



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

PUESTA EN MARCHA Y PROCEDIMIENTO DE VERIFICACIÓN DE IMPRESORA 3D DE ESTEREOLITOGRÁFIA FORM 1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRECISIÓN

Autor

Samuel Abad García

Director

Jorge Santolaria Mazo

EINA / Grado en Tecnologías Industriales
Febrero, 2015



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

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

D./D^a. SAMUEL ABAD GARCÍA

con nº de DNI 73003894-P en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
GRADO (Título del Trabajo)
PUESTA EN MARCHA Y PROCEDIMIENTO DE VERIFICACIÓN DE IMPRESORA 3D
DE ESTEREOLITOGRAFÍA FORM 1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRECISIÓN

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

Zaragoza, 11 DE FEBRERO DE 2015

Fdo: SAMUEL ABAD GARCÍA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer el apoyo recibido por parte de mi familia y mis amigos, ya que sin él hubiera sido mucho más difícil llegar a este punto. Entre otras cosas, he aprendido que todo esfuerzo tiene su recompensa.

Agradecer especialmente a mi director del proyecto Jorge Santolaria el tiempo que me ha dedicado ante cualquier duda que pudiera surgir y el tiempo dedicado al proyecto. Gracias a él he podido ampliar mis conocimientos y profundizar en el campo de la impresión 3D, algo que hasta entonces era desconocido para mí.

Por último quiero agradecer al departamento de Fabricación la posibilidad de utilizar los recursos y utilajes que he necesitado en todo momento.

PUESTA EN MARCHA Y PROCEDIMIENTO DE VERIFICACIÓN DE IMPRESORA 3D DE ESTEREOLITOGRAFÍA FORM 1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRECISIÓN

RESUMEN

En los últimos tiempos se está asistiendo a un cambio hacia lo digital en distintos ámbitos de la vida, tanto personal como laboral.

Además de innovadores, son muy variados los procesos que posibilitan la realización de piezas mediante Fabricación Aditiva (AM), lo que supone una "revolución industrial". La oportunidad de prescindir de herramientas, de reproducir cualquier forma que el ser humano pueda imaginar y la inmediatez con la que se responde al requerimiento variable del consumidor, hacen del AM una verdadera pieza clave del futuro industrial.

En primer lugar, se va a introducir la Fabricación Aditiva. Entre las múltiples tecnologías existentes, este trabajo está focalizado en la estereolitografía (SLA), más concretamente en la puesta en marcha y verificación de la impresora 3D Form 1, así como la comparación de dicha impresora con otra que utiliza un método distinto de Fabricación Aditiva.

Posteriormente se va a describir detalladamente la puesta en marcha de la impresora Form 1, en la que se incluyen tanto las especificaciones técnicas de la misma, el proceso y los pasos necesarios a seguir por un usuario, como los materiales y el software necesarios para su correcta utilización.

A continuación, tras una revisión del estado del arte de patrones utilizados en procedimientos de verificación funcional de máquinas-herramienta y sistemas de Fabricación Aditiva, se diseñarán patrones que permitan analizar las capacidades de la impresora.

Se fabricarán diferentes versiones de las piezas patrón en diferentes condiciones, con el posterior análisis metrológico en una Máquina de Medición de Coordenadas. Con los datos obtenidos se realizará un estudio tanto de la precisión geométrica de la impresora como de la precisión dimensional.

Finalmente, se realizará una comparativa de precisión de la impresora a estudio con una impresora que emplea otra tecnología, a través de la fabricación y la medición de una pieza patrón.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. FABRICACIÓN ADITIVA O IMPRESIÓN 3D.....	1
1.1.1. <i>Ventajas de la tecnología AM</i>	1
1.1.2. <i>Limitaciones de la tecnología AM</i>	1
1.2. ETAPAS DEL PROCESO.....	2
1.3. MÉTODOS	3
1.3.1. <i>Sinterizado en lecho de polvo.....</i>	3
1.3.2. <i>Fotopolimerización</i>	4
1.3.3. <i>Extrusión.....</i>	6
1.3.4. <i>Laminación.....</i>	6
1.3.5. <i>Impresión.....</i>	7
1.3.6. <i>Tabla comparativa de las principales tecnologías.....</i>	8
2. PUESTA EN MARCHA FORM 1	9
2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y DETALLES DE LA IMPRESORA FORM 1.....	9
2.2 PROCESO DE PUESTA EN MARCHA Y USO DE LA IMPRESORA FORM 1	10
2.3 MATERIALES.....	13
2.4 SOFTWARE.....	13
3. VERIFICACIÓN FORM 1	15
3.1 TRABAJOS PREVIOS	15
3.2 PROCESOS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PIEZAS PATRÓN.....	17
3.2.1 <i>Diseño Pieza 1</i>	17
3.2.2 <i>Diseño Prismas.....</i>	18
3.2.3 <i>Diseño Matriz</i>	18
3.2.4 <i>Fabricación de las piezas patrón.....</i>	18
3.3 MEDICIÓN DE LAS PIEZAS	23
3.4 ÁNALISIS DE RESULTADOS.....	26
3.5 ERRORES.....	37
4. COMPARACIÓN DE IMPRESORAS	39
4.1 TABLA COMPARATIVA DE PRECIOS DE IMPRESORAS 3D	39
4.2 OBJET EDEN 350V	40
4.3 COMPARACIÓN DE LA PRECISIÓN GEOMÉTRICA.....	41
4.4 COMPARACIÓN DE LA PRECISIÓN DIMENSIONAL.....	44
5. CONCLUSIÓN.....	45
6. REFERENCIAS	47
ANEXO A: HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS FORM 1.....	49
ANEXO B: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MATERIALES.....	50
ANEXO C: HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS OBJET EDEN 350V	52
ANEXO D: TRABAJOS PREVIOS.....	54
ANEXO E: RESULTADOS DE LAS MEDICIONES.....	64
ANEXO F: ELEMENTOS Y PLANOS PIEZAS PATRÓN	73
ANEXO G: ASPECTOS ECONÓMICOS Y TEMPORALES.....	80

1. INTRODUCCIÓN

1.1. FABRICACIÓN ADITIVA O IMPRESIÓN 3D

La Fabricación Aditiva o Additive Manufacturing (AM), como se conoce internacionalmente, consiste básicamente en fabricar un objeto sólido a partir de un modelo digital.

En el último cuarto del siglo XX surgen las tecnologías AM, que aprovechan todo el conocimiento desarrollado en la era digital, y que pueden superar las limitaciones de los procesos de construcción de piezas empleados hasta el momento, ya que se pasa a fabricar por deposición controlada de material, capa a capa, aportando exclusivamente allí donde es necesario, hasta conseguir la geometría final, en lugar de arrancar material (mecanizado, troquelado), o conformar con ayuda de herramientas y moldes (fundición, inyección, plegado) [1].

1.1.1. Ventajas de la tecnología AM

Las principales características que distinguen el proceso de fabricación de sólidos por adición de capas de material (AM) de cualquier otro proceso de fabricación industrial, le confieren enormes ventajas competitivas. Éstas pueden resumirse en dos:

- 1- La complejidad geométrica que se debe conseguir no encarece el proceso: características como la esbeltez, un vaciado interior, canales internos, los espesores variables, las formas irregulares e incluso la reproducción de la naturaleza son retos que los métodos convencionales (sustractivos y conformativos) de fabricación de piezas no han resuelto más que con aproximaciones, ensamblajes o por medio de procesos de muy alto coste, y que para el AM son, en muchas ocasiones, propiedades muy poco relevantes a la hora de fabricar una pieza [2].
- 2- La personalización no encarece el proceso: AM permite fabricar productos, sin imponer un elevado coste, independiente de si se tiene que fabricar un determinado número de piezas iguales o todas distintas, lo que facilita la personalización, que es una de las principales tendencias actuales en el desarrollo de productos con valor añadido; la personalización en masa es uno de los "objetivos" que persigue la industria en países desarrollados [3].

1.1.2. Limitaciones de la tecnología AM

Sin embargo este novedoso proceso de fabricación presenta tres importantes limitaciones:

- 1- El coste de la maquinaria, los precios van desde 400 euros de una pequeña impresora 3D que puedes montar en casa, hasta máquinas de más de un millón de euros, en función de la aplicación final del producto, del tipo de tecnologías AM que hay que emplear y de la calidad que se requiera para cada caso.

- 2- Algunas tecnologías AM presentan problemas de repetitividad y capacidad de proceso, es decir, no se puede asegurar la precisión dimensional con la que se va a realizar una pieza y la siguiente. Por otro lado, la estabilidad en las propiedades físicas del producto (dureza, elasticidad, carga de rotura, metalurgia, etc.), aspecto crítico para su homologación en determinados sectores (automóvil, aeronáutico, médico), es a su vez una asignatura pendiente [4].
- 3- La posibilidad futura que se abre de poder llegar a fabricar los productos de manera individual por parte del público en general, por ejemplo mediante descargas por Internet de diseños, hace que se deban considerar asuntos relacionados con la propiedad intelectual de dichos diseños [5].

1.2. ETAPAS DEL PROCESO

Modelado

La impresión 3D tiene planos virtuales de diseño asistido por ordenador (CAD) o animación de software de modelado como guías para la impresión. Dependiendo de la máquina que se utiliza, el material se deposita sobre el lecho de compilación o de la plataforma hasta que la capa de material/aglutinante se completa y el modelo 3D final ha sido "impreso".

Los datos estándar de interfaz entre el software CAD y las máquinas de impresión es el formato de archivo STL. Un archivo STL se aproxima a la forma de una pieza o un ensamblaje con facetas triangulares. Pequeñas facetas producen una superficie de mayor calidad [6].

Impresión

La impresora lee el diseño y establece las capas correspondientes de material para construir el modelo a partir de una serie de secciones transversales. Estas capas, que corresponden a las secciones transversales virtuales a partir del modelo CAD, se unen automáticamente para crear la forma final.

La construcción de un modelo puede tardar de varias horas a varios días, dependiendo del método utilizado, el tamaño y la complejidad del modelo, tipo de máquina utilizada y del tamaño y número de los modelos de fabricación simultánea.

Acabado

Aunque la resolución del impreso producido es suficiente para muchas aplicaciones, una mayor resolución se puede lograr mediante la impresión de una versión ligeramente sobredimensionada del objeto deseado en resolución estándar y luego retirar material con un proceso sustractivo de mayor resolución.

Algunas técnicas de fabricación son capaces de utilizar múltiples materiales en el curso de la construcción de las piezas. Algunos también utilizan soportes durante la construcción. Los soportes son extraíbles tras la finalización de la impresión [6].

1.3. MÉTODOS

En la Figura 1.1 se muestra un esquema de los métodos y tecnologías de Fabricación Aditiva. Posteriormente son explicados aquellos más utilizados en la actualidad.

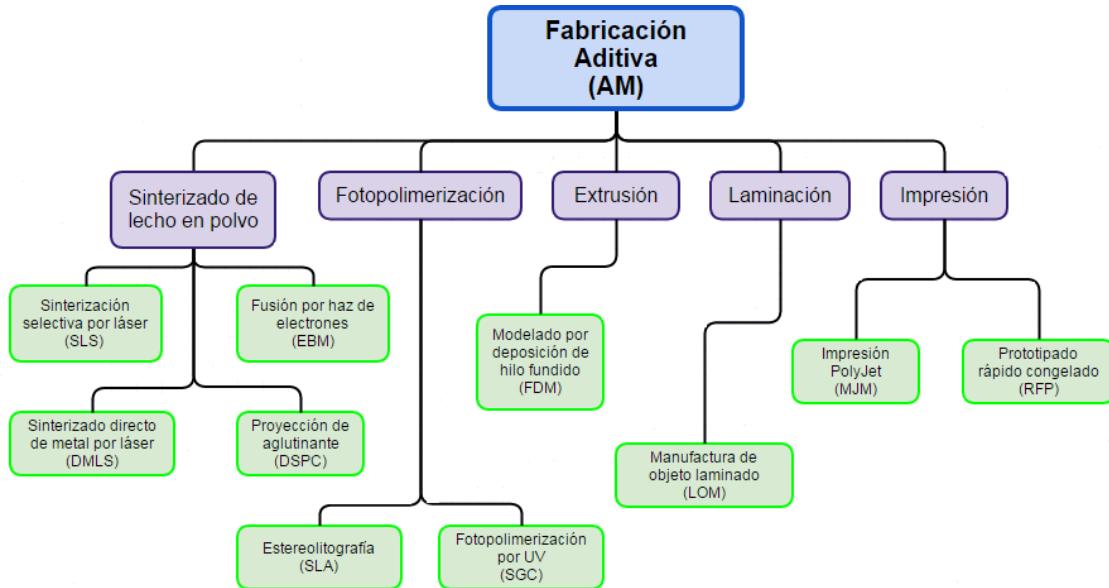


Figura 1.1 Métodos de Fabricación Aditiva

1.3.1. Sinterizado en lecho de polvo

Sinterización selectiva por láser (SLS)

La sinterización selectiva por láser (Figura 1.2) es una técnica de prototipado rápido que fabrica las piezas por capas. El software de la máquina hace capas y las envía al escáner de la máquina que escanea la superficie, activando un láser de CO₂ sólo en aquellas zonas donde existe espesor de pieza. Cuando ha terminado una superficie entera, el rodillo añade una nueva capa de material y se procede a sinterizar la siguiente sección de la pieza, así sucesivamente hasta que se termina de construir la pieza completa [7].

Los materiales que se emplean son generalmente poliamidas, por lo que las características mecánicas de los prototipos son en la mayoría de los casos similares a las piezas posteriormente inyectadas [8].

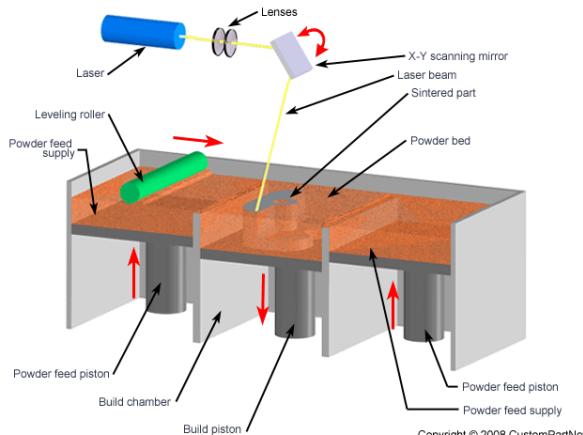


Figura 1.2 Esquema proceso SLS

Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)

Fusión por haz de electrones (EBM)

Fusión por haz de electrones (EBM) es un tipo de Fabricación Aditiva (AM) para piezas metálicas. Está clasificada como una técnica de sinterizado en lecho de polvo [9].

EBM utiliza un haz de electrones como fuente de energía. Esta tecnología fabrica piezas por fusión del polvo metálico capa por capa mediante un haz de electrones en un alto vacío. A diferencia de otras técnicas de sinterizado, esta tecnología logra la fusión completa del polvo metálico.

En la Figura 1.3 aparece representado el proceso EBM.

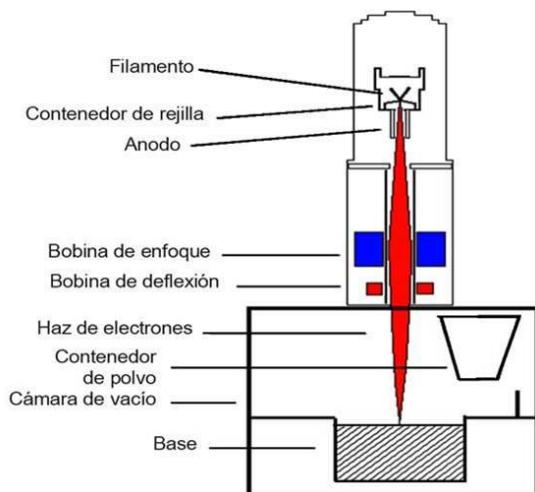


Figura 1.3 Esquema proceso EBM

Proyección de aglutinante (DSPC)

1.3.2. Fotopolimerización

En estos procesos, el modelo se genera capa a capa mediante el curado de una capa de resina en estado líquido, pasando a estar en estado sólido. Una vez la capa expuesta ha solidificado, la plataforma que contiene el modelo asciende o desciende una altura igual al espesor de la nueva capa a generar sobre la anterior. Este espacio es ocupado por una nueva capa de resina líquida dispuesta para su posterior curado y repetición del ciclo.

Estereolitografía (SLA)

Esta técnica se basa en la posibilidad de solidificar una resina en estado líquido mediante la proyección de un haz láser de una frecuencia y potencia muy concretas. El proceso empieza con el elevador situado a una distancia de la superficie del líquido igual al grosor de la primera sección a imprimir. El láser sigue la superficie de la sección y su contorno. El líquido es un fotopolímero que cuando está expuesto a radiación ultra-violeta solidifica [10].

Una vez solidificada esta sección, el elevador sube o baja (dependiendo del tipo de impresora) su posición para situarse a la altura de la siguiente lámina. Se repite dicha operación hasta conseguir la pieza final.

Como consecuencia, la creación de los prototipos se inicia en su parte inferior y finaliza en la superior. El hecho de que la resina inicialmente se encuentre en estado líquido, conlleva la necesidad de generar, no sólo la geometría correspondiente a la pieza a crear, sino además, una serie de columnas que permitan soportar la pieza a medida que ésta se va generando. De no ser así las distintas capas o voladizos que son necesarios, caerían al no ser autosoportados por la resina líquida no solidificada. Para obtener unas características mecánicas óptimas de las piezas generadas, los prototipos son sometidos a un post-curado en un horno especial de rayos UVA [10]. Otra opción es el curado con ayuda de la luz solar.

En las Figuras 1.4 y 1.5 se muestran las dos opciones de SLA existentes.

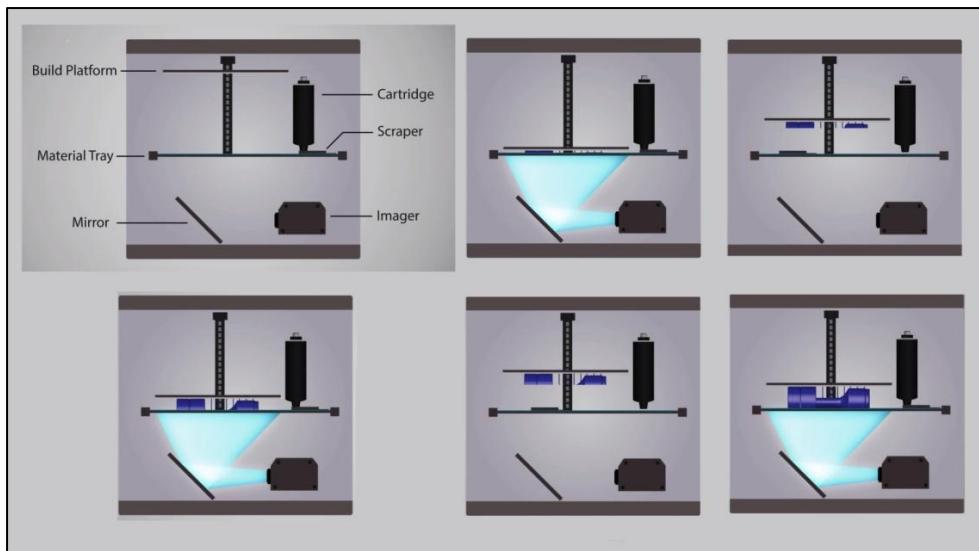


Figura 1.4 Esquema proceso SLA. Plataforma ascendente

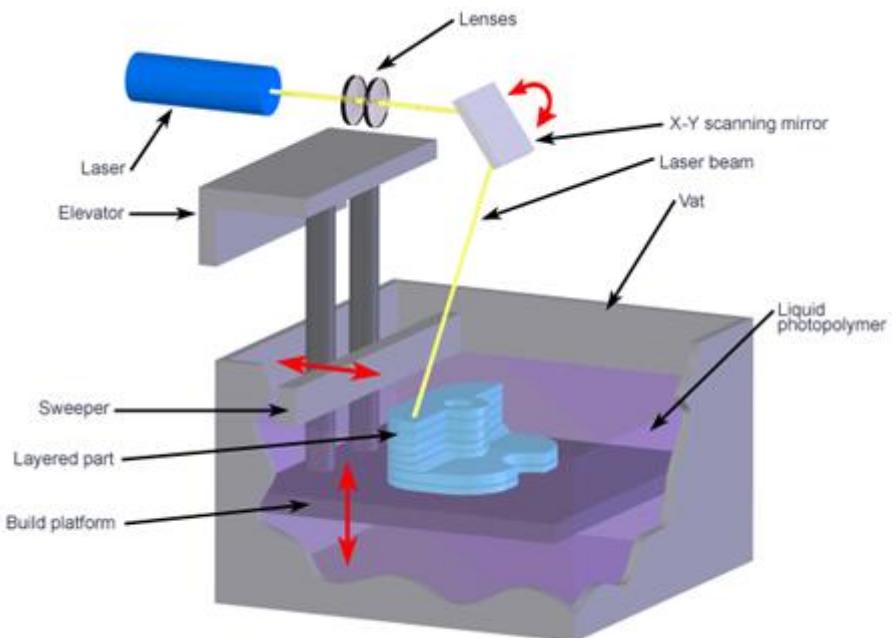


Figura 1.5 Esquema proceso SLA. Plataforma descendente

Fotopolimerización por UV (SGC)

1.3.3. Extrusión

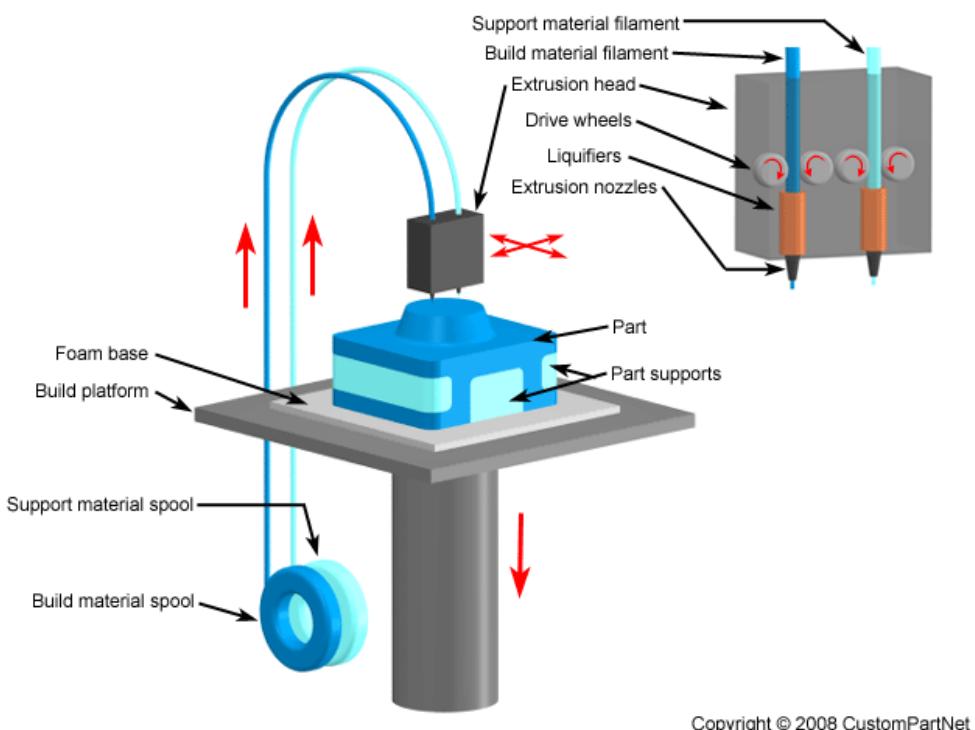
En los procesos de extrusión, el material que generará el modelo capa a capa, es depositado por unas boquillas que los extruyen en estado semisólido para pasar a solidificar una vez depositado, fundiéndose con la capa anterior y el material adyacente [10].

Modelado por deposición de hilo fundido (FDM)

Es la tecnología de Fabricación Aditiva más utilizada.

En este método pasa un hilo de material termoplástico por el interior de un inyector calefactable (generalmente se usa ABS, pero es posible la fabricación con diferentes termoplásticos variando la temperatura del cabezal así como con determinadas ceras, como son las destinadas a la formación de patrones) [11].

El material en cuestión avanza a lo largo de la boquilla (la cual se mueve en el plano XY), calentándose hasta llegar a su fusión. Seguidamente, se deposita sobre la mesa o capa anterior adhiriéndose a ella por estar fundido y solidificándose por la diferencia de temperaturas.



Copyright © 2008 CustomPartNet

Figura 1.6 Esquema proceso FDM

1.3.4. Laminación

El material es depositado en láminas en estado sólido que una vez unidas definen la geometría del objeto a construir.

Manufactura de objeto laminado (LOM)

1.3.5. Impresión

Tecnología que combina características propias de la SLA en cuanto al uso de resinas fotopoliméricas, con los procesos de extrusión de aglutinante.

Impresión Polyjet

La tecnología Polyjet (Figura 1.7) consiste en la "impresión" de un material fotopolímero mediante múltiples boquillas ubicadas en el cabezal. Las boquillas depositan el material en estado líquido sobre la bandeja de construcción con un movimiento similar al de una impresora. Una vez depositado, una luz ultravioleta solidifica el material. La bandeja de construcción desciende y el proceso se repite.

Las piezas se construyen con dos materiales fotopolímeros diferentes: el material de modelo y el material de soporte. Los soportes necesarios durante el proceso de construcción de las piezas son fabricados en un material diferente al modelo. Se trata de un material que, una vez finalizado el proceso de fabricación se elimina con un simple chorro de agua [12].

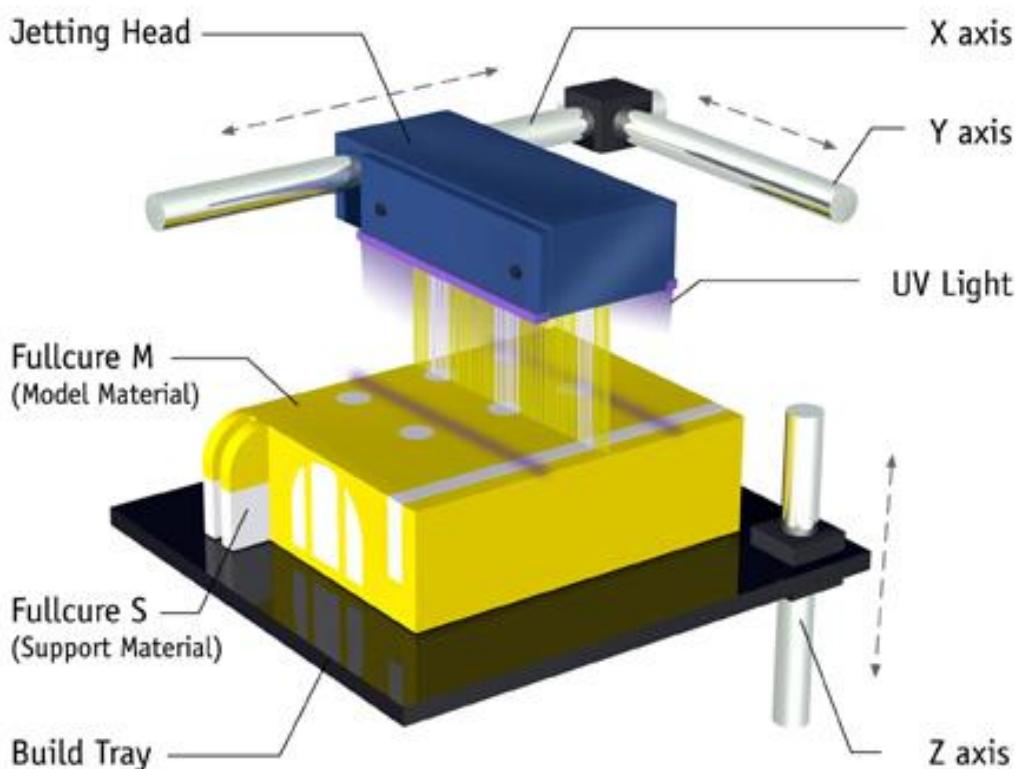


Figura 1.7 Esquema proceso Polyjet

Prototipado rápido congelado (RFP)

1.3.6. Tabla comparativa de las principales tecnologías

	Tecnologías de Fabricación Aditiva				
	SLA	SLS	EBM	FDM	Polyjet
Ventajas	- Tecnología madura - Piezas de buena calidad y precisión - Geometrías complejas	- Piezas de buenas prestaciones mecánicas - Geometrías complejas - Piezas funcionales - No necesita soportes - Resistencia a altas temperaturas	- Elimina tratamientos térmicos	- Rápido - Económico	- Muy rápido - Más preciso que FDM - Fabricación de moldes
Desventajas	- Necesarios soportes - Modelos quebradizos - Resinas caras - Piezas no funcionales - Post-procesos	- Mayores tolerancias - Peor acabado superficial - Necesario nitrógeno	- Precisa vacío - Rayos Gamma	- Piezas no funcionales - Materiales limitados	- Materiales limitados - Modelos quebradizos - Post-procesos - Necesarios soportes
Epesor de capa	0.01mm - 0.5mm	0.075mm - 0.5mm	0.013mm - 0.2mm	mínimo: 0.04mm	0.016mm - 0.1mm
Materiales	- Resinas ABS , policarbonato, polipropileno, epoxi - Termoplásticos	- Termoplásticos: Nylon, poliamida, poliestireno - Elastómeros	- Aleaciones de titanio - Aleaciones de acero	- ABS, nylon, policarbonato, poliéster	- Resinas - Composites
Calidad superficial	Uno de los procesos con mejor calidad	Algo granulada y de aspecto laminado	Un poco granulada	Algo granulado	Uno de los procesos con mejor calidad
Velocidad	Relativamente lenta	Más rápida que SLA	Bastante rápida	Media	Una de las más rápidas

Tabla 1.1 Resumen comparativo de las principales tecnologías de AM

2. PUESTA EN MARCHA FORM 1

La impresora a estudiar en este trabajo está basada en la estereolitografía. Como se ha mencionado antes, esta técnica consiste en la posibilidad de solidificar una resina fotopolimérica en estado líquido mediante la proyección de un haz láser ultravioleta. Para cada capa, el rayo láser traza una sección transversal del modelo en la superficie de la resina líquida. La exposición a la luz ultravioleta endurece el patrón trazado en la resina, que lo une a la capa de debajo [10].

