



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
*Escuela Politécnica Superior de Jaén*

Trabajo Fin de Grado

# **INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA EN LA IMPRESIÓN POR FDM**

**Alumno: Milagros María Montijano Ortega**

Tutor: Prof. D. Rubén Dorado Vicente  
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

**Septiembre, 2016**



Universidad de Jaén  
Escuela Politécnica Superior de Jaén  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Rubén Dorado Vicente , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Influencia de la Geometría en la Impresión por FDM, que presenta Milagros María Montijano Ortega, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2016

El alumno:

El tutor:

Milagros María Montijano Ortega

Rubén Dorado Vicente

# Índice

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>0. NOMENCLATURA.....</b>                                    | <b>4</b>  |
| <b>1. RESUMEN.....</b>                                         | <b>5</b>  |
| <b>2. MOTIVACIÓN.....</b>                                      | <b>5</b>  |
| <b>3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS.....</b>          | <b>5</b>  |
| 3.1. Antecedentes.....                                         | 5         |
| 3.1.1. Introducción.....                                       | 6         |
| 3.1.2. Tecnologías de impresión 3D.....                        | 8         |
| 3.2. Objetivos.....                                            | 10        |
| 3.3. Metodología.....                                          | 10        |
| <b>4. PROCESO DE IMPRESIÓN POR FDM.....</b>                    | <b>11</b> |
| 4.1. Materiales utilizados en la impresión por FDM.....        | 11        |
| 4.1.1. ABS.....                                                | 11        |
| 4.1.2. PLA.....                                                | 11        |
| 4.1.3. PC.....                                                 | 12        |
| 4.1.4. NYLON.....                                              | 13        |
| 4.1.5. ULTEM.....                                              | 13        |
| 4.2. Procesos seguidos en la impresión 3D.....                 | 13        |
| 4.2.1. Modelado digital.....                                   | 13        |
| 4.2.2. Exportación.....                                        | 13        |
| 4.2.3. Laminado.....                                           | 13        |
| 4.2.4. Conexión.....                                           | 14        |
| 4.2.5. Producción.....                                         | 14        |
| 4.2.6. Postprocesado.....                                      | 14        |
| <b>5. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>                            | <b>15</b> |
| 5.1. Máquina FDM. Objeto de estudio.....                       | 15        |
| 5.1.1. Movimientos X, Y y Z.....                               | 15        |
| 5.1.2. Funcionamiento de los ejes y el extrusor.....           | 18        |
| 5.2. Diseño de experimentos y proceso de medida.....           | 19        |
| 5.2.1. Búsqueda de parámetros y variables representativas..... | 20        |
| 5.2.2. Diseño de probetas.....                                 | 25        |
| 5.2.3. Patrón de relleno.....                                  | 25        |
| 5.2.4. Asignación de parámetros.....                           | 29        |
| 5.2.5. Diseño de experimentos: listas de combinaciones.....    | 30        |

|           |                                                            |            |
|-----------|------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.6.    | Obtención y estudio de las variables. ....                 | 36         |
| 5.3.      | Ejecución de ensayos. ....                                 | 41         |
| 5.3.1.    | Preparación de la habitación. ....                         | 41         |
| 5.3.2.    | Preparación de la impresora. ....                          | 41         |
| 5.3.3.    | Preparación de la toma de datos. ....                      | 42         |
| 5.3.4.    | Pasos posteriores. ....                                    | 42         |
| <b>6.</b> | <b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ....</b>                       | <b>43</b>  |
| 6.1.      | Estudio del tiempo real. ....                              | 43         |
| 6.1.1.    | Observación de los resultados. ....                        | 44         |
| 6.1.2.    | Geometrías de relleno. ....                                | 53         |
| 6.1.3.    | Geometrías externas. ....                                  | 61         |
| 6.1.4.    | Movimiento del extrusor. ....                              | 65         |
| 6.2.      | Estudio de las dimensiones experimentales. ....            | 80         |
| 6.3.      | Estudio de las aceleraciones. ....                         | 85         |
| 6.4.      | Estudio de la rugosidad superficial. ....                  | 98         |
| 6.5.      | Planteamiento de modelo y validación con ensayos. ....     | 105        |
| 6.5.1.    | Parámetros seleccionados. ....                             | 106        |
| 6.5.2.    | Representación de los resultados experimentales. ....      | 110        |
| <b>7.</b> | <b>CONCLUSIONES .....</b>                                  | <b>119</b> |
| <b>8.</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                  | <b>121</b> |
| <b>9.</b> | <b>ESQUEMAS Y ANEXOS. ....</b>                             | <b>123</b> |
| 9.1.      | WITBOX. ....                                               | 123        |
| 9.1.1.    | Partes de la impresora. ....                               | 123        |
| 9.1.2.    | Funcionamiento principal de la impresora. ....             | 124        |
| 9.2.      | Programas desarrollados. ....                              | 127        |
| 9.2.1.    | Programación de Arduino UNO. ....                          | 127        |
| 9.2.2.    | Lectura y guardado de datos de Arduino UNO. ....           | 127        |
| 9.2.3.    | Corrección del programa del apartado 9.9.1. Limpieza. .... | 130        |
| 9.2.4.    | Transformada de Fourier en Wolfram Mathematica 9. ....     | 134        |
| 9.2.5.    | Lectura del Código G. Cálculos. ....                       | 135        |
| 9.3.      | Planos de las piezas. ....                                 | 152        |
| 9.3.1.    | GEOMETRÍA CUADRADO.- PLANO 1/3 .....                       | 152        |
| 9.3.2.    | GEOMETRÍA TRIÁNGULO.- PLANO 2/3 .....                      | 152        |
| 9.3.3.    | GEOMETRÍA HEXÁGONO.- PLANO 3/3 .....                       | 152        |

## 0. NOMENCLATURA.

Debido al campo de estudio al que pertenece, este trabajo se ha desarrollado en las unidades presentes en la siguiente lista.

- Longitud → milímetros (mm)
- Tiempo → segundos (s)
- Velocidad → milímetro por segundo (mm/s)
- Aceleración → milímetro por segundo al cuadrado ( $\text{mm/s}^2$ )
- Rugosidad → micrómetro ( $\mu\text{m}$ )
- Tensión → voltios (V)
- Temperatura → grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ )

## **1. RESUMEN.**

La deposición de hilo fundido (Fused Deposition Modeling, FDM) es un sistema de fabricación aditivo sencillo y económico. Entre sus inconvenientes se encuentra un avance menor al que muestran los sistemas convencionales de arranque de material. El avance está limitado por la aceleración máxima admitida por la máquina, y ésta depende de la geometría de la pieza y del patrón de relleno empleado.

En este trabajo se observará la influencia de la geometría tanto externa como de relleno en el tiempo de operación, la vibración de la máquina y el error dimensional, y viceversa.

## **2. MOTIVACIÓN.**

La causa principal que conduce a la realización de este trabajo es sin duda la obligatoriedad de su elaboración para obtención del título del grado.

La elección de la temática de este trabajo viene motivada entre otras cosas por la necesidad que plantea el estudio de la tecnología de impresión por FDM para su aplicación industrial, concretamente en el área del prototipado rápido, donde en los últimos años ha ganado mucho terreno gracias al ahorro temporal que supone.

## **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS.**

### **3.1. Antecedentes.**

En el sector industrial, la tecnología de impresión por FDM ha permitido el abaratamiento de la fabricación gracias a la rapidez para la realización de prototipos, lo que agiliza la realización de ensayos interactivos, y a la fabricación rápida, siendo una opción barata respecto a otras tecnologías en producciones de pequeñas cantidades de piezas.

Al ser uno de los métodos de impresión 3D más económicos resulta de interés el estudio de los parámetros que tienen una influencia mayor en la consecución de unas estrechas tolerancias dimensionales y el tiempo invertido en función de cómo varíen éstos.

### **3.1.1. Introducción.**

#### *3.1.1.1. Concepto de la impresión 3D.*

Se define la impresión 3D o manufactura aditiva como aquella tecnología de fabricación que reproduce sólidos tridimensionales a partir de un modelo digital creado por ordenador agregando material de forma muy precisa capa a capa [16].

#### *3.1.1.2. Historia de la impresión 3D.*

El comienzo de la impresión 3D se remonta al año 1976, cuando se inventa la impresora de inyección de tinta. [16].

En 1984, el inventor Charles Hull, destacado en el campo de la óptica iónica, idea el primer método de impresión 3D: la estereolitografía (SLA). Tras patentar su invento, en 1986 funda la compañía 3D Systems, que permite el uso a nivel industrial de esta técnica. Partiendo de ésta, en 1987 Carl Deckard desarrolla el sinterizado selectivo por láser (SLS) .[14][16].

Al año siguiente, Scott Crump concibe el método de impresión por FDM (Fused Deposition Modeling), y en 1989 funda la empresa Stratasys para comercializar su invento. [14][16].

En 1993, un grupo de estudiantes del MIT desarrollan la impresión 3D por inyección (3DP) y fundan ZCorporation, que dos años sería parte de 3D Systems y pondría a la venta ésta tecnología. [14][16].

Fue en 1999 cuando la impresión 3D genera avances en el campo de la medicina al imprimir el primer órgano, aunque no sería hasta 2002 cuando se imprimiría el primer riñón completamente funcional. [14][16].

En 2005, Z Corporation consigue crear el primer equipo de impresión 3D que trabaja en color a alta definición. Este mismo año, el Dr. Browyer, de la Universidad de Bath, Reino Unido, lanza la primera impresora capaz de autorreplicarse, de donde nace RepRap. Por otro lado, se consigue un nuevo proceso aditivo basado en tecnología de soldadura por haz de electrones (EBW). [14][16].

Al año siguiente, se consigue la primera máquina de tipo SLS (Sintetización de Láser Selectivo). Objet, empresa adquirida posteriormente por Stratasys, desarrolla una impresora capaz de realizar piezas en varios materiales. [14][16].

En el año 2008, la tecnología de impresión 3D comienza a ser usada por artistas, diseñadores, arquitectos y otros clientes que desean realizar productos personalizados. Es a partir de entonces cuando sale a la venta la primera impresora 3D DIY (Do It Yourself) en forma de kit. [14][16].

En 2011, los ingenieros de la Universidad de Southampton diseñan y construyen el primer avión no tripulado impreso en 3D en siete días, con un presupuesto de 7000€. La empresa Kor Ecologic prototipa un coche cuya totalidad de su carrocería está diseñada e impresa en 3D. Materialise consigue imprimir metales preciosos, abriendo nuevas vías de negocios. [14][16].

Durante los años siguientes los avances permiten la impresión de la primera mandíbula transplantada así como de otros órganos y prótesis. La técnica se traslada al mundo de la construcción, lográndose imprimir el primer edificio completo en un día. Se consigue la impresión de alimentos, revolucionando el mundo culinario. Sin embargo, la impresión de las primeras armas de fuego domésticas generó un gran debate sobre la venta libre de tecnología de impresión 3D. [14][16].

#### *3.1.1.3. Aplicaciones.*

A continuación se exponen resumidamente algunos de los campos donde se está aplicando la tecnología de impresión 3D. [16].

- Automoción.
- Medicina.
- Defensa.

- Aeroespacial.
- Educación.
- Arte.
- Arquitectura.

### **3.1.2. Tecnologías de impresión 3D.**

Desde la creación de la primera impresora 3D han surgido gran variedad de técnicas dependientes de los materiales que admiten y el método aditivo.

A continuación se presentan las tres técnicas más conocidas.

#### *3.1.2.1. Sinterizado selectivo por láser (SLS)*

En cada capa, un rodillo coloca una fina capa de material en polvo a una temperatura ligeramente inferior a la de fusión del material y un láser sinteriza la zona programada provocando el conformado de las partículas seleccionadas. Se repite el proceso hasta que se completa el modelo. [17]

La principal ventaja de esta técnica es que el polvo no solidificado puede ser reutilizado, por lo que genera menos gasto de material. [17].

#### *3.1.2.2. Estereolitografía (SLA)*

La técnica de la estereolitografía es muy parecida a la comentada en el punto 3.1.2.1, diferenciándose en su funcionamiento y en el material utilizado, ya que en ésta, la base se va sumergiendo (o saliendo) capa a capa en un baño de material líquido (resina fotocurable) mientras un láser de luz ultravioleta cura la resina solidificándola. [17].

#### *3.1.2.3. Modelado por deposición fundida (FDM)*

La tecnología FDM está muy extendida debido a que es una de las más económicas y seguras del mercado. La impresión por FDM consiste en la fundición de un hilo de material sólido termoplástico (principalmente de PLA y ABS, aunque existen otros muchos materiales utilizados, como metales eutécticos y materiales comestibles) al pasar por el extrusor. El filamento fundido solidifica conforme es

depositado, inicialmente sobre la cama (base plana o mesa) que puede ser o no precalentada, y posteriormente sobre la capa anterior, y así hasta completar la geometría. [16][17].

Entre las ventajas que conlleva la impresión por FDM destacan su facilidad de uso y las geometrías y cavidades complejas que es capaz de realizar.

Sin embargo, para realizar voladizos y zonas muy inclinadas es necesario el uso de material de soporte, que bien puede estar compuesto del mismo material pero con una densidad de relleno inferior para facilitar su posterior extracción, o bien puede ser de un material diferente que es soluble a soluciones químicas como la sosa cáustica.

Otro inconveniente es que la inercia del extrusor limita la velocidad máxima de la máquina para poder respetar unas tolerancias dimensionales inferiores a 0,5 mm (lo aceptado en aplicaciones industriales). Los actuadores son motores paso a paso en los que no hay un control realimentado, por lo que la elección de velocidades y trayectorias del extrusor afectan al acabado dimensional y al tiempo de ejecución.

Este trabajo se centra en esta técnica de impresión, por sus potenciales aplicaciones, y por la necesidad de estudiar los efectos de la geometría en su eficiencia medida en términos de tiempo y tolerancia dimensional.

#### 3.1.2.4. Comparación de tecnologías.

A continuación se muestra una tabla donde se presenta los tipos de impresión según su funcionamiento, y los materiales compatibles con ella.

| TÉCNICA   | TECNOLOGÍAS                              | MATERIALES             |                                    |
|-----------|------------------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| EXTRUSIÓN | Modelado por deposición fundida (FDM)    | Termoplásticos         | ABS<br>PLA<br>NYLON<br>PC<br>ULTEM |
|           |                                          | Metales eutécticos     |                                    |
|           |                                          | Materiales comestibles |                                    |
| HILADO    | Fabricación por haz de electrones (EBF3) | Aleaciones de metal    |                                    |

|              |                                               |                                                  |                                                                                 |
|--------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| GRANULADO    | Sinterizado de metal por láser (DMLS)         | Aleación de metal                                |                                                                                 |
|              | Fusión por haz de electrones (EBM)            | Metales                                          | Titanio<br>Tungsteno<br>Acero inoxidable<br>Cobalto<br>Superalaciones de níquel |
|              | Sinterizado selectivo por calor (SHS)         | Polvo termoplástico.                             |                                                                                 |
|              | Sinterizado selectivo por láser (SLS)         | Nylon<br>Metales<br>Cerámica<br>Composites       |                                                                                 |
|              | Proyección aglutinante (DSPC)                 | Yeso<br>Escayola<br>Cerámica<br>Azúcar y almidón |                                                                                 |
| LAMINADO     | Laminado de capas (LOM)                       | Papel<br>Plástico<br>Cerámica<br>Composite       |                                                                                 |
| FOTOQUÍMICOS | Estereolitografía (SLA)                       | Polímeros fotosensibles                          |                                                                                 |
|              | Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC) | Fotopolímeros<br>Resinas fotosensibles           |                                                                                 |

TABLA 3.1.- Comparación entre las distintas tecnologías de impresión 3D.- Elaboración propia en base a la referencia [16].

### 3.2. Objetivos.

Este Proyecto de Fin de Grado analiza la impresión por FDM, teniendo los siguientes puntos como objetivos principales:

- Estudio de la influencia de la geometría en el proceso de impresión por FDM.
- Medición experimental de las variables tiempo, vibración y dimensiones relacionadas con la eficiencia de la impresión.
- Realización de un modelo que permita la predicción de los puntos anteriores a partir de los parámetros geometría de la frontera y geometría de la trayectoria de relleno.

### 3.3. Metodología.

Para la consecución de un adecuado estudio, se seguirá el orden siguiente:

- Estudio teórico de la cinemática y dinámica de la máquina de FDM (Apartado 5.1).
- Diseño de experimentos y procesos de medida (Apartado 5.2).
- Ejecución de ensayos y discusión de resultados (Apartados 6.1 a 6.4).
- Planteamiento de modelo y validación con ensayos (Apartado 6.5).

## 4. PROCESO DE IMPRESIÓN POR FDM.

### 4.1. Materiales utilizados en la impresión por FDM.

#### 4.1.1. ABS

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno es un termoplástico duro resistente a impactos y al calor obtenido a partir de la polimerización del estireno, facilitando el proceso, acrilonitrilo, que aporta la resistencia química e incrementa la dureza superficial, y el butadieno, que imparte la fuerza de impacto y dureza. [13].

Su fórmula química es  $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_x$

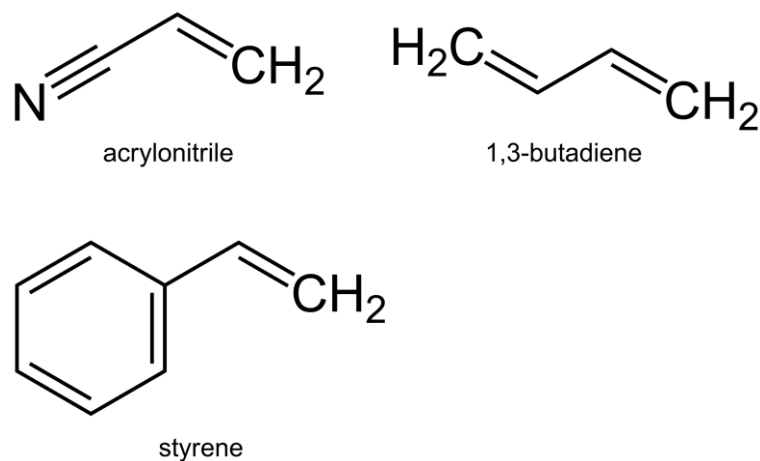


FIGURA 4.1.- Fórmula química del Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).- Obtenida de Wikipedia.

#### 4.1.2. PLA

El Poliláctico (PLA o Ácido Poliláctico) es un termoplástico obtenido a partir de almidón de maíz, de yuca o mandioca o de caña de azúcar, por lo que se trata de un material biodegradable, que se deteriora con facilidad en agua y óxido de carbono. Las moléculas del poliláctico tienen propiedades similares a las del

tereftalato de polietileno (PET), comúnmente utilizado para la fabricación de envases de bebidas no alcohólicas y otros productos no alimenticios. [06][07]

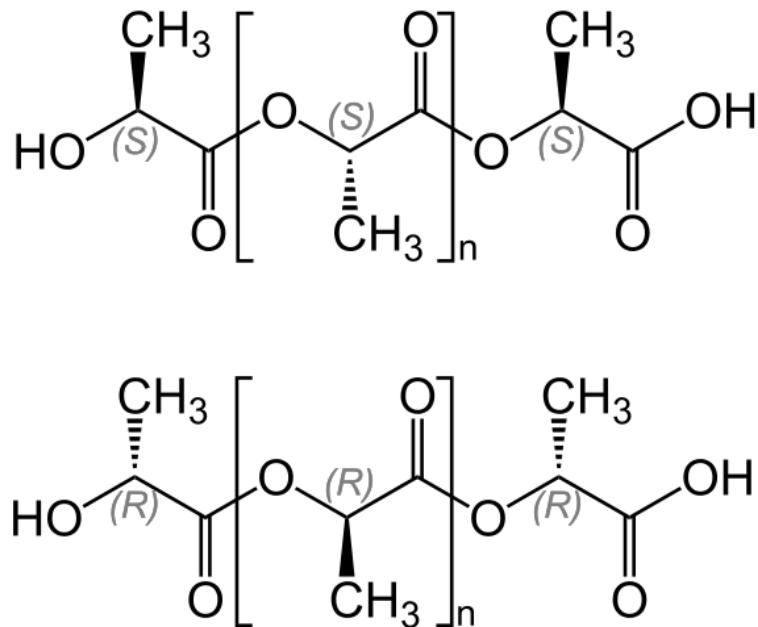


FIGURA 4.2.- Fórmula química del Poliácido Láctico (PLA).- Imagen obtenida de Wikipedia. [06].

#### 4.1.3. PC

El Policarbonato es un termoplástico compuesto por polímeros que presentan grupos funcionales unidos por grupos carbonato y que se caracteriza por su facilidad para moldear, termoconformar y acabado superficial blanco. [12].

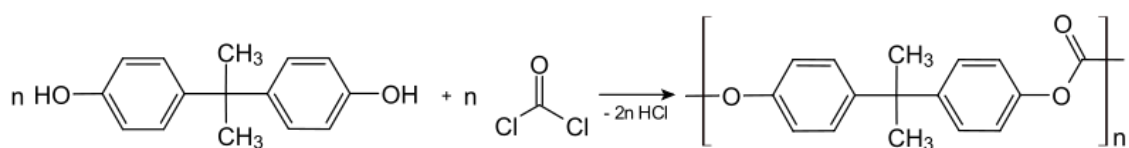


FIGURA 4.3.- Fórmula química del Policarbonato.- Obtenida de Wikipedia.

Entre sus ventajas se encuentra la elevada resistencia al impacto, deformación térmica y a la fluencia, gran rigidez y estabilidad dimensional, transparencia y sus propiedades de aislamiento eléctrico y protección contra rayos ultravioleta. [12].

Sin embargo, no resiste larga exposiciones con sustancias químicas, presenta alta sensibilidad al entallado y susceptibilidad a fisuras por esfuerzos y a la hidrólisis. [12].

#### **4.1.4. NYLON**

El nylon es el material más flexible utilizado en la impresión por FDM. Presentan una buena resistencia química, a la fatiga, a los impactos y a la rotura en la dirección perpendicular a la de laminación. Su acabado es blanco, aunque es posible su tintado tras la impresión.

#### **4.1.5. ULTEM**

Resina resistente al fuego y a los disolventes, siendo perfecto para aplicaciones de mecanizado y prototipado avanzadas en la industria. Es un material certificado para la producción alimenticia y médica. [12].

### **4.2. Procesos seguidos en la impresión 3D.**

Desde que se concibe la idea hasta que se obtiene impresa hay que seguir un proceso que puede ser desde simple a complejo en función de la geometría que se quiere realizar, materiales necesarios, impresora disponible, etc.

#### **4.2.1. Modelado digital.**

Mediante un software de Diseño Asistido por Ordenador (CAD) u otro que lo permita se crea el modelo 3D del objeto ideado.

#### **4.2.2. Exportación.**

Se genera un archivo en formato STL (aunque bien puede ser otro formato compatible con el software posterior) que contiene la geometría en forma de malla de elementos generalmente triangular de un tamaño configurable. Cuanto más pequeño es el elemento, mayor es la calidad superficial de la impresión, al igual que el tamaño del archivo.

#### **4.2.3. Laminado.**

Convierte el modelo digital con el formato anterior en una lista de comandos llamados código g o g-code que la impresora 3D puede interpretar y realizar. Para ello, otro software específico divide el objeto en capas según la posición en la que se configure dentro del área de impresión, así como de los parámetros que se

introduzcan con relación a la velocidad, altura de capa, geometría y densidad de relleno, etc.

#### **4.2.4. Conexión.**

Traspasamos el código g mediante una tarjeta de memoria o bien, conectando directamente el ordenador a través de un cable USB.

#### **4.2.5. Producción.**

Antes de comenzar a imprimir es necesaria la preparación de la impresora, siendo generalmente suficiente con seguir las indicaciones del fabricante. Principalmente, se prepara el material y se supervisa que el área de impresión está lista para su funcionamiento. Tras estos pasos previos se procede a la impresión y espera del resultado.

#### **4.2.6. Postprocesado.**

Se retira el objeto recién creado y se eliminan las partes adicionales si existieran para limpiar su superficie.

Existen lugares donde se puede descargar directamente el modelo digital en formato STL o incluso el código g (como por ejemplo <https://www.thingiverse.com/> ) agilizando los procesos de diseño y laminado siempre y cuando la geometría en cuestión ya exista.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 5.1. Máquina FDM. Objeto de estudio.

Para comenzar este proyecto, es importante tener un conocimiento previo tanto de las partes como del funcionamiento de la impresora en cuestión, siendo en este caso la impresora Witbox de Bq.

Los datos sobre las partes y funcionamiento de la impresora Witbox se encuentran más detallados en el Anexo 9.1.

#### 5.1.1. Movimientos X, Y y Z.

Las máquinas de impresión 3D tienen tres ejes. Esto significa que se genera movimiento durante la impresión en tres direcciones distintas, siendo en este caso las tres direcciones perpendiculares entre sí (direcciones principales del espacio).

El extrusor se desplaza en el plano XY, mientras que la base de impresión lo hace en la dirección Z.

Así pues, si dos coordenadas realizan una trayectoria lineal dentro de la superficie horizontal, puede ocurrir que intervenga sólo un eje o dos de la siguiente forma:

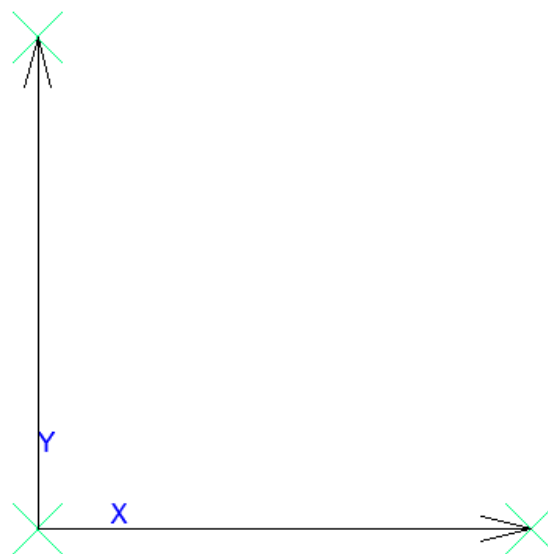


FIGURA 5.1.- Trayectorias vertical y horizontal.-  
Elaborado en AutoCAD.

Durante el desplazamiento de X e Y, en la Figura 5.1 sólo se genera movimiento en uno de los dos motores que componen los ejes, por lo que es la trayectoria más sencilla que se puede generar.

$$x_2 = x_1 + \Delta x \bar{i}$$

$$y_2 = y_1 + \Delta y \bar{j}$$

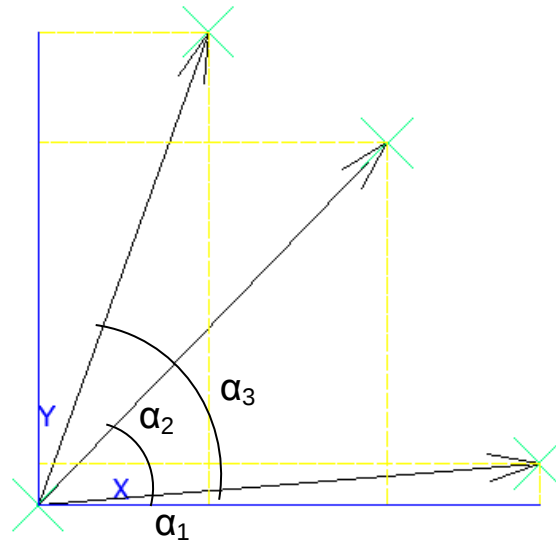
(Fórmula 5.1)

$$v_{fx} = v_f \bar{i}$$

$$v_{fy} = v_f \bar{j}$$

(Fórmula 5.2)

Donde  $x_1, x_2$  = coordenada x inicial y final.  
 $y_1, y_2$  = coordenada y inicial y final.  
 $\Delta x, \Delta y$  = desplazamiento en los ejes x e y.  
 $v_{fx}, v_{fy}$  = velocidades de avance en los ejes X e Y.  
 $v_f$  = módulo de la velocidades de avance.  
 $\bar{i}, \bar{j}$  = vectores unitarios horizontal y vertical.



