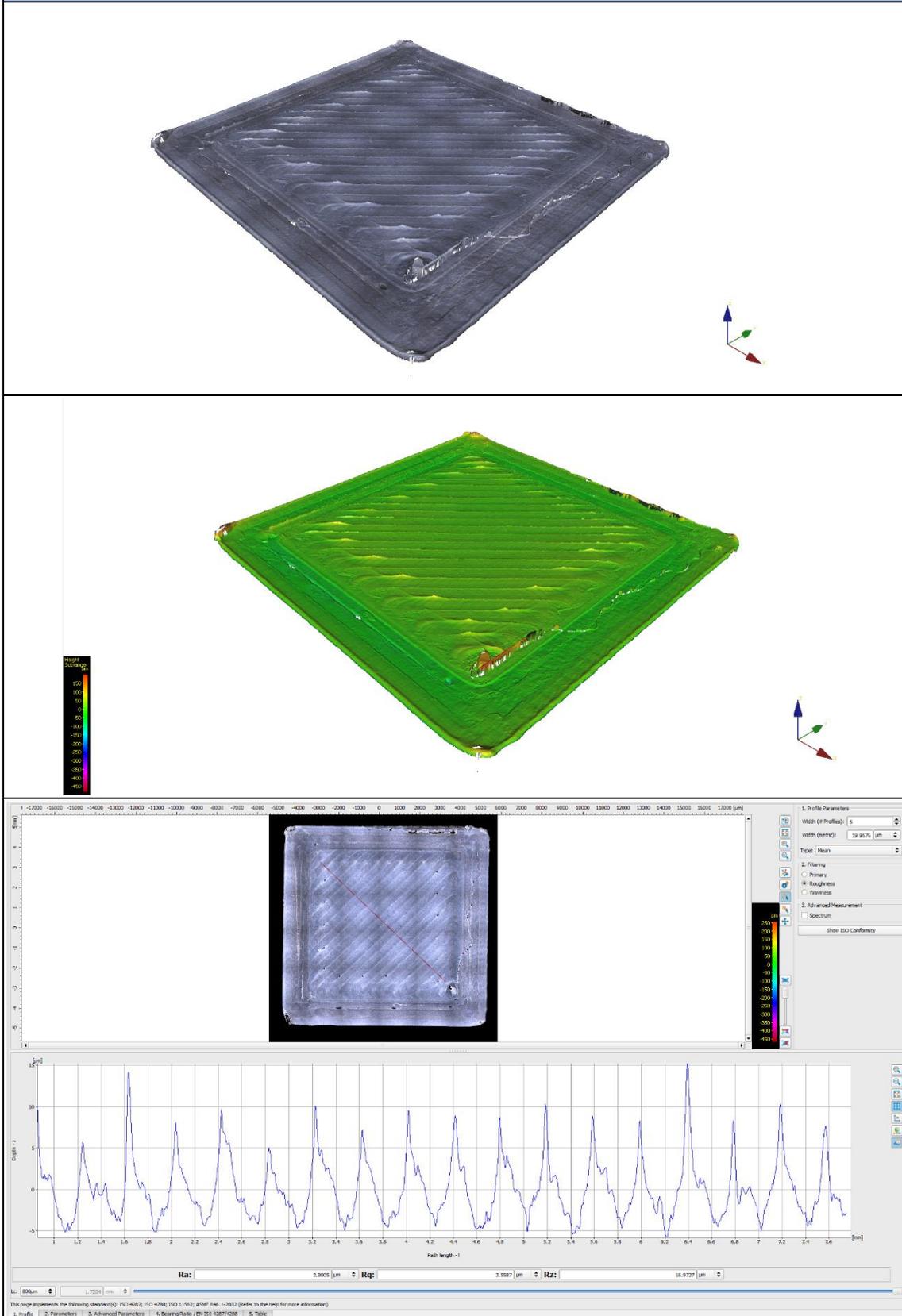


Ilustración 104 – Resultados del análisis en la superficie HS-A (Anet A8)

Resultados en la superficie HS-B – Anet A8

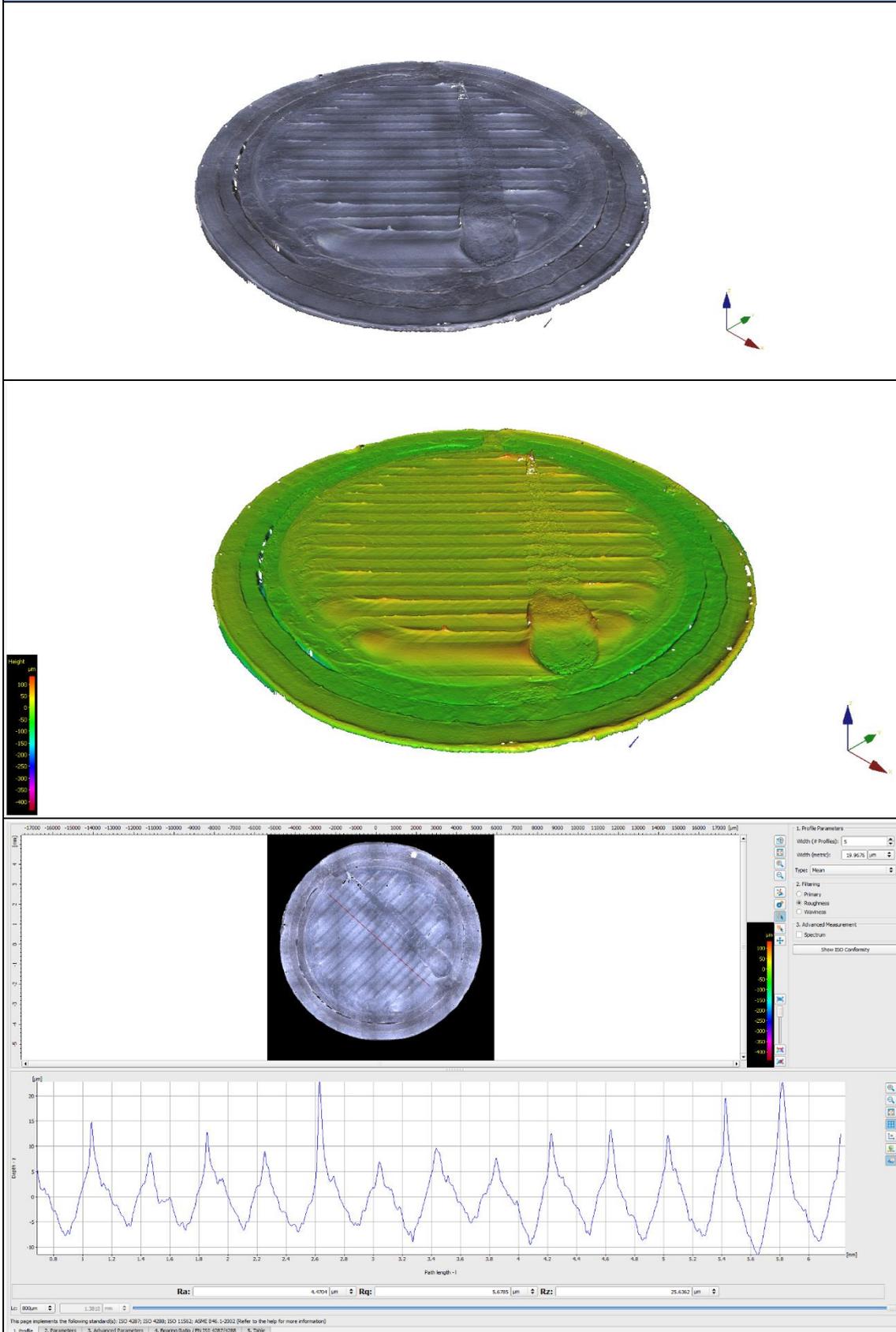


Ilustración 105 – Resultados del análisis en la superficie HS-B (Anet A8)

Resultados en la superficie HI-A – Anet A8

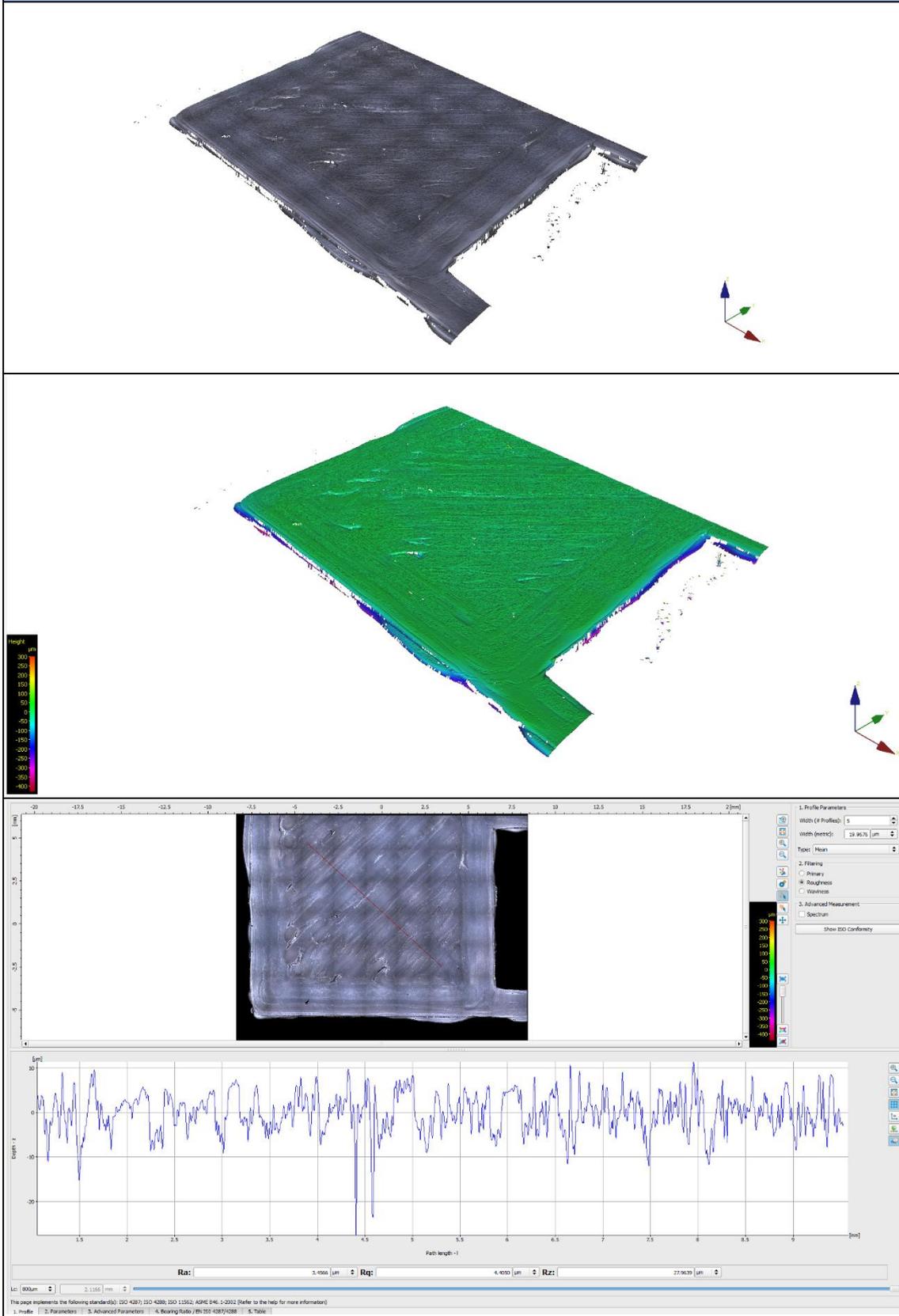


Ilustración 106 – Resultados del análisis en la superficie HI-A (Anet A8)