Una vez que una capa se ha curado, la plataforma de construcción asciende por una distancia igual al espesor de una sola capa, entre 0,1 mm y 0,025 mm. El rayo láser cura la capa siguiente y ese proceso se repite una y otra vez hasta que se construye la pieza completa.

2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y DETALLES DE LA IMPRESORA FORM 1

La hoja resumen de especificaciones técnicas de la impresora Form 1 se puede encontrar en el Anexo A. Estas son las principales características a tener en cuenta [13]:

Resolución de la impresora

Los fabricantes de impresoras 3D utilizan diferentes métricas para definir "resolución", pero espesor de capa es la más común.

La impresora Form 1 puede crear capas tan finas de tan sólo 25 micrómetros, que es mucho menor que otras máquinas de escritorio.

El detalle mínimo, por otro lado, se refiere a la pared más delgada o el punto más fino que es posible imprimir, llegando a ser tan pequeño como 300 micrómetros en la Form 1. El haz de láser de esta impresora se puede mover en pasos de menos de 10 micrómetros [13], creando movimientos muy precisos y un acabado superficial que las máquinas FDM no pueden igualar.



Figura 2.1 Impresora 3D Form 1

Dimensiones máximas de los modelos a imprimir

Las dimensiones máximas de las piezas que se pueden imprimir son 125 x 125 x 165 mm. Para los modelos mayores, se puede imprimir por partes.

Velocidad

La velocidad de construcción es parecida a las máquinas FDM cuando se comparan espesor de la capa y densidad. Como regla general, la velocidad de construcción es de 1-2 cm/hora a lo largo del eje Z cuando se imprime a 100 micrómetros [13].

Por ejemplo, en el caso de nuestra pieza 1, cuando se imprime a 100 micrómetros el tiempo necesario es de 12 h 25 min, a 50 micrómetros es de 21 h y a 25 micrómetros es de 40 h 59 min.

Material necesario para su utilización

La impresora Form 1 llega totalmente montada, calibrada y lista para usar. Cada pedido Form 1 también incluye 1 litro de resina y un kit para ayudar a finalizar las impresiones. Todo lo que se necesita es un ordenador con el software Preform instalado, un modelo 3D para imprimir, y alcohol isopropílico (IPA), para sumergir en él el modelo impreso.

Precio

El precio de la impresora es de 2999€. Esto incluye: la impresora, un litro de material, el tanque de resina, la plataforma de construcción, el kit de finalización y un año de garantía [13].

Actualización a Form 1+

Formlabs anunció una actualización de la impresora 3D Form 1. Es la Form 1+, la cual es idéntica a la Form 1 original por el exterior, pero por dentro, el equipo de Formlabs ha actualizado componentes clave que le permiten imprimir con mayor precisión, más fiable y hasta dos veces más rápido que la Form 1.

❖ Mejoras de Form 1+ [14]:

- Módulo láser de segunda generación 4 veces más potente.
- Panel de control del galvanómetro actualizado.
- Recalibración completa.
- Nuevo y rediseñado tanque de resina.
- Ampliación de un año de garantía.

2.2 PROCESO DE PUESTA EN MARCHA Y USO DE LA IMPRESORA FORM 1

En este apartado se va a describir el proceso que debe seguir un usuario una vez recibida la impresora. Estos son los pasos que hay que llevar a cabo para la puesta en marcha y el uso de la impresora Form 1:

1. Elija una ubicación

La Form 1 es compacta por lo que cabe cómodamente en su escritorio o mesa de trabajo del taller. La impresora tendrá que conectarse a su equipo para iniciar una impresión, pero puede ser desconectada una vez que el archivo se transfiera por completo.

Coloque la impresora en una superficie plana. La Form 1 funciona mejor a temperatura ambiente (18-28 °C) [13]. Trate de ubicarla en algún lugar que no esté expuesta a temperaturas extremas.

2. Conecte e inicie la impresora

- Conecte el cable a la impresora y la toma de corriente de la pared más cercana.
- Pulse el botón de la Form 1 para encender la pantalla de la impresora.
- Conecte un extremo del cable USB en la parte posterior de la impresora y el otro extremo del cable al ordenador. Véase Figura 2.2.

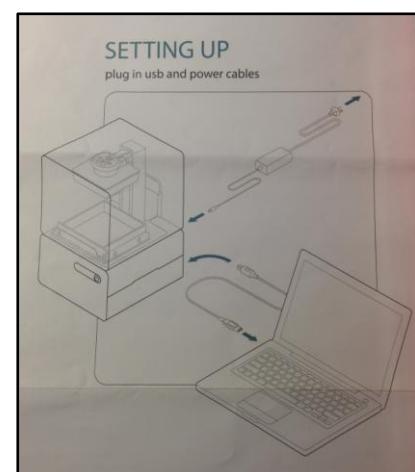


Figura 2.2 Puesta en marcha

3. Inserte el tanque de resina y la plataforma de construcción

Abra la cubierta y deslice el tanque de resina por las guías hasta que encaje en su lugar. A continuación, deslice y asegure la plataforma de construcción empujando la bisagra hacia abajo.

4. Llene el tanque de resina

El tanque de resina está diseñado para contener hasta 200 ml de resina.

- Agite la botella de resina.
- Vierta la resina en el tanque.
- Llene el tanque hasta la línea que indica máximo (Figura 2.3). Si se sobrepasa esta línea, la resina se desbordará y podría dañar la impresora.

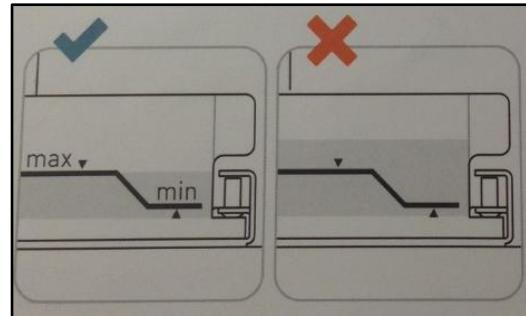


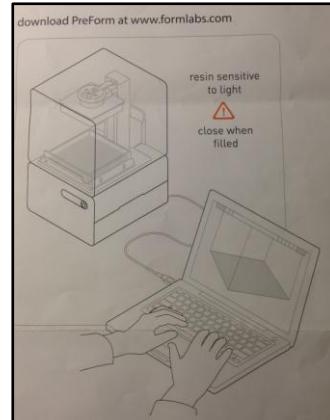
Figura 2.3 Llenado tanque

Impresiones de mayor tamaño pueden requerir que el tanque sea rellenado durante la impresión. Para ponerla en pausa, hay que pulsar el botón de la impresora, abrir la cubierta y añadir poco a poco la resina hasta llegar a la línea de llenado máximo.

5. Comience a imprimir

Para ello, deberá descargar el software PreForm de la página de Formlabs.

Una vez descargado el programa, será necesario cargar el modelo deseado en formato .OBJ o .STL. Posteriormente, deberá elegir una serie de aspectos necesarios para la impresión, tales como el espesor de capa, el tipo de resina utilizada o la generación de soportes (Figura 2.4). Esto se verá con detalle más adelante en la explicación del software.



Una vez realizados los pasos que indica el programa, deberá pulsar el botón "Send to Printer" y confirmar la impresión pulsando el botón de la impresora.

Figura 2.4 Software PreForm

6. Pasos posteriores a la impresión

- a) Retire la plataforma de construcción y colóquela en el lugar correspondiente de la bandeja (Figura 2.5).



Figura 2.5 Retirada plataforma

- b) Utilice el raspador para retirar la pieza de la plataforma de construcción (Figura 2.6).
- c) Enjuague la pieza en alcohol isopropílico (IPA). Para ello sumérjala en la bañera de enjuague y agítela durante 2 minutos. Luego déjela reposar durante 10 minutos (Figura 2.7).

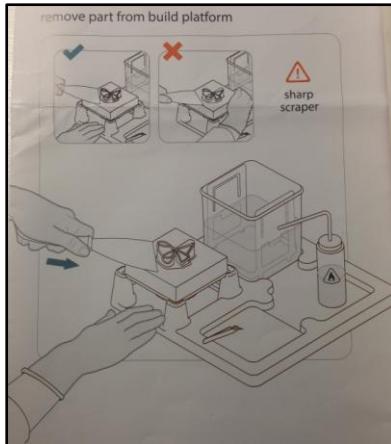


Figura 2.6 Separación pieza



Figura 2.7 Enjuague en IPA

7. Retire los soportes

Para obtener el modelo deseado, es necesario retirar los soportes generados en la impresión. Esto se puede hacer de forma manual sin mucha dificultad. En el caso de piezas delicadas o piezas que contengan soportes interiores, se pueden utilizar las herramientas que incluye el kit de finalizado para no deteriorar la pieza.

8. Post-curado

La resina no está totalmente curada después del baño en alcohol, por lo que hay que someterla a un proceso de post-curado. Para ello se puede curar en un horno o lámpara con luz UV o directamente con la luz solar.

En nuestro caso hemos optado por curar las piezas con ayuda de la luz solar (Figura 2.8).

9. Lijado

Para evitar que queden restos de los soportes generados, se puede lijar la pieza y así conseguir un mejor acabado.

En este caso no se ha realizado este proceso para no alterar las características dimensionales nominales de las piezas.

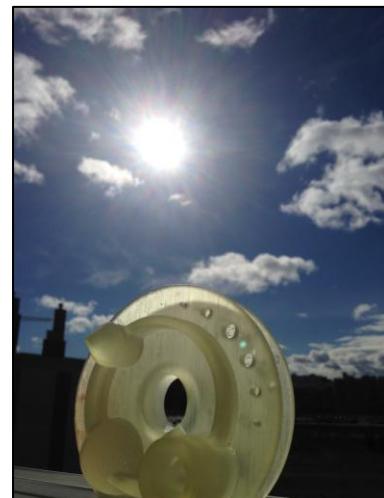


Figura 2.8 Exposición luz UV

2.3 MATERIALES

Resinas

Formlabs ofrece Black, Grey, Clear y White; resinas estándar para la creación de prototipos generales. Estas resinas producen modelos físicos precisos y robustos. Formlabs también ofrece resinas funcionales con diferentes propiedades mecánicas tales como Castable y Flexible. En base a las necesidades de los usuarios, Formlabs está desarrollando nuevos materiales con diferentes propiedades estéticas y mecánicas.

En nuestro caso, hemos empleado la resina Clear. La hoja de especificaciones técnicas se puede consultar en el Anexo B.

Propiedades de las resinas

Las resinas fotopoliméricas de Formlabs están pensadas para el desarrollo de productos y la creación rápida de prototipos. En combinación con la tecnología de estereolitografía, estos materiales presentan acabados de superficies lisas y capturas precisas de los detalles mínimos en las impresiones.

2.4 SOFTWARE

Software PreForm

Formlabs crea el software PreForm, que hace que la configuración y la creación de su impresión sea sencilla e intuitiva. Después de importar un archivo .OBJ o .SLT de cualquier paquete CAD 3D, puede escalar, rotar, duplicar y alinear el modelo. Finalmente, tan sólo es necesario pulsar el botón de "Sent to printer" para imprimir.

PreForm tiene todas las características y herramientas que se podría esperar:

- a) Selección del material a utilizar y el espesor de capa para la impresión
- b) Barra de herramientas del menú:
 - Factor de escala
 - Orientación
 - Duplicación
 - Disposición en la plataforma de construcción
- c) Importación de otros modelos
- d) Generación de soportes

Estos ajustes básicos son suficientes ya que los resultados de impresión son bastante aceptables.

El único ajuste en el que es posible profundizar un poco más es la generación de soportes. PreForm le permite ajustar la densidad de apoyos, el tamaño de punto de contacto, el espesor de la base, los apoyos internos, la cantidad de apoyos en superficies inclinadas así como la altura por encima de la base.

Software para crear archivos CAD 3D

Herramientas profesionales para modelado digital incluyen Solidworks, Rhino e Inventor entre otras. En este caso se ha utilizado Solidworks.

Solidworks es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp. Su primera versión fue lanzada al mercado en 1995 con el propósito de hacer la tecnología CAD más accesible.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada [15].

3. VERIFICACIÓN FORM 1

3.1 TRABAJOS PREVIOS

Existen dos importantes metodologías empleadas en la evaluación del rendimiento de una máquina o proceso. La primera consiste en la medición directa de la máquina o las características del proceso. La segunda, se basa en la medición de una pieza patrón fabricada por la máquina a evaluar.

Para realizar mediciones directas se deben poder posicionar y controlar los componentes individuales de la máquina así como poder utilizar los instrumentos de medida dentro del volumen de trabajo. El problema es que no siempre es posible realizar el posicionamiento y control necesarios, como es el caso de los procesos de Fabricación Aditiva.

Este tipo de máquinas tienen una serie de obstáculos que impiden la medición directa de sus componentes, siendo necesaria la utilización de piezas patrón. Por un lado, los componentes internos no tienen fácil accesibilidad. Por otro lado, muchos de estos procesos contienen elementos láser que impiden la manipulación de la máquina mientras está en funcionamiento.

Con la aparición de estas nuevas tecnologías se han desarrollado gran variedad de piezas patrón (Figura 3.1). Algunas están orientadas a la evaluación de procesos individuales mientras que otras se centran en la comparación y elección del proceso de Fabricación Aditiva más adecuado en cada caso.

Los principales parámetros estudiados han sido el acabado superficial, la precisión geométrica y la precisión dimensional.

En el Anexo D se muestran varios de los estudios previos en los que se indican tanto los procesos y características estudiados como los diseños de las piezas patrón y los resultados obtenidos.

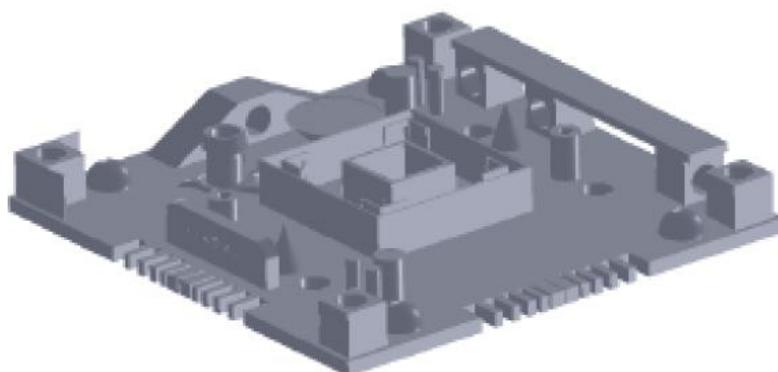


Figura 3.1 Pieza patrón diseñada por Mahesh

En los últimos años, la verificación de los sistemas de producción de Fabricación Aditiva está enfocada y regida por una serie de normas creadas por el comité F42 del organismo de normalización ASTM.

La norma ASTM F2971 [30] describe un procedimiento estándar para tratar los resultados obtenidos evaluando piezas producidas mediante Fabricación Aditiva. En la Tabla 3.1 se indica el formato propuesto de tratamiento de datos y en la Figura 3.2 las diferentes orientaciones que se aconsejan para realizar los estudios. Los dos objetivos de esta norma son establecer requerimientos de presentación de datos y proporcionar información para el diseño de hojas de especificaciones de propiedades de materiales.

A		Report Header Requirement		
	Data Element	Format	Supporting Information	
B	Material	Material Specification	Unique Alpha/Numeric Designation	Materials Specification meeting the requirements of this practice
C	Process Standard	Process Specification	Unique Alpha/Numeric Designation	Contains applicable materials, materials loading, processing, and post processing information for the sample
D	Test Plan or Specification	Document or Document Designation	Unique Alpha/Numeric Designation	Contains specific deviations or exceptions from existing test standards, ad hoc, or custom test methods used to produce the data
Data Field Requirements				
	Data Element	Format	Supporting Information	
E	Test Process	Test Plan/Standard or Process Coordinates	Unique Alpha/Numeric Designation	Units, Specific Test Configuration, and Reporting Options, Sample Preparation, and Sample Conditioning Per Terminology F2921
F	Sample Orientation	X,Y,Z and Degrees		

Tabla 3.1 Formato y requerimientos para el tratamiento de resultados

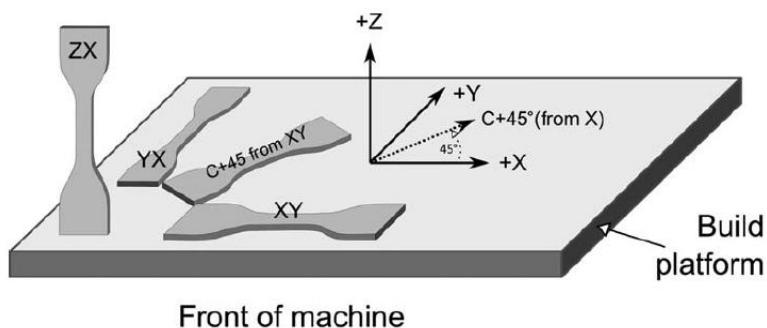


Figura 3.2 Orientaciones de las muestras en la plataforma de construcción

La norma ISO/ASTM 52921 [31] incluye la nomenclatura, términos y definiciones asociados a los sistemas de coordenadas y las metodologías de verificación de sistemas de Fabricación Aditiva con motivo de estandarizar los términos empleados por los usuarios, fabricantes, etc. En la Figura 3.3 se reflejan algunos de los términos estándar utilizados en las impresoras y sus sistemas de coordenadas.

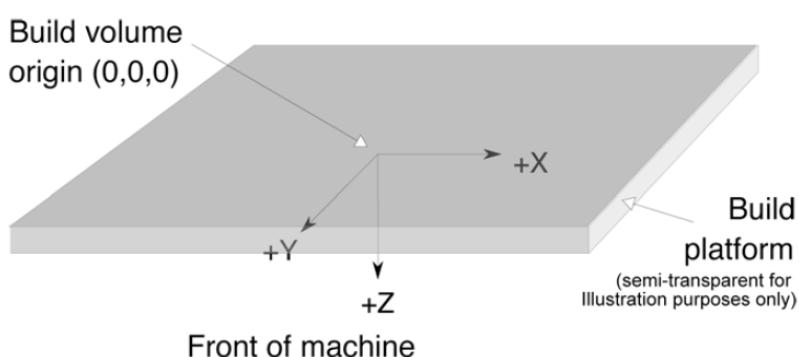


Figura 3.3 Sistema genérico de Fabricación Aditiva

3.2 PROCESOS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PIEZAS PATRÓN

A continuación se van a detallar los procesos de diseño y fabricación de cada una de las piezas empleadas en el proceso de verificación de la impresora Form 1. Los planos y los nombres de los elementos de cada pieza se encuentran en el Anexo F.

3.2.1 Diseño Pieza 1 (Figuras 3.4 y 3.5)

El objetivo principal por el que ha sido diseñada esta pieza patrón es el análisis de la precisión geométrica y dimensional de la impresora 3D Form 1.

Debido a que las dimensiones máximas de construcción de esta impresora son 125x125x160 mm, el diámetro elegido para la pieza en su diseño ha sido 110 mm, mientras que la altura es de 50 mm.

Para determinar la precisión de la máquina, se han incluido los siguientes elementos:

- Agujero cilíndrico pasante en el centro
- 2 cilindros huecos, uno de ellos pasante
- Semiesfera
- Cono
- 9 agujeros cilíndricos con diámetros comprendidos entre 7 y 0,25 mm en la cara superior y otros 9 agujeros iguales la cara inferior.
- Dos rampas

Con estos elementos podemos verificar la impresora en términos de precisión geométrica de localización y forma así como precisión dimensional y analizar los errores en cada caso:

Precisión geométrica de localización

Se analizará la posición (X,Y) de cada uno de los elementos incluidos en la Pieza 1, la coaxialidad de los dos cilindros y la coaxialidad existente entre los 9 agujeros de las caras superior e inferior.

Precisión geométrica de forma

Para determinar el alcance de la impresora en este aspecto, se va a estudiar la cilindricidad de todos los elementos posibles, la planitud de la cara superior, y la angularidad del cono y las rampas.

Precisión dimensional

En este caso, las características a analizar son los diámetros de todos los elementos posibles y el espesor de las rampas.

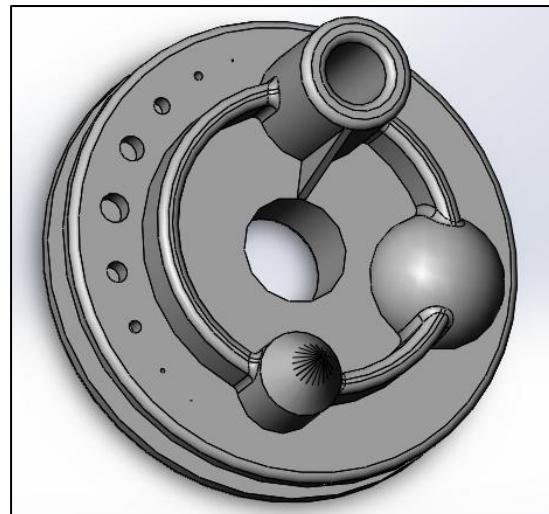


Figura 3.4 Vista superior Pieza 1

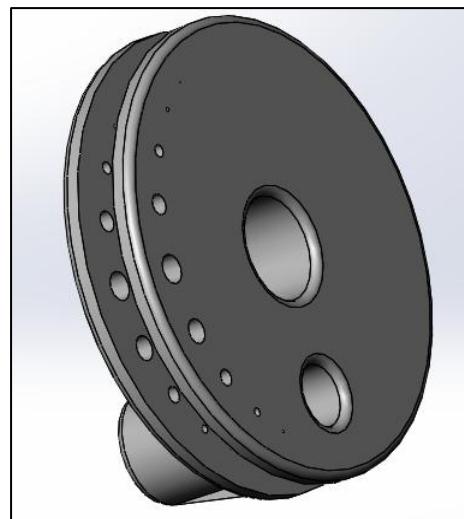


Figura 3.5 Vista inferior Pieza 1

3.2.2 Diseño Prismas

Para analizar la precisión dimensional de la impresora Form 1 en el eje Z se han diseñado 3 prismas de 50 (Figura 3.6), 100 (Figura 3.7) y 150 (Figura 3.8) mm de altura. Aprovechando estos diseños, también se va a estudiar la precisión geométrica de forma mediante la planitud de 4 planos que serán mostrados más adelante.

Se trata de 3 prismas de base cuadrada diseñados de forma hueca por el simple motivo de ahorro de material. Los de 100 y 150 mm se han cortado con el objetivo de ahorrar material, ya que lo que se pretende es determinar los errores en el eje Z y con dejar un pequeño plano en la cara superior para poder ser medido por la MMC es suficiente.

Cabe destacar que por el hecho de trabajar por capas, la altura esperada de la pieza será un múltiplo de la altura de capa, que no tiene por qué coincidir con la altura de la pieza. El error en el eje Z es inherente a la Fabricación Aditiva.

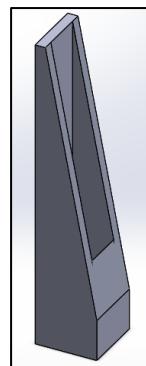
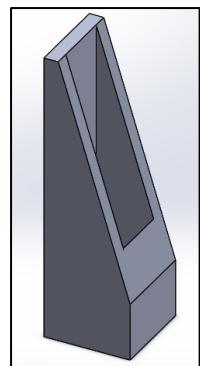
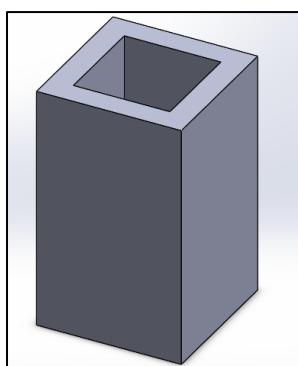


Figura 3.6 Prisma 50 mm

Figura 3.7 Prisma 100 mm

Figura 3.8 Prisma 150 mm

3.2.3 Diseño Matriz (Figura 3.9)

El objetivo del diseño de esta pieza patrón es el análisis de la precisión geométrica de localización (ejes X e Y).

Por este motivo, se ha diseñado una estructura matricial que consta de 9 prismas rectangulares de dos alturas, donde cada prisma contiene 9 agujeros cónicos (Figura 3.10) diseñados pensando en su medida con un palpador de 2mm de diámetro.

Con un total de 81 agujeros cónicos distribuidos a lo largo de toda la pieza que ocupa la práctica totalidad de la plataforma de construcción, se puede analizar perfectamente el error de posicionamiento que sufre la impresora en función del lugar donde se encuentre localizada la pieza.

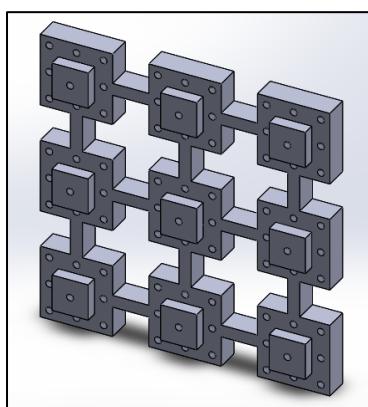


Figura 3.9 Matriz

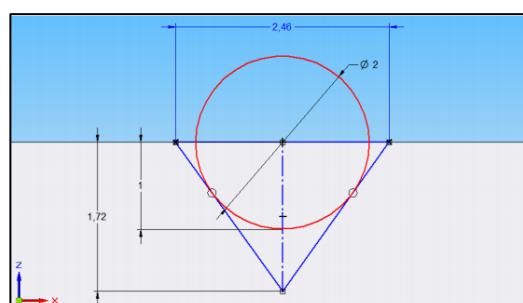


Figura 3.10 Agujeros cónicos

3.2.4 Fabricación de las piezas patrón

Con las piezas diseñadas, el siguiente objetivo es la fabricación de las mismas en la impresora Form 1. Para ello, es necesario seguir una serie de pasos:

1. Diseño CAD de las piezas
2. Conversión del archivo CAD a formato OBJ o STL
3. Configuración de los parámetros de impresión deseados
4. Impresión de las piezas patrón
5. Post-procesos

Este proceso es común en la mayoría de las piezas patrón estudiadas. Aquí se va a profundizar un poco en cada paso a seguir:

1. Diseño CAD de la pieza

El programa de CAD elegido en este trabajo ha sido Solidworks. En las Figuras 3.11 y 3.12 se muestran algunos de los ejemplos del diseño CAD de las piezas patrón.

Las operaciones más utilizadas han sido extrusión, vaciado, simetría, revolución y matriz.

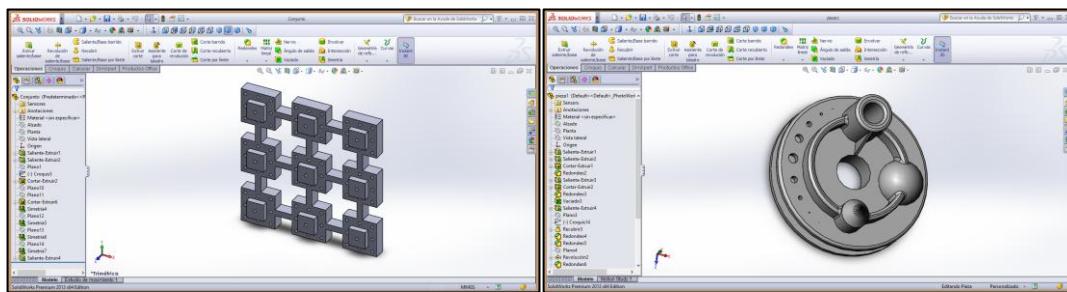


Figura 3.11 Diseño CAD Matriz

Figura 3.12 Diseño CAD Pieza 1

2. Conversión del archivo CAD a formato OBJ o STL

Ese paso es muy sencillo, ya que la conversión a STL se puede hacer directamente desde el programa Solidworks desde la opción de *Guardar como*.