**FIGURA 5.2.- Trayectorias diagonales.- Elaborado en AutoCAD.**

En el caso de la Figura 5.2 ocurre una combinación de ambos ejes, de forma que los dos motores se accionan y, dependiendo de los puntos inicial y final uno de ellos avanzará más rápido que el otro.

$$(x_2, y_2) = (x_1 + \Delta x)\bar{i} + (y_1 + \Delta y)\bar{j}$$

(Fórmula 5.3)

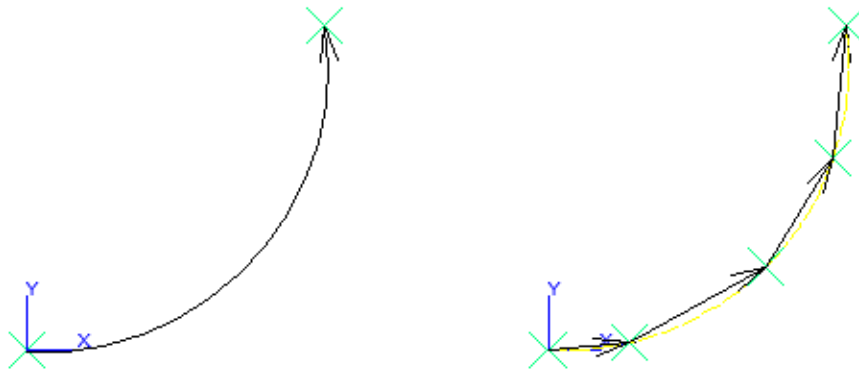
$$v_{fx} = v_f \cos \alpha \bar{i}$$

$$v_{fy} = v_f \sin \alpha \bar{j}$$

(Fórmula 5.4)

Donde  $x_1, x_2$  = coordenada x inicial y final.  
 $y_1, y_2$  = coordenada y inicial y final.  
 $\Delta x, \Delta y$  = desplazamiento en los ejes x e y.  
 $v_{fx}, v_{fy}$  = velocidades de avance en los ejes X e Y.  
 $v_f$  = módulo de la velocidades de avance.  
 $\bar{i}, \bar{j}$  = vectores unitarios horizontal y vertical.

Sin embargo, las trayectorias curvas puras no existen en la impresión. Lo que sucede es una secuencia de rectas de pequeña longitud que se aproximan a la forma real. Esto es debido a que cuando se genera un código G en impresión 3D no existen interpolaciones circulares como sí ocurre por ejemplo en el fresado CNC. Así pues, el software guarda los datos por coordenadas (trayectoria discontinua), de forma que si se quiere configurar una precisión alta éste descompondrá una curva en más puntos, generando rectas de menor tamaño donde la operación será más parecida a la deseada. Por otro lado si aumentan los segmentos, aumentarán las discontinuidades, y es de esperar que no se alcance el avance de referencia fijado en el código y por tanto el tiempo de procesamiento aumentará.



**FIGURA 5.3.-** A la izquierda se representa la curva a trazar, a la derecha la trayectoria realmente seguida.- Elaborado en AutoCAD.

### **5.1.2. Funcionamiento de los ejes y el extrusor.**

Al comenzar la impresión, lo primero que hará la impresora será llevar el extrusor y la base de impresión a la posición origen. Una vez en el origen, lo siguiente es calentar el extrusor hasta alcanzar la temperatura programada para la fusión del filamento. Es entonces cuando comienza la impresión.

A diferencia del Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) el PLA no emite gases tóxicos durante su fusión. Debido a que el lugar donde se van a realizar los ensayos

no tiene la ventilación adecuada para el uso de ABS, se ha utilizado PLA en el desarrollo de este Proyecto.

Cuando se realiza la impresión, el motor de los ejes se mueve en función de la velocidad y trayectoria que esté siguiendo. Pasa de estar en reposo a la velocidad programada en apenas unas décimas de segundo. En el momento en el que hay un cambio de sentido se produce una desaceleración y aceleración según el ángulo que hay entre rectas.

A su vez, el filamento es extruido según la velocidad del extrusor de forma que, si el extrusor se mueve rápidamente, los rodillos que se encuentran en el interior del extrusor girarán más rápido. Cuando la máquina realiza un cambio de posición donde el extrusor no tiene que sacar material, los rodillos giran en sentido contrario introduciendo el filamento unos milímetros.

En el momento en el que la impresora realiza la zona de una capa en voladizo sin material de soporte se acciona (lo codifica el software) el difusor que se encuentra junto la boquilla para generar una corriente de aire que enfría el filamento y lo solidifica cuanto antes conforme se va inyectando para que mantenga su forma y no caiga.

Por otro lado, la impresora tiene un sistema de lazo abierto que, a diferencia de en CNC, no corrige la trayectoria si en algún momento la posición de inyección se desvía, lo que provoca que si la boquilla se atranca en algún punto de una capa al tropezar con la anterior siga imprimiendo en unas coordenadas erróneas desviadas una distancia concreta.

## **5.2. Diseño de experimentos y proceso de medida.**

Como se describe en el apartado 3.2 de este documento, este Proyecto busca determinar la influencia que tiene la geometría externa e interna en las variables tiempo, vibración y tolerancias dimensionales en la impresión por FDM. Siendo la impresora estudiada la Witbox de Bq y el material del filamento PLA, el siguiente paso es la realización de un diseño de experimentos en la que se quiere evaluar con un número reducido de ensayos la relación que existen entre los parámetros anteriores.

Para la tecnología de impresión 3D por FDM no se han encontrado estudios públicos ni antecedentes que ayuden en el desarrollo de este proyecto. Lo más sencillo sería modificar un parámetro cada vez mientras el resto permanecen fijos. Sin embargo, sería necesario un gran número de pruebas, siendo un gasto considerable de dinero y tiempo, por lo que finalmente se ha optado por los arreglos que se detallan a continuación.

#### 5.2.1. Búsqueda de parámetros y variables representativas.

En primer lugar, se enumeran las variables que se quieren estudiar junto con los posibles parámetros de los que dependen. Teniendo en cuenta los objetivos que se han marcado se tendrá la siguiente lista:

| VARIABLES                         | PARÁMETROS (UNIDADES)   |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Tiempo                            | Avance (mm/s)           |
|                                   | Densidad de relleno (%) |
|                                   | Geometría externa.      |
|                                   | Geometría de relleno.   |
| Vibración                         | Avance (mm/s)           |
|                                   | Geometría de relleno.   |
|                                   | Densidad (%)            |
| Dimensiones (calidad superficial) | Geometría externa.      |
|                                   | Geometría de relleno.   |
|                                   | Avance (mm/s)           |
|                                   | Altura de capa (mm)     |
|                                   | Temperatura (°C)        |
|                                   | Densidad (%)            |
| Rugosidad                         | Geometría externa.      |
|                                   | Geometría de relleno.   |
|                                   | Avance (mm/s)           |
|                                   | Altura de capa (mm)     |
|                                   | Temperatura (°C)        |
|                                   | Densidad (%)            |

TABLA 5.1.- Parámetros y variables a estudiar.- Elaboración propia.

Como se puede observar, las variables más representativas teóricamente son:

- Geometría externa.
- Geometría interna o de relleno.
- Avance (mm/s)
- Densidad de la geometría interna (%)
- Altura de capa (mm)
- Temperatura (°C)

Así pues, se evalúa los métodos de obtención de los valores teóricos de cada parámetro en la siguiente tabla:

| PARÁMETROS                           | MÉTODOS               |                           |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------|
|                                      | VALORES TEÓRICOS      | HERRAMIENTA               |
| Geometría externa.                   | Software de modelado. | Solidworks.               |
| Geometría interna o de relleno       | Software de Laminado  | Repetier Host.<br>Slic3r. |
| Avance (mm/s)                        |                       |                           |
| Densidad de la geometría interna (%) |                       |                           |
| Altura de capa (mm)                  |                       |                           |
| Temperatura (°C)                     |                       |                           |

TABLA 5.2.- Métodos de obtención de parámetros.- Elaboración propia.

A continuación se definen las técnicas de medición de los valores reales de las variables.

| VARIABLES   | INSTRUMENTO DE MEDIDA |
|-------------|-----------------------|
| Tiempo      | Reloj/Cronómetro      |
| Vibración   | Acelerómetro          |
| Dimensiones | Pie de Rey            |
| Rugosidad   | Rugosímetro           |

TABLA 5.3.- Técnica de medición de variables.- Elaboración propia.

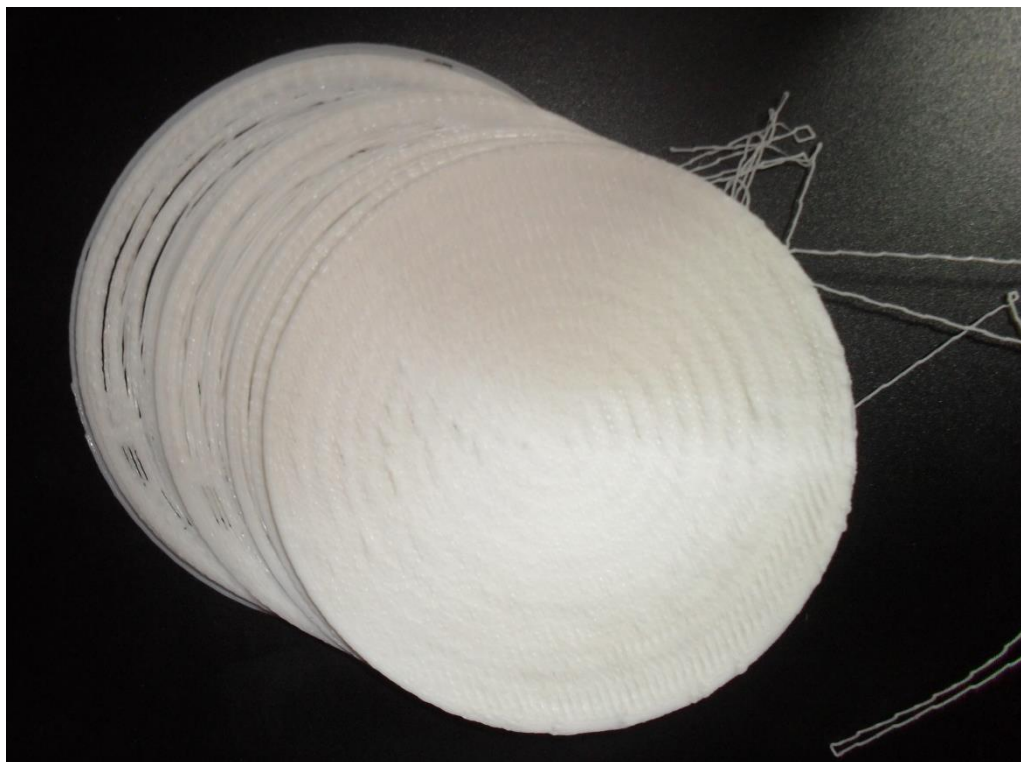
Por consiguiente, uniendo ambas tablas obtenemos la siguiente:

| PARÁMETROS                           | MÉTODOS               |                       | VALORES DEPENDIENTES REALES |                       |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
|                                      | VALORES TEÓRICOS      | HERRAMIENTA           | VARIABLES                   | INSTRUMENTO DE MEDIDA |
| Geometría externa.                   | Software de modelado. | Solidworks.           | Tiempo                      | Reloj/Cronómetro      |
|                                      |                       |                       | Dimensiones                 | Pie de Rey            |
|                                      |                       |                       | Vibración                   | Acelerómetro          |
|                                      |                       |                       | Rugosidad                   | Rugosímetro           |
| Geometría interna o de relleno       | Software de Laminado  | Repetier Host. Slic3r | Tiempo                      | Reloj/Cronómetro      |
|                                      |                       |                       | Acelerómetro                | Vibración             |
|                                      |                       |                       | Rugosidad                   | Rugosímetro           |
| Avance (mm/s)                        | Software de Laminado  | Repetier Host. Slic3r | Tiempo                      | Reloj/Cronómetro      |
|                                      |                       |                       | Dimensiones                 | Pie de Rey            |
|                                      |                       |                       | Acelerómetro                | Vibración             |
|                                      |                       |                       | Rugosidad                   | Rugosímetro           |
| Densidad de la geometría interna (%) | Software de Laminado  | Repetier Host. Slic3r | Tiempo                      | Reloj/Cronómetro      |
|                                      |                       |                       | Dimensiones                 | Pie de Rey            |
|                                      |                       |                       | Acelerómetro                | Vibración             |
|                                      |                       |                       | Rugosidad                   | Rugosímetro           |
| Altura de capa (mm)                  | Software de Laminado  | Repetier Host. Slic3r | Rugosidad                   | Rugosímetro           |
| Temperatura (°C)                     | Software de Laminado  | Repetier Host. Slic3r | Rugosidad                   | Rugosímetro           |

**TABLA 5.4.- Unión de tablas 5.2 y 5.3. Análisis de parámetros y variables.- Elaboración propia.**

Tras realizar varias impresiones de prueba para la búsqueda de unos valores representativos para los parámetros a considerar, se observa que hay dos parámetros que se pueden fijar para la simplificación de los ensayos. En varios intentos por conseguir la impresión de una circunferencia de 100 mm de diámetro y 10 mm de altura con una altura de capa de 0,1 mm para obtener la mejor calidad en el eje Z posible con una geometría de relleno “Honeycomb”, se observa que debido a la condición de sistema abierto de la impresora (mencionada en el apartado 5.1.3) por la cual no corrige su trayectoria en desviaciones, para un avance de 60 mm/s el extrusor se atranca en el material de la capa anterior y la impresión de la siguiente ocurre en coordenadas erróneas. Se observa también que a una temperatura inferior de 210°C el material no fluye eficientemente, mientras que a temperaturas de más de 225°C comienza a salir de un color oscuro. Por ello, para simplificar la cantidad de impresiones a realizar, se fijan la temperatura y la altura de capa en 220°C y en 0,2 mm, valores considerados óptimo por los usuarios de Witbox. Es importante apuntar que la altura de capa ha sido fijada además debido a que el objetivo de este proyecto se centra en el estudio de la influencia debida a la geometría principalmente bidimensional.

En las siguientes imágenes se puede ver lo que ocurrió durante la impresión a una altura de capa de 0,1 mm:



**FIGURA 5.4.-** Vista de planta de probeta impresa con una altura de capa de 0,1 mm a 60 mm/s.- Foto propia.



**FIGURA 5.5.- Vista de lateral de probeta impresa con una altura de capa de 0,1 mm a 60 mm/s.- Foto propia.**

En las figuras 5.4 y 5.5 se puede observar cómo la impresora siguió imprimiendo capas en coordenadas desviadas hasta terminar la pieza. Es por ello que es importante realizar un mantenimiento de la boquilla (asegurarse que está limpia) y un calibrado correcto de la base, como se comentará en apartados posteriores.

Por lo tanto, se considerarán finalmente los siguientes valores para las variables anteriores:

| PARÁMETROS                           | VALORES                                          | COMENTARIO                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geometría externa.                   | Hexágono<br>Cuadrado<br>Triángulo                | Se desea visualizar el comportamiento dimensional exterior en el cambio de dirección según si el ángulo es más o menos cerrado.                                                  |
| Geometría interna o de relleno       | Archimedean<br>Chord<br>Rectilinear<br>Honeycomb | Tienen diferentes geometrías, siendo Rectilinear líneas rectas de lateral a lateral, Archimedean Chord una espiral y Honeycomb formas hexagonales.                               |
| Avance (mm/s)                        | 40 mm/s<br>60 mm/s<br>80 mm/s                    | Se eligen estos valores debido a que según la marca Bq, 60 mm/s es el valor óptimo, mientras que no se recomienda utilizar un avance superior a 80 mm/s                          |
| Densidad de la geometría interna (%) | 15 %<br>30 %<br>50%                              | Para un valor superior a 50% de densidad la pieza en el caso de patrones o geometrías internas complejas (honeycomb) se puede considerar compacta, no definiéndose la geometría. |
| Altura de capa (mm)                  | 0,2 mm                                           | Valor óptimo.                                                                                                                                                                    |
| Temperatura (°C)                     | 220 °C                                           | Valor recomendado por usuarios de Witbox.                                                                                                                                        |

**TABLA 5.5.- Valores asignados a estudio para los parámetros elegidos.- Elaboración propia.**

### 5.2.2. Diseño de probetas.

Antes de comenzar a realizar los primeros experimentos de prueba para corroborar que el método elegido resulta de utilidad, es necesario el diseño de las probetas.

Las probetas tendrán como parámetro común el área de la base y su altura, por lo que el volumen será constante. Así pues, teniendo en cuenta lo anterior, mediante el software Solidworks 2014 versión estudiante se diseñan los volúmenes con las proporciones que se observan en los planos del apartado 9.3.

Las geometrías exteriores tendrán en común el área de la base y la altura, por lo que tendrán el mismo volumen. En la siguiente tabla se recoge esta información:

| GEOMETRÍA EXTERIOR | Área $a$ (mm <sup>2</sup> ) | Perímetro $p$ (mm) | Relación $p/a$ (1/m) | Relación $p/a$ con respecto: |           |          |
|--------------------|-----------------------------|--------------------|----------------------|------------------------------|-----------|----------|
|                    |                             |                    |                      | Cuadrado                     | Triángulo | Hexágono |
| Hexágono           | 5542,56                     | 277,13             | 50                   | 0,93                         | 0,82      | 1,00     |
| Triángulo          | 5542,56                     | 339,41             | 61,24                | 1,14                         | 1,00      | 1,22     |
| Cuadrado           | 5542,56                     | 297,79             | 53,73                | 1,00                         | 0,88      | 1,07     |

TABLA 5.6.- Datos de diseño geométrico de las probetas y relación entre ellas.- Elaboración propia.

Además de estos datos las tres geometrías serán impresas quedando abiertas en la zona inferior y terminando sus últimas capas cerradas, de forma que por abajo se podrá observar la geometría interna y por arriba se medirá la rugosidad superficial que se obtiene debida a su relleno. Se imprimirá una falda corta para asegurar que no se despegará la pieza durante la impresión y que el material fluye por la boquilla libremente antes de comenzar la impresión de la geometría que interesa.

Posteriormente, se guardan el modelo digital en formato \*.stl para exportarlo al segundo software donde se descompondrá en coordenadas y donde se le asignará los valores de las variables.

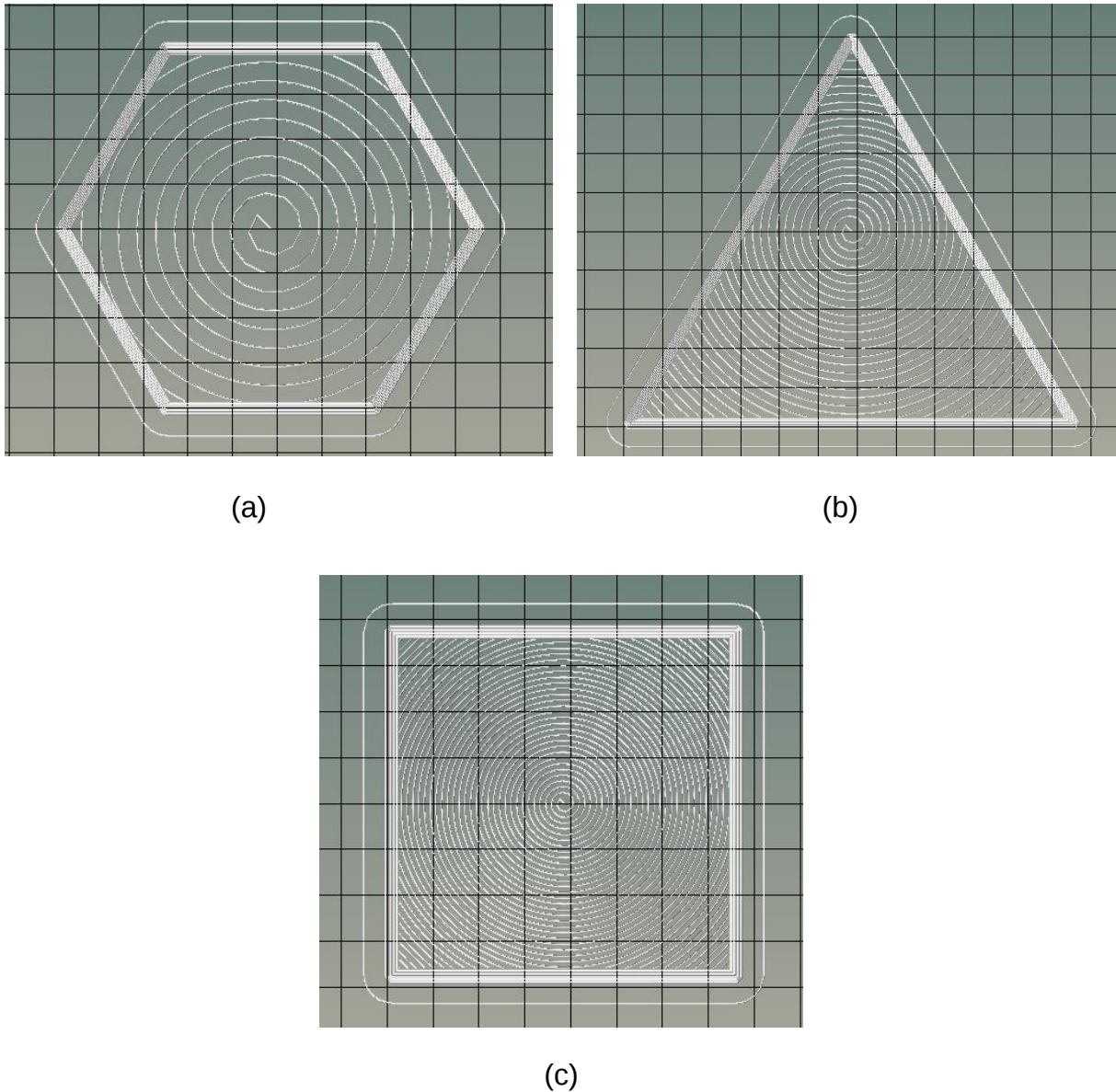
### 5.2.3. Patrón de relleno.

Los patrones elegidos para los ensayos son los siguientes:

#### 5.2.3.1. Archimedean Chords.

Presenta la forma de espiral cuyas curvas estarán compuestas por líneas en distintas direcciones. Los ángulos que hay entre línea y línea oscilan mayoritariamente entre  $160^\circ$  y  $180^\circ$ . Según la densidad estará compuesto por más o menos líneas de longitud similar.

A continuación se muestran unos ejemplos de este patrón de relleno:

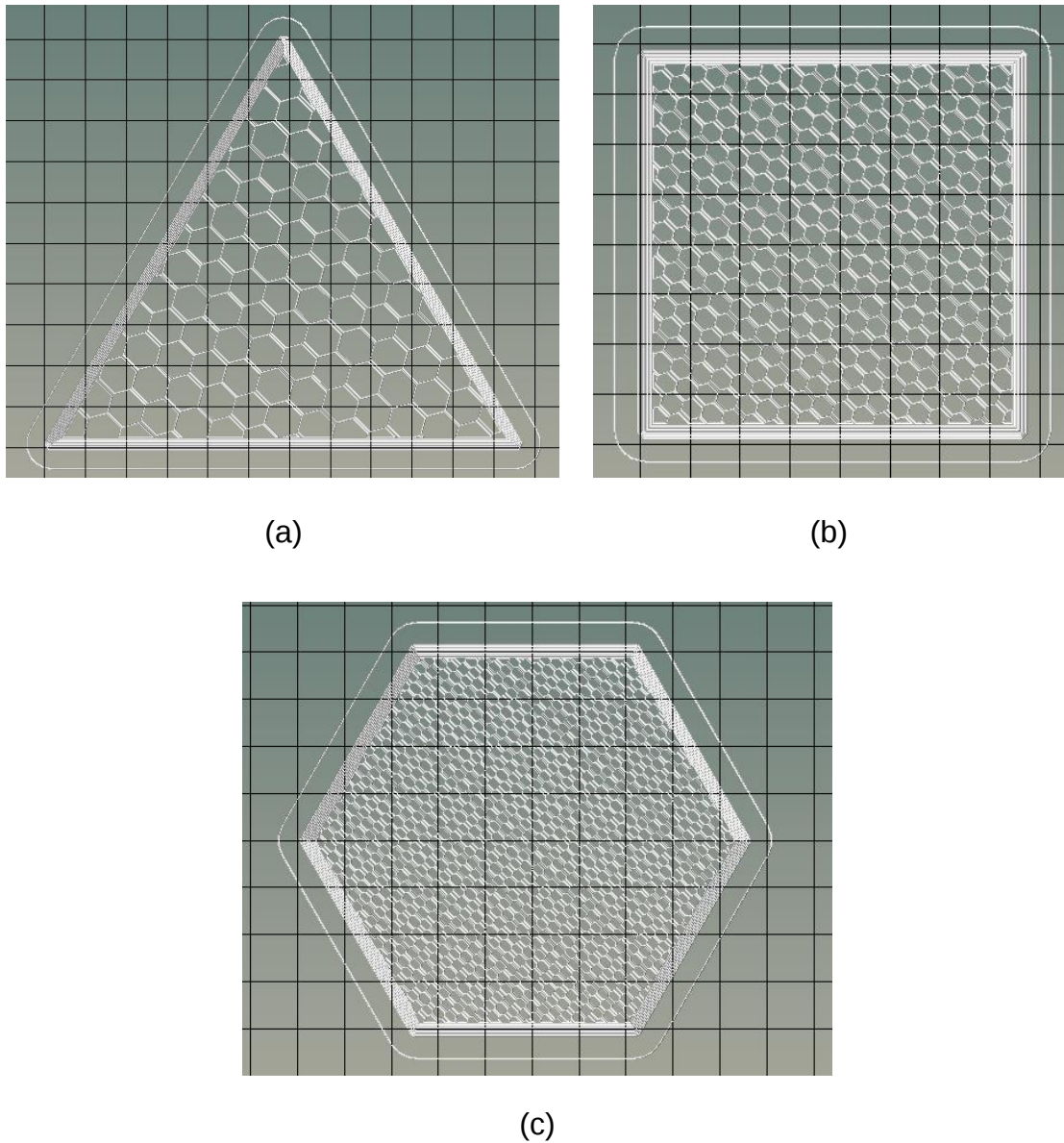


**FIGURA 5.6.-** (a) Geometría externa HEXÁGONO con geometría interna ARCHIMEDEAN CHORDS de densidad de relleno 15. (b) Geometría externa TRIÁNGULO con geometría interna ARCHIMEDEAN CHORDS de densidad de relleno 30%. (c) Geometría externa CUADRADO con geometría interna ARCHIMEDEAN CHORDS de densidad de relleno 50%.- Elaborada en REPETIER-HOST.

#### 5.2.3.2. Honeycomb.

Consta de un conjunto de hexágonos que forma lo que se conoce como un “panel”. El ángulo que predomina en éste patrón es de  $120^\circ$ .

A continuación se muestra unos ejemplos de este patrón de relleno:

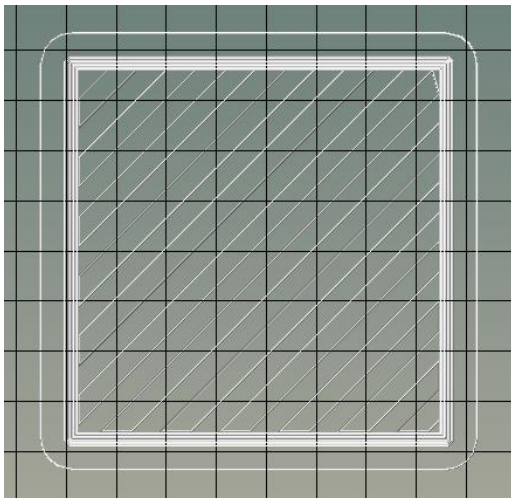


**FIGURA 5.7.- (a) Geometría externa TRIÁNGULO con geometría interna HONEYCOMB de densidad de relleno 15%. (b) Geometría externa CUADRADO con geometría interna HONEYCOMB de densidad de relleno 30%. (c) Geometría externa HEXÁGONO con geometría interna HONEYCOMB de densidad de relleno 50%.- Elaborada en REPETIER-HOST.**

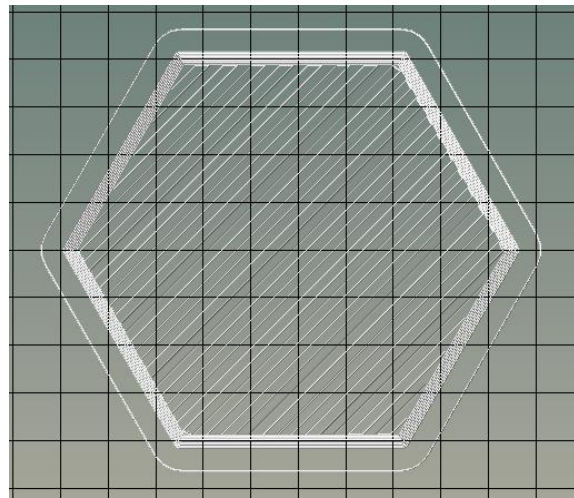
#### 5.2.3.3. Rectilinear.

