



Universidad
Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

“DISEÑO, FABRICACIÓN Y MEDICIÓN DE
PIEZAS PATRÓN PARA IMPRESORA 3D”

Autor

Merced Cobertera Rey

Director/es

José Antonio Albajez García

Jorge Santolaria Mazo

Universidad de Zaragoza /Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2014

Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zaguan

<http://zaguan.unizar.es>

“DISEÑO, FABRICACIÓN Y MEDICIÓN DE PIEZAS PATRÓN PARA IMPRESORA 3D”

RESUMEN

Este proyecto final de carrera tiene como principal objetivo determinar los errores de posicionamiento y perpendicularidad de la impresora 3D ubicada en el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad de Zaragoza.

El modelo de impresora 3D utilizada en este trabajo basa su funcionamiento en un sistema de tres ejes coordenados y ortogonales entre sí, X-Y-Z. En general, en las máquinas de tres ejes pueden definirse una serie de errores en cada uno de los mismos mediante diferentes técnicas. En este proyecto, se ha optado por la determinación de cada uno de los errores individualmente. Para llevar a cabo este tipo de análisis es necesario tener acceso a la máquina mientras está en funcionamiento, condición que no puede realizarse en la impresora 3D empleada. La solución encontrada es la fabricación de una pieza patrón, a través de cuya medición obtener los errores buscados. Sin embargo, con esta técnica no pueden calcularse todos los errores de la máquina, aunque, si bien es cierto, los errores de posicionamiento y perpendicularidad son los que mayor fuente de error generan. Por este motivo, únicamente se han calculado estos dos tipos de errores.

Se ha diseñado una pieza patrón que cubre buena parte de la bandeja de impresión, de manera, que el rango analizado ha sido lo más amplio posible.

Dos de los principales inconvenientes en la determinación individual de todos los errores de una máquina son, por un lado, la lentitud del proceso, y por otro, que durante todo el proceso la máquina deja de estar disponible. En cambio, la fabricación y medición de una pieza patrón no presenta dichos inconvenientes. Esta situación, se ha aprovechado para realizar, adicionalmente, un estudio de estabilidad temporal de la máquina. De esta manera, se pretende ofrecer una herramienta sencilla y rápida para controlar que los errores de la impresora no aumentan significativamente. La realización del estudio de estabilidad temporal requiere de la fabricación de una pieza para cada fecha de control. Por este motivo se ha diseñado una segunda pieza de dimensiones reducidas que puede fabricarse en cualquier orden de trabajo de la impresora y que se mide fácilmente.

En este proyecto, no solo es importante, el diseño de ambas piezas sino el proceso de medición y el análisis de los resultados obtenidos. Por un lado, la realización de un estudio de estabilidad temporal ha conducido a la definición de un procedimiento de medición estándar para las piezas. Se ha optado por emplear la Máquina de Medición por Coordenadas disponible en el departamento ya que ofrece múltiples opciones de medición que se adaptan adecuadamente a los requerimientos de este proyecto. Por otro lado, para el análisis de los resultados obtenidos se han empleado gráficos de control de tipo X-R. Esta herramienta es muy útil para el estudio de estabilidad temporal ya que permite detectar desviaciones y tendencias en los resultados.

A fecha de entrega, los datos calculados para el estudio de estabilidad son limitados, pero se ha puesto a disposición del departamento tanto el procedimiento de medición como la plantilla de cálculo que permite continuar el trabajo empezado en este proyecto. Además, los errores obtenidos son coherentes con la información facilitada por el fabricante de la impresora. No obstante, tras realizar este proyecto es necesario continuar con líneas futuras de trabajo que profundicen y complementen los resultados obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y pareja por todo su apoyo a lo largo de estos años.

ÍNDICE

1. Introducción.....	9
1.1. Justificación del proyecto	9
1.2. Estado del arte	10
1.3. Objetivo y alcance	12
1.4. Metodología de trabajo	12
2. Memoria.....	15
2.1. Planteamiento	15
2.2. Proceso de diseño de piezas patrón	16
2.2.1. <i>Proceso de diseño de la PIEZA A</i>	16
2.2.2. <i>Proceso de diseño de la PIEZA B</i>	17
2.3. Fabricación de piezas patrón	19
2.3.1. <i>Diseño CAD de las piezas</i>	19
2.3.2. <i>Conversión a STL</i>	19
2.3.3. <i>Configuración de los parámetros de impresión y fabricación de las piezas</i>	20
2.3.4. <i>Post-procesos</i>	21
2.4. Medición de piezas patrón	22
2.4.1. <i>Procedimiento de medición de la PIEZA A</i>	23
2.4.2. <i>Procedimiento de Medición de la PIEZA B</i>	27
2.5. Resultados	34
2.5.1. <i>Resultados PIEZA A</i>	35
2.5.2. <i>Resultados PIEZA B</i>	44
3. Conclusiones.....	49
4. Bibliografía	51
5. Anexos	55
Anexo I: Trabajos previos	57

Anexo II: Especificaciones y principio de funcionamiento de la impresora EDEN 350V	75
Anexo III: Características de los materiales empleados	79
Anexo IV: Hojas de toma de datos	81
Anexo V: Resultados de medición de las PIEZAS A	99
Anexo VI: Resultados de medición de la PIEZA B	103
Anexo VII: Gráficos de control	111
Anexo VIII: Planos	115

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La Fabricación Aditiva se define, en las normas ISO 17296-1 Y ASTM 2792-12, como: *“proceso de unión de material para realizar objetos a partir de la información de un modelo 3D, normalmente capa sobre capa y como oposición a las metodologías de fabricación sustractiva.”* [1]

Estos procesos de fabricación permiten realizar casi cualquier tipo de pieza con geometrías complejas que otros procesos de fabricación convencionales no permiten. De esta manera el empleo de la Fabricación Aditiva está creciendo considerablemente ya que ofrece diversas ventajas [17]:

- Reducción del tiempo necesario para fabricar productos personalizados, dado que para ello únicamente se requiere modificar el archivo CAD, eliminando el uso de utillajes.
- Completa libertad y flexibilidad en el diseño del producto. La Fabricación Aditiva no tiene las limitaciones geométricas típicas de otros procesos de fabricación, como por ejemplo: ángulos de desmoldeo en inyección, limitación de acceso de la herramienta en mecanizado, etc.
- Máximo ahorro de material. Esta tecnología no elimina material, sólo añade el estrictamente necesario.
- No es necesario invertir en moldes o utillajes, lo cual permite obtener las primeras piezas o prototipos rápidamente. Esto posibilita la producción de series cortas y medias que con otros procesos supondrían un coste muy elevado.

Del mismo modo, la Fabricación Aditiva también presenta una serie de inconvenientes [17]:

- Alto coste de la materia prima. Se debe a la necesidad de transformar previamente el material al formato necesario (polvo, hilo, resina líquida, etc) ya que cada proceso lo utiliza de un modo distinto.
- Caracterización de las propiedades de los materiales procesados. Debido al proceso productivo, las propiedades de los materiales son distintas en función de la dirección de fabricación, obteniéndose normalmente materiales ortótropos con diferentes propiedades si se ensayan en la dirección de la capa o perpendicular a esta. A su vez, estas propiedades dependen del espesor de la capa, la tecnología empleada y los parámetros del proceso.
- Ausencia de un software específico de diseño para tecnologías de Fabricación Aditiva. Actualmente el diseño de piezas se realiza con programas de diseño 3D CAD que utilizan operaciones básicas de mecanizado para modelar el producto, lo cual impide el aprovechamiento óptimo de las posibilidades de fabricación de los procesos aditivos.
- Es necesario el desarrollo de nuevos materiales para estos procesos.
- Mejora de la calidad superficial y la precisión dimensional. Dependiendo de la tecnología empleada puede ser necesario realizar un mayor número de post-procesos y acabados superficiales, que incrementan el coste del producto.

La Fabricación Aditiva es una tecnología todavía en expansión y desarrollo que carece de estándares. Es por ello que se está llevando a cabo un proceso de estandarización [1] con el fin de

satisfacer las necesidades del sector y sus aplicaciones, desarrollando los estándares necesarios, certificaciones y buenas prácticas.

Para este proceso de estandarización se están desarrollando, desde el verano de 2013, los siguientes hitos:

- Creación del comité ASTM F42 e ISO/TC261.
- Terminología sobre Fabricación Aditiva, recogida en las normas ASTM 52912 e ISO 17296-1.
- Determinación de los procesos y materiales empleados en Fabricación Aditiva (ISO 17296-2).
- Establecimiento de los test de estandarización.
- Realización de guías de diseño.

Por lo tanto, dada la creciente importancia de estas tecnologías y la necesidad de comprobar y asegurar los productos mediante estándares, la realización de este proyecto se centra en el cuarto hito anteriormente mencionado: Establecimiento de los test de estandarización. Para ello, van a realizarse dos piezas patrón para caracterizar los errores de la máquina de impresión 3D, disponible en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación.

1.2. ESTADO DEL ARTE

Existen dos metodologías básicas empleadas para evaluar el rendimiento de una máquina o proceso. La primera, a través de una serie de medidas directas de la máquina o las características del proceso. La segunda, a través de la medición de una pieza patrón fabricada por la máquina a evaluar.

La elección de un método u otro depende, en parte, de las características del proceso de fabricación. De este modo, para realizar mediciones directas se requiere poder posicionar y controlar los componentes individuales de la máquina y, a su vez, el montaje de los instrumentos de medida dentro del volumen de trabajo. Con ello puede medirse la posición relativa, orientación y velocidades de cada uno de los componentes estudiados. Sin embargo, no siempre es posible realizar el posicionamiento y control necesarios, tal es el caso de los procesos de Fabricación Aditiva.

Este tipo de máquinas tienen una serie de particularidades constructivas que impiden la realización de medidas directas sobre sus componentes, haciendo necesaria la utilización de piezas patrón. En primer lugar, los componentes móviles no son accesibles al usuario y, por consiguiente, tampoco lo son para los instrumentos de medida. Además, muchos de los procesos de Fabricación Aditiva están dotados de elementos laser que impiden la manipulación de la máquina mientras está en funcionamiento. Por ello, las piezas patrón tienen un papel importante en la caracterización de los procesos y máquinas de Fabricación Aditiva.

Desde la aparición de estas nuevas tecnologías se han desarrollado numerosas piezas patrón. Sin embargo, aun no existe una única pieza patrón estándar. A continuación se muestran algunas de las

piezas que se han diseñado con dicho propósito desde principio de los años noventa. Para ello, se muestran los trabajos previos¹ en función de cuatro categorías [24]:

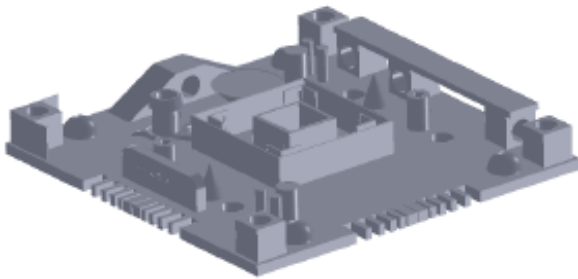


FIGURA 1. PIEZA PATRÓN DISEÑADA POR MAHESH

capacidad de varios procesos. Tal es el caso de Kruth, que fue el primero en emplear una pieza patrón, como también hizo Mahesh (Figura 1)

Otros parámetros estudiados fueron el acabado superficial y la exactitud geométrica de las piezas fabricadas por distintos procesos. Los investigadores Ippolito, Iuliano y Gatto [22] propusieron una pieza patrón y Xu y Wong [8] también. Paralelamente Campanelli [26], Zhou [13] y Dimitrov [6] entre otros, estudiaron la precisión de distintos procesos de impresión 3D.

Ha habido procesos específicos de Fabricación Aditiva que han adquirido relevancia y esto ha permitido realizar estudios comparativos de una misma familia de procesos. Para el caso de 3D Printing, Roberson, Espalin y Wicker [4] diseñaron una pieza patrón con la cual comparar cinco procesos.

Moylan [25] propuso una pieza patrón que englobara el mayor número posible de características y que sirviera de comparación entre distintos procesos de Fabricación Aditiva.

2. Piezas patrón para evaluar procesos individualmente

En este caso, la finalidad de las piezas diseñadas es, o bien estudiar un nuevo proceso como hizo Gargiulo entre otros, o bien optimizarlo. Además, la aparición de nuevos materiales para los procesos de Fabricación Aditiva también hace necesaria la utilización de piezas patrón para cuantificar la exactitud de las piezas fabricadas con el nuevo material. Para ello, se diseñaron las piezas

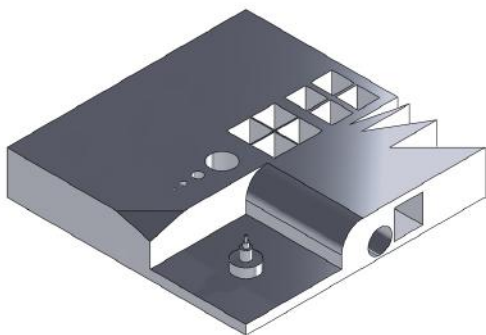


FIGURA 2. PIEZA PATRÓN DISEÑADA POR KRUTH

“Windowpane” y “Christmas tree” de Nguyen, Ritche y Jacobs.

3. Piezas patrón para procesos basados en materiales metálicos

Cuando las capacidades de los procesos para materiales metálicos crecieron e hicieron viable la fabricación directa de piezas metálicas, se realizaron numerosos estudios de mercado con piezas patrón. Tal es el caso de las piezas realizadas

¹ En este apartado se nombran diversos trabajos previos para ofrecer una visión general del estado en que se encuentran los estudios de este campo. En el Anexo I (Trabajos previos) se puede encontrar un análisis más detallado sobre algunos de los trabajos aquí mencionados.

por Kruth (Figura 2) o Castillo. En el primer caso, la pieza patrón se empleó para determinar y analizar los errores geométricos y el acabado superficial. Por otro lado, el trabajo de Castillo incluía el estudio de capacidad para construir diversos ángulos, así como la exactitud del sistema.

Ghany, Hanumaiah o Pessard son algunos de los investigadores que centraron sus trabajos en el análisis de procesos basados en materiales metálicos. Con el mismo fin, Delgado evaluó la precisión geométrica y la repetibilidad de la posición. Finalmente, Cooke [2] empleó una pieza patrón típica en procesos de mecanizado.

4. Piezas patrón para otros usos

El principal propósito de la mayoría de las piezas patrón mostradas anteriormente es caracterizar la exactitud geométrica de los procesos bajo estudio. Sin embargo, la Fabricación Aditiva se basa en la construcción de una capa sobre otra, lo cual lleva típicamente a perfiles de escalera y estructuras que dependen del espesor de la capa. Por ello, varias investigaciones se han centrado en el acabado superficial.

Además, esta construcción de capa sobre capa puede llevar a piezas con propiedades mecánicas anisótropas, desencadenando estudios de propiedades mecánicas mediante piezas patrón como el realizado por Delgado, Ciurana y Rodríguez [14].

1.3. OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo de este proyecto es la realización de dos piezas patrón que permitan la caracterización de los errores de una máquina de impresión 3D. En concreto, este proyecto se centra en la determinación de los errores de posición y perpendicularidad en cada uno de los tres ejes de la máquina, X, Y y Z.

Para ello, se han diseñado dos piezas. Una de ellas, se va a emplear para realizar un estudio de estabilidad temporal de la máquina, de manera que se propone su impresión en todas las órdenes de trabajo de la impresora 3D durante un tiempo específico. Por otro lado, la segunda pieza reúne diversas características geométricas que permiten caracterizar en detalle los seis errores de la máquina estudiados.

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Tal y como se ha comentado en el objetivo y alcance, en este proyecto se han realizado dos piezas patrón. Para ello, la metodología seguida es la que se describe a continuación.

En primer lugar, y tras realizar un estudio sobre trabajos previos relacionados con la precisión geométrica y el empleo de piezas patrón (ver Anexo I: Trabajos previos), se han diseñados ambas piezas. Se ha seguido un proceso iterativo y se ha empleado el programa de CAD SolidWorks.

El siguiente paso, es la fabricación de las piezas con la impresora 3D. Una de las piezas diseñadas se va a emplear para realizar un estudio de estabilidad temporal de la máquina, con ese objetivo, se fabricarán varias “impresiones” de la misma.

Posteriormente, todas las piezas serán medidas mediante una Máquina de Medición por Coordenadas y los datos recogidos se analizarán para obtener los errores de posición y perpendicularidad de cada uno de los ejes de la máquina.

2. MEMORIA

2.1. PLANTEAMIENTO

La impresora 3D con la cual se ha realizado este proyecto es una impresora de la marca Stratasys, modelo EDEN 350V que emplea la tecnología PolyJet para su funcionamiento (ver Anexo II: Especificaciones y principio de funcionamiento de la impresora EDEN 350V).

Esta impresora es una máquina de 3 ejes, y por lo tanto, se pueden determinar en ella 21 errores geométricos. De esta manera, por cada eje de la máquina se establecen los siguientes errores:

- Un error de posición.
- Dos errores de rectitud.
- Tres errores angulares.
- Un error de perpendicularidad.

De todos ellos, en este proyecto se van a determinar los errores de posición y perpendicularidad para los tres ejes X, Y, Z de la impresora 3D. Los otros tipos de errores, aunque son mayores en número tienen un peso menor sobre el total. Además, por características constructivas de la máquina, es muy complicado incorporar en su cabezal instrumentos de medida que permitan determinar los errores, motivo por el cual se han diseñado dos piezas patrón para realizar una verificación funcional de la impresora.

La primera de las piezas diseñadas, PIEZA A, se va a emplear para realizar un estudio de estabilidad temporal de la máquina. Es decir, verificar que la impresora funciona dentro de tolerancias, para lo cual, es necesario determinar los principales errores en cada uno de sus ejes y comprobar si están dentro de los límites aceptables para el tipo de impresora 3D estudiada.

Por otra parte, se va a realizar una segunda pieza, PIEZA B, para la caracterización de los errores de la impresora 3D mediante una verificación funcional. Este tipo de verificación se emplea habitualmente en máquina-herramienta y consiste en determinar, a partir de una pieza fabricada con la máquina a estudiar, los errores de dicha máquina. Este sistema analiza los errores de forma global y tiene en cuenta todos aquellos efectos internos o externos a la máquina que pueden ser una fuente de error. Este modo de trabajo es más rápido que el análisis eje por eje de cada uno de los errores, es decir, verificación directa de la máquina.

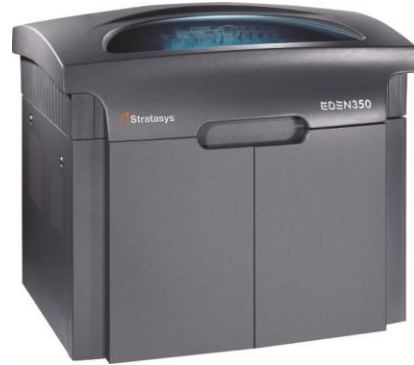


FIGURA 3. IMPRESORA EDEN 350V

2.2. PROCESO DE DISEÑO DE PIEZAS PATRÓN

En este apartado se van a exponer los pasos y razonamientos seguidos a la hora de diseñar las dos piezas patrón de este proyecto. En primer lugar se muestra la información relativa a la PIEZA A. Después se explica el proceso de diseño de la PIEZA B.

2.2.1. PROCESO DE DISEÑO DE LA PIEZA A

La finalidad de esta pieza es realizar un estudio de estabilidad temporal de la máquina. Por lo tanto, para el proceso de diseño de la pieza se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- La pieza debe permitir la determinación de posiciones y perpendicularidad en los tres ejes X, Y, Z.
- Tiene que ser de tamaño reducido para poder incluirse en la bandeja de impresión cada vez que se utilice la impresora.

Para determinar posiciones y perpendicularidades en una pieza pequeña las características geométricas elegidas han sido:

- Elementos circulares, principalmente agujeros cilíndricos.
- Formas prismáticas con caras perpendiculares.
- Agujeros cónicos ya que permiten posteriormente determinar la posición de su eje midiéndolos en la Máquina de Medir por Coordenadas.

Con estas consideraciones, y tras seguir un método iterativo, se ha llegado al siguiente diseño de la PIEZA A. Para ello se han estudiado previamente dos posibles piezas, siendo la tercera la definitiva:

- La primera de ellas (ver Figura 4a) permite analizar el error de posición en los ejes que forman el plano de su base, quedando el tercer eje sin analizar. Por este motivo, la pieza no es adecuada.
- En la siguiente pieza (ver Figura 4b) se ha invertido la construcción anterior, aumentando la superficie de caras perpendiculares y facilitando así su posterior medición. Se ha añadido un segundo agujero que tiene doble función: por un lado, permite analizar la concentricidad de ambos agujeros. Por otro lado, su colocación con respecto al agujero de mayor diámetro permite obtener un valor de posición en el eje perpendicular a la base. Aunque este valor puede ser difícil de medir posteriormente.
- La última pieza consiste en duplicar la segunda formando una "L". Esto ofrece la posibilidad de analizar posición y perpendicularidad mediante diversas características geométricas.

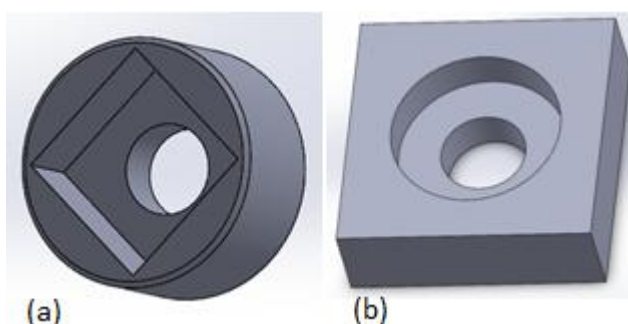


FIGURA 4. PRIMERA (A) Y SEGUNDA (B) ALTERNATIVA DE DISEÑO DE LA PIEZA A

La pieza diseñada cumple los requisitos necesarios para poder analizar los errores de posición y perpendicularidad. Sin embargo, tal y como está diseñada, no puede amarrarse para su posterior medición sin perder superficies útiles. Por ello, se añaden dos lengüetas con agujeros que permiten su sujeción en la mesa de medición.

Además, tal y como se detalla en el apartado 2.4, se va a emplear una Máquina de Medir por Coordenadas que permite obtener mucha información, pero no evaluar el paralelismo entre caras directamente. Por este motivo, se añaden a la pieza unos agujeros cónicos distribuidos por sus diferentes caras, de manera que mediante la medición de agujeros pueda evaluarse el paralelismo.

Con todas las consideraciones explicadas, el diseño final de la PIEZA A es el mostrado en la Figura 5².

A continuación se explica qué errores pueden determinarse a partir de la geometría final de la PIEZA A:

- Los agujeros cilíndricos permiten determinar la posición de su centro respecto a los dos ejes que forman el plano de su base, proporcionando error de posición en ambos ejes.
- Entre dos agujeros cilíndricos se establece una relación de concentricidad que puede medirse y que se traduce en errores de posicionamiento.
- A través de dos caras perpendiculares se establecen los errores de perpendicularidad.

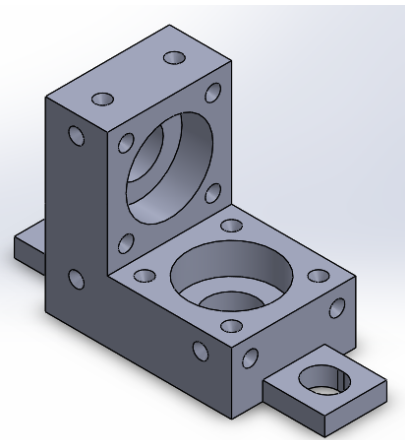


FIGURA 5. DISEÑO FINAL DE LA PIEZA A

2.2.2. PROCESO DE DISEÑO DE LA PIEZA B

Esta pieza se va a emplear para analizar los errores de posicionamiento y perpendicularidad mediante una verificación funcional de la impresora 3D. En este caso, las consideraciones tenidas en cuenta para su diseño son las siguientes:

- La pieza debe permitir la determinación de posiciones y perpendicularidad en los tres ejes X, Y, Z.
- El tamaño de la pieza debe cubrir buena parte de la bandeja de impresión.
- Debe reunir repetidas veces cada tipo de característica geométrica.

Para determinar posiciones y perpendicularidades en esta pieza las características geométricas elegidas han sido:

- Elementos circulares, principalmente agujeros cilíndricos.
- Formas prismáticas con caras perpendiculares.
- Agujeros cónicos ya que permiten posteriormente determinar la posición de su eje midiéndolos en la Máquina de Medir por Coordenadas.

² En el Anexo VIII están los planos de la PIEZA A.

En la Figura 6 puede verse el diseño final de la PIEZA B³ cuyas características se explican a continuación:

- Los escalones permiten determinar tanto errores de perpendicularidad como de posicionamiento a partir de caras paralelas.
- Se ha diseñado un patrón geométrico para los escalones y se ha ubicado a lo largo de los dos ejes que forman el plano de la base.
- El patrón de escalones incluye agujeros cilíndricos en cuya base se ha situado

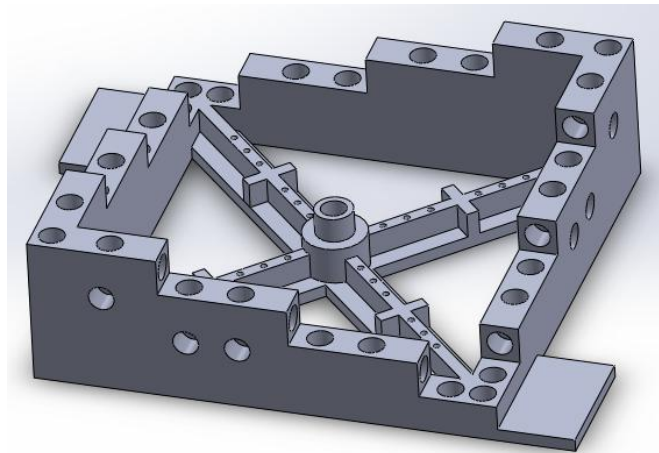


FIGURA 6. VISTA 3D DE LA PIEZA B

- un agujero cónico. Este diseño permite comparar, durante el proceso de medida, el centro del cilindro y el del cono, que deberían coincidir. De este modo, se obtienen errores de posición ya que los agujeros están distribuidos por los tres planos aprovechando la estructura de escalones.
- La estructura central, por su disposición, permite analizar ángulos de 45° y además ofrecen rigidez y estabilidad a la pieza.
- Los conos ubicados en los nervios ofrecen información sobre errores de posicionamiento en los tres ejes.
- Los cilindros centrales permiten analizar concentricidad y error de posición en el eje perpendicular a sus bases.
- Las lengüetas periféricas no poseen ninguna función geométrica, únicamente permiten el amarre de la pieza durante el proceso de medida.

³ En el Anexo VIII están los planos de la PIEZA B.

2.3. FABRICACIÓN DE PIEZAS PATRÓN

Una vez diseñadas las piezas, pueden fabricarse en la impresora 3D. En los procesos de Fabricación Aditiva es necesario seguir los siguientes pasos (Figura 7) para obtener una pieza:

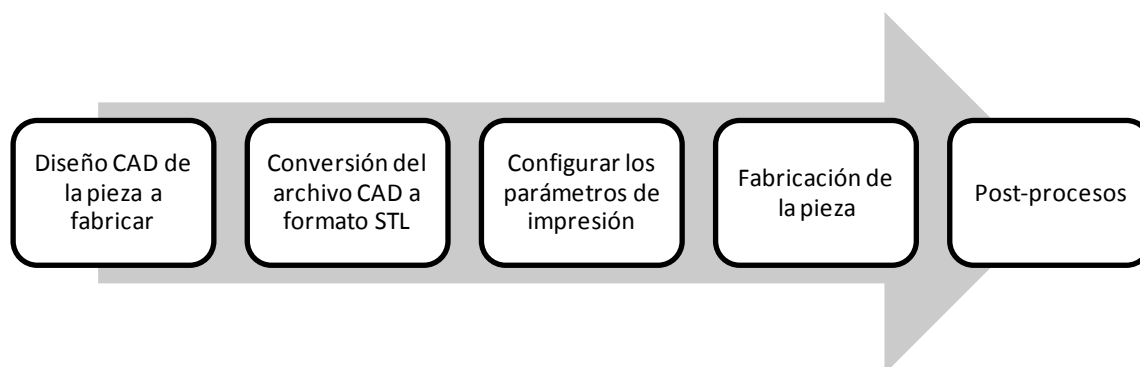


FIGURA 7. FASES DEL PROCESO DE FABRICACIÓN CON IMPRESORA 3D

En este apartado de la memoria se explica detalladamente cómo se han llevado a cabo los pasos arriba mostrados para la fabricación de ambas piezas, PIEZA A y PIEZA B.

2.3.1. DISEÑO CAD DE LAS PIEZAS

A partir del diseño de las piezas mostrado en el apartado 2.2 se han dibujado en el programa de CAD SolidWorks las PIEZAS A y B. Para ello se han empleado operaciones básicas del programa ya que las geometrías a dibujar no son complejas. Las operaciones más empleadas han sido extrusiones, cortes, vaciados, matrices o simetrías.

2.3.2. CONVERSIÓN A STL

La conversión al formato STL puede hacerse directamente con el programa SolidWorks desde la opción *Guardar como...* Dentro de la ventana para guardar el archivo existe la opción de configuración manual de los parámetros de conversión.

Al guardar en formato STL se muestra una ventana de configuración donde pueden fijarse a voluntad dos parámetros: desviación y ángulo. La elección de una tolerancia específica para cada uno de estos parámetros define la conversión a formato STL. Sin embargo, la elección de tolerancias puede no ser adecuada ya que esta conversión implica una simplificación de la pieza mediante la transformación de la geometría exterior por triángulos. Las características de estos triángulos quedan definidas por los parámetros de desviación y ángulo.

Para asegurar que el error cometido al realizar esta simplificación es despreciable, se ha empleado el programa Geomagic Qualify. Con él, se compara el CAD original con el archivo STL y se calculan las desviaciones.

El máximo error cometido al convertir el CAD en formato STL es del orden de nanómetros, por lo que es un error despreciable y pueden considerarse como adecuados los parámetros elegidos para la conversión, mostrados en la tabla siguiente:

	PIEZA A	PIEZA B
Desviación (mm)	0,005	0,016
Ángulo (grados)	1 ⁰	1 ⁰

TABLA 1. PARÁMETROS DE CONVERSIÓN A STL

2.3.3. CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN Y FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS

Con el archivo en formato STL, este puede importarse al software de la impresora 3D que permite configurar distintos parámetros del proceso de impresión.

El primero de ellos es el material a emplear, previa carga de la impresora con el mismo. En este proyecto se han empleado dos materiales diferentes tal y como muestra la tabla 2 (Ver Anexo III: Características de los materiales empleados).

	PIEZA A	PIEZA B
FC720	X	X
RGD525	X	

TABLA 2. MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS

Otro parámetro que puede indicarse en el software es la ubicación y orientación de las piezas dentro de la bandeja de impresión. Esta información es muy importante para las PIEZAS A ya que las distintas impresiones no han sido orientadas del mismo modo, lo cual implica un cambio de coordenadas a la hora de calcular los errores geométricos. En la figura 8 se muestran cuáles son los ejes de la impresora 3D.

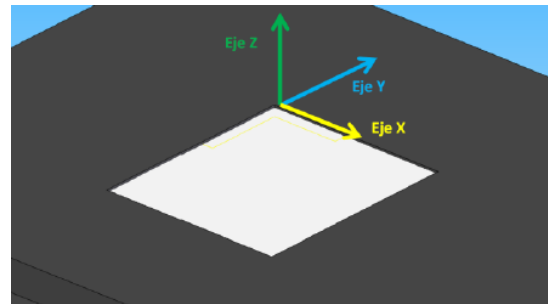


FIGURA 8. EJES DE LA IMPRESORA 3D

Las PIEZAS A se han colocado en la bandeja de impresión con dos orientaciones distintas. En la figura 9 se muestran las dos orientaciones de las piezas indicando la situación relativa de los ejes de la máquina en la pieza.

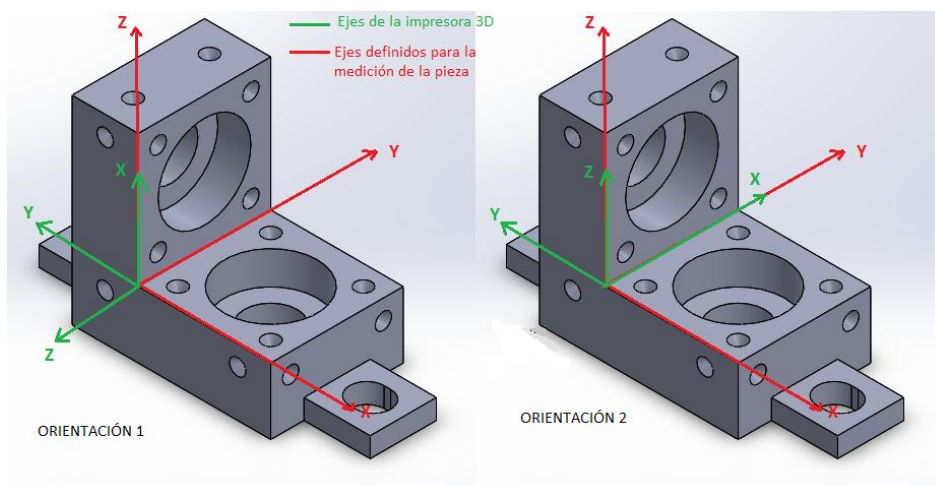


FIGURA 9. ORIENTACIONES DE PIEZA A RESPECTO EJES DE LA IMPRESORA 3D

La ubicación de las PIEZAS A ha sido distinta en cada una de las impresiones realizadas, ya que estas piezas se han impreso junto con otras que no guardan relación con este proyecto. De este modo,

las piezas han sido fabricadas en distintos puntos de la bandeja de impresión, por lo que los resultados abarcan un campo amplio del rango de impresión de la máquina.

Con respecto a la PIEZA B, su orientación y ubicación en la bandeja de impresión se muestra en la figura 10.

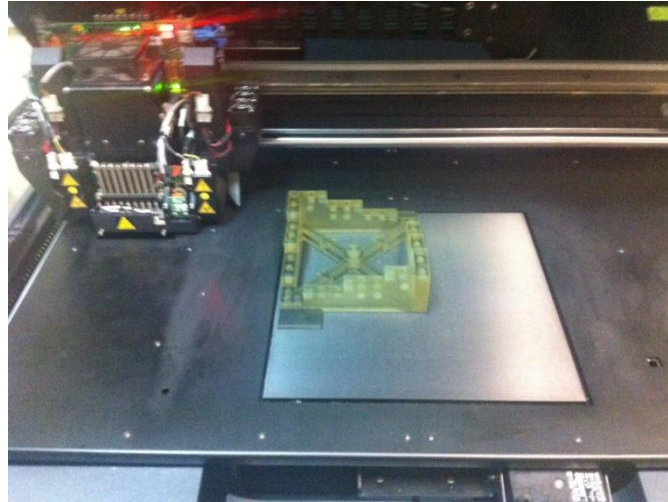


FIGURA 10. ORIENTACIÓN Y UBICACIÓN DE PIEZA B EN BANDEJA DE IMPRESIÓN

A fecha de entrega de este proyecto se han fabricado seis PIEZAS A y una PIEZA B. En la tabla siguiente se muestran las fechas de fabricación de cada una de las piezas así como su orientación en el caso de las PIEZAS A.

Pieza	Fecha	Orientación
Pieza A1	30/06/2014	1
Pieza A2	30/06/2014	2
Pieza A3	21/07/2014	1
Pieza A4	21/07/2014	2
Pieza A5	29/07/2014	1
Pieza A6	30/07/2014	1
Pieza B	30/07/2014	-

TABLA 3. FECHAS DE FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS Y ORIENTACIÓN DE LAS PIEZAS A

2.3.4. POST-PROCESOS

Una vez finalizado el proceso de impresión, la pieza debe separarse de la bandeja de impresión y debe limpiarse para eliminar el material de soporte que la impresora emplea para realizar entidades huecas cuando las características de la pieza lo requieren.

El proceso habitual de limpieza consiste en un baño con agua a presión y sosa. En este caso, se ha descartado la utilización de la sosa para prevenir posibles deterioros en las tolerancias dimensionales de las piezas.

2.4. MEDICIÓN DE PIEZAS PATRÓN

En este apartado se explica el proceso de medición seguido para cada una de las piezas. Para ello se ha empleado una Máquina de Medir por Coordenadas, MMC, de la marca Zeiss, modelo PMC 850. En la tabla 4 se recogen las principales características técnicas.

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)	1200
Movimiento en z (mm)	600
Control	Calypso

TABLA 4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA MMC

Dado que ambas piezas requieren distintas mediciones, en este apartado se han definido dos procedimientos de medición, uno para cada una de las piezas. Además, en el Anexo IV pueden consultarse las hojas de toma de datos rellenas tras cada sesión de medición.

Antes de detallar los procedimientos de medición, se incluyen a continuación algunas consideraciones surgidas a partir del proceso de medida.