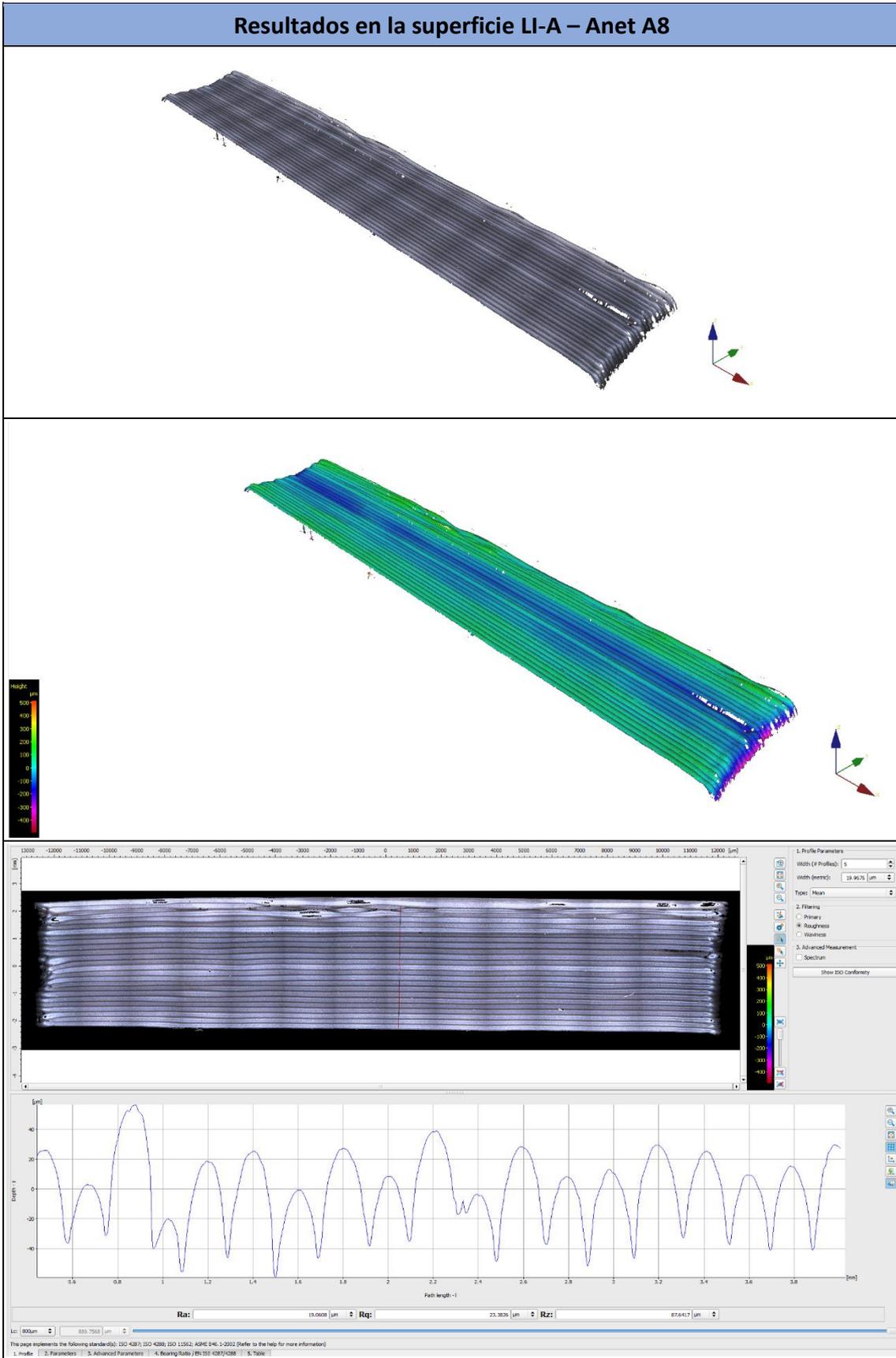


Ilustración 107 – Resultados del análisis en la superficie LI-A (Anet A8)

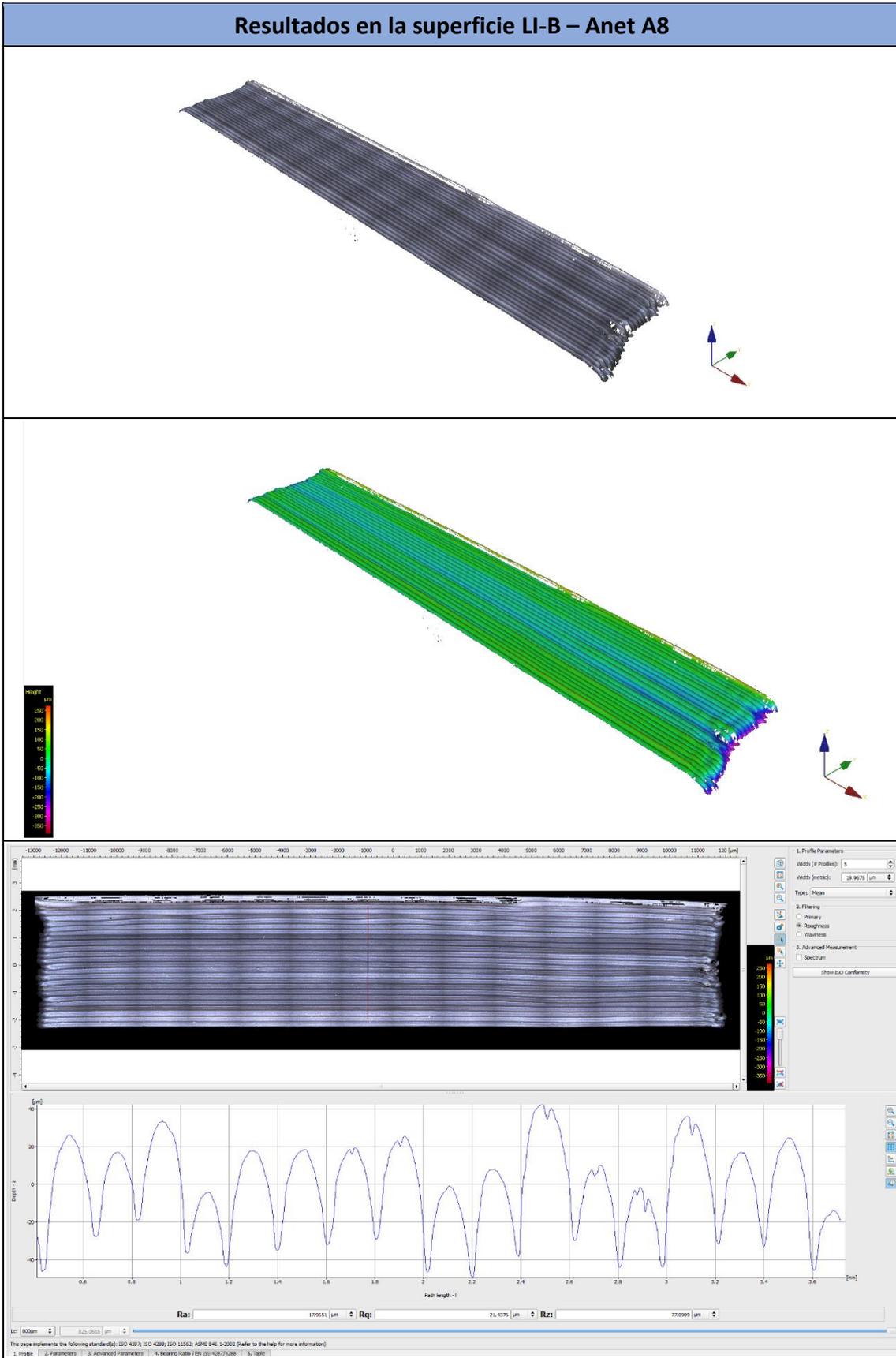
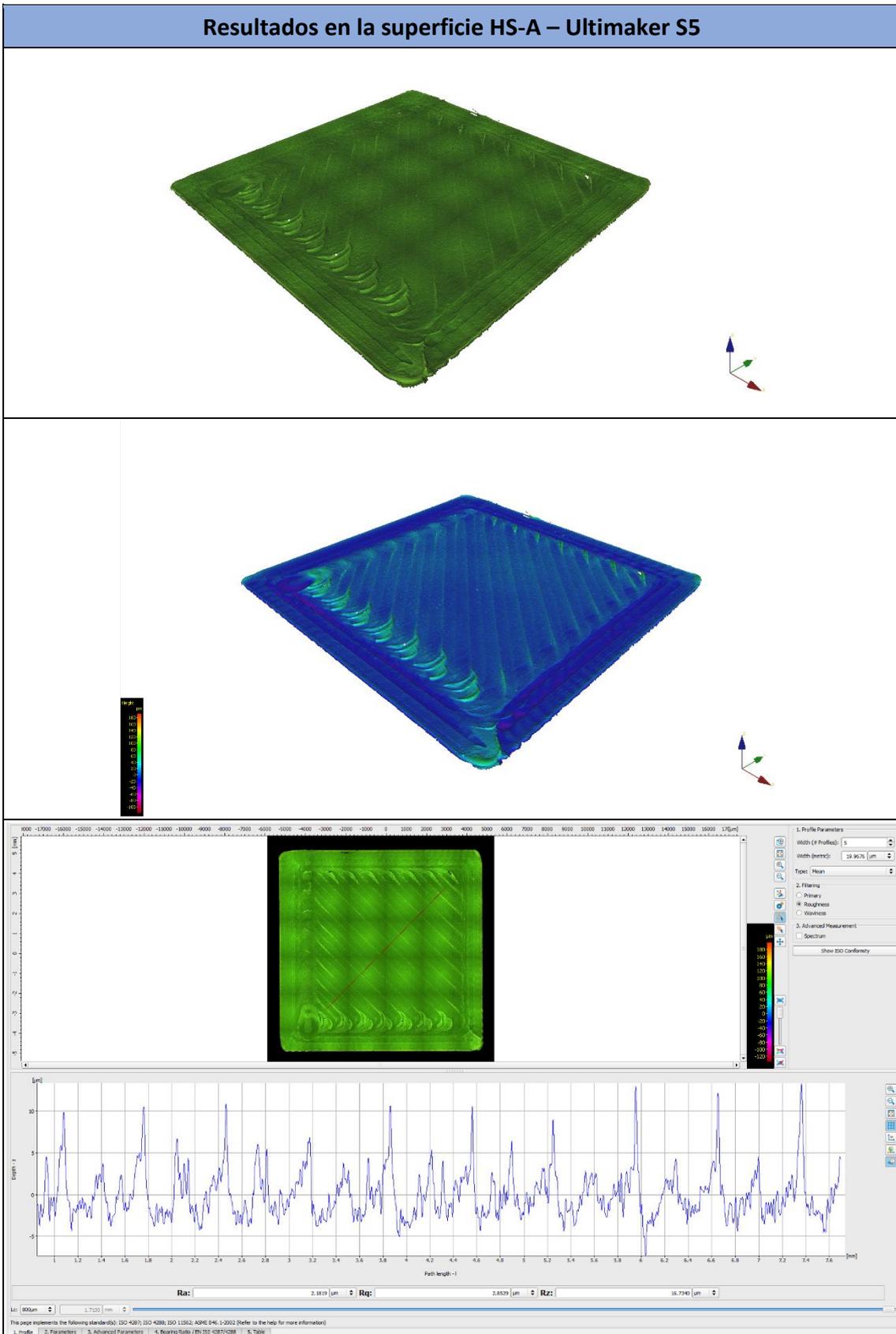


Ilustración 108 – Resultados del análisis en la superficie LI-B (Anet A8)