Se compone de sencillas rectas a  $45^\circ$  que se superponen cambiando en cada capa su dirección y creando una maya cuadriculada. El ángulo predominante en este patrón es dependiente de la geometría exterior, aunque en todas ellas aparecen cambios a  $45^\circ$  cuando la pared exterior es horizontal o vertical.

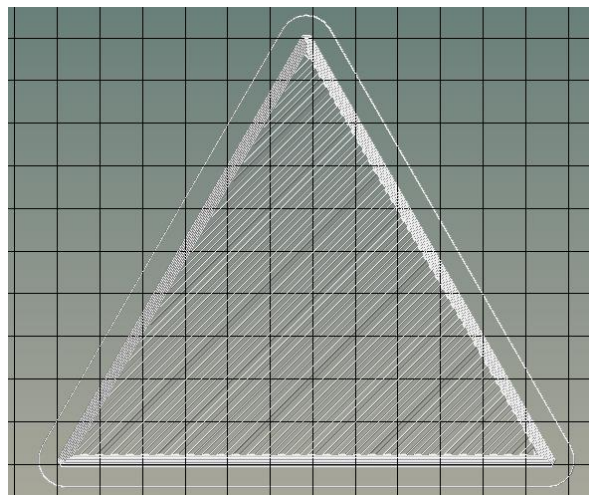
A continuación se muestra unos ejemplos de este patrón de relleno:



(a)



(b)



(c)

**FIGURA 5.8.- (a) Geometría externa CUADRADO con geometría interna RECTILINEAR de densidad de relleno 15%. (b) Geometría externa HEXÁGONO con geometría interna RECTILINEAR de densidad de relleno 30%. (c) Geometría externa TRIÁNGULO con geometría interna RECTILINEAR de densidad de relleno 50%.- Elaborada en REPETIER-HOST.**

#### 5.2.4. Asignación de parámetros.

Para la generación del código G y la asignación de valores a los parámetros se utilizará el software Repetier-Host, que integra el programa de laminado Slic3r.

##### 5.2.4.1. Repetier-Host.

Repetier-Host es un software cuya finalidad es la visualización de las piezas modeladas previamente y en formato \*.stl, generar el laminado con el laminador Slic3r (o Skeinforge), guardando el código en formato \*.gcode e imprimir siempre que la impresora esté conectada por USB.

Si bien no es necesario instalar Repetier-Host para utilizar Slic3r, Repetier-Host está diseñado para ser de uso más sencillo e intuitivo, aportando más opciones para controlar y visualizar los formatos \*.stl y \*.gcode.

##### 5.2.4.2. Configuración y utilización.

En primer lugar, Repetier-Host abrirá una ventana para configurar la impresora. Si se abre directamente sin configurar, se podrá realizar la configuración en la opción Configurar Impresora que aparece en la parte superior derecha. En el caso de Witbox, sólo hay que aceptar la configuración por defecto.

Para realizar el código G o ISO de una pieza para imprimir, en primer lugar se abrirá el archivo con la extensión \*.stl en el menú Archivo > Abrir. Aparecerá la geometría en cuestión en la pantalla colocada justo en el centro de la base de impresión.

A continuación, aunque se pueden realizar los ajustes de los parámetros directamente sin abrir Slic3r, en este proyecto se ha abierto pulsando en Configuración, botón que aparece bajo **Slice con Slic3r** en la zona derecha de la pantalla, justo sobre la selección de los perfiles configurados y guardados previamente con esta opción.

Cuando hayan sido introducidos los valores de los parámetros que se deseen y seleccionado el perfil donde ha sido guardados, se clickeará en **Slice con Slic3r**, generándose el archivo \*.gcode.

Para poder imprimir ese archivo sin conexión USB, tal y como se ha hecho en el desarrollo de este proyecto, es necesario guardar el código en su formato \*.gcode en una tarjeta SD, que será introducida en la ranura SD que se encuentra en el interior de la impresora, justo detrás de la pantalla LCD.

Sin embargo, para realizar este paso es necesario establecer qué combinación se va a realizar. Para ello, es el momento de encontrar un método apropiado para este estudio teórico-experimental.

#### **5.2.5. Diseño de experimentos: listas de combinaciones.**

##### *5.2.5.1. Método de Taguchi.*

En un principio se pensó el uso de un análisis estadístico mediante el método de Taguchi, donde se definieron los niveles mostrados en la siguiente tabla:

| NIVEL | GEOMETRÍA | PATRÓN             | DENSIDAD % | AVANCE mm/s |
|-------|-----------|--------------------|------------|-------------|
| 1     | Hexágono  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 15         | 40          |
| 2     | Triángulo | RECTILINEAR        | 30         | 60          |
| 3     | Cuadrado  | HONEYCOMB          | 50         | 80          |

**TABLA 5.7.- Elección de parámetros para cada nivel.- Elaborado en EXCEL.**

Teniéndose tres niveles y cuatro parámetros, la matriz de combinaciones de Taguchi sería la siguiente:

| Número de experimento | Parámetros |   |   |   |
|-----------------------|------------|---|---|---|
|                       | 1          | 2 | 3 | 4 |
| 1                     | 1          | 1 | 1 | 1 |
| 2                     | 1          | 2 | 2 | 2 |
| 3                     | 1          | 3 | 3 | 3 |
| 4                     | 2          | 1 | 2 | 3 |
| 5                     | 2          | 2 | 3 | 1 |
| 6                     | 2          | 3 | 1 | 2 |
| 7                     | 3          | 1 | 3 | 2 |
| 8                     | 3          | 2 | 1 | 3 |
| 9                     | 3          | 3 | 2 | 1 |

**TABLA 5.8.- Matriz de combinaciones.**  
Método de Taguchi.-  
Elaborado en EXCEL.

Para que el método pueda ser analizado estadísticamente, se establece de necesidad realizar los experimentos tres veces en un orden distinto. Por ello se crearon las siguientes tablas:

| EXPERIMENTOS 1º       |        |   |   |   |            |                    |            |             |
|-----------------------|--------|---|---|---|------------|--------------------|------------|-------------|
| Número de experimento | MATRIZ |   |   |   | Parámetros |                    |            |             |
|                       | 1      | 2 | 3 | 4 | Geometría  | Patrón             | Densidad % | Avance mm/s |
| 1                     | 1      | 1 | 1 | 1 | Hexágono   | ARCHIMEDEAN CHORDS | 15         | 40          |
| 2                     | 1      | 2 | 2 | 2 | Hexágono   | RECTILINEAR        | 30         | 60          |
| 3                     | 1      | 3 | 3 | 3 | Hexágono   | HONEYCOMB          | 50         | 80          |
| 4                     | 2      | 1 | 2 | 3 | Triángulo  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 30         | 80          |
| 5                     | 2      | 2 | 3 | 1 | Triángulo  | RECTILINEAR        | 50         | 40          |
| 6                     | 2      | 3 | 1 | 2 | Triángulo  | HONEYCOMB          | 15         | 60          |
| 7                     | 3      | 1 | 3 | 2 | Cuadrado   | ARCHIMEDEAN CHORDS | 50         | 60          |
| 8                     | 3      | 2 | 1 | 3 | Cuadrado   | RECTILINEAR        | 15         | 80          |
| 9                     | 3      | 3 | 2 | 1 | Cuadrado   | HONEYCOMB          | 30         | 40          |

**TABLA 5.9.- Orden de combinaciones de experimentos 1.-** Elaborado en EXCEL.

| EXPERIMENTOS 2º       |        |   |   |   |            |                    |            |             |
|-----------------------|--------|---|---|---|------------|--------------------|------------|-------------|
| Número de experimento | MATRIZ |   |   |   | Parámetros |                    |            |             |
|                       | 1      | 2 | 3 | 4 | Geometría  | Patrón             | Densidad % | Avance mm/s |
| 2                     | 1      | 2 | 2 | 2 | Hexágono   | RECTILINEAR        | 30         | 60          |
| 5                     | 2      | 2 | 3 | 1 | Triángulo  | RECTILINEAR        | 50         | 40          |
| 8                     | 3      | 2 | 1 | 3 | Cuadrado   | RECTILINEAR        | 15         | 80          |
| 1                     | 1      | 1 | 1 | 1 | Hexágono   | ARCHIMEDEAN CHORDS | 15         | 40          |
| 7                     | 3      | 1 | 3 | 2 | Cuadrado   | ARCHIMEDEAN CHORDS | 50         | 60          |
| 4                     | 2      | 1 | 2 | 3 | Triángulo  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 30         | 80          |
| 3                     | 1      | 3 | 3 | 3 | Hexágono   | HONEYCOMB          | 50         | 80          |
| 9                     | 3      | 3 | 2 | 1 | Cuadrado   | HONEYCOMB          | 30         | 40          |
| 6                     | 2      | 3 | 1 | 2 | Triángulo  | HONEYCOMB          | 15         | 60          |

**TABLA 5.10.- Orden de combinaciones de experimentos 2.-** Elaborado en EXCEL.

| EXPERIMENTOS 3º       |        |   |   |   |            |                    |            |             |
|-----------------------|--------|---|---|---|------------|--------------------|------------|-------------|
| Número de experimento | MATRIZ |   |   |   | Parámetros |                    |            |             |
|                       | 1      | 2 | 3 | 4 | Geometría  | Patrón             | Densidad % | Avance mm/s |
| 5                     | 2      | 2 | 3 | 1 | Triángulo  | RECTILINEAR        | 50         | 40          |
| 3                     | 1      | 3 | 3 | 3 | Hexágono   | HONEYCOMB          | 50         | 80          |
| 7                     | 3      | 1 | 3 | 2 | Cuadrado   | ARCHIMEDEAN CHORDS | 50         | 60          |
| 2                     | 1      | 2 | 2 | 2 | Hexágono   | RECTILINEAR        | 30         | 60          |
| 4                     | 2      | 1 | 2 | 3 | Triángulo  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 30         | 80          |
| 9                     | 3      | 3 | 2 | 1 | Cuadrado   | HONEYCOMB          | 30         | 40          |
| 6                     | 2      | 3 | 1 | 2 | Triángulo  | HONEYCOMB          | 15         | 60          |
| 1                     | 1      | 1 | 1 | 1 | Hexágono   | ARCHIMEDEAN CHORDS | 15         | 40          |
| 8                     | 3      | 2 | 1 | 3 | Cuadrado   | RECTILINEAR        | 15         | 80          |

**TABLA 5.11.-Orden de combinaciones de experimentos 3.- Elaborado en EXCEL.**

Finalmente y tras crear el código de las combinaciones en Repetier-Host y Slic3r, se comenzaron a llevar a cabo los primeros nueve experimentos para evaluar si los resultados obtenidos eran concluyentes. Sin embargo, y debido a la gran reducción en el número de experimentos y a la escasa información obtenida entre ellos, teniendo en cuenta la novedad de ésta tecnología de adición y la falta de información previa se establece que este método no es el adecuado para cumplir con los objetivos establecidos.

Es por ello por lo que descarta éste método.

#### 5.2.5.2. Diseño de experimentos elegido.

Aunque el diseño de Taguchi se ha descartado, tampoco se empleará un diseño ortogonal con todas las combinaciones posibles (Tabla 5.12) ya que supondría la realización de 81 ensayos lo que supondría un coste en tiempo y dinero elevado.

|    |                     |                     |            |          |
|----|---------------------|---------------------|------------|----------|
| 1  | GEOMETRÍA EXTERNA 1 | PATRÓN DE RELLENO 1 | DENSIDAD 1 | AVANCE 1 |
| 2  |                     |                     |            | AVANCE 2 |
| 3  |                     |                     |            | AVANCE 3 |
| 4  |                     |                     | DENSIDAD 2 | AVANCE 1 |
| 5  |                     |                     |            | AVANCE 2 |
| 6  |                     |                     |            | AVANCE 3 |
| 7  |                     |                     | DENSIDAD 3 | AVANCE 1 |
| 8  |                     |                     |            | AVANCE 2 |
| 9  |                     |                     |            | AVANCE 3 |
| 10 |                     | PATRÓN DE RELLENO 2 | DENSIDAD 1 | AVANCE 1 |
| 11 |                     |                     |            | AVANCE 2 |

|    |  |                     |            |          |
|----|--|---------------------|------------|----------|
| 12 |  |                     |            | AVANCE 3 |
| 13 |  |                     | DENSIDAD 2 | AVANCE 1 |
| 14 |  |                     |            | AVANCE 2 |
| 15 |  |                     |            | AVANCE 3 |
| 16 |  |                     | DENSIDAD 3 | AVANCE 1 |
| 17 |  |                     |            | AVANCE 2 |
| 18 |  |                     |            | AVANCE 3 |
| 19 |  | PATRÓN DE RELLENO 3 | DENSIDAD 1 | AVANCE 1 |
| 20 |  |                     |            | AVANCE 2 |
| 21 |  |                     |            | AVANCE 3 |
| 22 |  |                     | DENSIDAD 2 | AVANCE 1 |
| 23 |  |                     |            | AVANCE 2 |
| 24 |  |                     |            | AVANCE 3 |
| 25 |  |                     | DENSIDAD 3 | AVANCE 1 |
| 26 |  |                     |            | AVANCE 2 |
| 27 |  |                     |            | AVANCE 3 |

**TABLA 5.12.- Número total de combinaciones posibles para una geometría externa.- Elaborado en EXCEL.**

Para simplificar el número de experimentos, se elegirán de entre todas las combinaciones un las necesarias para ver resultados concluyentes. Por lo tanto, se ha optado por un diseño fraccionado que sigue un esquema de combinaciones creado específicamente para el sistema analizado.

Teniendo ya las mediciones y resultados obtenidos en la realización de la Tabla 5.9 de experimentos de prueba para el método de Taguchi, se escogerán las siguientes combinaciones según ésta dividiéndolos en cinco grupos de nueve experimentos. Para distinguir en qué grupo se van a imprimir, se tendrá en cuenta el siguiente código de color:

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| 1º | 2º | 3º | 4º | 5º |
|----|----|----|----|----|

**TABLA 5.13.- Código de color según orden de experimentos.- Elaborado en EXCEL.**

Del número total de combinaciones se imprimirán las cuarenta y cinco siguientes:

| Nº | GEOMETRÍA EXTERNA | PATRÓN DE RELLENO  | DENSIDAD | VELOCIDAD | ORDEN |
|----|-------------------|--------------------|----------|-----------|-------|
| 1  | Hexágono          | ARCHIMEDEAN CHORDS | 15       | 40        | 1     |
| 5  | Hexágono          | ARCHIMEDEAN CHORDS | 30       | 60        | 1     |

|    |           |                    |    |    |   |
|----|-----------|--------------------|----|----|---|
| 7  | Hexágono  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 50 | 40 | 1 |
| 8  | Hexágono  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 50 | 60 | 1 |
| 9  | Hexágono  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 50 | 80 | 1 |
| 10 | Hexágono  | RECTILINEAR        | 15 | 40 | 2 |
| 11 | Hexágono  | RECTILINEAR        | 15 | 60 | 2 |
| 12 | Hexágono  | RECTILINEAR        | 15 | 80 | 2 |
| 14 | Hexágono  | RECTILINEAR        | 30 | 60 | 2 |
| 18 | Hexágono  | RECTILINEAR        | 50 | 80 | 2 |
| 19 | Hexágono  | HONEYCOMB          | 15 | 40 | 3 |
| 22 | Hexágono  | HONEYCOMB          | 30 | 40 | 3 |
| 23 | Hexágono  | HONEYCOMB          | 30 | 60 | 3 |
| 24 | Hexágono  | HONEYCOMB          | 30 | 80 | 3 |
| 27 | Hexágono  | HONEYCOMB          | 50 | 80 | 3 |
| 28 | Triángulo | ARCHIMEDEAN CHORDS | 15 | 40 | 4 |
| 29 | Triángulo | ARCHIMEDEAN CHORDS | 15 | 60 | 4 |
| 30 | Triángulo | ARCHIMEDEAN CHORDS | 15 | 80 | 4 |
| 33 | Triángulo | ARCHIMEDEAN CHORDS | 30 | 80 | 4 |
| 34 | Triángulo | ARCHIMEDEAN CHORDS | 50 | 40 | 4 |
| 38 | Triángulo | RECTILINEAR        | 15 | 60 | 5 |
| 40 | Triángulo | RECTILINEAR        | 30 | 40 | 5 |
| 41 | Triángulo | RECTILINEAR        | 30 | 60 | 5 |
| 42 | Triángulo | RECTILINEAR        | 30 | 80 | 5 |
| 43 | Triángulo | RECTILINEAR        | 50 | 40 | 5 |
| 47 | Triángulo | HONEYCOMB          | 15 | 60 | 6 |
| 51 | Triángulo | HONEYCOMB          | 30 | 80 | 6 |
| 52 | Triángulo | HONEYCOMB          | 50 | 40 | 6 |
| 53 | Triángulo | HONEYCOMB          | 50 | 60 | 6 |
| 54 | Triángulo | HONEYCOMB          | 50 | 80 | 6 |
| 57 | Cuadrado  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 15 | 80 | 7 |
| 58 | Cuadrado  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 30 | 40 | 7 |
| 59 | Cuadrado  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 30 | 60 | 7 |
| 60 | Cuadrado  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 30 | 80 | 7 |
| 62 | Cuadrado  | ARCHIMEDEAN CHORDS | 50 | 60 | 7 |
| 66 | Cuadrado  | RECTILINEAR        | 15 | 80 | 8 |
| 67 | Cuadrado  | RECTILINEAR        | 30 | 40 | 8 |
| 70 | Cuadrado  | RECTILINEAR        | 50 | 40 | 8 |
| 71 | Cuadrado  | RECTILINEAR        | 50 | 60 | 8 |
| 72 | Cuadrado  | RECTILINEAR        | 50 | 80 | 8 |
| 73 | Cuadrado  | HONEYCOMB          | 15 | 40 | 9 |
| 74 | Cuadrado  | HONEYCOMB          | 15 | 60 | 9 |
| 75 | Cuadrado  | HONEYCOMB          | 15 | 80 | 9 |

|    |          |           |    |    |   |
|----|----------|-----------|----|----|---|
| 76 | Cuadrado | HONEYCOMB | 30 | 40 | 9 |
| 80 | Cuadrado | HONEYCOMB | 50 | 60 | 9 |

**TABLA 5.14.- Combinaciones a estudiar.- Elaborado en EXCEL.**

Sin embargo, la elección de las combinaciones no ha sido al azar, sino siguiendo una lógica concreta. Para poder discernir con más claridad el efecto que causa un único parámetro independiente sobre los demás, se escogieron posiciones contiguas como refleja la Tabla 5.15:

|           | densidad<br>velocidad | 15<br>40 | 15<br>60 | 15<br>80 | 30<br>40 | 30<br>60 | 30<br>80 | 50<br>40 | 50<br>60 | 50<br>80 |
|-----------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Hexágono  | ARCHIMEDEAN CHORDS    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Hexágono  | RECTILINEAR           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Hexágono  | HONEYCOMB             |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Triángulo | ARCHIMEDEAN CHORDS    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Triángulo | RECTILINEAR           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Triángulo | HONEYCOMB             |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cuadrado  | ARCHIMEDEAN CHORDS    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cuadrado  | RECTILINEAR           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Cuadrado  | HONEYCOMB             |          |          |          |          |          |          |          |          |          |

**TABLA 5.15.- Matriz de combinaciones.- Elaborado en EXCEL.**

|           | densidad<br>velocidad | 15<br>40 | 15<br>60 | 15<br>80 | 30<br>40 | 30<br>60 | 30<br>80 | 50<br>40 | 50<br>60 | 50<br>80 |
|-----------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Hexágono  | ARCHIMEDEAN CHORDS    | 1        |          |          |          | 5        |          | 7        | 8        | 9        |
| Hexágono  | RECTILINEAR           | 10       | 11       | 12       |          | 14       |          |          |          | 18       |
| Hexágono  | HONEYCOMB             | 19       |          |          | 22       | 23       | 24       |          |          | 27       |
| Triángulo | ARCHIMEDEAN CHORDS    | 28       | 29       | 30       |          |          | 33       | 34       |          |          |
| Triángulo | RECTILINEAR           |          | 38       |          | 40       | 41       | 42       | 43       |          |          |
| Triángulo | HONEYCOMB             |          | 47       |          |          |          | 51       | 52       | 53       | 54       |
| Cuadrado  | ARCHIMEDEAN CHORDS    |          |          | 57       | 58       | 59       | 60       |          | 62       |          |
| Cuadrado  | RECTILINEAR           |          |          | 66       | 67       |          |          | 70       | 71       | 72       |
| Cuadrado  | HONEYCOMB             | 73       | 74       | 75       | 76       |          |          |          | 80       |          |

**TABLA 5.16.- Matriz de combinaciones con numeración.- Elaborado en EXCEL.**

El número que se encuentra dentro de la matriz en la zona donde se exhibe el código de colores anterior es el que corresponde con el número de combinación (Tabla 5.16).

Cuando se planteó esta matriz se tenía el pensamiento de que la geometría externa y la velocidad eran variables más significativas que las demás, aunque para tener un número eficiente de experimentos que reflejaran las demás se alternó la

densidades y las geometrías, de forma que hubieran suficientes datos para poder graficar y verificar la relación entre todas.

Tras la impresión del segundo grupo de combinaciones y comenzar a graficar los resultados se decide seguir con este método.

Es momento de estudiar la forma de recogida de medidas realizada durante la impresión de las combinaciones.

#### **5.2.6. Obtención y estudio de las variables.**

Repetier-Host y Solidworks sólo aportan los valores teóricos de las variables tiempo y dimensiones. Sin embargo, a la hora de realizar la impresión de una pieza modelada y codificada, los valores reales varían.

A continuación se describen las técnicas utilizadas durante el desarrollo de este trabajo para la obtención teórica y experimental de estas variables.

##### *5.2.6.1. Tiempo.*

Repetier-Host no sólo es una herramienta que codifica una geometría en función de unos parámetros asignados. Además, este software calcula el tiempo de impresión según la velocidad de avance, densidad de relleno y geometría utilizada. No obstante, en la impresora Witbox real las continuas discontinuidades en las trayectorias, debidas a las interpolaciones lineales empleadas, generan aceleraciones y deceleraciones que reducen el avance medio. Esto aumenta el tiempo real de la operación.

Witbox por defecto calcula el tiempo que tarda en imprimir cada pieza, reflejándolo en la parte inferior de la pantalla LCD. Aunque resulta muy precisa, la unidad más pequeña que obtiene es el minuto.

Para este proyecto se ha buscado la mayor exactitud posible en el cálculo de variables, por lo que además de considerar el cálculo de Witbox se obtendrá el resultado de manera alternativa.

Al comienzo de cada impresión se ha apuntado la hora exacta, incluyendo segundos, en la que comienza el extrusor a moverse. Cuando ésta acaba la última capa y se para, se apunta la hora de finalización exacta.

Haciendo la diferencia entre la hora de comienzo y la hora de finalización de la impresión, se obtendrá el valor real del tiempo.

Del mismo modo, realizando la diferencia entre el tiempo que ha tardado realmente la impresión frente al calculado por Repetier-Host se obtendrá una diferencia de tiempo que posteriormente será la que se analizará y comparará con el resto de las variables, pues se asume que es el tiempo perdido sobre el que influyen los parámetros.

#### *5.2.6.2. Dimensiones superficiales.*

Al diseñar las probetas con Solidworks 2014 versión estudiante se obtienen automáticamente las dimensiones teóricas de la pieza, tal y como se puede ver en el plano del Anexo 9.3.

Los valores reales, por otro lado, han de medirse cuando la pieza está impresa y retirada de la base de impresión. Hay que tener en cuenta que al ser extruido el PLA por la boquilla a 220°C, el ambiente que hay dentro de la cámara de impresión es cálido y la pieza estará dilatada. Una vez fría, ya tiene la geometría final, por lo que será sobre ésta sobre la que tomaremos datos.

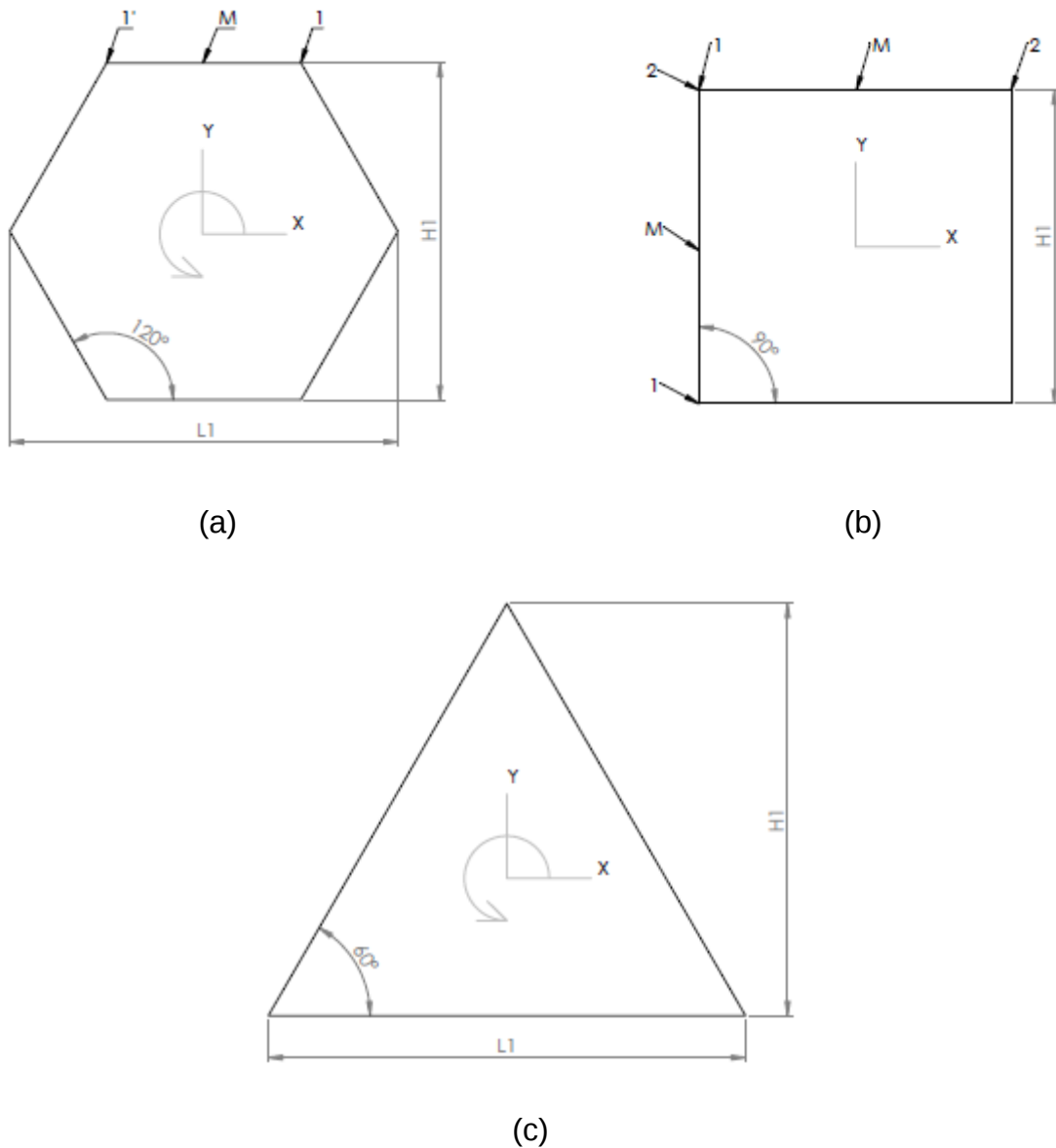
Para la medición de la geometría final y a falta de otro instrumento de medida más preciso y eficiente se utilizará un Pie de Rey.