Antes de guardarla, podemos modificar dos parámetros relacionados con la resolución del archivo. Estos son la tolerancia de la desviación y la tolerancia del ángulo.

Estos factores afectarán al STL ya que esta conversión se realiza mediante la simplificación de la pieza transformando la geometría en triángulos. Estos están caracterizados por la desviación y el ángulo elegidos.

En el caso de la Pieza 1, al contener una semiesfera es importante seleccionar una tolerancia de ángulo muy pequeño por lo que se ha elegido 1°. En cuanto a la desviación, la tolerancia es de 0.05 mm.

En el resto de las piezas la tolerancia de desviación seleccionada es 0.05 mm y la de ángulo es 3° ya que no existen formas redondeadas y no es necesaria tanta precisión.

3. Configuración de los parámetros de impresión deseados

Una vez se tiene el archivo STL, éste se puede abrir desde el software PreForm directamente.

Este programa permite seleccionar y modificar varios parámetros como se ha mencionado anteriormente.

Lo primero que hay que hacer es seleccionar el material con el que vamos a trabajar. En este caso se ha empleado la resina Clear 01 para todas las piezas.

Posteriormente, hay que elegir el espesor de capa con el que queremos trabajar. Los 3 espesores disponibles son 0.1, 0.5 y 0.025 mm. La Pieza 1 y los 3 prismas han sido impresos en los 3 espesores de capa posibles para poder hacer una comparativa. Para la Matriz, el espesor de capa empleado ha sido 0.025 mm.

Una vez seleccionados estos dos parámetros, en la barra de herramientas del menú podemos modificar el factor de escala, la orientación, la generación de soportes y la localización de la pieza en la plataforma de construcción. Para cada pieza se han elegido diferentes valores de los parámetros comentados:

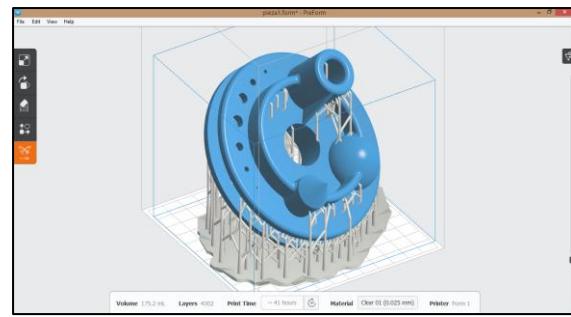


Figura 3.13 PreForm Pieza 1

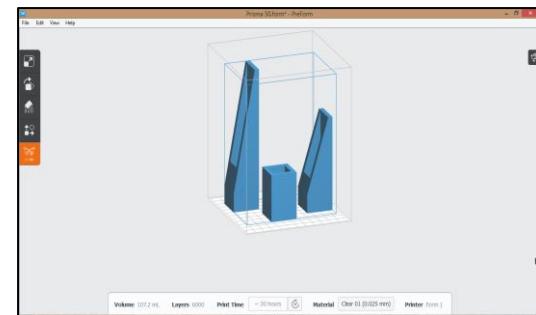


Figura 3.14 PreForm Prismas

- PIEZA 1 (Figura 3.13)
 - Factor de escala: 1:1
 - Orientación (X, Y, Z): -143, 30.93, 15.71. En este caso se ha elegido la opción de que el programa calcule la orientación óptima.
 - Generación de soportes: Los soportes han sido creados en base a los valores predeterminados del programa, ya que es lo aconsejable por el fabricante.
 - Localización: Automática
- PRISMAS (Figura 3.14)
 - Factor de escala: 1:1
 - Orientación (X, Y, Z): 180, 0, -90
 - Generación de soportes: Sin soportes
 - Localización: Automática
- MATRIZ (Figura 3.15)
 - Factor de escala: 1:1
 - Orientación (X, Y, Z): 90, 0, 0
 - Generación de soportes: Sin soportes
 - Localización: Automática

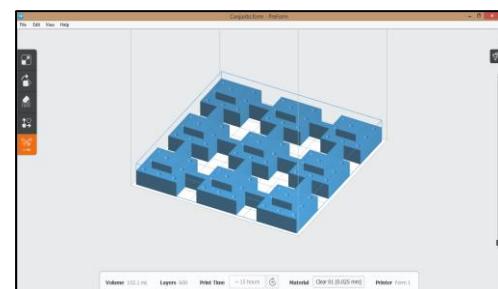


Figura 3.15 PreForm Matriz

4. Impresión de las piezas patrón

Con todos los parámetros seleccionados, llega el momento de imprimir las piezas. Para ello, primero hay que revisar que el tanque de resina no contenga resina curada en su superficie de anteriores impresiones y llenarlo sin sobrepasar el límite indicado por la línea de máximo.

Posteriormente, hay que pulsar el botón "Send to printer" del software Preform y el botón de la impresora.

Ahora ya sólo queda esperar el tiempo indicado.

- **PIEZA 1**

El resultado de la impresión de la Pieza 1 lo podemos apreciar en la Figura 3.16. Está recién impresa y todavía situada en la plataforma de construcción.

En la Figura 3.17 se muestra la Pieza 1 fabricada en los 3 espesores de capa posibles. Ya se han retirado los soportes y se han sometido al post-curado.

De izquierda a derecha los espesores de capa son 0.1, 0.05 y 0.025 mm respectivamente.



Figura 3.16 Pieza 1



Figura 3.17 Pieza 1 en los 3 espesores de capa posibles

- **PRISMAS**

La Figura 3.18 nos muestra los 3 prismas de 50, 100 y 150 mm de altura. Estos fueron impresos sin soportes para poder medir con exactitud la precisión de la impresora en el eje Z. Por este motivo, las bases de los mismos tienen algunos defectos que se muestran más adelante.

Cada uno de los prismas ha sido impreso en los 3 espesores de capa posibles.



Figura 3.18 Prismas

- MATERIAZ

En la Figura 3.19 podemos ver la Matriz impresa. En este caso tampoco se han utilizado soportes ya que lo que interesa es la precisión de la máquina en los ejes X e Y.

Se puede apreciar un defecto de impresión en la parte superior derecha. Este defecto se produjo por la falta de adhesión a la plataforma de construcción, pero no ha afectado a los resultados, ya que los agujeros cónicos medidos se encuentran en la cara superior de la matriz.

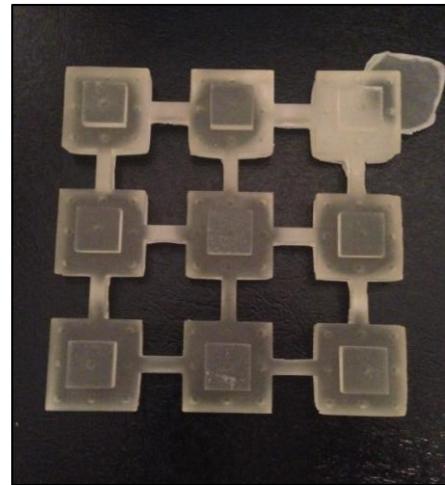


Figura 3.19 Matriz

5. Post-procesos

- Separar la pieza de la plataforma de construcción y limpiarla (Figura 3.20)



Figura 3.20 Pieza 1 en la plataforma de construcción

- Retirar los soportes (Figura 3.21) c) Curarla con luz UV (Figura 3.22)



Figura 3.21 Pieza 1 sin soportes



Figura 3.22 Pieza 1 después y antes de ser curada

NOTA: Los post-procesos b) y c) se pueden realizar en el orden que se quiera, pero por experiencia se aconseja retirar los soportes en primer lugar.

3.3 MEDICIÓN DE LAS PIEZAS

Para poder realizar la verificación de la impresora 3D Form 1 y analizar los resultados, tenemos que medir las piezas ya fabricadas.

Para ello se ha utilizado una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC) (Figura 3.23) y el Software Calypso. En la Tabla 3.2 se muestran las características de la misma.



Marca	Zeiss
Modelo	PMC 850
Peso aproximado (kg)	3400
Dimensiones (l x w x h) (mm)	2850 x 1550 x 2950
Movimiento en x (mm)	850
Movimiento en y (mm)	700
Movimiento en z (mm)	600
Software	Calypso

Figura 3.23 MMC

Tabla 3.2 Características técnicas de la MMC

Lo primero que hay que hacer para comenzar con las mediciones es posicionar las piezas en la mesa de forma que no se muevan al medirlas. Una vez fijadas, es necesario elegir un palpador adecuado y establecer un sistema de coordenadas definido a partir de la geometría de la pieza. En las Figuras, el eje X es de color rojo, el eje Y de color verde y el eje Z de color azul.

Estos dos aspectos son diferentes en la medición de cada pieza, por lo que se van a detallar a continuación:

- **PIEZA 1**

En este caso se han empleado 4 palpadores diferentes para medir las piezas. Se han utilizado dos palpadores horizontales (eje -Z) para medir la cara superior y otros dos iguales pero en sentido contrario (eje +Z) para medir la cara inferior. Ha sido necesaria la utilización de un segundo palpador de menor tamaño ya que esta pieza contiene agujeros de hasta 2 mm de diámetro.

El sistema de coordenadas ha sido definido mediante un plano y dos puntos contenidos en ese plano que forman una recta (Figura 3.25).

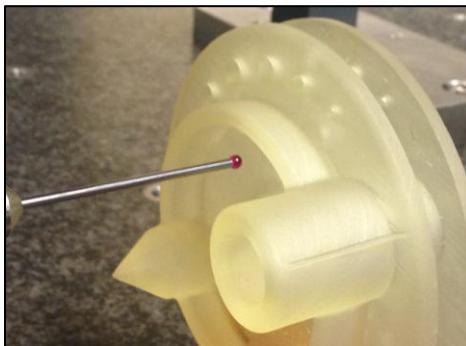


Figura 3.24 Pieza 1 y palpador

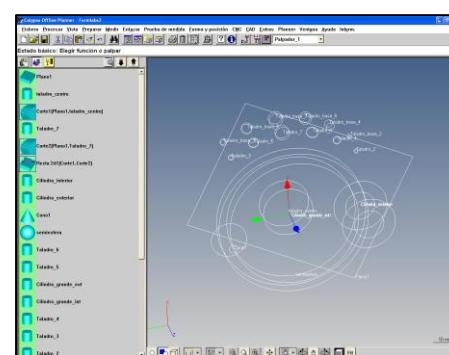


Figura 3.25 Calypso Pieza 1

- PRISMAS

Para la medición de estas piezas se ha utilizado un único palpador vertical (eje -Z).

El sistema de coordenadas ha sido definido mediante tres planos perpendiculares entre sí.

En la Figura 3.26 vemos los 4 planos que determinarán la precisión de la impresora en cuanto a la planitud.

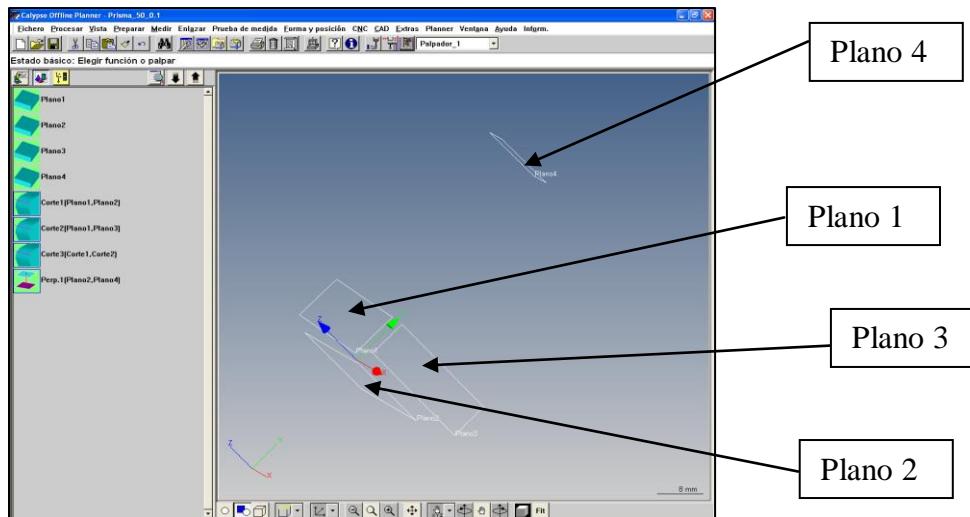


Figura 3.26 Planos medidas Prismas

- MATRIZ

En este caso se ha empleado un palpador vertical (eje -Z) de diámetro 2 mm.

Para realizar la medición de los 81 agujeros cónicos que contiene la Matriz, se ha optado por el método de palpado autocentrante (Figura 3.27). Este es un método que consiste en introducir los valores nominales de todos los puntos que se desean medir y la MMC realiza la medición de forma automática. En el programa Calypso se ven reflejados los valores reales que ha medido la MMC.

El sistema de coordenadas en este caso también ha sido definido por 3 planos perpendiculares entre sí (Figura 3.28).

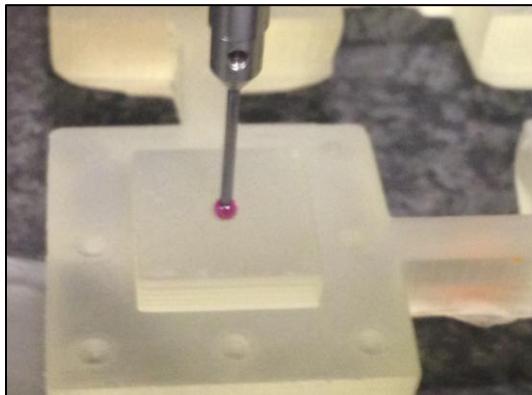


Figura 3.27 Palpado autocentrante

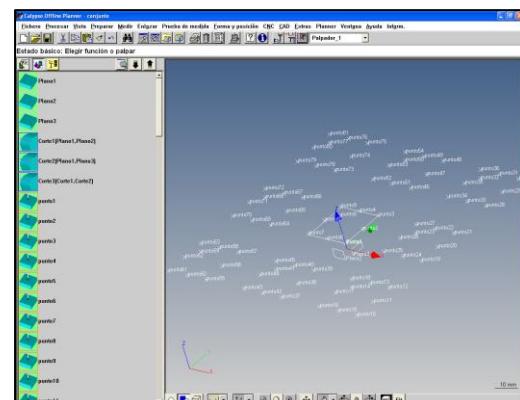


Figura 3.28 Calypso Matriz

Instrumentos de medida auxiliares

Para la medición de las rampas en la Pieza 1, se ha optado por la utilización de otros dos elementos de medición del fabricante Mitutoyo: el goniómetro (Figura 3.29) para medir el ángulo de inclinación y el calibre o pie de rey (Figura 3.30) para medir el espesor.



Figura 3.29 Goniómetro



Figura 3.30 Calibre o Pie de rey

3.4 ÁNALISIS DE RESULTADOS

A continuación se procede al análisis de los resultados obtenidos en las mediciones de todas las piezas patrón. Todos los datos numéricos se presentan reflejados en las tablas del Anexo E mientras que los elementos a los que corresponden los números de los gráficos están en el Anexo F junto con los planos.

Todos los errores han sido calculados restando el valor real menos el valor nominal.

• PIEZA 1

Precisión geométrica de localización

Los Gráficos 3.1 y 3.2 representan los errores de posición en los ejes X e Y de cada uno de los elementos medidos en la Pieza 1. Se aprecia claramente que el espesor de capa es muy influyente en la precisión de la impresora.

El elemento con mayor error tanto en el eje X como en Y es el 4 (Cono). Mientras que en el eje X el único elemento cuyo valor real es notablemente menor que el nominal es la semiesfera, en el eje Y hay una mayor tendencia hacia este caso.

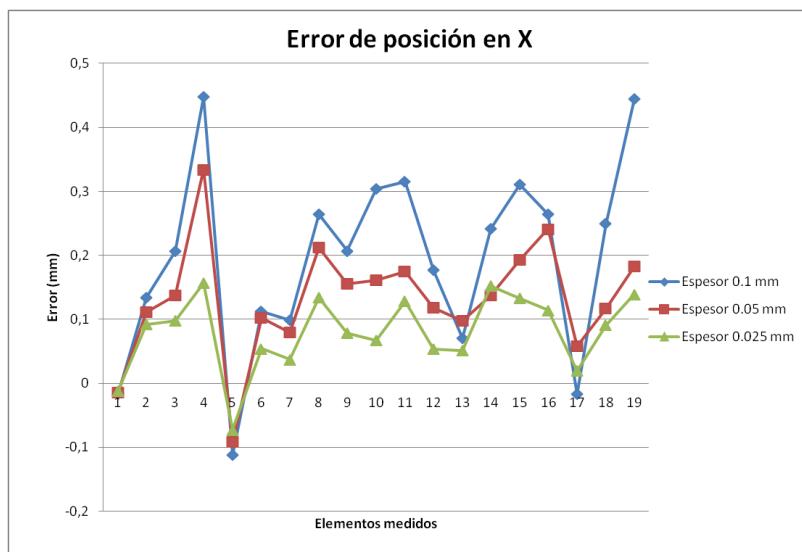


Gráfico 3.1 Comparación error de posición en X

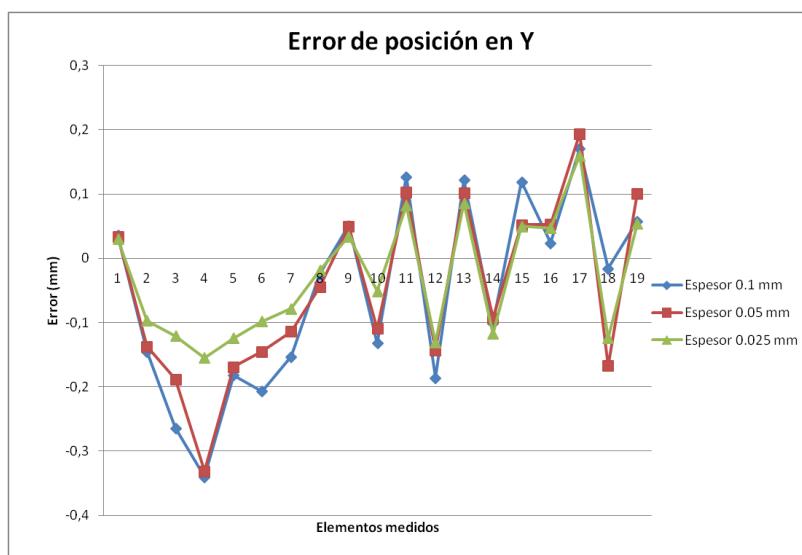


Gráfico 3.2 Comparación error de posición en Y

Posteriormente se ha analizado la coaxialidad de los cilindros (Gráfico 3.3) y de los agujeros situados en las bases de la pieza (Gráfico 3.4) en función del espesor de capa.

Se aprecia una gran diferencia de los valores del error entre los dos gráficos. Mientras que la coaxialidad entre los cilindros tiene unos errores aceptables, la de los agujeros es mucho mayor. Esto es debido a que la coaxialidad de los agujeros está calculada entre dos agujeros los cuales tienen un espacio de 10 mm entre ellos, por lo que con un mínimo error de cilindricidad en uno de los dos, el resultado de coaxialidad se verá enormemente afectado.

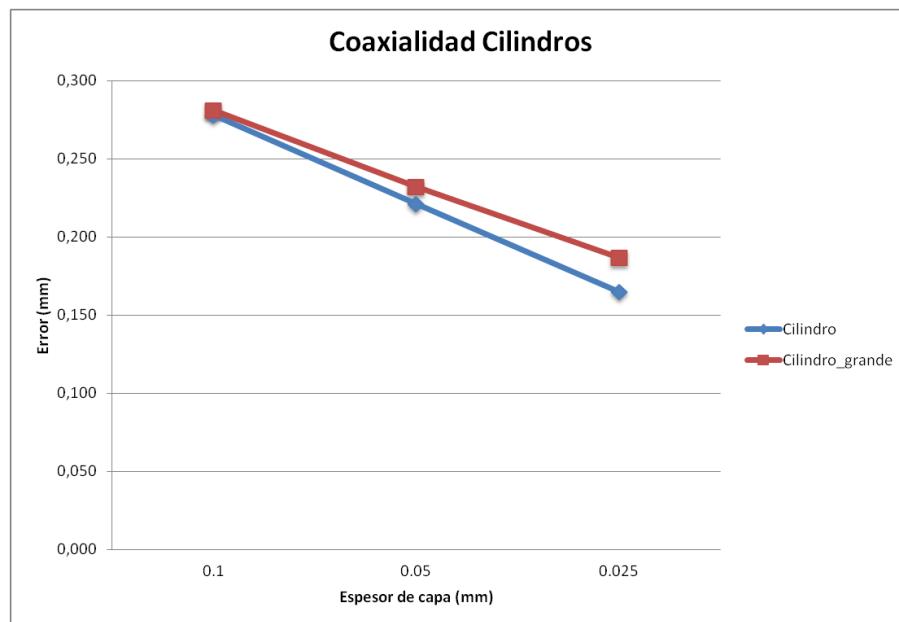


Gráfico 3.3 Comparación Coaxialidad cilindros

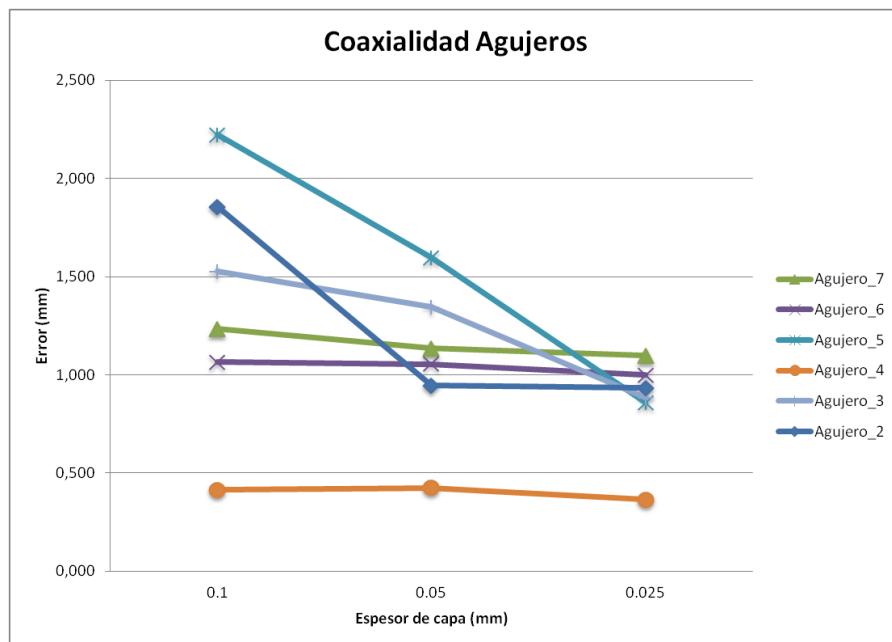


Gráfico 3.4 Comparación Coaxialidad agujeros

Precisión geométrica de forma

En cuanto a la precisión geométrica de forma los aspectos estudiados han sido la cilindricidad, la planitud y la angularidad.

En el caso de la cilindricidad (Gráfico 3.5) se encuentra una clara influencia en el espesor de capa, ya que cuanto menor es el espesor, menor es el error. El máximo error se encuentra en el elemento 3 (Cilindro exterior).

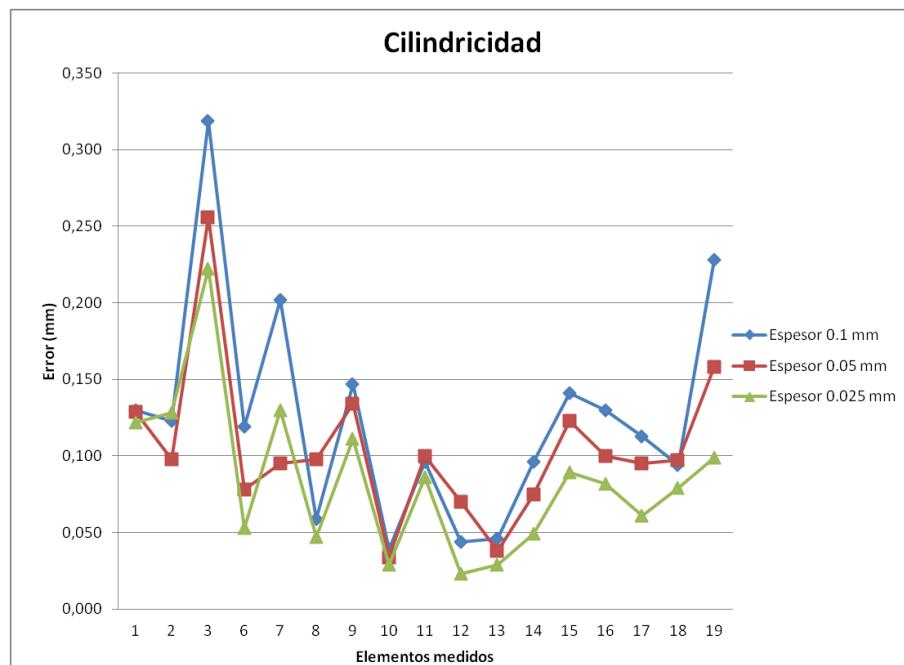


Gráfico 3.5 Comparación Cilindricidad

El error de planitud (Gráfico 3.6) cumple con lo previsto, a menor espesor de capa menor error de planitud.

En el caso de la angularidad (Gráfico 3.7) se han estudiado 3 elementos. La rampa de 2 mm de espesor posee un error considerable en su ángulo de inclinación incluso con el menor espesor de capa posible.

La rampa de 1 mm de espesor está mucho menos influenciada por el espesor de capa de fabricación de la pieza.

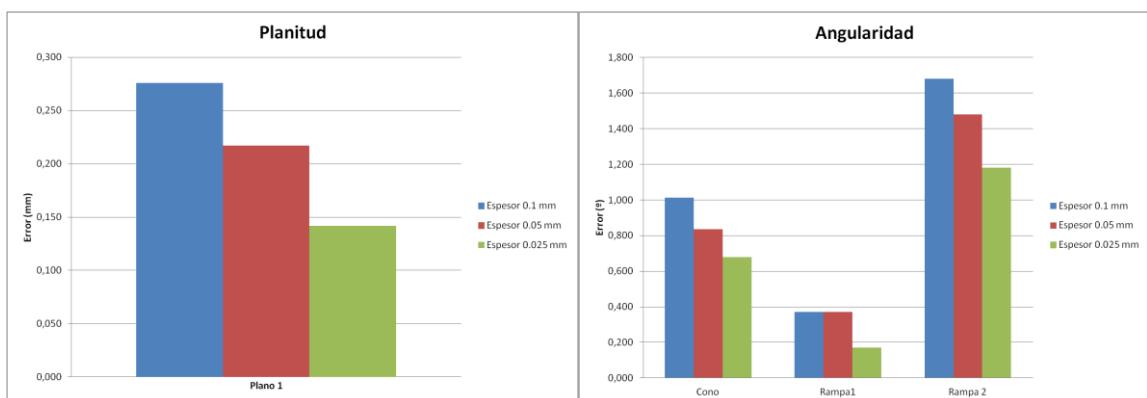


Gráfico 3.6 Comparación Planitud

Gráfico 3.7 Comparación Angularidad

Precisión dimensional

Para estudiar la precisión dimensional se han medido los diámetros de todos los elementos posibles y el espesor de las rampas.

En cuanto a los diámetros (Gráfico 3.8), los mayores errores se encuentran en el cilindro grande, tanto en la parte interior como en la exterior. Se observa una tendencia de la impresora a hacer los diámetros mayores que el valor nominal en los elementos de mayor diámetro. En el caso de los agujeros, en general los valores reales son menores que los nominales, con la excepción de los dos agujeros más pequeños de la base en los espesores de capa de 0,1 y 0,05 mm.

El error en el espesor de las rampas (Gráfico 3.9) no muestra un comportamiento esperado ya que no hay muchas diferencias en función del espesor de capa y en el caso de la Rampa 1 el error es mayor con un espesor de capa de 0,05 mm que de 0,1 mm.