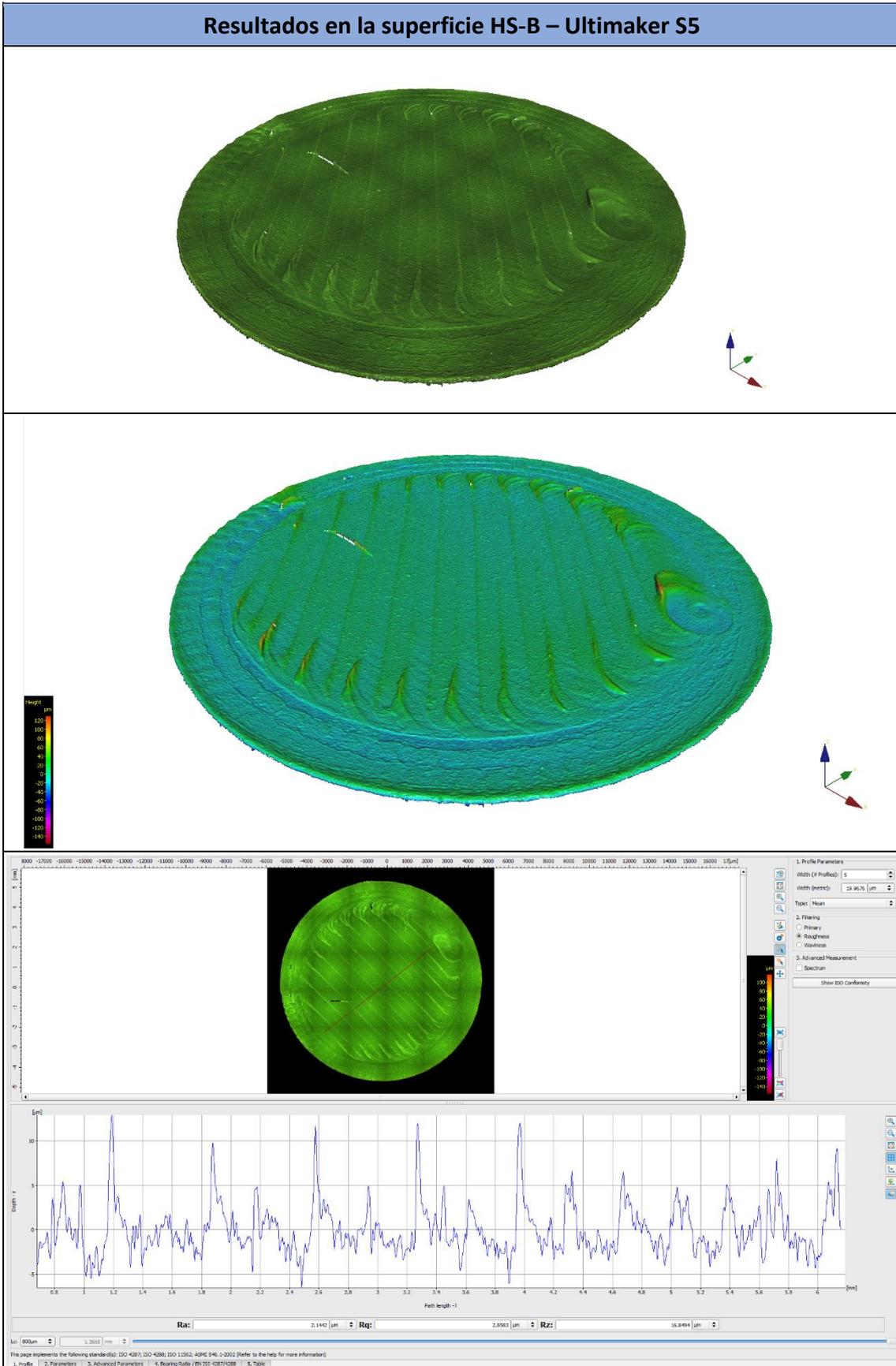


Ilustración 110 – Resultados del análisis en la superficie HS-B (Ultimaker S5)

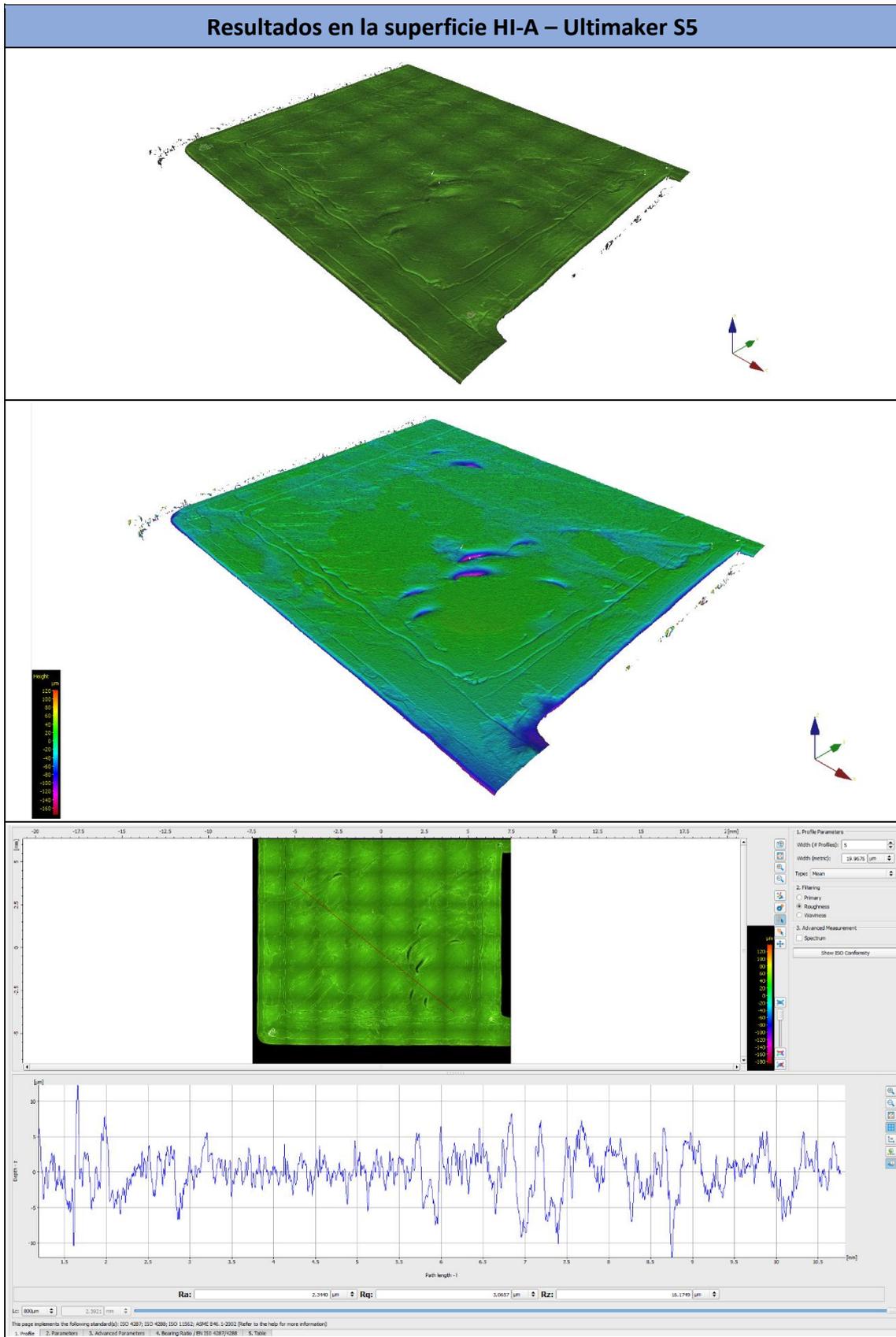


Ilustración 111 – Resultados del análisis en la superficie HI-A (Ultimaker S5)

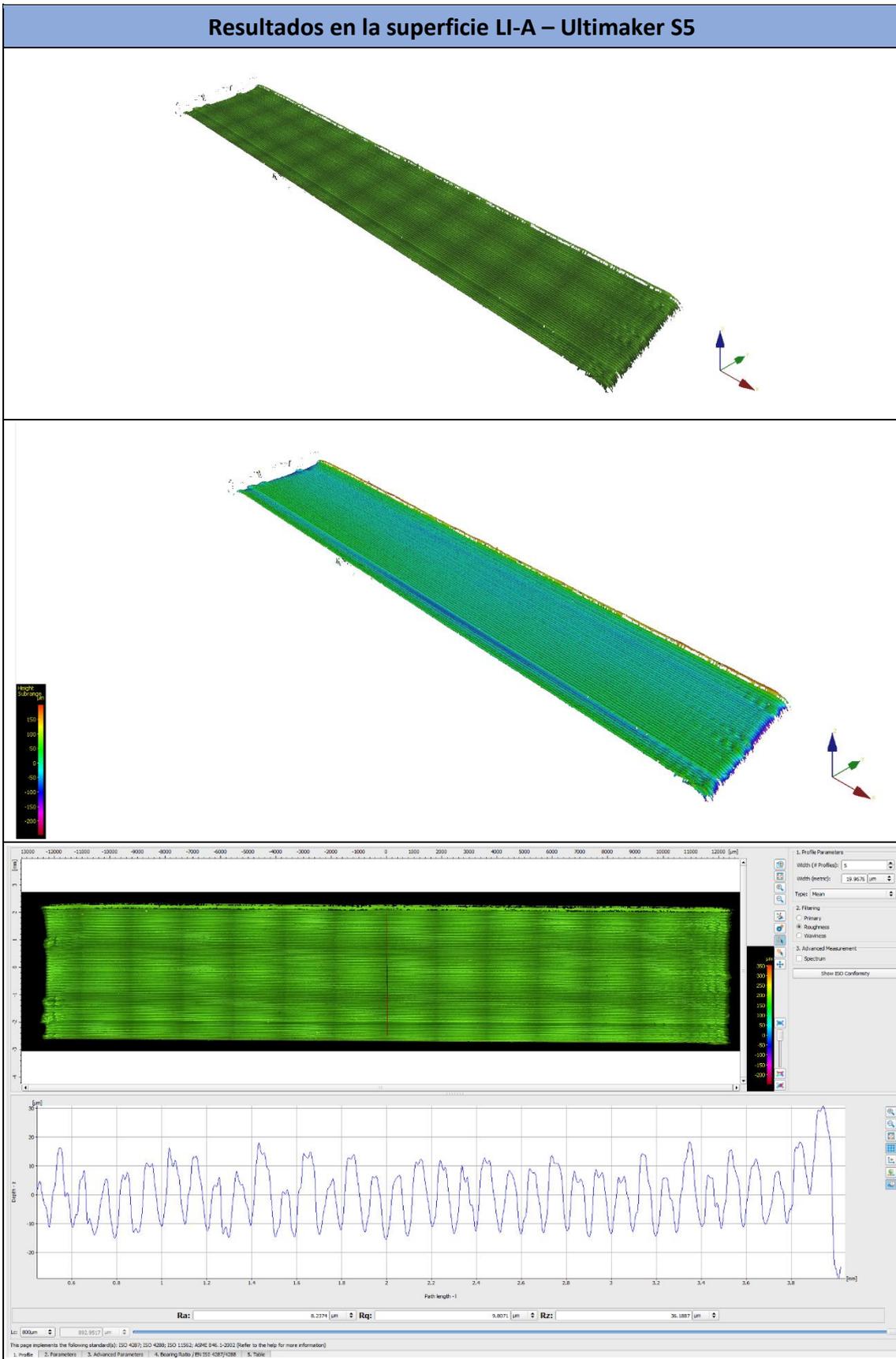


Ilustración 112 – Resultados del análisis en la superficie LI-A (Ultimaker S5)