Un Pie de Rey es un instrumento de medida de longitud cuyo valor más pequeño es, utilizando unidades del S.I., 0,02mm.

Según la geometría exterior se recogerá un número de datos, principalmente bidimensional (ejes X e Y) que son en los que más interés se tiene este proyecto.

Para ello se realizarán las mediciones de las probetas del siguiente modo, obteniendo las mismas para cada dirección al girarlas en el sentido indicado.

En la siguiente imagen se muestra las longitudes medidas:



**FIGURA 5.9.-** (a) Acotación de las longitudes medidas de la geometría HEXÁGONO. (b) Acotación de las longitudes medidas de la geometría CUADRADO. (c) Acotación de las longitudes medidas de la geometría TRIÁNGULO.- Elaborado en Solidworks.

#### 5.2.6.3. Rugosidad superficial.

Éste parámetro se medirá con un rugosímetro de la marca Mitutoyo.

La medición de la rugosidad es un método utilizado en la fabricación para el control de la calidad superficial de un producto. El micrómetro empleado tiene una resolución de 0.02 micras.

Para medir la rugosidad superficial es necesario seguir el siguiente orden:

0. Calibrar el rugosímetro según especifica el fabricante en las instrucciones.
1. Realizar una primera medida y recoger el valor de  $R_a$ . Según el valor obtenido se elegirán unas variables para configurar el sistema.
2. Configurado el sistema, se procede a colocar la punta cuidadosamente de forma que cuando sea recogida se mueva perpendicularmente a la dirección de las líneas de filamento.
3. Guardar los datos.
4. Repetir los pasos 2, 3 y 4 en todas las probetas.

Posteriormente se estudiarán los datos para tratar de entender el comportamiento que tienen frente al resto de parámetros.

#### *5.2.6.4. Vibración de la máquina.*

Durante la impresión, Witbox al igual que cualquier otra máquina, produce una vibración que genera una ligera desviación en la posición en la que el extrusor está situado, afectando a la calidad superficial de la pieza impresa.

Esta vibración queda reflejada en los laterales de las probetas cuando cambian de dirección a una velocidad alta.

Por ello y para estudiar la influencia que la geometría que está siendo impresa tiene sobre ésta, se medirá durante la impresión.

Se utilizará un sistema de adquisición de datos basado en una placa Arduino UNO con acelerómetro basado en condensadores (Figura 5.10), que se colocará en la tapa transparente de la parte superior de la impresora, tal y como se muestra en la Figura 5.11:



**FIGURA 5.10.- Arduino con acelerómetro colocado dentro de su caja.- Fotografía propia.**



**FIGURA 5.11.- Caja con Arduino colocada en la zona superior de la impresora.- Fotografía propia.**

Para configurar a Arduino UNO se utiliza el software Arduino 1.6.7., siendo libre en la web de la propia marca, y para lo cual es necesario introducir el código en c++ que se encuentra en el Anexo 9.2.1.

Éste código reconoce los datos que registra el acelerómetro en los tres ejes principales, los lee en filas separados por columnas según a qué corresponda.

Tras guardar el código es necesario verificar que está correcto con Arduino UNO conectado mediante USB y, verificado, se pulsa “Subir” para ejecutar.

Seguidamente, para guardar los datos registrados por Arduino 1.6.7. se ha creado un programa en el software Matlab versión R2012a (Anexo 9.2.2.) que lee los datos de dicho programa, los grafica para comprobar que los datos se están registrando correctamente, y guarda en formato txt y xls para futuros cálculos.

Posteriormente se realiza otro programa paralelo que relee los datos guardados anteriormente, limpia el ruido y los prepara para que Wolfram Mathematicas 9 calcule la transformada de Fourier de la señal registrada, obteniéndose datos que se pueden comparar con las variables de las que dependen. (Anexos 8.2.3. y 8.2.4.)

### **5.3. Ejecución de ensayos.**

#### **5.3.1. Preparación de la habitación.**

En primer lugar, es importante que la temperatura de la habitación donde se van a imprimir las piezas esté a la temperatura adecuada, siendo la misma para cada una de las impresiones.

El lugar será el laboratorio de metrología 049, 049A del edificio A3 (Escuela Politécnica Superior) del Campus Las Lagunillas de la Universidad de Jaén.

La temperatura ambiental a la que se realizan los experimentos es de 30°C.

Es importante que el lugar esté ordenado y, sobre todo, que la mesa donde se encuentra la impresora, así como los alrededores, estén despejados.

#### **5.3.2. Preparación de la impresora.**

La base de impresión o cama de la impresora debe de estar limpia. Se le echará una fina capa de laca en la superficie para que la primera capa se adhiera a ésta. Seguidamente se nivela la base siguiendo las instrucciones de Witbox y con el uso de la plantilla que trae la máquina. En el Anexo 9.1 se recoge el uso de la máquina y su preparación.

Se procederá a precalentar la boquilla del extrusor y cargar el filamento.

La correcta preparación de la impresora es muy importante para evitar que se produzcan casos como el de las Figuras 5.4 y 5.5 del apartado 5.2.1.

### **5.3.3. Preparación de la toma de datos.**

Antes de comenzar la impresión es imprescindible haber preparado el código G y apuntado los datos teóricos que Repetier-Host calcula.

También es necesaria la colocación previa del arduino acelerómetro en la parte de la impresora donde se ha decidido su instalación, y haber realizado los programas que registrarán los datos de éste.

Entonces, cuando tengamos los puntos anteriores, se procederá al comienzo del experimento, ejecutando en primer lugar el programa Arduino 1.6.7. seguido del archivo Matlab que lee y guarda los datos recogidos por el anterior. Matlab pedirá que se introduzca el nombre del fichero que va a crear y los datos teóricamente calculados. Una vez introducidos se pondrá la impresora en marcha.

### **5.3.4. Pasos posteriores.**

Es muy importante que durante la ejecución de la impresión no se realicen movimientos cerca de la mesa donde está la impresora ni se toque nada que esté en ésta, ya que afectaría en el registro del acelerómetro.

Una vez terminada la impresión, en primer lugar se parará la recogida de datos del Acelerómetro. Tras esto y tras apuntar el tiempo que la máquina ha contado que ha tardado realmente la impresión (se recuerda que se apuntó la hora inicial y la final de la impresión) se esperará a que la boquilla se haya enfriado. Se extraerá la base con la pieza impresa y se retirará cuidadosamente.

Finalmente se limpia la base del material que ha quedado adherido y de laca para su próximo uso.

Las probetas se marcarán con un rotulador permanente en la base superior donde se indicarán la posición de impresión y el número de probeta.

Se mide la probeta con el Pie de Rey y su rugosidad superficial como se indicaba en los apartados 5.2.6.2. y 5.2.6.3.

## 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Una vez realizados los ensayos y mediciones y hechos los cálculos convenientes, es interesante compararlos entre ellos en la búsqueda de coincidencias y tendencias que den respuesta a los objetivos planteados.

### 6.1. Estudio del tiempo real.

El tiempo teórico se calcula de la siguiente manera:

$$t_t = \frac{l}{v_f}$$

(Fórmula 6.1)

Donde  $t_t$  = tiempo teórico (s)  
 $l$  = longitud total recorrida por el extrusor (mm).  
 $v_f$  = velocidad de avance del extrusor (mm/s).

Sin embargo, aunque se quiera fijar una velocidad de avance concreta, el extrusor se mueve a 40 mm/s cuando realiza la primera capa para asegurar la fijación del material en la base de impresión, y cuando no inyecta y simplemente cambia su posición, la velocidad es de 130 mm/s, por lo que el tiempo teórico realmente se calcula así:

$$t_t = \frac{l_1}{v_{f_1}} + \frac{l_2}{v_{f_2}} + \frac{l_3}{v_{f_3}}$$

(Fórmula 6.2)

Donde  $t_t$  = tiempo teórico (s)

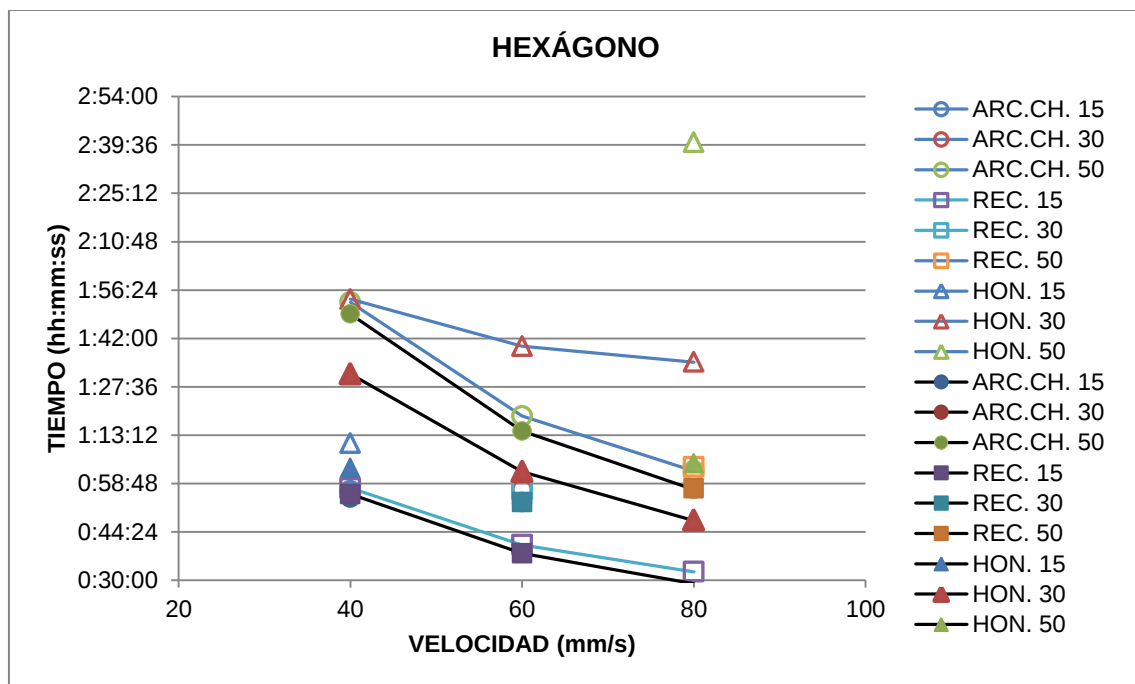
$l_1, l_2, l_3$  = tramos de longitud recorridas por el extrusor a cada velocidad (mm).

$v_{f1}, v_{f2}, v_{f3}$  = velocidades de avance del extrusor (mm/s).

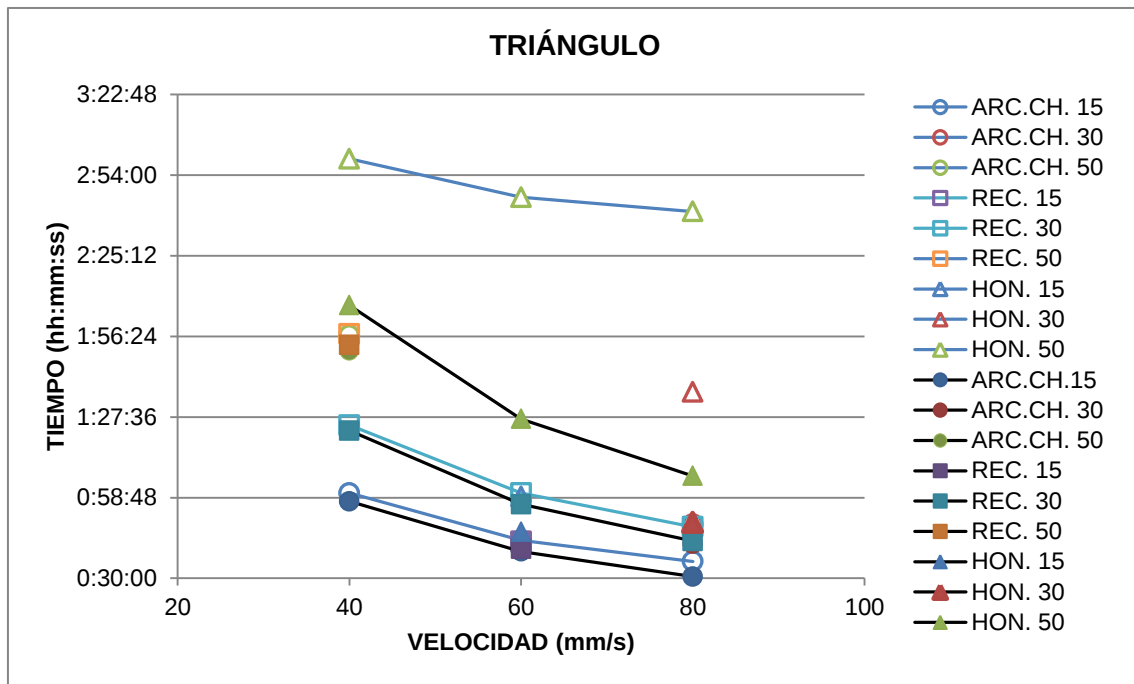
Por lo tanto, en este documento se habla de la velocidad de avance general fijada en la mayor parte de la impresión.

### 6.1.1. Observación de los resultados.

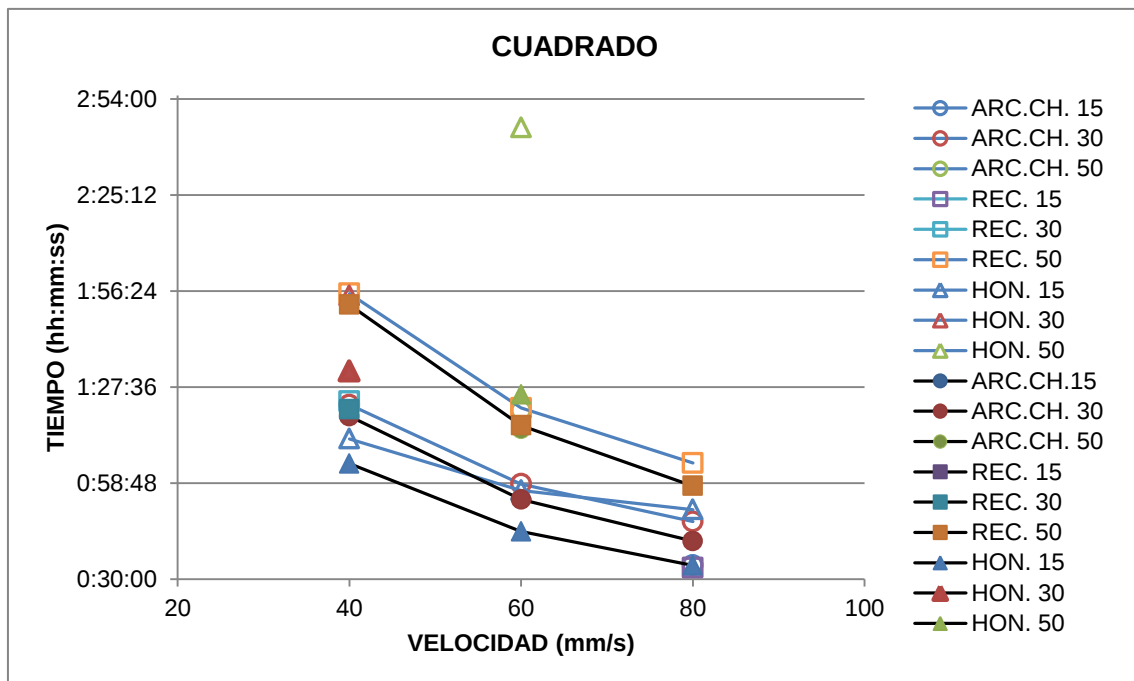
En primer lugar, se estudiará el tiempo teórico fijando la geometría exterior primero, y luego el tipo de patrón de relleno, y variando en los dos casos la velocidad de avance durante la impresión y, la densidad de relleno. Atendiendo a las Gráficas 6.26 a 6.37, las diferencias son más significativas cuando se cambia de un tipo de trayectoria de relleno a otra.



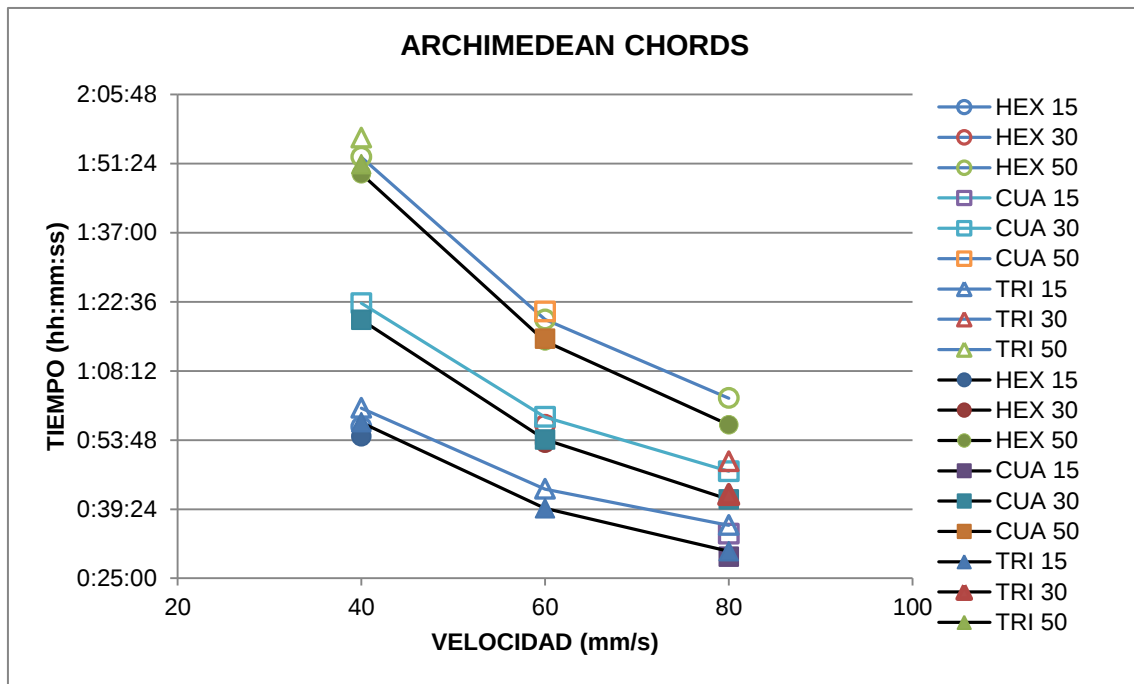
**GRÁFICA 6.26.-** Resultados temporales teóricos-experimentales de la geometría HEXÁGONO según la velocidad de avance. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.



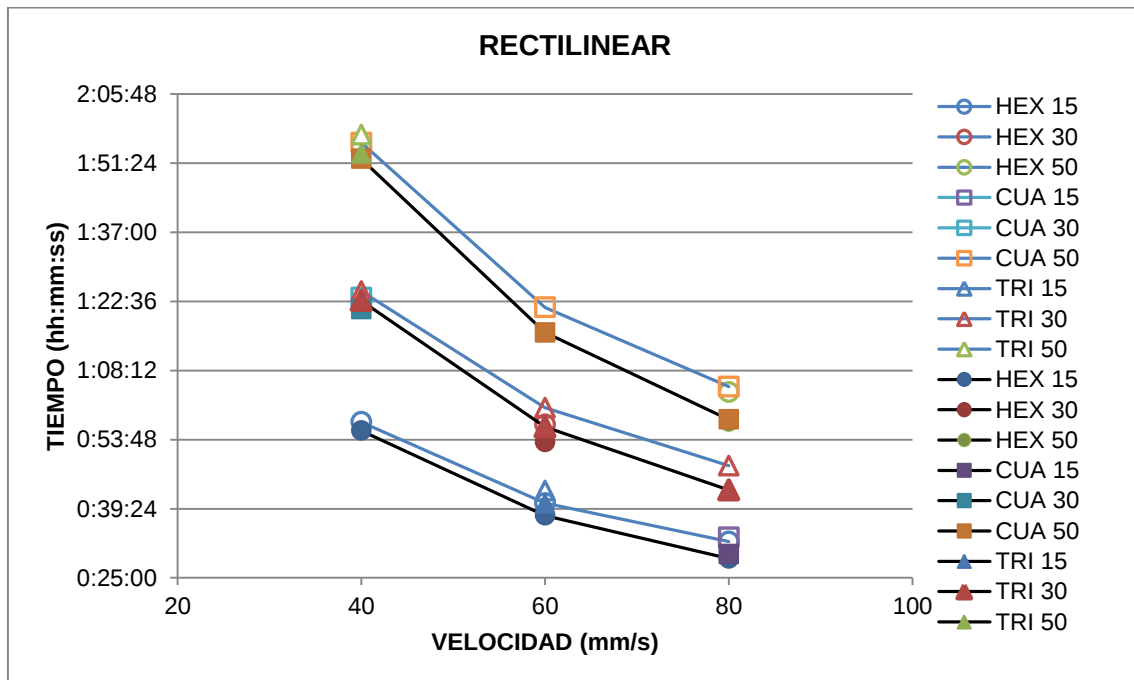
**GRÁFICA 6.27.- Resultados temporales teóricos-experimentales de la geometría TRIÁNGULO según la velocidad de avance. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.**



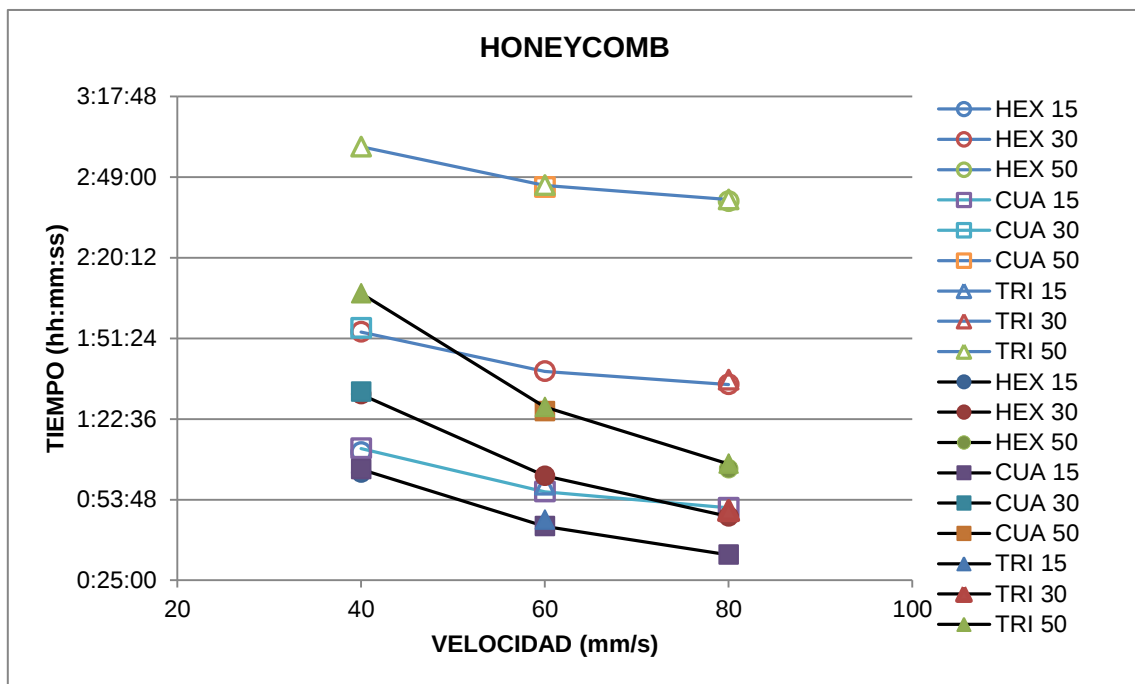
**GRÁFICA 6.28.- Resultados temporales teóricos-experimentales de la geometría CUADRADO según la velocidad de avance. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.**



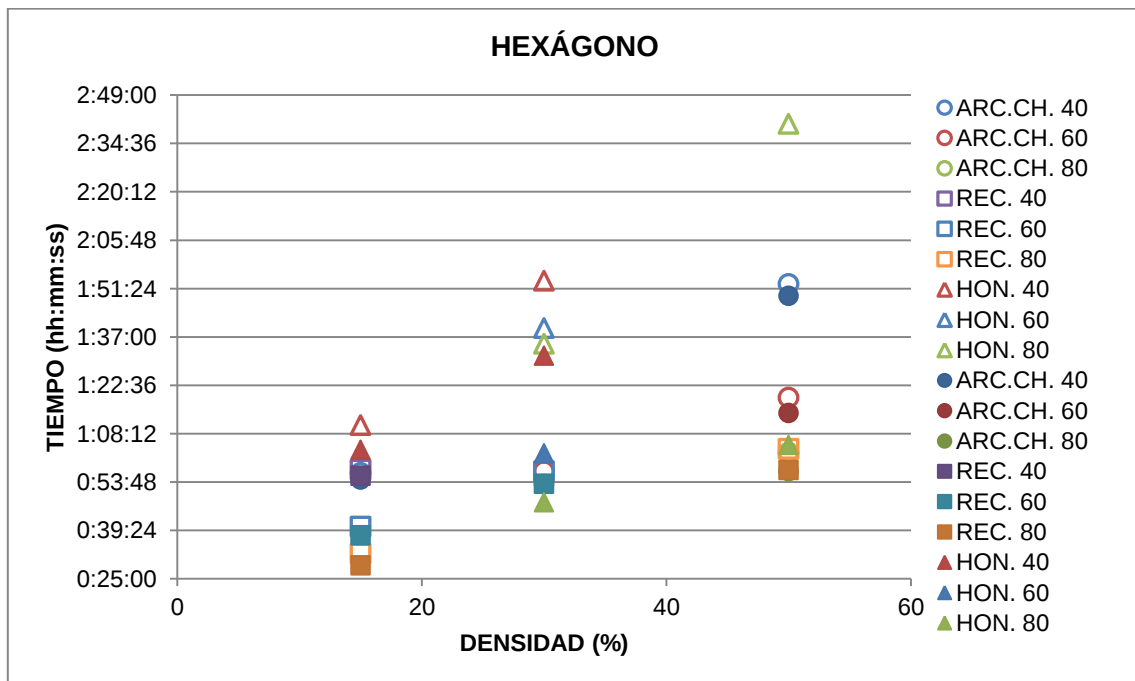
**GRÁFICA 6.29.- Resultados temporales teórico-experimentales del patrón ARCHIMEDEAN CHORDS según la velocidad de avance. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.**