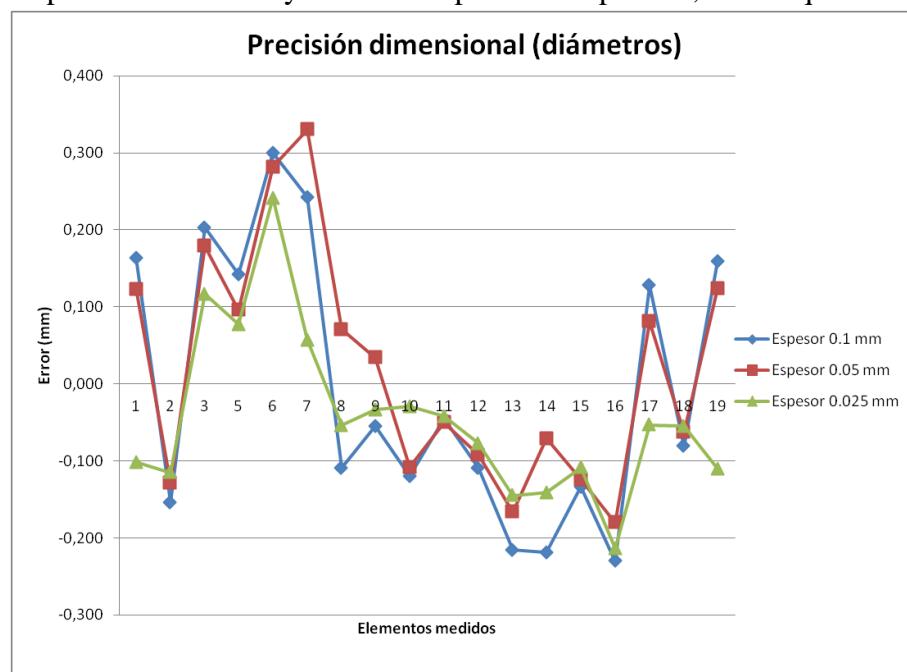


Gráfico 3.8 Comparación Precisión dimensional Diámetros

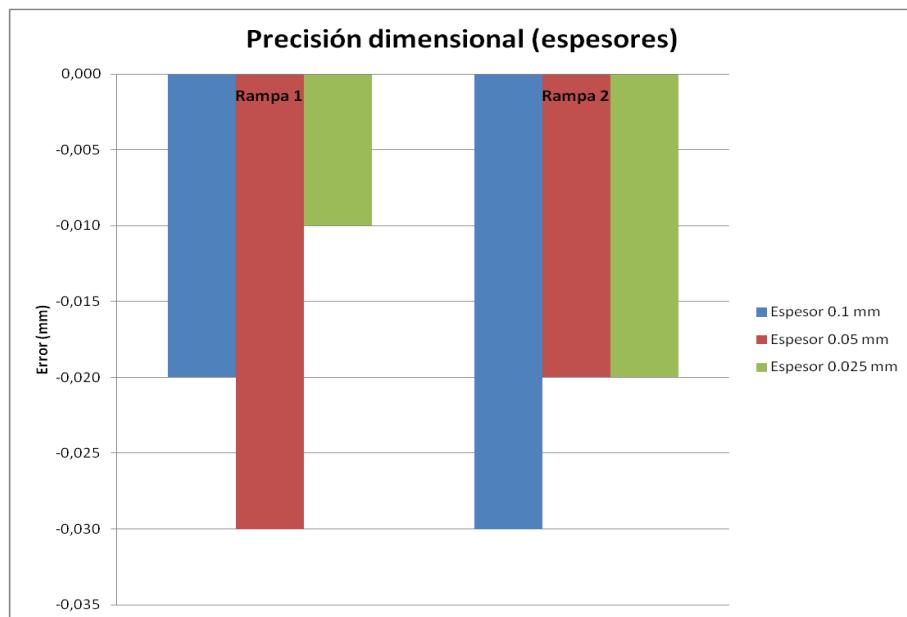


Gráfico 3.9 Comparación Precisión dimensional Espesores

- PRISMAS

- Altura = 50 mm

Precisión geométrica de forma

En relación a la planitud (Gráfico 3.10), los planos 1 y 3 son los que contienen un mayor error y no hay una clara mejora en la precisión de planitud según el espesor de capa.

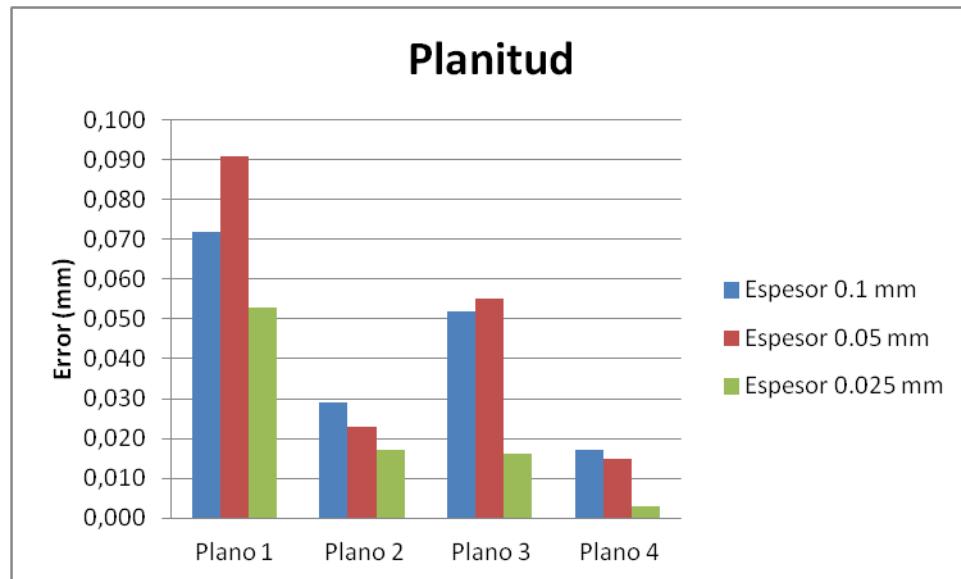


Gráfico 3.10 Comparación Planitud

Precisión dimensional

En el caso de la Longitud en el eje Z (Gráfico 3.11), el prisma fabricado con un espesor de capa de 0,025 mm tiene un error mucho menor que los otros dos.

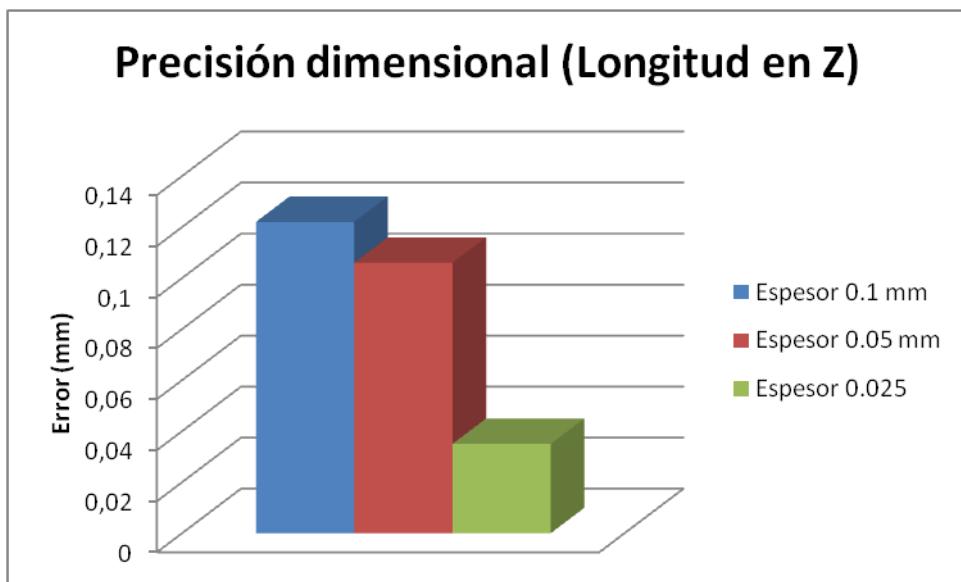


Gráfico 3.11 Comparación Precisión dimensional Longitud en Z

b) Altura = 100 mm

Precisión geométrica de forma

Del mismo modo que en el prisma de 50 mm de altura, los planos 1 y 3 son los que contienen un mayor error de planitud (Gráfico 3.12). En este caso sí se puede apreciar una notable mejora de la precisión con un espesor de capa de 0,025 mm.

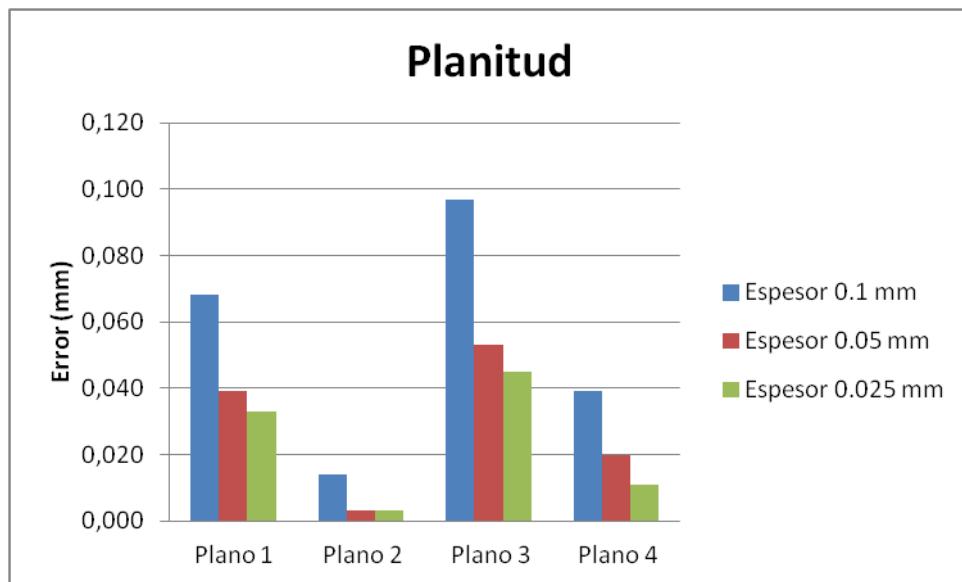


Gráfico 3.12 Comparación Planitud

Precisión dimensional

En cuanto a la precisión dimensional en el eje Z (Gráfico 3.13) los errores son mayores que en el prisma de 50 mm y no hay una diferencia tan clara de precisión entre un espesor de capa y otro.

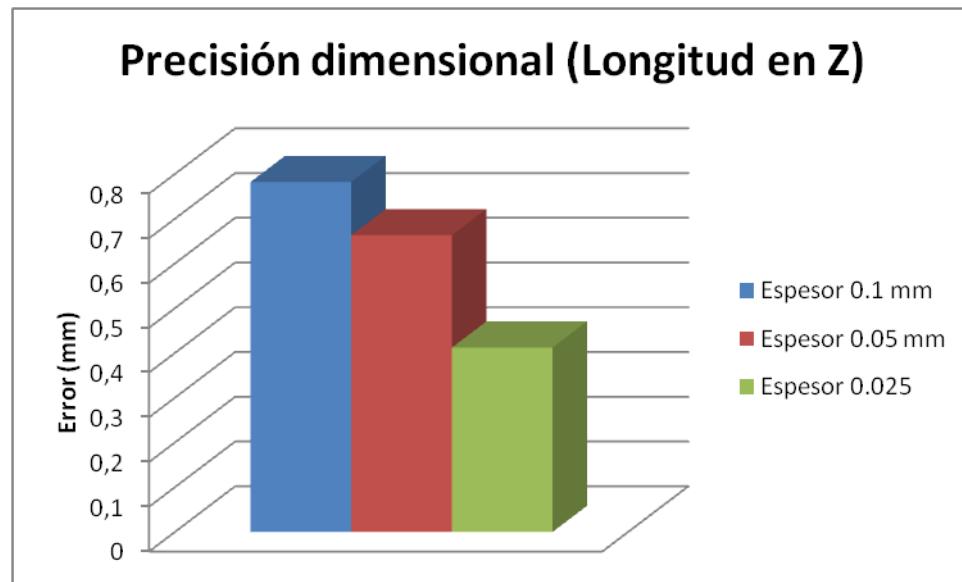


Gráfico 3.13 Comparación Precisión dimensional Longitud en Z

c) Altura = 150 mm

Precisión geométrica de forma

Como en los casos anteriores, los planos 1 y 3 son los que contienen un mayor error de planitud (Gráfico 3.14). En el caso del plano 4 el error con un espesor de capa de 0,1 mm es considerable pero con el espesor de capa de 0,025 mm se ve notablemente reducido.

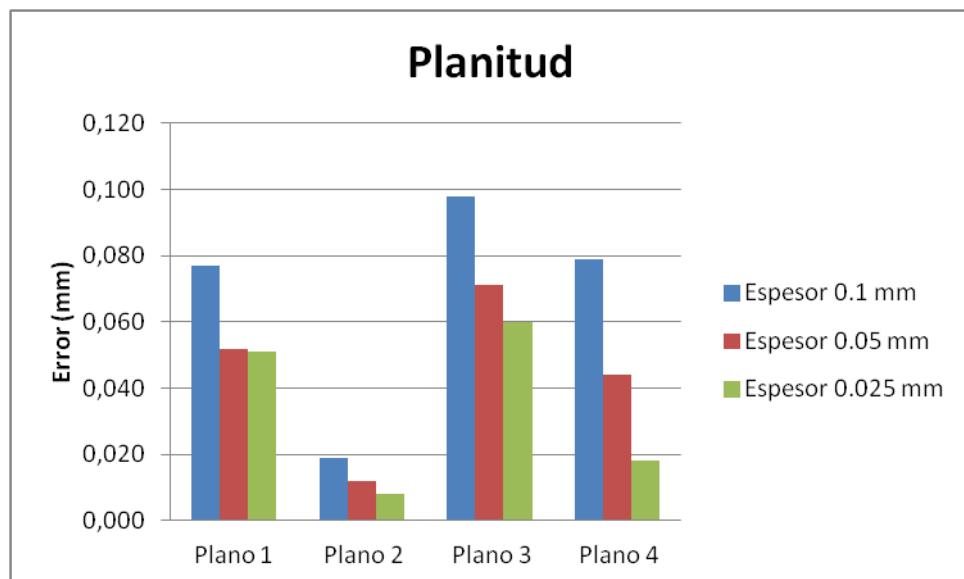


Gráfico 3.14 Comparación Planitud

Precisión dimensional

Del error en la longitud en el eje Z (Gráfico 3.15) se puede señalar que los errores son mayores que en los prismas anteriores y la diferencia de un espesor de capa a otro es mínima.

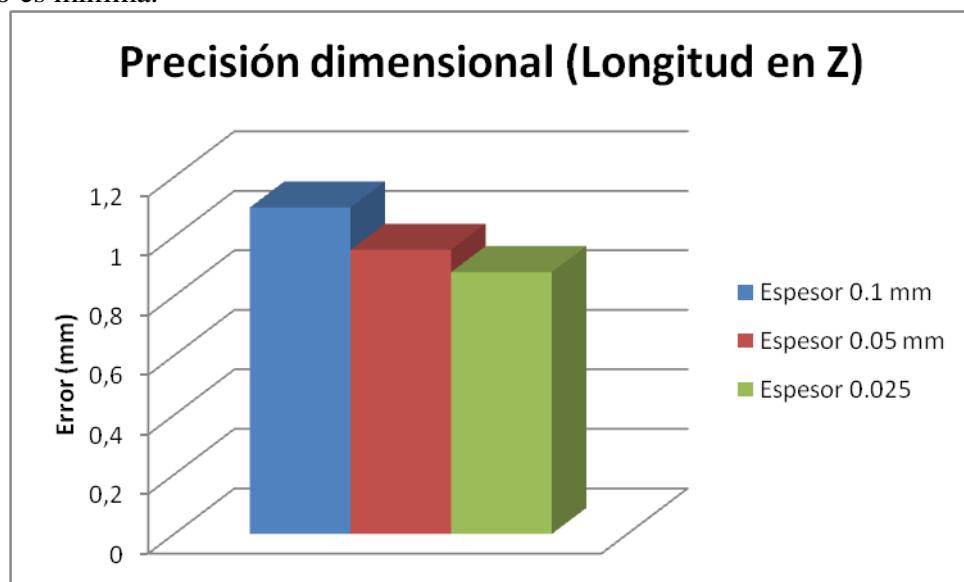


Gráfico 3.15 Comparación Precisión dimensional Longitud en Z

d) Comparación de los 3 prismas

Precisión dimensional

Finalmente se ha realizado una comparación de la precisión dimensional en el eje Z entre los 3 prismas de diferentes alturas (Gráfico 3.16).

Existe una gran diferencia en los errores de uno a otro. Cuanto mayor es la longitud del prisma en el eje Z mayor es el error.

En el caso de los prismas de 50 y 100 mm de altura, la diferencia de precisión entre el espesor de capa de 0,1 mm y el de 0,025 mm es notablemente alta mientras que en el prisma de 150 mm de altura, el espesor de capa no parece ser un factor demasiado influyente.

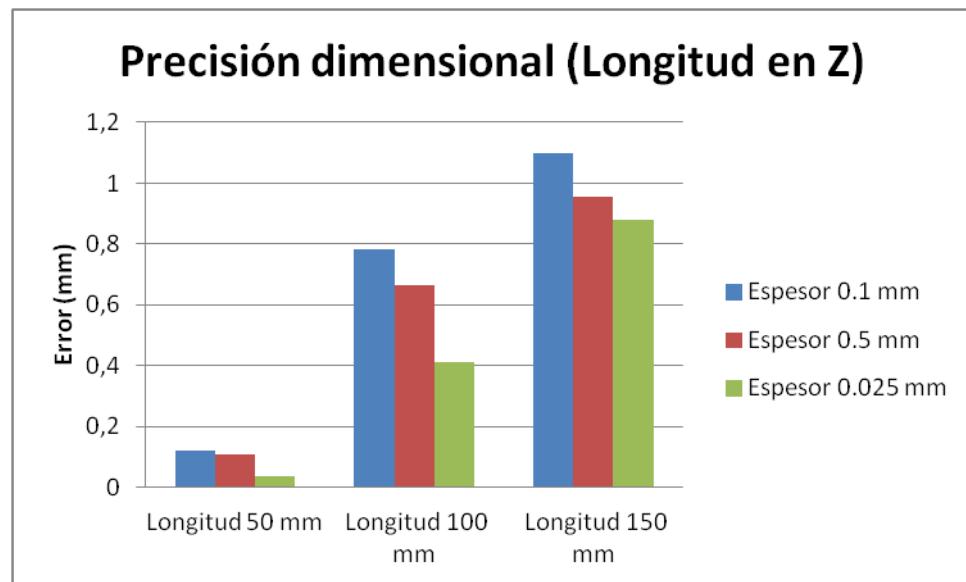


Gráfico 3.16 Comparación Precisión dimensional de los 3 Prismas

- **MATRIZ**

A continuación se representan en los Gráficos 3.17 y 3.18 los errores de posición en los ejes X e Y respectivamente de todos los agujeros cónicos pertenecientes a la matriz. La localización de los mismos está representada en el Anexo F.

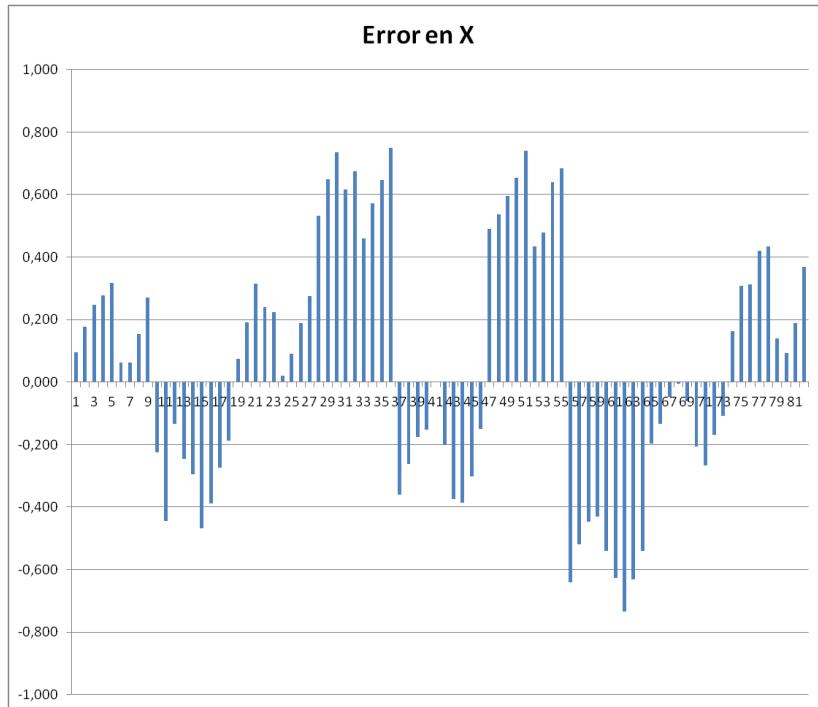


Gráfico 3.17 Error de posición en X Matriz

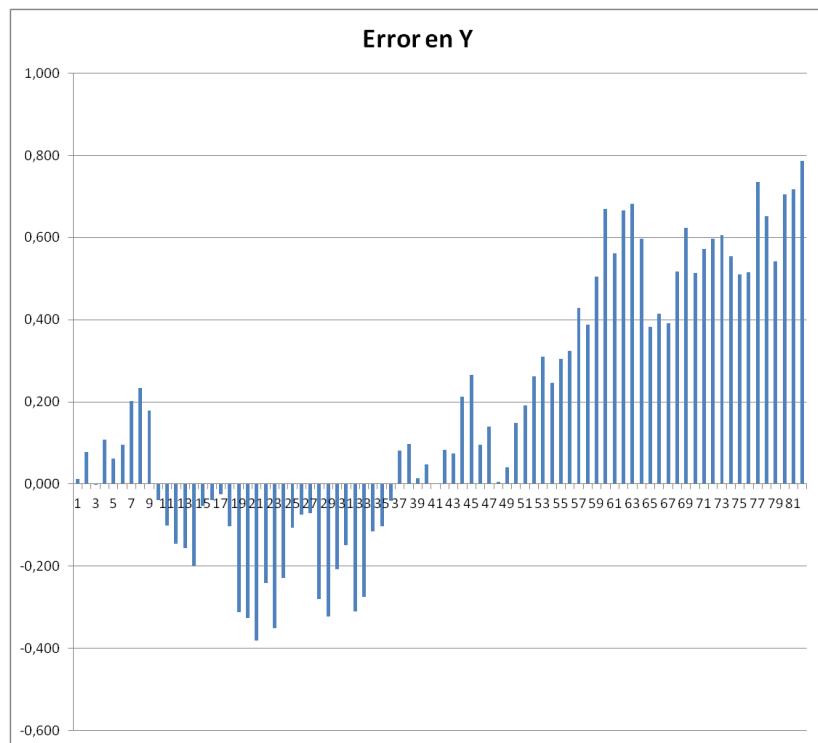


Gráfico 3.18 Error de posición en Y Matriz

Otra forma rápida de visualización de los errores de posición es la representada en el Gráfico 3.19. En este gráfico se aprecia claramente la tendencia del error. Para observar los errores correctamente se ha realizado el gráfico a escala 50:1.

Hay que tener en cuenta que gran parte del error es debido a la falta de exactitud a la hora de determinar el sistema de referencia.

Un mínimo error en la planitud de los planos elegidos para tomar los ejes X e Y de la pieza, hace que todos los valores vean aumentado su error de forma considerable. Esto explica la forma de espiral de este gráfico.

Independientemente del error causado por la elección del sistema de referencia, tanto en los gráficos anteriores como en este, se aprecia de forma clara que conforme nos alejamos del centro de referencia, los errores aumentan considerablemente.

Se puede concluir que la impresora Form 1 dispone de una mayor precisión en el centro de la plataforma de construcción y va perdiendo precisión conforme nos acercamos a los extremos.

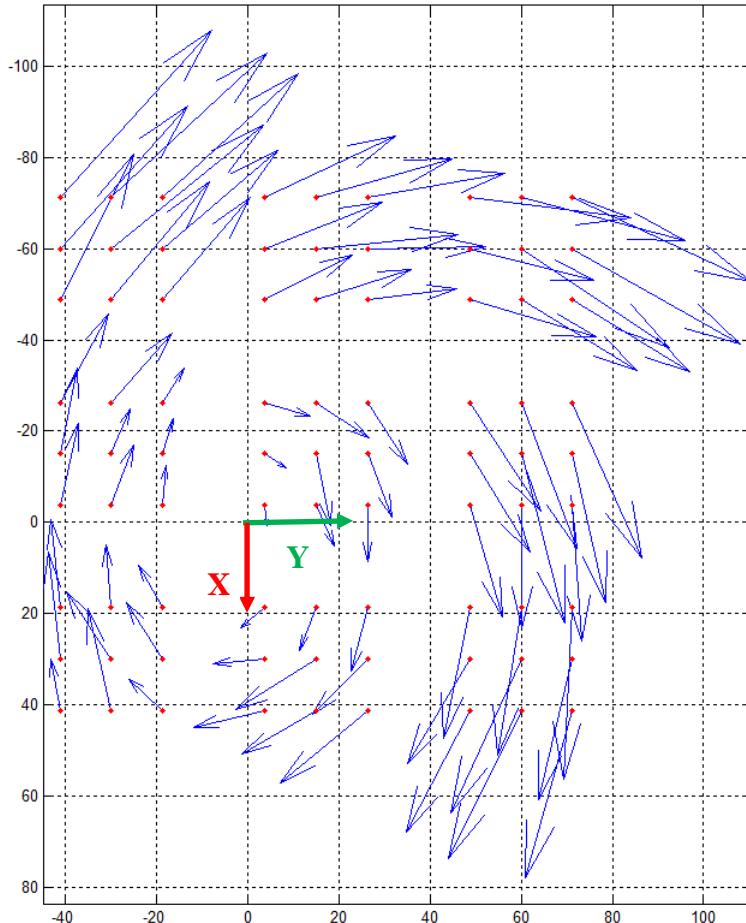


Gráfico 3.19 Tendencia del error de posición en X e Y

• CONCLUSIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS

Observando los resultados obtenidos en el proceso de verificación, para finalizar este apartado se incluye en el Anexo G un análisis económico y temporal global de este proyecto en el que se ha realizado un estudio exhaustivo de la precisión de la impresora. Por otro lado, se ha planteado un estudio simplificado de verificación que podría realizar un usuario en su casa.

La conclusión que se puede sacar es que la relación precisión/precio de las piezas impresas por la impresora Form 1 es aceptable ya que los errores máximos hallados son:

Pieza 1

Máximo error	Espesor de capa (mm)	Elemento	Valor del error (mm)
Posición en X	0.1	4. Cono	0,448
	0.05	4. Cono	0,334
	0.025	4. Cono	0,157
Posición en Y	0.1	4. Cono	-0,34
	0.05	4. Cono	-0,331
	0.025	17. Agujero_base_3	0,16
Coaxialidad	0.1	Agujero_5, Agujero_base_5	2,223
	0.05	Agujero_5, Agujero_base_5	1,597
	0.025	Agujero_7, Agujero_base_7	1,098
Cilindricidad	0.1	3. Cilindro_exterior	0,319
	0.05	3. Cilindro_exterior	0,256
	0.025	3. Cilindro_exterior	0,222
Angularidad	0.1	21. Rampa 2	1,68
	0.05	21. Rampa 3	1,48
	0.025	21. Rampa 4	1,18
Dimensional	0.1	6. Cilindro_grande_ext	0,3
	0.05	7. Cilindro_grande_int	0,33
	0.025	6. Cilindro_grande_ext	0,242

Tabla 3.3 Errores máximos Pieza 1

Prismas

Máximo error	Espesor de capa (mm)	Elemento	Valor del error (mm)
Planitud	0.1	Plano 3-Prisma 150	0,098
	0.05	Plano 1-Prisma 50	0,091
	0.025	Plano 3-Prisma 150	0,06
Dimensional (eje Z)	0.1	Prisma 150	1,097
	0.05	Prisma 150	0,955
	0.025	Prisma 150	0,88

Tabla 3.4 Errores máximos Prismas

Matriz

Máximo error	Elemento	Valor del error (mm)
Posición en X	36	0,749
Posición en Y	81	0,786

Tabla 3.5 Errores máximos Matriz

3.5 ERRORES

En la fase de impresión de las piezas patrón se han presentado varios problemas o errores en el resultado final de la pieza.

El primer error a destacar es que el diámetro mínimo de agujero que consigue fabricar la impresora Form 1 es de 2 mm. En la Pieza 1 se aprecia una pequeña señal en el agujero de diámetro igual a 1 mm pero no lo hace correctamente.

En las Figuras 3.31 y 3.32 se pueden apreciar los errores más repetidos en este tiempo de estudio de la impresora Form 1. Parte de la base de la pieza a imprimir se adhiere correctamente a la plataforma de construcción pero otra se queda pegada en el tanque con base de silicona (PDMS). Debido a esto, se han producido varios intentos fallidos de impresión de piezas.



Figura 3.31 Error de adhesión



Figura 3.32 Error. Fijación en el tanque

Por otro lado, en algunas de las piezas han aparecido defectos bastante destacables. Esto se muestra en las Figuras 3.33 y 3.34.