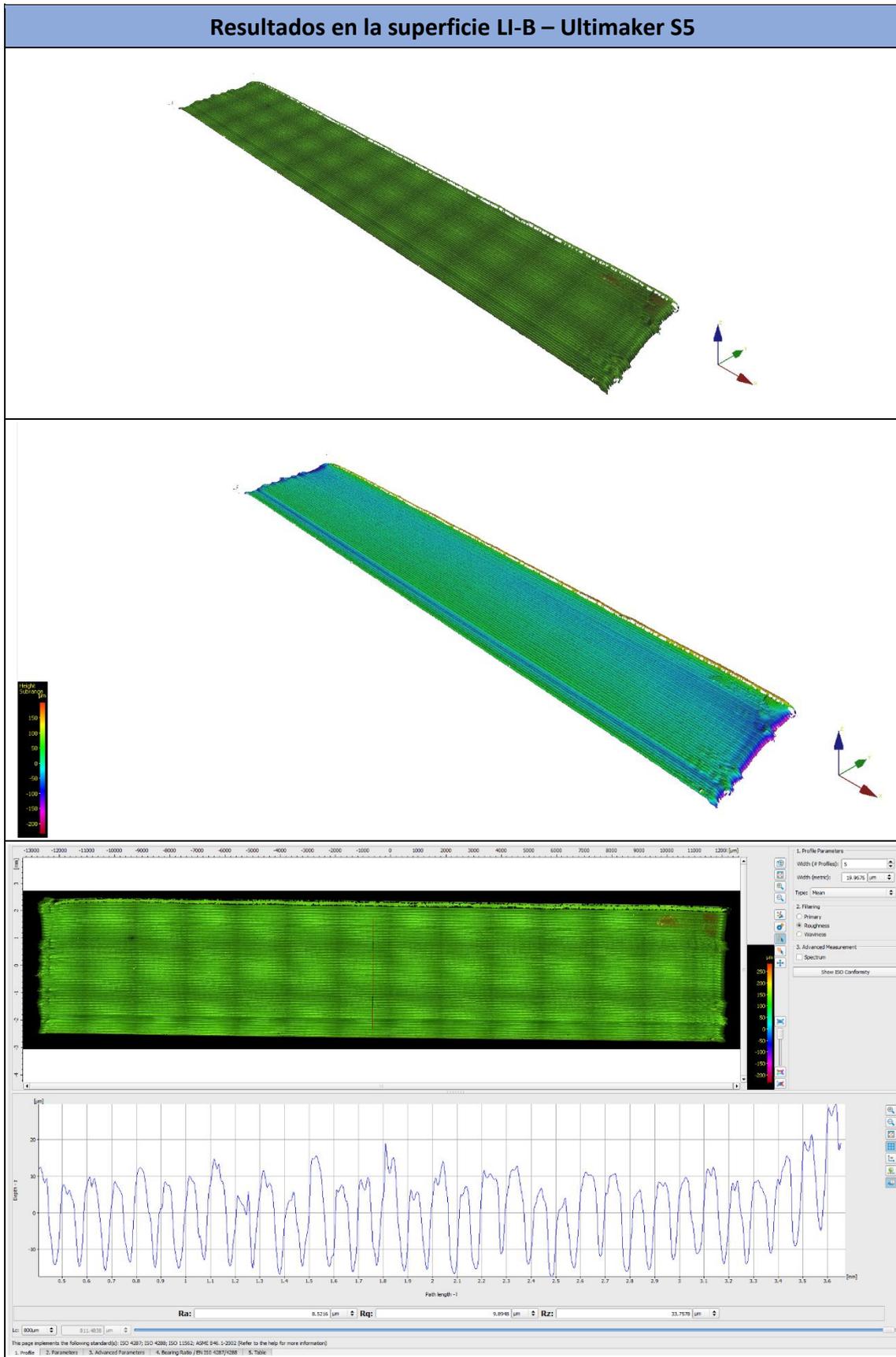


Ilustración 113 – Resultados del análisis en la superficie LI-B (Ultimaker S5)

Anexo VI: Resultados numéricos medios de las mediciones obtenidas con la MMC “ZEISS WMM850”

Media de las 3 series medidas – Cotas directas – Ultimaker S5				
Probeta	Eje	Dispersión de los ptos. palpados	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	X	0,0191	0,0105	0,0856
2	X	0,0272	0,0207	0,1578
3	X	0,0246	-0,0384	0,3496
4	X	0,0266	-0,1139	0,3609
5	X	0,0276	-0,2149	0,5799
6	X	0,0293	-0,1217	0,6567
7	X	0,0224	-0,0310	0,0988
8	X	0,0282	-0,0298	0,1539
9	X	0,0332	-0,0020	0,1398
10	X	0,0137	0,0385	0,0925
11	X	0,0249	0,0778	0,1617
12	X	0,0233	0,1267	0,2017
13	X	0,0139	0,0295	0,0789
14	X	0,0238	0,0586	0,1185
15	X	0,0248	0,0703	0,1226
16	X	0,0165	0,0082	0,0648
17	X	0,0224	0,0305	0,0778
18	X	0,0271	0,0725	0,1108
19	X	0,0198	0,0462	0,0955
20	X	0,0317	0,1101	0,2134
21	X	0,0323	0,1405	0,2373
22	X	0,0198	0,0642	0,1083
23	X	0,0286	0,0881	0,1663
24	X	0,0372	0,1254	0,1876
25	X	0,0302	0,0377	0,1109
26	X	0,0247	0,0755	0,1372
27	X	0,0363	0,1191	0,1535

Media de las 3 series medidas – Cotas directas – Ultimaker S5				
Probeta	Eje	Dispersión de los ptos. palpados	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Y	0,0233	0,0190	0,0882
2	Y	0,0257	0,0457	0,1735
3	Y	0,0267	0,0013	0,3335
4	Y	0,0306	-0,1558	0,3242
5	Y	0,0343	-0,2173	0,4609
6	Y	0,0317	-0,1866	0,5658
7	Y	0,0229	-0,0101	0,1286
8	Y	0,0297	0,0027	0,1750
9	Y	0,0335	0,0552	0,1917
10	Y	0,0168	0,0415	0,0877
11	Y	0,0298	0,0928	0,1698
12	Y	0,0214	0,1035	0,1905
13	Y	0,0160	0,0320	0,0732
14	Y	0,0227	0,0944	0,1363
15	Y	0,0218	0,0999	0,1412
16	Y	0,0169	-0,0021	0,0544
17	Y	0,0253	0,0904	0,1192
18	Y	0,0352	0,1355	0,1607
19	Y	0,0204	0,0545	0,1002
20	Y	0,0278	0,1317	0,2132
21	Y	0,0297	0,1263	0,2296
22	Y	0,0204	0,0835	0,1215
23	Y	0,0380	0,0723	0,1471
24	Y	0,0405	0,1384	0,1771
25	Y	0,0350	-0,0037	0,0793
26	Y	0,0312	0,0655	0,1117
27	Y	0,0422	0,1834	0,2046

Media de las 3 series medidas – Cotas directas – Ultimaker S5				
Probeta	Eje	Dispersión de los ptos. palpados	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Z	0,0207	-0,0517	0,0517
2	Z	0,0263	-0,0416	0,0572
3	Z	0,0560	0,0282	0,0717
4	Z	0,0278	-0,0098	0,0758
5	Z	0,0427	-0,0065	0,0645
6	Z	0,0460	0,0429	0,1032
7	Z	0,0185	-0,0485	0,0485
8	Z	0,0278	-0,0338	0,0452
9	Z	0,0463	0,0456	0,0949
10	Z	0,0184	-0,0603	0,0652
11	Z	0,0225	-0,0501	0,0508
12	Z	0,0348	0,0104	0,0893
13	Z	0,0170	-0,0367	0,0809
14	Z	0,0384	-0,0318	0,0429
15	Z	0,0400	0,0214	0,0778
16	Z	0,0162	-0,0433	0,0452
17	Z	0,0377	-0,0305	0,0451
18	Z	0,0626	0,0368	0,1038
19	Z	0,0263	-0,0624	0,0689
20	Z	0,0265	-0,0458	0,0518
21	Z	0,0346	0,0071	0,0768
22	Z	0,0219	-0,0446	0,0553
23	Z	0,0337	-0,0267	0,0367
24	Z	0,0422	0,0279	0,1091
25	Z	0,0224	-0,0488	0,0488
26	Z	0,0293	-0,0220	0,0468
27	Z	0,0626	0,0437	0,0956

Media de las 3 series medidas – Cotas directas – Anet A8				
Probeta	Eje	Dispersión de los ptos. palpados	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	X	0,7313	-0,1780	0,1944
2	X	1,3119	0,0105	0,4735
3	X	0,4477	-0,0021	0,1452
4	X	0,6244	-0,0966	0,1620
5	X	2,1580	-0,1672	0,7719
6	X	0,7032	-0,0163	0,2036
7	X	1,6102	-0,3240	0,5599
8	X	1,2313	-0,1867	0,4264
9	X	0,5341	-0,0545	0,1607
10	X	0,6896	-0,1664	0,1668
11	X	0,4567	-0,0436	0,1104
12	X	0,4246	0,0182	0,1615
13	X	0,5726	-0,0931	0,1369
14	X	0,5105	-0,0687	0,1470
15	X	0,4509	-0,0244	0,1462
16	X	0,6330	-0,1371	0,1730
17	X	0,4536	-0,0412	0,1130
18	X	0,5168	-0,0980	0,1570
19	X	0,7487	-0,1924	0,1946
20	X	0,5530	-0,0924	0,1334
21	X	0,4160	0,0274	0,1668
22	X	0,5519	-0,1151	0,1285
23	X	0,5051	-0,0830	0,1396
24	X	0,4752	-0,0450	0,1659
25	X	0,6928	-0,1479	0,1869
26	X	0,4947	-0,1040	0,1413
27	X	0,5043	-0,0681	0,1633

Media de las 3 series medidas – Cotas directas – Anet A8				
Probeta	Eje	Dispersión de los ptos. palpados	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Y	0,7770	-0,0369	0,1556
2	Y	1,1834	0,0603	0,3416
3	Y	0,4800	0,0787	0,1238
4	Y	0,7221	-0,0509	0,1207
5	Y	2,2201	-0,1166	0,7931
6	Y	0,7141	0,0941	0,2407
7	Y	1,5962	-0,1971	0,4883
8	Y	1,2389	-0,0922	0,3822
9	Y	0,4927	0,1826	0,2016
10	Y	0,7102	0,0005	0,1162
11	Y	0,5197	0,0379	0,1324
12	Y	0,4331	0,1983	0,2068
13	Y	0,6145	0,0387	0,1288
14	Y	0,5171	0,1024	0,1318
15	Y	0,4680	0,2397	0,2397
16	Y	0,6945	0,0145	0,1359
17	Y	0,4901	0,1537	0,1881
18	Y	0,5640	0,1497	0,2039
19	Y	0,8185	-0,0494	0,1758
20	Y	0,6285	-0,0146	0,1224
21	Y	0,4066	0,1507	0,1536
22	Y	0,5689	0,0411	0,0933
23	Y	0,5396	0,0747	0,1366
24	Y	0,4856	0,2184	0,2312
25	Y	0,7746	-0,0273	0,1579
26	Y	0,5064	0,1469	0,1834
27	Y	0,5048	0,2395	0,2536