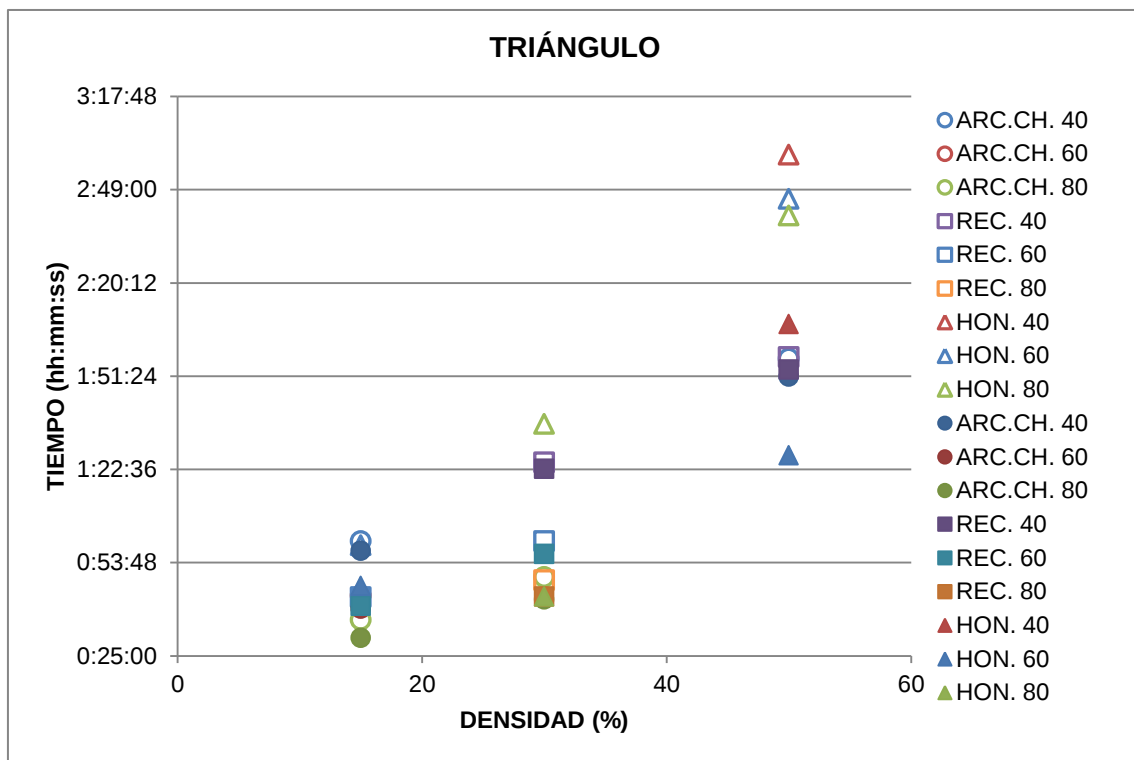
**GRÁFICA 6.30.- Resultados temporales teórico-experimentales del patrón RECILINEAR según la velocidad de avance. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.**



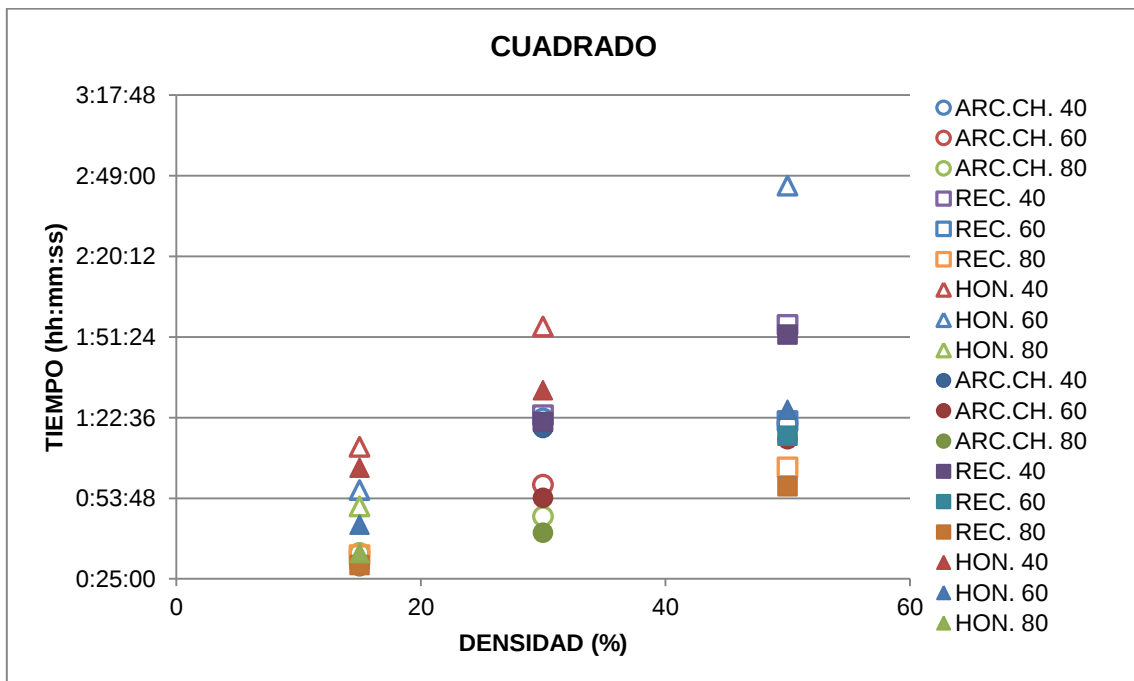
**GRÁFICA 6.31.-** Resultados temporales teóricos-experimentales del patrón HONEYCOMB según la velocidad de avance. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.



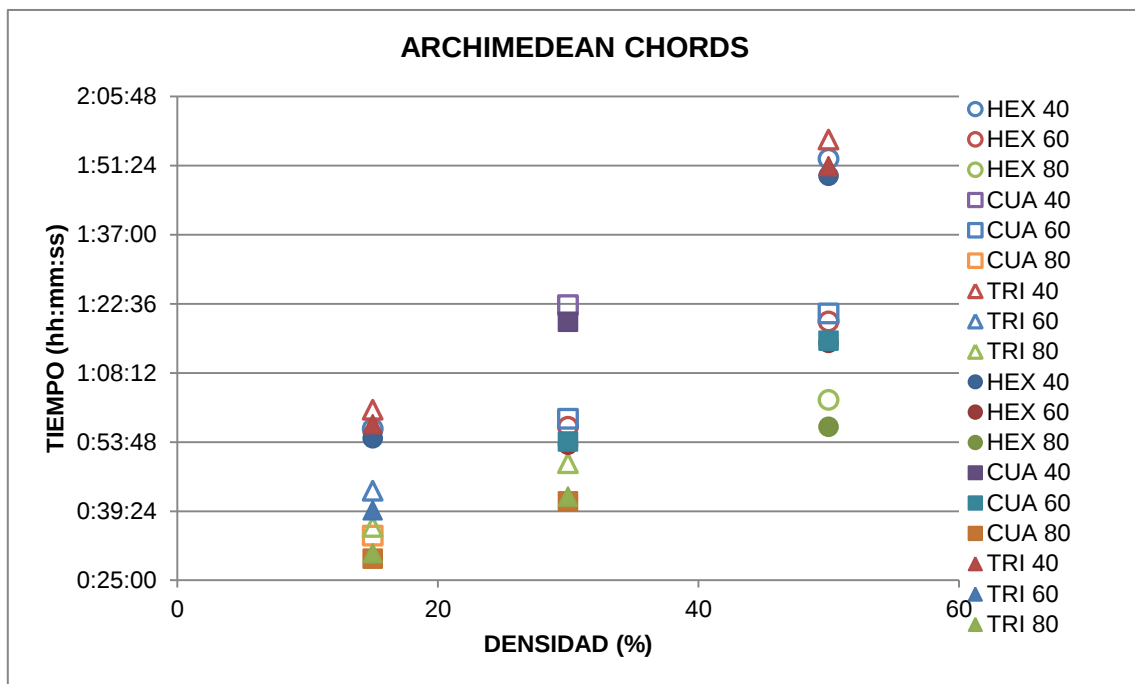
**GRÁFICA 6.32.-** Resultados temporales teóricos-experimentales del patrón HEXÁGONO según la densidad de relleno. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.



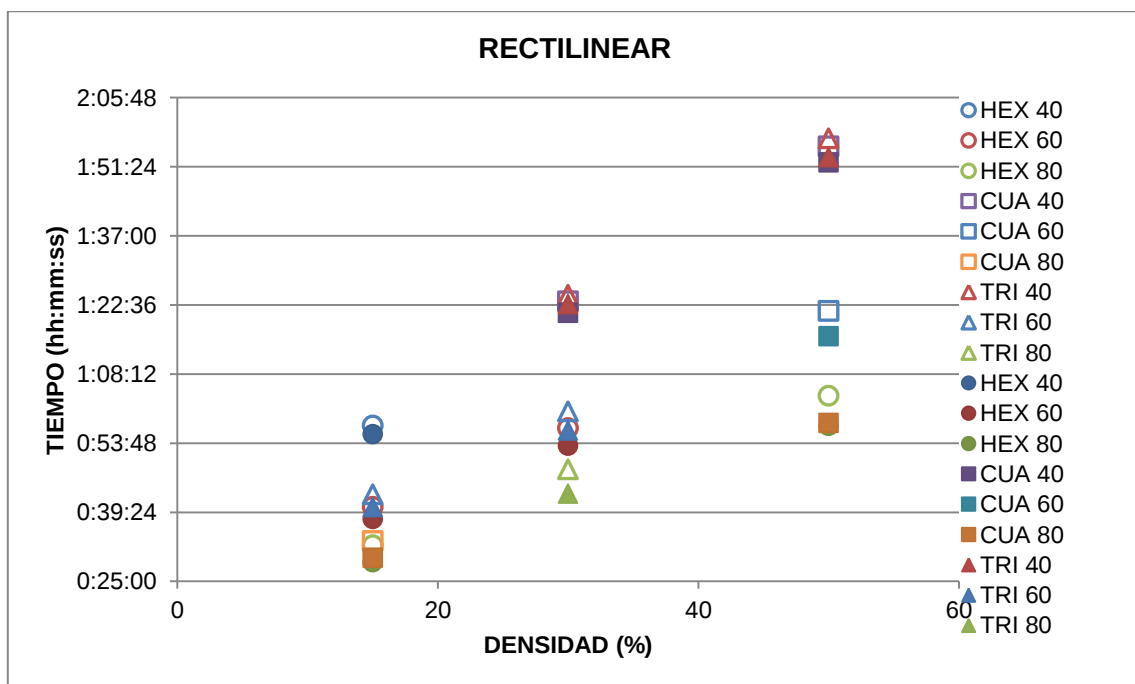
**GRÁFICA 6.33.- Resultados temporales teóricos-experimentales del patrón TRIÁNGULO según la densidad de relleno. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.**



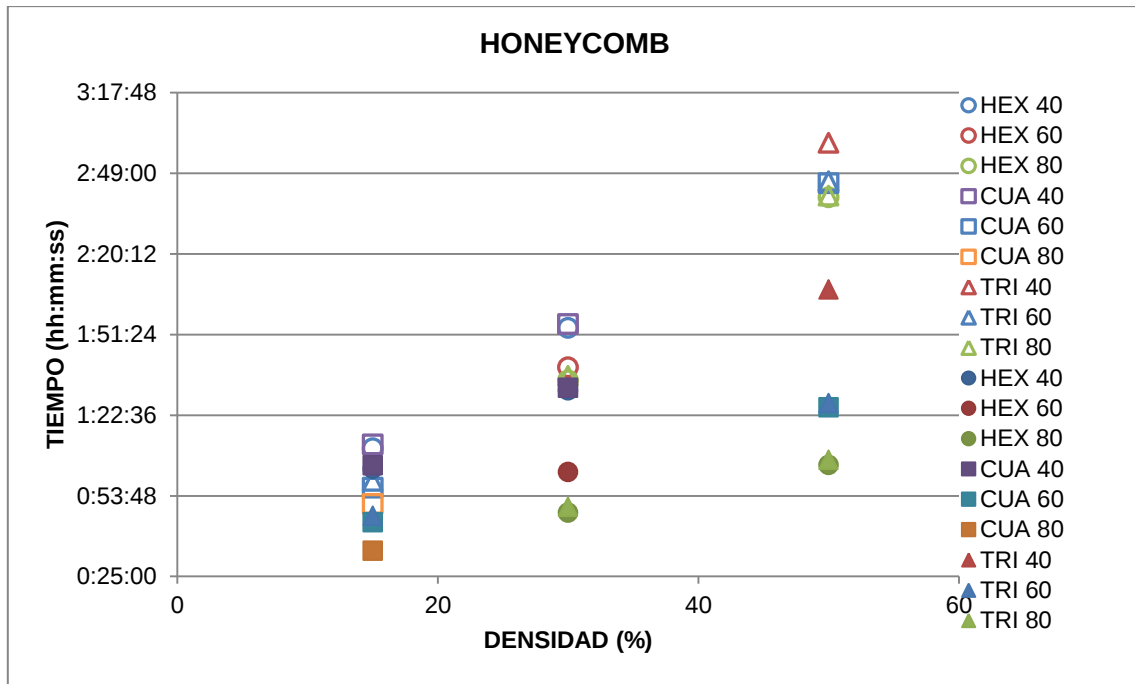
**GRÁFICA 6.34.- Resultados temporales teóricos-experimentales del patrón CUADRADO según la densidad de relleno. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.**



**GRÁFICA 6.35.-** Resultados temporales teórico-experimentales del patrón ARCHIMEDEAN CHORDS según la densidad de relleno. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.36.-** Resultados temporales teórico-experimentales del patrón RECTILINEAR según la densidad de relleno. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.37.- Resultados temporales teóricos-experimentales del patrón HONEYCOMB según la densidad de relleno. Los puntos rellenos indican el tiempo teórico estimado, mientras que los puntos sin relleno indican tiempos reales.- Realizada con EXCEL.**

Destaca que en el patrón Honeycomb la diferencia de tiempo real con respecto al teórico es mayor que para el resto de los patrones. Esto es algo que se esperaba ya que esta trayectoria tiene numerosos cambios de dirección bruscos que impiden alcanzar la velocidad de referencia.

Cuando la velocidad aumenta, ocurre que el tiempo necesitado para imprimir una misma geometría es menor, mientras que al aumentar la densidad del patrón de relleno aumenta el tiempo necesitado para una misma velocidad, ya que se ha de extruir mayores cantidades de material alargándose el recorrido.

Para analizar más en detalle los efectos que tienen las geometrías de relleno en la diferencia de tiempo real-teórica, se definirán dos coeficientes. A uno se le ha denominado factor de tardanza, y a su inversa, eficiencia.

$$f_t = \frac{t_r}{t_t} \quad \text{siendo} \quad \begin{matrix} 1 \Leftrightarrow t_r = t_t \\ \infty \Leftrightarrow t_r \Rightarrow \infty \end{matrix}$$

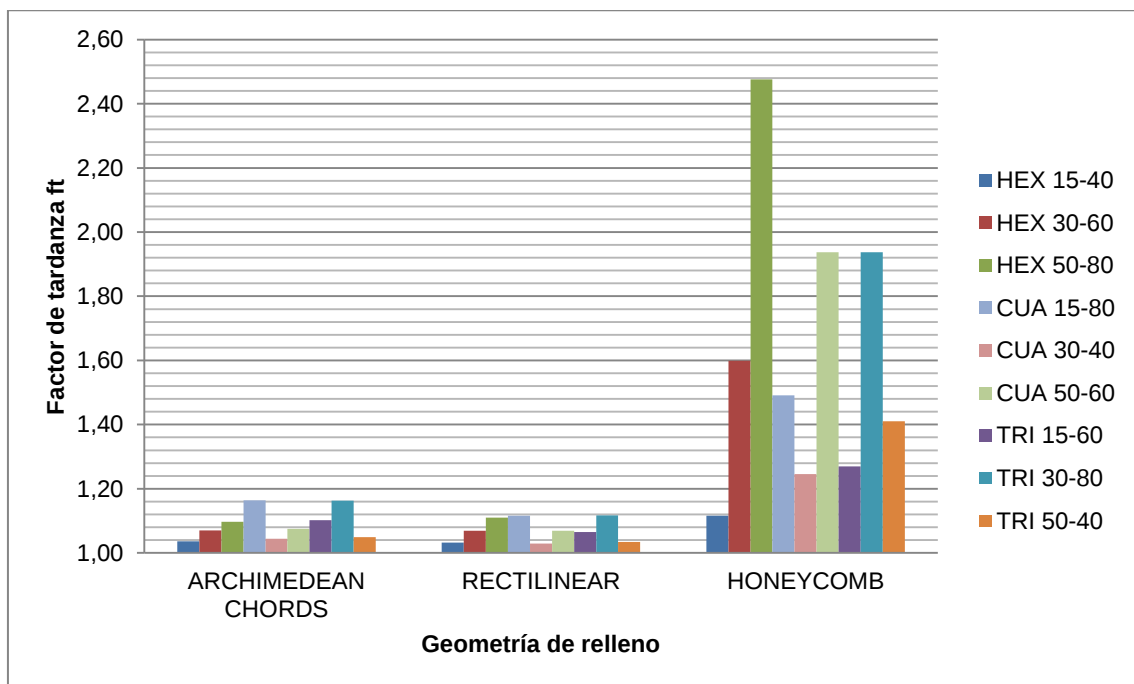
(Fórmula 6.3)

$$\varepsilon = \frac{t_t}{t_r} = \frac{1}{f_t} \quad \text{siendo} \quad \begin{matrix} 1 \Leftrightarrow t_r = t_t \\ 0 \Leftrightarrow t_r \Rightarrow \infty \end{matrix}$$

(Fórmula 6.4)

Donde  $f_t$  = factor de tardanza.  
 $\varepsilon$  = eficiencia.

El factor de tardanza se define como un coeficiente que muestra cuántas veces el tiempo teórico ha sido sobrepasado, siendo siempre su valor mínimo 1 (cuando el tiempo real coincide con el estipulado teóricamente), y su máximo será infinito cuando el tiempo real sea infinito. La eficiencia por el contrario tendrá siempre un valor inferior a 1 (coincidencia entre valor teórico y calculado) y sólo será nulo cuando el tiempo real sea infinito.

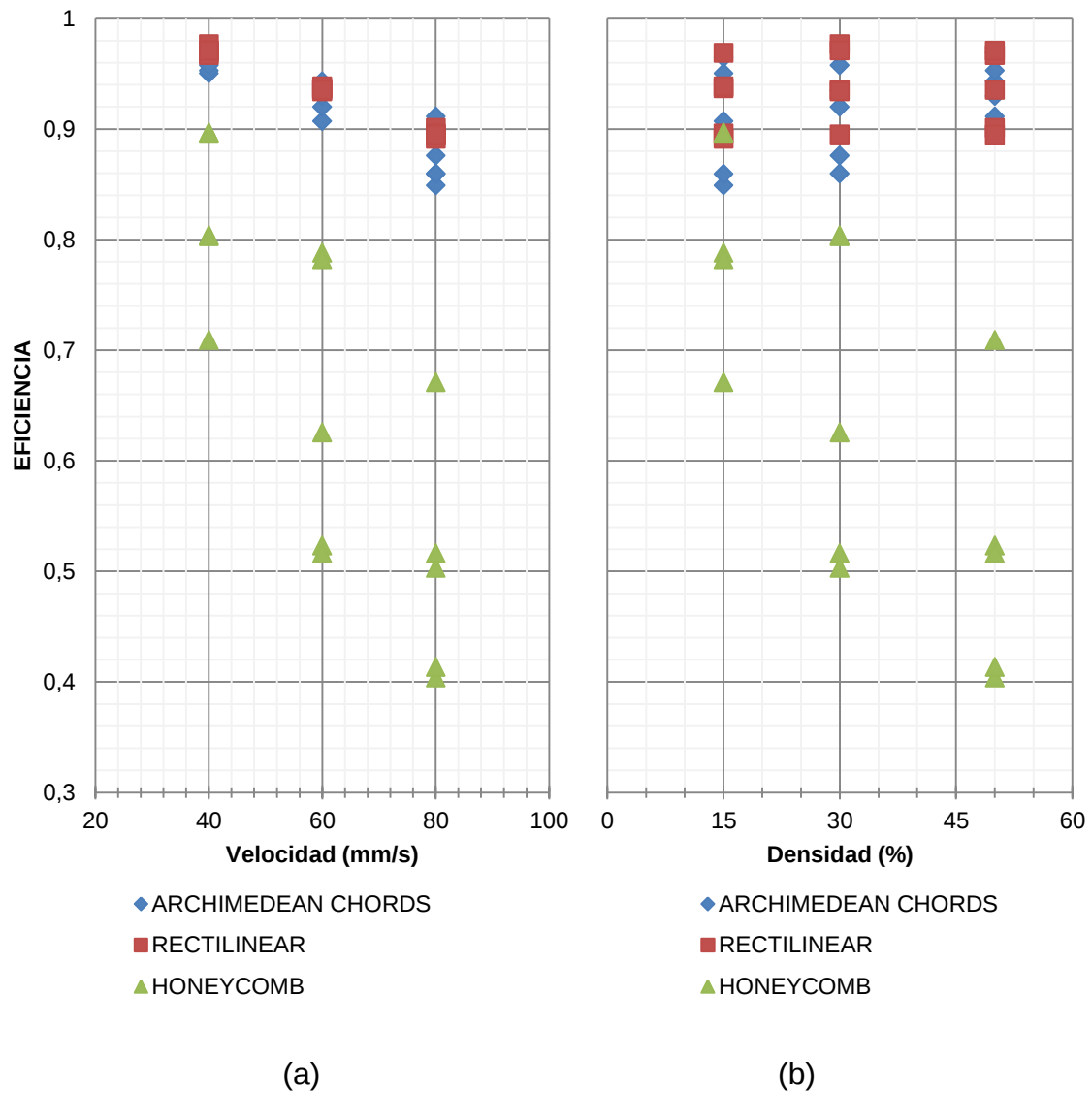


**GRÁFICA 6.38.- Comparación entre los factores de tardanza de las distintas geometrías interiores según sus parámetros geometría externa – densidad – velocidad.- Realizada con EXCEL.**

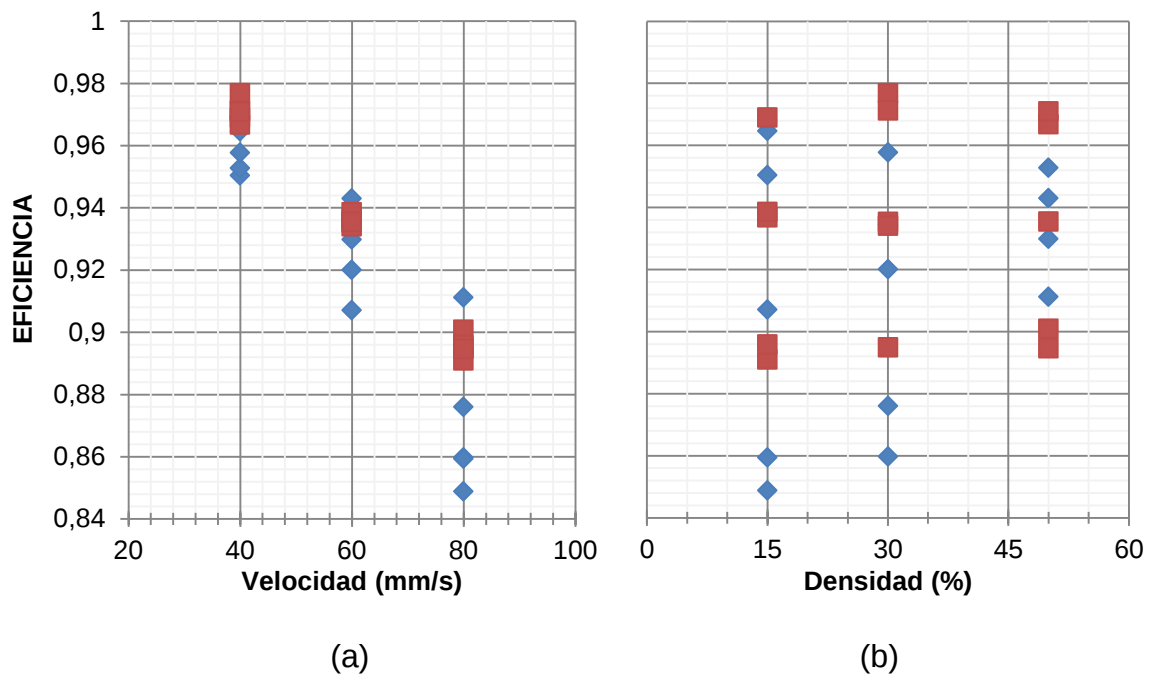
Si se representara la misma gráfica cambiando el factor de tardanza por la diferencia de tiempo teórico-real se obtendrían los mismos resultados visuales. Sin embargo, mediante el factor de tardanza se puede comprobar cómo el patrón

Honeycomb ha llegado a tardar en la impresión de la probeta hexagonal a densidad 50% y velocidad de avance 80mm/s más del doble del tiempo (Gráfica 6.38).

La Gráfica 6.39 muestra las eficiencias para un patrón de relleno similar según densidad y velocidad:



**GRÁFICA 6.39.- (a) Representación de la eficiencia en función de la velocidad de avance (mm/s) según la geometría interna. (b) Representación de la eficiencia en función de la densidad de relleno (%) según la geometría interna.- Realizada con EXCEL.**



**GRÁFICA 6.40.- (a) Ampliación de las geometrías ARCHIMEDEAN CHORDS y RECTILINEAR de la gráfica 6.39 (a). Ampliación de las geometrías ARCHIMEDEAN CHORDS y RECTILINEAR de la gráfica 6.39 (b).- Realizada con EXCEL.**

Se aprecia que la eficiencia del patrón Honeycomb decae con el aumento de velocidad y densidad, mientras que las geometrías Rectilinear y Archimedean Chords se mantienen a una eficiencia por encima del 85%.

Sin embargo, Archimedean Chords mejora la eficiencia con el aumento de densidad mientras que Rectilinear la mantiene constante. También se observa que tanto en función de la velocidad como en función de la densidad, los puntos obtenidos por Rectilinear son coincidentes y claros, mientras que Archimedean Chords registra puntos dispersos.

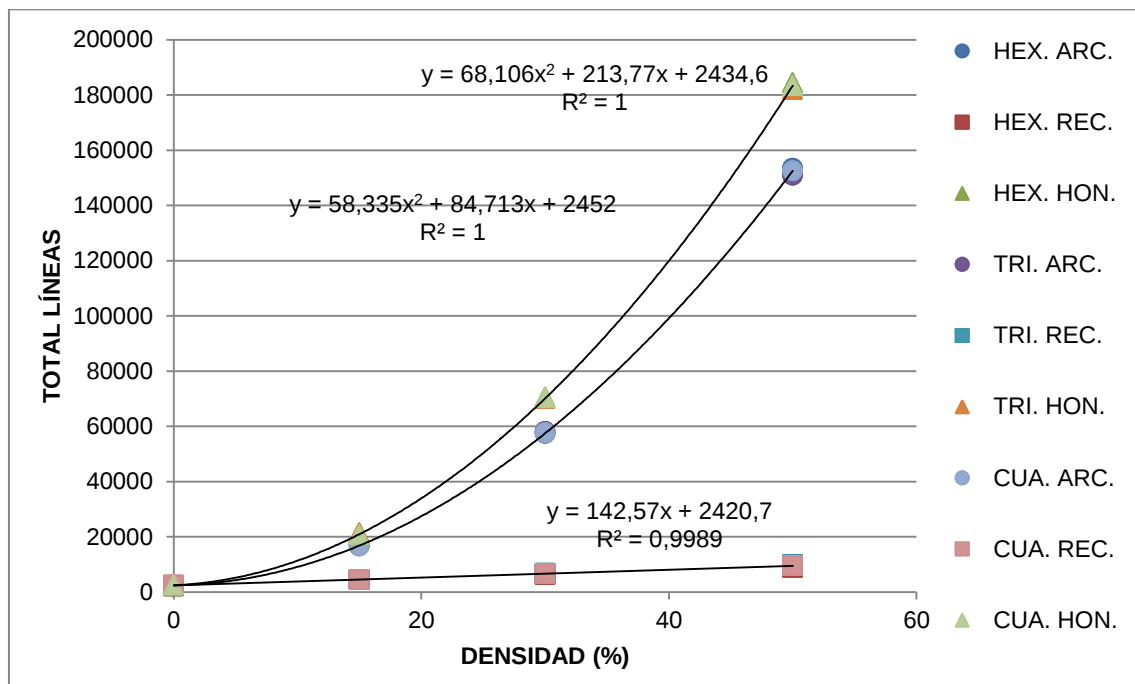
Tras esto resulta interesante la búsqueda de las principales diferencias en las geometrías de relleno que afectan en las diferencias temporales entre ellas.