Para la medición de las PIEZAS A se ha empleado un conjunto de dos palpadores, uno vertical y otro horizontal. De este modo, todas las superficies de la pieza son accesibles y, por lo tanto, medibles. Sin embargo, debido a un problema con el palpador horizontal, en las dos primeras impresiones (Pieza A1 y Pieza A2) no se pudieron medir todas las entidades indicadas en el procedimiento de medición. Por ello, la sesión guardada y citada en el procedimiento es la primera que se realizó (Pieza A3) con el conjunto de palpadores completo y operativo. De este modo, cualquier usuario puede seguir el mismo procedimiento de medida asegurando que se analizan los mismos datos.

Para amarrar la PIEZA A los utillajes disponibles en el Laboratorio de Metrología eran demasiado voluminosos. Por ello, se ha diseñado un utillaje específicamente para este caso. En la imagen 11 puede verse el sistema empleado: uniones roscadas mesa - utillaje y entre éste y la pieza.

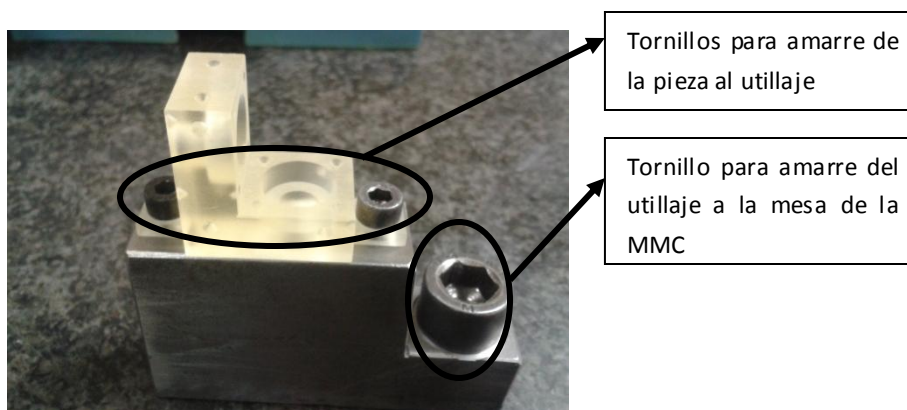


FIGURA 11. UTILLAJE EMPLEADO PARA LA SUJECIÓN DE LA PIEZA A EN LA MMC

Para medir piezas con una MMC es necesario establecer un sistema de coordenadas definido a partir de la geometría de la pieza. Para las PIEZAS A y B se ha definido un sistema de tres ejes a partir de la intersección de tres planos perpendiculares, ya que por la geometría de las piezas, son entidades accesibles fácilmente y rápida medición. La disposición de ejes elegida para las PIEZAS A y B se muestra en el procedimiento de medición (figuras 13 y 22 respectivamente).

2.4.1. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LA PIEZA A

Este procedimiento de medición indica el proceso que debe seguirse para medir una de las PIEZAS A a partir de una sesión previamente guardada. Sin embargo, los pasos para crear dicha sesión no se incluyen. La única diferencia se encuentra en los pasos 3, 4, 5 y 6 ya que en primer lugar debe definirse el sistema de palpadores mediante la medición de la esfera de referencia. A continuación, hay que medir y definir qué tres entidades caracterizan el sistema de referencia. Finalmente, se establece el paralelepípedo de seguridad.

A continuación, se indican los pasos a seguir para medir una pieza:

1. Amarre de la pieza con el utillaje como muestra la figura 11.



FIGURA 12. CONJUNTO DE PALPADORES EMPLEADO PARA MEDIR LAS PIEZAS A

2. Arrancar el programa Calypso y abrir la sesión guardada como *Pieza_L_24072014*.
3. El sistema de palpadores que debe emplearse para medir esta pieza es el mostrado en la figura 12 y está guardado como *pza_L*. Si no está colocado en la MMC debe ponerse y medir la esfera de referencia con el palpador.
4. Dentro del menú del sistema de palpadores elegir el vertical para realizar los pasos del 5 al 10. En la tabla 5 se muestran el nombre y el número de cada uno de los palpadores empleados.

Nombre del palpador	Número
Z	1
2	2

TABLA 5. NOMBRE Y NÚMERO DE LOS PALPADORES PARA LA PIEZA A

5. Volver a medir las entidades que constituyen el sistema de referencia para esta pieza. Para ello, hay que entrar en el menú *Sistema básico de arranque* donde aparecen los planos que definen el sistema de coordenadas. Hay que elegir la opción *Medir manualmente* mediante la cual el programa indica cuántos puntos hay que volver a medir sobre la entidad indicada. Es decir, volver a medir los tres planos que forman el sistema de referencia. En la figura 13 se indican cuáles son estos tres planos.

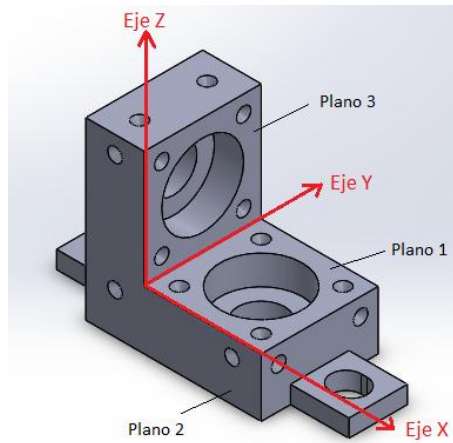


FIGURA 13. SISTEMA DE REFERENCIA PIEZA A Y PLANOS 1, 2 Y 3

6. El paralelepípedo de seguridad ya está definido pero si no aparece señalado en verde es necesario volver a definirlo.

7. Medir los conos del 1 al 10 (son los indicados en la figura 14) con la opción de palpado autocentrante. De esta manera, se obtiene la posición del eje del cono como un punto.

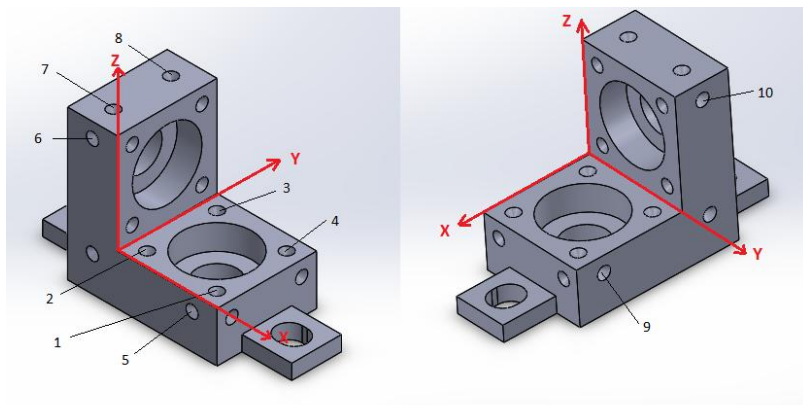


FIGURA 14. CONOS DEL 1 AL 10 EN PIEZA A

8. Medir los planos 4 y 5 (Figura 15)

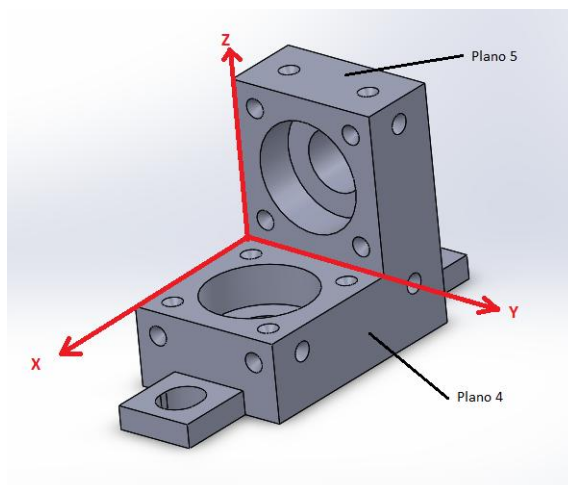


FIGURA 15. PLANOS 4 Y 5 EN PIEZA A

9. Medir cilindros 1 y 2 (Figura 16)

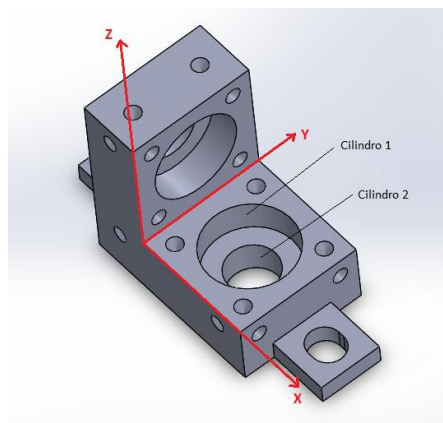


FIGURA 16. CILINDROS 1 Y 2 EN PIEZA A

10. Medir plano 6 y 7 (Figura 17)

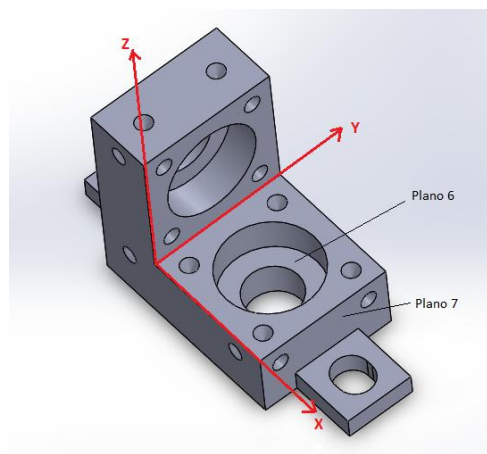


FIGURA 17. PLANOS 6 Y 7 EN PIEZA A

11. En el menú del sistema de palpadores, elegir el palpador horizontal para realizar los pasos 12 y 13.

12. Medir cilindros 3 y 4 (Figura 18)

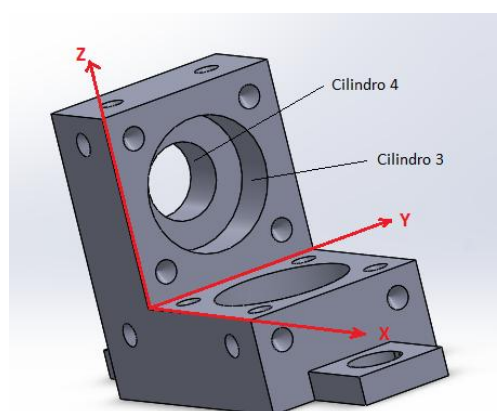


FIGURA 18. CILINDROS 3 Y 4 EN PIEZA A

13. Medir los conos del 11 al 16 (Figura 19) con la opción de palpado autocentrante.

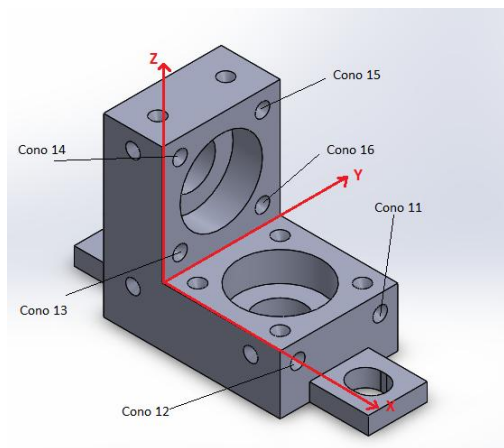


FIGURA 19. CONOS DEL 11 AL 16 EN PIEZA A

14. Evaluar la planitud de todos los planos medidos con la opción *Planitud* del menú *Forma y posición*.

15. Evaluar la coaxialidad entre los cilindros 1 – 2 y 3 – 4 con la opción *Coaxialidad* del menú *Forma y posición*.

17. Evaluar el paralelismo entre los planos 1 – 5, 2 – 4 y 3 – 7 con la opción *Paralelismo* del menú *Forma y posición*.

18. Evaluar la perpendicularidad entre los planos 1 – 7, 1 – 4, 2 – 5, 2 – 7, 3 – 4, 3 – 5, 4 – 5 y 4 – 7 con la opción *Perpendicularidad* del menú *Forma y posición*.

2.4.2. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LA PIEZA B

A diferencia del procedimiento de medición de las PIEZAS A, en este caso, se explica cómo crear la sesión de medición de la PIEZA B.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Amarre de la pieza con el utillaje según indica la figura 20. Se ha optado por emplear un par de utillajes disponibles en el Laboratorio de Medición que se emplean habitualmente para amarrar piezas en la MMC.

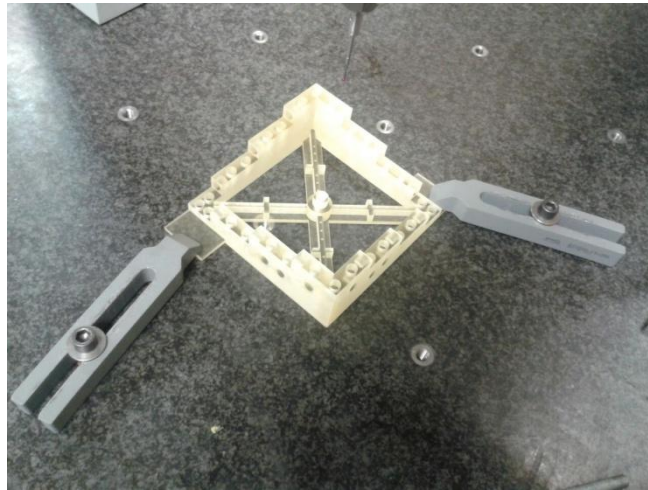


FIGURA 20. PRIMERA POSICIÓN DE AMARRE DE LA PIEZA B

2. Arrancar el software Calypso y abrir una nueva sesión.

3. El sistema de palpadores que debe emplearse para medir esta pieza se compone de cinco palpadores. Sin embargo, para poder tener accesibilidad a todas las entidades a medir, no se colocan todos ellos al comienzo. En primer lugar, se coloca el palpador vertical (Figura 21) y debe definirse el conjunto de palpadores en el menú *sistema de palpadores*. Para ello:

3.1. Medir la esfera de referencia con el palpador de referencia.

3.2. Sustituir el palpador de referencia por el palpador para medir la pieza. Medir otra vez la esfera de referencia con el nuevo palpador y designarlo como *Palp_G*.



FIGURA 21. PALPADOR VERTICAL PARA MEDICIÓN DE PIEZA B

4. Dentro del menú *sistema de palpadores*, cada vez que se incluya otro palpador al conjunto debe designarse con un nombre y debe indicarse con qué número de palpador se corresponde. En la tabla 6 se muestran el nombre y el número de cada uno de los palpadores empleados.

Nombre del palpador	Número
Z	1
2	2
3	3
4	4
5	5

TABLA 6. NOMBRE Y NÚMERO DE LOS PALPADORES PARA LA PIEZA B

5. Definir el sistema de referencia. Para ello, hay que entrar en el menú *Sistema básico de arranque* donde se indican ordenadamente las entidades que definen el sistema. Para esta pieza se ha optado por determinar el sistema de referencia mediante tres planos ortogonales entre sí. De este modo, en la ventana del programa de medición, por cada plano medido hay que indicar, para los dos primeros, la dirección que define la normal al plano, y para el tercero el origen del sistema de referencia. En la figura 22 se indica qué planos deben medirse en la pieza. Por otro lado, en la figura 23 puede observarse la pantalla de definición del sistema de referencia del software empleado.

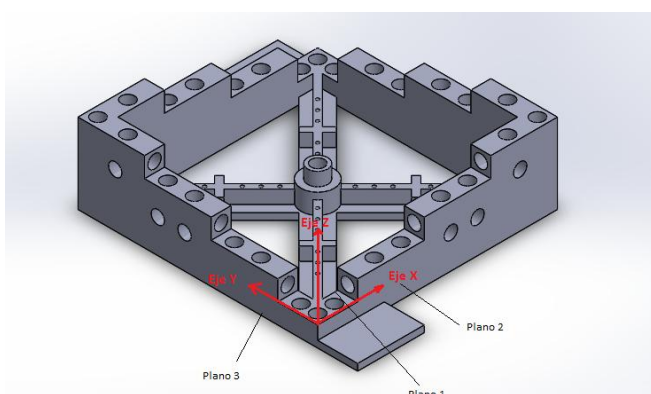


FIGURA 22. SISTEMA DE REFERENCIA PARA LA PIEZA B

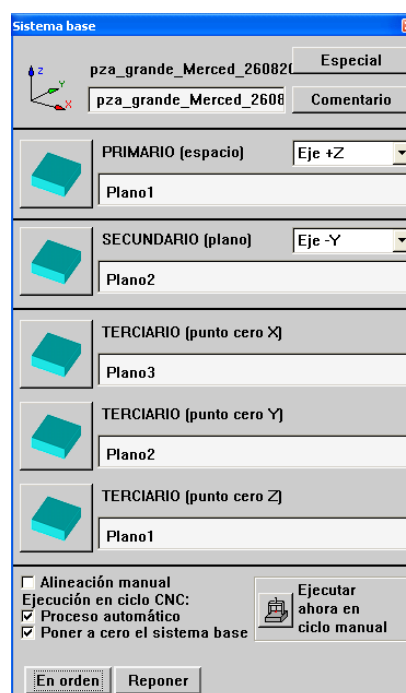


FIGURA 23. SISTEMA BÁSICO DE ARRANQUE PARA PIEZA B

6. Aunque esta pieza sólo se ha medido una vez, se define también el paralelepípedo de seguridad ya que hay entidades que se han medido automáticamente. En esos casos, el software no permite llevar a cabo una medición automática sin antes definir dicho paralelepípedo.

7. En primer lugar se miden todos los cilindros ubicados en los planos horizontales, así como los conos situados en las bases de dichos cilindros, en total, 28 cilindros y 28 conos. Se recomienda comenzar la medición por el cilindro más cercano al origen de coordenadas y continuar con el resto en sentido horario tal y como muestra la figura 24. Para la medición de los conos emplear la opción de palpado autocentrante.

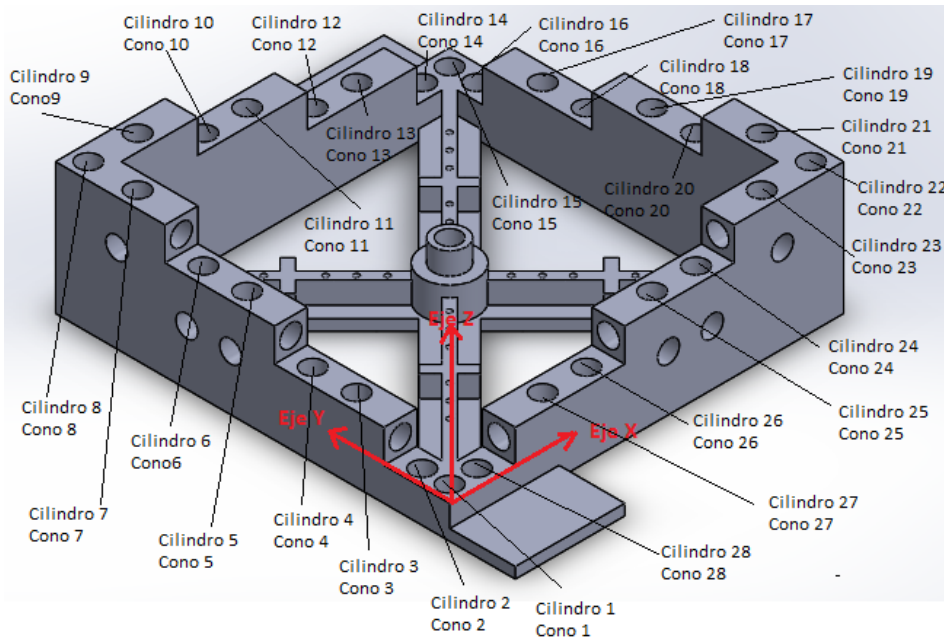


FIGURA 234. CILINDROS Y CONOS DEL 1 AL 28 EN PIEZA B

8. Medir los 24 conos situados en los nervios centrales con la opción de palpado autocentrante. En la figura 25 se indica el orden de medición y la numeración empleada.

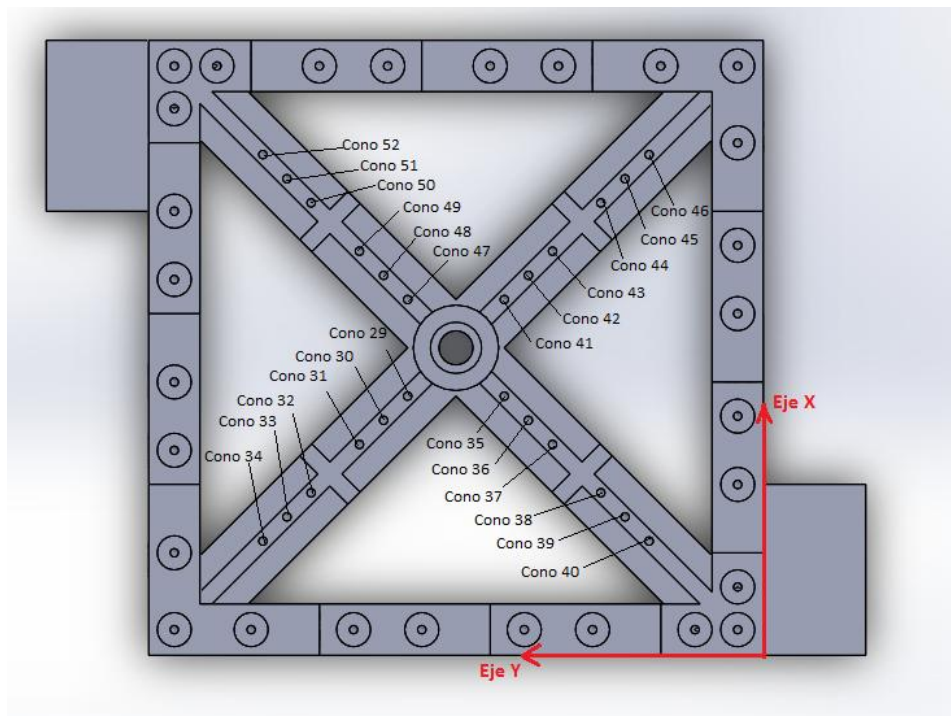


FIGURA 245. CONOS DEL 29 AL 52 EN PIEZA B

9. Medir la estructura cilíndrica central. Para ello, medir los cilindros 29, 30 y 31 en el orden indicado en la figura 26

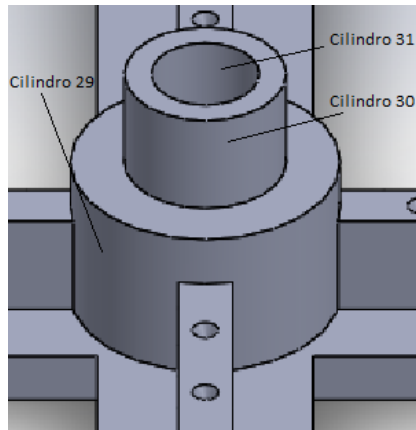


FIGURA 26. CILINDROS DEL 29 AL 31 EN PIEZA B

10. Medir los planos 4, 5 y 6 mostrados en la figura 27.

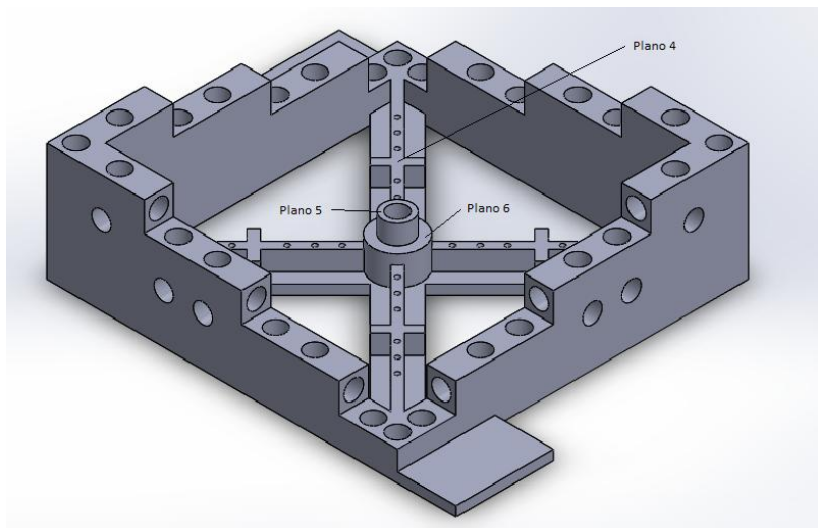


FIGURA 257. PLANOS 4, 5 Y 6 EN PIEZA A

11. Cambiar el palpador vertical por los palpadores número 2 y 3, que son los mostrados en la figura 28.



FIGURA 268. PALPADORES NÚMERO 2 Y 3 PARA MEDICIÓN DE PIEZA B

12. Medir todos los cilindros ubicados en el plano 2, así como los conos situados en las bases de dichos cilindros, es decir, los cilindros del 32 al 34 y los conos del 53 al 55. (Ver figura 29)

13. Medir los cilindros ubicados en planos paralelos al 2 y perpendiculares al 3, así como los conos situados en las bases de dichos cilindros, es decir, los cilindros del 35 al 37 y los conos del 56 al 58 (Ver figura 29)

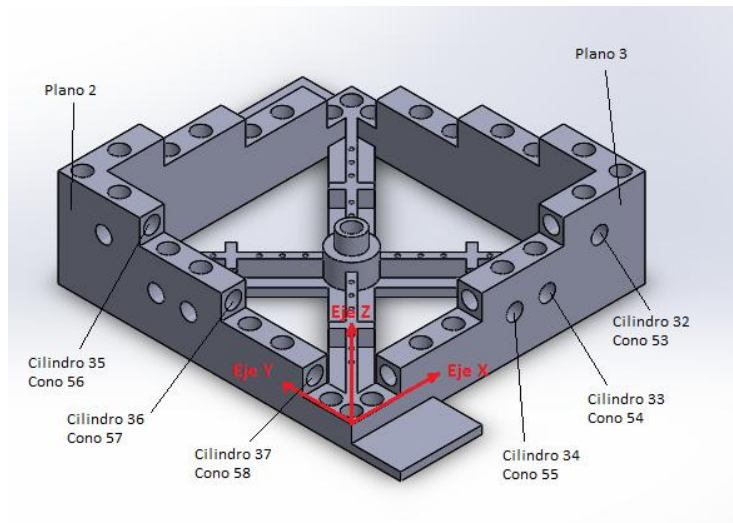


FIGURA 29. CILINDROS DEL 32 AL 37 Y CONOS DEL 53 AL 58 EN PIEZA B

14. Medir todos los cilindros ubicados en el plano 3, así como los conos situados en las bases de dichos cilindros, es decir, los cilindros del 38 al 40 y los conos del 59 al 61. (Ver figura 30)

15. Medir los cilindros ubicados en planos paralelos al 3 y perpendiculares al 2, así como los conos situados en las bases de dichos cilindros, es decir, los cilindros del 41 al 43 y los conos del 62 al 64 (Ver figura 30)

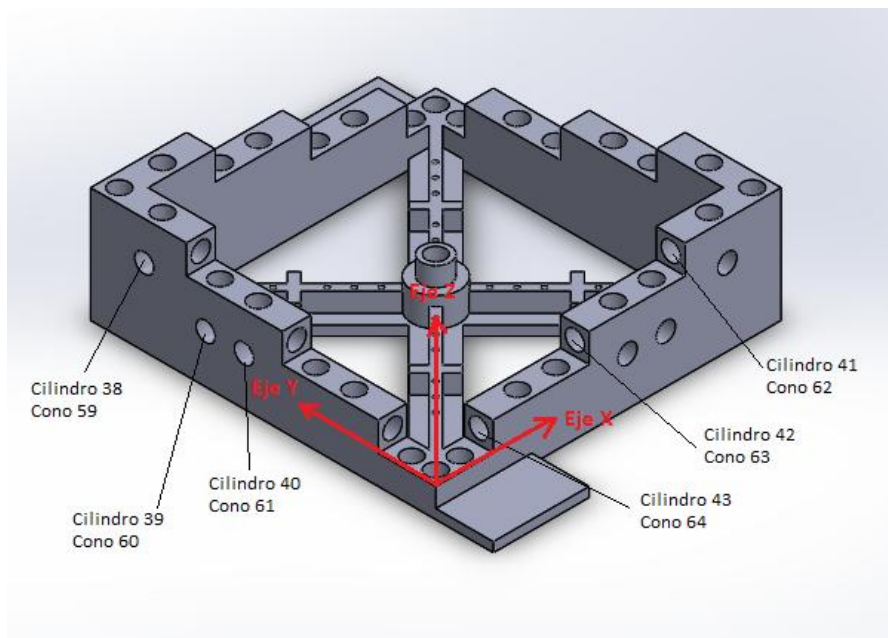


FIGURA 30. CILINDROS DEL 38 AL 43 Y CONOS DEL 59 AL 64 EN PIEZA B

16. Cambiar la posición de amarre de la pieza por la mostrada en la figura 31. A continuación, sustituir los palpadores 2 y 3 por el palpador vertical Z y volver a medir las entidades que conforman el sistema de referencia. De este modo, aunque se haya desplazado la posición de la pieza, repetir la medición de los planos 1, 2 y 3 permite continuar midiendo.

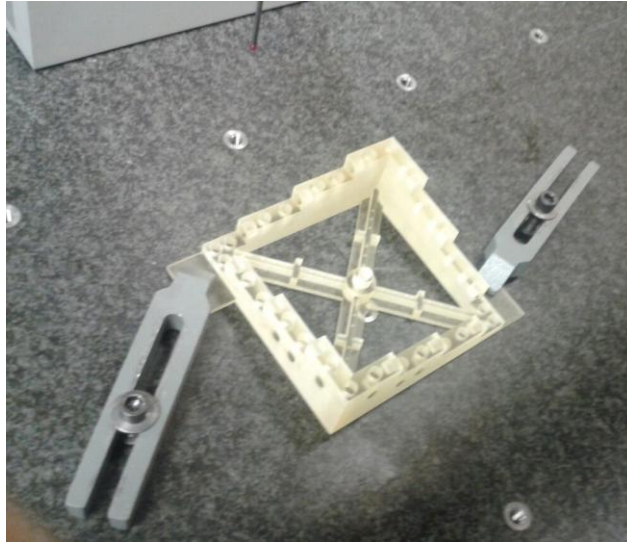


FIGURA 31. SEGUNDA POSICIÓN DE AMARRE DE LA PIEZA B

17. Medir todos los cilindros ubicados en el plano paralelo al plano 2, así como los conos situados en las bases de dichos cilindros, es decir, los cilindros del 44 al 46 y los conos del 65 al 67. (Ver figura 32)

18. Medir los cilindros ubicados en planos paralelos al 2 y perpendiculares al 3, así como los conos situados en las bases de dichos cilindros, es decir, los cilindros del 47 al 49 y los conos del 68 al 70 (Ver figura 32)

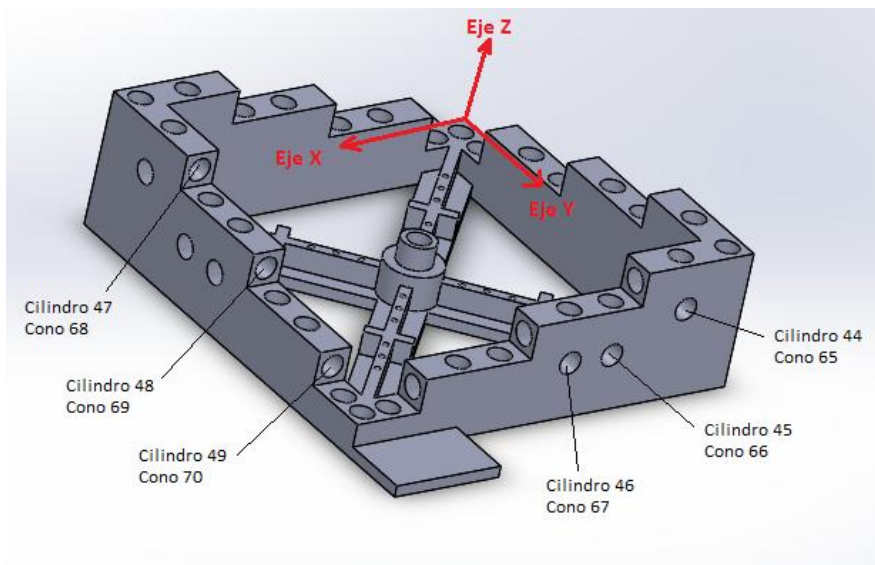


FIGURA 272. CILINDROS DEL 44 AL 49 Y CONOS DEL 65 AL 70 EN PIEZA B

19. Medir todos los cilindros ubicados en el plano paralelo al 2, así como los conos situados en las bases de dichos cilindros, es decir, los cilindros del 50 al 52 y los conos del 71 al 73. (Ver figura 33)

20. Medir los cilindros ubicados en planos paralelos al 2 y perpendiculares al 3, así como los conos situados en las bases de dichos cilindros, es decir, los cilindros del 53 al 55 y los conos del 74 al 76 (Ver figura 33)

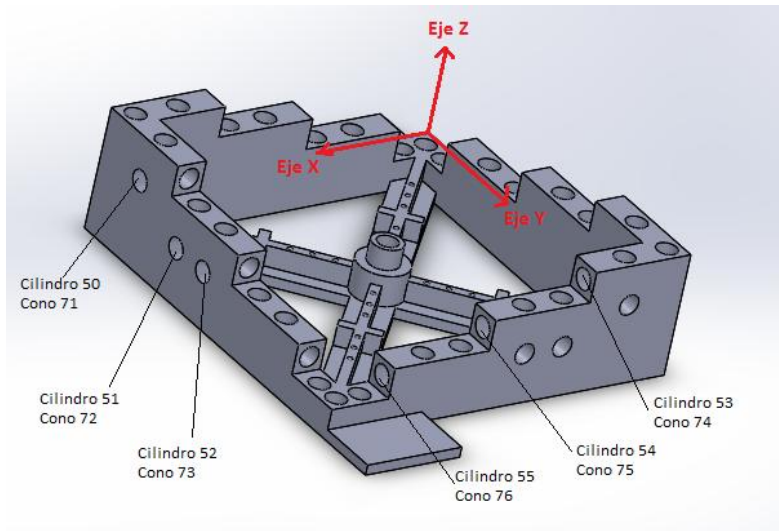


FIGURA 33. CILINDROS DEL 50 AL 55 Y CONOS DEL 71 AL 76 EN PIEZA B

21. Desde el menú *Forma y posición*, con la opción *Distancia 2d* evaluar las distancias entre los planos 4-5, 4-6 y 5-6.
22. Desde el menú *Forma y posición*, con la opción *Perpendicularidad* evaluar la perpendicularidad entre los planos 1-2, 1-3 y 2-3.
23. Desde el menú *Forma y posición*, con la opción *Paralelismo* evaluar el paralelismo entre los planos 1-5 y 1-6.
24. Desde el menú *Forma y posición*, con la opción *Planitud* evaluar la planitud de los planos 1, 2, 3, 4, 5 y 6.
25. Desde el menú *Forma y posición*, con la opción *Coaxialidad* evaluar la coaxialidad de los cilindros 29, 30 y 31.

2.5. RESULTADOS

Con los datos obtenidos en el proceso de medición se han calculado los errores de posicionamiento y perpendicularidad en los tres ejes de la impresora 3D.

El error de posicionamiento es la diferencia entre el valor medido en una posición del eje y el valor teórico de dicha posición. Por cada eje puede obtenerse un error de posicionamiento⁴, de manera que las fórmulas empleadas para su cálculo en cada uno de los ejes son:

$$xPx = X_{medida} - X_{nominal} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$yPy = Y_{medida} - Y_{nominal} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$zPz = Z_{medida} - Z_{nominal} \quad (\text{Ec. 3})$$

El error de perpendicularidad es debido a la no ortogonalidad de dos ejes y se ha determinado midiendo las diferencias de longitud en las mediciones de las diagonales en cualquiera de los tres planos del sistema de coordenadas [15], tal y como muestra la figura 34.

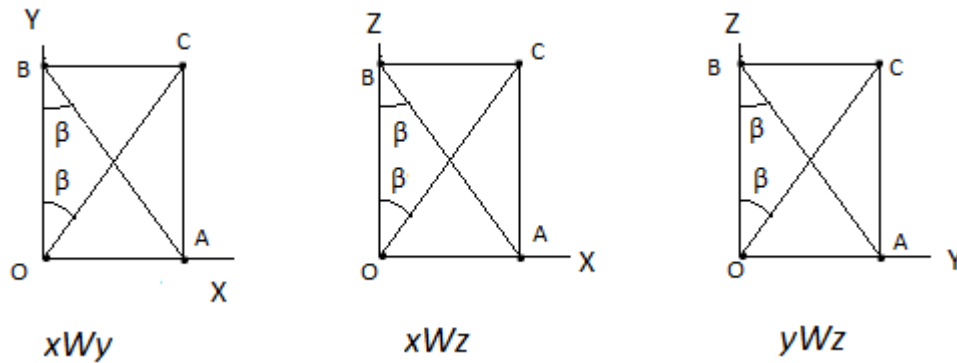


FIGURA 284. ESQUEMAS EMPLEADOS PARA EL CÁLCULO DE ERRORES DE PERPENDICULARIDAD

La fórmula utilizada para el cálculo del error de perpendicularidad es la misma para los tres errores si se sigue la nomenclatura de la figura anterior:

$$xWy = xWz = yWz \approx \frac{OC^2 - AB^2}{2 \operatorname{sen}\beta \operatorname{cos}\beta} \quad (\text{Ec. 4})$$

Como ya se ha comentado en el apartado 2.3.3 los ejes de la impresora 3D no coinciden con los ejes empleados en las piezas durante su medición por lo que se ha realizado un cambio de coordenadas para transformar los datos medidos en $(X, Y, Z)_{Pieza}$ en $(X, Y, Z)_{Imp}$.