Figura 3.33 Error de construcción



Figura 3.34 Error de construcción

Las causas más probables de ocurrencia de estos problemas y errores se detallan a continuación [26]:

- 1) El proceso de eliminación de los soportes crea una fuerza de tensión que conduce a la deformación o requiere soportes pesados que no se pueden eliminar limpiamente de la pieza. La falta de adhesión a la plataforma de construcción y el daño a la silicona del tanque de resina también son fuentes de fracaso.
- 2) Para que sea más compacta, la impresora utiliza un espejo para doblar la trayectoria del láser. El rayo de luz está ahora en contacto con la parte inferior del tanque con un ángulo variable. Como el tanque está compuesto de múltiples materiales, las refracciones pueden deformar la trayectoria del láser e introducir defectos en los extremos del área de impresión que podrían ser difíciles de corregir.
- 3) La impresora no incluye ninguna ayuda óptica para corregir el efecto barril ya que las trayectorias del láser varían con la longitud. El tamaño del punto de contacto del láser podría cambiar dependiendo de la ubicación.
- 4) La impresora se encuentra situada al lado de una puerta por lo que cuando ésta es abierta y cerrada se producen vibraciones que podrían afectar a la precisión en el momento en el que la impresora está imprimiendo.

4. COMPARACIÓN DE IMPRESORAS

4.1 TABLA COMPARATIVA DE PRECIOS DE IMPRESORAS 3D

A continuación, en la Tabla 4.1 se muestra una comparativa de precios de impresoras 3D de diferentes tecnologías [13], [28], [29].

Tecnología	Fabricante	Modelo	Imagen	Precio
SLA	Formlabs	Form 1		2.999 €
SLA	Autodesk	Ember		5.300 €
SLS	3D Systems	ProX 500		442.000 €
SLS	Matsuura Machinery	LUMEX Avance 25		740.760 €
EBM	Arcam	Arcam Q10		441.850 €
EBM	Arcam	Arcam A2X		861.600 €
FDM	M3D	The Micro 3D printer		308 €
FDM	Big Rep	BigRep ONE		34.300 €
Polyjet	Stratasys	Objet Eden 350V		120.000 €
Polyjet	Stratasys	Objet500 Connex3		291.000 €

Tabla 4.1 Comparación precios impresoras 3D

La impresora con la que hemos realizado el estudio comparativo de precisión es la Objet Eden 350V (Figura 4.1). A continuación se detalla el funcionamiento y se procede a la comparación con la impresora Form 1.

4.2 OBJET EDEN 350V

Esta impresora pertenece al fabricante Stratasys, cuyo modelo es el Objet Eden 350V. Las especificaciones técnicas de la máquina se pueden consultar en el Anexo C.

Su principio de funcionamiento es la tecnología Polyjet.

El cabezal de inyección de la máquina expulsa dos materiales distintos, el material para fabricar la pieza y el material de soporte. Esto se realiza mediante sucesivas pasadas por la zona de trabajo. El material empleado en este caso para fabricar la pieza es el RGD 720, cuyas características técnicas se pueden encontrar en el Anexo B.

Tras depositar el material, una lámpara emite luz UV que provoca la reacción del material y su consiguiente endurecimiento.

Para imprimir la pieza, hay que abrir el archivo .STL desde el programa de la impresora Objet Studio. Este programa dispone de opciones que permiten la localización automática de la pieza en la bandeja (Figura 4.2). Por otro lado el programa realiza una estimación del tiempo necesario para fabricar la pieza y del consumo de material, tanto del empleado para fabricar la pieza como del de soporte.

Un aspecto muy importante es el coste económico y temporal de fabricación. En el Anexo G se encuentra la comparación entre la impresora Form 1 y la impresora Objet Eden 350V. Se puede apreciar que las diferencias son bastante considerables.

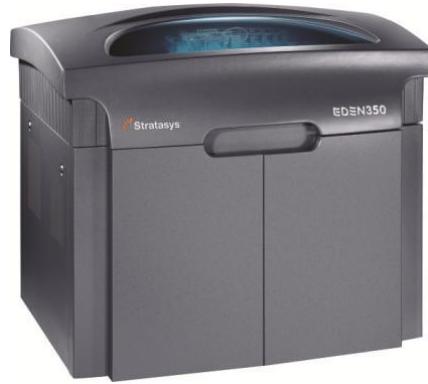


Figura 4.1 Objet Eden 350V

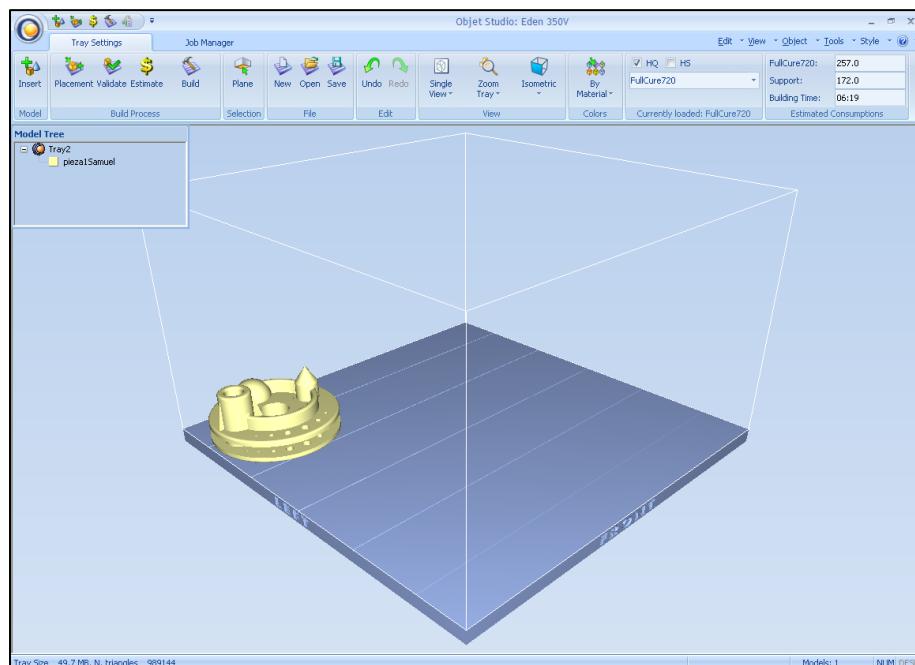


Figura 4.2 Posicionamiento en la bandeja

4.3 COMPARACIÓN DE LA PRECISIÓN GEOMÉTRICA

Para realizar el estudio comparativo se ha elegido la Pieza 1 como pieza patrón. La comparación se va a realizar entre la pieza fabricada por la impresora Form 1 (Figura 4.3) con un espesor de capa de 0.025 mm y la pieza impresa por la impresora Objet Eden 350V (Figura 4.4) con un espesor de capa de 0.016 mm.



Figura 4.3 Pieza 1 Form 1



Figura 4.4 Pieza 1 Objet Eden 350V

Los resultados numéricos obtenidos en la medición se encuentran en el Anexo E y los elementos a los que corresponden los números representados en los gráficos en el Anexo F.

Precisión geométrica de localización

Con objeto de estudiar la precisión geométrica de localización se han analizado el error de posición en el eje X (Gráfico 4.1), el error de posición en el eje Y (Gráfico 4.2) y la coaxialidad (Gráficos 4.3 y 4.4).

En cuanto al error de posición se aprecia que la impresora Form 1 posee errores algo mayores que la Objet Eden 350V. En el caso del eje X la primera presenta los valores reales mayores que los valores nominales y la segunda al revés. En el eje Y no se sigue este comportamiento y además en los últimos elementos correspondientes a los agujeros no hay una relación coherente.

En cuanto a la coaxialidad, la precisión de la impresora Objet Eden 350V es mucho mayor que la de la Form 1.

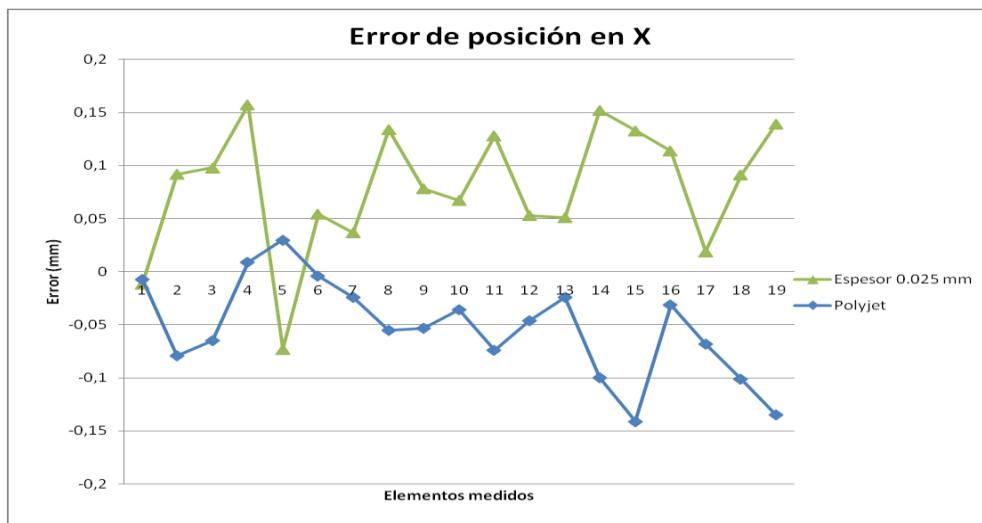


Gráfico 4.1 Comparación error de posición en X

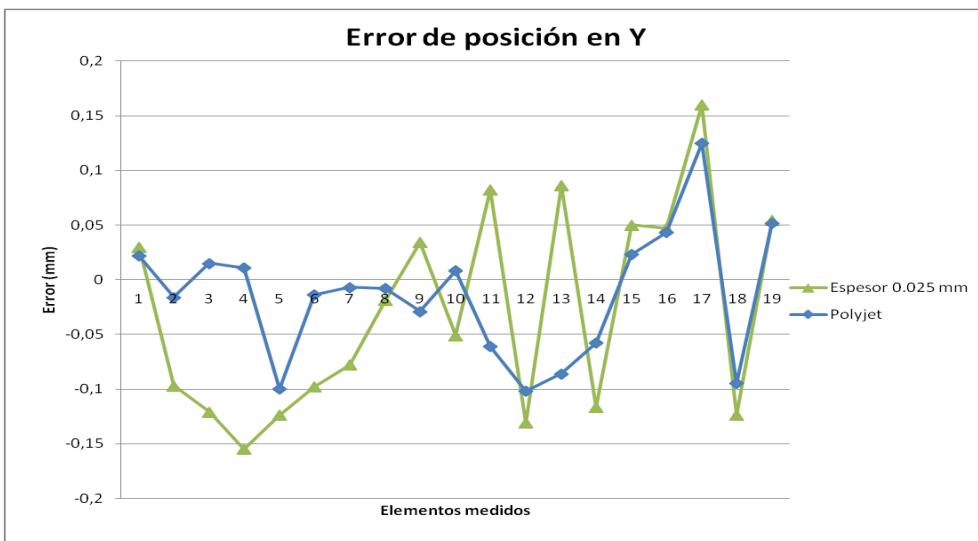


Gráfico 4.2 Comparación error de posición en Y

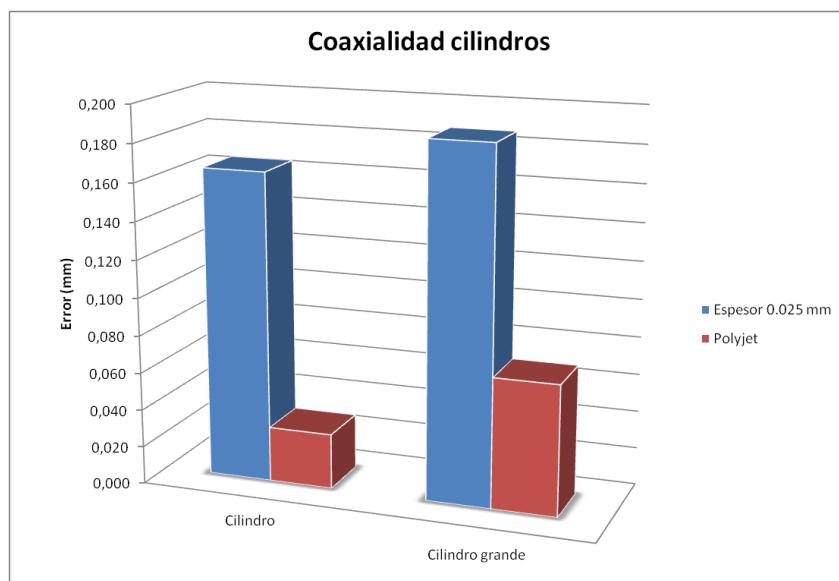


Gráfico 4.3 Comparación Coaxialidad cilindros

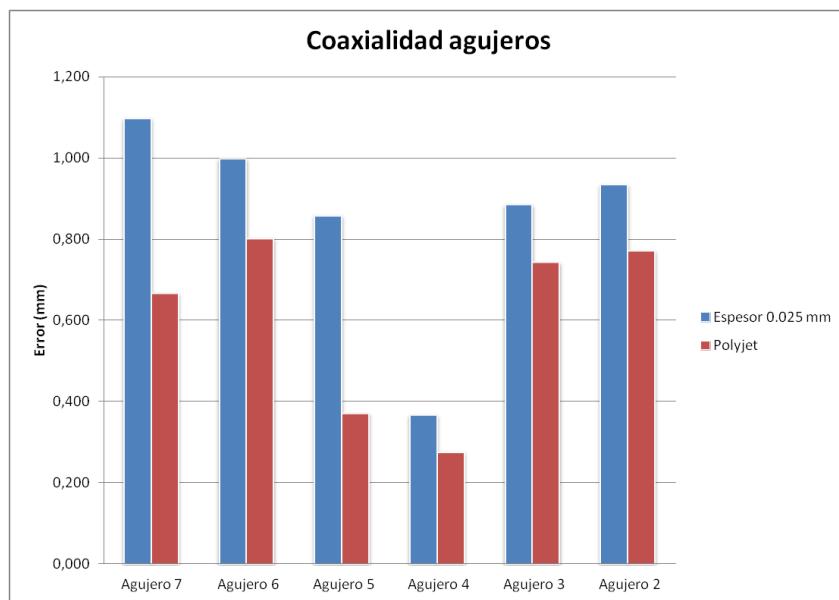


Gráfico 4.4 Comparación Coaxialidad agujeros

Precisión geométrica de forma

Para comparar la precisión geométrica de forma los aspectos analizados han sido la cilindricidad, la planitud y la angularidad.

En cuanto a la cilindricidad (Gráfico 4.5) se puede observar que la pieza impresa con la impresora Objet Eden 350V posee errores pequeños. Por otro lado la impresora Form 1 realiza un error considerable en el elemento 3 (Cilindro exterior), pero en general también tiene una gran precisión en el aspecto de la cilindricidad.

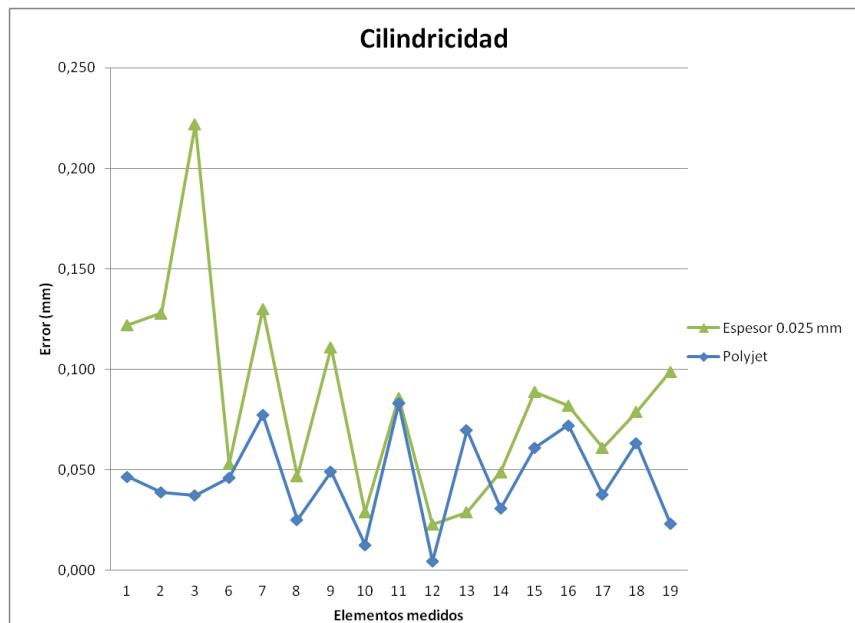


Gráfico 4.5 Comparación Cilindricidad

En el error de planitud (Gráfico 4.6) hay una gran diferencia, ya que el error existente en la Pieza 1 impresa por la impresora Form 1 es más del doble que el existente en la pieza realizada por la otra impresora.

A diferencia de la planitud, la precisión en la angularidad (Gráfico 4.7) presenta menos diferencias. El error en el ángulo de la Rampa 1 es el mismo en ambos caso mientras que en la Rampa 2 si que existe una notable diferencia. En el caso del Cono la diferencia apreciable también es muy pequeña entre las dos impresoras estudiadas.

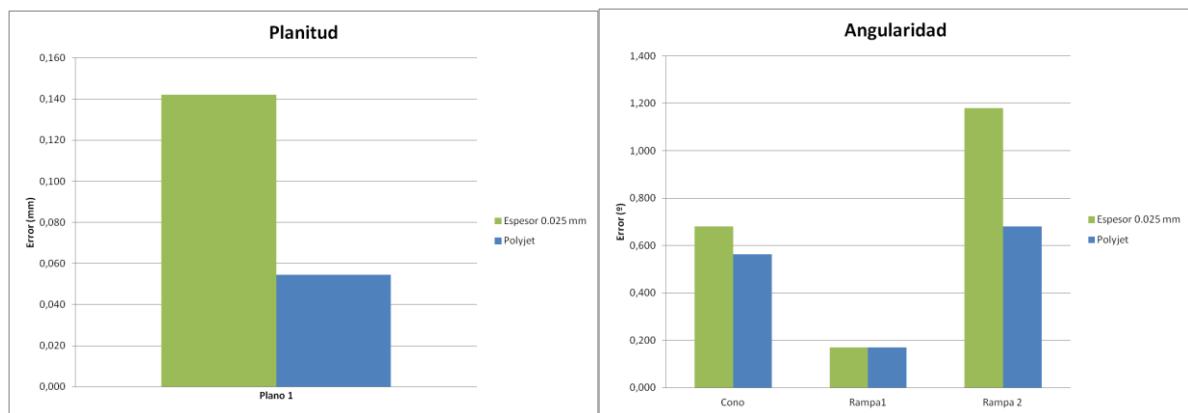


Gráfico 4.6 Comparación Planitud

Gráfico 4.7 Comparación Angularidad

4.4 COMPARACIÓN DE LA PRECISIÓN DIMENSIONAL

Para estudiar la precisión dimensional se han medido los diámetros de los elementos y el espesor de las rampas.

El Gráfico 4.8 muestra la precisión dimensional en relación a los diámetros. La impresora Objet Eden 350 V tiene una gran precisión ya que los errores están comprendidos entre $\pm 0,1$ mm mientras que la Form 1 contiene un mayor error y tiende a realizar los agujeros de pequeño diámetro menores del valor nominal y los de mayor diámetro al contrario.

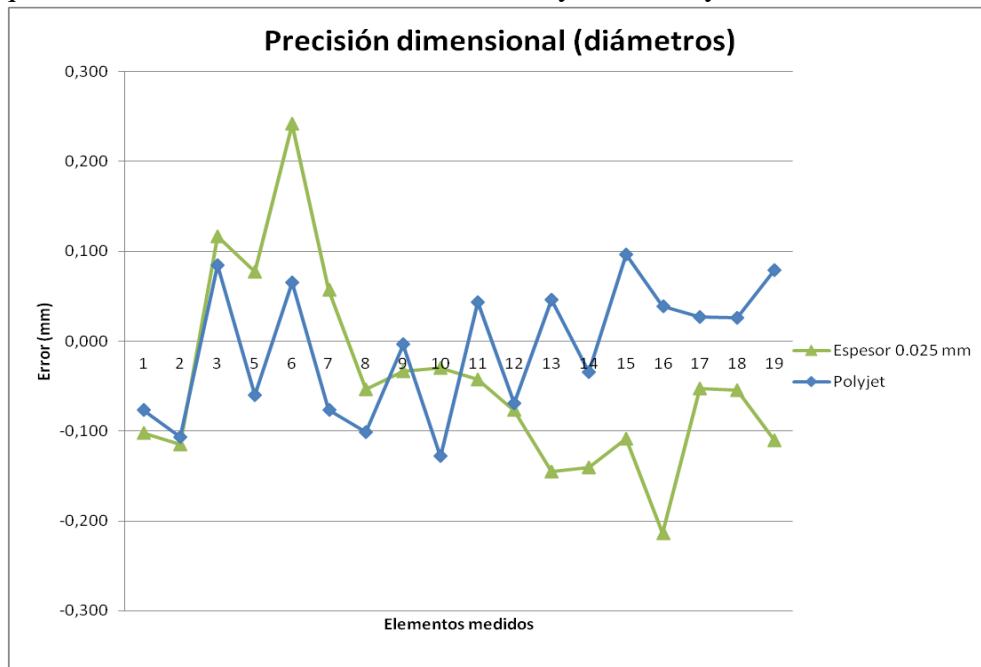


Gráfico 4.8 Comparación Precisión dimensional Diámetros

El error en el espesor de las rampas (Gráfico 4.9) es el mismo creado por las dos impresoras en la Rampa 1 mientras que en la Rampa 2 es el doble en el caso de la Form 1.

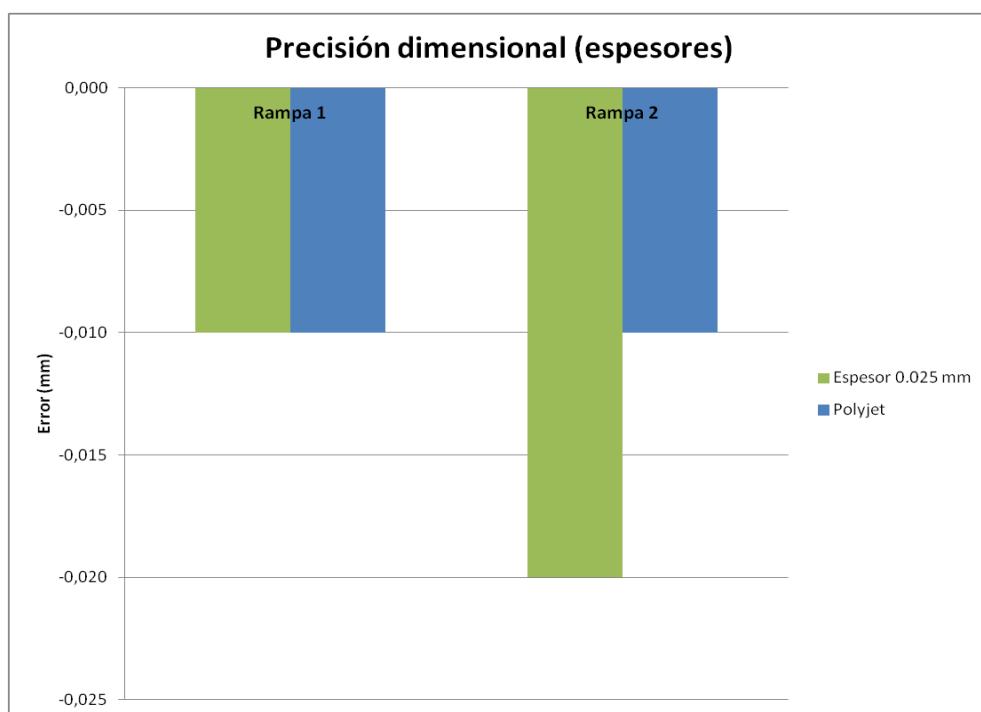


Gráfico 4.9 Comparación Precisión dimensional Espesores

5. CONCLUSIÓN

Para finalizar este proyecto, cabe destacar una serie de conclusiones que se pueden sacar a partir de los resultados obtenidos y su consiguiente análisis.

En primer lugar, los aspectos positivos que se pueden señalar de la impresora 3D de estereolitografía Form1 son los siguientes:

- Notable precisión en relación al precio

Para tratarse de una impresora de bajo coste se puede observar que alcanza niveles de precisión muy elevados ya que en la comparación con la impresora Objet Eden 350V las diferencias son pequeñas. Mientras que la impresora Form 1 cuesta alrededor de 3.000 € y la Pieza 1 impresa por ella cuesta 23,6 €, la impresora Objet Eden 350V cuesta 120.000 € y la Pieza 1 fabricada por ésta cuesta 90,8 €. Las diferencias en el precio son muy altas en comparación con las diferencias en precisión.

- Excelente kit

Cuando se compra la impresora Form 1, no sólo se está adquiriendo una impresora, sino que se compra un pack completo que incluye desde el software hasta el kit de finalización, lo que permite realizar todos los procesos de impresión de las piezas.

- No hay grandes deformaciones

A excepción de los fallos y problemas encontrados en el transcurso de este trabajo, la impresora a estudio fabrica las piezas de forma correcta y precisa.

- Bajos niveles de ruido

Otro aspecto muy positivo es que esta impresora apenas hace ruido cuando está en funcionamiento. Comparado con la impresora Objet Eden 350V, la impresora Form 1 es muy silenciosa.

Por otro lado, también se han podido sacar otras conclusiones menos positivas como son:

- Manipulación y eliminación de la resina

Este es un aspecto a mejorar en la impresión con la Form 1. La resina es pegajosa y requiere el uso de guantes para tratar con ella. Además, en ningún sitio indican cómo deshacerse de ella correctamente.

Por otro lado, si se observan las especificaciones técnicas relacionadas con la seguridad, la resina está clasificada como una sustancia irritante y lo único que indican es que contamina el medio ambiente y que se debe eliminar de acuerdo a las regulaciones estatales.

- Coste de los recambios y gastos de envío

Uno de los puntos negativos es el coste de los tanques de resina (55 €), los cuales aconsejan cambiarlos cada dos litros de resina empleados y utilizar uno para cada tipo de resina que se use.

Además, debido a que los envíos se producen desde EEUU, se aplican unos elevados gastos de envío para cada material o tanque que sea necesario.

- Velocidad de impresión

El principal inconveniente de esta impresora es el elevado tiempo de impresión que necesita. Para la Pieza 1 con un espesor de capa de 0,025 mm se han necesitado casi 41 horas mientras que la impresora Objet Eden 350V a un espesor de capa de 0,016 mm la ha impreso en poco más de 6 horas.

A pesar de esto, no hay problema para dejar la impresora imprimiendo durante la noche sin vigilarla.

- Pequeño volumen de construcción

Las dimensiones máximas de construcción son 125 x 125 x 165 mm lo que implica un volumen de 2578 cm³. Sólo se pueden imprimir piezas de pequeño tamaño u optar por la impresión por partes.

- Adhesión del material a la plataforma de construcción y al tanque de resina

En este trabajo ha habido varios intentos fallidos de impresión debido a la adhesión de la resina al tanque de resina. Este es un aspecto que debería ser eliminado completamente ya que produce daño tanto en la plataforma de construcción como en el tanque de resina.

La conclusión general de este estudio exhaustivo ha sido muy positiva y es necesario destacar que los problemas que han aparecido en la impresión de las piezas por la adhesión de la resina al tanque han sido comunicados al equipo de Formlabs y han tratado de solucionar estos problemas de forma muy eficaz. Después de seguir una serie de pasos y realizar un test desde aquí, se han ofrecido a revisar y reparar de forma gratuita los elementos internos que causaran los fallos.

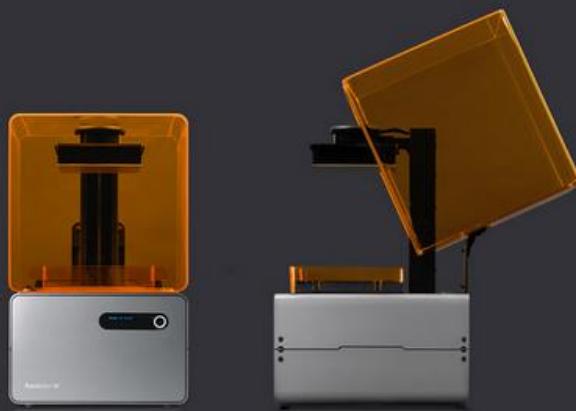
6. REFERENCIAS

- [1] Fundación COTEC (2011): *Documentos COTEC sobre oportunidades tecnológicas*.
- [2] N. Hopkinson, R.J.M. Hague y P.M. Dickens (2006): *Rapid Manufacturing - An Industrial revolution for the digital age*.
- [3] F. Fogliatto (2010): *Mass Customization: Engineering and Managing Global Operations*.
- [4] Gibson, Rosen y Stucker (2010): *Additive Manufacturing Technologies: Rapid prototyping to Direct Digital Manufacturing*.
- [5] M. Zahera (2012): *La Fabricación Aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos*.
- [6] M. Ojeda (2013): *Tecnología de los Plásticos: Impresión 3D*.
- [7] Aitiip: *SLS (Selective Laser Sintering)*.
- [8] R.Infante (2012): *Procesos de conformado de materiales poliméricos por prototipado rápido*.
- [9] ASTM International, ASTM F2792-12a: *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.
- [10] J.A. Alonso: *Sistemas de prototipado rápido*.
- [11] M. Porras (2012): *Análisis técnico-económico de técnicas de fabricación aditiva para aplicación en diferentes sectores industriales*.
- [12] OTEA (2006): *Novedades y tendencias en la fabricación rápida para el sector del plástico*.
- [13] Información general de la empresa Formlabs: <http://formlabs.com>.
- [14] C. Peters (2014): *Form1+ 3D printer review - Upgrading from a Form1*.
- [15] D. Ramírez (2014): *Solid Works*.
- [16] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens y M. Alkan Donmez (2012): *Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes*.
- [17] D.A. Roberson, D. Espalin y R.B. Wicker (2013): *3D printer selection: A decision-making evaluation and ranking model*.
- [18] M. Ancäu, C. Caizar (2010): *The computation of Pareto-optimal set in multicriterial optimization of rapid prototyping processes*.
- [19] E. Azteni, L. Iuliano, P. Minetola y A. Salmi (2012): *Proposal of an innovative benchmark for accuracy evaluation of dental crown manufacturing*.