### 6.1.2. Geometrías de relleno.

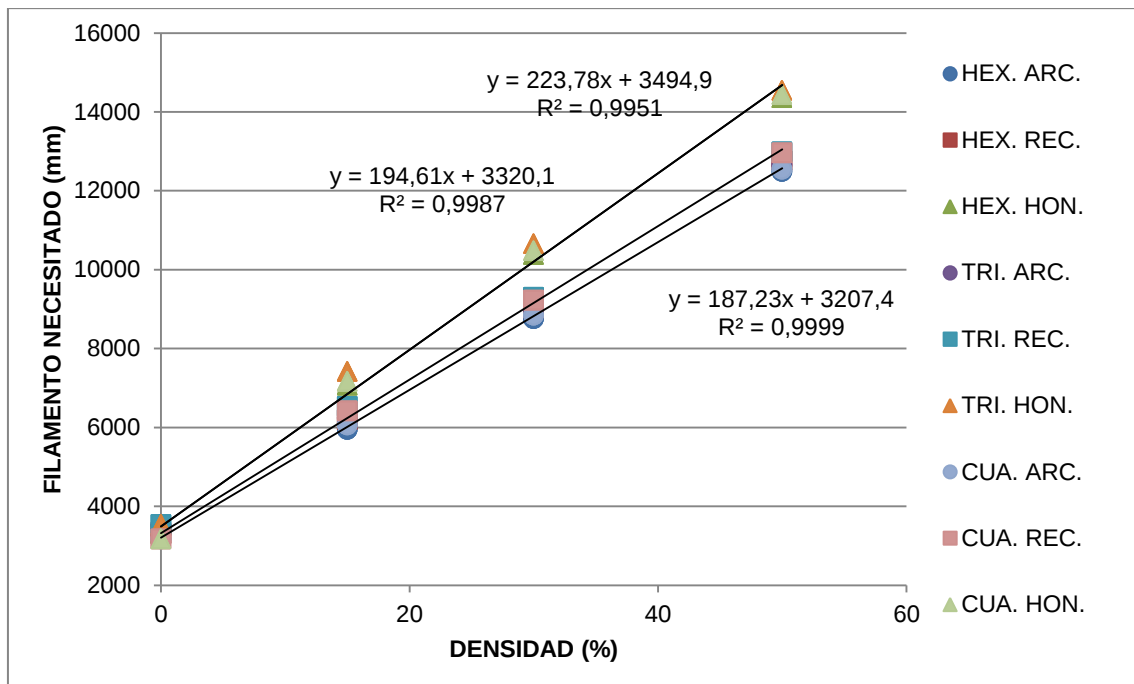
Si se sujetan dos probetas impresas con la misma geometría externa e interna pero con diferentes densidades es evidente que las que más densidad tiene pesará más. Es más, si se sujetan dos probetas que mantengan la misma geometría externa y densidad de relleno pero que no tengan el mismo patrón se nota enseguida que el peso también es distinto.

Al variar la densidad de relleno para una misma geometría, la longitud que el extrusor tiene que recorrer para imprimirla es mayor debido al aumento del número de líneas, y aunque dos patrones tengan la misma densidad de relleno no tendrán la misma cantidad de líneas ni el mismo volumen de material (recordar que el volumen para todas las probetas es el mismo en el diseño original en Solidworks).

Las siguientes gráficas muestran cómo varía el número de líneas y el filamento necesitado con la densidad según la geometría externa y de relleno.



**GRÁFICA 6.41.- Representación del número total de líneas de todas las geometrías externas-internas según la densidad de relleno.- Realizada con EXCEL.**

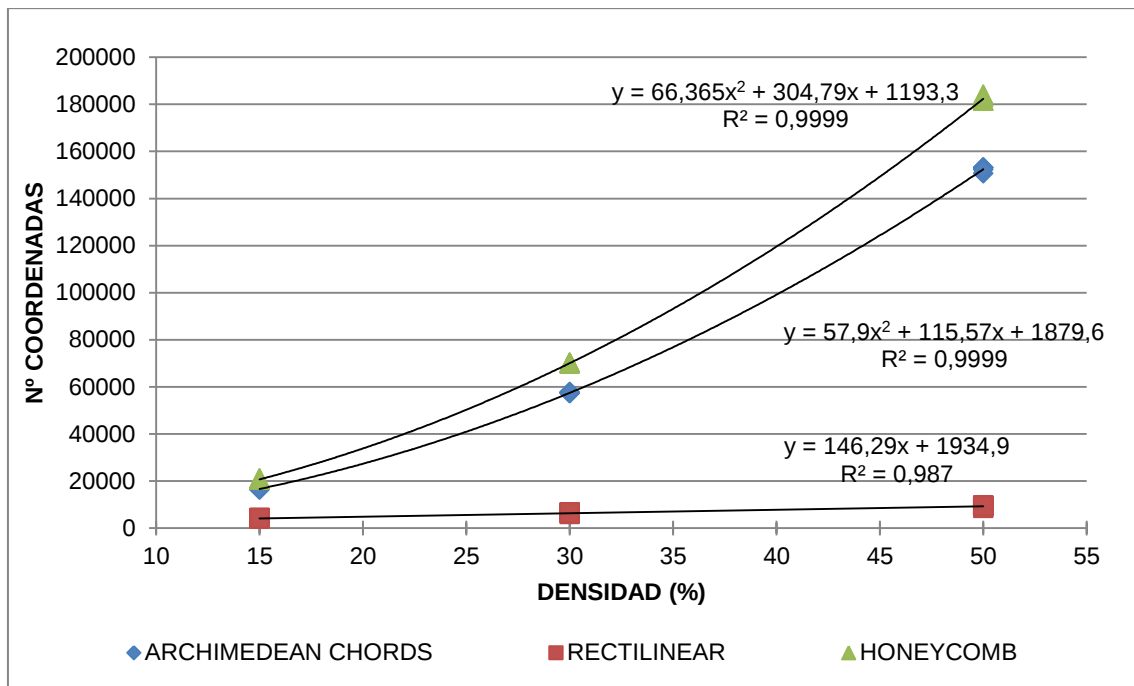


**GRÁFICA 6.42.-** Representación de la cantidad de filamento necesitado (mm) de todas las geometrías externas-internas según la densidad de relleno.- Realizada con EXCEL.

Nuevamente cabe destacar que la geometría externa apenas influye significativamente en los datos anteriormente representados, coincidiendo los puntos para éstas según el patrón de relleno que contienen.

Para un estudio más exhaustivo de la impresión de la probeta, se ha desarrollado un código en Matlab que lee el código G generado en Repetier-Host y lo analiza mostrando los datos que han sido considerado oportunos en el desarrollo de este proyecto (Anexo 9.2.5).

Así pues, se ha contado la cantidad total de puntos de paso (coordenadas que generan una línea donde la impresora deposita material, es decir, se han eliminado las coordenadas donde la boquilla se posiciona) que tiene cada uno de los códigos generados, obteniéndose la siguiente gráfica:

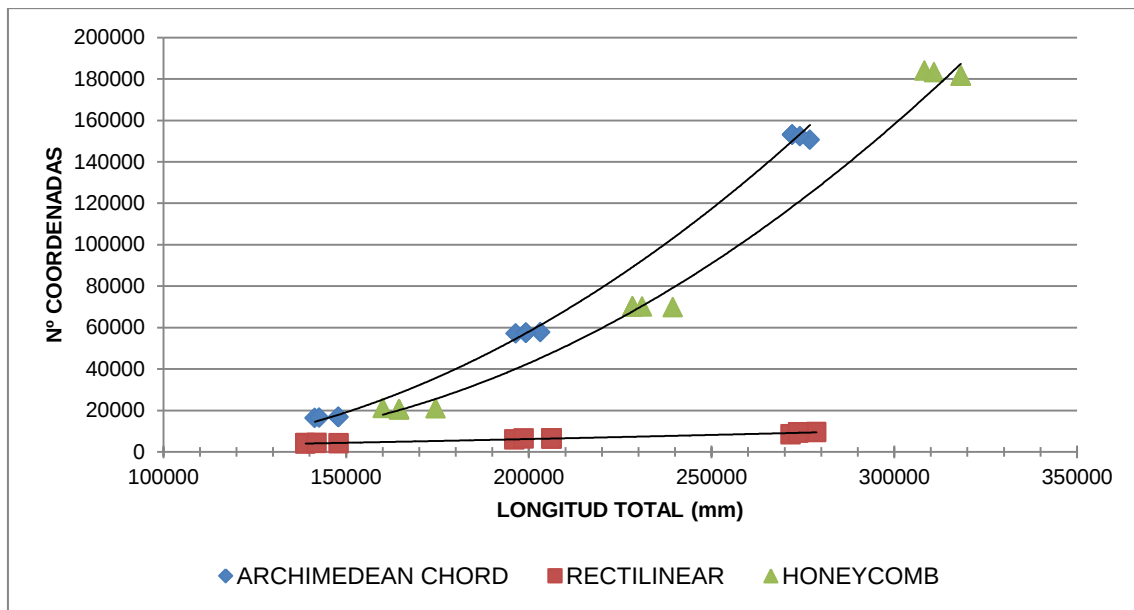


**GRÁFICA 6.43.- Representación del número total de coordenadas para cada geometría interna según la densidad de relleno.- Realizada con EXCEL.**

Se observa cómo con el aumento de densidad aumenta con un ajuste polinómico de segundo grado los patrones Archimedeian Chords y Honeycomb, mientras que Rectilinear se ajusta mejor a una recta que podría ser horizontal debido a su escasa pendiente.

Al aumentar la densidad disminuye la distancia entre cada pasada dentro de una misma capa, lo que se traduce en un aumento lineal del número de líneas con la densidad. Esto es lo que ocurre con el patrón Rectilinear al estar compuesto por líneas completamente rectas. Sin embargo, la diferencia existente entre Rectilinear frente a los patrones Honeycomb y Archimedeian Chords se debe a que al aumentar la densidad, en los dos últimos además aumenta la cantidad de elementos geométricos (éstos reducen su tamaño y aumentan en número) que compone cada pasada formando dicha geometría, lo que al sumar dicha cantidad a la anterior genera un aumento polinómico.

En la siguiente gráfica se muestra el aumento del número de coordenadas frente a la longitud total recorrida por el extrusor durante la impresión:



**GRÁFICA 6.44.- Representación del número total de coordenadas para cada geometría interna según la longitud total del filamento (mm).- Realizada con EXCEL.**

Con el aumento de densidad, el aumento de la longitud recorrida tanto para los patrones Rectilinear y Archimedean Chords permanece constante a pesar del crecimiento del número de elementos en Archimedean Chords, mientras que para Honeycomb el aumento de densidad repercute en un aumento mayor de longitud recorrida. El motivo de éstas diferencias y similitudes entre ambos patrones se debe a que Archimedean Chords básicamente es una espiral cuya geometría no varía con el cambio de densidad, siendo la única diferencia la distancia entre cada una de sus circunferencias que disminuyen con el aumento de la densidad, igual que Rectilinear. Sin embargo y lo que explica el aumento polinómico del número de coordenadas de Archimedean Chords es que las curvas de la espiral están compuestas de pequeñas rectas que se asemejan a la forma final, por lo que a diferencia de Rectilinear, con el aumento de circunferencias aumenta el número de líneas cuyas longitudes dependen de la distancia al centro en el que se encuentren. Por el contrario, Honeycomb es una geometría constituida por hexágonos que se vuelven más diminutos y numerosos cuanto más compacta resulta la probeta, por lo que con el aumento de densidad aumenta el número de elementos aumentando de la misma manera la cantidad de material requerida.

Como el tiempo es función de la velocidad, para realizar las próximas representaciones se van a utilizar los siguientes cálculos:

$$x_1 = \frac{l_1}{l} ; \quad x_2 = \frac{l_2}{l} ; \quad x_3 = \frac{l_3}{l}$$

(Fórmula 6.5)

$$v_{fr} = x_1 \cdot v_{f_1} + x_2 \cdot v_{f_2} + x_3 \cdot v_{f_3}$$

(Fórmula 6.6)

$$\Delta t_{vr} = \frac{\Delta t}{v_{fr}} = \frac{t_r - t_t}{v_{fr}}$$

(Fórmula 6.7)

Donde  $\Delta t_{vr}$  = la diferencia del tiempo en función de la velocidad media (s<sup>2</sup>/m).  
 $\Delta t$  = diferencia entre tiempos teórico y real (s).  
 $v_{fr}$  = velocidad media real (mm/s).  
 $x_1, x_2, x_3$  = proporción de longitud correspondiente a cada velocidad general.  
 $v_{f1}, v_{f2}, v_{f3}$  = velocidades generales (mm/s).

$$l_u = \frac{l}{c}$$

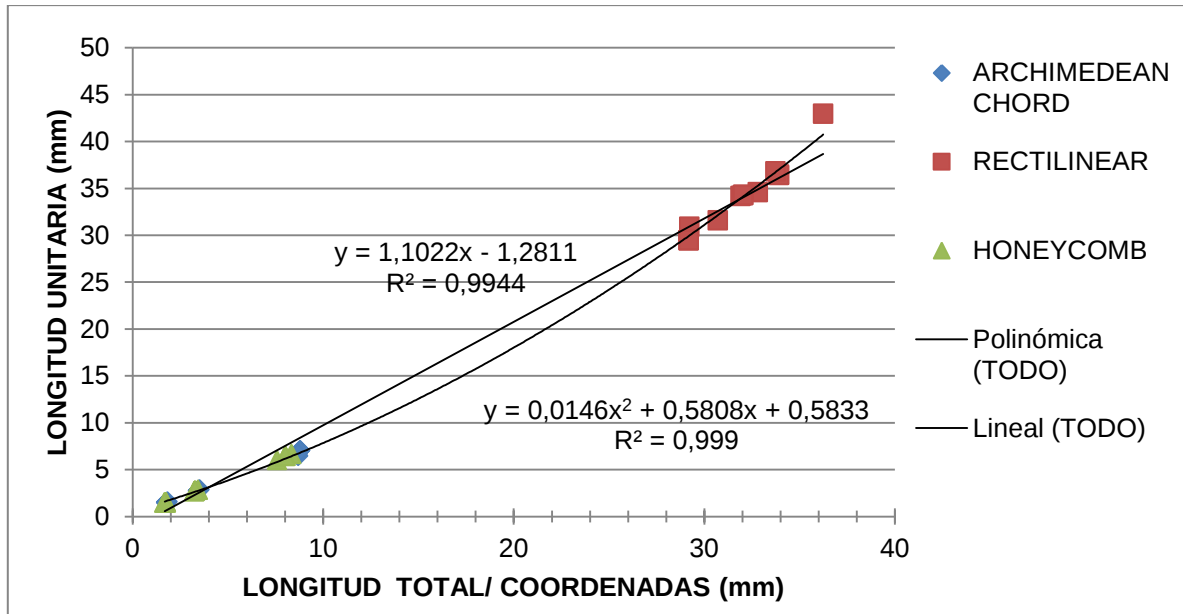
(Fórmula 6.8)

Donde  $l_u$  = longitud de una línea o longitud unitaria (mm).  
 $c$  = cantidad de coordenadas totales.

Hay que aclarar que esta longitud unitaria es una media de las variadas medidas que se pueden encontrar en una sola capa, así, por ejemplo, el patrón Rectilinear obtiene con este valor un valor medio que puede no aproximarse a la

realidad, por lo que a continuación hay que tenerlo en cuenta. No obstante, se considerará como la longitud de una línea en el análisis posterior para simplificar los cálculos.

Si representamos la Fórmula 6.8 en una gráfica donde cada eje representa cada lado de la fórmula se observará cómo se comporta experimentalmente al variar los factores.



**GRÁFICA 6.45.-** Representación de la longitud unitaria para cada geometría interna según la longitud total del filamento (mm) dividido entre el número de coordenadas.- Realizada con EXCEL.

Se confirma que tiene un comportamiento aproximado al lineal donde todos los puntos pasan por la misma recta. Un ajuste más certero para un grupo de puntos de experimentos diferentes a partir de la gráfica sería el siguiente:

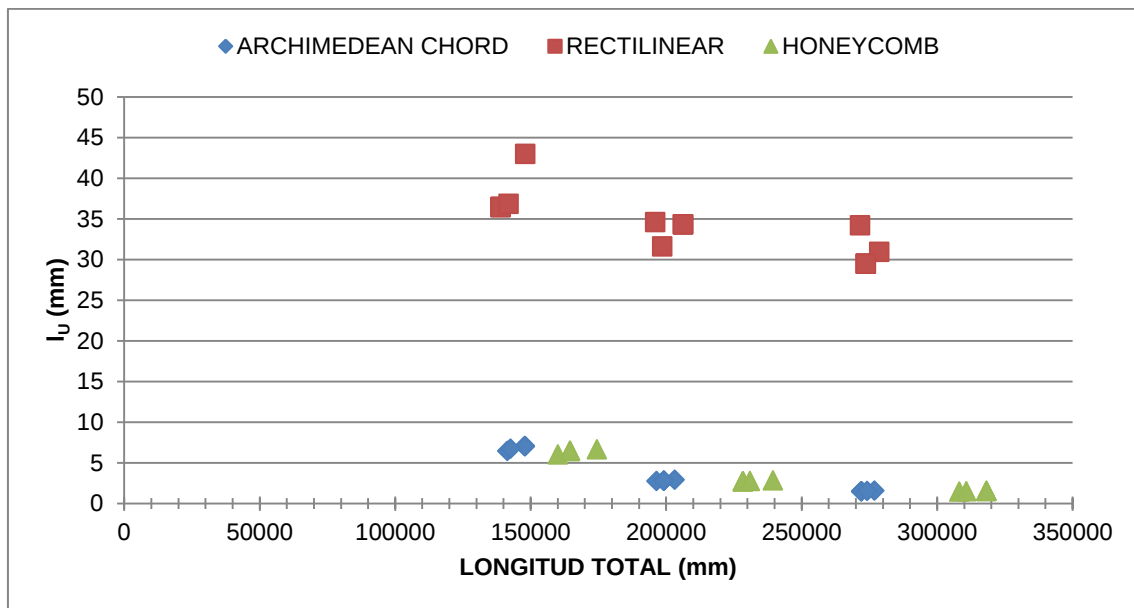
$$l_{ui} = 1,1022 \frac{l_i}{c_i} - 1,2811$$

(Fórmula 6.9)

$$l_{ui} = 0,0146 \frac{l_i^2}{c_i} + 0,5808 \frac{l_i}{c_i} + 0,5833$$

Donde  $l_i$  = longitud total de la probeta "i" (mm)  
 $l_{ui}$  = longitud de una línea para la probeta "i" (mm).  
 $C_i$  = cantidad de coordenadas totales de la probeta "i".

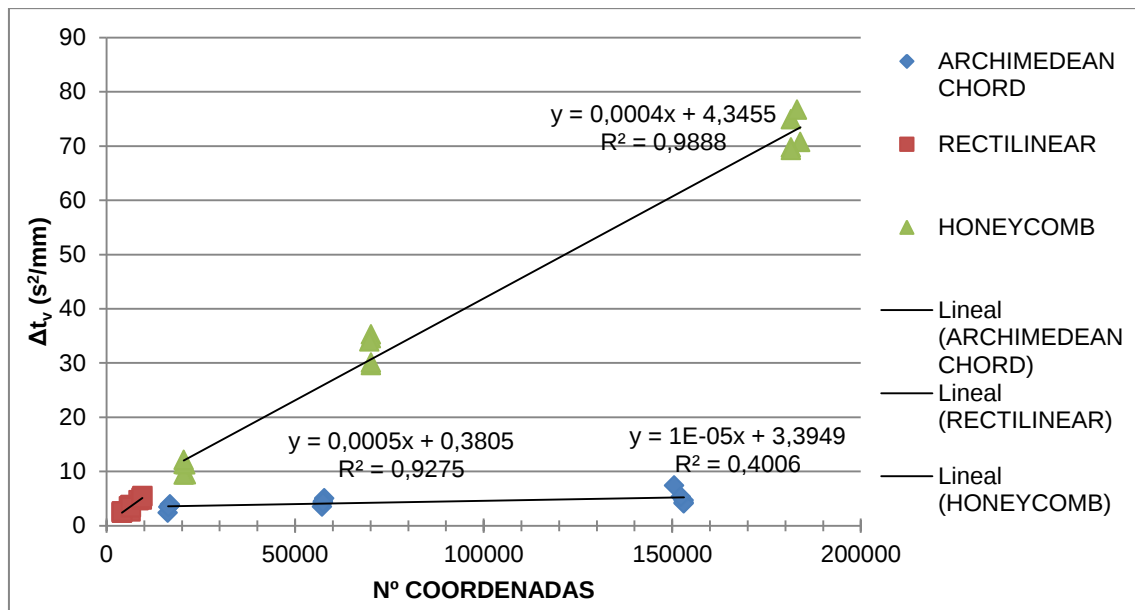
Teniendo en cuenta los cálculos anteriores, la Gráfica 6.46 representa la longitud de una línea frente a la longitud total recorrida:



**GRÁFICA 6.46.- Representación de la longitud unitaria para cada geometría interna según la longitud total del filamento (mm).- Realizada con EXCEL.**

Como en la gráfica XXX se observa cómo la longitud unitaria de Rectilinear es mayor debido a que la trayectoria es sencilla mientras que los otros dos patrones tienen elementos complejos en éstas. En los tres casos la longitud de cada línea media disminuye con la densidad. Recordar que la longitud del patrón Rectilinear es una longitud media, por lo que en la Gráfica 6.46 su valor sería mayor (longitud máxima) o parecida a los otros patrones (longitud mínima).

Sin embargo, si se representa la diferencia de tiempo en función de la velocidad media frente al número de coordenadas se obtienen los siguientes puntos:



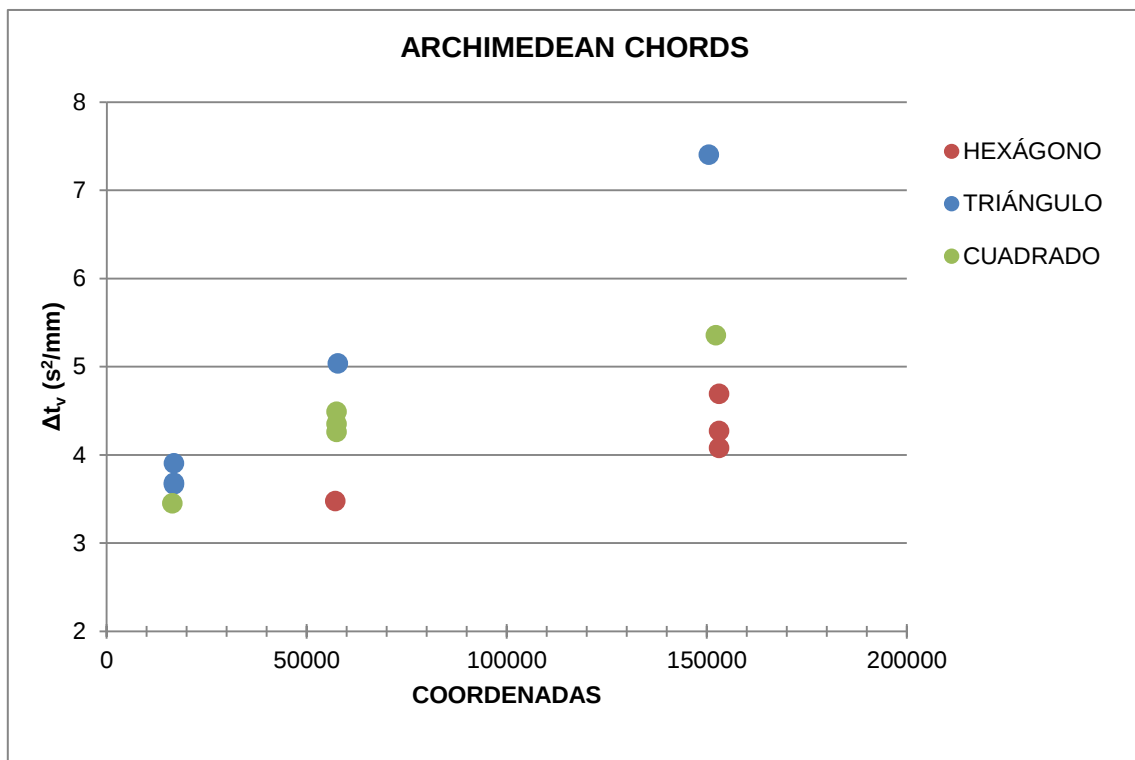
GRÁFICA 6.47.- Representación del tiempo en función de la velocidad frente al número total de coordenadas según cada geometría interna.- Realizada con EXCEL.

A pesar de que con el aumento del número de coordenadas (y densidad del patrón de relleno) previamente a ver estos resultados cualquiera puede creer que el tiempo aumentará por igual, es interesante que no es así. Teniendo un número de coordenadas similar, la pendiente de las rectas descritas por los puntos de los patrones Honeycomb y Archimedean Chords son muy diferentes. Aun así, si se realiza un ajuste lineal para cada patrón se observa que Archimedean Chords no se ajusta del todo bien.

Pero ¿por qué no se ajusta? ¿Cuál es el motivo de esta diferencia entre ambos patrones? ¿Por qué la pendiente que se obtiene con Rectilinear es parecida que la de Honeycomb? Las respuestas están en el análisis conjunto de las geometrías externas y de relleno.

### 6.1.3. Geometrías externas.

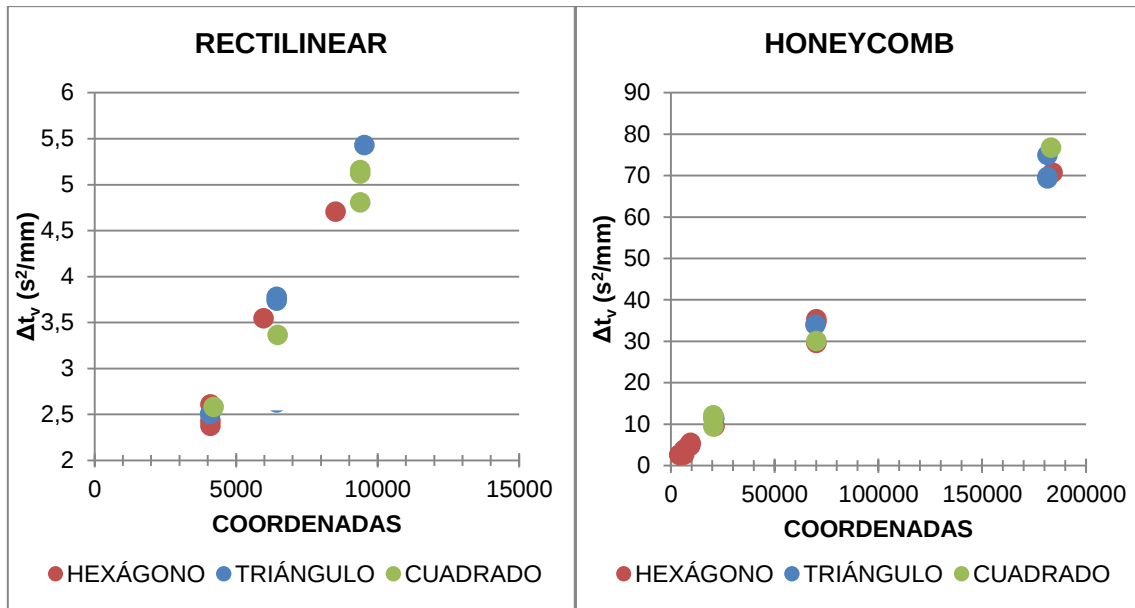
Si se analiza el patrón Archimedean Chords descompuesto en las formas externas se observa que a pesar de mantener un mismo número de coordenadas, según qué tipo de geometría externa sea se obtiene un tiempo distinto a las otras:



**GRÁFICA 6.48.-** Representación del tiempo en función de la velocidad frente al número total de coordenadas según cada geometría externa con el patrón ARCHIMEDEAN CHORDS.- Realizada con EXCEL.

El motivo de esta dispersión es la geometría externa que tiene cada probeta, ya que en el caso de un triángulo, en el momento en el que la espiral toca la pared de ésta el extrusor “salta” de una coordenada a otra, necesitando un tiempo distinto que en el caso del cuadrado o el hexágono, donde al tener un área libre más grande (superficie donde el extrusor se mueve libremente sin tocar la pared externa de la geometría) “saltará” en menos ocasiones y distancias distintas (Figura 6.3).