Para definir esta matriz hay que resolver el siguiente sistema matricial:

$$\begin{pmatrix} A11 & A12 & A13 \\ A21 & A22 & A23 \\ A31 & A32 & A33 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{Pieza} \\ Y_{Pieza} \\ Z_{Pieza} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{Imp} \\ Y_{Imp} \\ Z_{Imp} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 5})$$

⁴ La nomenclatura empleada para designar los errores de posicionamiento y perpendicularidad es la misma que se utiliza en la verificación de máquina herramienta. Errores de posición: xPx , yPy , zPz ; Errores de perpendicularidad: xWy , xWz , yWz .

2.5.1. RESULTADOS PIEZA A

Se han reunido todos los datos medidos en un archivo Excel donde se han calculado los errores. Para ello, se han separado los datos dependiendo de qué tipo de error se ha calculado con ellos. De este modo, para el error de posicionamiento se han empleado:

- Posición del eje de los conos, registrados como puntos del 1 al 12 en las hojas de toma de datos.
- Centro de los cilindros. Cuando se mide un cilindro, los datos proporcionados por el software de la MMC incluyen la posición de su centro a partir de las coordenadas (X, Y, Z)_{Pieza}, entre otros datos.

De manera análoga, para el error de perpendicularidad se ha empleado la posición del eje de los conos, con la cual se ha calculado el esquema explicado en el apartado 2.5 (Figura 347). Para realizar dicho esquema se ha supuesto que Beta es realmente el mismo en ambos ángulos ya que, aunque no es cierto, las variaciones de estos ángulos son pequeñas en comparación con el valor de Beta teórico que garantiza la perpendicularidad.

Las PIEZAS A se han impreso con dos orientaciones⁵, por lo que para poder emplear los datos medidos es necesario emplear dos matrices de cambio de coordenadas distintas, una para cada una de las orientaciones de la pieza. Las matrices de cambio de coordenadas se han obtenido resolviendo el sistema matricial (Ec. 5) para cada una de las orientaciones, tal y como se muestra a continuación:

Orientación 1:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{Pieza} \\ Y_{Pieza} \\ Z_{Pieza} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{imp} \\ Y_{imp} \\ Z_{imp} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 6})$$

Orientación 2:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{Pieza} \\ Y_{Pieza} \\ Z_{Pieza} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{imp} \\ Y_{imp} \\ Z_{imp} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 7})$$

Conocidas las matrices de cambio de coordenadas, el procedimiento empleado para la obtención de los errores de posicionamiento ha sido el siguiente:

- Para cada una de las orientaciones posibles de la pieza, se han tomado las tres coordenadas de medición de los distintos puntos y se han transformado mediante la matriz de cambio de coordenadas. Se obtienen así las coordenadas en el sistema de referencia de la impresora.
- Para cada punto del 1 al 16 se han calculado los errores de posición en cada uno de los ejes: xPx, yPy, zPz. Sin embargo, los puntos están medidos a través de conos, por lo que una de las coordenadas obtenidas (la longitud del eje del cono) no se ha utilizado para la obtención de errores. En la figura 35 puede verse cómo se efectúa la medida de los conos y por qué la profundidad no se ha empleado para los cálculos. Los conos se

⁵ En la tabla 3 del apartado 2.3.3 se indica con qué orientación han sido impresas cada una de las piezas.

han medido con la opción de palpado autocentrante, lo cual implica que la MMC mide uno de los círculos de la superficie del cono. Teóricamente, dicho círculo debería encontrarse a la misma profundidad, pero en la práctica, esto no ocurre así. Dicha desviación en la cota de la profundidad es un error de medición, motivo por el cual no se emplea este dato para el cálculo de errores.

- También se ha empleado la posición del centro de los cilindros del 1 al 4. En este caso, la cota correspondiente a la altura del cilindro tampoco se ha empleado. La máquina de medición calcula la posición del centro en función de los puntos palpados. Para el caso de un cilindro, es necesario medir, como mínimo, dos circunferencias del mismo. Teniendo en cuenta este método de medición, la MMC calcula la cota de altura del cilindro a partir de la distancia entre las circunferencias medidas. Por ello, la cota de altura no es relevante ya que variará en función de qué circunferencias se midan para determinar el cilindro.

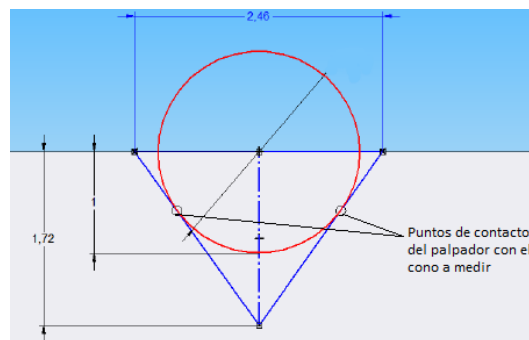


FIGURA 295. MEDICIÓN DE CONOS CON PALPADO AUTOCENTRANTE

Los resultados obtenidos de cálculo de errores de posicionamiento pueden consultarse en el Anexo V donde se incluye una tabla por cada PIEZA A indicando las coordenadas nominales de cada punto medido, los datos medidos, la conversión de un sistema de coordenadas a otro y los errores de posición obtenidos según los criterios y fórmulas antes mencionados.

En los resultados se aprecia una gran diferencia entre los errores obtenidos en las dos primeras piezas y en las demás. Para las primeras los errores son muy superiores a los obtenidos en las piezas de la 3 a la 6, tal y como muestra la tabla 7.

Nº de pieza	Mínimo error obtenido (mm)	Máximo error obtenido (mm)
A1, A2	0,0017	0,1243
A3, A4, A5, A6	0,0002	0,0099

TABLA 7. ERRORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS OBTENIDOS EN LAS PIEZAS A

Esta diferencia se debe al proceso de medida. Para las dos primeras piezas no se disponía del utillaje adecuado por lo que las piezas no estaban firmemente sujetas y al palparlas la fuerza que ejerce la MMC podría haber provocado pequeños desplazamientos que se reflejan en los resultados de medición obtenidos.

Para interpretar los resultados obtenidos hay que tener en cuenta también la incertidumbre derivada del proceso de medida. Para ello, se ha empleado la siguiente fórmula:

$$I (\mu\text{m}) = 2,3 + \frac{L}{300} \quad \text{siendo } L \text{ la distancia medida} \quad (\text{Ec. 8})$$

Aplicando la ecuación 8, y dado que las cotas medidas son de pequeñas dimensiones, la incertidumbre de medida no supera en ningún caso los 2,5 micrómetros.

Se ha optado por la realización de los siguientes gráficos de control para poder determinar la estabilidad temporal de la impresora. Para ello, se ha construido un gráfico de tipo X-R para cada uno de los errores de posicionamiento, xPx, yPy, zPz.

Este tipo de gráfico requiere establecer el número de muestras, entre otros parámetros. Puesto que la finalidad del gráfico es analizar los datos temporalmente, se han agrupado en muestras las piezas fabricadas en función de su fecha de impresión. En la tabla 8 se indica qué piezas componen cada una de las muestras, llamadas k en este tipo de gráficos.

k	Fecha muestra	Piezas
1	21/07/2014	A3
2	29/07/2014	A5
3	30/07/2014	A6

TABLA 8. MUESTRAS PARA LOS GRÁFICOS DE ESTABILIDAD TEMPORAL EN ERRORES DE POSICIÓN

Otro de los parámetros que deben determinarse para construir estos gráficos, es el número de datos que contiene cada muestra, denominado n. Los gráficos de control se emplean habitualmente en la industria para analizar si las piezas fabricadas están dentro de unos márgenes. Sin embargo, para este proyecto se quiere analizar si son los errores calculados los que están dentro de rango. Analizando los errores obtenidos, se aprecia que n varía de unas muestras a otras si se tienen en cuenta todos los puntos considerados en los cálculos, es decir, errores de posición obtenidos a partir de conos y cilindros medidos. Para solucionarlo, y tener el mismo número de datos por muestra en todas ellas, solo se han considerado los errores calculados a partir de los conos medidos y las piezas fabricadas con la orientación 1.

En el Anexo VII se incluyen las fórmulas utilizadas para obtener los gráficos de control de tipo X-R que se muestran a continuación:

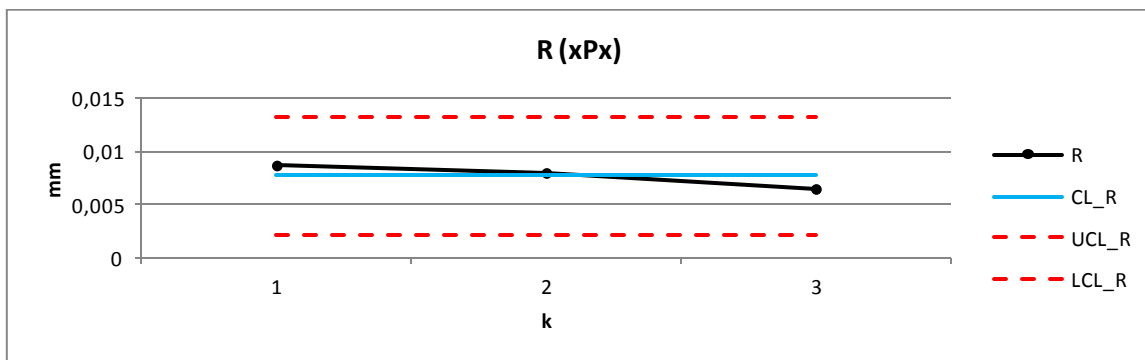


GRÁFICO 1. GRÁFICO R PARA XPX

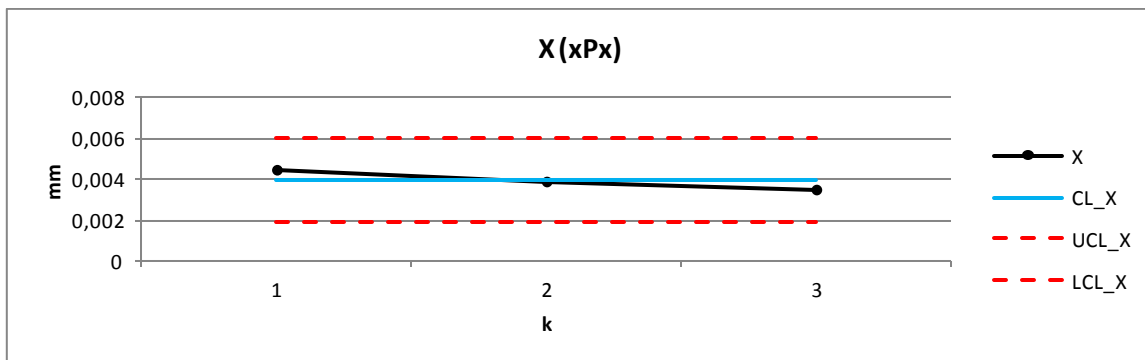


GRÁFICO 2. GRÁFICO X PARA XPX

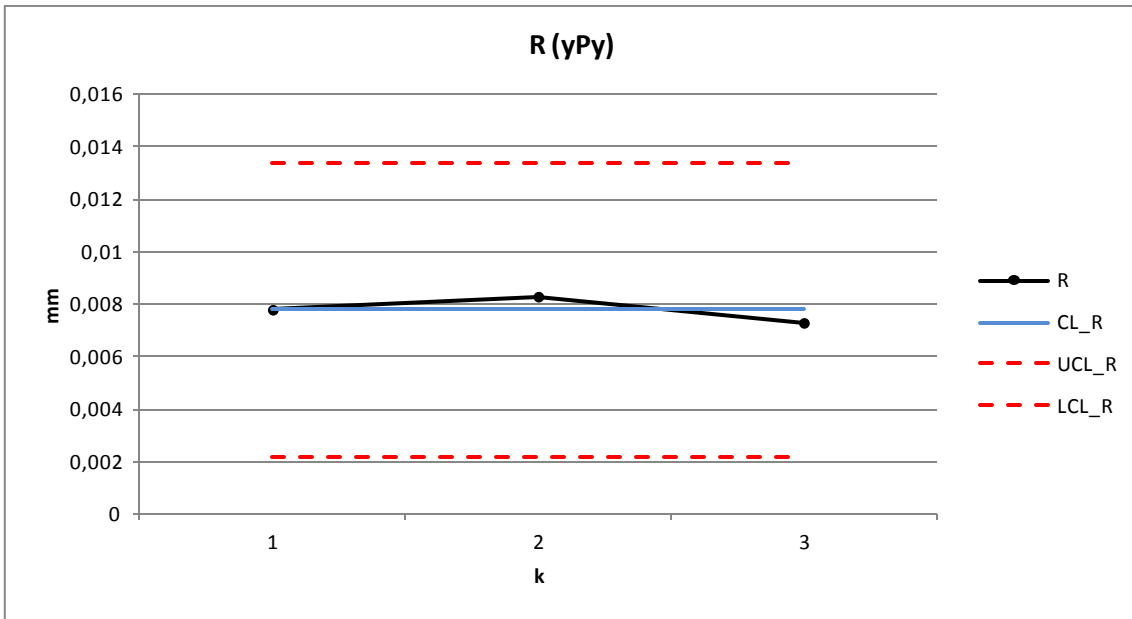


GRÁFICO 3. GRÁFICO R PARA YPY

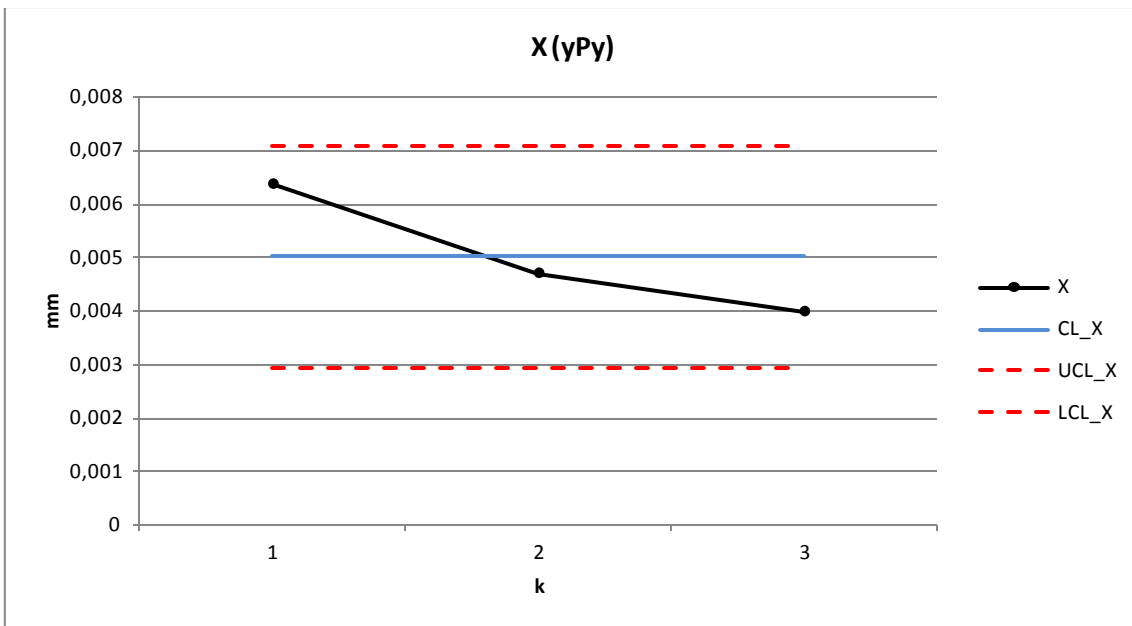


GRÁFICO 4. GRÁFICO X PARA YPY

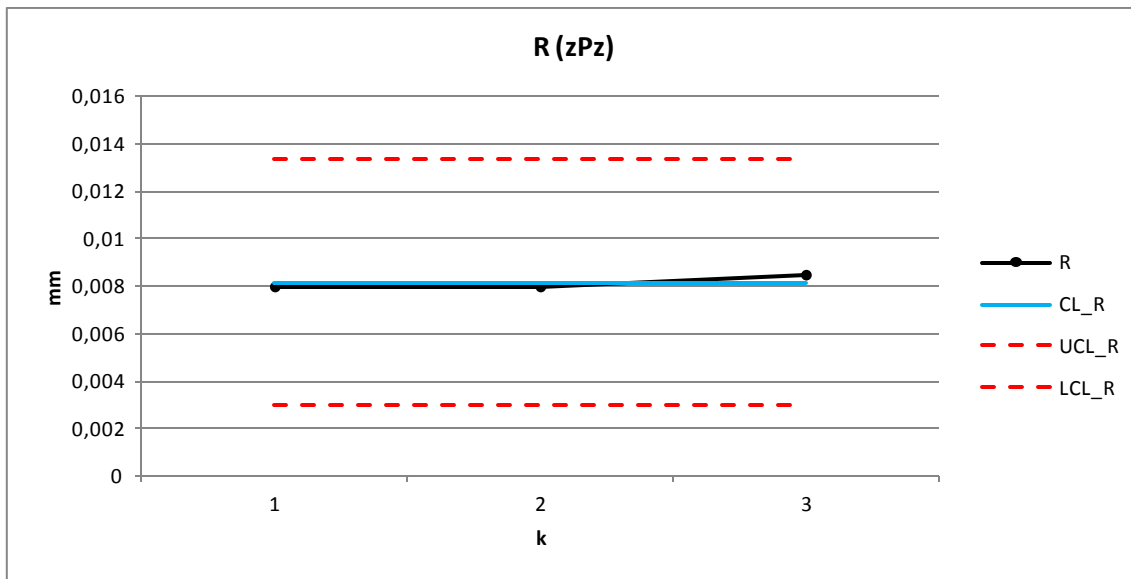


GRÁFICO 5. GRÁFICO R PARA ZPZ

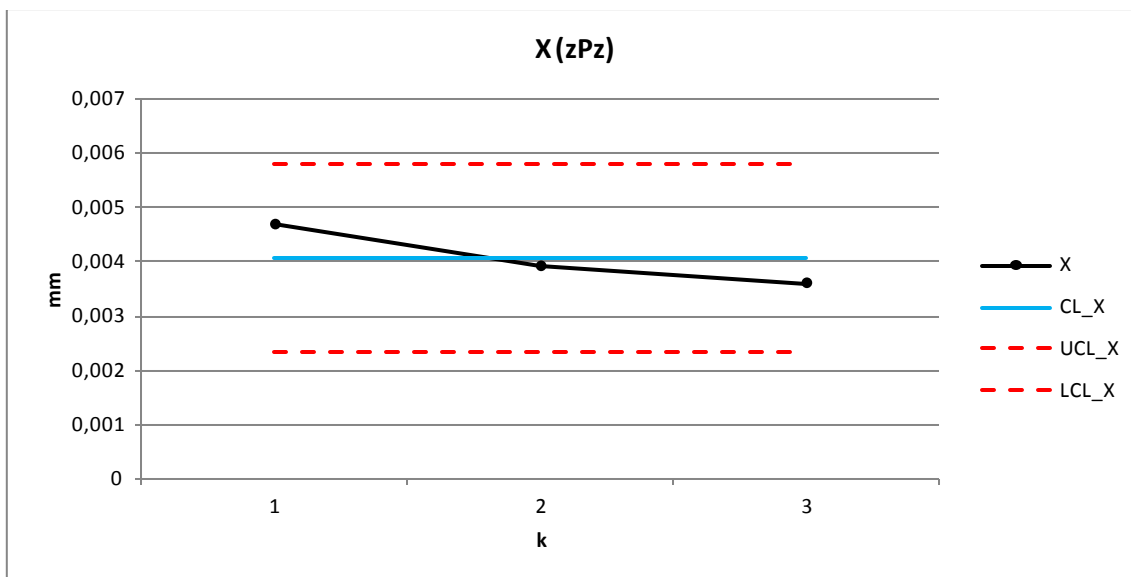


GRÁFICO 6. GRÁFICO X PARA ZPZ

Observando los gráficos de control anteriores puede apreciarse que los tres errores de posición calculados para la impresora están dentro de los límites superior e inferior definidos según las fórmulas del Anexo VII.

Para la obtención de los errores de perpendicularidad se ha empleado el siguiente procedimiento:

- El cambio de coordenadas realizado para el cálculo de los errores de perpendicularidad, según cada una de las orientaciones, es el mismo que para los errores de posicionamiento.
- Por cada uno de los tres planos del sistema de coordenadas de la impresora se obtiene un error de perpendicularidad, derivado de los puntos empleados para su cálculo que se muestran en la siguiente tabla:

		Puntos empleados
Orientación 1	Plano XY] _{imp}	-
	Plano XZ] _{imp}	13, 14, 15, 16
	Plano YZ] _{imp}	1, 2, 3, 4
Orientación 2	Plano XY] _{imp}	1, 2, 3, 4
	Plano XZ] _{imp}	13, 14, 15, 16
	Plano YZ] _{imp}	-

TABLA 9. PUNTOS EMPLEADOS PARA EL CÁLCULO DE ERRORES DE PERPENDICULARIDAD

La figura 36 muestra los esquemas planteados para cada uno de los casos mostrados en la tabla 9. A partir de ellos, se ha aplicado la Ec. 4 para obtener los errores de perpendicularidad.

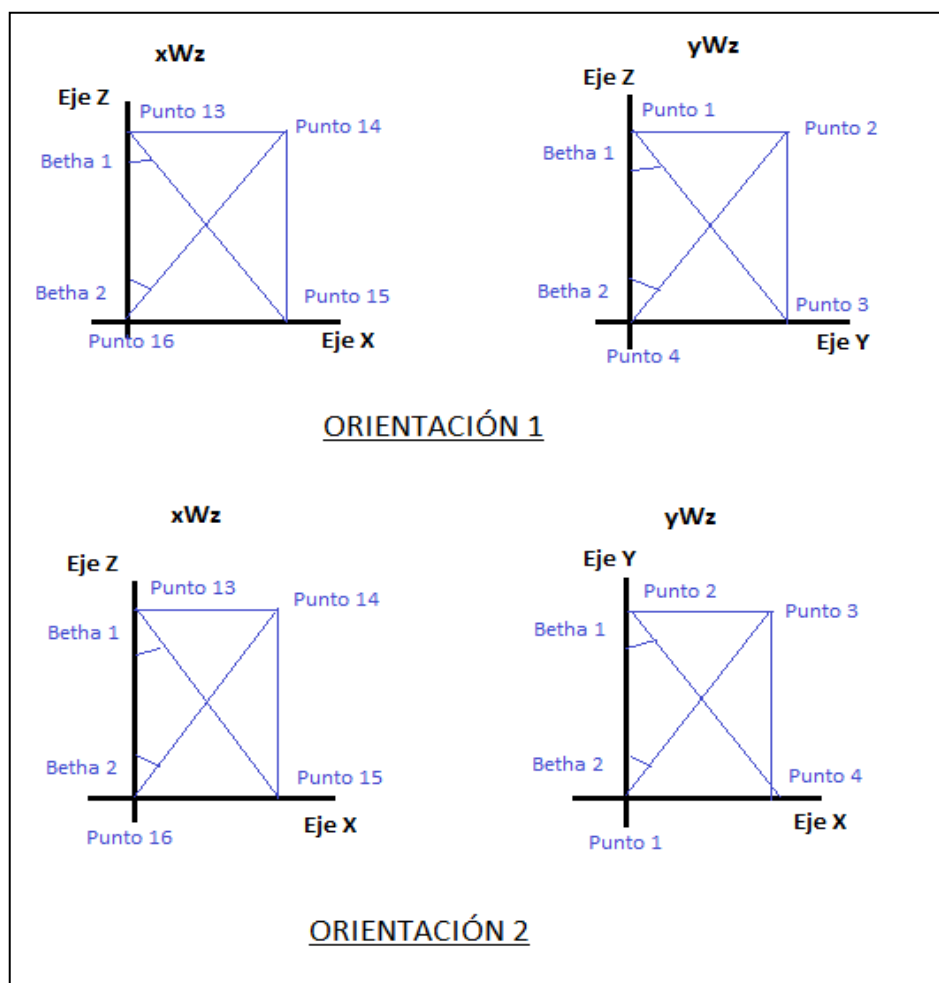


FIGURA 306. ESQUEMAS EMPLEADOS PARA EL CÁLCULO DEL ERROR DE PERPENDICULARIDAD

Como puede apreciarse en la imagen, se calculan dos ángulos betha con la finalidad de verificar que sus valores son aproximadamente iguales ya que en caso contrario, la técnica propuesta para el cálculo del error de perpendicularidad no sería adecuada. Los cálculos completos están incluidos en el Anexo V.

A continuación se incluyen dos tablas resumen con los resultados obtenidos para los errores de perpendicularidad:

	Puntos empleados	xWy (mm)	xWz (mm)	yWz (mm)
PIEZA A1	1, 2, 3, 4	-	-	0,0046
PIEZA A3	1, 2, 3, 4	-	-	0,0002
	13, 14, 15, 16	-	0,0001	-
PIEZA A5	1, 2, 3, 4	-	-	0,0005
	13, 14, 15, 16	-	0,0003	-
PIEZA A6	1, 2, 3, 4	-	-	0,0000
	13, 14, 15, 16	-	0,0004	-

TABLA 10. ERRORES DE PERPENDICULARIDAD PARA ORIENTACIÓN 1 DE PIEZAS A

	Puntos empleados	xWy (mm)	xWz (mm)	yWz (mm)
PIEZA A1	1, 2, 3, 4	0,0043	-	-
PIEZA A4	1, 2, 3, 4	0,0003	-	-
	13, 14, 15, 16	-	0,0009	-

TABLA 11. ERRORES DE PERPENDICULARIDAD PARA ORIENTACIÓN 2 DE PIEZAS A

Observando los resultados se aprecia una diferencia de un orden de magnitud entre los errores obtenidos a partir de las piezas 1 y 2 con respecto al resto. Este comportamiento no es debido a ningún error en la impresora sino al proceso de medición de dichas piezas, como ya se puso de relieve al calcular los errores de posicionamiento.

Obtenidos los errores de posicionamiento y perpendicularidad, los datos medidos y el software de la MMC permiten la obtención de más resultados, entre ellos, diversas tolerancias. Por un lado, durante la medición de planos y cilindros el programa informa directamente de las tolerancias de forma de cada uno de ellos. Adicionalmente, pueden elegirse otras para analizar.

En este proyecto se han consultado las tolerancias de planitud, paralelismo y perpendicularidad entre planos y coaxialidad de cilindros ya que se considera que están relacionadas con los errores calculados. El paralelismo y la perpendicularidad serán mejores cuanto menores sean los errores de posicionamiento y perpendicularidad entre otros. Además, la coaxialidad se traduce en un error de posición de los ejes de los cilindros considerados.

Por un lado, se ha analizado la evolución de la tolerancia de planitud tal y como muestra el gráfico 7. En él vuelven a reflejarse los problemas encontrados para la medición de las dos primeras piezas, ya que en las restantes las tolerancias presentan valores más homogéneos.

Las tolerancias de paralelismo y perpendicularidad no se tomaron en la medición de las dos primeras piezas, por lo que los gráficos 8 y 9 respectivamente sólo incluyen datos relativos a las restantes piezas. Esto permite observar el mismo comportamiento homogéneo observado para la planitud.

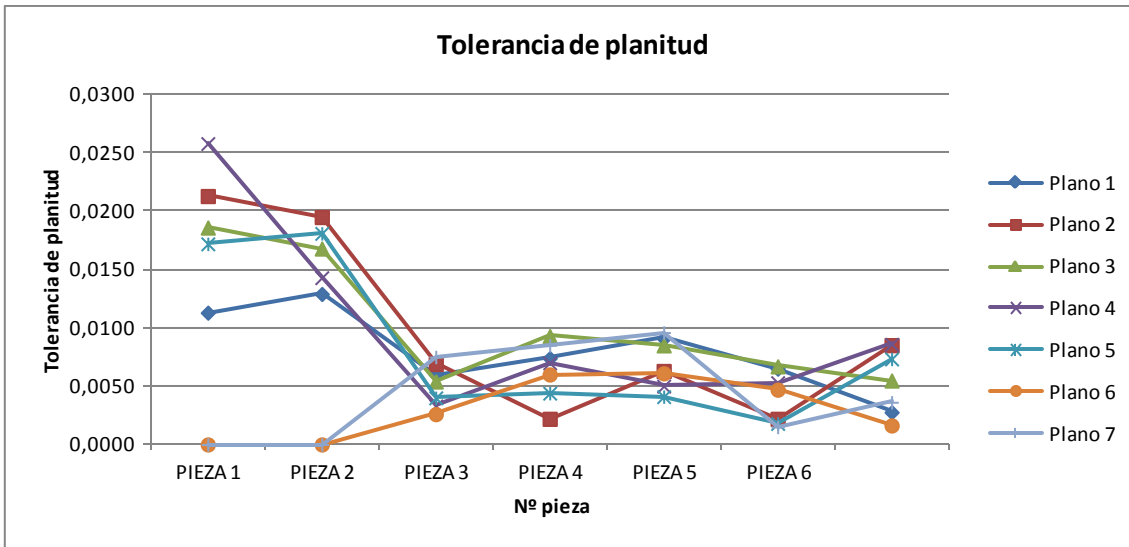


GRÁFICO 7. TOLERANCIAS DE PLANITUD EN PIEZAS A

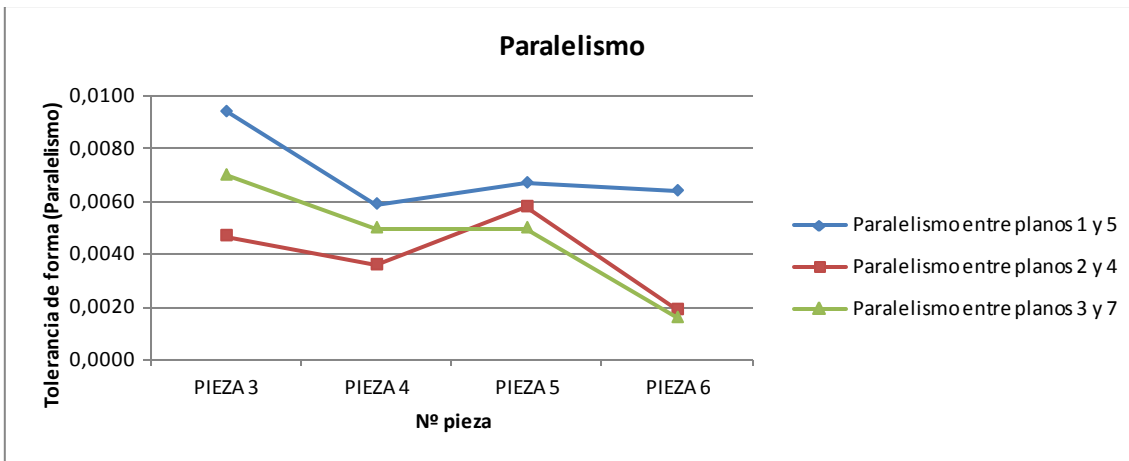


GRÁFICO 8. PARALELISMO ENTRE PLANOS EN PIEZAS A

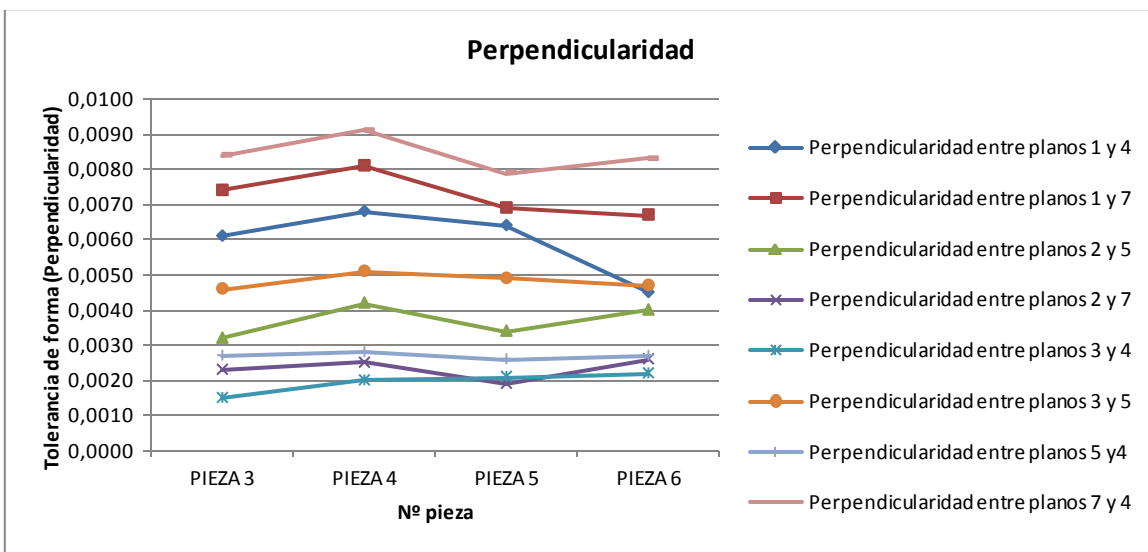


GRÁFICO 9. PERPENDICULARIDAD ENTRE PLANOS EN PIEZAS A

Finalmente, el gráfico siguiente muestra la tolerancia de coaxialidad entre los dos pares de cilindros presentes en la PIEZA A.

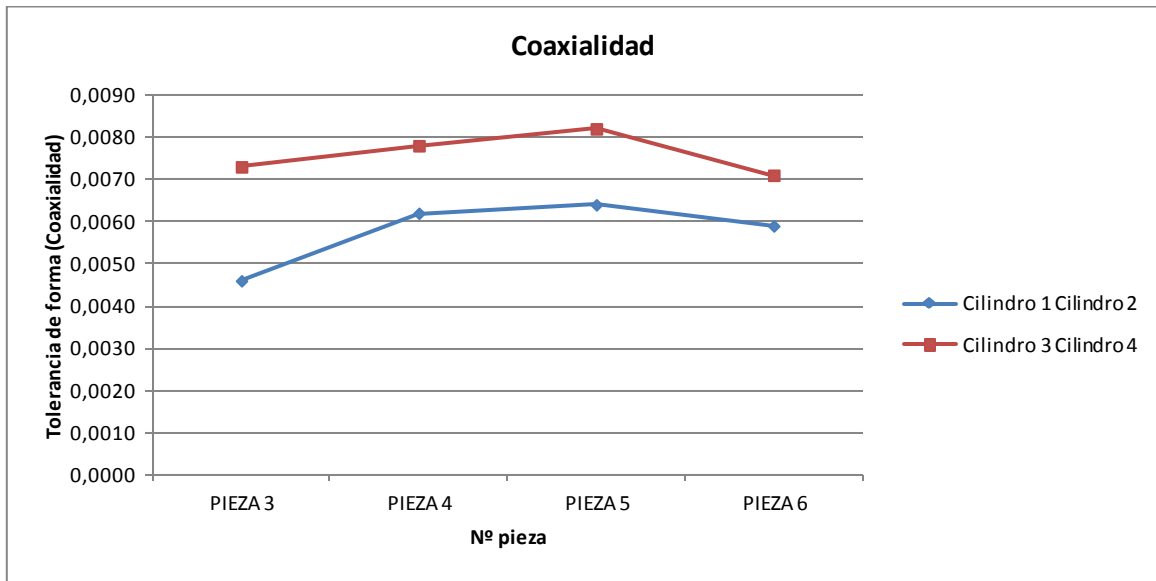


GRÁFICO 10. COAXIALIDAD ENTRE CILINDROS EN PIEZAS A

2.5.2. RESULTADOS PIEZA B

El sistema de referencia definido durante el proceso de medición de la PIEZA B coincide con el sistema de coordenadas de la impresora 3D, por lo que no es necesario realizar ningún cambio de coordenadas.

En primer lugar, se expone el procedimiento empleado para la obtención de los errores de posicionamiento:

- Para cada punto del 1 al 76 se han calculado los errores de posición en cada uno de los ejes: xPx, yPy, zPz. Sin embargo, los puntos están medidos a través de conos, de manera que la cota de profundidad del cono no se ha tenido en cuenta por los mismos motivos explicados en la PIEZA A.
- También se ha empleado la posición del centro de los cilindros del 1 al 55. En este caso, la cota correspondiente a la altura del cilindro tampoco se ha empleado por las razones ya expuestas en el apartado relativo a la PIEZA A.
- Por último, comparando las distancias entre planos paralelos (4-5, 4-6 y 5-6) obtenidos con el software de medición con las distancias nominales entre dichos planos, pueden obtenerse igualmente errores de posición.

Los resultados obtenidos pueden consultarse en detalle en el Anexo VI donde se incluye la posición nominal de los puntos, el valor medido y el error de posicionamiento obtenido.