- [20] F. Xu, Y.S. Wong y H.T. Loh (2001): *Toward Generic Models for Comparative Evaluation and Process Selection in Rapid Prototyping and Manufacturing.*
- [21] H. Byun y K.H. Lee (2006): *Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making.*
- [22] J.G. Zhou, D.Herscovici y C.C. Chen (2000): *Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts.*
- [23] S.L. Campanelli, G. Cardano, R. Giannoccaro, A.D. Ludovico y E.L.J. Bohez (2006): *Statistical analysis of the stereolithographic process to improve the accuracy.*
- [24] D. Dimitrov, W. van Wijck, K. Schreve y N. de Beer (2006): *Investigating the achievable accuracy of three dimensional printing.*
- [25] R. Ippolito, L. Iuliano y A. Gatto (1995): *Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish.*
- [26] Damien (2014): *Precision vs accuracy: why I sold my Form 1.*
- [27] Stratasys (2014): *Polyjet Materials Data Sheet and Objet Eden 350V Data Sheet.*
- [28] 3ders: *Price compare - 3D printers* (www.3ders.org).
- [29] Aniwaa: *Compare 3D Printers* (www.aniwaa.com).
- [30] ASTM F2971-13: *Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing.*
- [31] ISO/ASTM 52921-13: *Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies.*

ANEXO A: HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS FORM 1

Tech Specs



The Form 1	Dimensions	30 × 28 × 45 cm 12 × 11 × 18 in
	Weight	8 kg 18 lbs
	Operating Temperature	10–28° C 64–82° F
	Power Requirements	100–240 V 1.5 A 50/60 Hz 60 W
	Laser Specifications	EN 60825-1:2007 certified Class 1 Laser Product 405nm violet laser
	Printing Properties	Stereolithography (SLA)
Printing Properties	Technology	Stereolithography (SLA)
	Build Volume	125 × 125 × 165 mm 4.9 × 4.9 × 6.5 in
	Min Feature Size	300 microns 0.012 inches
	Layer Thickness (Axis Resolution)	25, 50, 100, 200 microns 0.001, 0.002, 0.004, 0.008 inches
	Supports	Auto-Generated Easily Removable

Tabla A.1 Especificaciones técnicas Form 1 [13]

ANEXO B: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MATERIALES

Resina Clear

	Metric ¹	Imperial ¹	Method
Tensile Properties			
Tensile Strength at Yield	29.8 ² (61.5) ³ MPa	4320 (8920) psi	ASTM D 638-10
Young's Modulus	1.3 (2.7) GPa	191 (392) ksi	ASTM D 638-10
Elongation at Failure	20 (5) %	20 (5) %	ASTM D 638-10
Flexural Properties			
Flexural Modulus	0.97 (2.38) GPa	140 (345) ksi	ASTM D 790-10(A)
Impact Properties			
Notched IZOD	22 (29) J/m	0.406 (0.537) ft-lbf/in	ASTM D 256-10
Temperature Properties			
Heat deflection temp. @ 66 psi	52 (78) °C	126 (172) °F	ASTM D 648-07
Heat deflection temp. @ 200 psi	47 (60) °C	117 (140) °F	ASTM D 648-07

Tabla B.1 Especificaciones técnicas Resina Clear [13]

NOTAS

- ¹ Las propiedades del material pueden variar según la geometría, la orientación de la pieza, los ajustes de impresión y la temperatura.
- ² Los datos han sido obtenidos de piezas impresas con un espesor de capa de 50 micras, sin tratamientos adicionales.
- ³ Los datos entre paréntesis hacen referencia a las propiedades después de someter las piezas a un proceso de curado mediante luz ultravioleta a 15 J/cm².

Material RGD720

RGD720					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	50-65	psi	7250-9450
Elongation at break	D-638-05	%	15-25	%	15-25
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000	psi	290,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	80-110	psi	12000-16000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	2700-3300	psi	390,000-480,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50	°F	113-122
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	45-50	°F	113-122
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	20-30	ft lb/inch	0.375-0.562
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.5-2.2	%	1.5-2.2
Tg	DMA, E»	°C	48-50	°F	118-122
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	83-86	Scale D	83-86
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	73-76	Scale M	73-76
Polymerized density	ASTM D792	g/cm3	1.18-1.19		
Ash content	USP281	%	0.01-0.02	%	0.01-0.02

Tabla B.2 Especificaciones técnicas material RGD720 [27]

ANEXO C: HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS OBJET EDEN 350V



Objet Eden350/350V™ The 16 Micron Layer 3D Printing System

Enjoy high productivity & flexibility with outstanding model quality

Eden350/350V

- Ultra-thin-layer PolyJet™ technology
- 16 micron high resolution ensures smooth surfaces and fine details
- Tray size: 350x350x200 mm
- Office environment
- Wide range of materials: FullCure®720, Tango, Vero and Durus
- Single support for all model materials

Eden350V

- 72 hours of unattended continuous printing
- Optimax for automation of resin handling
- High Quality Printing Modes & High Speed
- Upgradable to Objet Connex350 3D Printer

OBJET
The Power to Create

Tabla C.1 Especificaciones técnicas Objet Eden 350V [27]

Objet Eden350/350V™

The 16 Micron Layer 3D Printing System

Technical Specifications

Layer Thickness (Z-axis)

Horizontal build layers down to 16-micron

Tray Size (XxYxZ)

350x350x200 mm

Net Build Size (XxYxZ)

340x340x200 mm

Build Resolution

X-axis: 600 dpi

Y-axis: 600 dpi

Z-axis: 1600 dpi

Printing Modes

Eden350: High Quality (HQ): 16-micron

Eden350V: High Quality (HQ): 16-micron High Speed (HS): 30-micron

Typical Accuracy

20-85um for features below 50mm

Up to 200um for full model size

(for rigid materials only, depending on geometry, build parameters and model orientation)

Material Supported

- Objet FullCure®720: transparent material
- Objet VeroClear: transparent clear material
- Objet Vero family: rigide opaque material

- Objet DurusWhite: polypropylene-like material
- Objet Tango family: rubber-like material
- Objet RGD525: high temperature resistant material

Support Type

- Objet FullCure®705 Support
- Non-toxic gel-like photopolymer support easily removed by WaterJet

Materials Cartridges

Eden350: Sealed 2x3.6 kg cartridges

Eden350V: Sealed 4x3.6 kg cartridges

Automatic switching between cartridges Easily and instantly replaced through a front-loading door

Power Requirements

110 – 240 VAC 50/60 Hz

1.5 KW single phase

Machine Dimensions (WxDxH)

1320x990x1200 mm

Machine Weight

Net 410 kg

Gross (in crate) 500 kg

Software

Objet Studio™ features:

- Optimax-printing optimum package
- Suggested build orientation and speed, auto-placement
- Automatic real time support structure generation
- Slice on the fly
- PolyLog™ Materials Management
- Network version

Input Format

STL and SLC File

Operational Environment

Temperature 18 – 25 °C

Relative Humidity 30 – 70%

Special Facility Requirements

-None

Jetting Heads

SHR (Single Head Replacement), 8 units

Network Communication

LAN – TCP/IP

Compatibility

Windows XP, Windows 2000

*All specification are subject to change without notice



ABOUT OBJET

Objet Ltd., is a leading provider of high quality, cost effective inkjet-based 3D printing systems and materials. A global company, Objet has offices in North America, Europe, Japan, China, Hong Kong, and India.

Objet's 3D printing systems and 3D printing materials are ideal for any company involved in the manufacture or design of physical products using 3D software or other 3D content. Companies using Objet's solutions can be typically found in sectors such as consumer goods & electronics, aerospace & defense, automotive, education, dental, medical and medical devices, architecture, industrial machinery, footwear, sporting goods, toys and service bureaus.

Founded in 1998, the company has thousands of customers worldwide including a substantial share of the relevant Fortune 100 and Fortune 500. Its award-winning technology (12 awards in 5 years) is based upon over 110 patents and patent pending inventions.

Objet's advanced 3D printing systems and range of over 60 materials enable professionals to build prototypes that accurately simulate the true look, feel and function of an end-product, even complex, assembled goods.

The Objet Connex™ line of multi-material 3D printers features the world's only technology to simultaneously jet 2 materials. With this, users can print many different materials into a single part and print various mixed parts on the same build tray. Users can also create advanced composite materials, or Digital Materials™ featuring unique mechanical and thermal properties. Objet's range of over 60 3D printing materials simulate properties ranging from rigid to rubber-like, transparent to opaque and standard to ABS-grade engineering plastics, with a large number of in-between shore grades and shades.

Objet's 3D printers are available in a range of form-factors, from cost-effective desktop 3D printers ideal for entry-level professionals all the way to industrial-scale multi-material machines for front-line designers and top manufacturers. Objet's 3D printers feature the industry's highest-resolution 3D printing quality, based on 16-micron (0.0006 in.) superthin layering, wide material versatility, office friendliness and ease of operation.

For more information, visit us at www.objet.com, and for more about 3D printing industry-related news, business issues and trends, read the Objet Blog.

Objet Ltd.
Headquarters

T: +972-8-931-4314
F: +972-8-931-4315

Objet Inc.
North America

T: +1-877-489-9449
F: +1-866-676-1533

Objet GmbH
Europe

T: +49-7229-7772-0
F: +49-7229-7772-990

Objet AP
Asia Pacific

T: +852-3944-8888
F: +852-217-40555

Objet Shanghai Ltd.
China

T: +86-21-51750566
F: +86-21-58362468

Objet AP
Japan

T: +81-3-5389-5290

Objet AP
India

T: +91-124-4696939
F: +91-124-4696970

info@objet.com www.objet.com

[Objet Blog](#)



© 2011 Objet, Objet24, Objet30, Objet Studio, Quadra, QuadraTempo, FullCure, SHR, Eden, Eden250, Eden260, Eden260V, Eden330, Eden350, Eden350V, Job Manager, CADMatrix, Connex, Objet260 Connex, Connex350, Connex500, Alaris, Alaris30, PolyLog, TangoBlack, TangoGray, TangoPlus, TangoBlackPlus, VeroBlue, VeroBlack, VeroClear, VeroDent, VeroGray, VeroWhite, VeroWhitePlus, Durus, Digital Materials, PolyJet, PolyJet Matrix, ABSlike and ObjetGreen are trademarks or registered trademarks of Objet Ltd. and may be registered in certain jurisdictions. All other trademarks belong to their respective owners.

OBJET
The Power to Create

Q1/12

Tabla C.2 Especificaciones técnicas Objet Eden 350V (cont.) [27]

ANEXO D: TRABAJOS PREVIOS

- 1) “*3D PRINTER SELECTION: A DECISION-MAKING EVALUATION AND RANKING MODEL*” [17]

Procesos estudiados

- Modelado por deposición de hilo fundido (FDM)
- Manufactura de objeto laminado (LOM)
- Fotopolimerización por UV (SGC)

Pieza patrón

La pieza empleada es una modificación de la estructura de Grimm, la cual ya había sido utilizada anteriormente en otros trabajos. En este caso se decidió modificarla debido a que la pieza original sufría variaciones con la temperatura y al hacerla escalonada estas variaciones desaparecían.

Características analizadas

- Precisión dimensional
- Tiempo de fabricación de la pieza
- Rugosidad superficial
- Coste de la pieza fabricada

Resultados

- Para poder comparar los resultados obtenidos, los autores han agrupado los datos en tablas y gráficas de forma que la visualización de los resultados sea rápida e intuitiva.
- En el caso del tiempo necesario para fabricar la pieza, la impresora más rápida es de SGC mientras que la más lenta es de FDM.
- Por otro lado, la que posee mayor precisión dimensional es la de LOM y la que menos la de SGC.

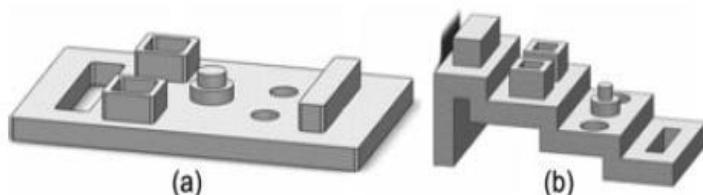


Figura D.1

2) “PROPOSAL FOR A STANDARDIZED TEST ARTIFACT FOR ADDITIVE MANUFACTURING MACHINES AND PROCESSES” [16]

Procesos estudiados

- Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)
- Polyjet

Pieza patrón

La pieza patrón ha sido diseñada con el fin de analizar diversos parámetros. Para ello se han incluido una serie de elementos geométricos como:

- Superficie plana
- Agujero pasante
- Agujeros cilíndricos, cuadrados y romboidales para analizar el detalle mínimo
- Rampas

Características analizadas

- Detalle mínimo
- Precisión geométrica de forma, orientación y situación
- Tiempo de fabricación

Resultados

- El trabajo está enfocado al diseño de la pieza, no a la caracterización de los procesos.
- El tiempo de fabricación mediante DMLS es de 19 horas mientras que mediante Polyjet es de 1 hora.
- La precisión en cuanto al detalle mínimo no es del todo adecuada.
- Se recomienda fabricar la pieza mediante otros procesos de Fabricación Aditiva.

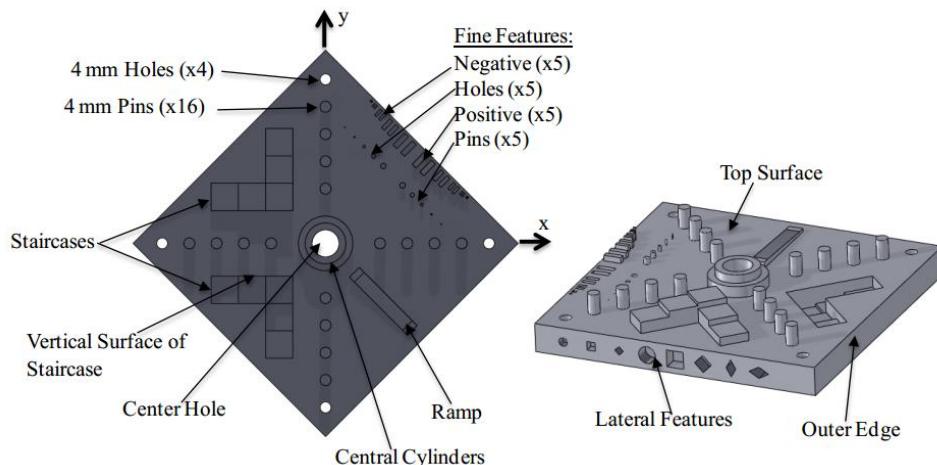


Figura D.2

3) “THE COMPUTATION OF PARETO-OPTIMAL SET IN MULTICRITERIAL OPTIMIZATION OF RAPID PROTOTYPING PROCESSES” [18]

Procesos estudiados

- Sinterización selectiva por láser (SLS)
- Manufactura de objeto laminado (LOM)

Pieza patrón

En este trabajo se han diseñado dos piezas que poseen paredes con inclinaciones comprendidas entre 0º y 90º. La pieza de arriba está diseñada mediante SLS y la abajo mediante LOM.

Características analizadas

- Relación entre la inclinación y la rugosidad
- Tiempo de fabricación de la pieza
- Coste de la pieza fabricada

Resultados

- Mediante algoritmos que estudian la orientación óptima, se pretende minimizar el tiempo de fabricación, el coste de la pieza y la rugosidad superficial.
- El trabajo se centra principalmente en la relación existente entre la inclinación y la rugosidad superficial.

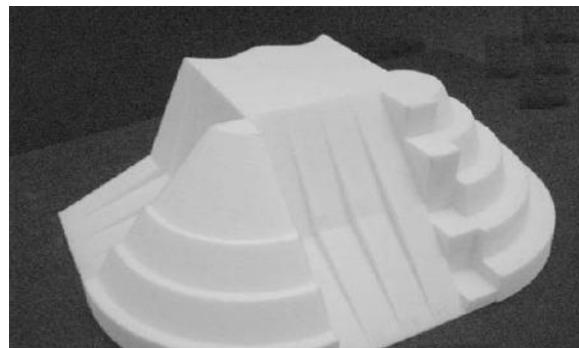


Figura D.3

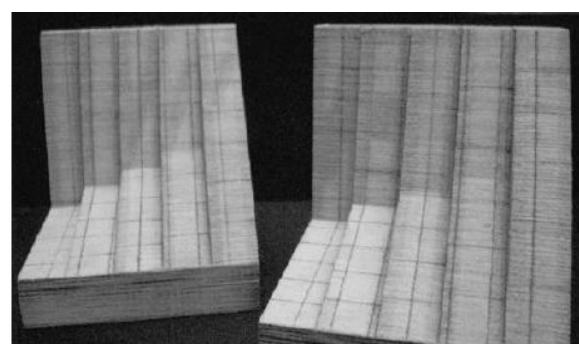


Figura D.4

4) “PROPOSAL OF AN INNOVATIVE BENCHMARK FOR ACCURACY EVALUATION OF DENTAL CROWN MANUFACTURING” [19]

Procesos estudiados

- Sinterización selectiva por láser (SLS)

Pieza patrón

La pieza que se ha diseñado en este caso es la simulación de una dentadura. Se han creado tres geometrías diferentes para reproducir las características de distintos tipos de dientes.

Características analizadas

- Precisión dimensional
- Precisión geométrica de localización

Resultados

- Se ha utilizado una MMC para medir la pieza y posteriormente se ha comparado con los valores nominales del archivo CAD.
- En la actualidad, la odontología y sus prótesis es un campo en el que la impresión 3D está teniendo una fuerte inmersión. Este trabajo pretende analizar el alcance de la tecnología SLS en cuanto a precisión dimensional y posicionamiento, ya que son los factores más importantes en el caso de las dentaduras postizas.

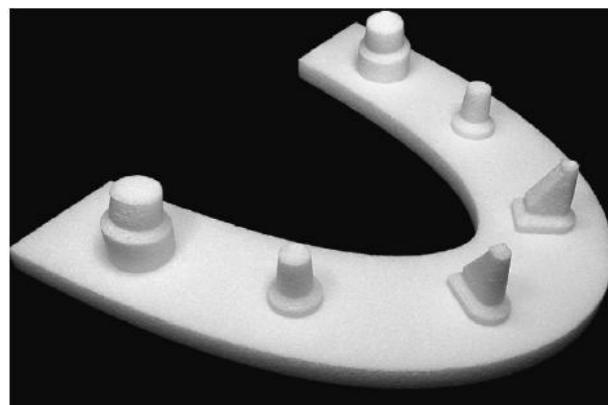


Figura D.5

5) “TOWARD GENERIC MODELS FOR COMPARATIVE EVALUATION AND PROCESS SELECTION IN RAPID PROTOTYPING AND MANUFACTURING” [20]

Procesos estudiados

- Estereolitografía (SLA)
- Sinterización selectiva por láser (SLS)
- Modelado por deposición de hilo fundido (FDM)
- Manufactura de objeto laminado (LOM)

Pieza patrón

La pieza ha sido diseñada con el objetivo de incluir diversas geometrías como cilindros de pequeño diámetro, paredes delgadas y agujeros.

Características analizadas

- Precisión dimensional
- Precisión geométrica
- Tiempo de fabricación
- Coste de la pieza fabricada

Resultados

- Este trabajo está enfocado en el estudio comparativo de la precisión geométrica analizada desde cuatro procesos diferentes.
- Se incluyen medios analíticos para analizar la capacidad de cada uno de los procesos.
- Realizan una propuesta de estudio de las propiedades mecánicas de cada pieza para comparar los procesos y materiales pero no lo analizan en este trabajo.

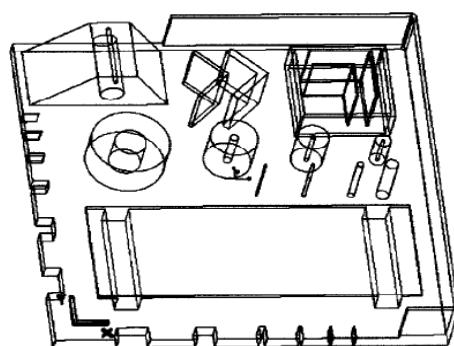


Figura D.6

6) “DETERMINATION OF THE OPTIMAL BUILD DIRECTION FOR DIFFERENT RAPID PROTOTYPING PROCESSES USING MULTI-CRITERION DECISION MAKING” [21]

Procesos estudiados

- Estereolitografía (SLA)
- Sinterización selectiva por láser (SLS)
- Modelado por deposición de hilo fundido (FDM)
- Manufactura de objeto laminado (LOM)

Pieza patrón

La pieza ha sido diseñada con el objetivo de poder orientarla en 6 posiciones distintas. De esta forma se puede analizar la influencia de la orientación en la impresión.

Características analizadas

- Tiempo de fabricación de la pieza
- Rugosidad superficial
- Coste de la pieza fabricada

Resultados

- El estudio está completamente centrado en la orientación de la pieza y la influencia en las características mencionadas.
- No hacen un análisis de la precisión geométrica de los procesos ni de los errores de las máquinas.

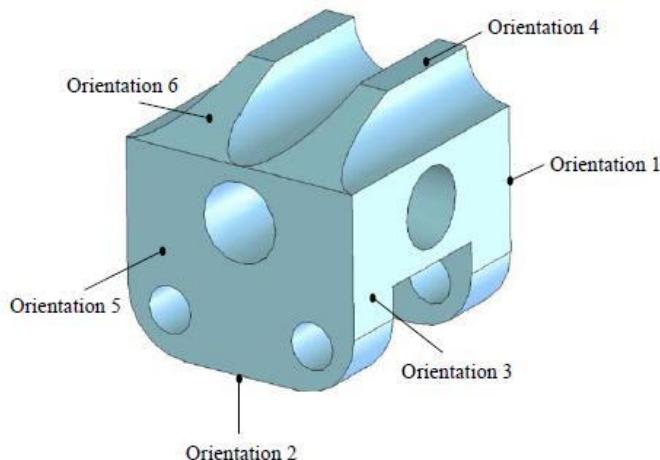


Figura D.7

7) “PARAMETRIC PROCESS OPTIMIZATION TO IMPROVE THE ACCURACY OF RAPID PROTOTYPED STEREOLITHOGRAPHY PARTS” [22]

Procesos estudiados

- Estereolitografía (SLA)

Pieza patrón

En este caso la pieza patrón se trata de una matriz de 20 elementos en el que cada uno es el mostrado en la imagen X. Se ha tratado de incluir varios elementos con distintas geometrías para analizar el proceso de SLA.

Características analizadas

- Precisión de la impresora según la variación de sus parámetros
- Precisión dimensional
- Precisión geométrica

Resultados

- Se ha utilizado el método Taguchi.
- Se ha realizado un análisis de varianza ANOVA.
- Analizan las desviaciones estándar y los ratio entre los factores controlables.
- Análisis estadístico a partir de las medidas obtenidas con la MMC.

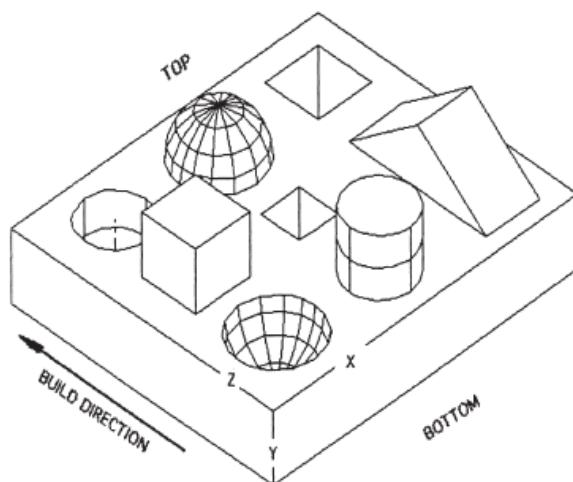


Figura D.8

8) “STATISTICAL ANALYSIS OF THE STEREOLITHOGRAPHIC PROCESS TO IMPROVE THE ACCURACY” [23]

Procesos estudiados

- Estereolitografía (SLA)

Pieza patrón

Este diseño está enfocado al campo de la joyería y se pretende imitar las formas necesarias para estudiar la precisión.

Características analizadas

- Precisión dimensional horizontal
- Precisión dimensional vertical
- Errores de forma
- Errores de posición

Resultados

- Mediante índices, se han evaluado los errores dimensionales, de forma y de posición.
- Se ha realizado un análisis ANOVA para estudiar la influencia de cuatro factores:
 - ❖ Espesor de capa
 - ❖ Profundidad de penetración en la capa adyacente
 - ❖ Distancia entre líneas de solidificación
- En el caso del tiempo necesario para fabricar la pieza, la impresora más rápida es de SGC mientras que la más lenta es de FDM.
- Por otro lado, la que posee mayor precisión dimensional es la de LOM y la que menos la de SGC.

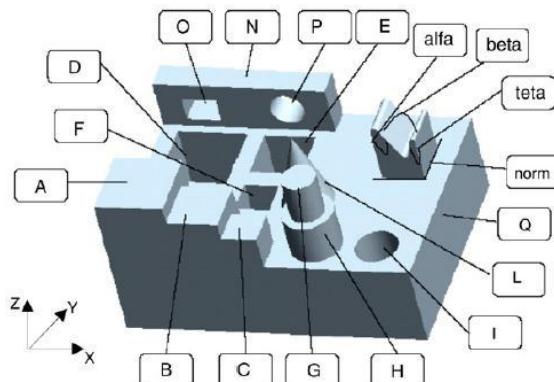


Figura D.9

9) "INVESTIGATING THE ACHIEVABLE ACCURACY OF THREE DIMENSIONAL PRINTING" [24]

Procesos estudiados

- Polyjet

Pieza patrón

En este proyecto se han diseñado dos piezas. La pieza de la izquierda es un cubo de 190 mm de lado con ranuras y láminas salientes rectangulares repartidas por las 6 caras del cubo.

La pieza de la derecha es una caja del diferencial, utilizada en el campo de la automoción. Se compone principalmente de elementos circulares, angulares y cilíndricos.

Características analizadas

- Precisión de la máquina en los tres ejes (X, Y y Z).
- Comparación del material utilizado
- Precisión geométrica
- Precisión dimensional

Resultados

- Para la pieza de la izquierda se han realizado cálculos estadísticos y se han analizado los errores en los tres ejes con dos materiales diferentes.
- También se ha analizado la precisión angular.
- En cuanto a la pieza de la derecha se ha analizado la precisión en la cilindricidad y la concentricidad mediante la medición con una MMC y la comparación con los valores nominales del archivo CAD.

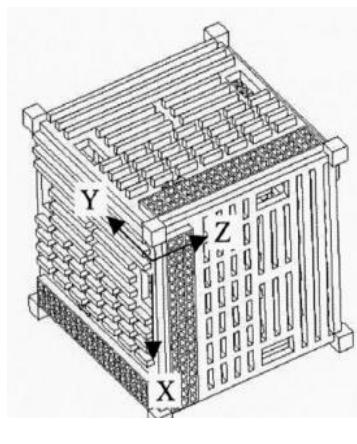


Figura D.10

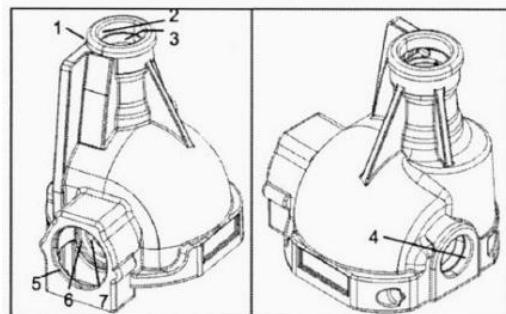


Figura D.11

10) "BENCHMARKING OF RAPID PROTOTYPING TECHNIQUES IN TERMS OF DIMENSIONAL ACCURACY AND SURFACE FINISH" [25]

Procesos estudiados

- Modelado por deposición de hilo fundido (FDM)
- Manufactura de objeto laminado (LOM)
- Fotopolimerización por UV (SGC)
- Estereolitografía (SLA)
- Sinterización selectiva por láser (SLS)

Pieza patrón

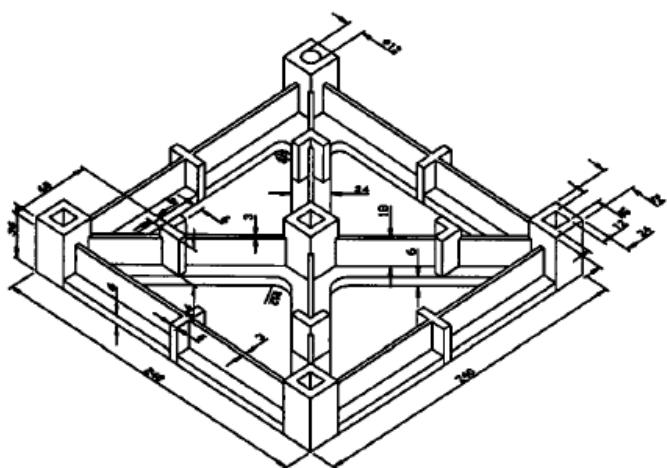
La pieza ha sido diseñada para analizar la precisión dimensional y se ha optado por la simetría en este caso.