No ocurre lo mismo con los otros patrones:

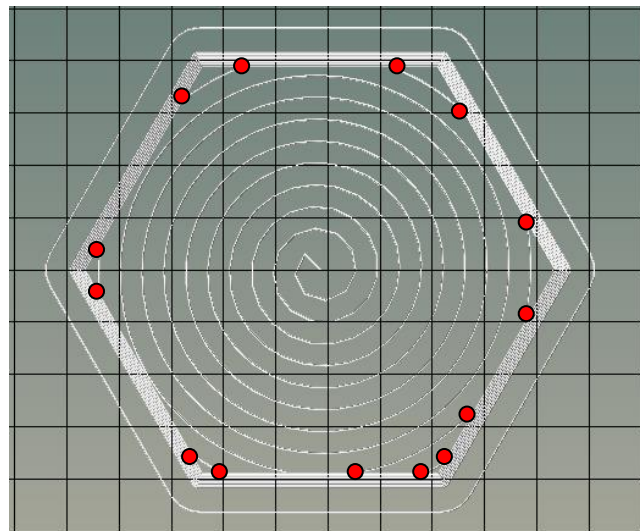


(a)

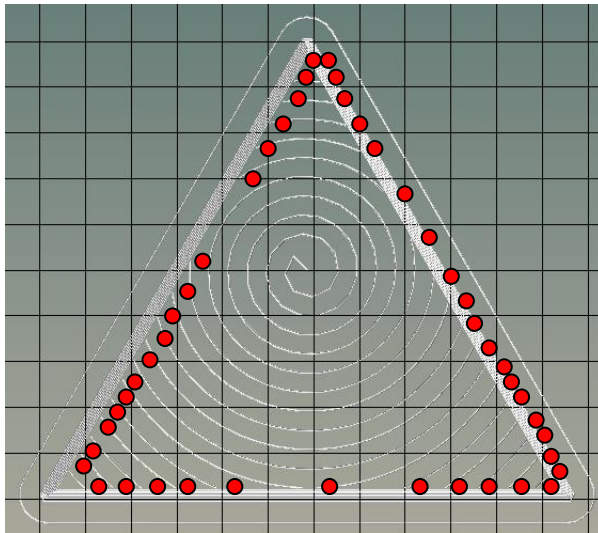
(b)

**GRÁFICA 6.49.- (a) Representación del tiempo en función de la velocidad frente al número total de coordenadas según cada geometría externa con el patrón RECTILINEAR. (b) Representación del tiempo en función de la velocidad frente al número total de coordenadas según cada geometría externa con el patrón HONEYCOMB.- Realizada con EXCEL.**

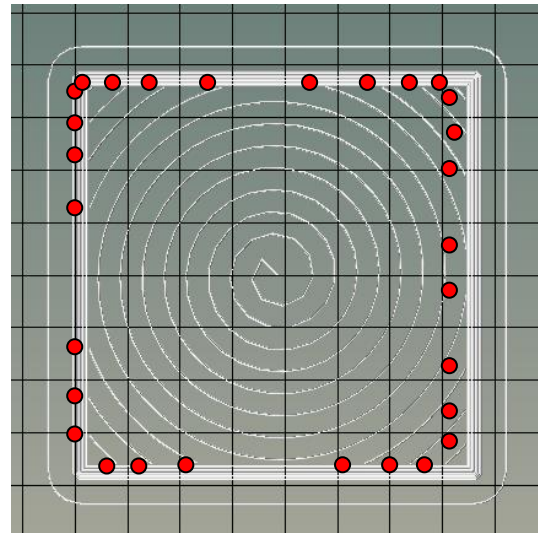
Esto explica que la línea no se ajuste al patrón Archimedean Chords como los otros dos, ya que sus puntos están más dispersos.



(a)



(b)



(c)

**FIGURA 6.1.- (a) Puntos de corte entre el patrón ARCHIMEDEAN CHORDS de densidad 30% con la frontera de un HEXÁGONO. (b) Puntos de corte entre el patrón ARCHIMEDEAN CHORDS de densidad 30% con la frontera de un TRIÁNGULO. (c) Puntos de corte entre el patrón ARCHIMEDEAN CHORDS de densidad 30% con la frontera de un CUADRADO.- Elaborado en REPETIER-HOST.**

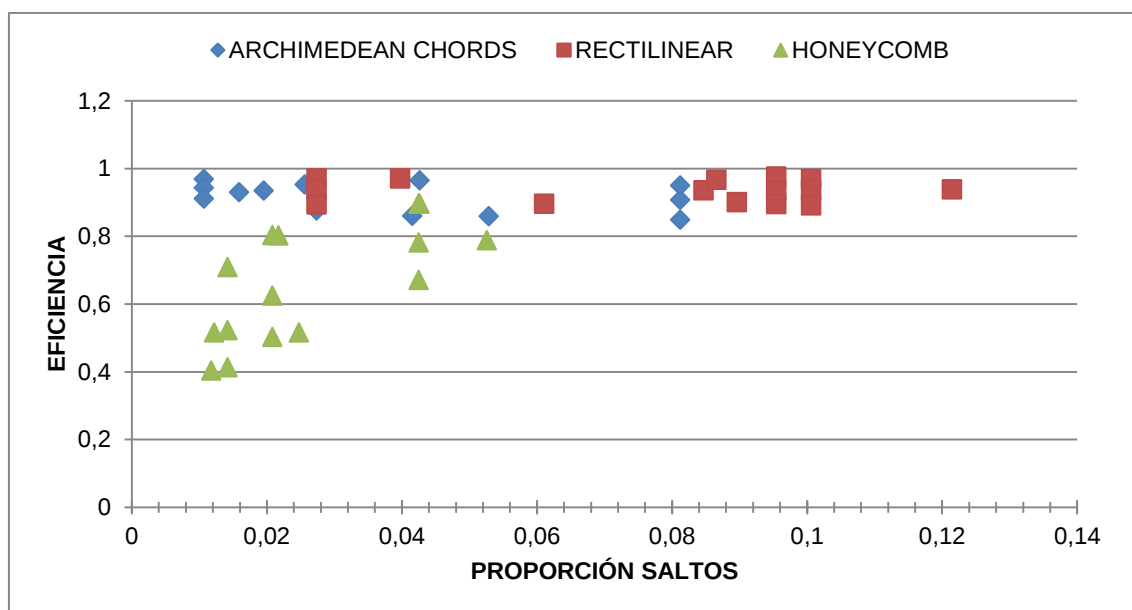
Así pues, es interesante investigar cuántas veces el extrusor cambia su velocidad para recolocarse en otra coordenada mientras imprime un relleno. Para averiguar la proporción de líneas descritas que son saltos (denominamos saltos a la cantidad de líneas descritas con una velocidad superior, 130 mm/s, durante las cuales no se inyecta material y cuya finalidad es recolocar el extrusor) se ha realizado el siguiente cálculo:

$$y = \frac{s}{c}$$

(Fórmula 6.11)

Donde  $y$  = proporción de saltos.  
 $s$  = saltos.  
 $c$  = cantidad de coordenadas totales de la probeta.

Así pues, se obtiene la representación de la Gráfica 6.50 con respecto a la eficiencia.



**GRÁFICA 6.50.-** Representación de la eficiencia frente a la proporción de saltos para cada geometría interna.- Realizada con EXCEL.

La proporción de saltos realizados no parece explicar el motivo por el que existe una diferencia temporal tan grande entre los patrones, ya que éstos tienen una proporción similar, entremezclándose los puntos. No obstante, si se observa para el patrón Honeycomb que su eficiencia mejora conforme aumenta la proporción de saltos.

#### 6.1.4. Movimiento del extrusor.

Volviendo al principio del apartado 6.1. se descubre que se ha descrito el tiempo teórico empleado en función de la velocidad y la longitud total recorrida, a la vez que se obtenían las eficiencias, factores y velocidades reales. Sin embargo, es ahora tras el estudio de los anteriores resultados cuando se puede hilar una teoría que conduzca al cálculo del tiempo real.

Tras todo esto, ya se han observado las igualdades y diferencias geométricas entre las probetas así como su influencia sobre el tiempo. Es el momento de razonar qué influye sobre la diferencia temporal existente.

El tiempo real de impresión se puede entender con la siguiente expresión:

$$t_r = t_t + \Delta t = \frac{l}{\mu \cdot v_{fr}}$$

(Fórmula 6.12)

$$\Delta t = \frac{l}{\mu \cdot v_{fr}} - \frac{l}{v_{fr}} = \frac{l}{v_{fr}} \cdot \frac{1 - \mu}{\mu}$$

(Fórmula 6.13)

Donde  $t_t$  = tiempo teórico (s).  
 $t_r$  = tiempo real (s).  
 $v_{fr}$  = velocidad de avance media del extrusor (mm/s).  
 $\mu$  = coeficiente de paro.

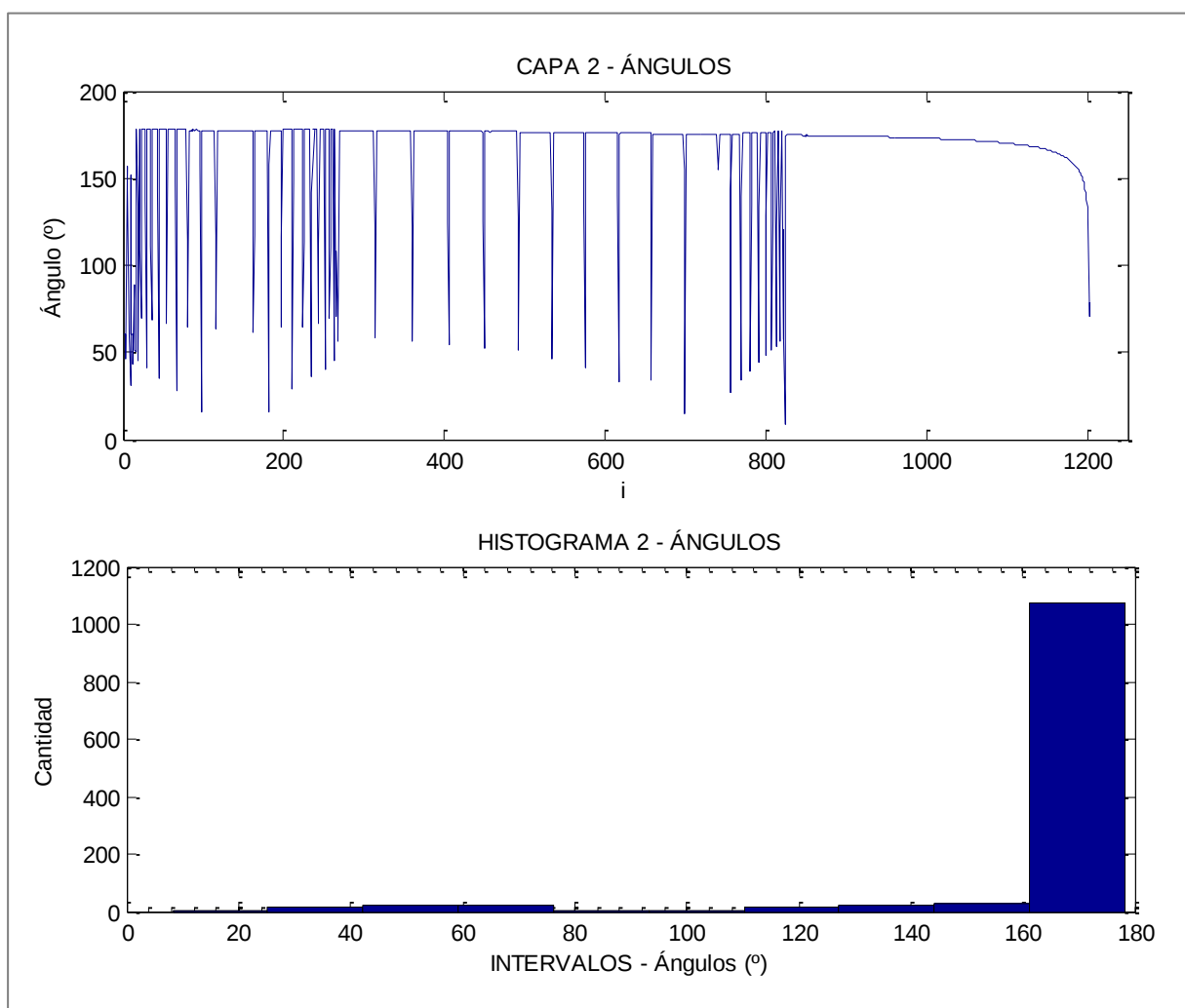
Se introduce un coeficiente que se denominará como de paro y que siempre estará entre 0 y 1, siendo el tiempo infinito cuando sea 0 y exactamente el teórico cuando sea 1. El coeficiente de paro se introduce en la anterior ecuación para tener en cuenta todas las desaceleraciones y aceleraciones que sufre el extrusor durante un cambio de dirección y que produce un retraso. Al sumar todos los retrasos sufridos en todos los cambios de dirección se obtendrá la diferencia de tiempo existente entre el tiempo real y el tiempo calculado teóricamente.

No obstante, todos los cambios de dirección no producen el mismo retraso como ya se puede comprobar en los apartados anteriores, donde se veía que existía una diferencia significativa de tiempo entre Archimedean Chords y Honeycomb a pesar de tener un número de coordenadas similar.

En este estudio se consideran dos factores. El primero se ha visto en el apartado 6.1.3. y se trata de los saltos que el extrusor realiza en la frontera, y el segundo es el número de veces que el extrusor cambia de: paradas en el eje X, ya que sólo se numerarán las del eje horizontal (se pueden numerar las paradas en el

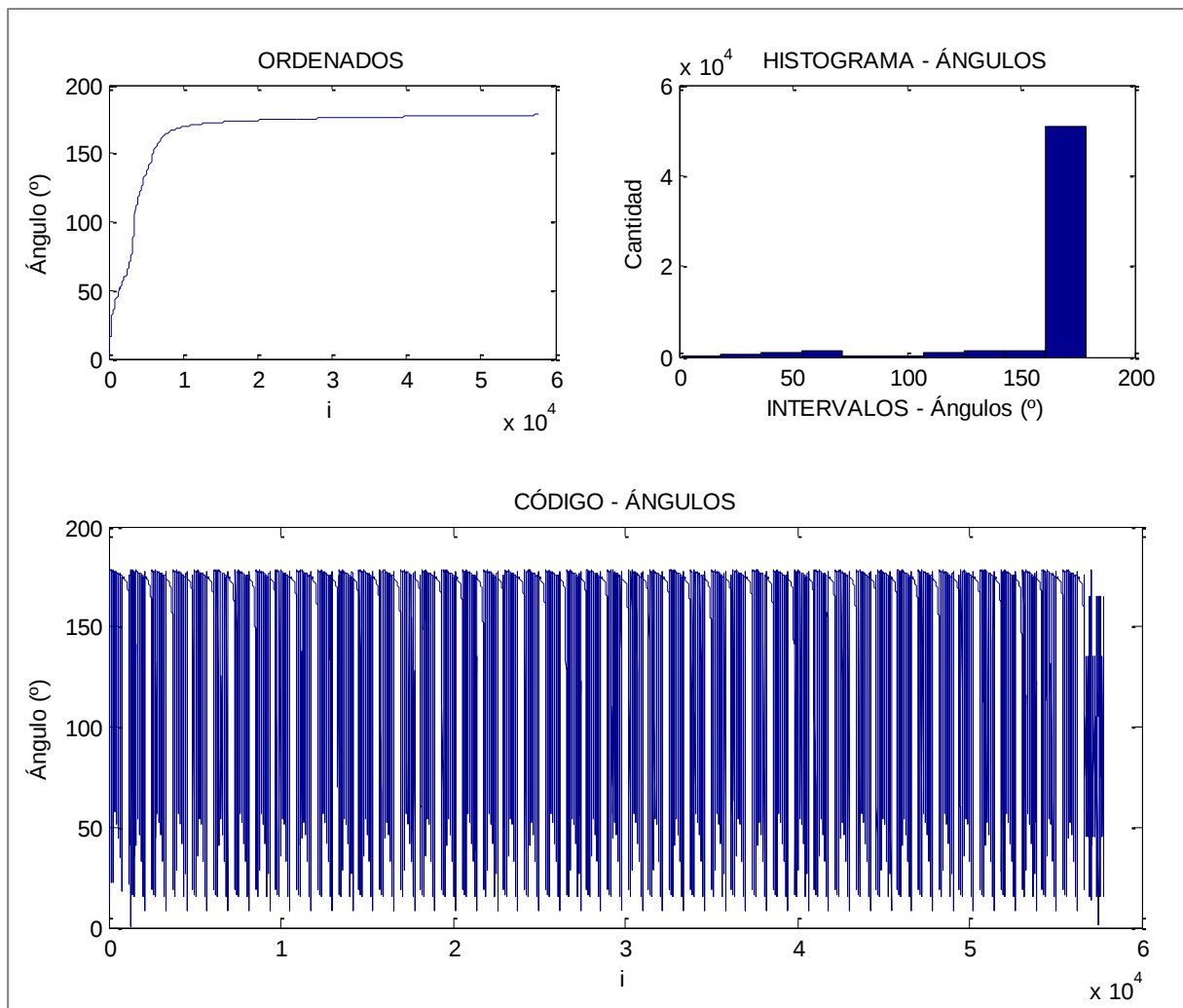
eje Y, pero debido a las geometrías de relleno que se están viendo, para formas regulares, se simplificará el cálculo obviando dicho eje.

No es suficiente realizar un cálculo donde se hallen los dos factores anteriores. Es necesario estudiar los ángulos principales en los que se mueve el extrusor. Para ello se ha escogido un experimento que represente la geometría interna para una densidad de relleno 30%, de donde se obtienen las Figuras 6.51 a 6.69. Estas Gráficas presentan los ángulos entre segmentos consecutivos obtenidos a partir del código G para distintos patrones de relleno.



**GRÁFICA 6.51.- Representación de la apertura angular en la segunda capa frente al número correspondiente de coordenada para un TRIÁNGULO con geometría interna ARCHIMEDEAN CHORDS.- Realizada con MATLAB.**

**GRÁFICA 6.52.- Histograma.- Repetición angular por intervalos en la segunda capa para un TRIÁNGULO con geometría interna ARCHIMEDEAN CHORDS.- Realizada con MATLAB.**



**GRÁFICA 6.53.-** Representación de la apertura angular ordenada de menor a mayor en toda la geometría frente al número total de coordenadas para un TRIÁNGULO con geometría interna ARCHIMEDEAN CHORDS.- Realizada con MATLAB.

**GRÁFICA 6.54.-** Histograma.- Repetición angular por intervalos en toda la geometría para un TRIÁNGULO con geometría interna ARCHIMEDEAN CHORDS.- Realizada con MATLAB.

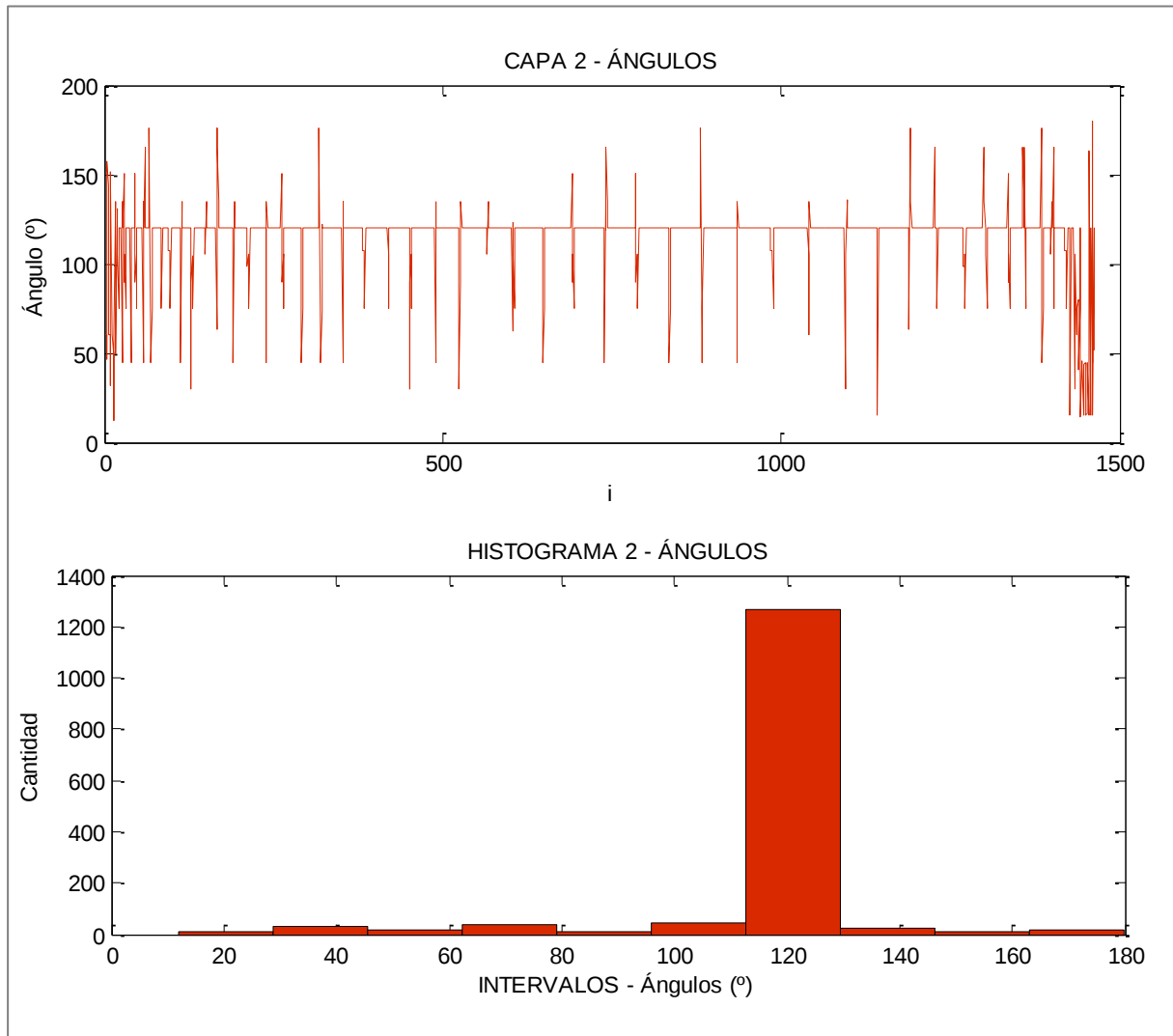
**GRÁFICA 6.55.-** Representación de la apertura angular en toda la geometría frente al número correspondiente de coordenada para un TRIÁNGULO con geometría interna ARCHIMEDEAN CHORDS.- Realizada con MATLAB.

Es necesario entender que la Gráfica 6.51 es una de las capas representadas en la Gráfica 6.55, donde aparecen todas tal y como serán impresas. Los histogramas representados en las Gráficas 6.52 y 6.54.

En la gráfica 6.51 se puede observar lo que se explicaba en la Figura 6.1. Teniendo en cuenta que se está representando un triángulo, los saltos que se producen donde el ángulo baja y sube repentinamente son saltos debido a que en esta capa se está realizando la trayectoria de fuera para dentro de la espiral, por lo que primero se realiza la zona cercana a las paredes y, cuando la circunferencia se

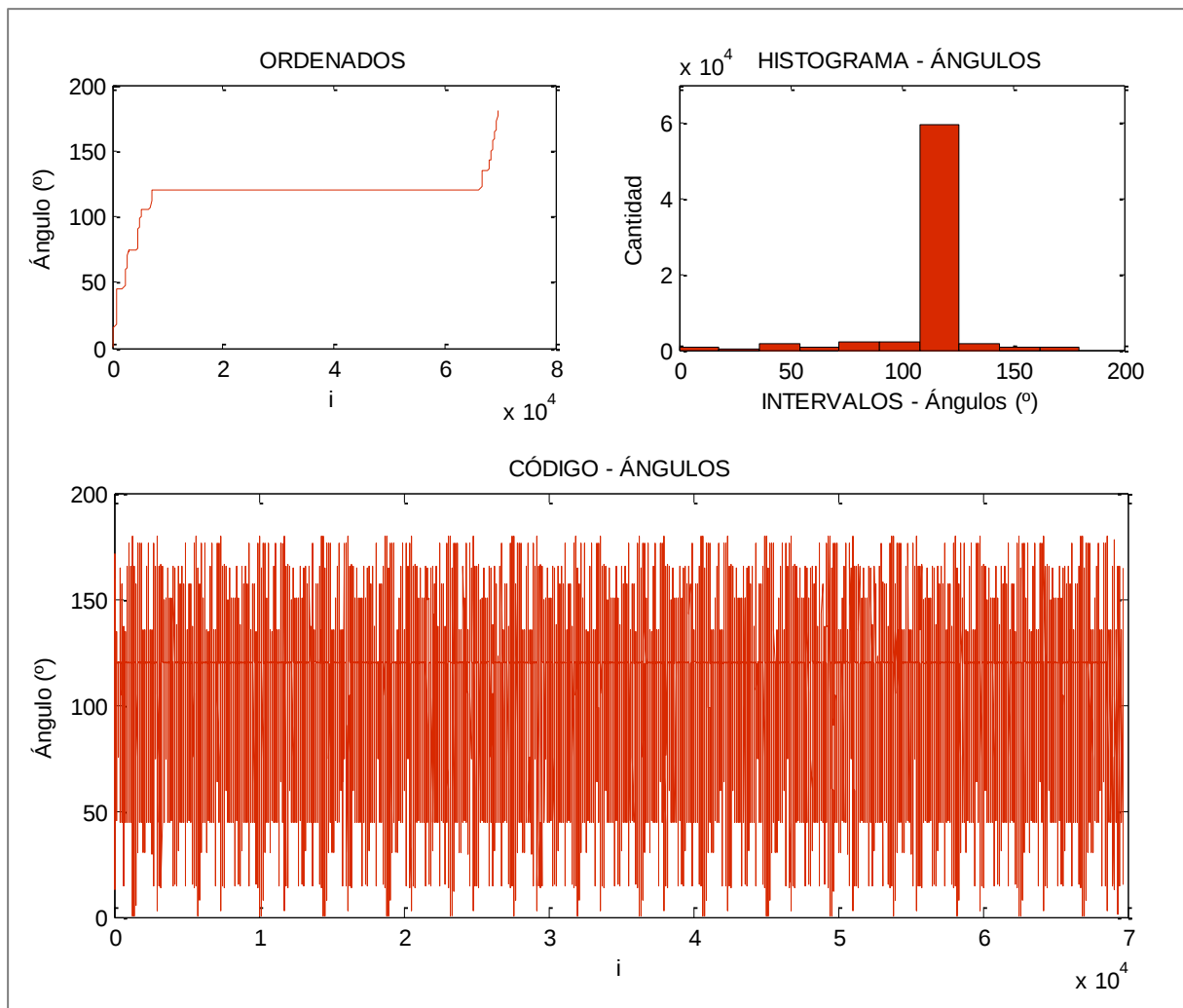
estrecha, mantiene una línea constante que desciende cada vez más conforme se acerca al centro de la espiral.

Las Gráficas 6.56 a 6.69 siguen el mismo criterio que las cinco anteriores.



**GRÁFICA 6.56.-** Representación de la apertura angular en la segunda capa frente al número correspondiente de coordenada para un TRIÁNGULO con geometría interna HONEYCOMB.- Realizada con MATLAB.

**GRÁFICA 6.57.-** Histograma.- Repetición angular por intervalos en la segunda capa para un TRIÁNGULO con geometría interna HONEYCOMB.- Realizada con MATLAB.