A modo de resumen, se incluyen a continuación, por un lado, la tabla 12 que indica los errores de posicionamiento mínimos y máximos obtenidos en cada eje, y por otro, el gráfico 11 que muestra todos los errores calculados.

	xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)
Mínimo error	0,0023	0,0008	0,0028
Máximo error	0,0197	0,0199	0,0194

TABLA 12. MÍNIMOS Y MÁXIMOS ERRORES DE POSICIONAMIENTO EN PIEZA B

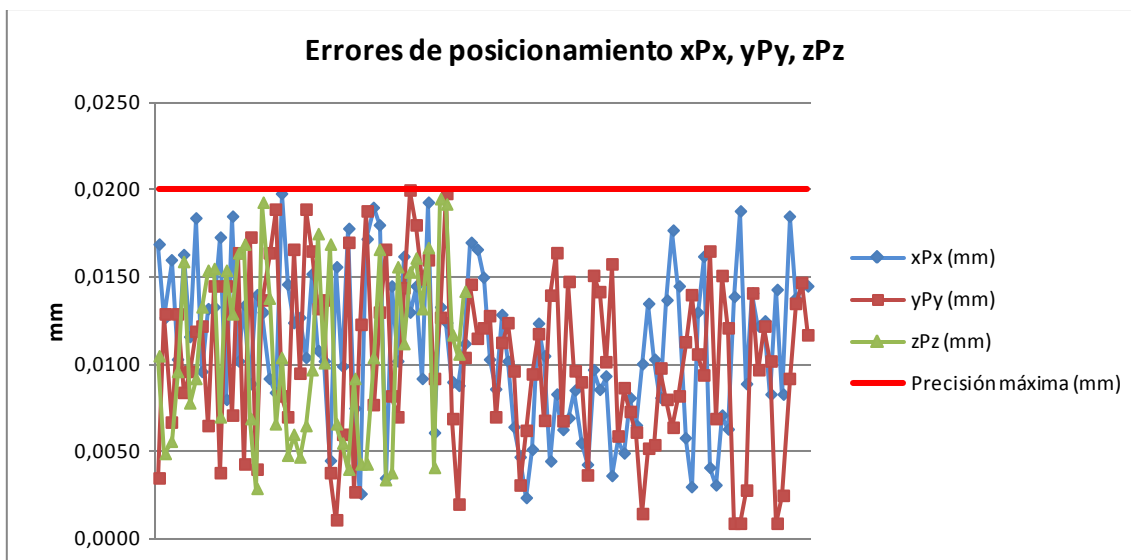


GRÁFICO 11. ERRORES DE POSICIONAMIENTO EN PIEZA B

En el gráfico anterior está indicado el valor de 0,02 mm como precisión máxima, que indica el fabricante de la impresora y que puede consultarse en el Anexo II. Como puede apreciarse en el gráfico, los errores calculados no superan este valor de precisión indicado por el fabricante.

Los resultados mostrados en el gráfico 11 no hacen ninguna distinción entre los errores de posición obtenidos a partir de la medición de cono o cilindros, es por ello, que se han realizado gráficos comparativos. Los dos primeros gráficos (12 y 13) muestran los errores de posición xPx e yPy obtenidos mediante la medición de los conos y cilindros numerados del 1 al 28 en el procedimiento de medición. Ante la aparente dispersión de los resultados, se han trazado las líneas de tendencia de cada una de las series de datos para poder comparar ambas. Con ello, se aprecia que para el eje X, los errores obtenidos con la medición de conos son mayores, mientras que en el caso del error yPy la situación es inversa, es decir, se han obtenido mejores errores a través de la medición de cilindros.

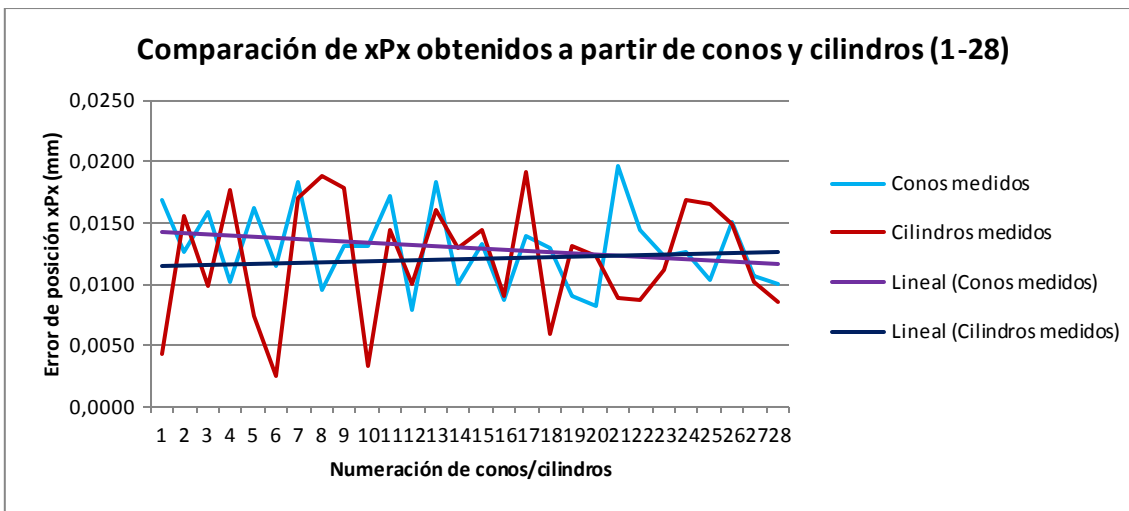


GRÁFICO 12. COMPARACIÓN DE XPX OBTENIDOS A PARTIR DE CONOS Y CILINDROS MEDIDOS (1-28)

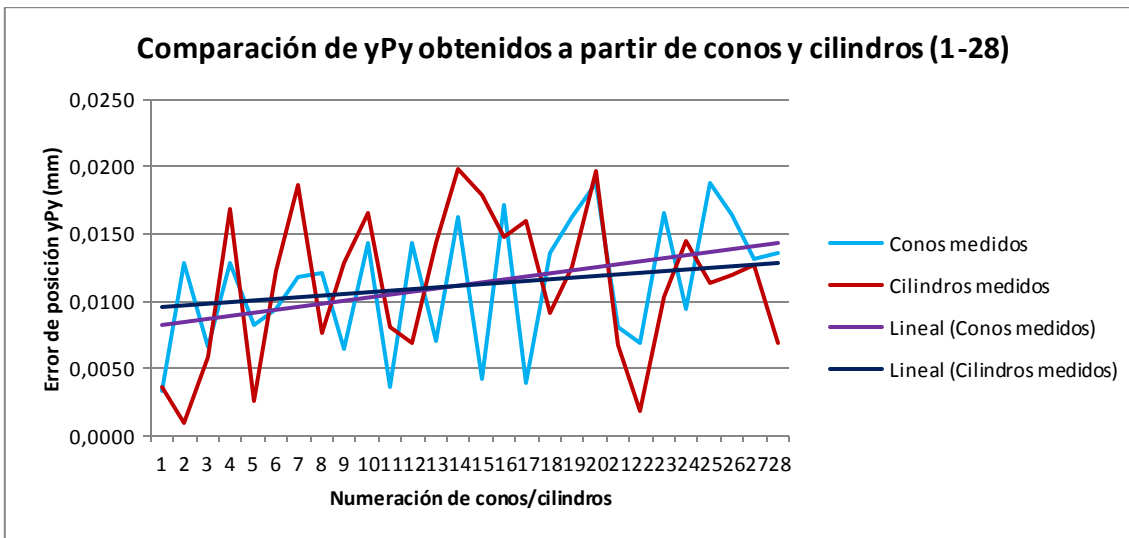


GRÁFICO 13. COMPARACIÓN DE YPY OBTENIDOS A PARTIR DE CONOS Y CILINDROS MEDIDOS (1-28)

La geometría de la pieza permite realizar un análisis similar al anterior con todos los conjuntos cono-cilindro. En los gráficos 14, 15 y 16, se muestran las comparaciones para los errores xPx, yPy y zPz respectivamente, obtenidos en diversos puntos. Los restantes gráficos comparativos pueden consultarse en el Anexo VI.

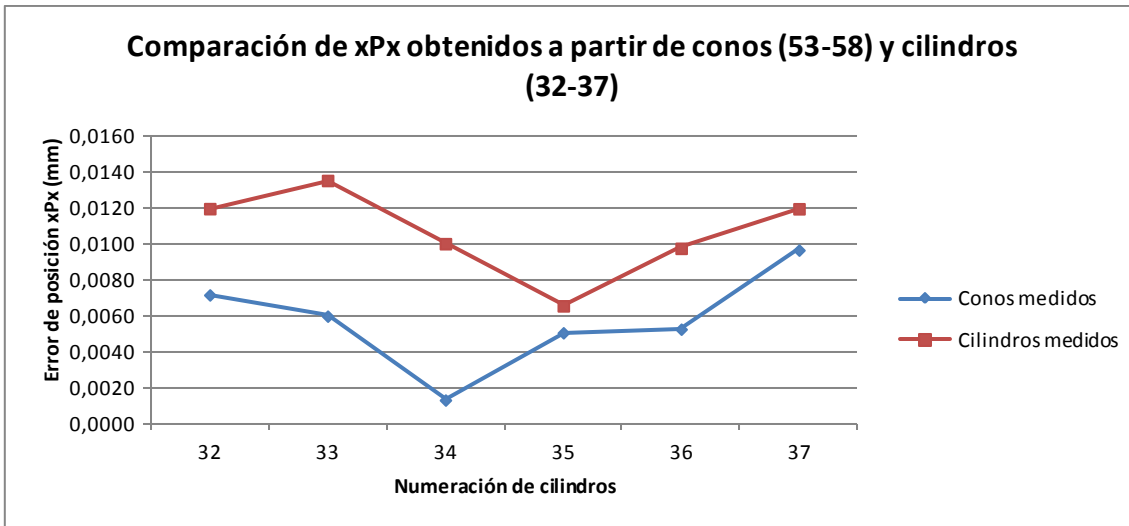


GRÁFICO 14. COMPARACIÓN DE XPX OBTENIDOS A PARTIR DE CONOS (53-58) Y CILINDROS (32-37) MEDIDOS

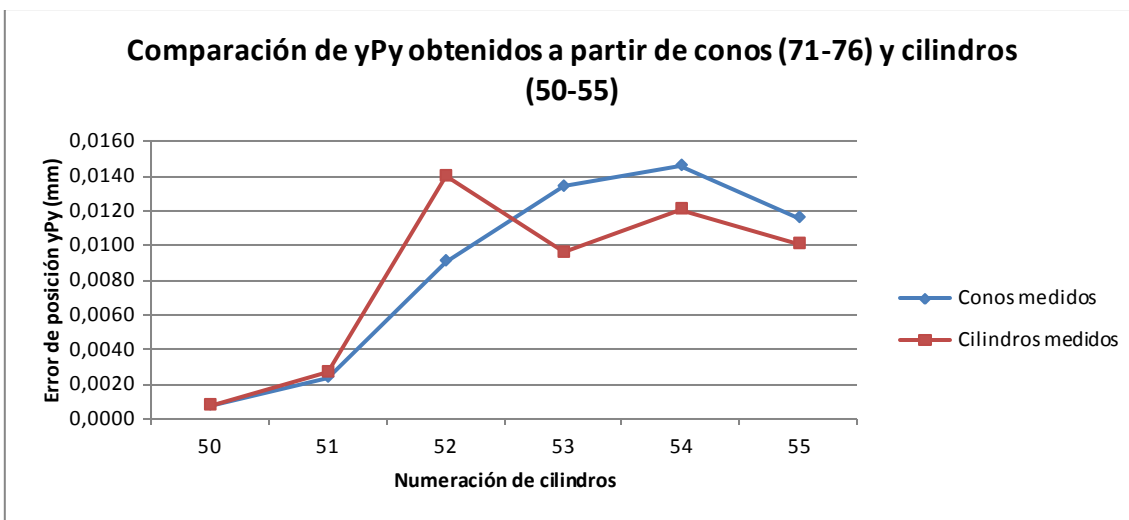


GRÁFICO 15. COMPARACIÓN DE YPY A PARTIR DE CONOS (71-76) Y CILINDROS (50-55) MEDIDOS

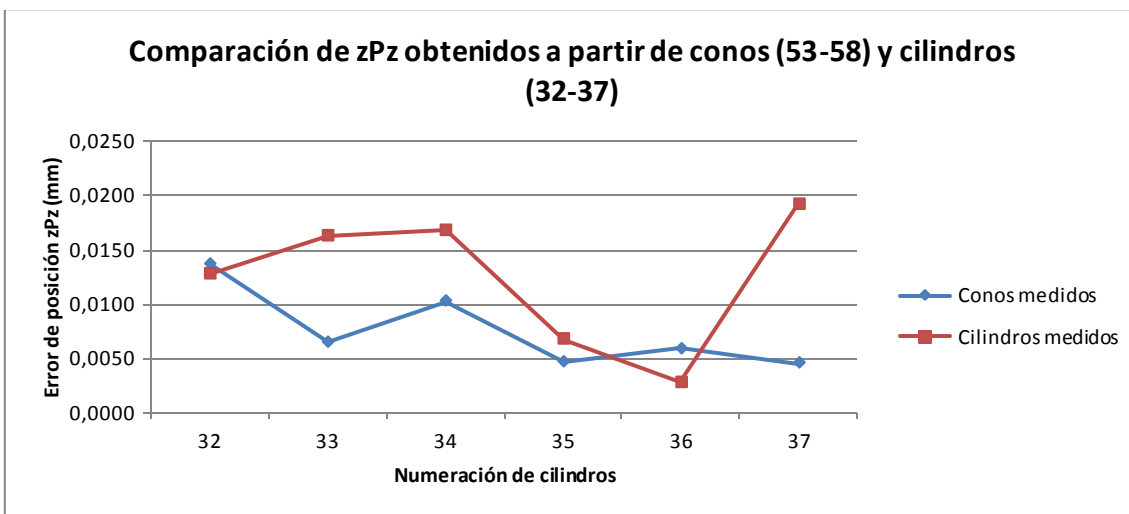


GRÁFICO 16. COMPARACIÓN DE ZPZ A PARTIR DE CONOS (53-58) Y CILINDROS (32-37) MEDIDOS

Teniendo en cuenta los gráficos arriba mostrados y los incluidos en el Anexo VI, no se puede afirmar con qué entidad, conos o cilindros, se obtienen mejores resultados. Dependiendo del eje analizado y la orientación de las entidades medidas, se han empleado distintos palpadores que pueden influir en los resultados de medición ya que cada uno de ellos tiene distintas características, como por ejemplo, la desviación estándar. Además, las características geométricas de la pieza provocan que ciertas entidades tengan peor visibilidad durante el proceso de medición, por lo que, los resultados obtenidos pueden estar condicionados por ello.

La PIEZA B abarca un rango amplio de la bandeja de impresión, es por ello, que puede resultar de interés analizar si existen diferencias entre los errores calculados a partir de puntos medidos en planos paralelos.

En primer lugar, los gráficos 17 y 18 muestran los errores xPx e yPy obtenidos de la medición de conos y cilindros cuyos ejes están contenidos en planos paralelos al plano YZ del sistema de referencia definido. Los puntos medidos empleados en esta comparación pueden consultarse en la figura 23 del procedimiento de medición. Analizando los gráficos se aprecia que en ambos errores de posición, son mayores los que se han obtenido con entidades contenidas en planos más alejados del origen de coordenadas. En el Anexo VI pueden consultarse los gráficos para analizar los errores en planos paralelos el XZ, observándose el mismo comportamiento que en YZ.

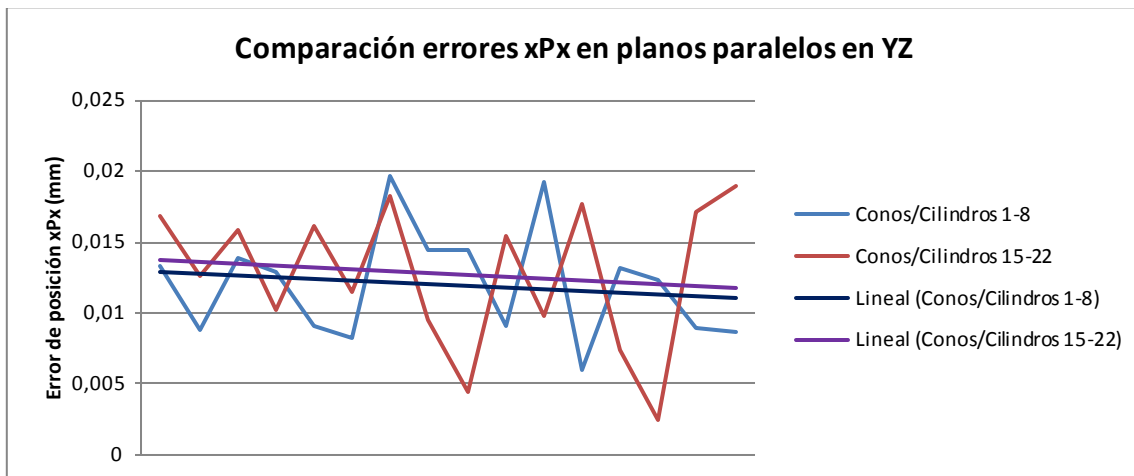


GRÁFICO 17. COMPARACIÓN DE ERRORES XPX EN PLANOS PARALELOS EN YZ

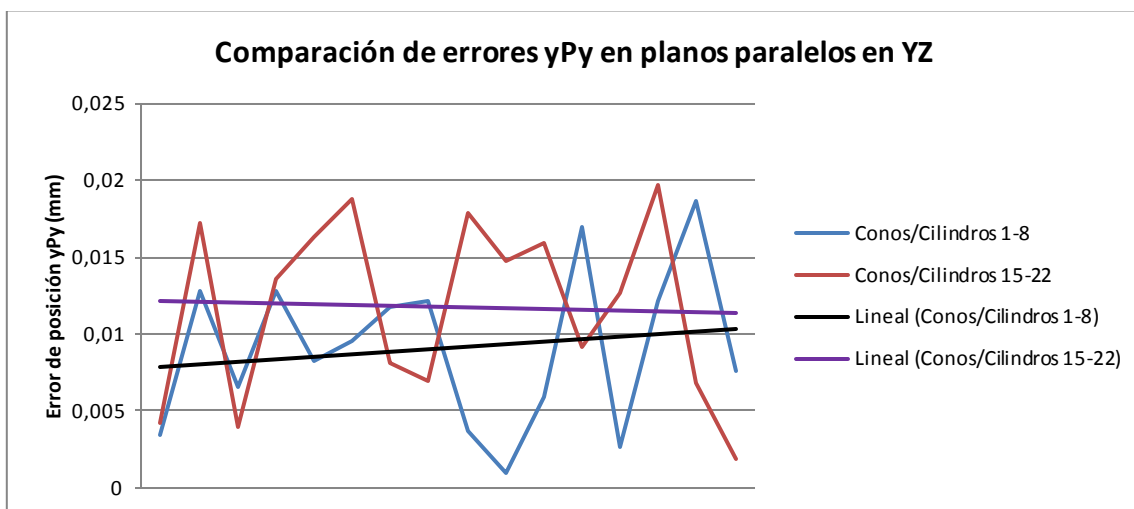


GRÁFICO 18. COMPARACIÓN DE ERRORES YPY EN PLANOS PARALELOS EN YZ

En segundo lugar, para la obtención de los errores de perpendicularidad se ha empleado el siguiente procedimiento:

- Por cada uno de los tres planos del sistema de coordenadas de la impresora se obtiene un error de perpendicularidad, por lo que los puntos empleados para su cálculo se muestran en la siguiente tabla:

	Conos medidos	Cilindros medidos
xWz	10, 11, 66, 67	10, 11, 45, 46
	24, 25, 54, 55	24, 25, 33, 34
yWz	5, 6, 60, 61	5, 6, 39, 40
	19, 20, 72, 73	19, 20, 51, 52
xWy	29, 35, 41, 47	-
	30, 36, 42, 48	-
	31, 37, 43, 49	-
	32, 38, 44, 50	-
	33, 39, 45, 51	-
	34, 40, 46, 52	-

TABLA 13. ENTIDADES DE MEDICIÓN EMPLEADAS PARA EL CÁLCULO DE ERROR DE PERPENDICULARIDAD

Para la obtención de los errores de perpendicularidad se han planteado esquemas análogos a los mostrados para las PIEZAS A, alcanzándose los resultados mostrados en la tabla 14. En ella se muestran los errores obtenidos, por un lado, a partir de conos medidos, y por el otro, de cilindros. Además se indica la numeración de las entidades empleadas para los cálculos, de manera que puede consultarse en las figuras del procedimiento de medición de la PIEZA B la numeración de entidades.

	Conos medidos	Error calculado (mm)	Cilindros medidos	Error calculado (mm)
xWz	10, 11, 66, 67	0,0217	10, 11, 45, 46	0,0053
	24, 25, 54, 55	0,0308	24, 25, 33, 34	0,0289
yWz	5, 6, 60, 61	0,0023	5, 6, 39, 40	0,0361
	19, 20, 72, 73	0,0022	19, 20, 51, 52	0,0143
xWy	29, 35, 41, 47	0,0006	-	-
	30, 36, 42, 48	0,0001	-	-
	31, 37, 43, 49	0,0003	-	-
	32, 38, 44, 50	0,0000	-	-
	33, 39, 45, 51	0,0001	-	-
	34, 40, 46, 52	0,0000	-	-

TABLA 14. ERRORES DE PERPENDICULARIDAD PARA PIEZA B

Observando la tabla 14 se aprecian diferencias significativas entre los errores calculados en función de las entidades que se han empleado para su obtención. Para el caso del error xWy, se han empleados los conos de la estructura central que forman cuadrados y al realizar el cálculo de los ángulos Beta, estos valen prácticamente 45 grados. Es por ello, que los errores obtenidos son tan cercanos a cero.

3. CONCLUSIONES

Para finalizar este proyecto, se incluyen a continuación una serie de conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados. De este modo, se pretende ofrecer un resumen claro de los resultados alcanzados y su adecuación con los objetivos fijados al comienzo de este trabajo.

En primer lugar, los valores de errores de posicionamiento obtenidos son coherentes con la información facilitada por el fabricante de la impresora 3D (ver Anexo II). Este ofrece información sobre la precisión con que pueden obtenerse las piezas en función de su tamaño. En este proyecto, para los errores de posicionamiento, en las PIEZAS A, de pequeño tamaño, se han obtenido errores de hasta 85 micrómetros⁶, mientras que en la PIEZA B, que es de mayores dimensiones, los errores aumentan hasta cerca de 200 micrómetros.

Sin embargo, en los errores de perpendicularidad de la PIEZA B se han obtenido errores xWz e yWz superiores a los 200 micrómetros. No obstante, la información ofrecida por el fabricante es de precisión y no de errores de máquina. Por ello, solo en el caso de errores de posicionamiento pueden compararse los resultados obtenidos con los de precisión, ya que una desviación lineal en cualquiera de los ejes se traduce en una disminución de la precisión final de la pieza. Por el contrario, no puede relacionarse directamente el valor de precisión con el de error de perpendicularidad ya que la relación entre ambos no es conocida. Por todo ello, los datos obtenidos sobre errores de perpendicularidad a partir de la PIEZA B no son suficientes para determinar si los errores de la impresora son adecuados.

La geometría de la PIEZA B permite analizar si los errores de posicionamiento de la impresora aumentan conforme nos alejamos del origen de coordenadas interno de la máquina. Los resultados calculados indican cierta tendencia al aumento de los errores al alejarse del origen. No obstante, en cualquier caso los errores de posición obtenidos están dentro de los valores esperados y las diferencias son mínimas.

Por otro lado, el estudio de estabilidad temporal realizado con la ayuda de los gráficos de control X-R indica que los resultados calculados están cercanos a la línea central. Sin embargo, con el número de piezas fabricadas no hay suficientes datos para determinar si los errores de máquina siguen un comportamiento cercano al promedio o, si por el contrario, existen tendencias en los errores. Por lo tanto, hay que tener en cuenta que la utilidad de esta herramienta no se verificará hasta haber cubierto un periodo temporal suficientemente representativo de varios meses. Además, con los datos disponibles solo pueden analizarse temporalmente los errores de posicionamiento cuando sería de gran interés realizar el mismo estudio de estabilidad temporal para los errores de perpendicularidad.

Otro punto a tener en cuenta, es el método de medición. Durante la realización de este proyecto han surgido inconvenientes con las primeras mediciones de PIEZAS A, lo cual se traduce en una pérdida de información. El mal amarre, y por consiguiente, la mala medición de las dos primeras piezas ha reducido el número de datos analizados posteriormente.

⁶ El fabricante indica en la hoja de características de la impresora 3D (ver Anexo II) que la precisión esperada en piezas de pequeñas dimensiones está entre 20 y 85 micrómetros mientras que para piezas que abarquen toda la bandeja de impresión la precisión desciende hasta los 200 micrómetros aproximadamente.

De igual modo, problemas de funcionamiento de la impresora 3D han obligado a fabricar las piezas en un corto periodo de tiempo, cuando lo deseable hubiese sido fabricarlas más dilatadas en el tiempo. De este modo, el estudio de estabilidad temporal hubiese abarcado un periodo de tiempo más amplio.

El diseño de la PIEZA B incluye conos y cilindros que comparten un eje común, de este modo, se obtienen el doble de resultados. Sin embargo, con los resultados obtenidos no ha podido afirmarse cuál de las dos entidades se mide con mayor precisión. Es importante realizar adecuadamente la medición ya que, en caso contrario, los resultados están influenciados por errores de medición adicionales a la incertidumbre intrínseca del proceso, que para las entidades medidas en la PIEZA B no supera los 2,875 micrómetros. Sin embargo, analizando los resultados se observa que en ocasiones los errores obtenidos a partir de la medición de conos son mayores que los calculados a partir de cilindros medidos y viceversa. Esto indica que la medición realizada de algunas entidades no ha sido la más adecuada.

Para finalizar y teniendo en cuenta lo comentado anteriormente, se presentan posibles líneas de trabajo futuro que den continuidad a los estudios comenzados en este proyecto.

Por una parte, continuar con la fabricación de PIEZAS A y los posteriores cálculos. Para ello, se deja a disposición del departamento el procedimiento de medición, así como las plantillas de cálculo. De este modo, podrán obtenerse más conclusiones sobre los errores de la máquina.

Aunque los errores de posicionamiento y perpendicularidad sean los que más peso tienen, sería de gran interés ampliar el estudio a los restantes errores presente en una máquina de tres ejes: dos de rectitud y tres angulares por eje. Para ello, debería plantearse si el empleo de piezas patrón permite obtener todos los errores y, en caso afirmativo, diseñar nuevas piezas.

Las PIEZAS A permiten controlar los errores de la máquina. Sin embargo, son piezas de pequeño tamaño y, tal como se ha comentado ya, el fabricante de la impresora determina distintas precisiones en función del tamaño de la pieza. De este modo, las PIEZAS A cubren únicamente el rango de pequeñas dimensiones. Sin embargo, no es viable en términos de costes económicos, de tiempo y material empleado, fabricar la PIEZA B para un estudio de estabilidad temporal que abarque dimensiones mayores. Es por ello, que resultaría beneficioso diseñar otra pieza que reduzca los costes y permita analizar también dimensiones mayores. De este modo, todo el rango de trabajo de la impresora podría controlarse y detectar rápidamente cambios en la tendencia de los errores de máquina.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] "2014 Additive Manufacturing: SASAM Standardisation Roadmap"
- [2] A. L. Cooke, J. A. Soons. "Variability in the Geometric Accuracy of Additively Manufactured Test Parts" NIST, National Institute of Standards and Technology.
- [3] C. Cajal, J. Santolaria, J. Velazquez, S. Aguado, J. A. Albajez. "Técnica volumétrica de compensación de error para impresoras 3D" Universidad de Zaragoza.
- [4] D. A. Roberson, D. Espalin, R. B. Wicker. "3D printer selection: A decision-making evaluation and ranking model" University of Texas at El Paso, El Paso, USA, 2013.
- [5] D. Dimitrov, W. van Wijck. "Investigating the achievable accuracy of three dimensional printing" University of Stellenbosch, South Africa.
- [6] D. Dimitrov, W. van Wijck, K. Schreve, N. de Beer, J. Meijer. "An investigation of the Capability Profile of the Three Dimensional Printing Process with an Emphasis on the Achievable Accuracy" University of Stellenbosch, South Africa, 2003.
- [7] Eleonora Atzeni, Luca Iuliano, Paolo Minetola, Alessandro Salmi. "Proposal of an innovative benchmark for accuracy evaluation of dental crown manufacturing" Politecnico di Torino, Italy.
- [8] F. Xu, Y. S. Wong, H. T. Loh. "Toward Generic Models for Comparative Evaluation and Process Selection in Rapid Prototyping and Manufacturing" Dept. of Mechanical & Production Engineering, National University of Singapore.
- [9] G. D. Kim, Y. T. Oh. "A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost".
- [10] H. J. Yang, P. J. Hwang, S. H. Lee. "A study on shrinkage compensation of the SLS process by using the Taguchi method" Pusan National University, South Korea, 2001.
- [11] Hong-Seok Byun, Kwan H. Lee. "Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making" GIST, Gwangju Institute of Science and Technology, Republic of Korea.
- [12] Jack G. Zhou, Daniel Herscovici, Calvin C. Chen. "Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts" Drexel University, Philadelphia, USA, 1998.
- [13] Jack G. Zhou, Daniel Herscovici, Calvin C. Chen. "Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts" 1999.
- [14] Jordi Delgado, Joaquim Ciurana, Ciro A. Rodríguez. "Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based material".
- [15] Jorge Aguado. "Comparación experimental de técnicas tradicionales y novedosas de verificación geométrica de máquina-herramienta" Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza, 2010.
- [16] J. P. Kruth, L. Zhou, C. Van den Bergh, P. Vanherck. "A Method for Squareness Error Verification on a Coordinate Measuring Machine" 2003

- [17] Juan Vicente Haro González. "Desarrollo de un procedimiento de diseño óptimo para fabricación de componentes mediante tecnologías aditivas" Máster Universitario en Ingeniería Mecánica y Materiales, Universitat Politècnica de València.
- [18] Kun Tong. "Parametric error modeling and software error compensation for rapid prototyping" Pennsylvania State University, 2005.
- [19] Mircea Ancău, Cristian Caizar. "The computation of Pareto-optimal set in multicriterial optimization of rapid prototyping processes" Technical University of Cluj-Napoca, Romania.
- [20] N. Raghunath, Pulak M. Pandey. "Improving accuracy through shrinkage modeling by using Taguchi method in selective laser sintering" Indian Institute of Technology Delhi, India, 2006.
- [21] Ratnadeep Paul, Sam Anand. "Optimal part orientation in Rapid Manufacturing process for achieving geometric tolerances" University of Cincinnati, USA.
- [22] R. Ippolito, L. Iuliano, Politecnico di Torino; A. Gatto, Univerità di Ancona. "Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish" 1995.
- [23] Rupinder Singh. "Process capability study of polyjet printing for plastic components" 2011.
- [24] Shawn Moylan, April Cooke, Kevin Jurrens, John Slotwinski, M. Alkan Donmez. "A Review of Test Artifacts for Additive Manufacturing" NIST, National Institute of Standards and Technology. 2012.
- [25] Shawn Moylan, John Slotwinski, April Cooke, Kevin Jurrens, M. Alkan Donmez. "Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes" NIST, National Institute of Standards and Technology. 2012.
- [26] S. L. Campanelli, G. Cardano, R. Giannoccaro, A. D. Ludovico, E. L. J. Bohez. "Statistical analysis of the stereolithographic process to improve the accuracy" 2006.

Fuentes electrónicas:

- [27] Página web se Stratasys: <http://www.stratasys.com/es>

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1. Pieza patrón diseñada por Mahesh.....	11
Figura 2. Pieza patrón diseñada por Kruth	11
Figura 3. Impresora EDEN 350V	15
Figura 4. Primera (a) y segunda (b) alternativa de diseño de la PIEZA A	16
Figura 5. Diseño final de la PIEZA A.....	17
Figura 6. Vista 3D de la PIEZA B	18
Figura 7. Fases del proceso de fabricación con impresora 3D.....	19
Figura 9. Orientaciones de PIEZA A respecto ejes de la impresora 3D.....	20
Figura 8. Ejes de la impresora 3D.....	20
Figura 10. Orientación y ubicación de PIEZA B en bandeja de impresión.....	21
Figura 11. Utillaje empleado para la sujeción de la pieza a en la MMC.....	22
Figura 12. Conjunto de palpadores empleado para medir las PIEZAS A	23
Figura 13. Sistema de referencia PIEZA A y planos 1, 2 y 3	24
Figura 14. Conos del 1 al 10 en PIEZA A	24
Figura 15. Planos 4 y 5 en PIEZA A	24
Figura 16. Cilindros 1 y 2 en PIEZA A.....	25
Figura 17. Planos 6 y 7 en PIEZA A	25
Figura 18. Cilindros 3 y 4 en PIEZA A.....	25
Figura 19. Conos del 11 al 16 12 en PIEZA A	26
Figura 20. Primera posición de amarre de la PIEZA B.....	27
Figura 21. Palpador vertical para medición de PIEZA B.....	27
Figura 22. Sistema de referencia para la PIEZA B	28
Figura 23. Sistema básico de arranque para PIEZA B.....	28
Figura 24. Cilindros y conos del 1 al 28 en PIEZA B.....	29
Figura 25. Conos del 29 al 52 en PIEZA B.....	29
Figura 26. Cilindros del 29 al 31 en PIEZA B.....	30
Figura 27. Planos 4, 5 y 6 en PIEZA A.....	30
Figura 28. Palpadores número 2 y 3 para medición de PIEZA B.....	30
Figura 29. Cilindros del 32 al 37 y conos del 53 al 58 en PIEZA B	31
Figura 30. Cilindros del 38 al 43 y conos del 59 al 64 en PIEZA B.....	31
Figura 31. Segunda posición de amarre de la PIEZA B.....	32
Figura 32. Cilindros del 44 al 49 y conos del 65 al 70 en PIEZA B.....	32
Figura 33. Cilindros del 50 al 55 y conos del 71 al 76 en PIEZA B.....	33
Figura 34. Esquemas empleados para el cálculo de errores de perpendicularidad	34
Figura 35. Medición de conos con palpado autocentrante.....	36
Figura 36. Esquemas empleados para el cálculo del error de perpendicularidad	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de conversión a STL	20
Tabla 2. Materiales empleados en la fabricación de las piezas	20
Tabla 3. Fechas de fabricación de las piezas y orientación de las PIEZAS A	21
Tabla 4. Características técnicas de la MMC.....	22
Tabla 5. Nombre y número de los palpadores para la PIEZA A	23
Tabla 6. Nombre y número de los palpadores para la PIEZA B	28

Tabla 7. Errores máximos y mínimos obtenidos en las PIEZAS A	36
Tabla 8. Muestras para los gráficos de estabilidad temporal en errores de posición	37
Tabla 9. puntos empleados para el cálculo de errores de perpendicularidad	40
Tabla 10. Errores de perpendicularidad para orientación 1 de PIEZAS A	41
Tabla 11. Errores de perpendicularidad para orientación 2 de PIEZAS A	41
Tabla 12. mínimos y máximos errores de posicionamiento en pieza b.....	44
Tabla 13. entidades de medición empleadas para el cálculo de error de perpendicularidad	48
Tabla 14. Errores de perpendicularidad para pieza b.....	48

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Gráfico r para xPx.....	37
Gráfico 2. Gráfico X para xPx.....	37
Gráfico 3. gráfico r para yPy.....	38
Gráfico 4. Gráfico X para yPy.....	38
Gráfico 5. Gráfico R para zPz.....	39
Gráfico 6. Gráfico X para zPz.....	39
Gráfico 7. Tolerancias de planitud en PIEZAS A	42
Gráfico 8. Paralelismo entre planos en PIEZAS A	42
Gráfico 9. Perpendicularidad entre planos en PIEZAS A	42
Gráfico 10. Coaxialidad entre cilindros en PIEZAS A	43
Gráfico 11. Errores de posicionamiento en pieza b	44
Gráfico 12. Comparación de xPx obtenidos a partir de conos y cilindros medidos (1-28).....	45
Gráfico 13. Comparación de yPy obtenidos a partir de conos y cilindros medidos (1-28).....	45
Gráfico 14. Comparación de xPx obtenidos a partir de conos (53-58) y cilindros (32-37) medidos.....	46
Gráfico 15. Comparación de yPy a partir de conos (71-76) y cilindros (50-55) medidos.....	46
Gráfico 16. Comparación de zPz a partir de conos (53-58) y cilindros (32-37) medidos.....	46
Gráfico 17. Comparación de errores xPx en planos paralelos en YZ.....	47
Gráfico 18. Comparación de errores yPy en planos paralelos en YZ	47

5. ANEXOS

ANEXO I: TRABAJOS PREVIOS

[19] "THE COMPUTATION OF PARETO-OPTIMAL SET IN MULTICRITERIAL OPTIMIZATION OF RAPID PROTOTYPING PROCESSES"

Autores: Mircea Ancău, Cristian Caizar.

Procesos de Fabricación Aditiva estudiados:

- SLS (Selective Laser Sintering)
- LOM (Laminated Object Manufacturing)

Piezas patrón: Se muestran dos piezas patrón distintas (Figuras x y x), aunque ambas están formadas por varias paredes inclinadas entre 0° y 90° , con variaciones de 5° . Hay dos diferencias entre ambas piezas, por un lado el proceso de Fabricación Aditiva con el cual se han fabricado, y por otro, el diseño final de la pieza.