Media de las 3 series medidas – Cotas directas – Anet A8				
Probeta	Eje	Dispersión de los ptos. palpados	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Z	0,7641	0,1165	0,1165
2	Z	1,0794	0,0094	0,0761
3	Z	0,5036	0,0378	0,0740
4	Z	0,6400	0,0942	0,0942
5	Z	1,7161	-0,0090	0,0589
6	Z	0,6397	0,0052	0,0847
7	Z	1,3506	0,0819	0,0819
8	Z	1,0394	0,0030	0,0721
9	Z	0,5295	0,0141	0,0892
10	Z	0,7130	0,1066	0,1066
11	Z	0,4904	0,0245	0,0918
12	Z	0,4625	0,0171	0,0516
13	Z	0,6417	0,1025	0,1025
14	Z	0,4870	-0,0339	0,0734
15	Z	0,4854	-0,0270	0,0730
16	Z	0,6912	0,0940	0,0940
17	Z	0,5210	-0,0150	0,0710
18	Z	0,5557	-0,0028	0,0497
19	Z	0,7724	0,0921	0,0921
20	Z	0,5639	0,0022	0,0701
21	Z	0,4473	-0,0048	0,0580
22	Z	0,5904	0,0972	0,0972
23	Z	0,5371	0,0086	0,0801
24	Z	0,5135	-0,0061	0,0678
25	Z	0,7571	0,0968	0,0968
26	Z	0,5228	0,0122	0,0820
27	Z	0,5564	0,0089	0,0643

Media de las 3 series medidas – Cotas aristas – Ultimaker S5			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	X	-0,0336	0,0813
2	X	-0,0056	0,1599
3	X	-0,1032	0,3278
4	X	-0,2015	0,3224
5	X	-0,3292	0,4677
6	X	-0,2411	0,5710
7	X	-0,0596	0,0953
8	X	-0,0818	0,1327
9	X	-0,0523	0,1131
10	X	0,0073	0,0820
11	X	0,0622	0,1638
12	X	0,1341	0,2234
13	X	0,0028	0,0642
14	X	0,0376	0,1107
15	X	0,0385	0,1292
16	X	-0,0470	0,0568
17	X	-0,0077	0,0720
18	X	0,0422	0,1023
19	X	0,0226	0,1040
20	X	0,1133	0,2203
21	X	0,1669	0,2614
22	X	0,0461	0,1148
23	X	0,0714	0,1756
24	X	0,1166	0,2202
25	X	0,0098	0,1188
26	X	0,0677	0,1454
27	X	0,1070	0,1701

Media de las 3 series medidas – Cotas aristas – Ultimaker S5			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Y	-0,0050	0,0917
2	Y	0,0427	0,1859
3	Y	-0,0239	0,3379
4	Y	-0,1948	0,3182
5	Y	-0,2879	0,4526
6	Y	-0,2351	0,5523
7	Y	-0,0200	0,1341
8	Y	0,0045	0,1709
9	Y	0,0475	0,1747
10	Y	0,0462	0,0866
11	Y	0,0613	0,1657
12	Y	0,1019	0,2052
13	Y	0,0295	0,0625
14	Y	0,1000	0,1331
15	Y	0,1038	0,1430
16	Y	-0,0129	0,0561
17	Y	0,0981	0,1141
18	Y	0,1294	0,1388
19	Y	0,0464	0,0972
20	Y	0,1505	0,2156
21	Y	0,1322	0,2411
22	Y	0,0827	0,1144
23	Y	0,0758	0,1434
24	Y	0,1494	0,1888
25	Y	-0,0210	0,0751
26	Y	0,0654	0,1112
27	Y	0,1775	0,1872

Media de las 3 series medidas – Cotas aristas – Ultimaker S5			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Z	-0,0287	0,0329
2	Z	-0,0234	0,0329
3	Z	-0,0058	0,0372
4	Z	-0,0345	0,0370
5	Z	-0,0364	0,0438
6	Z	0,0067	0,0618
7	Z	-0,0251	0,0258
8	Z	-0,0271	0,0371
9	Z	0,0086	0,0416
10	Z	-0,0366	0,0390
11	Z	-0,0316	0,0326
12	Z	-0,0019	0,0499
13	Z	-0,0449	0,0497
14	Z	-0,0162	0,0288
15	Z	0,0033	0,0378
16	Z	-0,0288	0,0317
17	Z	-0,0188	0,0293
18	Z	0,0160	0,0505
19	Z	-0,0355	0,0406
20	Z	-0,0225	0,0250
21	Z	0,0017	0,0471
22	Z	-0,0370	0,0370
23	Z	-0,0054	0,0213
24	Z	0,0069	0,0572
25	Z	-0,0261	0,0261
26	Z	-0,0066	0,0276
27	Z	0,0135	0,0363

Media de las 3 series medidas – Cotas aristas – Anet A8			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	X	-0,1780	0,1944
2	X	0,0105	0,4735
3	X	-0,0021	0,1452
4	X	-0,0966	0,1620
5	X	-0,1672	0,7719
6	X	-0,0163	0,2036
7	X	-0,3240	0,5599
8	X	-0,1867	0,4264
9	X	-0,0545	0,1607
10	X	-0,1664	0,1668
11	X	-0,0436	0,1104
12	X	0,0182	0,1615
13	X	-0,0931	0,1369
14	X	-0,0687	0,1470
15	X	-0,0244	0,1462
16	X	-0,1371	0,1730
17	X	-0,0412	0,1130
18	X	-0,0980	0,1570
19	X	-0,1924	0,1946
20	X	-0,0924	0,1334
21	X	0,0274	0,1668
22	X	-0,1151	0,1285
23	X	-0,0830	0,1396
24	X	-0,0450	0,1659
25	X	-0,1479	0,1869
26	X	-0,1040	0,1413
27	X	-0,0681	0,1633

Media de las 3 series medidas – Cotas aristas – Anet A8			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Y	-0,0369	0,1556
2	Y	0,0603	0,3416
3	Y	0,0787	0,1238
4	Y	-0,0509	0,1207
5	Y	-0,1166	0,7931
6	Y	0,0941	0,2407
7	Y	-0,1971	0,4883
8	Y	-0,0922	0,3822
9	Y	0,1826	0,2016
10	Y	0,0005	0,1162
11	Y	0,0379	0,1324
12	Y	0,1983	0,2068
13	Y	0,0387	0,1288
14	Y	0,1024	0,1318
15	Y	0,2397	0,2397
16	Y	0,0145	0,1359
17	Y	0,1537	0,1881
18	Y	0,1497	0,2039
19	Y	-0,0494	0,1758
20	Y	-0,0146	0,1224
21	Y	0,1507	0,1536
22	Y	0,0411	0,0933
23	Y	0,0747	0,1366
24	Y	0,2184	0,2312
25	Y	-0,0273	0,1579
26	Y	0,1469	0,1834
27	Y	0,2395	0,2536

Media de las 3 series medidas – Cotas aristas – Anet A8			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Z	0,1165	0,1165
2	Z	0,0094	0,0761
3	Z	0,0378	0,0740
4	Z	0,0942	0,0942
5	Z	-0,0090	0,0589
6	Z	0,0052	0,0847
7	Z	0,0819	0,0819
8	Z	0,0030	0,0721
9	Z	0,0141	0,0892
10	Z	0,1066	0,1066
11	Z	0,0245	0,0918
12	Z	0,0171	0,0516
13	Z	0,1025	0,1025
14	Z	-0,0339	0,0734
15	Z	-0,0270	0,0730
16	Z	0,0940	0,0940
17	Z	-0,0150	0,0710
18	Z	-0,0028	0,0497
19	Z	0,0921	0,0921
20	Z	0,0022	0,0701
21	Z	-0,0048	0,0580
22	Z	0,0972	0,0972
23	Z	0,0086	0,0801
24	Z	-0,0061	0,0678
25	Z	0,0968	0,0968
26	Z	0,0122	0,0820
27	Z	0,0089	0,0643

Media de las 3 series medidas – Cotas puntos – Ultimaker S5			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	X	-0,0315	0,0721
2	X	-0,0023	0,1492
3	X	-0,0937	0,3044
4	X	-0,1996	0,3046
5	X	-0,3366	0,4619
6	X	-0,2483	0,5425
7	X	-0,0644	0,0948
8	X	-0,0778	0,1274
9	X	-0,0446	0,1085
10	X	0,0146	0,0692
11	X	0,0691	0,1445
12	X	0,1355	0,2171
13	X	0,0079	0,0529
14	X	0,0380	0,1003
15	X	0,0432	0,1283
16	X	-0,0432	0,0513
17	X	-0,0027	0,0625
18	X	0,0464	0,0979
19	X	0,0284	0,0882
20	X	0,1200	0,2040
21	X	0,1680	0,2561
22	X	0,0508	0,1056
23	X	0,0734	0,1619
24	X	0,1153	0,2206
25	X	0,0083	0,1125
26	X	0,0687	0,1388
27	X	0,1119	0,1707

Media de las 3 series medidas – Cotas puntos – Ultimaker S5			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Y	0,0162	0,0875
2	Y	0,0562	0,1781
3	Y	-0,0059	0,3222
4	Y	-0,1686	0,3103
5	Y	-0,2579	0,4292
6	Y	-0,1951	0,5248
7	Y	0,0049	0,1445
8	Y	0,0271	0,1805
9	Y	0,0695	0,1858
10	Y	0,0566	0,0806
11	Y	0,0753	0,1628
12	Y	0,1166	0,1942
13	Y	0,0340	0,0581
14	Y	0,1117	0,1354
15	Y	0,1127	0,1494
16	Y	0,0014	0,0532
17	Y	0,1094	0,1231
18	Y	0,1636	0,1681
19	Y	0,0587	0,0921
20	Y	0,1473	0,2074
21	Y	0,1529	0,2300
22	Y	0,0900	0,1127
23	Y	0,0898	0,1352
24	Y	0,1561	0,1992
25	Y	-0,0088	0,0771
26	Y	0,0719	0,1178
27	Y	0,1988	0,2064

Media de las 3 series medidas – Cotas puntos – Ultimaker S5			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Z	-0,0168	0,0216
2	Z	-0,0090	0,0228
3	Z	-0,0103	0,0378
4	Z	-0,0390	0,0432
5	Z	-0,0327	0,0429
6	Z	-0,0050	0,0603
7	Z	-0,0154	0,0166
8	Z	-0,0157	0,0247
9	Z	0,0131	0,0306
10	Z	-0,0220	0,0252
11	Z	-0,0209	0,0239
12	Z	0,0105	0,0335
13	Z	-0,0347	0,0390
14	Z	-0,0034	0,0216
15	Z	0,0127	0,0298
16	Z	-0,0153	0,0196
17	Z	-0,0074	0,0218
18	Z	0,0174	0,0323
19	Z	-0,0201	0,0260
20	Z	-0,0149	0,0189
21	Z	0,0106	0,0346
22	Z	-0,0231	0,0241
23	Z	-0,0022	0,0184
24	Z	0,0141	0,0367
25	Z	-0,0164	0,0167
26	Z	-0,0050	0,0225
27	Z	0,0139	0,0262

Media de las 3 series medidas – Cotas puntos – Anet A8			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	X	-0,1767	0,1913
2	X	-0,0270	0,3836
3	X	-0,0050	0,1270
4	X	-0,0870	0,1446
5	X	-0,1336	0,7198
6	X	-0,0406	0,2035
7	X	-0,3048	0,5138
8	X	-0,1725	0,3830
9	X	-0,0723	0,1575
10	X	-0,1719	0,1774
11	X	-0,0372	0,1028
12	X	0,0041	0,1379
13	X	-0,0946	0,1339
14	X	-0,0546	0,1398
15	X	-0,0416	0,1406
16	X	-0,1450	0,1763
17	X	-0,0463	0,1179
18	X	-0,1191	0,1587
19	X	-0,1919	0,1933
20	X	-0,0903	0,1344
21	X	0,0212	0,1486
22	X	-0,1140	0,1297
23	X	-0,0906	0,1482
24	X	-0,0654	0,1626
25	X	-0,1495	0,1853
26	X	-0,1073	0,1484
27	X	-0,0709	0,1607