Características analizadas

- Precisión dimensional
- Acabado superficial

Resultados

- La precisión dimensional varía de forma insignificante en los cinco procesos estudiados.
- Los resultados varían debido al material utilizado y los parámetros configurados en cada proceso.
- El aspecto crítico en la mayoría de los procesos es la rugosidad superficial.
- Dejan abierto el proyecto a futuros trabajos de investigación, no sacan ninguna conclusión relevante.



ANEXO E: RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

PIEZA 1

Precisión geométrica de localización

	Elemento	Impresora	Material	Espesor de capa (mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error en X (mm)	Error en Y (mm)
1	Agujero_centro	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(0, 0)	(-0.017, 0.036)	-0.017	0.036
				0.05		(0, 0)	(-0.015, 0.034)	-0.015	0.034
				0.025		(0, 0)	(-0.012, 0.030)	-0.012	0.03
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(0, 0)	(-0.007, 0.022)	-0.007	0.022
2	Cilindro_interior	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(0, -35)	(0.134, -35.145)	0.134	-0.145
				0.05		(0, -35)	(0.111, -35.137)	0.111	-0.137
				0.025		(0, -35)	(0.092, -35.097)	0.092	-0.097
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(0, -35)	(-0.079, -35.016)	-0.079	-0.016
3	Cilindro_exterior	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(0, -35)	(0.206, -35.264)	0.206	-0.264
				0.05		(0, -35)	(0.137, -35.188)	0.137	-0.188
				0.025		(0, -35)	(0.098, -35.121)	0.098	-0.121
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(0, -35)	(-0.065, -34.985)	-0.065	0.015
4	Cono	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(0, 34.5)	(0.448, 34.160)	0.448	-0.34
				0.05		(0, 34.5)	(0.334, 34.169)	0.334	-0.331
				0.025		(0, 34.5)	(0.157, 34.345)	0.157	-0.155
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(0, 34.5)	(0.009, 34.511)	0.009	0.011
5	Semiesfera	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(-34.5, 0)	(-34.612, -0.182)	-0.112	-0.182
				0.05		(-34.5, 0)	(-34.592, -0.169)	-0.092	-0.169
				0.025		(-34.5, 0)	(-34.573, -0.124)	-0.073	-0.124
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(-34.5, 0)	(-34.469, -0.100)	0.03	-0.1
6	Cilindro_grande_ext	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(0, 0)	(0.112, -0.207)	0.112	-0.207
				0.05		(0, 0)	(0.102, -0.145)	0.102	-0.145
				0.025		(0, 0)	(0.054, -0.098)	0.054	-0.098
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(0, 0)	(-0.004, -0.014)	-0.004	-0.014
7	Cilindro_grande_int	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(0, 0)	(0.099, -0.153)	0.099	-0.153
				0.05		(0, 0)	(0.079, -0.114)	0.079	-0.114
				0.025		(0, 0)	(0.037, -0.078)	0.037	-0.078
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(0, 0)	(-0.024, -0.007)	-0.024	-0.007
8	Agujero_7	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(44.5, 0)	(44.764, -0.025)	0.264	-0.025
				0.05		(44.5, 0)	(44.712, -0.045)	0.212	-0.045
				0.025		(44.5, 0)	(44.634, -0.019)	0.134	-0.019
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(44.5, 0)	(44.445, -0.008)	-0.055	-0.008
9	Agujero_base_7	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(44.5, 0)	(44.707, 0.051)	0.207	0.051
				0.05		(44.5, 0)	(44.655, 0.049)	0.155	0.049
				0.025		(44.5, 0)	(44.578, 0.034)	0.078	0.034
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(44.5, 0)	(44.446, -0.029)	-0.053	-0.029
10	Agujero_6	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(42.07, -15.08)	(42.374, -15.212)	0.304	-0.132
				0.05		(42.07, -15.08)	(42.231, -15.189)	0.161	-0.109
				0.025		(42.07, -15.08)	(42.137, -15.131)	0.067	-0.051
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(42.07, -15.08)	(42.033, -15.072)	-0.036	0.008
11	Agujero_base_6	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(42.07, -15.08)	(42.385, -14.952)	0.315	0.127
				0.05		(42.07, -15.08)	(42.245, -14.977)	0.175	0.103
				0.025		(42.07, -15.08)	(42.198, -14.998)	0.128	0.082
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(42.07, -15.08)	(41.996, -15.141)	-0.074	-0.061
12	Agujero_5	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(42.07, 15.08)	(42.247, 14.893)	0.177	-0.186
				0.05		(42.07, 15.08)	(42.188, 14.937)	0.118	-0.143
				0.025		(42.07, 15.08)	(42.123, 14.949)	0.053	-0.131
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(42.07, 15.08)	(42.024, 14.978)	-0.046	-0.102
13	Agujero_base_5	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(42.07, 15.08)	(42.140, 15.202)	0.07	0.122
				0.05		(42.07, 15.08)	(42.168, 15.182)	0.098	0.102
				0.025		(42.07, 15.08)	(42.121, 15.166)	0.051	0.086
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(42.07, 15.08)	(42.045, 14.994)	-0.024	-0.086
14	Agujero_4	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(36.14, -26.84)	(36.382, -26.941)	0.242	-0.101
				0.05		(36.14, -26.84)	(36.277, -26.933)	0.137	-0.093
				0.025		(36.14, -26.84)	(36.292, -26.957)	0.152	-0.117
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(36.14, -26.84)	(36.04, -26.898)	-0.1	-0.058
15	Agujero_base_4	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(36.14, -26.84)	(36.451, -26.720)	0.311	0.119
				0.05		(36.14, -26.84)	(36.333, -26.788)	0.193	0.052
				0.025		(36.14, -26.84)	(36.273, -26.790)	0.133	0.05
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(36.14, -26.84)	(35.999, -26.817)	-0.141	0.023
16	Agujero_3	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(36.14, 26.84)	(36.404, 26.864)	0.264	0.024
				0.05		(36.14, 26.84)	(36.381, 26.893)	0.241	0.053
				0.025		(36.14, 26.84)	(36.254, 26.887)	0.114	0.047
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(36.14, 26.84)	(36.109, 26.883)	-0.031	0.043
17	Agujero_base_3	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(36.14, 26.84)	(36.122, 27.111)	-0.017	0.171
				0.05		(36.14, 26.84)	(36.198, 27.134)	0.058	0.194
				0.025		(36.14, 26.84)	(36.159, 27.100)	0.019	0.16
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(36.14, 26.84)	(36.071, 27.075)	-0.068	0.125
18	Agujero_2	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(28.25, -36)	(28.499, -36.016)	0.249	-0.016
				0.05		(28.25, -36)	(28.367, -36.167)	0.117	-0.167
				0.025		(28.25, -36)	(28.341, -36.124)	0.091	-0.124
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(28.25, -36)	(28.148, -36.095)	-0.101	-0.095
19	Agujero_base_2	Form 1	Clear	0.1	Posición (X, Y)	(28.25, -36)	(28.695, -35.941)	0.444	0.058
				0.05		(28.25, -36)	(28.433, -35.899)	0.183	0.101
				0.025		(28.25, -36)	(28.389, -35.946)	0.139	0.054
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		(28.25, -36)	(28.114, -35.907)	-0.135	0.052

Tabla E.1 Posición

Elemento	Impresora	Material	Espesor de capa(mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error (mm)
Cilindro	Form 1	Clear	0.1	Coaxialidad	0	0,278	0,278
			0.05		0	0,221	0,221
			0.025		0	0,165	0,165
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		0	0,029	0,029
Cilindro_grande	Form 1	Clear	0.1	Coaxialidad	0	0,281	0,281
			0.05		0	0,232	0,232
			0.025		0	0,187	0,187
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		0	0,069	0,069
Agujero_7, base_7	Form 1	Clear	0.1	Coaxialidad	0	1,234	1,234
			0.05		0	1,134	1,134
			0.025		0	1,098	1,098
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		0	0,666	0,666
Agujero_6, base_6	Form 1	Clear	0.1	Coaxialidad	0	1,064	1,064
			0.05		0	1,055	1,055
			0.025		0	0,998	0,998
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		0	0,802	0,802
Agujero_5, base_5	Form 1	Clear	0.1	Coaxialidad	0	2,223	2,223
			0.05		0	1,597	1,597
			0.025		0	0,858	0,858
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		0	0,371	0,371
Agujero_4, base_4	Form 1	Clear	0.1	Coaxialidad	0	0,415	0,415
			0.05		0	0,425	0,425
			0.025		0	0,367	0,367
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		0	0,276	0,276
Agujero_3, base_3	Form 1	Clear	0.1	Coaxialidad	0	1,525	1,525
			0.05		0	1,345	1,345
			0.025		0	0,885	0,885
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		0	0,743	0,743
Agujero_2, base_2	Form 1	Clear	0.1	Coaxialidad	0	1,856	1,856
			0.05		0	0,945	0,945
			0.025		0	0,934	0,934
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		0	0,772	0,772

Tabla E.2 Coaxialidad

Precisión geométrica de forma

Elemento	Impresora	Material	Espesor de capa(mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error (mm)
Plano 1	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,276	0,276
			0.05		0	0,217	0,217
			0.025		0	0,142	0,142
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		0	0,054	0,054

Tabla E.3 Planitud

Elemento	Impresora	Material	Espesor de capa(mm)	Característica	Valor Nominal (º)	Valor Real (º)	Error (º)
Cono	Form 1	Clear	0.1	Angularidad	66,31	67,324	1,014
			0.05		66,31	67,145	0,835
			0.025		66,31	66,99	0,680
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		66,31	66,872	0,562
Rampa 1	Form 1	Clear	0.1	Angularidad	9,13	9,5	0,37
			0.05		9,13	9,5	0,37
			0.025		9,13	9,4	0,27
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		9,13	9,3	0,17
Rampa 2	Form 1	Clear	0.1	Angularidad	17,82	19,5	1,68
			0.05		17,82	19,3	1,48
			0.025		17,82	19	1,18
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		17,82	18,5	0,68

Tabla E.4 Angularidad

	Elemento	Impresora	Material	Espesor de capa(mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error (mm)
1	Agujero_centro	Form 1	Clear	0.1	Cilindricidad	0	0,130	0,130
				0.05		0	0,129	0,129
				0.025		0	0,122	0,122
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		0	0,047	0,047
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,123	0,123
2	Cilindro_interior	Form 1	Clear	0.05	Cilindricidad	0	0,098	0,098
				0.025		0	0,128	0,128
				0.016		0	0,039	0,039
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,319	0,319
	Objet Eden 350V	RGD720		0.05		0	0,256	0,256
3	Cilindro_exterior	Form 1	Clear	0.025	Cilindricidad	0	0,222	0,222
				0.016		0	0,037	0,037
				0.1		0	0,119	0,119
	Objet Eden 350V	RGD720		0.05		0	0,078	0,078
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,053	0,053
6	Cilindro_grande_ext	Form 1	Clear	0.016	Cilindricidad	0	0,046	0,046
				0.1		0	0,202	0,202
				0.05		0	0,095	0,095
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,130	0,130
	Objet Eden 350V	RGD720		0.016		0	0,077	0,077
7	Cilindro_grande_int	Form 1	Clear	0.1	Cilindricidad	0	0,059	0,059
				0.05		0	0,098	0,098
				0.025		0	0,047	0,047
	Objet Eden 350V	RGD720		0.016		0	0,025	0,025
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,147	0,147
8	Agujero_7	Form 1	Clear	0.05	Cilindricidad	0	0,134	0,134
				0.025		0	0,111	0,111
				0.016		0	0,049	0,049
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,039	0,039
	Objet Eden 350V	RGD720		0.05		0	0,034	0,034
9	Agujero_base_7	Form 1	Clear	0.025	Cilindricidad	0	0,029	0,029
				0.016		0	0,013	0,013
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,096	0,096
	Objet Eden 350V	RGD720		0.05		0	0,100	0,100
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,086	0,086
10	Agujero_6	Form 1	Clear	0.016	Cilindricidad	0	0,083	0,083
				0.1		0	0,044	0,044
				0.05		0	0,070	0,070
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,023	0,023
	Objet Eden 350V	RGD720		0.016		0	0,004	0,004
11	Agujero_base_6	Form 1	Clear	0.016	Cilindricidad	0	0,096	0,096
				0.1		0	0,100	0,100
				0.05		0	0,086	0,086
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,083	0,083
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,046	0,046
12	Agujero_5	Form 1	Clear	0.016	Cilindricidad	0	0,038	0,038
				0.1		0	0,029	0,029
				0.05		0	0,070	0,070
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,023	0,023
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,004	0,004
13	Agujero_base_5	Form 1	Clear	0.016	Cilindricidad	0	0,070	0,070
				0.1		0	0,046	0,046
				0.05		0	0,038	0,038
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,029	0,029
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,070	0,070
14	Agujero_4	Form 1	Clear	0.016	Cilindricidad	0	0,031	0,031
				0.1		0	0,096	0,096
				0.05		0	0,075	0,075
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,049	0,049
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,031	0,031
15	Agujero_base_4	Form 1	Clear	0.016	Cilindricidad	0	0,061	0,061
				0.1		0	0,141	0,141
				0.05		0	0,123	0,123
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,089	0,089
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,061	0,061
16	Agujero_3	Form 1	Clear	0.016	Cilindricidad	0	0,072	0,072
				0.1		0	0,130	0,130
				0.05		0	0,100	0,100
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,082	0,082
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,072	0,072
17	Agujero_base_3	Form 1	Clear	0.016	Cilindricidad	0	0,038	0,038
				0.1		0	0,113	0,113
				0.05		0	0,095	0,095
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,061	0,061
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,038	0,038
18	Agujero_2	Form 1	Clear	0.016	Cilindricidad	0	0,064	0,064
				0.1		0	0,094	0,094
				0.05		0	0,097	0,097
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,079	0,079
	Objet Eden 350V	RGD720		0.1		0	0,064	0,064
19	Agujero_base_2	Form 1	Clear	0.016	Cilindricidad	0	0,228	0,228
				0.1		0	0,158	0,158
				0.05		0	0,099	0,099
	Objet Eden 350V	RGD720		0.025		0	0,023	0,023

Tabla E.5 Cilindricidad

Precisión dimensional

	Elemento	Impresora	Material	Espesor de capa (mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error (mm)
1	Agujero_centro	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	25,00	25,163	0,163
				0.05		25,00	25,123	0,123
				0.025		25,00	24,898	-0,102
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		25,00	24,923	-0,077
2	Cilindro_interior	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	15,00	14,846	-0,154
				0.05		15,00	14,871	-0,129
				0.025		15,00	14,885	-0,115
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		15,00	14,894	-0,106
3	Cilindro_exterior	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	27,00	27,203	0,203
				0.05		27,00	27,179	0,179
				0.025		27,00	27,117	0,117
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		27,00	27,084	0,084
5	Semiesfera	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	32,00	32,142	0,142
				0.05		32,00	32,096	0,096
				0.025		32,00	32,077	0,077
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		32,00	31,940	-0,060
6	Cilindro_grande_ext	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	75,00	75,300	0,300
				0.05		75,00	75,282	0,282
				0.025		75,00	75,242	0,242
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		75,00	75,066	0,066
7	Cilindro_grande_int	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	65,00	65,242	0,242
				0.05		65,00	65,330	0,330
				0.025		65,00	65,057	0,057
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		65,00	64,924	-0,076
8	Agujero_7	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	7,00	6,891	-0,109
				0.05		7,00	7,071	0,071
				0.025		7,00	6,947	-0,053
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		7,00	6,899	-0,101
9	Agujero_base_7	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	7,00	6,945	-0,055
				0.05		7,00	7,034	0,034
				0.025		7,00	6,967	-0,033
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		7,00	6,996	-0,004
10	Agujero_6	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	6,00	5,880	-0,120
				0.05		6,00	5,892	-0,108
				0.025		6,00	5,971	-0,029
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		6,00	5,872	-0,128
11	Agujero_base_6	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	6,00	5,955	-0,045
				0.05		6,00	5,950	-0,050
				0.025		6,00	5,958	-0,042
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		6,00	6,044	0,044
12	Agujero_5	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	5,00	4,891	-0,109
				0.05		5,00	4,908	-0,092
				0.025		5,00	4,923	-0,077
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		5,00	4,931	-0,069
13	Agujero_base_5	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	5,00	4,784	-0,216
				0.05		5,00	4,834	-0,166
				0.025		5,00	4,855	-0,145
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		5,00	5,046	0,046
14	Agujero_4	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	4,00	3,781	-0,219
				0.05		4,00	3,929	-0,071
				0.025		4,00	3,859	-0,141
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		4,00	3,966	-0,034
15	Agujero_base_4	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	4,00	3,866	-0,134
				0.05		4,00	3,876	-0,124
				0.025		4,00	3,891	-0,109
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		4,00	4,096	0,096
16	Agujero_3	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	3,00	2,770	-0,230
				0.05		3,00	2,820	-0,180
				0.025		3,00	2,786	-0,214
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		3,00	3,039	0,039
17	Agujero_base_3	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	3,00	3,128	0,128
				0.05		3,00	3,081	0,081
				0.025		3,00	2,947	-0,053
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		3,00	3,027	0,027
18	Agujero_2	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	2,00	1,919	-0,081
				0.05		2,00	1,937	-0,063
				0.025		2,00	1,945	-0,055
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		2,00	2,026	0,026
19	Agujero_base_2	Form 1	Clear	0.1	Diámetro	2,00	2,159	0,159
				0.05		2,00	2,124	0,124
				0.025		2,00	1,890	-0,110
		Objet Eden 350V	RGD720	0.016		2,00	2,079	0,079

Tabla E.6 Diámetros

Elemento	Impresora	Material	Espesor de capa(mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error (mm)
Rampa 1	Form 1	Clear	0.1	Espesor	1,00	0,980	-0,020
			0.05		1,00	0,970	-0,030
			0.025		1,00	0,980	-0,020
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		1,00	0,990	-0,010
Rampa 2	Form 1	Clear	0.1	Espesor	2,00	1,970	-0,030
			0.05		2,00	1,980	-0,020
			0.025		2,00	1,980	-0,020
	Objet Eden 350V	RGD720	0.016		2,00	1,990	-0,010

Tabla E.7 Espesores Rampa

PRISMAS

Prisma 50 mm

Precisión geométrica de forma

Elemento	Impresora	Material	Espesor de capa (mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error (mm)
Plano 1	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,072	0,072
			0.05		0	0,091	0,091
			0.025		0	0,053	0,053
Plano 2	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,029	0,029
			0.05		0	0,023	0,023
			0.025		0	0,017	0,017
Plano 3	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,052	0,052
			0.05		0	0,055	0,055
			0.025		0	0,016	0,016
Plano 4	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,017	0,017
			0.05		0	0,015	0,015
			0.025		0	0,003	0,003

Tabla E.8 Planitud

Precisión dimensional

Impresora	Material	Espesor de capa (mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error (mm)
Form 1	Clear	0.1	Longitud en Z	50	50,122	0,122
		0.05		50	50,106	0,106
		0.025		50	50,035	0,035

Tabla E.9 Longitud en Z

Prisma 100 mm

Precisión geométrica de forma

Elemento	Impresora	Material	Espesor de capa (mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error (mm)
Plano 1	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,068	0,068
			0.05		0	0,039	0,039
			0.025		0	0,033	0,033
Plano 2	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,014	0,014
			0.05		0	0,003	0,003
			0.025		0	0,003	0,003
Plano 3	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,097	0,097
			0.05		0	0,053	0,053
			0.025		0	0,045	0,045
Plano 4	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,039	0,039
			0.05		0	0,02	0,020
			0.025		0	0,011	0,011

Tabla E.10 Planitud

Precisión dimensional

Impresora	Material	Espesor de capa (mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error (mm)
Form 1	Clear	0.1	Longitud en Z	100	100,782	0,782
		0.05		100	100,663	0,663
		0.025		100	100,412	0,412

Tabla E.11 Longitud en Z

Prisma 150 mm

Precisión geométrica de forma

Elemento	Impresora	Material	Espesor de capa (mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error (mm)
Plano 1	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,077	0,077
			0.05		0	0,052	0,052
			0.025		0	0,051	0,051
Plano 2	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,019	0,019
			0.05		0	0,012	0,012
			0.025		0	0,008	0,008
Plano 3	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,098	0,098
			0.05		0	0,071	0,071
			0.025		0	0,06	0,060
Plano 4	Form 1	Clear	0.1	Planitud	0	0,079	0,079
			0.05		0	0,044	0,044
			0.025		0	0,018	0,018

Tabla E.12 Planitud

Precisión dimensional

Impresora	Material	Espesor de capa (mm)	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error (mm)
Form 1	Clear	0.1	Longitud en Z	50	50,122	0,122
		0.05		50	50,106	0,106
		0.025		50	50,035	0,035

Tabla E.13 Longitud en Z

MATRIZ

Precisión geométrica de localización

Punto	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error en X (mm)	Error en Y (mm)
1	Posición (X, Y)	(-3.75, 3.75)	(-3.655, 3.761)	0,095	0,011
2	Posición (X, Y)	(-3.75, 15)	(-3.572, 15.077)	0,177	0,077
3	Posición (X, Y)	(-3.75, 26.25)	(-3.502, 26.249)	0,247	-0,001
4	Posición (X, Y)	(-15, 26.25)	(-14.722, 26.357)	0,277	0,107
5	Posición (X, Y)	(-15, 15)	(-14.683, 15.061)	0,317	0,061
6	Posición (X, Y)	(-15, 3.75)	(-14.938, 3.845)	0,062	0,096
7	Posición (X, Y)	(-26.25, 3.75)	(-26.188, 3.951)	0,062	0,201
8	Posición (X, Y)	(-26.25, 15)	(-26.096, 15.234)	0,154	0,234
9	Posición (X, Y)	(-26.25, 26.25)	(-25.979, 26.428)	0,271	0,178
10	Posición (X, Y)	(41.25, -41.25)	(41.025, -41.289)	-0,225	-0,039
11	Posición (X, Y)	(41.25, -30)	(40.805, -30.101)	-0,445	-0,101
12	Posición (X, Y)	(41.25, -18.75)	(41.115, -18.895)	-0,134	-0,145
13	Posición (X, Y)	(30, -18.75)	(29.753, -18.906)	-0,247	-0,156
14	Posición (X, Y)	(30, -30)	(29.705, -30.198)	-0,294	-0,198
15	Posición (X, Y)	(30, -41.25)	(29.532, -41.303)	-0,468	-0,053
16	Posición (X, Y)	(18.75, -41.25)	(18.361, -41.288)	-0,389	-0,039
17	Posición (X, Y)	(18.75, -30)	(18.475, -30.024)	-0,275	-0,025
18	Posición (X, Y)	(18.75, -18.75)	(18.563, -18.853)	-0,187	-0,103
19	Posición (X, Y)	(41.25, 3.75)	(41.323, 3.438)	0,073	-0,312
20	Posición (X, Y)	(41.25, 15)	(41.44, 14.674)	0,191	-0,326
21	Posición (X, Y)	(41.25, 26.25)	(41.565, 25.869)	0,316	-0,381
22	Posición (X, Y)	(30, 26.25)	(30.239, 26.008)	0,240	-0,242
23	Posición (X, Y)	(30, 15)	(30.223, 14.648)	0,223	-0,352
24	Posición (X, Y)	(30, 3.75)	(30.021, 3.522)	0,021	-0,228
25	Posición (X, Y)	(18.75, 3.75)	(18.84, 3.642)	0,090	-0,107
26	Posición (X, Y)	(18.75, 15)	(18.938, 14.925)	0,188	-0,075
27	Posición (X, Y)	(18.75, 26.25)	(19.026, 26.179)	0,276	-0,070
28	Posición (X, Y)	(41.25, 48.75)	(41.782, 48.469)	0,533	-0,280
29	Posición (X, Y)	(41.25, 60)	(41.899, 59.677)	0,650	-0,322
30	Posición (X, Y)	(41.25, 71.25)	(41.984, 71.043)	0,735	-0,207
31	Posición (X, Y)	(30, 71.25)	(30.616, 71.101)	0,616	-0,148
32	Posición (X, Y)	(30, 60)	(30.675, 59.689)	0,676	-0,311
33	Posición (X, Y)	(30, 48.75)	(30.46, 48.475)	0,460	-0,275
34	Posición (X, Y)	(18.75, 48.75)	(19.322, 48.634)	0,573	-0,116
35	Posición (X, Y)	(18.75, 60)	(19.396, 59.896)	0,646	-0,104
36	Posición (X, Y)	(18.75, 71.25)	(19.499, 71.209)	0,749	-0,040
37	Posición (X, Y)	(-3.75, -41.25)	(-4.11, -41.169)	-0,361	0,081
38	Posición (X, Y)	(-3.75, -30)	(-4.012, -29.903)	-0,262	0,097
39	Posición (X, Y)	(-3.75, -18.75)	(-3.925, -18.736)	-0,175	0,014
40	Posición (X, Y)	(-15, -18.75)	(-15.153, -18.703)	-0,153	0,047

Punto	Característica	Valor Nominal (mm)	Valor Real (mm)	Error en X (mm)	Error en Y (mm)
41	Posición (X, Y)	(-15, -30)	(-15.199, -29.916)	-0,199	0,083
42	Posición (X, Y)	(-15, -41.25)	(-15.374, -41.175)	-0,374	0,075
43	Posición (X, Y)	(-26.25, -41.25)	(-26.636, -41.037)	-0,386	0,213
44	Posición (X, Y)	(-26.25, -30)	(-26.552, -29.735)	-0,303	0,265
45	Posición (X, Y)	(-26.25, -18.75)	(-26.399, -18.655)	-0,150	0,095
46	Posición (X, Y)	(-3.75, 48.75)	(-3.26, 48.89)	0,489	0,140
47	Posición (X, Y)	(-3.75, 60)	(-3.214, 60.004)	0,536	0,004
48	Posición (X, Y)	(-3.75, 71.25)	(-3.155, 71.291)	0,595	0,041
49	Posición (X, Y)	(-15, 71.25)	(-14.345, 71.398)	0,654	0,148
50	Posición (X, Y)	(-15, 60)	(-14.259, 60.191)	0,741	0,191
51	Posición (X, Y)	(-15, 48.75)	(-14.567, 49.011)	0,433	0,261
52	Posición (X, Y)	(-26.25, 48.75)	(-25.771, 49.059)	0,478	0,310
53	Posición (X, Y)	(-26.25, 60)	(-25.61, 60.245)	0,640	0,246
54	Posición (X, Y)	(-26.25, 71.25)	(-25.566, 71.554)	0,683	0,304
55	Posición (X, Y)	(-48.75, -41.25)	(-49.391, -40.925)	-0,642	0,325
56	Posición (X, Y)	(-48.75, -30)	(-49.27, -29.57)	-0,520	0,429
57	Posición (X, Y)	(-48.75, -18.75)	(-49.198, -18.362)	-0,448	0,388
58	Posición (X, Y)	(-60, -18.75)	(-60.43, -18.244)	-0,430	0,505
59	Posición (X, Y)	(-60, -30)	(-60.539, -29.33)	-0,539	0,669
60	Posición (X, Y)	(-60, -41.25)	(-60.626, -40.689)	-0,627	0,561
61	Posición (X, Y)	(-71.25, -41.25)	(-71.983, -40.584)	-0,733	0,666
62	Posición (X, Y)	(-71.25, -30)	(-71.88, -29.318)	-0,630	0,682
63	Posición (X, Y)	(-71.25, -18.75)	(-71.791, -18.152)	-0,541	0,597
64	Posición (X, Y)	(-48.75, 3.75)	(-48.946, 4.133)	-0,196	0,383
65	Posición (X, Y)	(-48.75, 15)	(-48.882, 15.414)	-0,133	0,414
66	Posición (X, Y)	(-48.75, 26.25)	(-48.797, 26.641)	-0,047	0,392
67	Posición (X, Y)	(-60, 26.25)	(-60.006, 26.767)	-0,006	0,517
68	Posición (X, Y)	(-60, 15)	(-60.061, 15.623)	-0,061	0,623
69	Posición (X, Y)	(-60, 3.75)	(-60.205, 4.264)	-0,205	0,514
70	Posición (X, Y)	(-71.25, 3.75)	(-71.517, 4.322)	-0,267	0,573
71	Posición (X, Y)	(-71.25, 15)	(-71.417, 15.597)	-0,168	0,597
72	Posición (X, Y)	(-71.25, 26.25)	(-71.358, 26.855)	-0,108	0,605
73	Posición (X, Y)	(-48.75, 48.75)	(-48.588, 49.304)	0,162	0,554
74	Posición (X, Y)	(-48.75, 60)	(-48.443, 60.509)	0,307	0,509
75	Posición (X, Y)	(-48.75, 71.25)	(-48.437, 71.765)	0,313	0,515
76	Posición (X, Y)	(-60, 71.25)	(-59.58, 71.985)	0,420	0,735
77	Posición (X, Y)	(-60, 60)	(-59.566, 60.651)	0,434	0,652
78	Posición (X, Y)	(-60, 48.75)	(-59.86, 49.292)	0,140	0,542
79	Posición (X, Y)	(-71.25, 48.75)	(-71.158, 49.455)	0,092	0,705
80	Posición (X, Y)	(-71.25, 60)	(-71.06, 60.717)	0,189	0,717
81	Posición (X, Y)	(-71.25, 71.25)	(-70.881, 72.036)	0,369	0,786