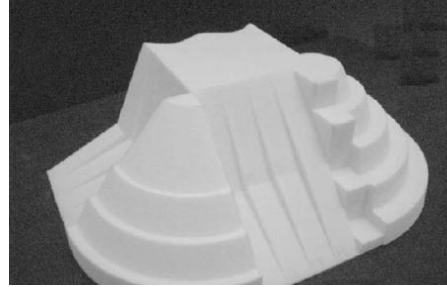


FIGURA 36

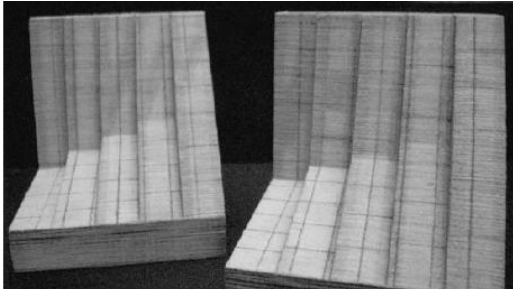


FIGURA 37

Características estudiadas:

- Relación entre la inclinación de una superficie y su rugosidad a partir del análisis de ambas piezas patrón.
- Tiempo de fabricación y coste de la pieza con cada proceso definiendo las ecuaciones para su cálculo.

En este estudio se programan algoritmos de optimización en función de la orientación de la pieza, buscando minimizar el tiempo de fabricación o el coste de la pieza o la rugosidad superficial. Sin embargo, solo se tienen en cuenta las paredes inclinadas como característica crítica de diseño y únicamente se analizan dos procesos de Fabricación Aditiva. Aunque se propongan algoritmos de optimización, estos no afectan a los errores de la máquina sino que asumiendo los errores optimiza todos aquellos parámetros del proceso que pueden controlarse.

[7] "PROPOSAL OF AN INNOVATIVE BENCHMARK FOR ACCURACY EVALUATION OF DENTAL CROWN MANUFACTURING"

Autores: Eleonora Atzeni, Luca Iuliano, Paolo Minetola, Alessandro Salmi .

Proceso de Fabricación Aditiva estudiados: EOS FORMIGA P 100 (EOS GmbH, Krailling, Alemania) máquina reciente y adecuada para aplicaciones dentales que se basa en SLS (Selective Laser Sintering)

Pieza patrón: se ha diseñado (ver Figura 38) imitando la estructura de una dentadura, pero simplificando los dientes mediante tres estructuras diferenciadas que reproducen las características particulares de tres tipos de dientes respectivamente.

Características estudiadas: errores dimensionales a partir de la estructura dental.

Resultados: se ha medido con una MMC la pieza patrón fabricada para compararla con el CAD y con el archivo STL y poder detectar los errores dimensionales.

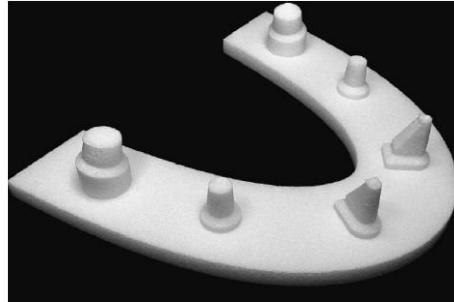


FIGURA 38

En este artículo se muestra un método para determinar errores dimensionales para una de las aplicaciones que más auge está teniendo en las impresoras 3D, aplicaciones dentales y médicas. Es importante que las prótesis realizadas cumplan con las dimensiones particulares de cada paciente. Esta pieza patrón reproduce características de los principales dientes y estudia su correcto posicionamiento y tamaño, para poder extrapolarlo a aplicaciones reales.

[11] "DETERMINATION OF THE OPTIMAL BUILD DIRECTION FOR DIFFERENT RAPID PROTOTYPING PROCESSES USING MULTI-CRITERION DECISION MAKING"

Autores: Hong-Seok Byun, Kwan H. Lee

Procesos de Fabricación Aditiva estudiados:

- FDM (Fused Deposition Modelling)
- SLS (Selective Laser Sintering)
- SLA (Stereo Lithography Apparatus)
- LOM (Laminated Objet Manufacturing)

Pieza patrón: el diseño de la pieza (ver Figura 39) permite su orientación de seis formas distintas. De

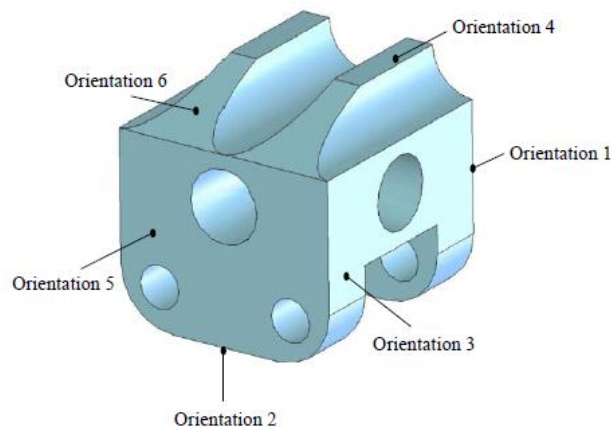


FIGURA 31

este modo se pueden comparar las características medidas en función de la orientación de la pieza en el momento de su fabricación.

Características estudiadas: mediante un algoritmo específicamente diseñado se compara el tiempo de fabricación, el coste de material y la rugosidad de la pieza. Tras aplicar el algoritmo, se compara éste con otros dos diseños por otros autores.

Este trabajo está dedicado exclusivamente a la orientación de las piezas, no al análisis de los errores de la máquina. Sin embargo, resulta de interés porque muestra diversas piezas patrón.

Procesos de Fabricación Aditiva estudiados: SL (Stereo Lithography).

Pieza patrón: la pieza diseñada (ver Figura 40) incluye características de tamaño pequeño y medio para aplicaciones de joyería. Además el diseño busca el consumo de poca cantidad de material y no requiere mucho tiempo para su fabricación.

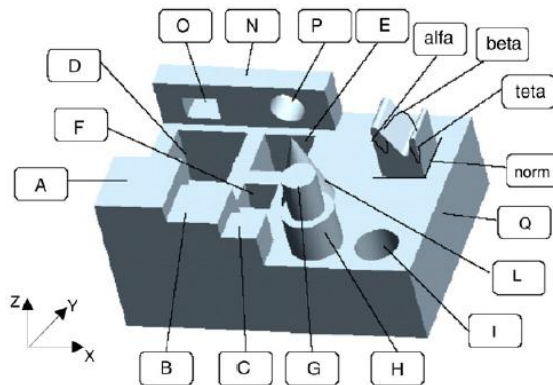


FIGURA 40

Características estudiadas:

- Precisión dimensional horizontal mediante A, B, C, D, E, F y Q.
 - Precisión dimensional vertical mediante O y P.
 - Errores de forma: cilindridad (G, H, I) y conicidad (L).
 - Errores de posición: inclinación, perpendicularidad y coaxialidad mediante los ángulos alfa, beta, theta y norm y los cilindros G y H.
 - Se han definido índices para evaluar los tres tipos de errores dimensionales, forma y posición.
- Se ha definido un índice de error global para evaluar la distorsión global de la pieza patrón fabricada.
 - Se ha realizado un análisis ANOVA para estudiar la influencia de cuatro factores en el índice global anteriormente descrito. Los factores considerados, para el proceso estudiado son:
 - Espesor de la capa.
 - Profundidad de penetración en la capa adyacente, en zonas internas y en los bordes de la pieza.
 - Distancia entre líneas de solidificación.

En este artículo se hace un estudio exhaustivo del proceso de Fabricación Aditiva a partir de una pieza patrón diseñada específicamente para ello. Se calculan errores dimensionales, de forma y de posición, aunque no definidos de la misma forma que en el proyecto al que pertenece este anexo.

[2] "VARIABILITY IN THE GEOMETRIC ACCURACY OF ADDITIVELY MANUFACTURED TEST PARTS"

Autor: Cooke

Procesos de Fabricación Aditiva estudiados:

- Proceso de fusión térmica de una base de material en polvo mediante un haz láser.
- Proceso de fusión térmica de una base de material en polvo mediante un haz de electrones.

Pieza patrón: en este estudio se ha empleado una pieza patrón "círculo-rombo-cuadrado" de la AIA (Aerospace Industries Association), NAS 979 (National Aerospace Standard), que se emplea en máquinas de fresado de cinco ejes. Esta pieza (ver Figura 41) es un test compuesto ya que permite detectar simultáneamente varios errores. Y así obtener información sobre los errores geométricos de las piezas fabricadas.

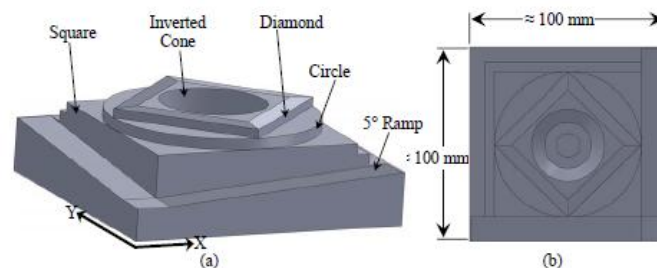


FIGURA 41

Características estudiadas: determinar los errores geométricos de los dos procesos de Fabricación Aditiva.

Resultados:

- Solo pueden compararse piezas fabricadas por el mismo proceso.
- Los errores observados en las piezas patrón fabricadas con los procesos de Fabricación Aditiva son de un orden de magnitud mayor que las fabricadas con mecanizado. Sin embargo, la diferencia se reduce aplicando tratamientos térmicos a las piezas realizadas.
- Los errores parecen tener un alto nivel de repetibilidad, lo cual permitiría diseñar estrategias de compensación.
- Los errores observados presentan un patrón que puede deberse al proceso empleado.
- Los post-tratamientos térmicos favorecen mejores resultados en la precisión de la pieza fabricada.

Este artículo centra sus investigaciones en dos procesos con materiales metálicos, limitando su rango de estudio. Además, una de las conclusiones alcanzadas es la imposibilidad de comparar, con la metodología seguida, la misma pieza fabricada con distintos procesos. Estos factores hacen necesario más trabajo y ampliar los estudios a un mayor número de procesos y materiales, analizando no sólo los errores geométricos sino también las propiedades mecánicas, limitaciones o repetibilidad del proceso.

[14] "INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON PART QUALITY AND MECHANICAL PROPERTIES FOR DMLS AND SLM WITH IRON-BASED MATERIAL"

Autores: Delgado, Ciurana y Rodríguez

Procesos de Fabricación Aditiva estudiados:

- DMLS (Direct Metal Laser Sintering).
- SLM (Selective Laser Melting).

Pieza patrón: en este caso no se ha realizado una pieza como la de trabajos anteriores sino que se han fabricado probetas de ensayo (ver Figura 42) que permitan realizar ensayos de determinación de propiedades mecánicas.

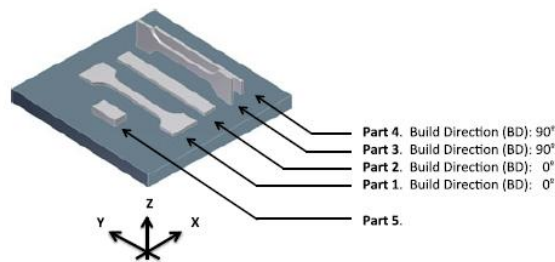


FIGURA 42

Características estudiadas:

- Se ha analizado el espesor de la capa y la velocidad y dirección de fabricación.
- Se han analizado los errores dimensionales, rugosidad superficial y propiedades mecánicas.

Resultados: el tamaño de los polvos metálicos, la anchura del haz láser y la estrategia de escaneado, entre otros, influyen significativamente en las propiedades mecánicas de la pieza obtenida.

En este estudio, los autores se han centrado en las propiedades mecánicas y han diseñado unas probetas de ensayo en lugar de la típica pieza patrón. Esto impide ampliar los parámetros de estudio, y aunque se analicen aspectos como el acabado superficial, los resultados no son extrapolables a cualquier geometría pero sí pueden tenerse en cuenta para la orientación de piezas. Además, solo se han considerado los procesos basados en materiales metálicos, y dado el uso habitual de materiales plásticos, el estudio puede resultar insuficiente.

[5] "INVESTIGATING THE ACHIEVABLE ACCURACY OF THREE DIMENSIONAL PRINTING"

Autores: D. Dimitrov, W. van Wijck

Proceso de Fabricación Aditiva estudiado: impresión 3D (3DP) desarrollada por el MIT y comercializada por Z-Corporation.

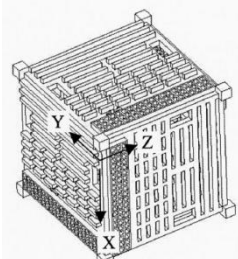


FIGURA 43

Piezas patrón: Se han diseñado dos piezas. La primera (ver Figura 473), es un cubo de 190x190x190 mm con ranuras y salientes rectangulares de 2, 6, 18, 54 y 162 mm repartidos por las caras del cubo (ejes X, Y y Z)

La segunda pieza (ver Figura 44) es un componente de la automoción, en concreto una caja del diferencial, fabricada en series de 12. Se caracteriza por tener una amplia selección de formas circulares, angulares y cilíndricas y diversas formas libres.

Características estudiadas:

- Describir la precisión de la máquina respecto a los tres ejes (X, Y y Z).
- Diferencias en los resultados según el material empleado.
- Para la precisión geométrica se han analizado: geometría de contornos libres, angulosidad, posición de los ejes, circularidad, coaxialidad y concentricidad.
- Las ranuras y los salientes se han repartido un número suficiente de veces para poder estimar la precisión dimensional en los tres ejes, pero los cálculos se han hecho a partir de una única pieza y se desconocen los resultados si se fabrica otra pieza (repetibilidad).

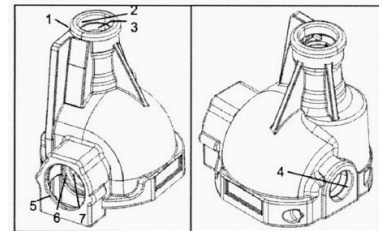


FIGURA 44

Resultados:

- Precisión dimensional: a partir de la primera pieza se realizan cálculos estadísticos y desviaciones estándar del error en los tres ejes y para ambos materiales.
- Forma de una superficie: a partir de la pieza de automoción se ha encontrado la capacidad de la máquina para recrear una superficie concreta, midiendo en MMC y comparando con CAD, y obteniendo gráficos con la distribución del error.
- Cilindricidad: a partir de la segunda pieza determinar los errores en diámetro.
- Concentricidad: a partir de la segunda pieza determinar las desviaciones y errores.
- Tolerancia angular (inclinación): a partir de la primera pieza.

Es un estudio interesante desde el punto de vista de determinación de errores, pero no incluye datos de repetibilidad. Además de detectar errores, las piezas tienen la finalidad de determinar la precisión geométrica obtenida, sin embargo, no han tenido en cuenta factores como la orientación de la pieza entre otros que sí son relevantes en la precisión obtenida.

[22] “BENCHMARKING OF RAPID PROTOTYPING TECHNIQUES IN TERMS OF DIMENSIONAL ACCURACY AND SURFACE FINISH”

Autores: Ippolito e Iuliano

Procesos de Fabricación Aditiva estudiados:

- SLA (Stereolithography).
- SGC (Solid Ground Curing).
- SLS (Selective Laser Sintering).
- FDM (Fused Deposition Modeling).
- LOM (Laminated Object Manufacturing).

Pieza patrón: La pieza patrón utilizada (ver Figura 45) es una versión de la propuesta por la compañía 3D System. Los autores optaron por esta pieza ya que su forma y simetrías eran adecuadas para observar las características de estudio, minimizando el efecto de cualquier otro factor.

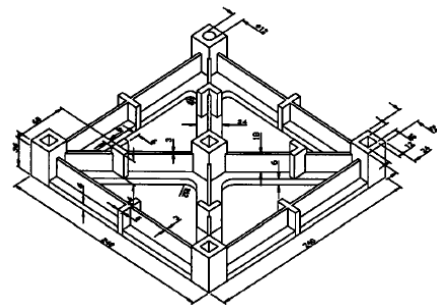


FIGURA 45

Características estudiadas:

- Precisión dimensional.
- Acabado superficial.

Resultados:

- La precisión dimensional de los procesos analizados es prácticamente la misma.
- Los resultados obtenidos están condicionados por el material empleado, los parámetros fijados de configuración de la máquina y la habilidad del operario.
- La rugosidad superficial es la característica crítica en la mayoría de los casos.

A pesar de comparar cinco procesos distintos de Fabricación Aditiva, quedan fuera del estudio las técnicas con materiales metálicos. Además, las características analizadas son muy específicas y no consideran ningún otro parámetro importante de estudio. Del mismo modo, la pieza patrón empleada es muy simple y no tiene en cuenta características geométricas como agujeros, cilindros, voladizos, formas libres, etc. Otro punto importante son las conclusiones obtenidas ya que no son determinantes y hacen necesario más trabajos de investigación.

[9] "A BENCHMARK STUDY ON RAPID PROTOTYPING PROCESSES AND MACHINES: QUANTITATIVE COMPARISONS OF MECHANICAL PROPERTIES, ACCURACY, ROUGHNESS, SPEED, AND MATERIAL COST"

Autores: G. D. Kim, Y. T. Oh

Procesos de Fabricación Aditiva estudiados:

- SL (Stereo Lithography)
- FDM (Fused Deposition Modelling)
- Poly-jet
- SLS (Selective Laser Sintering)
- 3DP (three-Dimensional Printing)
- LOM (Laminated Object Manufacturing)

Piezas patrón: En este estudio se muestran varias piezas distintas, cada una de ellas apropiada para analizar distintas características. La primera pieza (ver Figura 46) recoge distintas paredes inclinadas de menor a mayor ángulo. La segunda (ver Figura 47), consiste en una pieza plana que tiene pequeños agujeros, nervios y salientes lo cual permite estudiar características de pequeño tamaño. Además, al tener una base plana se ha podido estudiar el error de alabeo. La

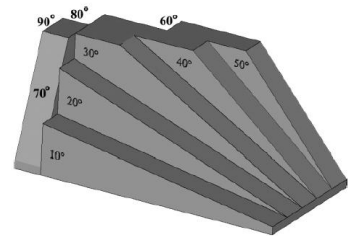


FIGURA 46

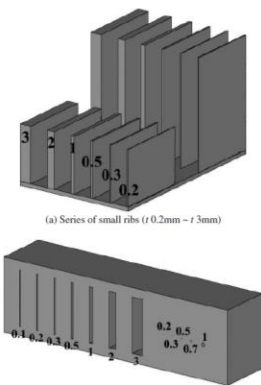


FIGURA 47

tercera pieza (ver Figura 48) está formada por 15 sub componentes que permiten estudiar el ensamblaje de piezas y la precisión final del montaje. En cuarto lugar, se muestran dos piezas (ver Figura 49) formadas por nervios y ranuras de distintos espesores. En último lugar se muestran tres piezas distintas con características particulares. La pieza C (ver Figura 49) tiene una de sus longitudes mucho mayor que cualquier bandeja de impresora 3D y por lo tanto se ha dividido en 3 sub partes. La pieza E (ver Figura 49) es ocho veces más pequeña que la D (ver Figura 49).

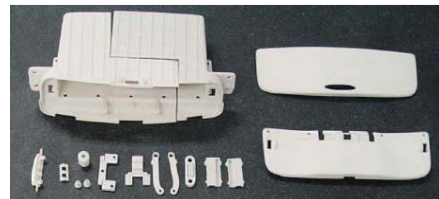


FIGURA 48

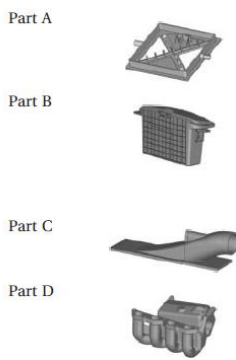


FIGURA 49

Características estudiadas:

- Propiedades mecánicas, estudiadas con piezas probeta basadas en normas ASTM.
- Influencia de la orientación de la pieza en las propiedades mecánicas.
- Rugosidad en función de la inclinación (efecto escalera) a partir de la primera pieza patrón.
- Errores geométricos y dimensionales a partir de la segunda y tercera pieza.
- A partir de la cuarta pieza se ha medido la capacidad de fabricar características geométricas "pequeñas".
- Comparación de la velocidad de fabricación y el coste de material.

Resultados:

- Resistencia a la tracción y propiedades térmicas de los materiales empleados a partir de las probetas fabricadas.
- Se han medido la segunda, tercera y cuarta pieza con un escáner 3D y se han comparados las nubes de puntos obtenidas con los modelos CAD para obtener los errores geométricos y dimensionales.
- Se ha medido la rugosidad de cada superficie inclinada de la primera pieza usando un rugosímetro (SV-3000, Mitutoyo).
- Se ha comparado el tiempo de fabricación y el coste de material de las últimas piezas entre los distintos procesos

Este estudio es muy completo ya que aúna diversos procesos de Fabricación Aditiva, que trabajan además con distintos materiales, y muestra múltiples piezas para analizar los puntos más conflictivos del proceso de fabricación. Sin embargo, ante la diversidad de medios empleados para obtener resultados, este estudio no es reproducible en un futuro, impidiendo obtener nuevas conclusiones conforme avance la tecnología.

[25] "PROPOSAL FOR A STANDARDIZED TEST ARTIFACT FOR ADDITIVE MANUFACTURING MACHINES AND PROCESSES"

Autores: Shawn Moylan, John Slotwinski, April Cooke, Kevin Jurrens, M. Alkan Donmez

Procesos de Fabricación Aditiva estudiados:

- DMLS (Direct Metal Laser Sintering).
- 3D Printing.

Características estudiadas:

- Determinar las capacidades y limitaciones de los procesos estudiados.
- Cuantificar la precisión de los procesos.
- Detectar defectos específicos de cada proceso.

Pieza patrón: en este caso se ha diseñado una pieza patrón (ver Figura 50) con los siguientes elementos geométricos:

- Superficie plana superior.
- Agujero pasante cilíndrico en el centro de la pieza.
- Agujeros circulares, cuadrados y romboidales de pequeña sección.
- Estructura en forma de escalera.
- Tres de las caras laterales son lisas, sin elemento alguno en ellas.
- Rampas.
- Características finas como prismas y cavidades rectangulares y circulares.

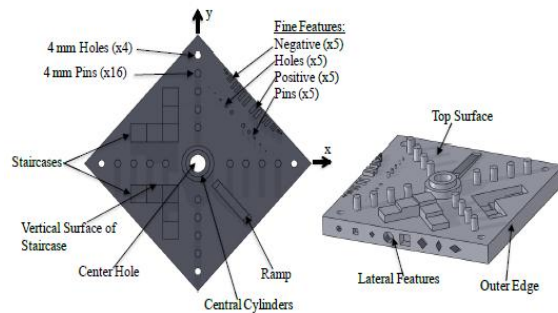


FIGURA 50

Conclusiones del estudio:

- En ambos procesos se ha fabricado la pieza satisfactoriamente.
- El artículo no especifica apenas los resultados ya que solo se centra en el diseño de la pieza patrón.
- No todas las características de pequeño tamaño se han fabricado correctamente.
- Se recomienda la fabricación de la pieza patrón mediante otros procesos de Fabricación Aditiva para verificar si el diseño planteado es válido para otros procesos.

Tal y como recomiendan las conclusiones del estudio, es necesario ampliar el rango de utilización de la pieza diseñada para poder cubrir otros procesos, distintos materiales, etc. Además, el artículo está centrado en errores geométricos pero no estudia el acabado de la pieza o las propiedades mecánicas de esta.

[21] "OPTIMAL PART ORIENTATION IN RAPID MANUFACTURING PROCESS FOR ACHIEVING GEOMETRIC TOLERANCES"

Autores: Ratnadeep Paul, Sam Anand

Proceso estudiado: no se menciona

Pieza patrón: se ha diseñado una pieza simple (ver Figura 51) que permite su posicionamiento según distintas orientaciones. Las referencias de esta pieza son tres agujeros que están ubicados del siguiente modo: tomando como referencia el plano perpendicular el eje del agujero 1, el plano del agujero 2 forma 90° y el agujero 3 forma 45° .

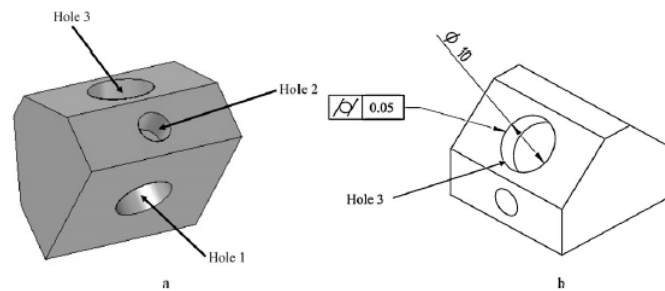


FIGURA 51

Características estudiadas: estudio analítico de errores de cilindridad en procesos de Fabricación Aditiva.

En este estudio solo se han analizado los errores de cilindridad. Si bien es cierto que, a excepción de los agujeros verticales, la fabricación de agujeros cilíndricos supone un error, las características geométricas de la pieza se podrían haber empleado para analizar otros factores.

[20] "IMPROVING ACCURACY THROUGH SHRINKAGE MODELLING BY USING TAGUCHI METHOD IN SELECTIVE LASER SINTERING"

Autores: N. Raghunath, Pulak M. Pandey

Proceso estudiado: SLS (Selective Laser Sintering)

Pieza patrón: se han diseñado dos piezas. La primera de ellas (ver Figura 52), está formada por bloques rectangulares de distintos tamaños. La segunda pieza es la misma que emplearon con anterioridad los autores Ippolito e Iuliano.



FIGURA 52

Características estudiadas:

- A partir de la primera pieza se ha empleado el método de Taguchi para el diseño de experimentos ya que son varios los factores cuya influencia se quiere estudiar.
- A partir de la segunda pieza se ha medido la precisión resultante tras aplicar las correcciones obtenidas con la otra pieza.

Este estudio realiza un primer análisis con el cual obtener, a partir de una pieza muy simple, unas correcciones para el proceso de Fabricación Aditiva. Luego, emplea esas correcciones para reconfigurar la máquina y fabricar la segunda pieza. La utilización de una pieza ya fabricada y analizada en otros estudios, permite comparar resultados y mostrar la evolución y fiabilidad de las correcciones propuestas por los autores. Sin embargo, este trabajo solo se centra en un proceso de fabricación y sería muy interesante ampliar este tipo de trabajos a otros procesos de Fabricación Aditiva.

[4] “3D PRINTER DELECTION: A DECISIÓN-MAKING EVALUATION AND RANKING MODEL”

Autores: Roberson, Espalin y Wicker

Procesos de Fabricación Aditiva estudiados:

- Impresoras basadas en extrusión de material. Las tres marcas comerciales estudiadas han sido: uPrint Plus de Stratasys, 3D Touch de Bits from Bytes y MakerBot Replicator de MarketBor Industries.
- Impresoras basadas en laminación de hojas. La marca comercial estudiada ha sido SD 300 Pro de Solido.
- Impresoras basadas en la fotopolimerización. La marca comercial estudiada ha sido V-Flash 3D Printer de 3D Systems.

Características estudiadas:

- Precisión dimensional.
- Acabado superficial.
- Comparación de los procesos en función del tiempo de fabricación, cantidad de material empleado y coste de fabricar una pieza.

Pieza patrón: la pieza patrón empleada (ver Figura 53) se ha diseñado a partir de la estructura modificada de Grimm, para así incluir un mayor número de características geométricas para su estudio y medición.

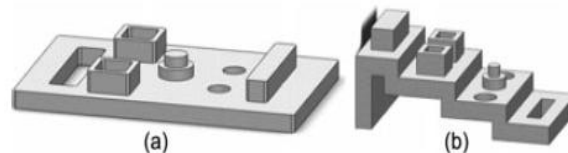


FIGURA 53

Resultados:

- Los autores han realizado un sistema de ordenación de los resultados, de manera que les permita realizar comparaciones entre los distintos procesos de fabricación.
- En base a las comparaciones obtenidas, se recomienda qué proceso es más adecuado en función de las posibles aplicaciones.

El sistema diseñado para poder comparar resultados obtenidos en distintos procesos es muy útil y permite profundizar en la materia, por lo que es un valor añadido a trabajos previos. De igual modo, ofrece unas breves pautas de aplicación de los procesos estudiados, sin embargo, no se ha realizado una base de datos con tal función, que en cambio podría ser de gran utilidad. La elección de procesos para el estudio, es amplia y cubre distintas posibilidades, pero deja fuera otros procesos, como los basados en metales, que están adquiriendo importancia.

[23] “PROCESS CAPABILITY STUDY OF POLYJET PRINTING FOR PLASTIC COMPONENTS”

Autor: Rupinder Singh

Proceso estudiado: impresión polyjet (Polyjet printing) en tres materiales plásticos distintos: Full Cure 720, Vero White y Vero Blue)

Pieza patrón: no se emplea una como tal sino que se fabrican las dos mitades de la carcasa de un pen USB con tres materiales distintos y se orientan según los tres ejes X, Y y Z de la máquina.

Características estudiadas:

- Evaluación de la desviación entre las magnitudes medidas con MMC y el CAD.
- Obtención del grado IT de calidad (ISO UNI EN 20286-1) en función de los resultados de medición.
- Coste de fabricación de la pieza en función del material y la orientación.

Resultados:

- Se han medido una serie de puntos de las carcasas para realizar un análisis de capacidad de la máquina y los distintos grados de calidad IT en cada punto.
- Estudios de capacidad con cp, cpk y gráfico de control X-R e histograma.

Este estudio se centra en analizar parámetros propios de cualquier proceso productivo. Es un enfoque que no se había realizado antes pero que puede aportar también resultados válidos y, lo más importante, aplicables para el empleo de máquina de Fabricación Aditiva en un entorno industrial real.

[8] "TOWARD GENERIC MODELS FOR COMPARATIVE EVALUATION AND PROCESS SELECTION IN RAPID PROTOTYPING AND MANUFACTURING"

Autores: . Xu, Y. S. Wong, H. T. Loh

Procesos de Fabricación Aditiva estudiados:

- SL (Stereolithography).
- SLS (Selective Laser Sintering).
- FDM (Fused Deposition Modeling).
- LOM (Laminated Object Manufacturing).

Pieza patrón: La pieza patrón (ver Figura 54) ha sido diseñada por los autores del trabajo y está planteada para dar respuesta a las características de estudio, para lo cual incluye algunas de las siguientes (los valores indicados son los valores mínimos diseñados): paredes delgadas (0,4mm), cavidades (0,2 mm), agujeros de pequeño diámetro (0,8mm) y cilindros de pequeño diámetro (0,4mm).

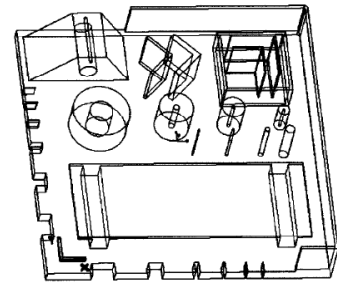


FIGURA 54

Características estudiadas:

- Precisión dimensional de las piezas fabricadas.
- Capacidad de cada proceso para construir características geométricas especiales: paredes delgadas, agujeros, cavidades, etc.
- Costes de fabricación de la pieza incluyendo coste de material y coste de tiempo de preparación, fabricación y post-procesos

Resultados:

- Las diferencias encontradas en las piezas fabricadas se deben a que cada proceso tiene distinto principio de funcionamiento.
- En este trabajo no solo se incluyen estudios experimentales para evaluar el funcionamiento de cada proceso sino también medios analíticos para analizar la capacidad de cada uno de ellos.

Este estudio se centra principalmente en las propiedades geométricas de piezas fabricadas mediante cuatro procesos distintos de Fabricación Aditiva. Sin embargo, para determinar la idoneidad de un proceso para realizar una pieza específica es necesario además analizar las propiedades mecánicas de la pieza resultante. Por ello, se propone en el artículo, como trabajo futuro, la realización de una base de datos con los parámetros del proceso, material empleado, geometría y criterios de aplicación. Con respecto a trabajos anteriores, este estudio incluye también datos sobre costes de fabricación con los distintos procesos, teniendo en cuenta factores temporales, materiales y económicos.

[10] "A STUDY ON SHRINKAGE COMPENSATION OF THE SLS PROCESS BY USING THE TAGUCHI METHOD"

Autores: H. J. Yang, P. J. Hwang, S. H. Lee

Proceso estudiado: SLS (Selective Laser Sintering)

Pieza patrón: se han diseñado dos piezas patrón. Para la primera de ellas (ver Figura 55) se ha aplicado el método Taguchi para el estudio de los factores que influyen en las contracciones que aparecen en piezas fabricadas con SLS. Para ello, las piezas A estudian los factores controlables y las piezas B los factores no controlables. Las piezas A y B se han ensayado separadamente. Por otro lado, la segunda

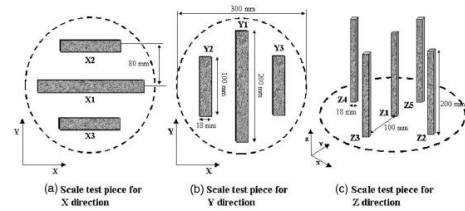


Fig. 4. Scale test pieces for X, Y, Z axes.

FIGURA 55

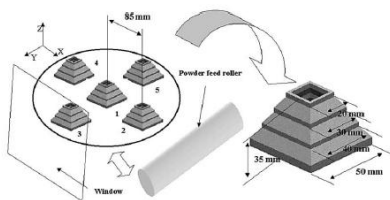


Fig. 6. The parking location of test geometry in building chamber.

FIGURA 56

pieza patrón (ver Figura 56) es un juego de piezas con el mismo diseño de distintos tamaños y en distintas orientaciones.

Características estudiadas:

- Se han realizado 10 experimentos con las piezas A para medir la influencia de factores conocidos en la contracción de piezas.
- Se han realizado 3 experimentos con las piezas B para medir la influencia de factores no conocidos en la contracción de piezas.

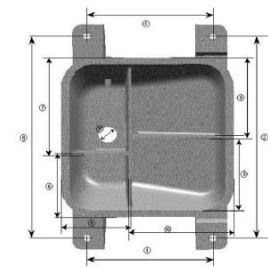


FIGURA 57

Resultados:

- Se han empleado el análisis de varianza ANOVA partir de las segundas piezas para determinar la contribución de cada factor con su error.
- Con el método Taguchi se obtienen factores para mantener la precisión dimensional tras aplicar cambios en la orientación de las piezas para reducir las contracciones.

En todo proceso de fabricación existen factores controlables y no controlables, pero en estudios anteriores sólo se analizaban los controlables. Por ello, este estudio aporta una nueva línea de investigación que incluye el estudio de factores no controlables pero sí influyentes.

[12] "PARAMETRIC PROCESS OPTIMIZATION TO IMPROVE THE ACCURACY OF RAPID PROTOTYPED STEREO LITHOGRAPHY PARTS"

Autores: Jack G. Zhou, Daniel Herscovici, Calvin C. Chen

Proceso estudiado: SL (Stereo Lithography)

Pieza patrón: está formada por la misma estructura (ver Figura 58) repetida 20 veces formando una matriz. Contiene varias características geométricas y dimensionales que se fabrican habitualmente.

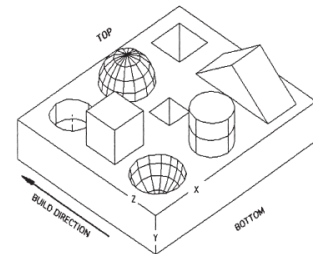


FIGURA 58

Características estudiadas:

- Buscar las relaciones entre la precisión de una pieza y los parámetros de la máquina usando el método Taguchi y optimización.
- Se ha fabricado la pieza patrón en forma matricial para poder realizar análisis estadístico a partir de medidas hechas con MMC.
- Se ha estudiado el efecto de 5 factores en la precisión dimensional y geométrica.

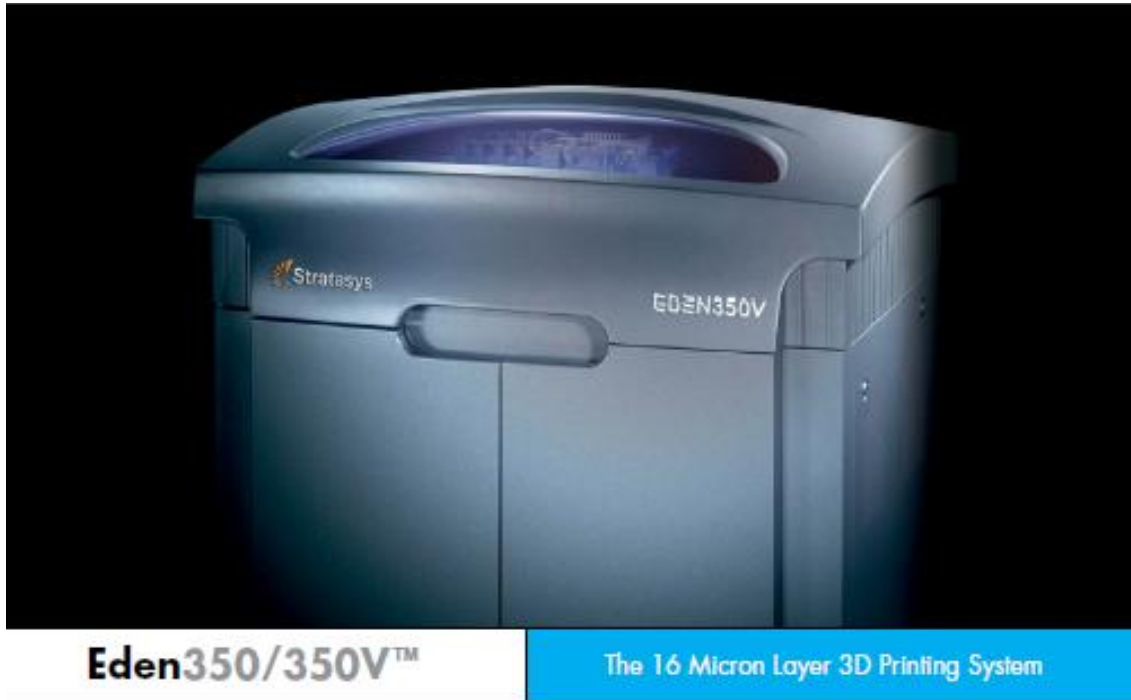
Resultados:

- Se ha realizado un análisis de varianza ANOVA.
- Se han obtenido desviaciones estándar y ratios entre factores.