Media de las 3 series medidas – Cotas puntos – Anet A8			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Y	-0,0153	0,1280
2	Y	0,1319	0,3083
3	Y	0,1425	0,1644
4	Y	-0,0224	0,1041
5	Y	-0,0842	0,7341
6	Y	0,1528	0,2461
7	Y	-0,1477	0,4399
8	Y	-0,0429	0,3692
9	Y	0,2272	0,2310
10	Y	0,0171	0,0961
11	Y	0,0686	0,1192
12	Y	0,2376	0,2423
13	Y	0,0703	0,1113
14	Y	0,1262	0,1425
15	Y	0,2823	0,2823
16	Y	0,0525	0,1119
17	Y	0,2058	0,2114
18	Y	0,2126	0,2232
19	Y	-0,0326	0,1355
20	Y	0,0170	0,1003
21	Y	0,1900	0,1915
22	Y	0,0706	0,0944
23	Y	0,1068	0,1347
24	Y	0,2551	0,2551
25	Y	0,0214	0,1384
26	Y	0,2131	0,2155
27	Y	0,2942	0,2942

Media de las 3 series medidas – Cotas puntos – Anet A8			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Z	0,0827	0,0843
2	Z	0,0042	0,0663
3	Z	0,0191	0,0758
4	Z	0,0607	0,0607
5	Z	-0,0037	0,0526
6	Z	0,0026	0,0599
7	Z	0,0568	0,0578
8	Z	-0,0013	0,0645
9	Z	0,0083	0,0617
10	Z	0,0777	0,0777
11	Z	0,0165	0,0795
12	Z	0,0066	0,0594
13	Z	0,0747	0,0751
14	Z	-0,0212	0,0607
15	Z	-0,0065	0,0671
16	Z	0,0699	0,0716
17	Z	0,0019	0,0683
18	Z	-0,0070	0,0543
19	Z	0,0701	0,0705
20	Z	0,0074	0,0705
21	Z	0,0045	0,0586
22	Z	0,0689	0,0691
23	Z	0,0058	0,0705
24	Z	0,0031	0,0673
25	Z	0,0735	0,0740
26	Z	0,0100	0,0722
27	Z	0,0109	0,0638

Media de las 3 series medidas – Distancias relativas – Ultimaker S5			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	X	-0,0214	0,1093
2	X	-0,0123	0,2465
3	X	-0,0764	0,4918
4	X	-0,1333	0,4313
5	X	-0,1622	0,5834
6	X	-0,1195	0,7371
7	X	-0,0689	0,1492
8	X	-0,0701	0,1840
9	X	-0,0539	0,1725
10	X	0,0288	0,1413
11	X	0,0743	0,2708
12	X	0,0941	0,3167
13	X	0,0070	0,1025
14	X	0,0277	0,1699
15	X	0,0323	0,2215
16	X	-0,0298	0,0708
17	X	0,0164	0,1258
18	X	0,0521	0,1670
19	X	0,0375	0,1718
20	X	0,1205	0,3506
21	X	0,1194	0,3713
22	X	0,0548	0,1867
23	X	0,0854	0,3006
24	X	0,0892	0,3175
25	X	0,0270	0,1733
26	X	0,0671	0,2370
27	X	0,0858	0,2608

Media de las 3 series medidas – Distancias relativas – Ultimaker S5			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Y	-0,0496	0,1503
2	Y	-0,0269	0,2730
3	Y	-0,1083	0,5138
4	Y	-0,1897	0,4452
5	Y	-0,1923	0,5797
6	Y	-0,1714	0,7293
7	Y	-0,1117	0,2014
8	Y	-0,0866	0,2093
9	Y	-0,0612	0,1967
10	Y	0,0139	0,1361
11	Y	-0,0047	0,3028
12	Y	0,0981	0,3197
13	Y	-0,0073	0,1000
14	Y	0,0243	0,1712
15	Y	0,0380	0,2143
16	Y	-0,0447	0,0754
17	Y	0,0119	0,1266
18	Y	0,0061	0,1593
19	Y	0,0190	0,1484
20	Y	0,1101	0,3311
21	Y	0,1092	0,3805
22	Y	0,0426	0,1754
23	Y	0,0474	0,2297
24	Y	0,0530	0,2697
25	Y	-0,0319	0,1155
26	Y	0,0230	0,1677
27	Y	0,0514	0,2051

Media de las 3 series medidas – Distancias relativas – Ultimaker S5			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Z	-0,0139	0,0445
2	Z	0,0029	0,0346
3	Z	-0,0613	0,1675
4	Z	-0,0705	0,3180
5	Z	-0,0492	0,3371
6	Z	0,0041	0,3683
7	Z	-0,0141	0,0397
8	Z	0,0058	0,0375
9	Z	0,0887	0,0887
10	Z	-0,0153	0,0483
11	Z	-0,0083	0,0405
12	Z	0,0622	0,0622
13	Z	0,0210	0,0693
14	Z	0,0170	0,0352
15	Z	0,0501	0,0501
16	Z	-0,0075	0,0386
17	Z	0,0063	0,0350
18	Z	0,0524	0,0524
19	Z	-0,0130	0,0531
20	Z	0,0034	0,0542
21	Z	0,0657	0,0657
22	Z	0,0013	0,0482
23	Z	0,0029	0,0345
24	Z	0,0613	0,0613
25	Z	-0,0148	0,0368
26	Z	0,0068	0,0355
27	Z	0,0535	0,0535

Media de las 3 series medidas – Distancias relativas – Anet A8			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	X	-0,1803	0,2239
2	X	-0,0609	0,6771
3	X	-0,1092	0,2077
4	X	-0,1340	0,1757
5	X	-0,1163	1,0673
6	X	-0,1384	0,3454
7	X	-0,2928	0,7032
8	X	-0,2737	0,5649
9	X	-0,1750	0,2659
10	X	-0,1532	0,2062
11	X	-0,1054	0,1456
12	X	-0,0796	0,2266
13	X	-0,1258	0,1578
14	X	-0,1449	0,1669
15	X	-0,0778	0,2339
16	X	-0,1514	0,1858
17	X	-0,0966	0,1493
18	X	-0,1176	0,2737
19	X	-0,1723	0,2037
20	X	-0,1211	0,1950
21	X	-0,1105	0,2373
22	X	-0,1295	0,1490
23	X	-0,1372	0,2379
24	X	-0,0916	0,2765
25	X	-0,1824	0,2142
26	X	-0,1009	0,1888
27	X	-0,1165	0,2662

Media de las 3 series medidas – Distancias relativas – Anet A8			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Y	-0,1594	0,1934
2	Y	-0,0841	0,5672
3	Y	-0,0254	0,1295
4	Y	-0,1052	0,1143
5	Y	-0,0438	1,0958
6	Y	-0,0799	0,2988
7	Y	-0,2843	0,6671
8	Y	-0,2059	0,5598
9	Y	-0,0093	0,0859
10	Y	-0,1001	0,1258
11	Y	0,0137	0,1573
12	Y	0,0200	0,1503
13	Y	-0,0565	0,0941
14	Y	-0,0753	0,1491
15	Y	0,0324	0,0953
16	Y	-0,1045	0,1233
17	Y	-0,0460	0,1388
18	Y	-0,0592	0,1235
19	Y	-0,1707	0,1980
20	Y	-0,0327	0,1361
21	Y	0,0171	0,1050
22	Y	-0,0407	0,0648
23	Y	-0,0311	0,1109
24	Y	0,0193	0,1028
25	Y	-0,1376	0,1558
26	Y	-0,0334	0,1363
27	Y	-0,0093	0,0827

Media de las 3 series medidas – Distancias relativas – Anet A8			
Probeta	Eje	Desviación cota	Desviación abs. cota
1	Z	-0,0731	0,1367
2	Z	-0,1054	0,1600
3	Z	-0,1325	0,1770
4	Z	-0,0290	0,1035
5	Z	-0,0649	0,1715
6	Z	-0,0964	0,1377
7	Z	-0,0456	0,1005
8	Z	-0,0620	0,2137
9	Z	-0,0957	0,1431
10	Z	-0,0581	0,1234
11	Z	-0,1389	0,1836
12	Z	-0,1060	0,1461
13	Z	-0,0562	0,1155
14	Z	-0,1200	0,1436
15	Z	-0,0902	0,1469
16	Z	-0,0314	0,1281
17	Z	-0,1317	0,1446
18	Z	-0,0847	0,1540
19	Z	-0,0567	0,1160
20	Z	-0,1262	0,1808
21	Z	-0,1038	0,1473
22	Z	-0,0561	0,1056
23	Z	-0,1430	0,1580
24	Z	-0,1343	0,1628
25	Z	-0,0307	0,1208
26	Z	-0,1509	0,1637
27	Z	-0,1190	0,1519

Media de las 3 series medidas – Planitud – Ultimaker S5			
Probeta	Eje X	Eje Y	Eje Z
1	0,0102	0,0189	0,0268
2	0,0140	0,0110	0,0273
3	0,0120	0,0148	0,0432
4	0,0075	0,0146	0,0201
5	0,0068	0,0138	0,0309
6	0,0066	0,0194	0,0386
7	0,0119	0,0139	0,0135
8	0,0146	0,0167	0,0176
9	0,0109	0,0230	0,0362
10	0,0067	0,0136	0,0204
11	0,0148	0,0096	0,0244
12	0,0097	0,0077	0,0317
13	0,0059	0,0115	0,0179
14	0,0122	0,0139	0,0288
15	0,0085	0,0145	0,0190
16	0,0082	0,0098	0,0161
17	0,0107	0,0142	0,0261
18	0,0098	0,0235	0,0216
19	0,0117	0,0149	0,0272
20	0,0135	0,0151	0,0213
21	0,0076	0,0095	0,0320
22	0,0092	0,0080	0,0208
23	0,0108	0,0195	0,0288
24	0,0107	0,0173	0,0212
25	0,0092	0,0186	0,0221
26	0,0123	0,0154	0,0218
27	0,0109	0,0210	0,0426

Media de las 3 series medidas – Planitud – Anet A8			
Probeta	Eje X	Eje Y	Eje Z
1	0,0321	0,0478	0,0202
2	0,0391	0,0280	0,0459
3	0,0400	0,0190	0,0713
4	0,0221	0,0401	0,0778
5	0,0178	0,0173	0,0587
6	0,0550	0,0325	0,0514
7	0,0361	0,0149	0,0811
8	0,0172	0,0184	0,0544
9	0,0506	0,0228	0,0477
10	0,0532	0,0141	0,0207
11	0,0156	0,0281	0,0551
12	0,0531	0,0294	0,0750
13	0,0508	0,0418	0,0185
14	0,0178	0,0215	0,0613
15	0,0464	0,0289	0,0837
16	0,0546	0,0629	0,0198
17	0,0176	0,0381	0,0650
18	0,0355	0,0366	0,0905
19	0,0617	0,0425	0,0281
20	0,0339	0,0336	0,0516
21	0,0417	0,0299	0,0664
22	0,0333	0,0247	0,0152
23	0,0277	0,0381	0,0472
24	0,0351	0,0363	0,0738
25	0,0697	0,0776	0,0275
26	0,0474	0,0318	0,0617
27	0,0442	0,0382	0,0713