Tabla E.14 Posición

ANEXO F: ELEMENTOS Y PLANOS PIEZAS PATRÓN

PIEZA 1

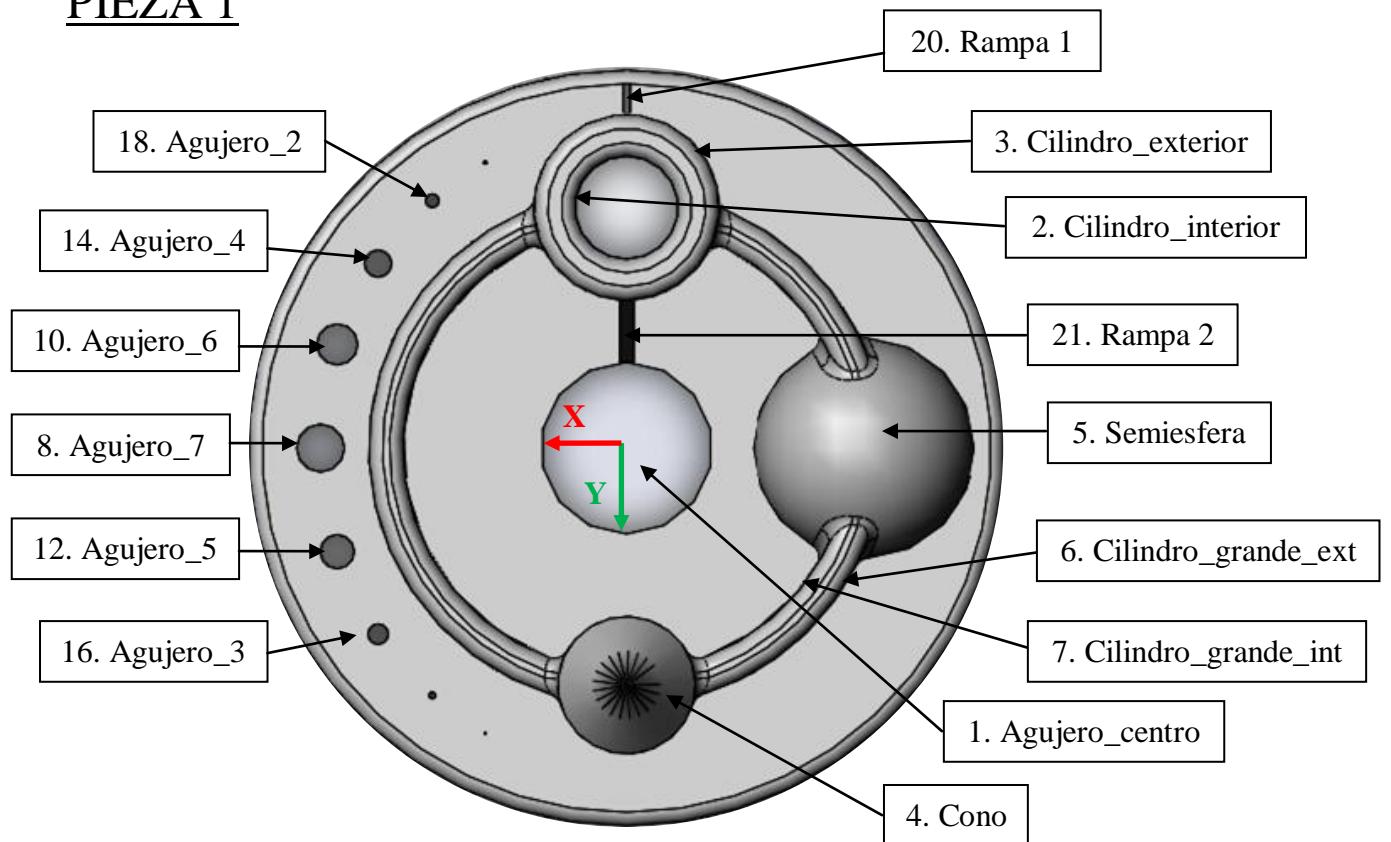


Figura F.1 Elementos Pieza 1 cara superior

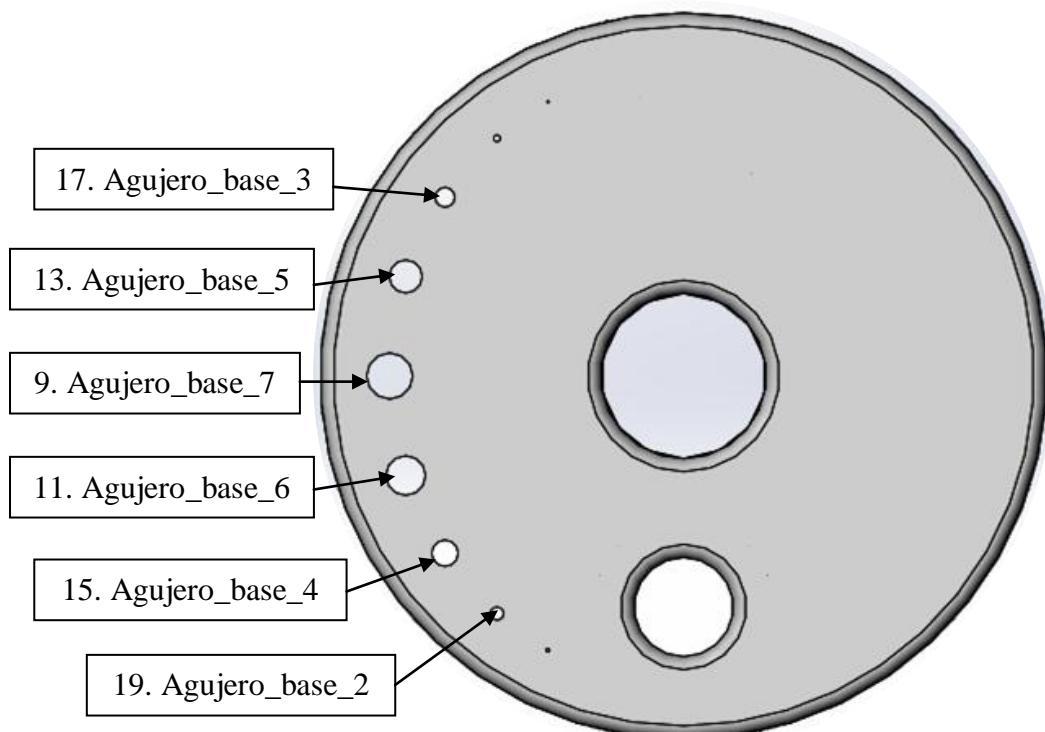
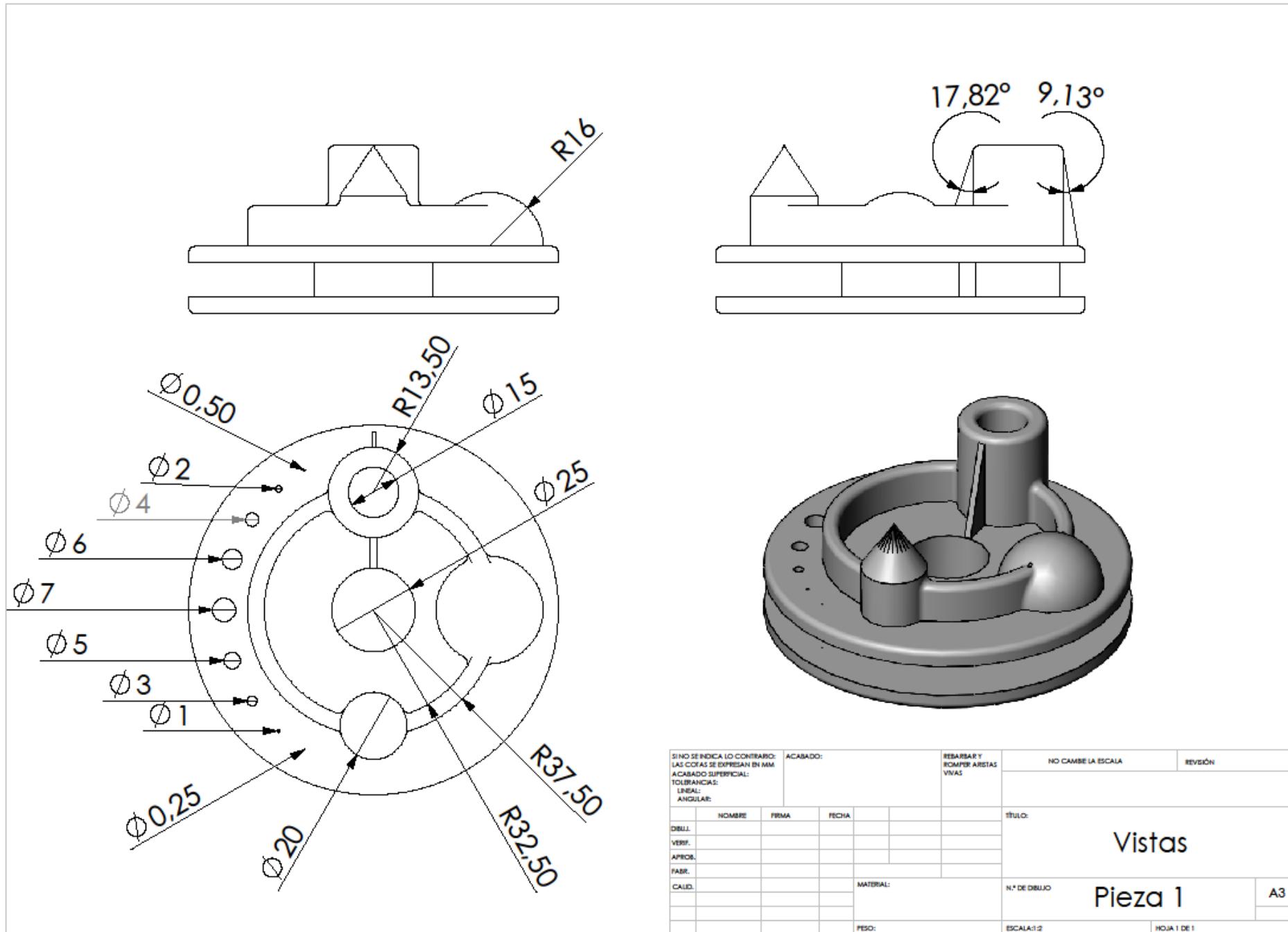
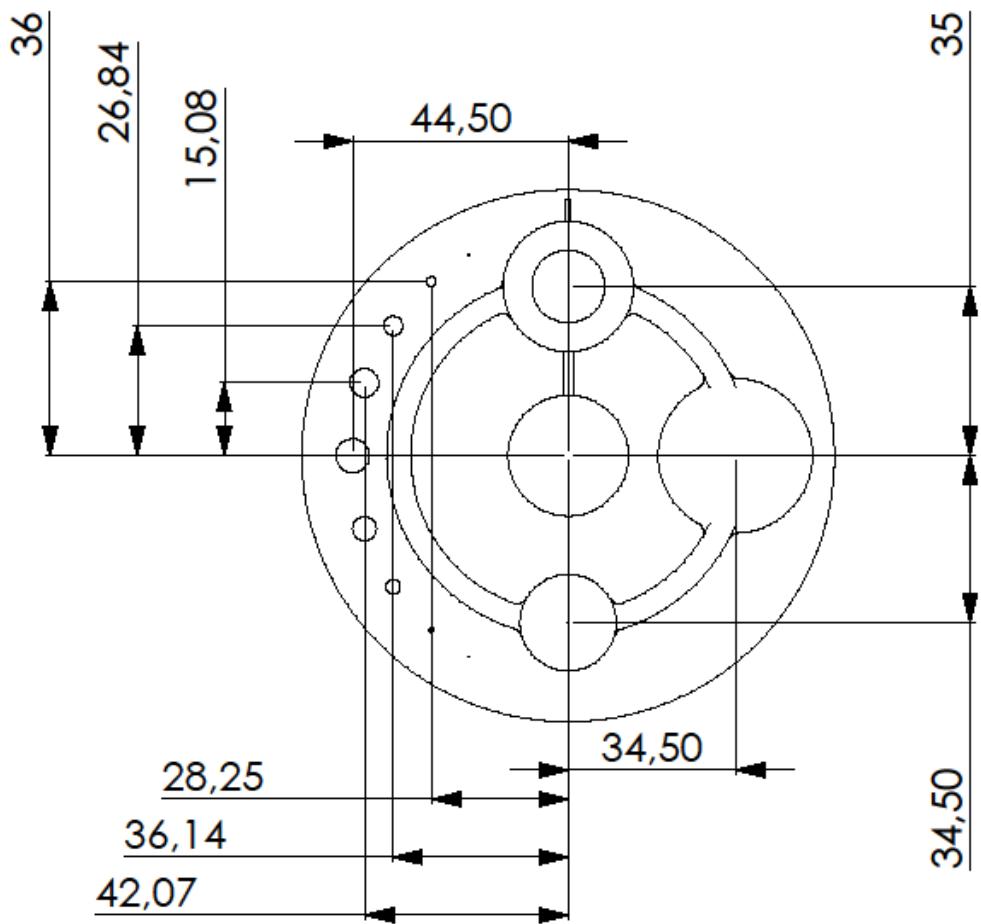


Figura F.2 Elementos Pieza 1 cara inferior





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:			REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VINAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA				
VERIF.							
APROB.							
FABR.							
CAUD.				MATERIAL:			
						N.º DE DIBUJO	
				PESO:		ESCALA 1:2	HOJA 1 DE 1

TÍTULO:
Acotación Planta
Pieza 1 A3

PRISMAS

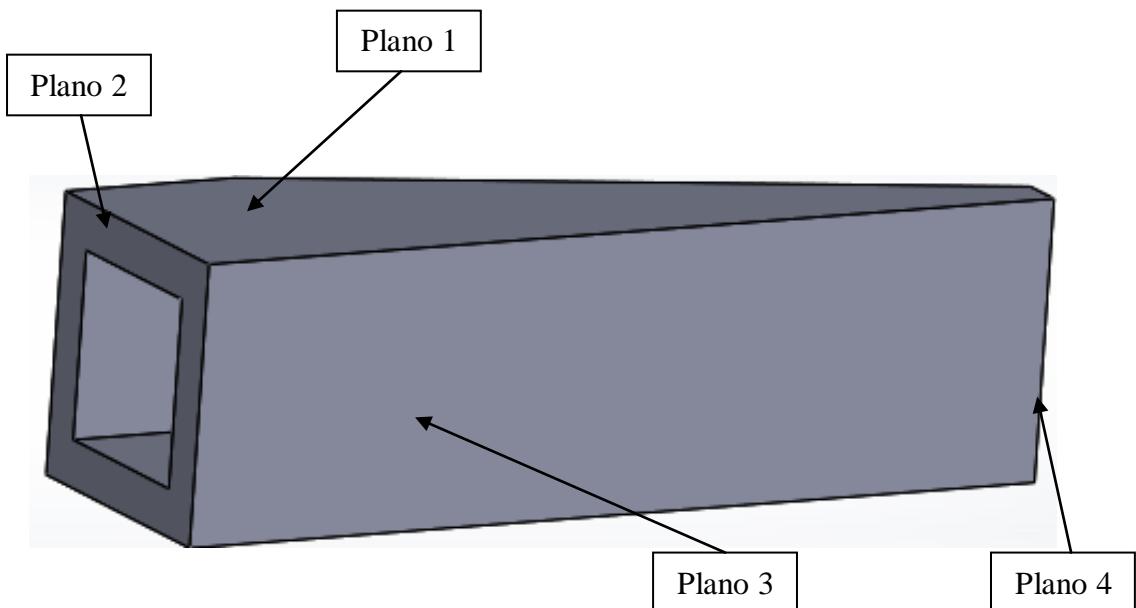
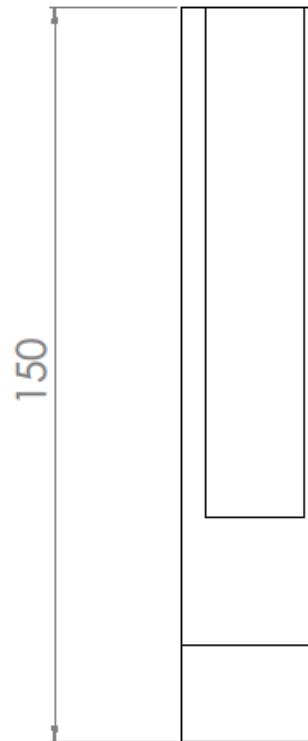
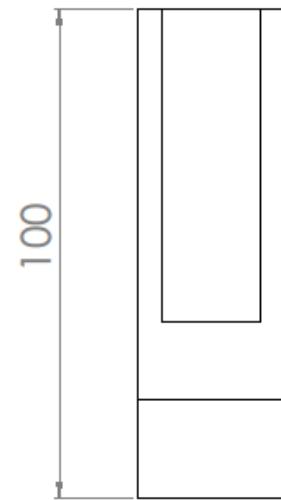
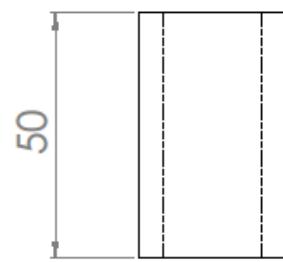


Figura F.3 Elementos Prismas



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COJAS SE EXPRESAN EN MM. ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:	
VERIF.						
APROB.						
FABR.						
CALCO.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO		
				PESO:		
				ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1	
				A3		

Alzados
Prismas

MATRIZ

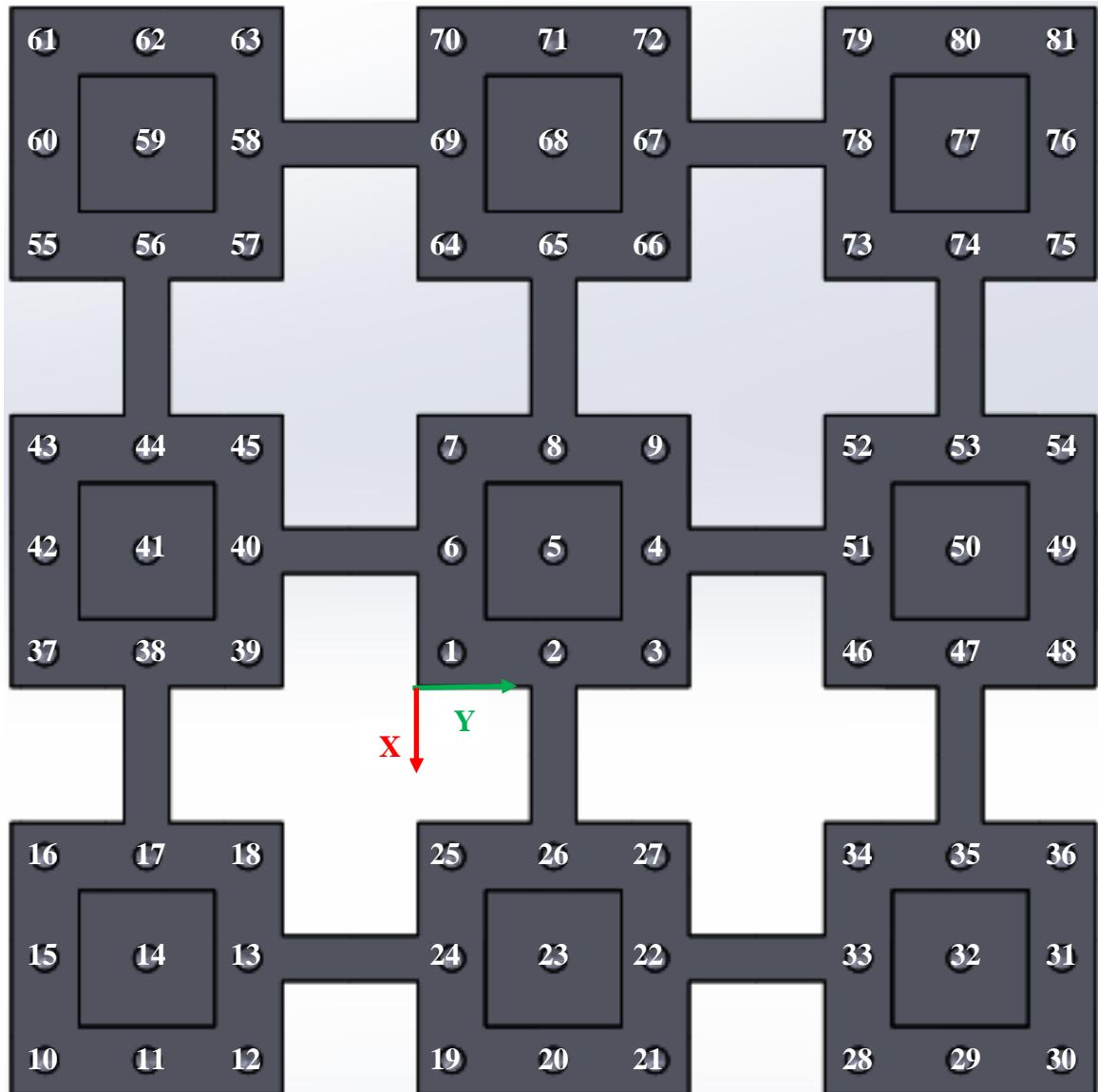
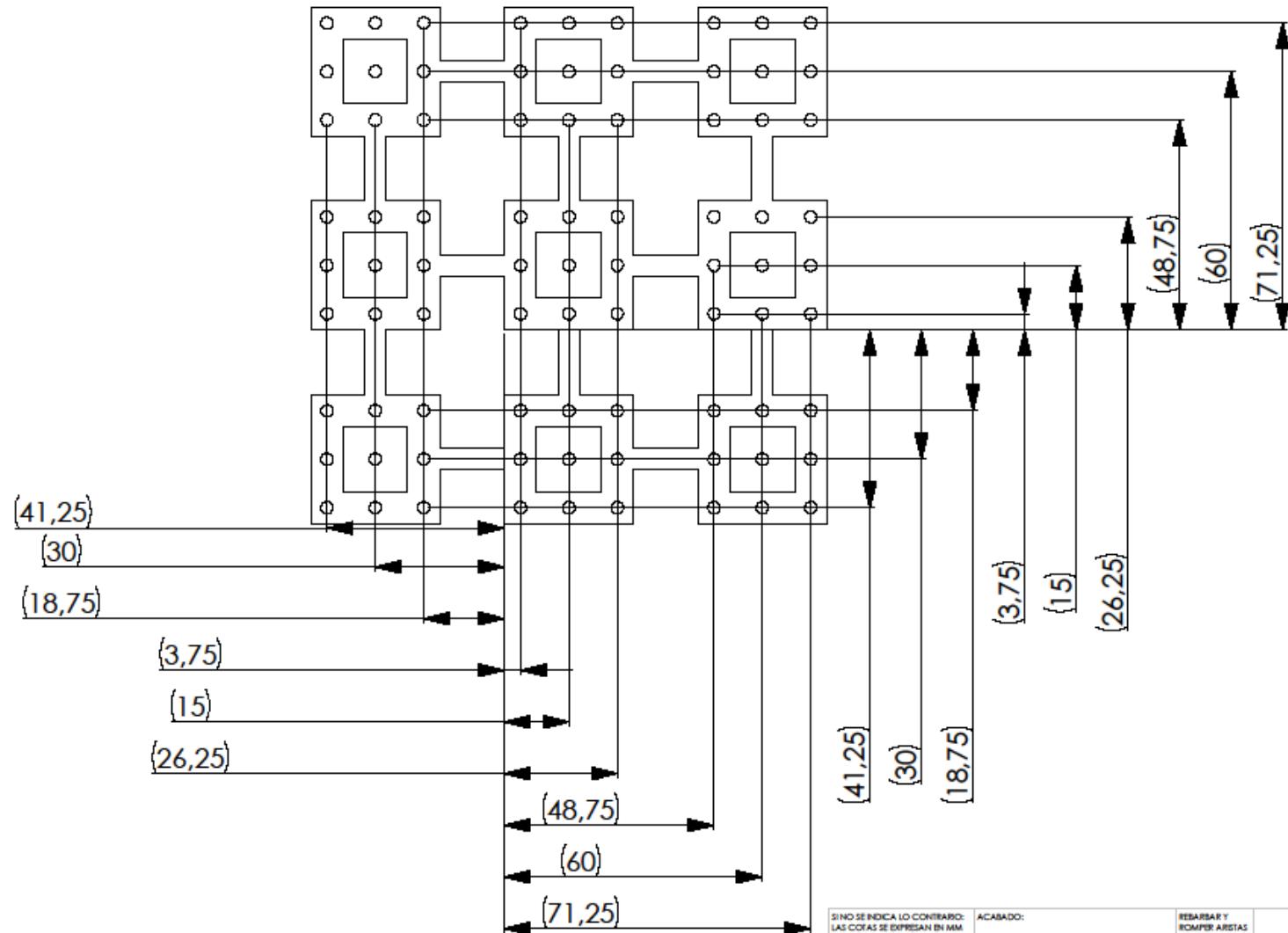


Figura F.4 Elementos matriz



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COFAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
VERIF.				TÍTULO:	
APROB.					
FAIR.					
CAUD.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	
				PESO:	ESCALA:1:2
					HOJA 1 DE 1

Planta

Matriz

A3

ANEXO G: ASPECTOS ECONÓMICOS Y TEMPORALES

Se ha realizado un estudio económico y temporal para conocer el coste que conlleva realizar una verificación completa de la impresora Form 1.

Por un lado se presenta el coste del estudio exhaustivo realizado en este proyecto que tenía como objetivo principal la verificación de la impresora. Por otro lado, se muestra el coste de un proceso de verificación simplificado que puede realizarse en casa del usuario y cuyo coste es menor, ya que no sería necesaria la impresión de las piezas en varios espesores de capa.

Estudio exhaustivo

Pieza patrón	Espesor de capa (mm)	Precio	Tiempo de fabricación
Pieza 1	0,1	23,63 €	12 h 25 min
Pieza 1	0,05	23,63 €	21 h
Pieza 1	0,025	23,63 €	40 h 59 min
Prisma 50	0,1	3,46 €	2 h 30 min
Prisma 50	0,05	3,46 €	5 h 13 min
Prisma 50	0,025	3,46 €	9 h 26 min
Prisma 100	0,1	4,52 €	3 h 59 min
Prisma 100	0,05	4,52 €	7 h 27 min
Prisma 100	0,025	4,52 €	15 h 7 min
Prisma 150	0,1	6,49 €	5 h 49 min
Prisma 150	0,05	6,49 €	10 h 54 min
Prisma 150	0,025	6,49 €	22 h
Matriz	0,025	13,78 €	9 h 21 min
TOTAL		128,07 €	238 h 10 min

Tabla G.1 Análisis económico y temporal de un estudio exhaustivo

Estudio en casa del usuario

Pieza patrón	Espesor de capa (mm)	Precio	Tiempo de fabricación
Pieza 1	0,05	23,63 €	21 h
Prisma 50	0,05	3,46 €	5 h 13 min
Prisma 150	0,05	6,49 €	10 h 54 min
TOTAL		33,58 €	37 h 7 min

Tabla G.2 Análisis económico y temporal de un estudio en casa del usuario

Comparativa

Finalmente se incluye una comparativa de precios y tiempos de fabricación de la Pieza 1 entre la impresora a estudio y la impresora Objet Eden 350.

Impresora	Precio impresora	Precio Pieza 1	Tiempo Pieza 1
Form 1	2.999 €	23,6 €	40h 59 min
Objet Eden 350V	120.000 €	90,8 €	6h 19 min

Tabla G.3 Comparación del coste (tiempo y dinero) de fabricación Pieza 1