Este estudio propone una pieza sencilla y la repite con una estructura matricial, eliminando el reducido número de puntos de medida de la pieza unitaria. Además, al repetir el mismo diseño se pueden comparar resultados en distintas zonas de la bandeja de impresión. Sin embargo, solo se analiza un proceso, y la estructura de la pieza propuesta es idónea para repetirla con distintos procesos y realizar comparaciones entre ellos.

ANEXO II: ESPECIFICACIONES Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA IMPRESORA EDEN 350V

HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS



Enjoy high productivity & flexibility
with outstanding model quality

- Eden350/350V**
 - Ultra-thin-layer Objet inkjet-based 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 StratasyS Connex350 3D Printer



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

20-85µm for features below 50mm
Up to 200µm 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: rigid opaque material
- Objet DuraWhite: 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:

- Optimas-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 specifications are subject to change without notice



www.stratasys.com | www.objet.com | objet-info@stratasys.com



© 2012 Stratasys Ltd. All rights reserved. Stratasys, Stratasys logo, Objet, For a 3D World, Objet24, Objet 30 Pro, Objet Studio, Quadra, QuadraTempo, FullCure, SHR, Eden, Eden250, Eden260, Eden260V, Eden 330, Eden350, Eden350N, Eden350N Jo Manager, CADMatrix, Connex, Objet260 Connex, Connex350, Connex500, Alaris, Alaris30, Polylog, TangoBlack, TangoGray, TangoPlus, TangoBlackPlus, VeroBlue, VeroBlack, VeroBlackPlus, VeroClear, VeroDent, VeroGray, VeroWhite, VeroWhitePlus, Dura, Digital Materials, PolyJet, PolyJet Matrix, ABS-like and ObjetGreen are trademarks or registered trademarks of Stratasys Ltd. and/or its subsidiaries or affiliates and may be registered in certain jurisdictions. All other trademarks belong to their respective owners.



Q3/12

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de funcionamiento de la impresora 3D empleada en este proyecto es el proceso PolyJet de Objet que trabaja con fotopolímeros.



FIGURA 32. IMPRESORA EDEN 350V

Los procesos de impresión 3D en general, se basan en la superposición de capas de material hasta obtener la geometría final. Esto implica que zonas huecas sobre las que posteriormente deben “construirse” capas de material no puedan fabricarse directamente. Para ello se emplea el material de soporte se deposita durante la fabricación de “zonas huecas”. Durante el proceso de limpieza de la pieza, este material se elimina con facilidad.

El cabezal de inyección de la máquina expulsa el material para fabricar la pieza y el material de soporte por toda la zona de trabajo mediante pasadas sucesivas. Tras depositar el material, una lámpara superior emite luz UV que provoca la reacción del material y su endurecimiento.

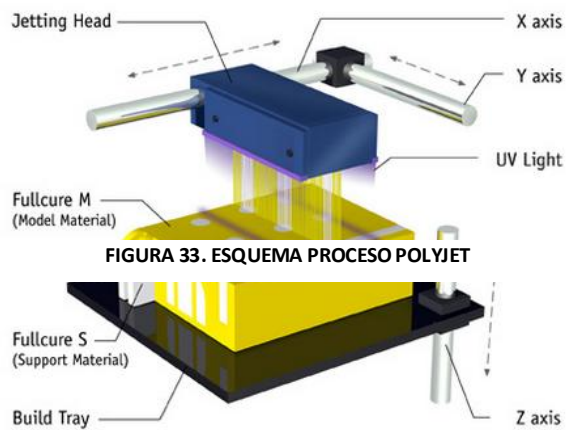


FIGURA 33. ESQUEMA PROCESO POLYJET

The Objet PolyJet Process

ANEXO III: CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

MATERIAL FC720:

Property	ASTM	Metric		Imperial	
Tensile Strength	D-638-03	MPa	60	psi	8744
Modulus of Elasticity	D-638-04	MPa	2870	psi	416150
Elongation at Break	D-638-05	%	20	%	20
Flexural Strength	D-790-03	MPa	76	psi	10991
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	1718	psi	249110
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	24	ft lb/in	0.4
Shore Hardness	Scale D	Scale D	83	Scale D	83
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	81	Scale M	81
HDT at 0.45 MPa	D-648-06	°C	48	°F	119
HDT at 1.82 MPa	D-648-07	°C	44	°F	112
Tg	DMA, E"	°C	49	°F	120
Ash Content	NA	%	<0.03	%	<0.03
Water Absorption	D570-98 24 Hr	%	1.53	%	1.53

FIGURA 34. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MATERIAL FC720 (FUENTE: FOLLETO "FULLCURE MATERIAL" DE OBJECT)

MATERIAL RGD525:

	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	70-80	psi	10,000-11,500
Elongation at break	D-638-05	%	10-15	%	10-15
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	3200-3500	psi	465,000-510,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	110-130	psi	16,000-19,000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	3100-3500	psi	450,000-510,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	63-67	°F	145-163
HDT, °C @ 0.45MPa after thermal post treatment procedure A	D-648-06	°C	75-80	°F	167-176
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	55-57	°F	131-135
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	14-16	ft lb/inch	0.262-0.300
Water Absorption, %	D-570-98 24hr	%	1.2-1.4	%	1.2-1.4
Tg	DMA, E»	°C	62-65	°F	144-149
Shore D	Scale D	Scale D	87-88	Scale D	87-88
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	78-83	Scale M	78-83
Polymerized density	ASTM D792	g/cm3	1.17-1.18		
Ash content	USP281	%	0.38-0.42	%	0.38-0.42

FIGURA 35. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MATERIAL RGD525 (FUENTE: FOLLETO "POLYJET MATERIALS DATA SHEET" DE STRATASYS)

ANEXO IV: HOJAS DE TOMA DE DATOS

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 01/1							
Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A1				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	01/07/2014	T (°C):	20				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PLANOS

	S (mm)	Forma
Plano 1	0,0091	0,0113
Plano 2	0,0085	0,0213
Plano 3	0,0116	0,0186
Plano 4	0,0137	0,0258
Plano 5	0,0103	0,0172
Plano 6	-	-
Plano 7	-	-

PARALELISMO

		Forma
Plano 1	Plano 5	-
Plano 2	Plano 4	-
Plano 3	Plano 7	-

PERPENDICULARIDAD

		Forma
Plano 1	Plano 4	-
Plano 1	Plano 7	-
Plano 2	Plano 5	-
Plano 2	Plano 7	-
Plano 3	Plano 4	-
Plano 3	Plano 5	-
Plano 5	Plano 4	-
Plano 7	Plano 4	-

COAXIALIDAD

		Forma
Cilindro 1	Cilindro 2	-
Cilindro 3	Cilindro 4	-

CILINDROS

	Posición del centro (mm)			Diámetro (mm)	S (mm)	Forma
	X	Y	Z			
Cilindro 1	9,9924	10,0789	-1,6970	14,1225	0,0584	0,0977
Cilindro 2	10,1243	10,0802	-7,3004	8,1075	0,0438	0,0714
Cilindro 3	-	-	-	-	-	-
Cilindro 4	-	-	-	-	-	-

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 01/2

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A1				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	01/07/2014	T (°C):	20				
PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN:			-				
Patrón/Instrumento calibrador:			-				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PUNTOS MEDIDOS EN LOS CONOS

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Punto 1	17,0872	2,9918	-0,5961
Punto 2	3,0922	2,9847	-0,6206
Punto 3	2,9983	16,9794	-0,0158
Punto 4	17,0272	17,0114	-0,1437
Punto 5	-	-	-
Punto 6	-	-	-
Punto 7	-	-	-
Punto 8	-	-	-
Punto 9	-	-	-
Punto 10	-	-	-
Punto 11	-	-	-
Punto 12	-	-	-
Punto 13	-	-	-
Punto 14	-	-	-
Punto 15	-	-	-
Punto 16	-	-	-

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 02/1

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A2				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	02/07/2014	T (°C):	20				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PLANOS

	S (mm)	Forma
Plano 1	0,0079	0,0129
Plano 2	0,0091	0,0195
Plano 3	0,0166	0,0168
Plano 4	0,0164	0,0143
Plano 5	0,0128	0,0181
Plano 6	-	-
Plano 7	-	-

PARALELISMO

		Forma
Plano 1	Plano 5	-
Plano 2	Plano 4	-
Plano 3	Plano 7	-

PERPENDICULARIDAD

		Forma
Plano 1	Plano 4	-
Plano 1	Plano 7	-
Plano 2	Plano 5	-
Plano 2	Plano 7	-
Plano 3	Plano 4	-
Plano 3	Plano 5	-
Plano 5	Plano 4	-
Plano 7	Plano 4	-

COAXIALIDAD

		Forma
Cilindro 1	Cilindro 2	-
Cilindro 3	Cilindro 4	-

CILINDROS

	Posición del centro (mm)			Diámetro (mm)	S (mm)	Forma
	X	Y	Z			
Cilindro 1	10,0815	9,9014	-2,3000	14,1289	0,0412	0,0724
Cilindro 2	10,0770	9,8778	-6,7997	8,1371	0,0250	0,0394
Cilindro 3	-	-	-	-	-	-
Cilindro 4	-	-	-	-	-	-

HOJA DE TOMA DE DATOS N° 02/2

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A2				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	N° de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	02/07/2014	T (°C):	20				
PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN:			-				
Patrón/Instrumento calibrador:			-				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PUNTOS MEDIDOS EN LOS CONOS

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Punto 1	17,0403	3,0411	-0,5103
Punto 2	3,0978	2,9512	-0,1362
Punto 3	2,9675	16,9862	-0,2545
Punto 4	17,1021	17,0724	-0,177
Punto 5	-	-	-
Punto 6	-	-	-
Punto 7	-	-	-
Punto 8	-	-	-
Punto 9	-	-	-
Punto 10	-	-	-
Punto 11	-	-	-
Punto 12	-	-	-
Punto 13	-	-	-
Punto 14	-	-	-
Punto 15	-	-	-
Punto 16	-	-	-

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 03/1

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A3				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	24/07/2014	T (°C):	20				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PLANOS

	S (mm)	Forma
Plano 1	0,0072	0,0060
Plano 2	0,0056	0,0069
Plano 3	0,0070	0,0054
Plano 4	0,0073	0,0033
Plano 5	0,0078	0,0040
Plano 6	0,0051	0,0026
Plano 7	0,0066	0,0075

PARALELISMO

		Forma
Plano 1	Plano 5	0,0094
Plano 2	Plano 4	0,0047
Plano 3	Plano 7	0,0070

PERPENDICULARIDAD

		Forma
Plano 1	Plano 4	0,0061
Plano 1	Plano 7	0,0074
Plano 2	Plano 5	0,0032
Plano 2	Plano 7	0,0023
Plano 3	Plano 4	0,0015
Plano 3	Plano 5	0,0046
Plano 5	Plano 4	0,0027
Plano 7	Plano 4	0,0084

COAXIALIDAD

		Forma
Cilindro 1	Cilindro 2	0,0046
Cilindro 3	Cilindro 4	0,0073

CILINDROS

	Posición del centro (mm)			Diámetro (mm)	S (mm)	Forma
	X	Y	Z			
Cilindro 1	9,9919	10,0033	-2,9002	13,9977	0,0019	0,0078
Cilindro 2	9,9903	10,0024	-6,4002	7,9901	0,0024	0,0041
Cilindro 3	-3,0995	9,9989	9,9968	14,0018	0,0054	0,0091
Cilindro 4	-7,0002	9,9981	10,0061	8,0031	0,0049	0,0078

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 03/2

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A3				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	24/07/2014	T (°C):	20				
PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN:			-				
Patrón/Instrumento calibrador:			-				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PUNTOS MEDIDOS EN LOS CONOS

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Punto 1	17,0087	2,9938	-0,0176
Punto 2	2,9958	2,9925	-0,1647
Punto 3	3,0051	17,0073	-0,4039
Punto 4	17,0047	17,0067	-0,1877
Punto 5	16,9916	-0,0212	-2,9984
Punto 6	-3,0097	-0,0569	17,0032
Punto 7	-4,9955	4,2391	19,7798
Punto 8	-4,9912	15,7753	19,8890
Punto 9	16,9981	19,7747	-2,9903
Punto 10	-3,0026	19,5734	16,9990
Punto 11	19,7085	17,0078	-2,9984
Punto 12	19,8094	2,9983	-2,9944
Punto 13	-0,0186	2,9961	3,0045
Punto 14	-0,1357	3,0052	16,9961
Punto 15	-0,1239	17,0026	17,0036
Punto 16	-0,1258	17,0029	2,9903

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 04/1

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A4				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	29/07/2014	T (°C):	20				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PLANOS

	S (mm)	Forma
Plano 1	0,0035	0,0074
Plano 2	0,0053	0,0022
Plano 3	0,0041	0,0093
Plano 4	0,0077	0,0070
Plano 5	0,0038	0,0034
Plano 6	0,0074	0,0060
Plano 7	0,0092	0,0085

PARALELISMO

		Forma
Plano 1	Plano 5	0,0059
Plano 2	Plano 4	0,0036
Plano 3	Plano 7	0,0050

PERPENDICULARIDAD

		Forma
Plano 1	Plano 4	0,0068
Plano 1	Plano 7	0,0081
Plano 2	Plano 5	0,0042
Plano 2	Plano 7	0,0025
Plano 3	Plano 4	0,0020
Plano 3	Plano 5	0,0051
Plano 5	Plano 4	0,0028
Plano 7	Plano 4	0,0091

COAXIALIDAD

		Forma
Cilindro 1	Cilindro 2	0,0062
Cilindro 3	Cilindro 4	0,0078

CILINDROS

	Posición del centro (mm)			Diámetro (mm)	S (mm)	Forma
	X	Y	Z			
Cilindro 1	9,9978	10,0056	-2,9002	13,9974	0,0069	0,0071
Cilindro 2	9,9917	10,0074	-6,4003	7,9936	0,0034	0,0059
Cilindro 3	-2,8777	9,9964	9,9957	14,0071	0,0028	0,0077
Cilindro 4	-6,5848	9,9977	9,9981	8,0062	0,0060	0,0086

HOJA DE TOMA DE DATOS N° 04/2

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A4				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	N° de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:	-	mm	
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	29/07/2014	T (°C):	20				
PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN:			-				
Patrón/Instrumento calibrador:			-				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PUNTOS MEDIDOS EN LOS CONOS

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Punto 1	17,0099	3,0063	-0,1265
Punto 2	3,0033	2,9917	-0,3561
Punto 3	2,9941	17,0035	-0,3785
Punto 4	17,0013	16,9998	-0,0068
Punto 5	17,0016	-0,0105	-2,9936
Punto 6	-3,0014	-0,0007	17,0067
Punto 7	-5,0021	4,2358	19,7970
Punto 8	-4,9903	15,7782	19,8886
Punto 9	16,9917	19,8255	-2,9991
Punto 10	-3,0073	19,9126	17,0051
Punto 11	19,8615	17,0015	-2,9993
Punto 12	19,7102	3,0089	-2,9919
Punto 13	-0,0286	2,9931	3,0018
Punto 14	-0,1301	3,0083	16,9939
Punto 15	-0,126	17,0052	17,0019
Punto 16	-0,1308	16,9989	2,9918

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 05/1

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A5				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:		T (°C):	20				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PLANOS

	S (mm)	Forma
Plano 1	0,0088	0,0091
Plano 2	0,0053	0,0063
Plano 3	0,0043	0,0085
Plano 4	0,0021	0,0050
Plano 5	0,0060	0,0041
Plano 6	0,0015	0,0061
Plano 7	0,0085	0,0096

PARALELISMO

		Forma
Plano 1	Plano 5	0,0067
Plano 2	Plano 4	0,0058
Plano 3	Plano 7	0,0050

PERPENDICULARIDAD

		Forma
Plano 1	Plano 4	0,0064
Plano 1	Plano 7	0,0069
Plano 2	Plano 5	0,0034
Plano 2	Plano 7	0,0019
Plano 3	Plano 4	0,0021
Plano 3	Plano 5	0,0049
Plano 5	Plano 4	0,0026
Plano 7	Plano 4	0,0079

COAXIALIDAD

		Forma
Cilindro 1	Cilindro 2	0,0064
Cilindro 3	Cilindro 4	0,0082

CILINDROS

	Posición del centro (mm)			Diámetro (mm)	S (mm)	Forma
	X	Y	Z			
Cilindro 1	10,0061	10,0024	-2,9436	14,0021	0,0041	0,0074
Cilindro 2	10,0052	10,0014	-6,9435	8,0076	0,0061	0,0052
Cilindro 3	-3,0845	9,9928	9,9954	13,9944	0,0058	0,0074
Cilindro 4	-7,0145	9,9918	9,9971	7,9939	0,0071	0,0082

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 05/2

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A5				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:	-	mm	
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:		T (°C):	20				
PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN:			-				
Patrón/Instrumento calibrador:			-				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PUNTOS MEDIDOS EN LOS CONOS

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Punto 1	16,9953	2,9918	-0,1350
Punto 2	2,9990	2,9914	-0,1545
Punto 3	3,0029	17,0020	-0,1678
Punto 4	17,0054	17,0013	-0,1666
Punto 5	16,9983	-0,0321	-2,9922
Punto 6	-3,0093	-0,0484	17,0040
Punto 7	-5,0021	4,2329	19,9546
Punto 8	-4,9958	15,7729	19,9945
Punto 9	17,0090	19,7193	-3,0014
Punto 10	-2,9952	19,7526	16,9970
Punto 11	19,8991	16,9944	-2,9907
Punto 12	19,9006	2,9990	-3,0160
Punto 13	-0,115	2,9994	2,9966
Punto 14	-0,1209	3,0045	17,0018
Punto 15	-0,111	17,0020	17,0013
Punto 16	-0,1284	16,9962	2,9943

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 06/1

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A6				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:		T (°C):	20				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PLANOS

	S (mm)	Forma
Plano 1	0,0019	0,0065
Plano 2	0,0097	0,0022
Plano 3	0,0035	0,0067
Plano 4	0,0084	0,0053
Plano 5	0,0027	0,0018
Plano 6	0,0018	0,0047
Plano 7	0,0057	0,0015

PARALELISMO

		Forma
Plano 1	Plano 5	0,0064
Plano 2	Plano 4	0,0019
Plano 3	Plano 7	0,0016

PERPENDICULARIDAD

		Forma
Plano 1	Plano 4	0,0045
Plano 1	Plano 7	0,0067
Plano 2	Plano 5	0,0040
Plano 2	Plano 7	0,0026
Plano 3	Plano 4	0,0022
Plano 3	Plano 5	0,0047
Plano 5	Plano 4	0,0027
Plano 7	Plano 4	0,0083

COAXIALIDAD

		Forma
Cilindro 1	Cilindro 2	0,0059
Cilindro 3	Cilindro 4	0,0071

CILINDROS

	Posición del centro (mm)			Diámetro (mm)	S (mm)	Forma
	X	Y	Z			
Cilindro 1	10,0072	10,056	-2,9643	14,0049	0,0083	0,0081
Cilindro 2	9,9912	10,0019	-6,9862	8,0095	0,0055	0,0094
Cilindro 3	-3,0167	10,0075	9,9924	13,9913	0,0089	0,0044
Cilindro 4	-7,0354	9,9916	10,0015	7,9918	0,0067	0,0077

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 06/2

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza A6				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:	-	mm	
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:		T (°C):	20				
PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN:			-				
Patrón/Instrumento calibrador:			-				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PUNTOS MEDIDOS EN LOS CONOS

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Punto 1	17,0018	3,0005	-0,1367
Punto 2	3,0017	2,9986	-0,1587
Punto 3	2,9917	17,0010	-0,1634
Punto 4	17,0015	17,0090	0,1989
Punto 5	17,0016	-0,0322	-2,9976
Punto 6	-2,9929	-0,0185	16,9960
Punto 7	-4,9972	4,2312	19,6458
Punto 8	-5,0028	15,7748	19,7560
Punto 9	17,0023	19,7684	-3,0053
Punto 10	-3,0019	19,8136	16,9959
Punto 11	19,9754	16,9982	-2,9974
Punto 12	19,9348	3,0018	-3,0011
Punto 13	-0,1675	3,0044	2,9928
Punto 14	-0,1526	2,9961	17,0011
Punto 15	-0,1742	17,0015	16,9984
Punto 16	-0,1246	17,0029	2,9964

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 07/1

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza B				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:	-	mm	
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	26/08/2014	T (°C):	20				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PLANOS

	Forma
Plano 1	0,0043
Plano 2	0,0016
Plano 3	0,0012
Plano 4	0,0025
Plano 5	0,0021
Plano 6	0,0033

PERPENDICULARIDAD

		Forma
Plano 1	Plano 2	0,0049
Plano 1	Plano 3	0,0028
Plano 2	Plano 3	0,0046

PARALELISMO

		Forma
Plano 1	Plano 5	0,0139
Plano 1	Plano 6	0,0121

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 07/2

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza B				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	26/08/2014	T (°C):	20				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

PUNTOS MEDIDOS EN CONOS

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Punto 1	7,5168	7,5034	-10,5869	Punto 27	49,9893	7,5131	4,3649
Punto 2	7,5126	20,0128	-10,5741	Punto 28	19,9899	7,4864	-10,5189
Punto 3	7,4841	50,0066	4,3421	Punto 29	75,8451	75,8467	-0,1521
Punto 4	7,4898	70,0128	4,3033	Punto 30	68,7767	68,7745	-0,1359
Punto 5	7,5162	100,0083	19,2217	Punto 31	61,7094	61,7062	-0,1256
Punto 6	7,5115	119,9905	19,1648	Punto 32	47,5782	47,5706	-0,0367
Punto 7	7,5183	149,9882	34,1283	Punto 33	40,5048	40,4964	-0,0294
Punto 8	7,4905	172,5121	34,0492	Punto 34	33,4365	33,4221	-0,5223
Punto 9	30,0131	172,4936	34,0233	Punto 35	104,1544	75,8462	-0,2094
Punto 10	60,0132	172,5144	18,9972	Punto 36	111,2236	68,7801	-0,5339
Punto 11	80,0172	172,5037	18,9855	Punto 37	118,2799	61,7296	-0,5581
Punto 12	110,0079	172,4856	3,9585	Punto 38	132,4182	47,5899	-0,6399
Punto 13	130,0184	172,4930	3,9979	Punto 39	139,4913	40,5092	-0,6859
Punto 14	160,0101	172,5163	-10,9988	Punto 40	146,5617	33,4168	-0,7302
Punto 15	172,5133	172,4958	-10,0670	Punto 41	104,1337	104,1326	-0,0792
Punto 16	172,4912	159,9828	-10,9950	Punto 42	111,2078	111,2043	-0,4709
Punto 17	172,4861	129,9961	4,0606	Punto 43	118,2801	118,2807	-0,0952
Punto 18	172,4871	109,9864	4,4729	Punto 44	132,4168	132,4114	-0,7871
Punto 19	172,5091	79,9837	19,0897	Punto 45	139,4890	139,4834	-0,3677
Punto 20	172,5083	59,9812	19,1847	Punto 46	146,5593	146,5786	-0,3133
Punto 21	172,5197	29,9919	34,4345	Punto 47	75,8614	104,1578	-0,0215
Punto 22	172,5145	7,4931	34,2439	Punto 48	68,7811	111,2074	-0,0004
Punto 23	150,0123	7,5165	34,2080	Punto 49	61,7109	118,2757	-0,6772
Punto 24	119,9874	7,5094	19,3787	Punto 50	47,5656	132,4192	-0,6707
Punto 25	99,9897	7,5188	19,2567	Punto 51	40,4961	139,5035	-0,7992
Punto 26	69,9849	7,5164	4,3350	Punto 52	33,4414	146,5699	-0,5187

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 07/3

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza B		
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:	-
		Y: 1200			
		Z: 600			
Fecha:	26/08/2014	T (°C):	20		
Realizado por:	Merced Cobertera Rey				

CILINDROS

	Posición del centro (mm)		
	X	Y	Z
Cilindro 1	7,5044	7,4963	-3,7008
Cilindro 2	7,5155	20,0010	-4,2996
Cilindro 3	7,5098	50,0059	7,9001
Cilindro 4	7,5177	70,0169	10,1994
Cilindro 5	7,5074	100,0026	25,3999
Cilindro 6	7,5025	120,0122	24,1998
Cilindro 7	7,4829	150,0187	39,4997
Cilindro 8	7,4811	172,4924	39,8000
Cilindro 9	29,9821	172,4871	39,5001
Cilindro 10	59,9966	172,5165	24,3998
Cilindro 11	80,0144	172,5081	24,5999
Cilindro 12	110,0101	172,5069	11,3999
Cilindro 13	130,0161	172,4857	9,5990
Cilindro 14	160,0129	172,5199	-5,3999
Cilindro 15	172,5144	172,5179	-4,4006
Cilindro 16	172,5091	160,0148	-3,9996
Cilindro 17	172,5192	129,9841	11,2001
Cilindro 18	172,5060	109,9909	10,6003
Cilindro 19	172,4868	79,9874	23,6000
Cilindro 20	172,4877	59,9803	24,1995
Cilindro 21	172,4911	29,9932	39,1091
Cilindro 22	172,5087	7,4981	41,7001
Cilindro 23	150,0111	7,4897	41,1002
Cilindro 24	120,0169	7,4855	25,8014
Cilindro 25	100,0165	7,4886	24,7001
Cilindro 26	70,0149	7,5120	9,7000
Cilindro 27	50,0102	7,5127	10,4001
Cilindro 28	20,0085	7,5069	-3,5013
Cilindro 29	90,0134	90,0051	-3,6002
Cilindro 30	90,0102	90,0053	7,4003
Cilindro 31	90,0080	90,0097	4,2000

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 07/4

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza B				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	26/08/2014	T (°C):	20				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

CILINDROS

	Posición del centro (mm)		
	X	Y	Z
Cilindro 32	152,0136	7,0158	25,0104
Cilindro 33	120,0176	6,9817	10,0048
Cilindro 34	100,0144	6,9967	9,9945
Cilindro 35	7,4943	7,0167	37,5095
Cilindro 36	7,4971	6,9833	22,4842
Cilindro 37	7,4871	7,0110	7,5077

PUNTOS MEDIDOS EN CONOS

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Punto 53	152,0161	10,0056	24,9909	Punto 59	10,0053	151,9907	24,9863
Punto 54	119,9960	10,9987	10,0132	Punto 60	10,9857	120,0164	10,0065
Punto 55	99,9970	10,9815	9,9847	Punto 61	10,9873	100,0068	10,0103
Punto 56	7,5070	10,9973	37,5154	Punto 62	10,0132	7,4850	37,4953
Punto 57	7,4938	10,0152	22,4931	Punto 63	10,9841	7,5120	22,5059
Punto 58	7,5138	10,9920	7,5153	Punto 64	10,9991	7,5008	7,4954

CILINDROS

	Posición del centro (mm)		
	X	Y	Z
Cilindro 38	7,0063	151,9921	24,9872
Cilindro 39	6,9998	120,0063	9,9837
Cilindro 40	7,0161	100,0081	10,0168
Cilindro 41	7,0155	7,4888	37,5068
Cilindro 42	6,9997	7,4861	22,4972
Cilindro 43	6,9979	7,5105	7,4808

HOJA DE TOMA DE DATOS Nº 07/5

Equipo:	MMC	Pieza medida:	Pieza B				
Marca:	Zeiss	Modelo:	PMC 850	Nº de serie:	-	Código interno:	-
Campo de medida:		X: 850	mm	División de escala:		-	mm
		Y: 1200					
		Z: 600					
Fecha:	26/08/2014	T (°C):	20				
Realizado por:	Merced Cobertera Rey						

CILINDROS

	Posición del centro (mm)		
	X	Y	Z
Cilindro 44	28,0187	172,9974	25,0064
Cilindro 45	60,0088	173,0073	10,0096
Cilindro 46	40,0140	172,9973	9,9826
Cilindro 47	172,4879	173,0153	37,5100
Cilindro 48	172,4876	173,0151	22,4832
Cilindro 49	172,5082	172,9980	7,4935

PUNTOS MEDIDOS EN CONOS

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Punto 65	27,9858	169,0016	25,0054	Punto 71	169,0136	28,0008	24,984
Punto 66	59,9918	169,9904	10,0039	Punto 72	169,0011	59,9976	9,9869
Punto 67	40,0184	169,9879	10,0091	Punto 73	169,016	39,9909	9,9834
Punto 68	172,5137	169,0129	37,4958	Punto 74	169,0036	172,5134	37,496
Punto 69	172,4856	169,0092	22,5042	Punto 75	169,0192	172,4854	22,4806
Punto 70	172,4856	169,9861	7,5103	Punto 76	169,9841	172,4884	7,4809

CILINDROS

	Posición del centro (mm)		
	X	Y	Z
Cilindro 50	173,0148	27,9992	24,9835
Cilindro 51	172,9930	59,9973	10,0033
Cilindro 52	173,0010	40,0140	10,0037
Cilindro 53	172,9829	172,5096	37,5155
Cilindro 54	172,9889	172,5121	22,4889
Cilindro 55	173,0133	172,4899	7,4848

ANEXO V: RESULTADOS DE MEDICIÓN DE LAS PIEZAS A

	PIEZA 1											
	Coordenadas impresora			Coordenadas pieza (mm)			Coordenadas impresora (mm)			xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)
	Xnom	Ynom	Znom	Xpieza	Ypieza	Zpieza	Ximp	Yimp	Zimp			
Punto 1	-	-17	-3	17,0872	2,9918	-0,5961	-0,5961	-17,0872	-2,9918	-	0,0872	0,0082
Punto 2	-	-3	-3	3,0922	2,9847	-0,6206	-0,6206	-3,0922	-2,9847	-	0,0922	0,0153
Punto 3	-	-3	-17	2,9983	16,9794	-0,0158	-0,0158	-2,9983	-16,9794	-	0,0017	0,0206
Punto 4	-	-17	-17	17,0272	17,0114	-0,1437	-0,1437	-17,0272	-17,0114	-	0,0272	0,0114
Punto 5	-3	-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 6	17	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 7	-	5	-4,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 8	-	5	-15,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 9	-3	-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 10	17	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 11	-3	-	-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 12	-3	-	-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 13	3	-	-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 14	17	-	-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 15	17	-	-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 16	3	-	-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cilindro 1	-	-10	-10	9,9924	10,0789	-1,697	-1,697	-9,9924	-10,0789	-	0,0076	0,0789
Cilindro 2	-	-10	-10	10,1243	10,0802	-7,3004	-7,3004	-10,1243	-10,0802	-	0,1243	0,0802
Cilindro 3	10	-	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cilindro 4	10	-	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

	PIEZA 2											
	Coordenadas impresora			Coordenadas pieza (mm)			Coordenadas impresora (mm)			xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)
	Xnom	Ynom	Znom	Xpieza	Ypieza	Zpieza	Ximp	Yimp	Zimp			
Punto 1	3	-17	-	17,0403	3,0411	-0,5103	3,0411	-17,0403	-0,5103	0,0411	0,0403	-
Punto 2	3	-3	-	3,0978	2,9512	-0,1362	2,9512	-3,0978	-0,1362	0,0488	0,0978	-
Punto 3	17	-3	-	2,9675	16,9862	-0,2545	16,9862	-2,9675	-0,2545	0,0138	0,0325	-
Punto 4	17	-17	-	17,1021	17,0724	-0,177	17,0724	-17,1021	-0,177	0,0724	0,1021	-
Punto 5	-	-17	-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 6	-	3	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 7	4,23	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 8	15,77	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 9	-	-17	-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 10	-	3	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 11	17	-	-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 12	3	-	-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 13	3	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 14	3	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 15	17	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Punto 16	17	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cilindro 1	10	-10	-	10,0815	9,9014	-2,3	9,9014	-10,0815	-2,3	0,0986	0,0815	-
Cilindro 2	10	-10	-	10,077	9,8778	-6,7997	9,8778	-10,077	-6,7997	0,1222	0,077	-
Cilindro 3	10	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cilindro 4	10	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

PIEZA 3												
Coordenadas impresora			Coordenadas pieza (mm)			Coordenadas impresora (mm)			xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)	
Xnom	Ynom	Znom	Xpieza	Ypieza	Zpieza	Ximp	Yimp	Zimp				
Punto 1	-	-17	-3	17,0087	2,9938	-0,0176	-0,0176	-17,0087	-2,9938	-	0,0087	0,0062
Punto 2	-	-3	-3	2,9958	2,9925	-0,1647	-0,1647	-2,9958	-2,9925	-	0,0042	0,0075
Punto 3	-	-3	-17	3,0051	17,0073	-0,4039	-0,4039	-3,0051	-17,0073	-	0,0051	0,0073
Punto 4	-	-17	-17	17,0047	17,0067	-0,1877	-0,1877	-17,0047	-17,0067	-	0,0047	0,0067
Punto 5	-3	-17	-	16,9916	-0,0212	-2,9984	-2,9984	-16,9916	0,0212	0,0016	0,0084	-
Punto 6	17	3	-	-3,0097	-0,0569	17,0032	17,0032	3,0097	0,0569	0,0032	0,0097	-
Punto 7	-	5	-4,23	-4,9955	4,2391	19,7798	19,7798	4,9955	-4,2391	-	0,0045	0,0091
Punto 8	-	5	-15,77	-4,9912	15,7753	19,889	19,889	4,9912	-15,7753	-	0,0088	0,0053
Punto 9	-3	-17	-	16,9981	19,7747	-2,9903	-2,9903	-16,9981	-19,7747	0,0097	0,0019	-
Punto 10	17	3	-	-3,0026	19,5734	16,999	16,999	3,0026	-19,5734	0,0010	0,0026	-
Punto 11	-3	-	-17	19,7085	17,0078	-2,9984	-2,9984	-19,7085	-17,0078	0,0016	-	0,0078
Punto 12	-3	-	-3	19,8094	2,9983	-2,9944	-2,9944	-19,8094	-2,9983	0,0056	-	0,0017
Punto 13	3	-	-3	-0,0186	2,9961	3,0045	3,0045	0,0186	-2,9961	0,0045	-	0,0039
Punto 14	17	-	-3	-0,1357	3,0052	16,9961	16,9961	0,1357	-3,0052	0,0039	-	0,0052
Punto 15	17	-	-17	-0,1239	17,0026	17,0036	17,0036	0,1239	-17,0026	0,0036	-	0,0026
Punto 16	3	-	-17	-0,1258	17,0029	2,9903	2,9903	0,1258	-17,0029	0,0097	-	0,0029
Cilindro 1	-	-10	-10	9,9919	10,0033	-2,9002	-2,9002	-9,9919	-10,0033	-	0,0081	0,0033
Cilindro 2	-	-10	-10	9,9903	10,0024	-6,4002	-6,4002	-9,9903	-10,0024	-	0,0097	0,0024
Cilindro 3	10	-	-10	-3,0995	9,9989	9,9968	9,9968	3,0995	-9,9989	0,0032	-	0,0011
Cilindro 4	10	-	-10	-7,0002	9,9981	10,0061	10,0061	7,0002	-9,9981	0,0061	-	0,0019