Media de las 3 series medidas – Paralelismo – Ultimaker S5			
Probeta	Eje X	Eje Y	Eje Z
1	0,0277	0,0342	0,0704
2	0,0282	0,0421	0,1019
3	0,0269	0,0454	0,1516
4	0,0207	0,0255	0,1121
5	0,0251	0,0316	0,1348
6	0,0729	0,0762	0,1632
7	0,0278	0,0548	0,0525
8	0,0257	0,0460	0,1058
9	0,0323	0,0642	0,1492
10	0,0202	0,0238	0,0604
11	0,0401	0,0930	0,0826
12	0,0783	0,0443	0,1105
13	0,0219	0,0251	0,1116
14	0,0324	0,0463	0,1115
15	0,0583	0,0491	0,1221
16	0,0235	0,0254	0,0639
17	0,0197	0,0366	0,1033
18	0,0283	0,0672	0,1492
19	0,0235	0,0304	0,0685
20	0,0347	0,0447	0,0752
21	0,0911	0,0624	0,0954
22	0,0129	0,0229	0,0557
23	0,0305	0,0444	0,0994
24	0,0882	0,0895	0,1421
25	0,0277	0,0466	0,0568
26	0,0249	0,0434	0,1001
27	0,0447	0,0715	0,1358

Media de las 3 series medidas – Paralelismo – Anet A8			
Probeta	Eje X	Eje Y	Eje Z
1	0,0718	0,1178	0,1004
2	0,1338	0,1062	0,1351
3	0,1259	0,0738	0,1496
4	0,0405	0,0626	0,1325
5	0,0911	0,0803	0,1379
6	0,1571	0,0754	0,1235
7	0,0844	0,0921	0,1062
8	0,0723	0,0864	0,1477
9	0,1638	0,1018	0,1398
10	0,0941	0,0890	0,0734
11	0,0765	0,1209	0,1159
12	0,1299	0,0784	0,1613
13	0,0637	0,0842	0,0795
14	0,0778	0,0744	0,1327
15	0,1369	0,0866	0,2132
16	0,0890	0,1109	0,0951
17	0,0703	0,0856	0,1574
18	0,1702	0,0953	0,1794
19	0,0982	0,1338	0,0859
20	0,1181	0,1194	0,1363
21	0,1030	0,0903	0,1645
22	0,0735	0,0642	0,0359
23	0,1032	0,1013	0,1134
24	0,1748	0,1018	0,1745
25	0,1232	0,1418	0,0746
26	0,1020	0,0744	0,1182
27	0,1802	0,0993	0,1771

Media de las 3 series medidas – Perpendicularidad – Ultimaker S5	
Probeta	Valor
1	0,0252
2	0,0251
3	0,0308
4	0,0218
5	0,0243
6	0,0363
7	0,0315
8	0,0321
9	0,0405
10	0,0182
11	0,0232
12	0,0297
13	0,0178
14	0,0247
15	0,0359
16	0,0202
17	0,0276
18	0,0456
19	0,0223
20	0,0244
21	0,0338
22	0,0144
23	0,0279
24	0,0397
25	0,0230
26	0,0283
27	0,0469

Media de las 3 series medidas – Perpendicularidad – Anet A8	
Probeta	Valor
1	0,0796
2	0,0892
3	0,0837
4	0,0731
5	0,0612
6	0,0854
7	0,0676
8	0,0799
9	0,0727
10	0,0697
11	0,0724
12	0,0839
13	0,0843
14	0,0683
15	0,0879
16	0,0952
17	0,0888
18	0,0881
19	0,0904
20	0,0810
21	0,0949
22	0,0714
23	0,0903
24	0,0912
25	0,1239
26	0,1038
27	0,0877

Media de las 3 series medidas – Cilindricidad – Ultimaker S5	
Probeta	Valor
1	0,0907
2	0,1242
3	0,1677
4	0,1644
5	0,1897
6	0,2336
7	0,1070
8	0,1256
9	0,1530
10	0,0625
11	0,0891
12	0,0967
13	0,0621
14	0,0809
15	0,0892
16	0,0707
17	0,0849
18	0,1302
19	0,1017
20	0,1182
21	0,1313
22	0,0914
23	0,1569
24	0,1672
25	0,1571
26	0,1426
27	0,1701

Media de las 3 series medidas – Cilindricidad – Anet A8	
Probeta	Valor
1	0,2288
2	0,2509
3	0,2685
4	0,2507
5	0,5273
6	0,2943
7	0,3595
8	0,3447
9	0,2690
10	0,2045
11	0,2330
12	0,2191
13	0,2908
14	0,2248
15	0,2358
16	0,2251
17	0,2641
18	0,2728
19	0,2655
20	0,2593
21	0,2810
22	0,2537
23	0,3577
24	0,2304
25	0,2386
26	0,2516
27	0,2607

Anexo VII: Gráficas de interacción obtenidas a partir de los resultados de las mediciones

Además de los resultados y las representaciones gráficas mostrados en el proyecto, el software “Minitab” ofrece unas gráficas de interacción entre los parámetros de impresión y las cotas obtenidas en función del eje en el que se produce.

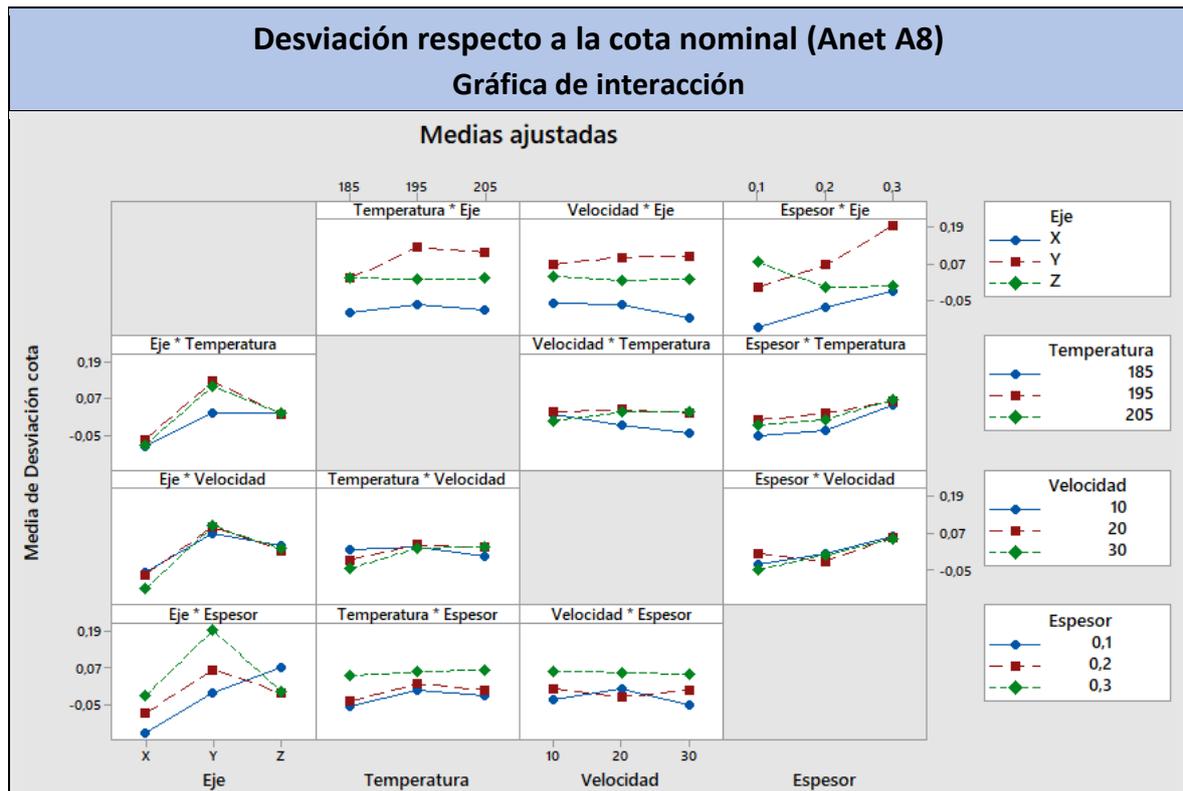
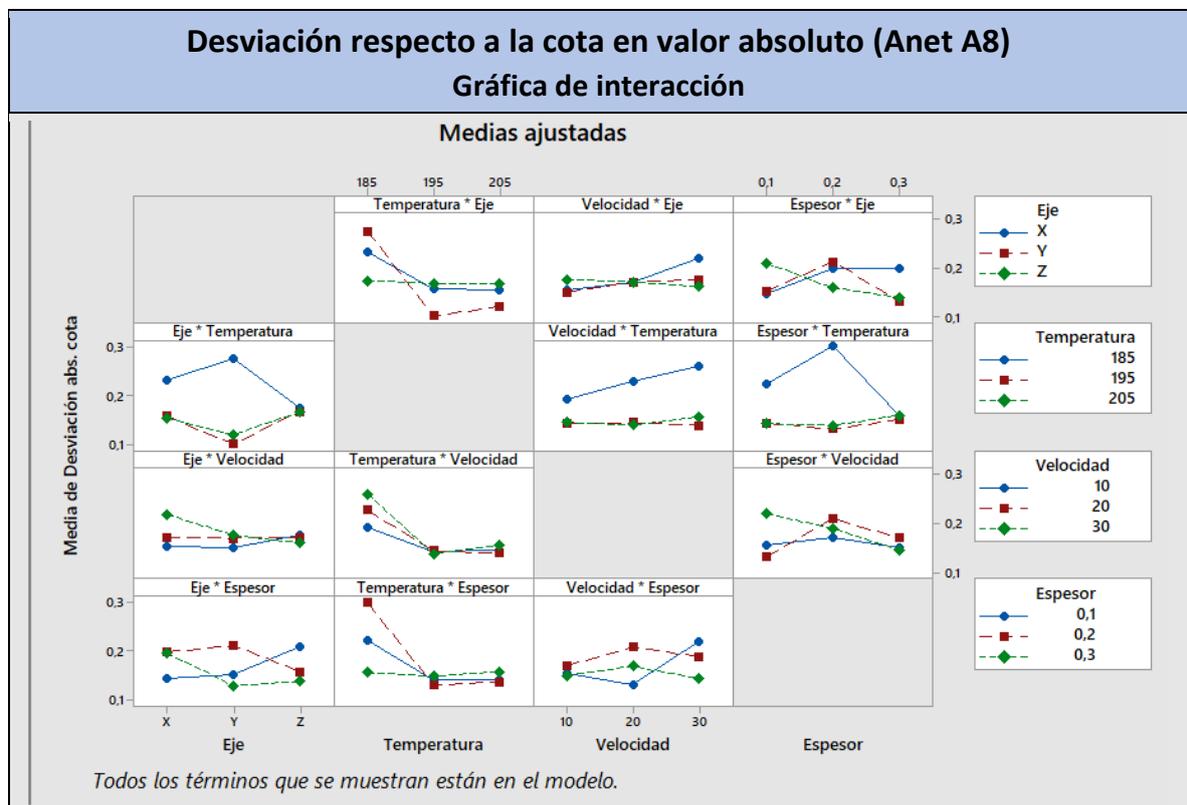
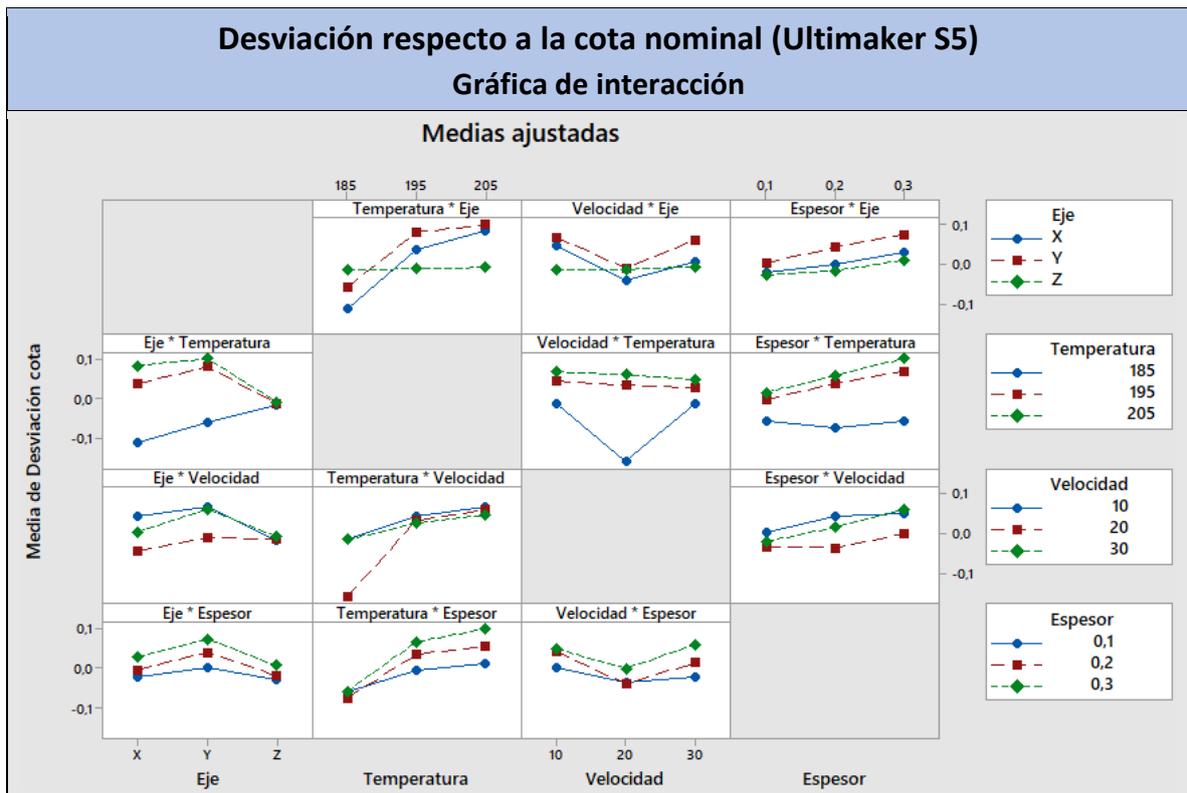