PIEZA 4												
Coordenadas impresora			Coordenadas pieza (mm)			Coordenadas impresora (mm)			xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)	
Xnom	Ynom	Znom	Xpieza	Ypieza	Zpieza	Ximp	Yimp	Zimp				
Punto 1	3	-17	-	17,0099	3,0063	-0,1265	3,0063	-17,0099	-0,1265	0,0063	0,0099	-
Punto 2	3	-3	-	3,0033	2,9917	-0,3561	2,9917	-3,0033	-0,3561	0,0083	0,0033	-
Punto 3	17	-3	-	2,9941	17,0035	-0,3785	17,0035	-2,9941	-0,3785	0,0035	0,0059	-
Punto 4	17	-17	-	17,0013	16,9998	-0,0068	16,9998	-17,0013	-0,0068	0,0002	0,0013	-
Punto 5	-	-17	-3	17,0016	-0,0105	-2,9936	-2,9936	-17,0016	-2,9936	-	0,0016	0,0064
Punto 6	-	3	17	-3,0014	-0,0007	17,0067	-0,0007	3,0014	17,0067	-	0,0014	0,0067
Punto 7	4,23	5	-	-5,0021	4,2358	19,797	4,2358	5,0021	19,797	0,0058	0,0021	-
Punto 8	15,77	5	-	-4,9903	15,7782	19,8886	15,7782	4,9903	19,8886	0,0082	0,0097	-
Punto 9	-	-17	-3	16,9917	19,8255	-2,9991	19,8255	-16,9917	-2,9991	-	0,0083	0,0009
Punto 10	-	3	17	-3,0073	19,9126	17,0051	19,9126	3,0073	17,0051	-	0,0073	0,0051
Punto 11	17	-	-3	19,8615	17,0015	-2,9993	17,0015	-19,8615	-2,9993	0,0015	-	0,0007
Punto 12	3	-	-3	19,7102	3,0089	-2,9919	3,0089	-19,7102	-2,9919	0,0089	-	0,0081
Punto 13	3	-	3	-0,0286	2,9931	3,0018	2,9931	0,0286	3,0018	0,0069	-	0,0018
Punto 14	3	-	17	-0,1301	3,0083	16,9939	3,0083	0,1301	16,9939	0,0083	-	0,0061
Punto 15	17	-	17	-0,126	17,0052	17,0019	17,0052	0,126	17,0019	0,0052	-	0,0019
Punto 16	17	-	3	-0,1308	16,9989	2,9918	16,9989	0,1308	2,9918	0,0011	-	0,0082
Cilindro 1	10	-10	-	9,9978	10,0056	-2,9002	10,0056	-9,9978	-2,9002	0,0056	0,0022	-
Cilindro 2	10	-10	-	9,9917	10,0074	-6,4003	10,0074	-9,9917	-6,4003	0,0074	0,0083	-
Cilindro 3	10	-	10	-2,8777	9,9964	9,9957	9,9964	2,8777	9,9957	0,0036	-	0,0043
Cilindro 4	10	-	10	-6,5848	9,9977	9,9981	9,9977	6,5848	9,9981	0,0023	-	0,0019

PIEZA 5												
Coordenadas impresora			Coordenadas pieza (mm)			Coordenadas impresora (mm)			xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)	
Xnom	Ynom	Znom	Xpieza	Ypieza	Zpieza	Ximp	Yimp	Zimp				
Punto 1	-	-17	-3	16,9953	2,9918	-0,135	-0,135	-16,9953	-2,9918	-	0,0047	0,0082
Punto 2	-	-3	-3	2,999	2,9914	-0,1545	-0,1545	-2,999	-2,9914	-	0,001	0,0086
Punto 3	-	-3	-17	3,0029	17,002	-0,1678	-0,1678	-3,0029	-17,002	-	0,0029	0,002
Punto 4	-	-17	-17	17,0054	17,0013	-0,1666	-0,1666	-17,0054	-17,0013	-	0,0054	0,0013
Punto 5	-3	-17	-	16,9983	-0,0321	-2,9922	-2,9922	-16,9983	0,0321	0,0078	0,0017	-
Punto 6	17	3	-	-3,0093	-0,0484	17,004	17,004	3,0093	0,0484	0,004	0,0093	-
Punto 7	-	5	-4,23	-5,0021	4,2329	19,9546	19,9546	5,0021	-4,2329	-	0,0021	0,0029
Punto 8	-	5	-15,77	-4,9958	15,7729	19,9945	19,9945	4,9958	-15,7729	-	0,0042	0,0029
Punto 9	-3	-17	-	17,009	19,7193	-3,0014	-3,0014	-17,009	-19,7193	0,0014	0,009	-
Punto 10	17	3	-	-2,9952	19,7526	16,997	16,997	2,9952	-19,7526	0,003	0,0048	-
Punto 11	-3	-	-17	19,8991	16,9944	-2,9907	-2,9907	-19,8991	-16,9944	0,0093	-	0,0056
Punto 12	-3	-	-3	19,9006	2,999	-3,0016	-3,0016	-19,9006	-2,999	0,0016	-	0,001
Punto 13	3	-	-3	-0,115	2,9994	2,9966	2,9966	0,115	-2,9994	0,0034	-	0,0006
Punto 14	17	-	-3	-0,1209	3,0045	17,0018	17,0018	0,1209	-3,0045	0,0018	-	0,0045
Punto 15	17	-	-17	-0,111	17,002	17,0013	17,0013	0,111	-17,002	0,0013	-	0,002
Punto 16	3	-	-17	-0,1284	16,9962	2,9943	2,9943	0,1284	-16,9962	0,0057	-	0,0038
Cilindro 1	-	-10	-10	10,0061	10,0024	-2,9436	-2,9436	-10,0061	-10,0024	-	0,0061	0,0024
Cilindro 2	-	-10	-10	10,0052	10,0014	-6,9435	-6,9435	-10,0052	-10,0014	-	0,0052	0,0014
Cilindro 3	10	-	-10	-3,0845	9,9928	9,9954	9,9954	3,0845	-9,9928	0,0046	-	0,0072
Cilindro 4	10	-	-10	-7,0145	9,9918	9,9971	9,9971	7,0145	-9,9918	0,0029	-	0,0082

	PIEZA 6											
	Coordenadas impresora			Coordenadas pieza (mm)			Coordenadas impresora (mm)			xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)
	Xnom	Ynom	Znom	Xpieza	Ypieza	Zpieza	Ximp	Yimp	Zimp			
Punto 1	-	-17	-3	17,0018	3,0005	-0,1367	-0,1367	-17,0018	-3,0005	-	0,0018	0,0005
Punto 2	-	-3	-3	3,0017	2,9986	-0,1587	-0,1587	-3,0017	-2,9986	-	0,0017	0,0014
Punto 3	-	-3	-17	2,9917	17,001	-0,1634	-0,1634	-2,9917	-17,001	-	0,0083	0,001
Punto 4	-	-17	-17	17,0015	17,009	0,1989	0,1989	-17,0015	-17,009	-	0,0015	0,009
Punto 5	-3	-17	-	17,0016	-0,0322	-2,9976	-2,9976	-17,0016	0,0322	0,0024	0,0016	-
Punto 6	17	3	-	-2,9929	-0,0185	16,996	16,996	2,9929	0,0185	0,004	0,0071	-
Punto 7	-	5	-4,23	-4,9972	4,2312	19,6458	19,6458	4,9972	-4,2312	-	0,0028	0,0012
Punto 8	-	5	-15,77	-5,0028	15,7748	19,756	19,756	5,0028	-15,7748	-	0,0028	0,0048
Punto 9	-3	-17	-	17,0023	19,7684	-3,0053	-3,0053	-17,0023	-19,7684	0,0053	0,0023	-
Punto 10	17	3	-	-3,0019	19,8136	16,9959	16,9959	3,0019	-19,8136	0,0041	0,0019	-
Punto 11	-3	-	-17	19,9754	16,9982	-2,9974	-2,9974	-19,9754	-16,9982	0,0026	-	0,0018
Punto 12	-3	-	-3	19,9348	3,0018	-3,0011	-3,0011	-19,9348	-3,0018	0,0011	-	0,0018
Punto 13	3	-	-3	-0,1675	3,0044	2,9928	2,9928	0,1675	-3,0044	0,0072	-	0,0044
Punto 14	17	-	-3	-0,1526	2,9961	17,0011	17,0011	0,1526	-2,9961	0,0011	-	0,0039
Punto 15	17	-	-17	-0,1742	17,0015	16,9984	16,9984	0,1742	-17,0015	0,0016	-	0,0015
Punto 16	3	-	-17	-0,1246	17,0029	2,9964	2,9964	0,1246	-17,0029	0,0036	-	0,0029
Cilindro 1	-	-10	-10	10,0072	10,0056	-2,9643	-2,9643	-10,0072	-10,0056	-	0,0072	0,0056
Cilindro 2	-	-10	-10	9,9912	10,0019	-6,9862	-6,9862	-9,9912	-10,0019	-	0,0088	0,0019
Cilindro 3	10	-	-10	-3,0167	10,0075	9,9924	9,9924	3,0167	-10,0075	0,0076	-	0,0075
Cilindro 4	10	-	-10	-7,0354	9,9916	10,0015	10,0015	7,0354	-9,9916	0,0015	-	0,0084

ANEXO VI: RESULTADOS DE MEDICIÓN DE LA PIEZA B

A continuación se muestran las tablas con los resultados de los errores de posición, indicando las dimensiones nominales de las entidades medidas, los valores medidos y los errores obtenidos.

	PIEZA 1								
	Coordenadas impresora			Coordenadas pieza			xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)
	Xnom	Ynom	Znom	Xpieza	Ypieza	Zpieza			
Punto 1	7,5	7,5	-	7,5168	7,5034	-10,5869	0,0168	0,0034	-
Punto 2	7,5	20	-	7,5126	20,0128	-10,5741	0,0126	0,0128	-
Punto 3	7,5	50	-	7,4841	50,0066	4,3421	0,0159	0,0066	-
Punto 4	7,5	70	-	7,4898	70,0128	4,3033	0,0102	0,0128	-
Punto 5	7,5	100	-	7,5162	100,0083	19,2217	0,0162	0,0083	-
Punto 6	7,5	120	-	7,5115	119,9905	19,1648	0,0115	0,0095	-
Punto 7	7,5	150	-	7,5183	149,9882	34,1283	0,0183	0,0118	-
Punto 8	7,5	172,5	-	7,4905	172,5121	34,0492	0,0095	0,0121	-
Punto 9	30	172,5	-	30,0131	172,4936	34,0233	0,0131	0,0064	-
Punto 10	60	172,5	-	60,0132	172,5144	18,9972	0,0132	0,0144	-
Punto 11	80	172,5	-	80,0172	172,5037	18,9855	0,0172	0,0037	-
Punto 12	110	172,5	-	110,0079	172,4856	3,9585	0,0079	0,0144	-
Punto 13	130	172,5	-	130,0184	172,4930	3,9979	0,0184	0,0070	-
Punto 14	160	172,5	-	160,0101	172,5163	-10,9988	0,0101	0,0163	-
Punto 15	172,5	172,5	-	172,5133	172,4958	-10,0670	0,0133	0,0042	-
Punto 16	172,5	160	-	172,4912	159,9828	-10,9950	0,0088	0,0172	-
Punto 17	172,5	130	-	172,4861	129,9961	4,0606	0,0139	0,0039	-
Punto 18	172,5	110	-	172,4871	109,9864	4,4729	0,0129	0,0136	-
Punto 19	172,5	80	-	172,5091	79,9837	19,0897	0,0091	0,0163	-
Punto 20	172,5	60	-	172,5083	59,9812	19,1847	0,0083	0,0188	-
Punto 21	172,5	30	-	172,5197	29,9919	34,4345	0,0197	0,0081	-
Punto 22	172,5	7,5	-	172,5145	7,4931	34,2439	0,0145	0,0069	-
Punto 23	150	7,5	-	150,0123	7,5165	34,2080	0,0123	0,0165	-
Punto 24	120	7,5	-	119,9874	7,5094	19,3787	0,0126	0,0094	-
Punto 25	100	7,5	-	99,9897	7,5188	19,2567	0,0103	0,0188	-
Punto 26	70	7,5	-	69,9849	7,5164	4,3350	0,0151	0,0164	-
Punto 27	50	7,5	-	49,9893	7,5131	4,3649	0,0107	0,0131	-
Punto 28	20	7,5	-	19,9899	7,4864	-10,5189	0,0101	0,0136	-

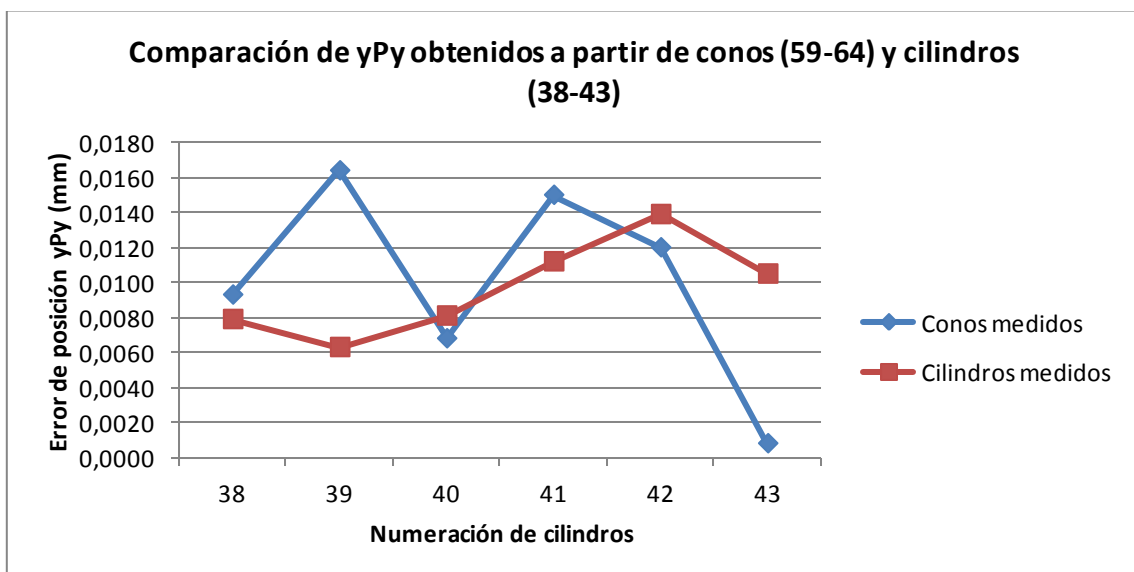
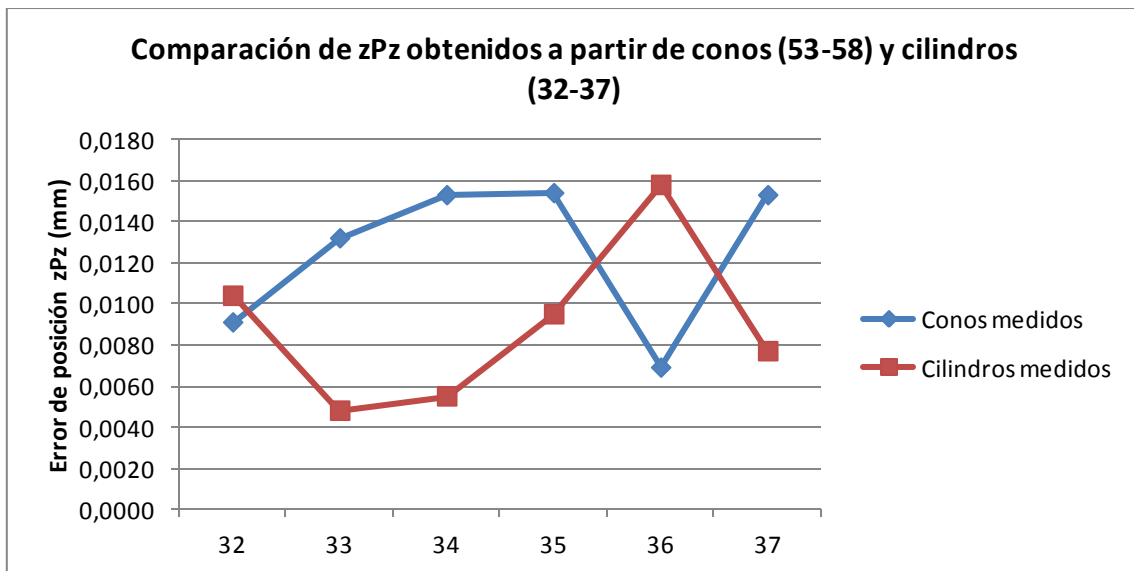
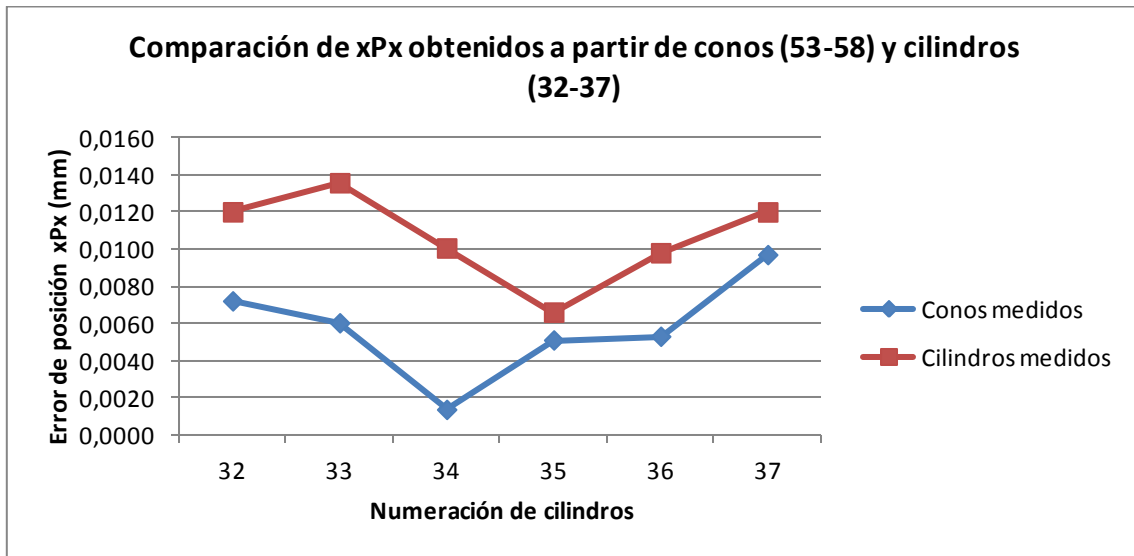
	PIEZA 1								
	Coordenadas impresora			Coordenadas pieza			xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)
	Xnom	Ynom	Znom	xpieza	ypieza	Zpieza			
Cilindro 1	7,5	7,5	-	7,5044	7,4963	-3,7008	0,0044	0,0037	-
Cilindro 2	7,5	20	-	7,5155	20,0010	-4,2996	0,0155	0,0010	-
Cilindro 3	7,5	50	-	7,5098	50,0059	7,9001	0,0098	0,0059	-
Cilindro 4	7,5	70	-	7,5177	70,0169	10,1994	0,0177	0,0169	-
Cilindro 5	7,5	100	-	7,5074	100,0026	25,3999	0,0074	0,0026	-
Cilindro 6	7,5	120	-	7,5025	120,0122	24,1998	0,0025	0,0122	-
Cilindro 7	7,5	150	-	7,4829	150,0187	39,4997	0,0171	0,0187	-
Cilindro 8	7,5	172,5	-	7,4811	172,4924	39,8000	0,0189	0,0076	-
Cilindro 9	30	172,5	-	29,9821	172,4871	39,5001	0,0179	0,0129	-
Cilindro 10	60	172,5	-	59,9966	172,5165	24,3998	0,0034	0,0165	-
Cilindro 11	80	172,5	-	80,0144	172,5081	24,5999	0,0144	0,0081	-
Cilindro 12	110	172,5	-	110,0101	172,5069	11,3999	0,0101	0,0069	-
Cilindro 13	130	172,5	-	130,0161	172,4857	9,5990	0,0161	0,0143	-
Cilindro 14	160	172,5	-	160,0129	172,5199	-5,3999	0,0129	0,0199	-
Cilindro 15	172,5	172,5	-	172,5144	172,5179	-4,4006	0,0144	0,0179	-
Cilindro 16	172,5	160	-	172,5091	160,0148	-3,9996	0,0091	0,0148	-
Cilindro 17	172,5	130	-	172,5192	129,9841	11,2001	0,0192	0,0159	-
Cilindro 18	172,5	110	-	172,5060	109,9909	10,6003	0,0060	0,0091	-
Cilindro 19	172,5	80	-	172,4868	79,9874	23,6000	0,0132	0,0126	-
Cilindro 20	172,5	60	-	172,4877	59,9803	24,1995	0,0123	0,0197	-
Cilindro 21	172,5	30	-	172,4911	29,9932	39,1091	0,0089	0,0068	-
Cilindro 22	172,5	7,5	-	172,5087	7,4981	41,7001	0,0087	0,0019	-
Cilindro 23	150	7,5	-	150,0111	7,4897	41,1002	0,0111	0,0103	-
Cilindro 24	120	7,5	-	120,0169	7,4855	25,8014	0,0169	0,0145	-
Cilindro 25	100	7,5	-	100,0165	7,4886	24,7001	0,0165	0,0114	-
Cilindro 26	70	7,5	-	70,0149	7,5120	9,7000	0,0149	0,0120	-
Cilindro 27	50	7,5	-	50,0102	7,5127	10,4001	0,0102	0,0127	-
Cilindro 28	20	7,5	-	20,0085	7,5069	-3,5013	0,0085	0,0069	-

	PIEZA 1								
	Coordenadas impresora			Coordenadas pieza			xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)
	Xnom	Ynom	Znom	xpieza	ypieza	Zpieza			
Punto 29	90,0000	90,0000	-	75,8451	75,8467	-0,1521	14,1549	14,1533	-
Punto 30	90,0000	90,0000	-	68,7767	68,7745	-0,1359	21,2233	21,2255	-
Punto 31	90,0000	90,0000	-	61,7094	61,7062	-0,1256	28,2906	28,2938	-
Punto 32	90,0000	90,0000	-	47,5782	47,5706	-0,0367	42,4218	42,4294	-
Punto 33	90,0000	90,0000	-	40,5048	40,4964	-0,0294	49,4952	49,5036	-
Punto 34	90,0000	90,0000	-	33,4365	33,4221	-0,5223	56,5635	56,5779	-
Punto 35	90,0000	90,0000	-	104,1544	75,8462	-0,2094	14,1544	14,1538	-
Punto 36	90,0000	90,0000	-	111,2236	68,7801	-0,5339	21,2236	21,2199	-
Punto 37	90,0000	90,0000	-	118,2799	61,7296	-0,5581	28,2799	28,2704	-
Punto 38	90,0000	90,0000	-	132,4182	47,5899	-0,6399	42,4182	42,4101	-
Punto 39	90,0000	90,0000	-	139,4913	40,5092	-0,6859	49,4913	49,4908	-
Punto 40	90,0000	90,0000	-	146,5617	33,4168	-0,7302	56,5617	56,5832	-
Punto 41	90,0000	90,0000	-	104,1337	104,1326	-0,0792	14,1337	14,1326	-
Punto 42	90,0000	90,0000	-	111,2078	111,2043	-0,4709	21,2078	21,2043	-
Punto 43	90,0000	90,0000	-	118,2801	118,2807	-0,0952	28,2801	28,2807	-
Punto 44	90,0000	90,0000	-	132,4168	132,4114	-0,7871	42,4168	42,4114	-
Punto 45	90,0000	90,0000	-	139,4890	139,4834	-0,3677	49,4890	49,4834	-
Punto 46	90,0000	90,0000	-	146,5593	146,5786	-0,3133	56,5593	56,5786	-
Punto 47	90,0000	90,0000	-	75,8614	104,1578	-0,0215	14,1386	14,1578	-
Punto 48	90,0000	90,0000	-	68,7811	111,2074	-0,0004	21,2189	21,2074	-
Punto 49	90,0000	90,0000	-	61,7109	118,2757	-0,6772	28,2891	28,2757	-
Punto 50	90,0000	90,0000	-	47,5656	132,4192	-0,6707	42,4344	42,4192	-
Punto 51	90,0000	90,0000	-	40,4961	139,5035	-0,7992	49,5039	49,5035	-
Punto 52	90,0000	90,0000	-	33,4414	146,5699	-0,5187	56,5586	56,5699	-
Cilindro 29	90	90	-	90,0134	90,0051	-3,6002	0,0134	0,0051	-
Cilindro 30	90	90	-	90,0102	90,0053	7,4003	0,0102	0,0053	-
Cilindro 31	90	90	-	90,0080	90,0097	4,2000	0,0080	0,0097	-

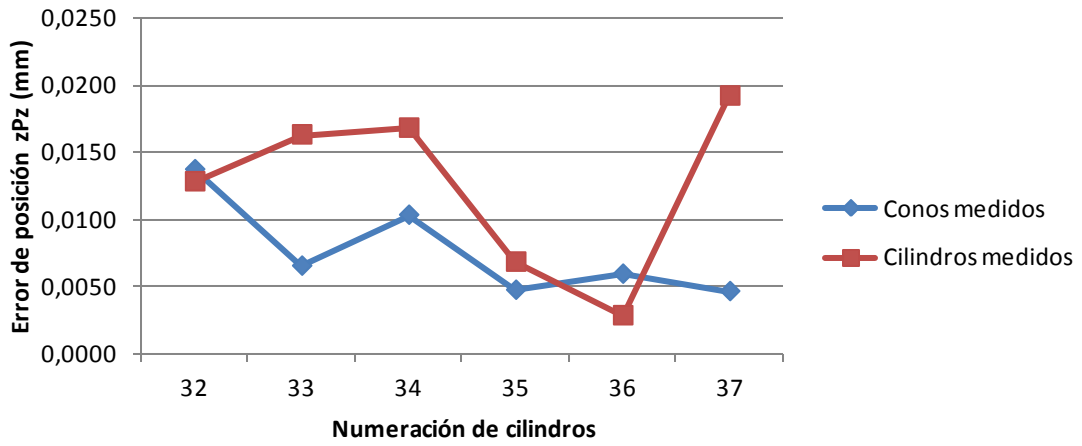
	PIEZA 1								
	Coordenadas impresora			Coordenadas pieza			xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)
	Xnom	Ynom	Znom	Xpieza	Ypieza	Zpieza			
Cilindro 32	152	-	25	152,0136	7,0158	25,0104	0,0136	-	0,0104
Cilindro 33	120	-	10	120,0176	6,9817	10,0048	0,0176	-	0,0048
Cilindro 34	100	-	10	100,0144	6,9967	9,9945	0,0144	-	0,0055
Cilindro 35	7,5	-	37,5	7,4943	7,0167	37,5095	0,0057	-	0,0095
Cilindro 36	7,5	-	22,5	7,4971	6,9833	22,4842	0,0029	-	0,0158
Cilindro 37	7,5	-	7,5	7,4871	7,0110	7,5077	0,0129	-	0,0077
Punto 53	152	-	25	152,0161	10,0056	24,9909	0,0161	-	0,0091
Punto 54	120	-	10	119,9960	10,9987	10,0132	0,0040	-	0,0132
Punto 55	100	-	10	99,9970	10,9815	9,9847	0,0030	-	0,0153
Punto 56	7,5	-	37,5	7,5070	10,9973	37,5154	0,0070	-	0,0154
Punto 57	7,5	-	22,5	7,4938	10,0152	22,4931	0,0062	-	0,0069
Punto 58	7,5	-	7,5	7,5138	10,9920	7,5153	0,0138	-	0,0153
Cilindro 38	-	152	25	7,0063	151,9921	24,9872	-	0,0079	0,0128
Cilindro 39	-	120	10	6,9998	120,0063	9,9837	-	0,0063	0,0163
Cilindro 40	-	100	10	7,0161	100,0081	10,0168	-	0,0081	0,0168
Cilindro 41	-	7,5	37,5	7,0155	7,4888	37,5068	-	0,0112	0,0068
Cilindro 42	-	7,5	22,5	6,9997	7,4861	22,4972	-	0,0139	0,0028
Cilindro 43	-	7,5	7,5	6,9979	7,5105	7,4808	-	0,0105	0,0192
Punto 59	-	152	25	10,0053	151,9907	24,9863	-	0,0093	0,0137
Punto 60	-	120	10	10,9857	120,0164	10,0065	-	0,0164	0,0065
Punto 61	-	100	10	10,9873	100,0068	10,0103	-	0,0068	0,0103
Punto 62	-	7,5	37,5	10,0132	7,4850	37,4953	-	0,0150	0,0047
Punto 63	-	7,5	22,5	10,9841	7,5120	22,5059	-	0,0120	0,0059
Punto 64	-	7,5	7,5	10,9991	7,5008	7,4954	-	0,0008	0,0046

	PIEZA 1								
	Coordenadas impresora			Coordenadas pieza			xPx (mm)	yPy (mm)	zPz (mm)
	Xnom	Ynom	Znom	Xpieza	Ypieza	Zpieza			
Cilindro 44	28	-	25	28,0187	172,9974	25,0064	0,0187	-	0,0064
Cilindro 45	60	-	10	60,0088	173,0073	10,0096	0,0088	-	0,0096
Cilindro 46	40	-	10	40,0140	172,9973	9,9826	0,0140	-	0,0174
Cilindro 47	172,5	-	37,5	172,4879	173,0153	37,5100	0,0121	-	0,0100
Cilindro 48	172,5	-	22,5	172,4876	173,0151	22,4832	0,0124	-	0,0168
Cilindro 49	172,5	-	7,5	172,5082	172,9980	7,4935	0,0082	-	0,0065
Punto 65	28	-	25	27,9858	169,0016	25,0054	0,0142	-	0,0054
Punto 66	60	-	10	59,9918	169,9904	10,0039	0,0082	-	0,0039
Punto 67	40	-	10	40,0184	169,9879	10,0091	0,0184	-	0,0091
Punto 68	172,5	-	37,5	172,5137	169,0129	37,4958	0,0137	-	0,0042
Punto 69	172,5	-	22,5	172,4856	169,0092	22,5042	0,0144	-	0,0042
Punto 70	172,5	-	7,5	172,4856	169,9861	7,5103	0,0144	-	0,0103
Cilindro 50	-	28	25	173,0148	27,9992	24,9835	-	0,0008	0,0165
Cilindro 51	-	60	10	172,9930	59,9973	10,0033	-	0,0027	0,0033
Cilindro 52	-	40	10	173,0010	40,0140	10,0037	-	0,0140	0,0037
Cilindro 53	-	172,5	37,5	172,9829	172,5096	37,5155	-	0,0096	0,0155
Cilindro 54	-	172,5	22,5	172,9889	172,5121	22,4889	-	0,0121	0,0111
Cilindro 55	-	172,5	7,5	173,0133	172,4899	7,4848	-	0,0101	0,0152
Punto 71	-	28	25	169,0136	28,0008	24,9840	-	0,0008	0,0160
Punto 72	-	60	10	169,0011	59,9976	9,9869	-	0,0024	0,0131
Punto 73	-	40	10	169,0160	39,9909	9,9834	-	0,0091	0,0166
Punto 74	-	172,5	37,5	169,0036	172,5134	37,4960	-	0,0134	0,0040
Punto 75	-	172,5	22,5	169,0192	172,4854	22,4806	-	0,0146	0,0194
Punto 76	-	172,5	7,5	169,9841	172,4884	7,4809	-	0,0116	0,0191
d4-5	-	-	15			14,9884	-	-	0,0116
d4-6	-	-	5			5,0105	-	-	0,0105
d5-6	-	-	10			9,9859	-	-	0,0141

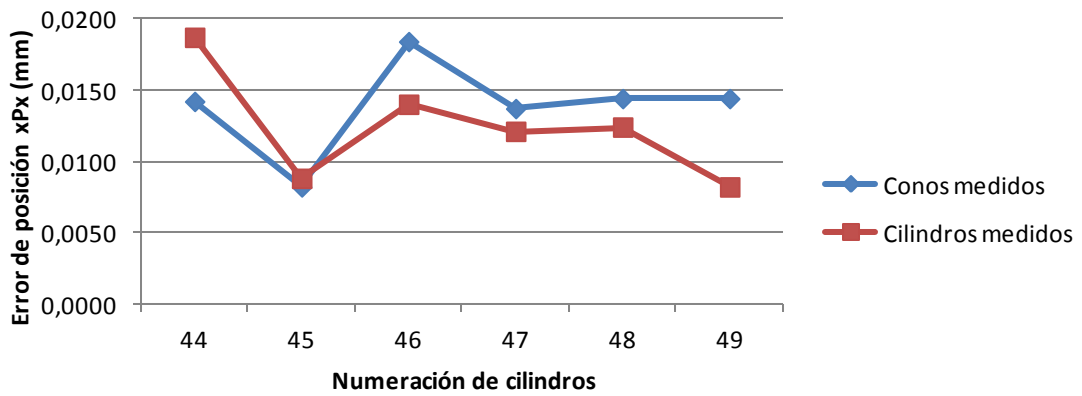
Las siguientes gráficas comparan los errores de posición obtenidos a partir de la medición de conos y cilindros:



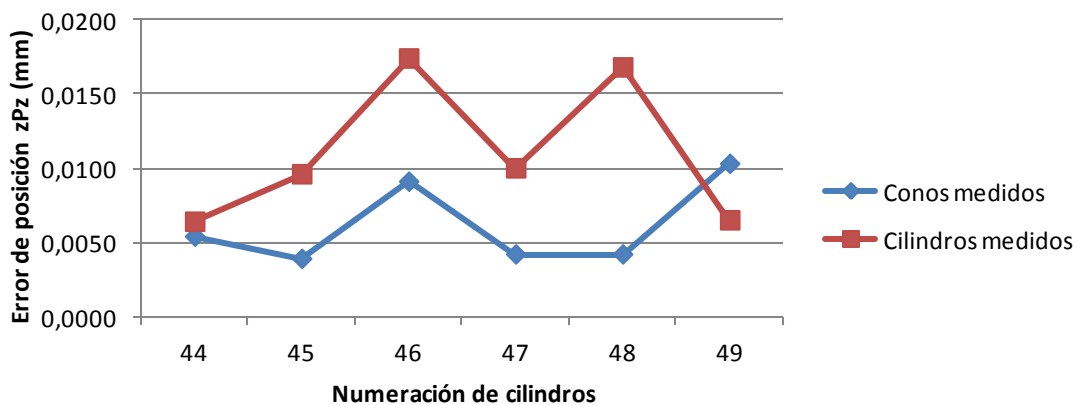
Comparación de zPz obtenidos a partir de conos (53-58) y cilindros (32-37)

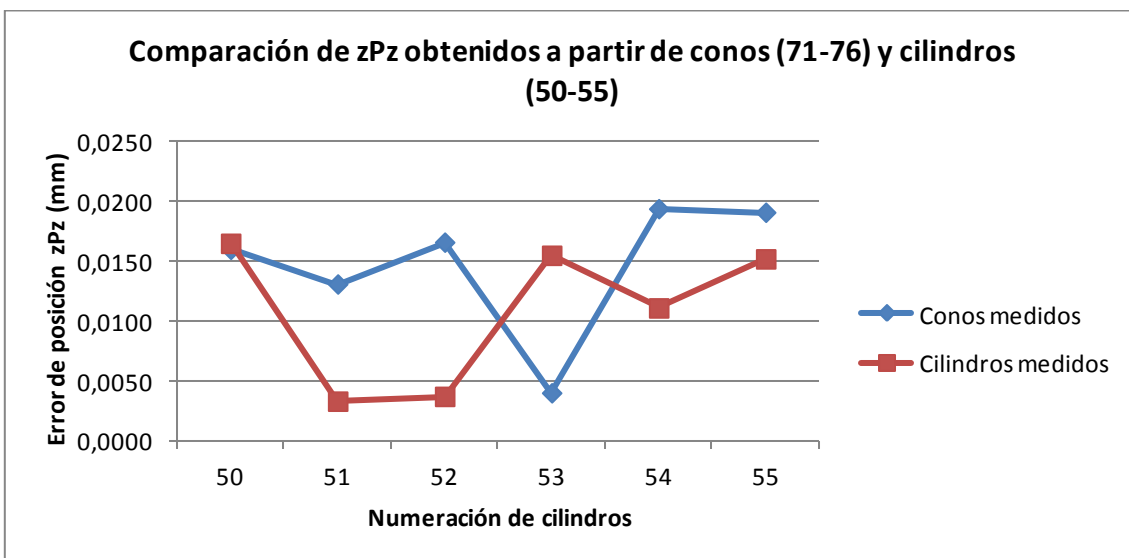
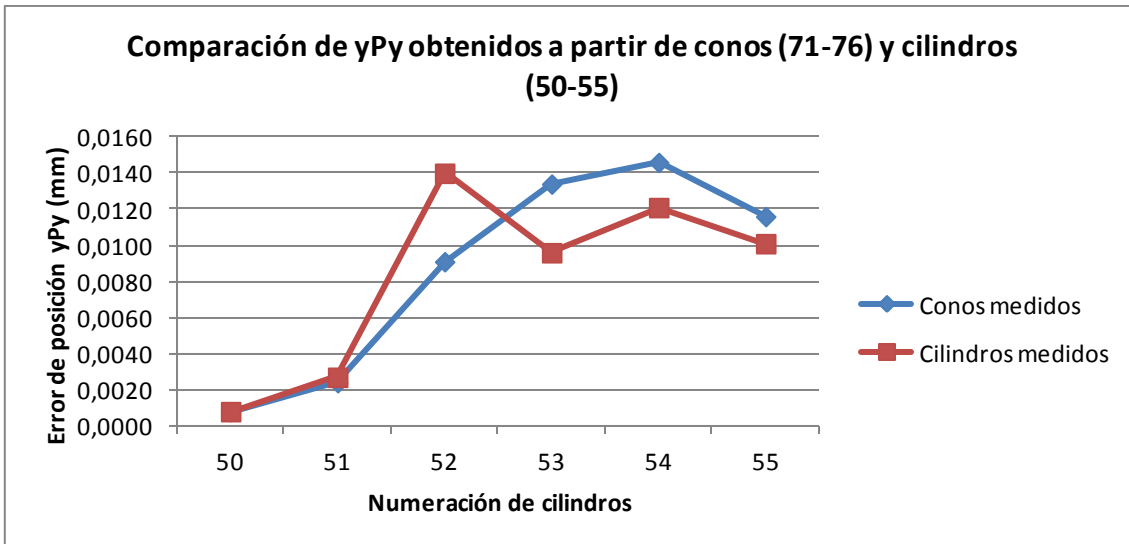


Comparación de xPx obtenidos a partir de conos (65-70) y cilindros (44-49)

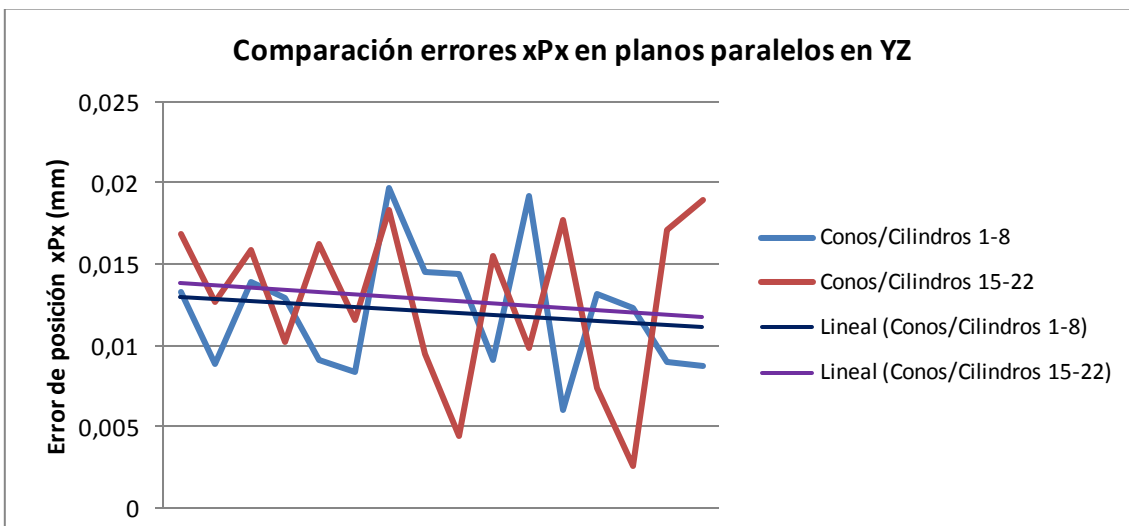


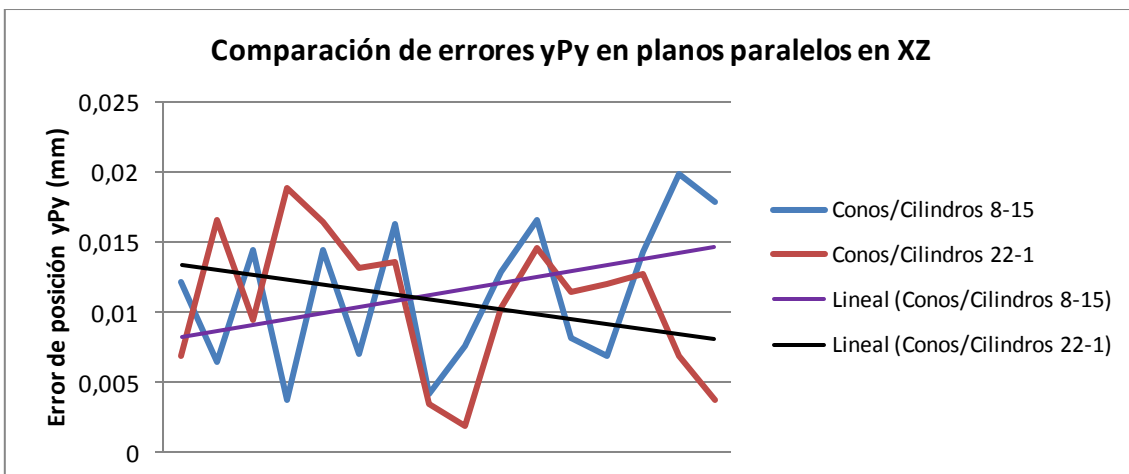
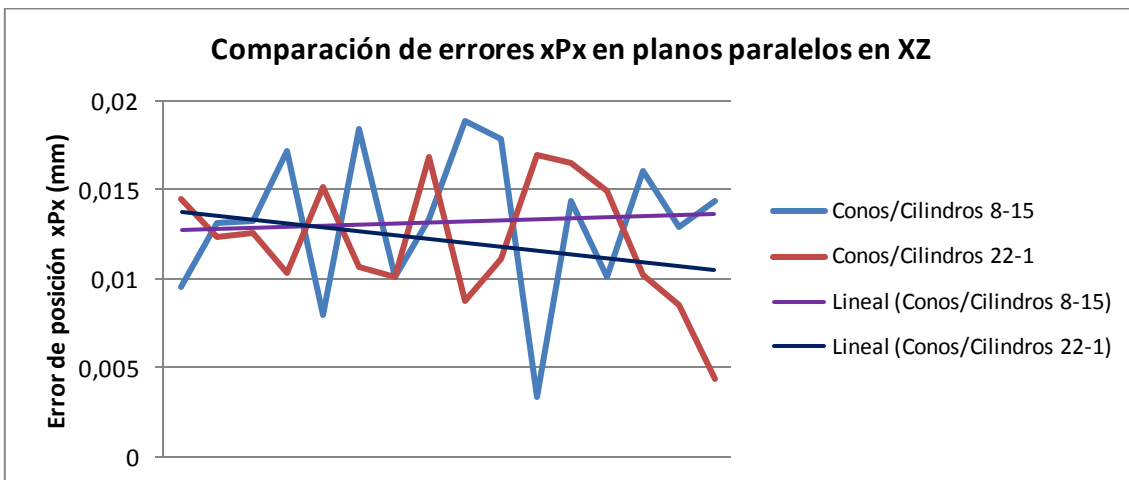
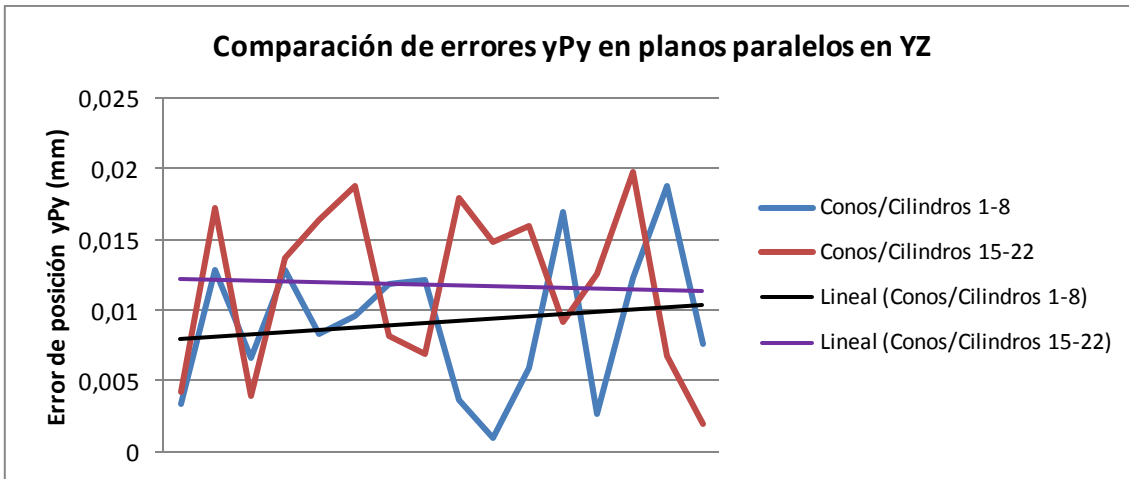
Comparación de zPz obtenidos a partir de conos (65-70) y cilindros (44-49)





Los gráficos que se muestran a continuación comparan los errores obtenidos en planos paralelos:





ANEXO VII: GRÁFICOS DE CONTROL

El gráfico de control empleado en este proyecto es del tipo X-R que analiza la media y el recorrido de los datos.

En primer lugar, los datos se han clasificado según las siguientes muestras mostradas en la tabla xxx. Los datos de cada muestra están en las tablas xxx, xxx y xxx y se han realizado tres gráficos, uno por cada error de posición

k	Fecha muestra	Piezas
1	21/07/2014	A3
2	29/07/2014	A5
3	30/07/2014	A6

TABLA 15. MUESTRAS PARA LOS GRÁFICOS DE ESTABILIDAD TEMPORAL EN ERRORES DE POSICIÓN

Para el gráfico de xPx:

k	1	2	3
xPx1	0,0016	0,0078	0,0024
xPx2	0,0032	0,004	0,004
xPx3	0,0097	0,0014	0,0053
xPx4	0,001	0,003	0,0041
xPx5	0,0016	0,0093	0,0026
xPx6	0,0056	0,0016	0,0011
xPx7	0,0045	0,0034	0,0072
xPx8	0,0039	0,0018	0,0011
xPx9	0,0036	0,0013	0,0016
xPx10	0,0097	0,0057	0,0036
xPx11	0,0032	0,0046	0,0076
xPx12	0,0061	0,0029	0,0015

TABLA 16. DATOS PARA GRÁFICO DE CONTROL DE XPX

Para el gráfico de yPy:

k	1	2	3
yPy1	0,0087	0,0047	0,0018
yPy2	0,0042	0,001	0,0017
yPy3	0,0051	0,0029	0,0083
yPy4	0,0047	0,0054	0,0015
yPy5	0,0084	0,0017	0,0016
yPy6	0,0097	0,0093	0,0071
yPy7	0,0045	0,0021	0,0028
yPy8	0,0088	0,0042	0,0028
yPy9	0,0019	0,009	0,0023
yPy10	0,0026	0,0048	0,0019
yPy11	0,0081	0,0061	0,0072
yPy12	0,0097	0,0052	0,0088

TABLA 17. DATOS PARA GRÁFICO DE CONTROL DE YPY

Para el gráfico de zPz:

k	1	2	3
zPz1	0,0062	0,0082	0,0005
zPz2	0,0075	0,0086	0,0014
zPz3	0,0073	0,002	0,001
zPz4	0,0067	0,0013	0,009
zPz5	0,0091	0,0029	0,0012
zPz6	0,0053	0,0029	0,0048
zPz7	0,0078	0,0056	0,0018
zPz8	0,0017	0,001	0,0018
zPz9	0,0039	0,0006	0,0044
zPz10	0,0052	0,0045	0,0039
zPz11	0,0026	0,002	0,0015
zPz12	0,0029	0,0038	0,0029
zPz13	0,0033	0,0024	0,0056
zPz14	0,0024	0,0014	0,0019
zPz15	0,0011	0,0072	0,0075
zPz16	0,0019	0,0082	0,0084

TABLA 18. DATOS PARA GRÁFICO DE CONTROL DE ZPZ

Con los datos anteriores se han seguido los siguientes pasos para obtener los gráficos:

1. Calcular la media y el recorrido de cada muestra.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$R = \max x_i - \min x_i$$

2. Para el gráfico R se han calculado tres valores:

$$CL_R = \frac{R}{k}$$

$$UCL_R = D_4 * CL_R$$

$$LCL_R = D_3 * CL_R$$

3. Calculados los parámetros para el gráfico R pueden calcularse los del gráfico X:

$$CL_X = \frac{\bar{x}}{k}$$

$$UCL_X = CL_X + (A_2 * CL_R)$$

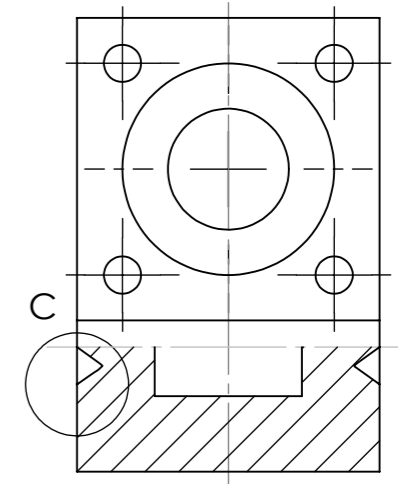
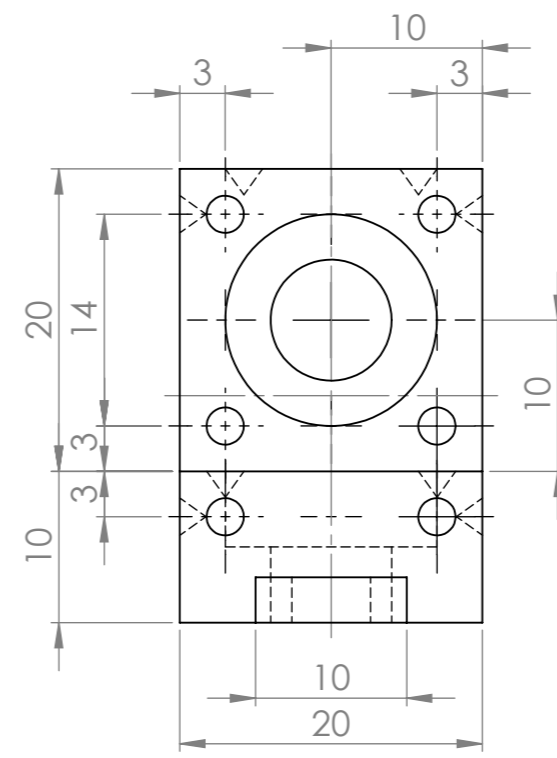
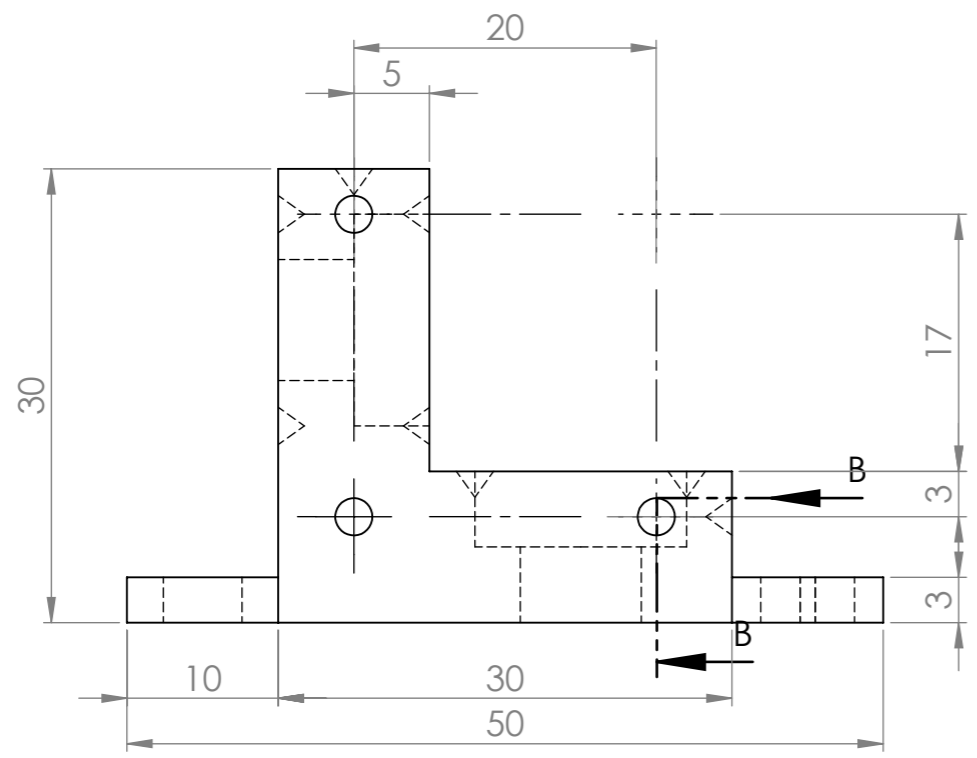
$$LCL_X = CL_X - (A_2 * CL_R)$$

Los valores de A_2 , D_3 y D_4 deben consultarse en una tabla y dependen de n , siendo n el número de datos. De este modo, para los gráficos de xPx e yPy , errores de posición en los ejes X e Y respectivamente, $n = 12$. Para zPz $n = 16$. La figura xxx muestra la tabla para obtener los valores de estas constantes.

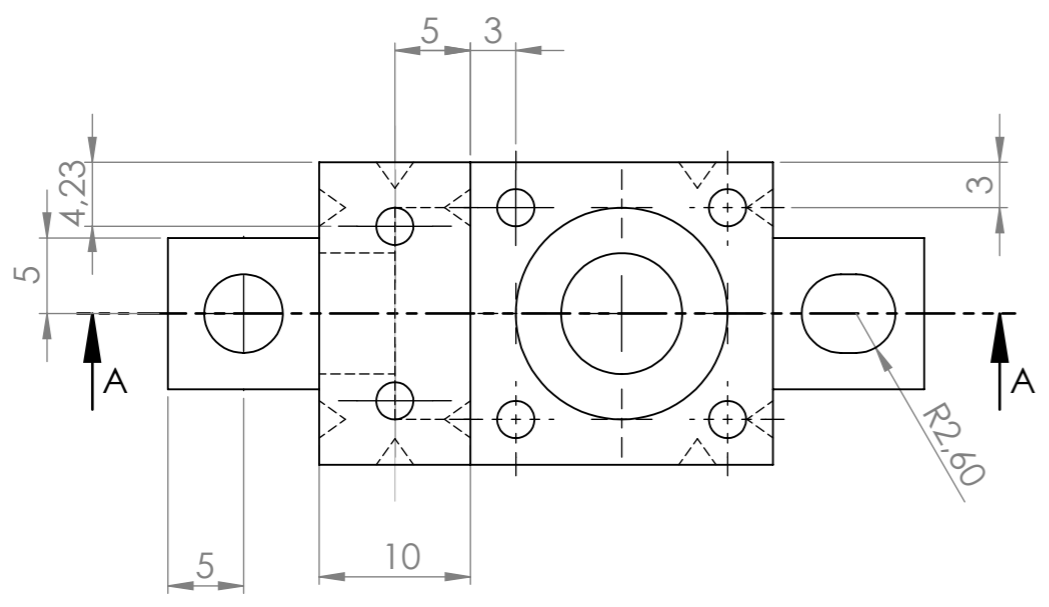
n	A	A2	A3	c4	1/c4	B3	B4	B5	B6	d2	d3	1/d2	D1	D2	D3	D4
2	2.121	1.880	2.659	0.798	1.253	0.000	3.267	0.000	2.606	1.128	0.853	0.886	0.000	3.686	0.000	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.886	1.128	0.000	2.568	0.000	2.276	1.693	0.888	0.591	0.000	4.358	0.000	2.575
4	1.500	0.729	1.628	0.921	1.085	0.000	2.266	0.000	2.088	2.059	0.880	0.486	0.000	4.698	0.000	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.940	1.064	0.000	2.089	0.000	1.964	2.326	0.864	0.430	0.000	4.918	0.000	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.952	1.051	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.848	0.395	0.000	5.079	0.000	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.959	1.042	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.833	0.370	0.205	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.965	1.036	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.820	0.351	0.388	5.307	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.969	1.032	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.808	0.337	0.547	5.394	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.973	1.028	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.797	0.325	0.686	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.975	1.025	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.787	0.315	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.978	1.023	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.778	0.307	0.923	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.979	1.021	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.770	0.300	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.981	1.019	0.406	1.594	0.398	1.563	3.407	0.763	0.294	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.982	1.018	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.756	0.288	1.203	5.740	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.983	1.017	0.448	1.552	0.440	1.527	3.532	0.750	0.283	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.985	1.016	0.466	1.534	0.459	1.510	3.588	0.744	0.279	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.985	1.015	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.739	0.275	1.424	5.856	0.391	1.609
19	0.688	0.187	0.698	0.986	1.014	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.733	0.271	1.489	5.889	0.404	1.596
20	0.671	0.180	0.680	0.987	1.013	0.510	1.490	0.503	1.470	3.735	0.729	0.268	1.549	5.921	0.415	1.585
21	0.655	0.173	0.663	0.988	1.013	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.724	0.265	1.606	5.951	0.425	1.575
22	0.640	0.167	0.647	0.988	1.012	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.720	0.262	1.660	5.979	0.435	1.565
23	0.626	0.162	0.633	0.989	1.011	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.716	0.259	1.711	6.006	0.443	1.557
24	0.612	0.157	0.619	0.989	1.011	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.712	0.257	1.759	6.032	0.452	1.548
25	0.600	0.153	0.606	0.990	1.010	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.708	0.254	1.805	6.056	0.459	1.541

TABLA 19. CONSTANTES PARA GRÁFICOS DE CONTROL

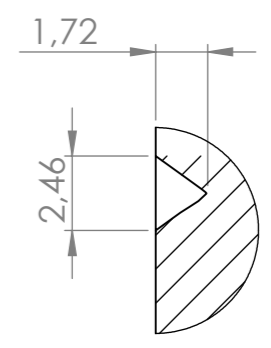
ANEXO VIII: PLANOS



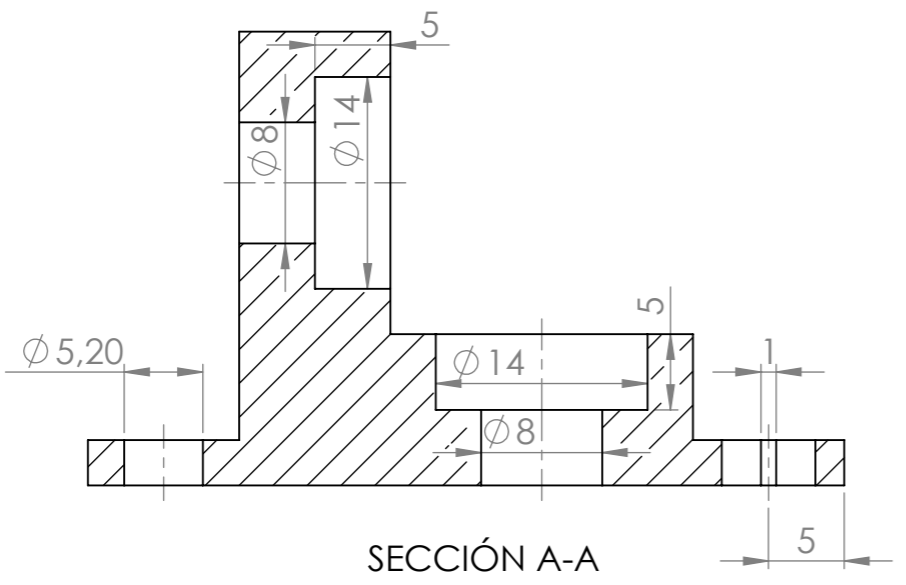
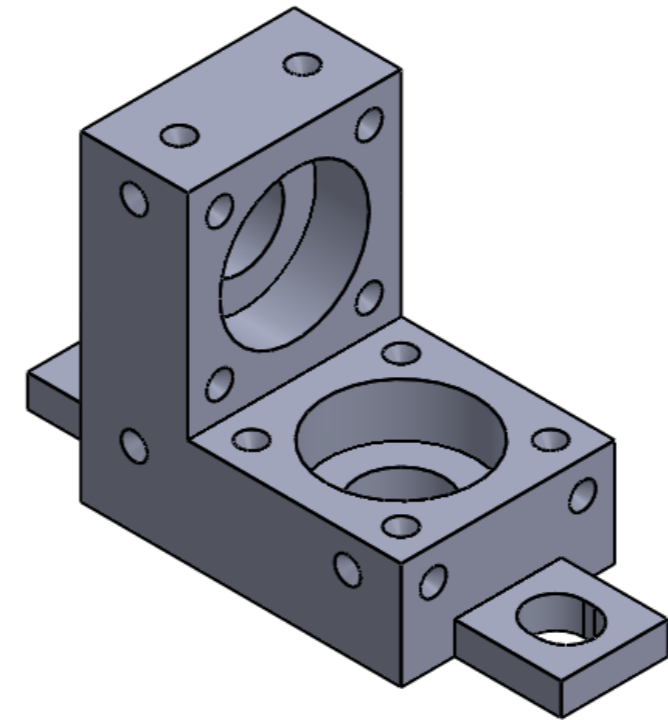
SECCIÓN B-B



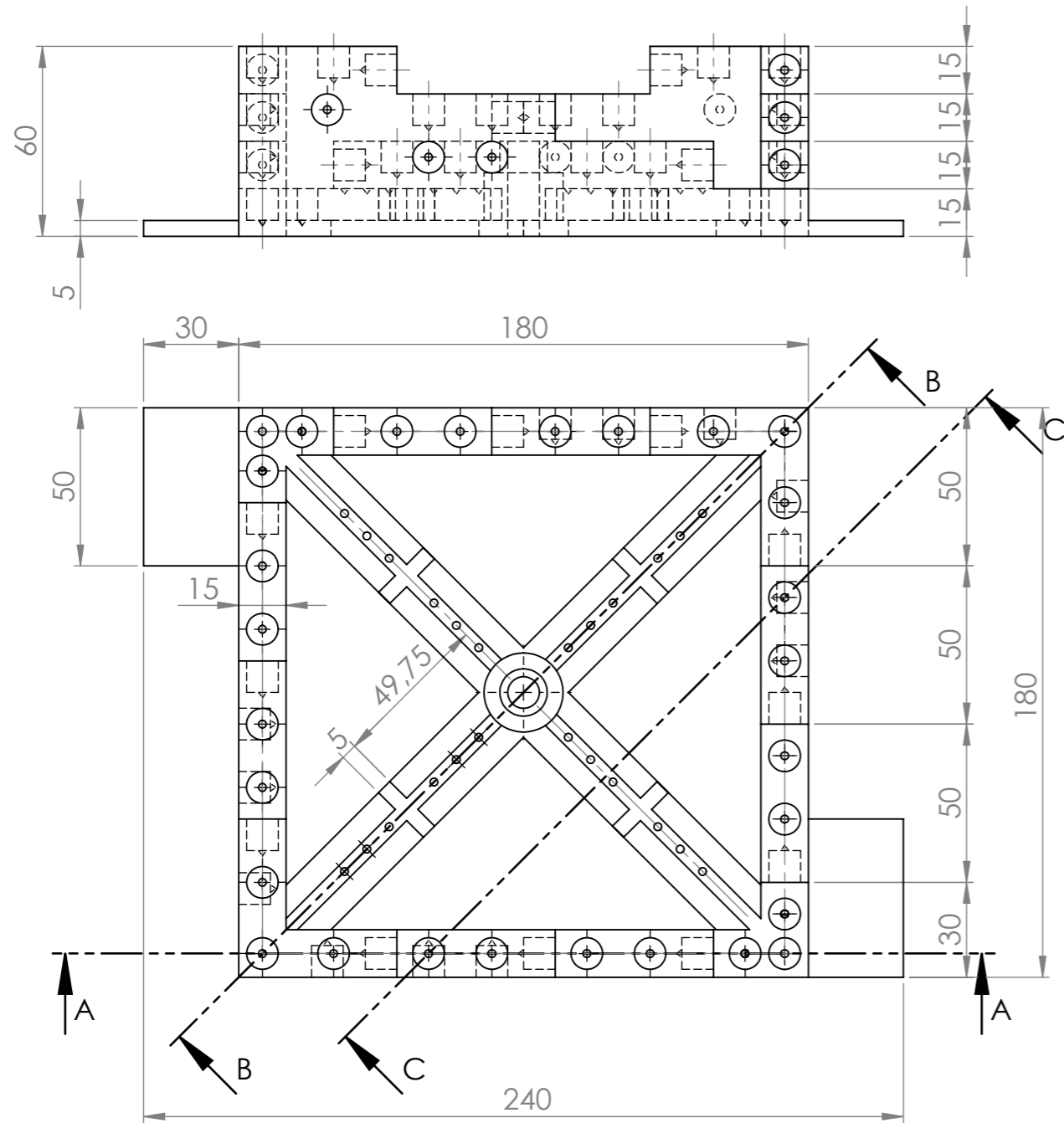
SECCIÓN A-A



DETALLE C
ESCALA 4 : 1

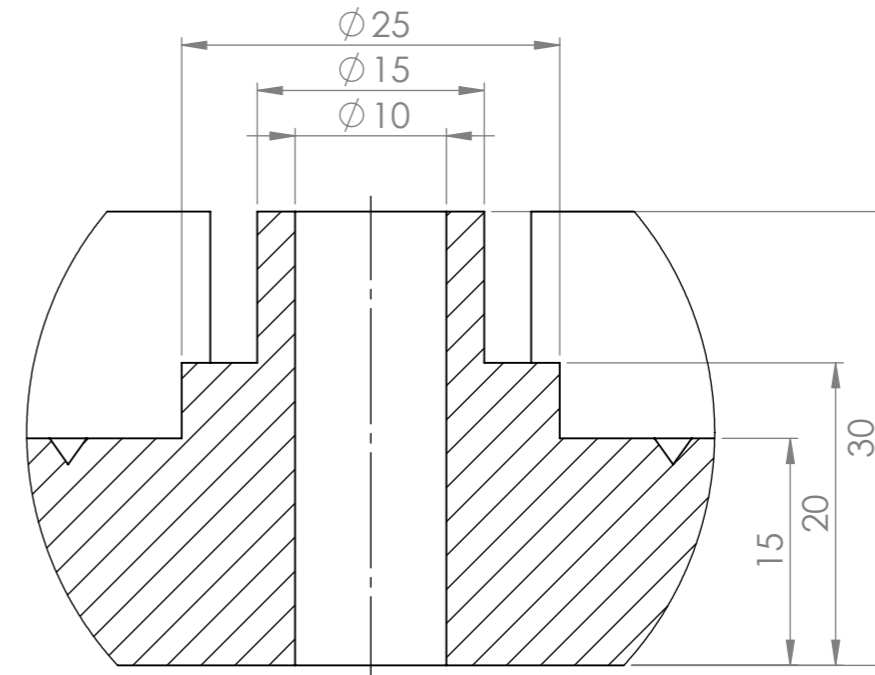
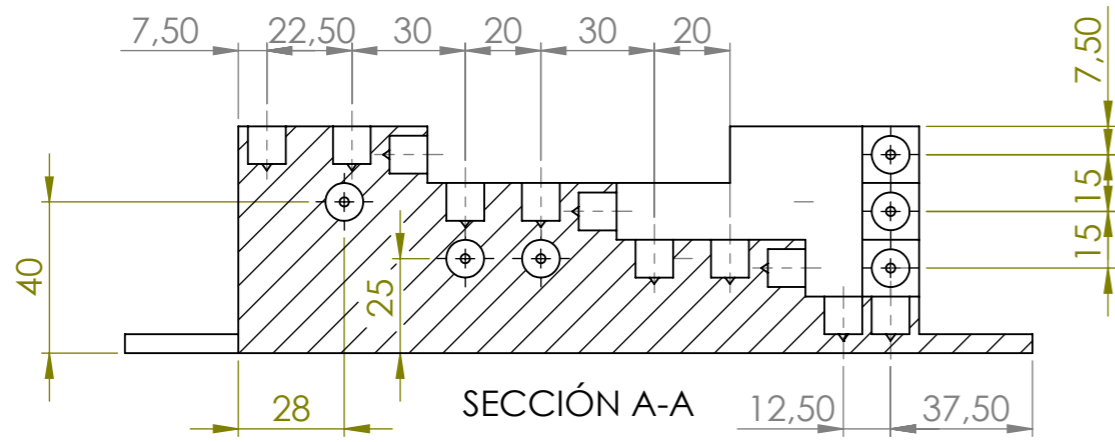


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		TODOS LOS CONOS DE LA PIEZA ESTÁN ACOTADOS SEGÚN EL DETALLE C		TÍTULO:	
NOMBRE	FIRMA	FECHA		Vistas y secciones	
DIBUJ.	M. Cobertera	Julio 2014			
VERIF.	J. Albajez	Julio 2014			
APROB.	J. Albajez	Julio 2014			
FABR.	EDEN 350V	Julio 2014			
MEDIDO	M. Cobertera	Julio 2014	MATERIAL:	NONMBRE PIEZA:	Pieza A
			FC720 y RGD 525	A3	
			PESO:	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1

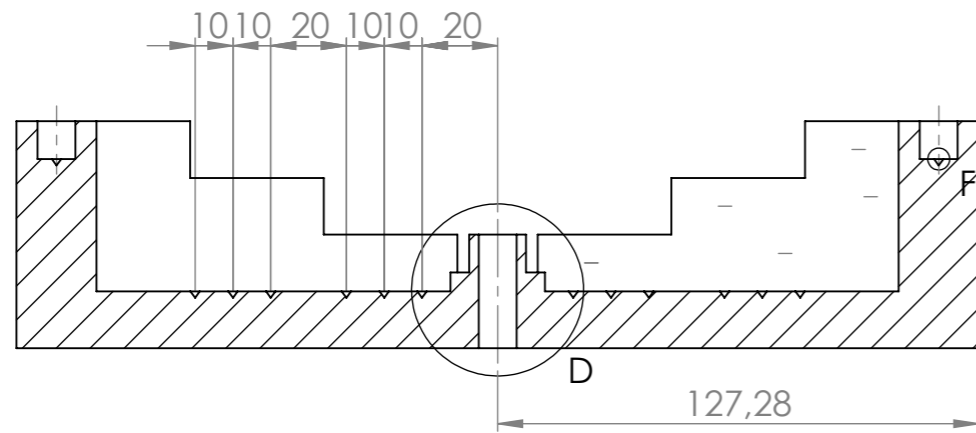


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		TODOS LOS CILINDROS UBICADOS EN LOS ESCALONES TIENEN LAS SIGUIENTES DIMENSIONES: R5X10 MM		TODOS LOS CONOS ESTÁN ACOTADOS SEGÚN DETALLE F	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.	M. Cobertera		Julio 2014		
VERIF.	J. Albajez		Julio 2014		
APROB.	J. Albajez		Julio 2014		
FABR.	EDEN 350V		Julio 2014		
MEDIDO	M. Cobertera		Ago. 2014	MATERIAL:	
				FC 720 y RGD 525	
				PESO:	

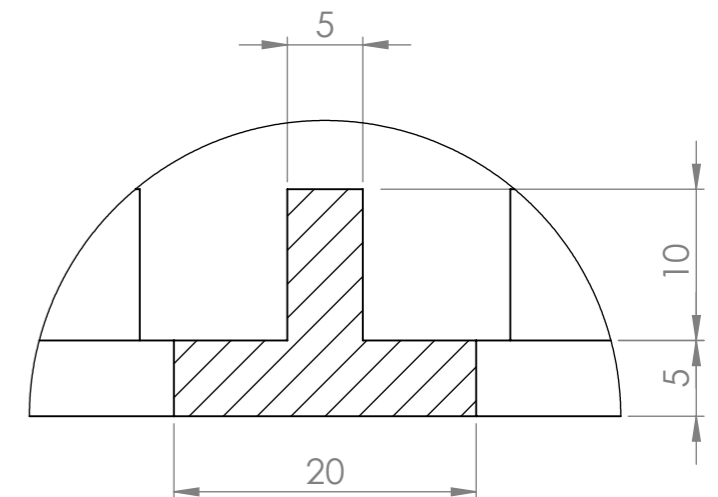
TÍTULO:		Alzado, Planta y Vista Isométrica	
NOMBRE PIEZA:		Pieza B	
ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 2	
		A3	



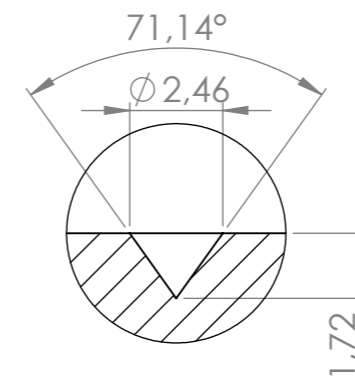
DETALLE D
ESCALA 2 : 1



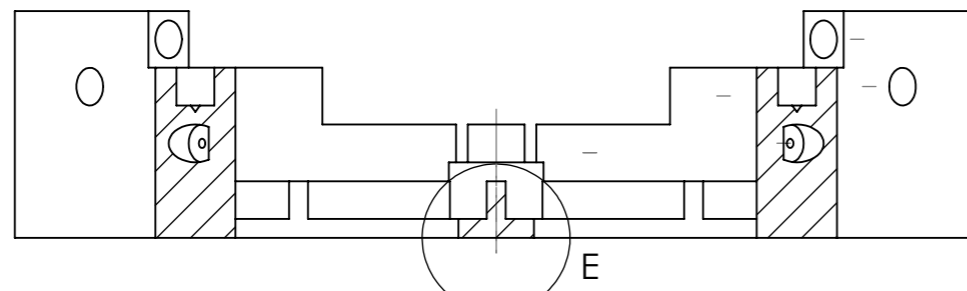
SECCIÓN B-B



DETALLE E
ESCALA 2 : 1



DETALLE F
ESCALA 5 : 1



SECCIÓN C-C

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

TODOS LOS CILINDROS UBICADOS EN LOS ESCALONES TIENEN LAS
SIGUIENTES DIMENSIONES: R5X10 MM

TODOS LOS CONOS ESTÁN ACOTADOS SEGÚN DETALLE F

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	M. Cobertera		Julio 2014
VERIF.	J. Albajez		Julio 2014
APROB.	J. Albajez		Julio 2014
FABR.	EDEN 350V		Julio 2014
MEDIDO	M. Cobertera		Ago. 2014

TÍTULO:	Secciones y Detalles	
NOMBRE PIEZA:	Pieza B	
ESCALA:1:2	HOJA 2 DE 2	A3

MATERIAL:
FC 720 y RGD 525