Ilustración 114 – Gráfica de interacción en las desviaciones de las cotas directas (Anet A8)



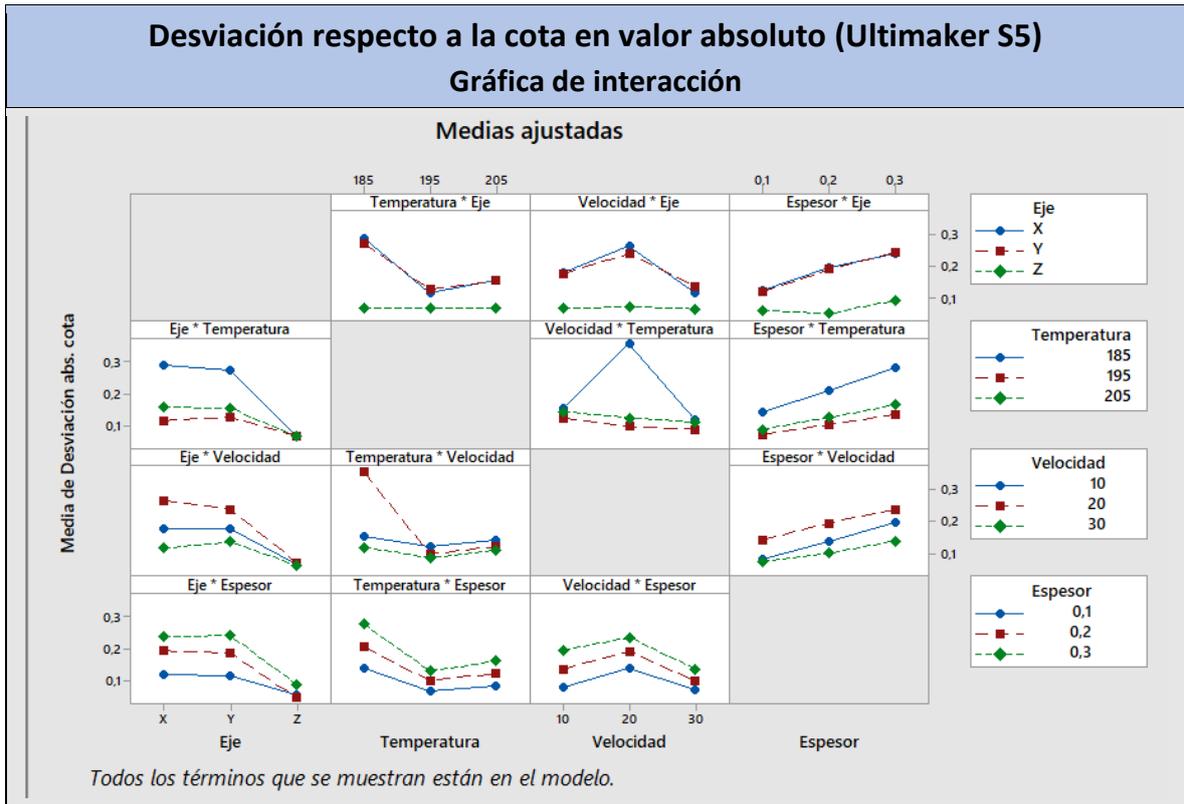


Ilustración 117 – Gráfica de interacción en las desviaciones absolutas de las cotas directas (Ultimaker S5)

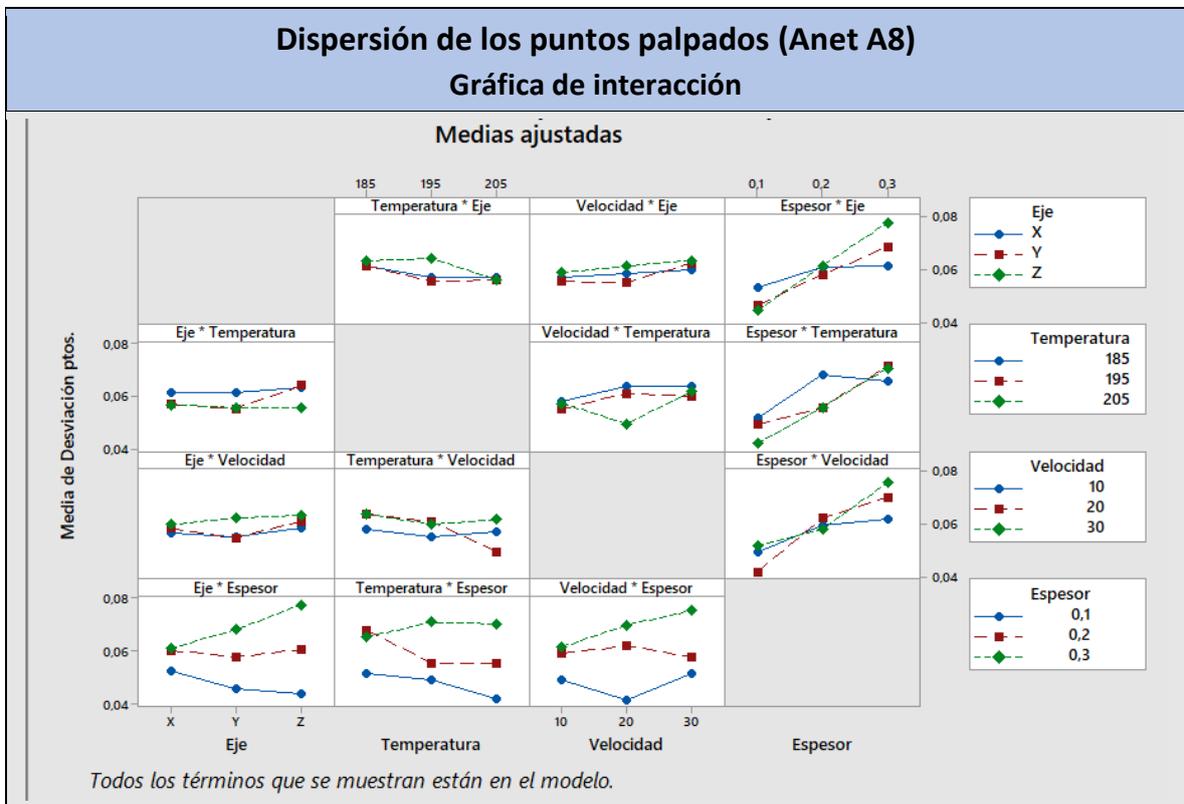


Ilustración 118 – Gráfica de interacción en las desviaciones de los puntos palpados (Anet A8)

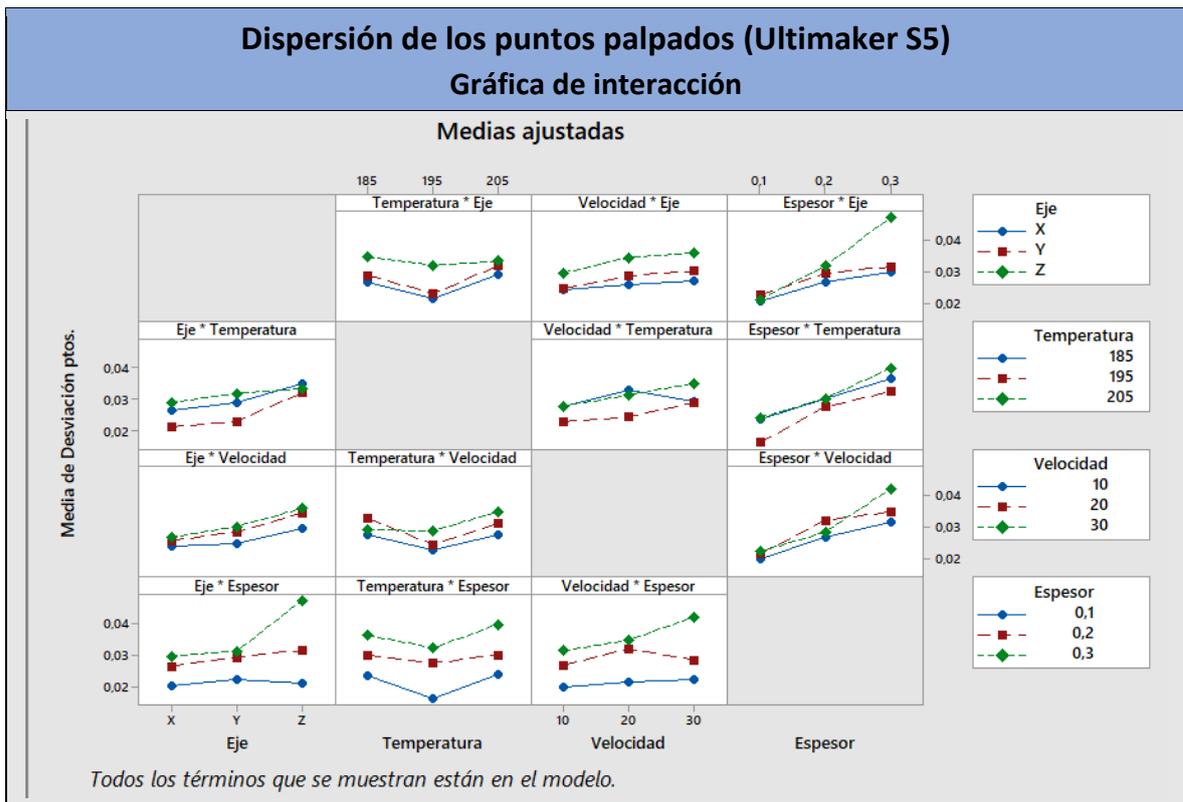


Ilustración 119 – Gráfica de interacción en las desviaciones de los puntos palpados (Ultimaker S5)