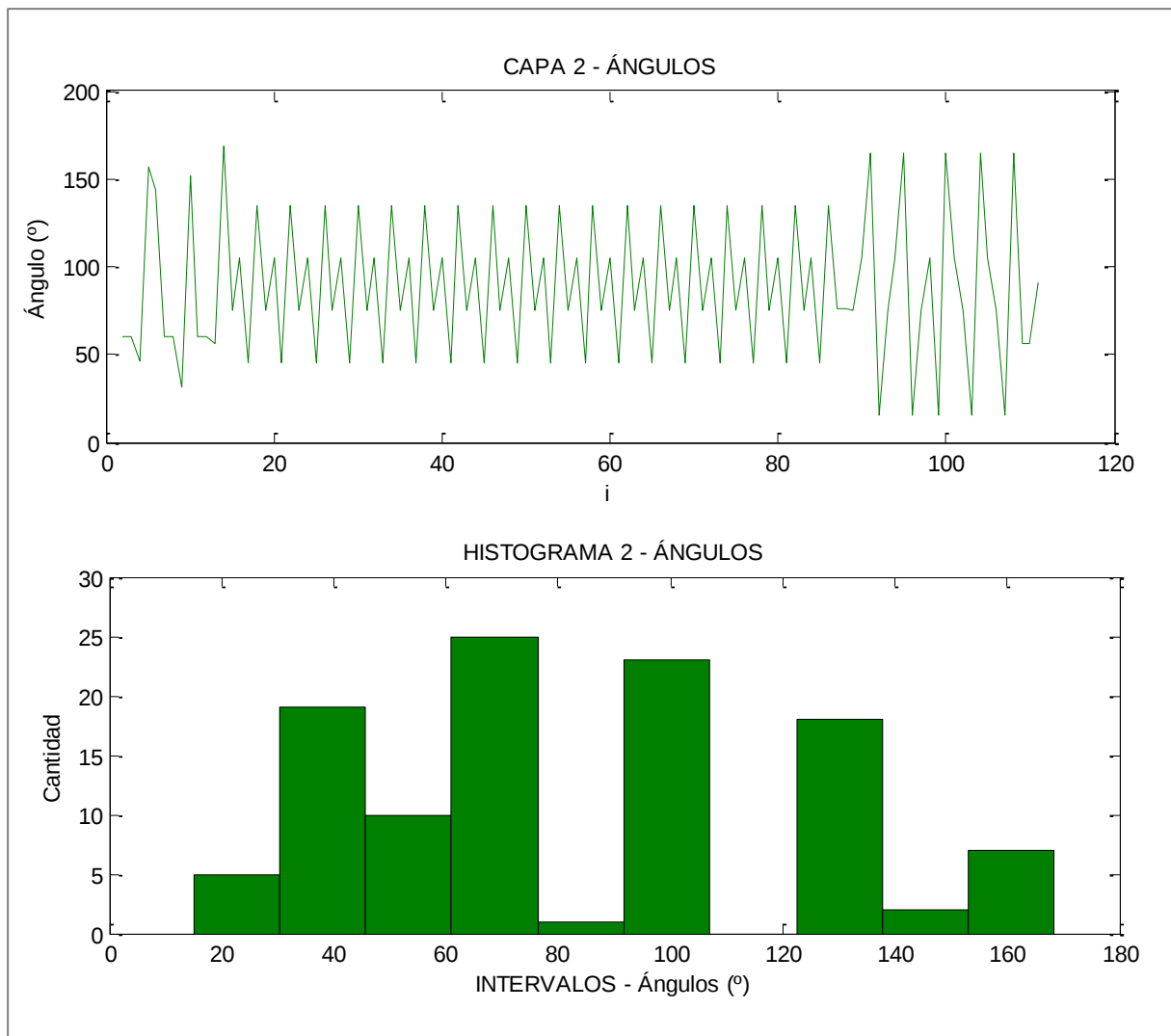


**GRÁFICA 6.58.-** Representación de la apertura angular ordenada de menor a mayor en toda la geometría frente al número total de coordenadas para un TRIÁNGULO con geometría interna HONEYCOMB.- Realizada con MATLAB.

**GRÁFICA 6.59.-** Histograma.- Repetición angular por intervalos en toda la geometría para un TRIÁNGULO con geometría interna HONEYCOMB.- Realizada con MATLAB.

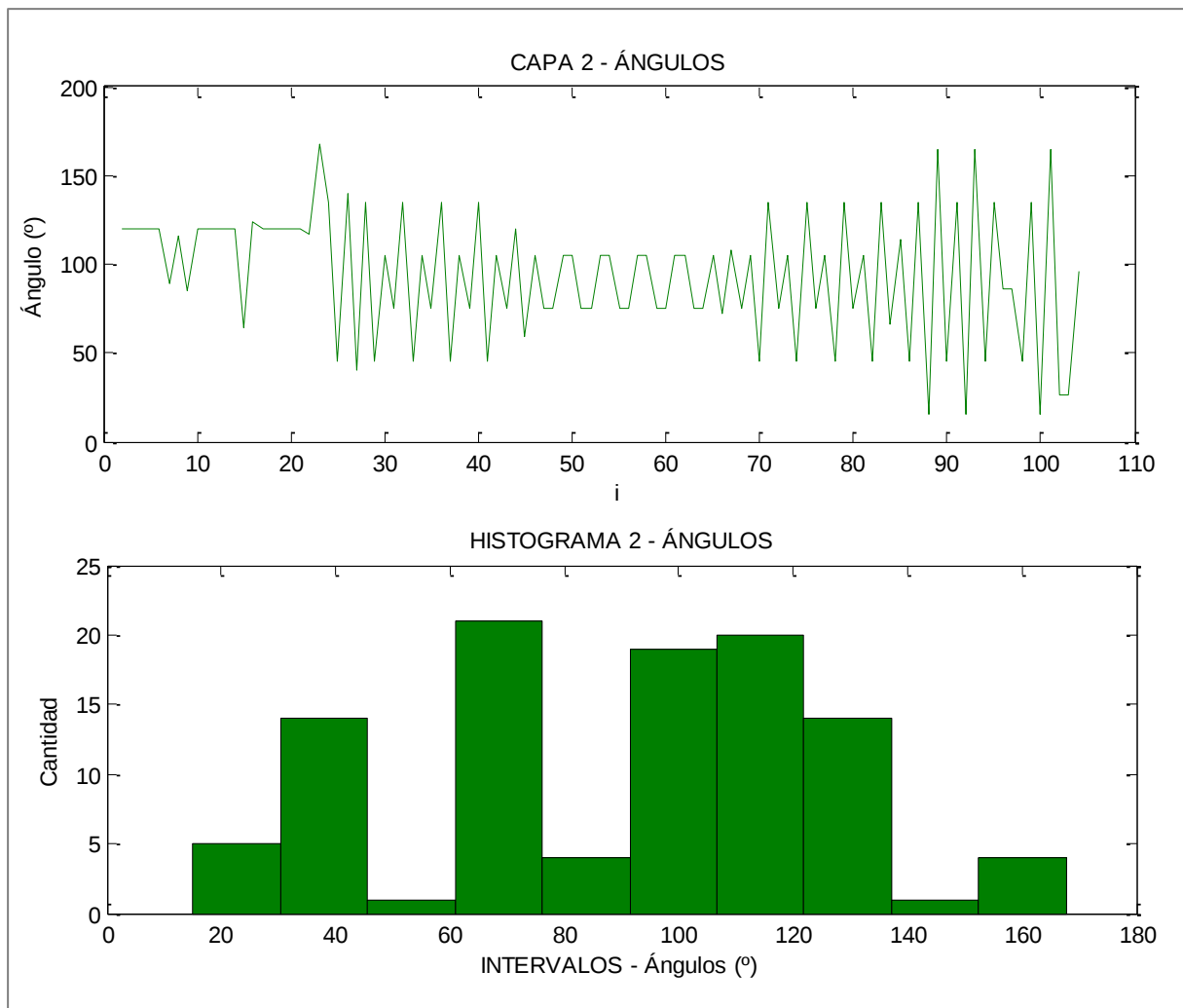
**GRÁFICA 6.60.-** Representación de la apertura angular en toda la geometría frente al número correspondiente de coordenada para un TRIÁNGULO con geometría interna HONEYCOMB.- Realizada con MATLAB.

Para el caso del patrón Rectilinear, se ha representado las primeras dos gráficas para cada geometría externa, ya que es el que más variedad de ángulos predominante tienen en función de estas. Esto se debe a que el único cambio de sentido que realiza al ser una trayectoria sencilla es cuando se aproxima a la frontera o pared externa, que dependiendo de la geometría externa tendrá un ángulo más o menos abierto.



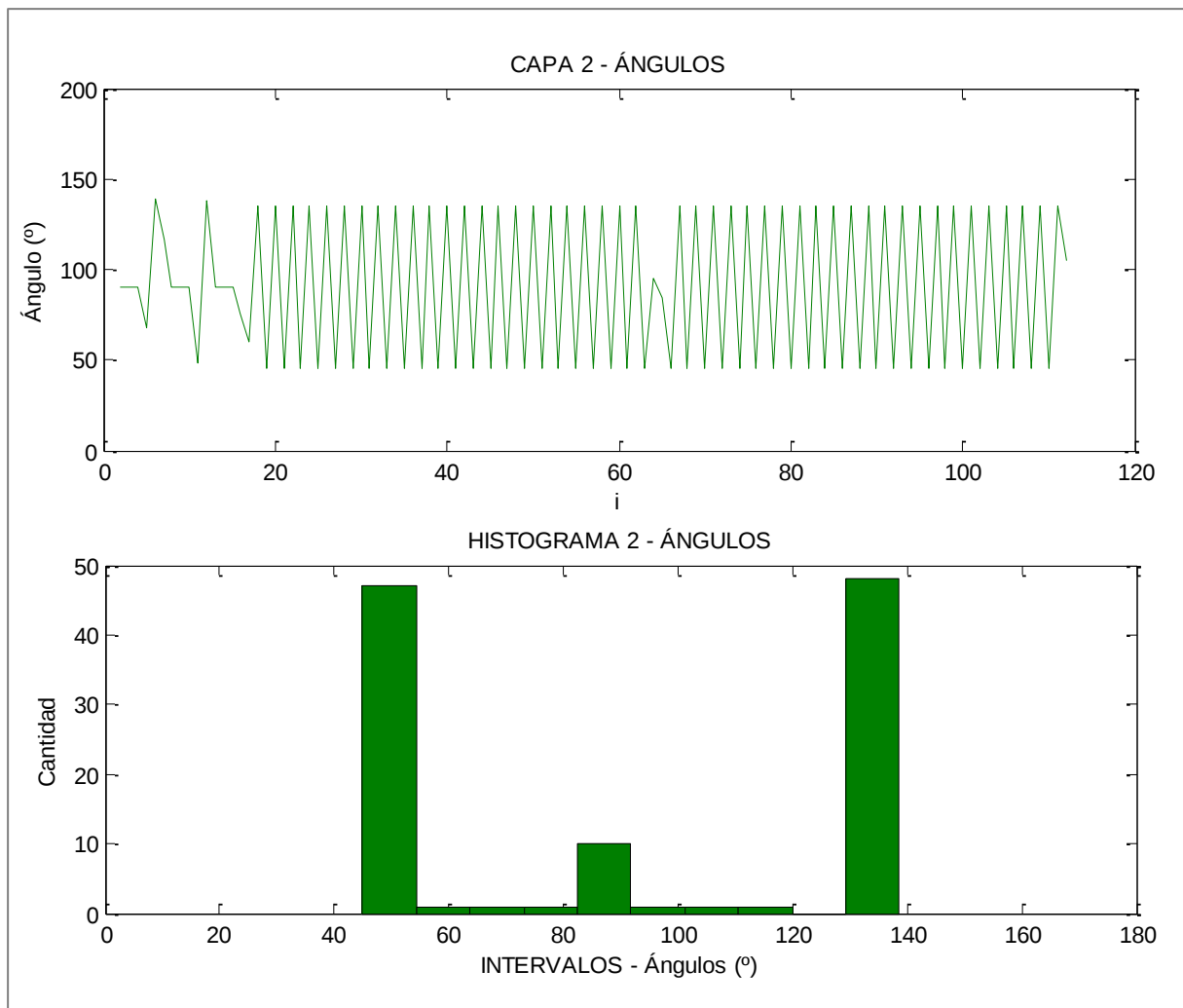
**GRÁFICA 6.61.-** Representación de la apertura angular en la segunda capa frente al número correspondiente de coordenada para un TRIÁNGULO con geometría interna RECTILINEAR.- Realizada con MATLAB.

**GRÁFICA 6.62.-** Histograma.- Repetición angular por intervalos en la segunda capa para un TRIÁNGULO con geometría interna RECTILINEAR.- Realizada con MATLAB.



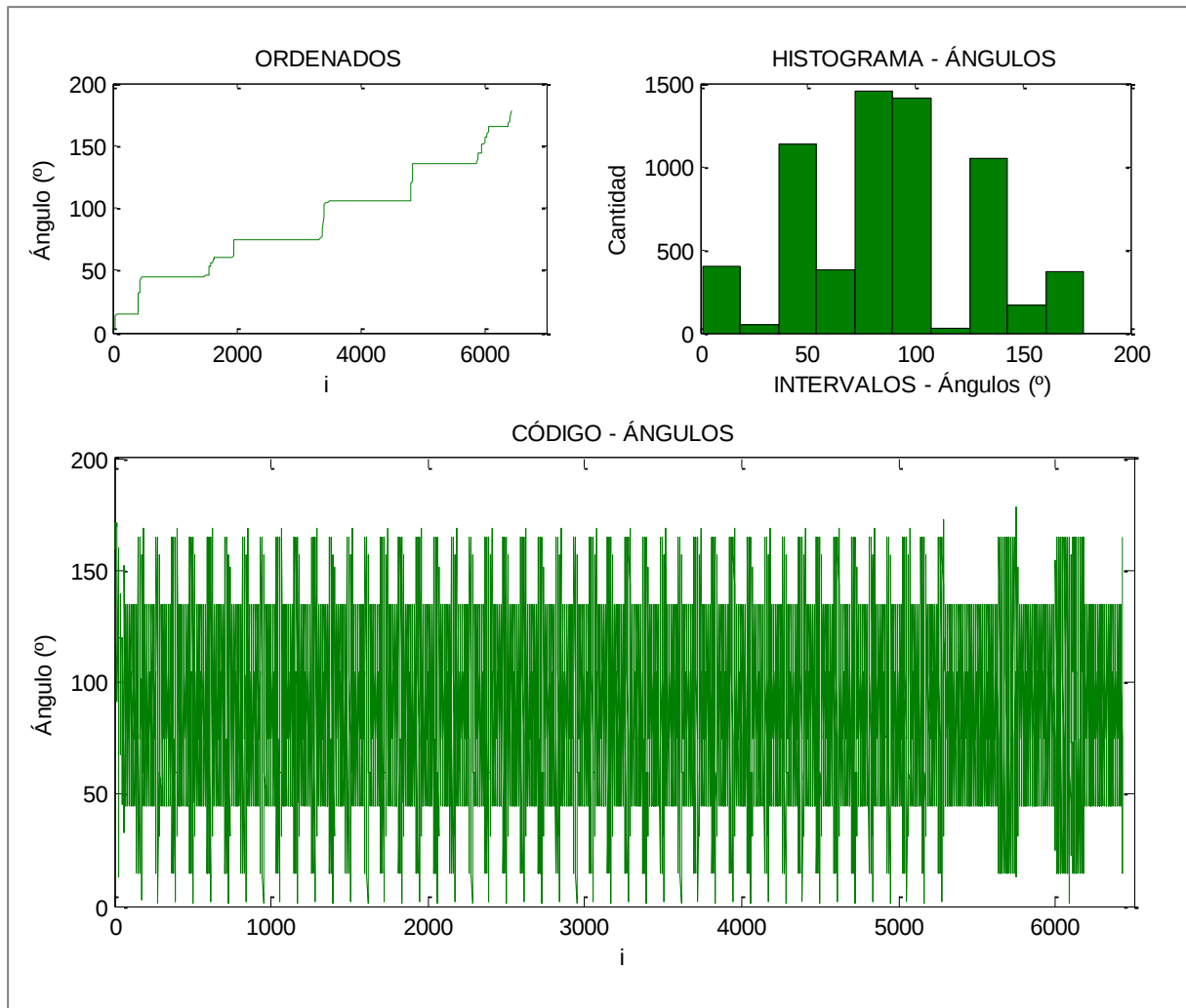
**GRÁFICA 6.63.-** Representación de la apertura angular en la segunda capa frente al número correspondiente de coordenada para un HEXÁGONO con geometría interna RECTILINEAR.- Realizada con MATLAB.

**GRÁFICA 6.64.-** Histograma.- Repetición angular por intervalos en la segunda capa para un HEXÁGONO con geometría interna RECTILINEAR.- Realizada con MATLAB.



**GRÁFICA 6.65.- Representación de la apertura angular en la segunda capa frente al número correspondiente de coordenada para un CUADRADO con geometría interna RECTILINEAR.- Realizada con MATLAB.**

**GRÁFICA 6.66.- Histograma.- Repetición angular por intervalos en la segunda capa para un CUADRADO con geometría interna RECTILINEAR.- Realizada con MATLAB.**



**GRÁFICA 6.67.-** Representación de la apertura angular ordenada de menor a mayor en toda la geometría frente al número total de coordenadas para un TRIÁNGULO con geometría interna HONEYCOMB.- Realizada con MATLAB.

**GRÁFICA 6.68.-** Histograma.- Repetición angular por intervalos en toda la geometría para un TRIÁNGULO con geometría interna HONEYCOMB.- Realizada con MATLAB.

**GRÁFICA 6.69.-** Representación de la apertura angular en toda la geometría frente al número correspondiente de coordenada para un TRIÁNGULO con geometría interna HONEYCOMB.- Realizada con MATLAB.

Así pues, teniendo en cuenta estos datos, se realizan los siguientes cálculos:

$$\mu = f(s, p_x) = f(D)$$

$$D = s + \beta \cdot p_x$$

$$\beta = 1 - \frac{\gamma}{180}$$

Donde  $D$  = cambios determinantes.  
 $s$  = saltos.  
 $p_x$  = paradas en  $X$ .  
 $\beta$  = proporción de amplitud angular.  
 $Y$  = media de los ángulos predominantes.

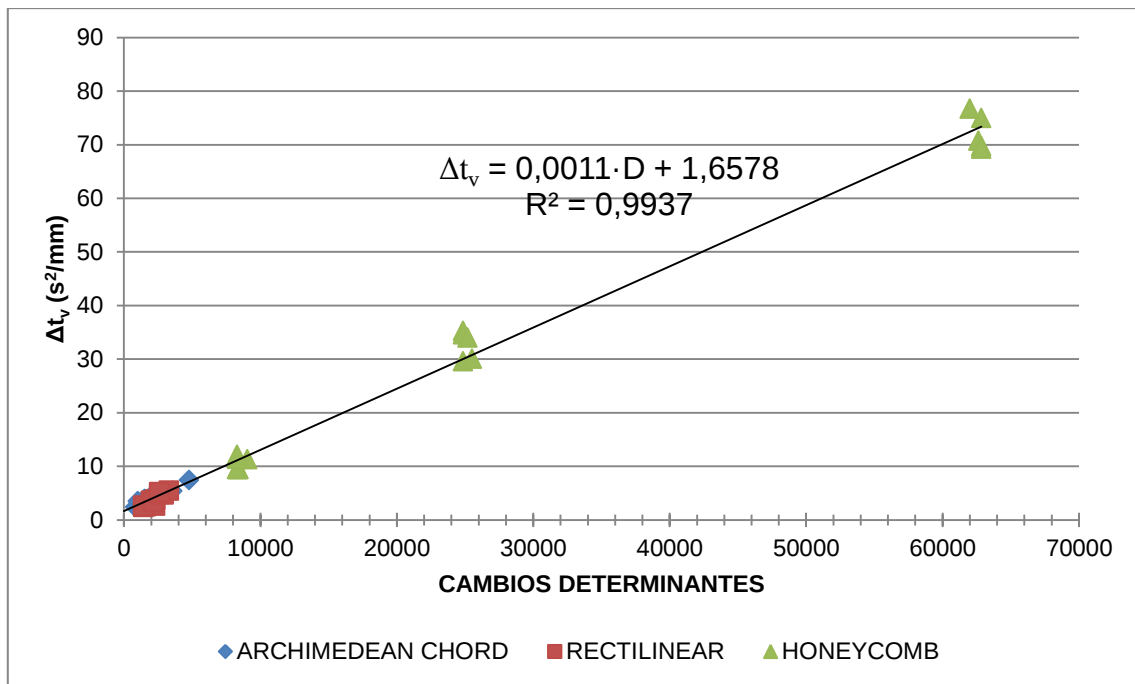
A continuación se muestra una tabla donde se resumen los datos vistos en las gráficas anteriores:

|                                        | ARCHIMEDEAN<br>CHORDS | HONEYCOMB | RECTILINEAR                                                            |
|----------------------------------------|-----------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>RANGO ÁNGULOS<br/>PREDOMINANTES</b> | 165° - 180°           | 120°      | 45°, 90°, 135°<br><br>(RESTO<br>CONDICIONADO POR<br>GEOMETRÍA EXTERNA) |
| $Y$                                    | 175°                  | 10        | 90°                                                                    |
| $\beta$                                | 0,0278                | 0,9444    | 0,5                                                                    |

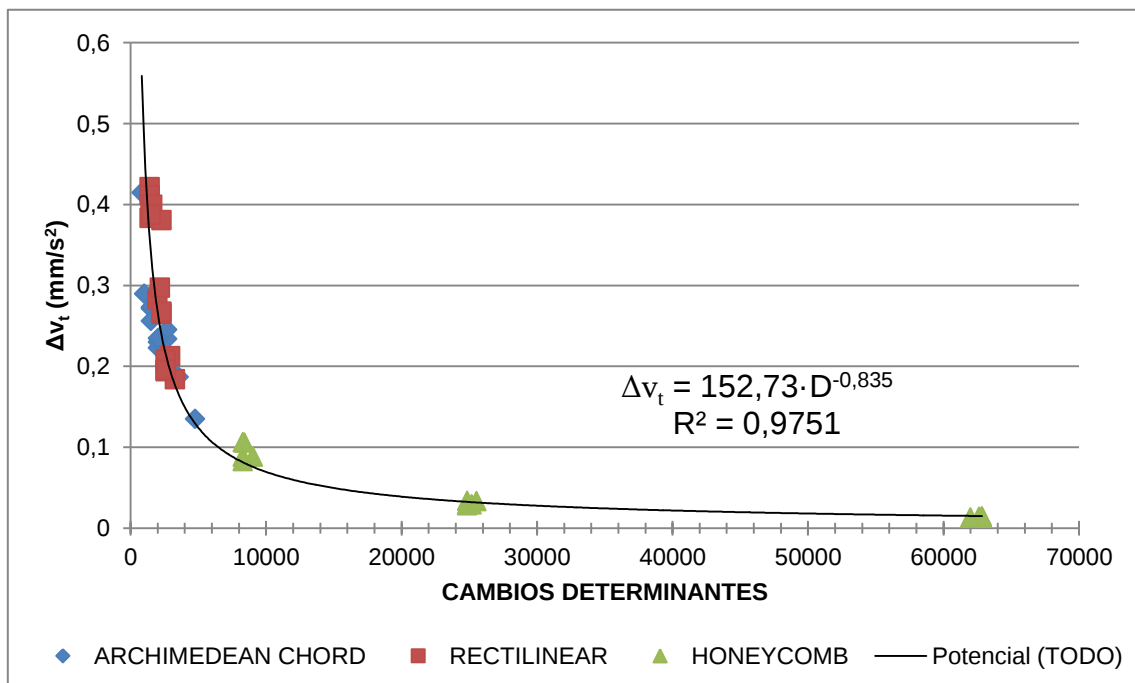
TABLA 6.1.- Ángulos predominantes según la geometría externa.- Elaboración propia.

El ángulo medio  $Y$  sólo se aplica si la geometría interna describe trayectorias sencillas o de ángulos continuos y elevados, en cuyo caso se calcula realizando una aproximación a la media entre los ángulos predominantes. En éste caso, se ha aplicado a Honeycomb un  $Y$  pequeño para aproximar el valor  $\beta$  a la unidad. Aun así, éste parámetro se queda abierto a estudio.

Representando la diferencia temporal en función del número de cambios determinantes se obtiene finalmente las siguientes gráficas:



**GRÁFICA 6.70.- Representación de la variación temporal en función de la velocidad frente a los cambios determinantes de sentido para cada geometría interna.- Realizada con EXCEL.**



**GRÁFICA 6.71.- Representación de la inversa de la variación temporal en función de la velocidad frente a los cambios determinantes de sentido para cada geometría interna.- Realizada con EXCEL.**

Finalmente se obtienen resultados con los que se pueden predecir en función de la geometría de la probeta la variación temporal que existirá.

Si obtenemos de la Gráfica XXX a XXX las ecuaciones de los ajustes y a partir de ellas sacamos el tiempo real tendremos lo siguiente.

$$\Delta t_v = 0,0011 \cdot D + 1,6578$$

$$\Delta v_t = 152,73 \cdot D^{-0,835}$$

(Fórmula 6.15)

Si se igualan las Fórmulas 6.7 y 6.15:

$$\Delta t = (0,0011 \cdot D + 1,6578) \cdot v_f$$

$$t_r = (0,0011 \cdot D + 1,6578) \cdot v_f + t_t$$

(Fórmula 6.16)

Y al ser la diferencia de velocidad en función del tiempo la inversa de la diferencia de tiempo en función de la velocidad:

$$\Delta t = \frac{v_f}{152,73 \cdot D^{-0,835}}$$

$$t_r = \frac{v_f}{152,73 \cdot D^{-0,835}} + t_t$$

(Fórmula 6.17)

Donde  $\Delta t_v$  = la diferencia del tiempo en función de la velocidad ( $s^2/mm$ ).

$\Delta t$  = diferencia entre tiempos teórico y real (s).

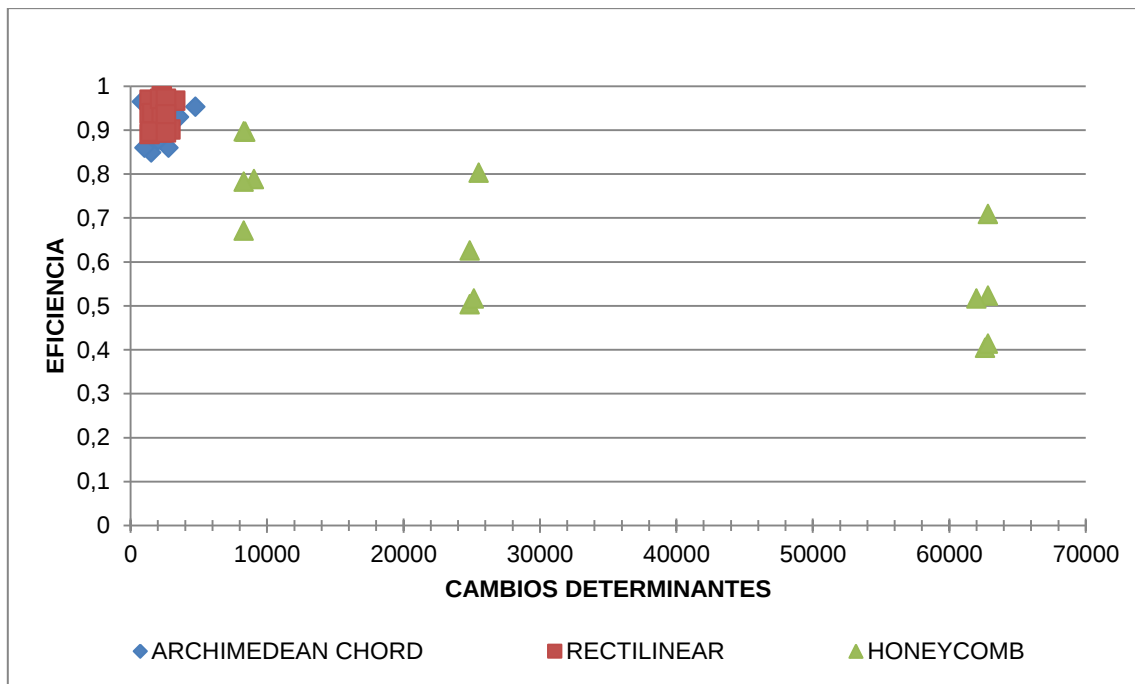
$t_r, t_t$  = tiempo real y teórico (s).

$v_f$  = velocidad de avance (mm/s).

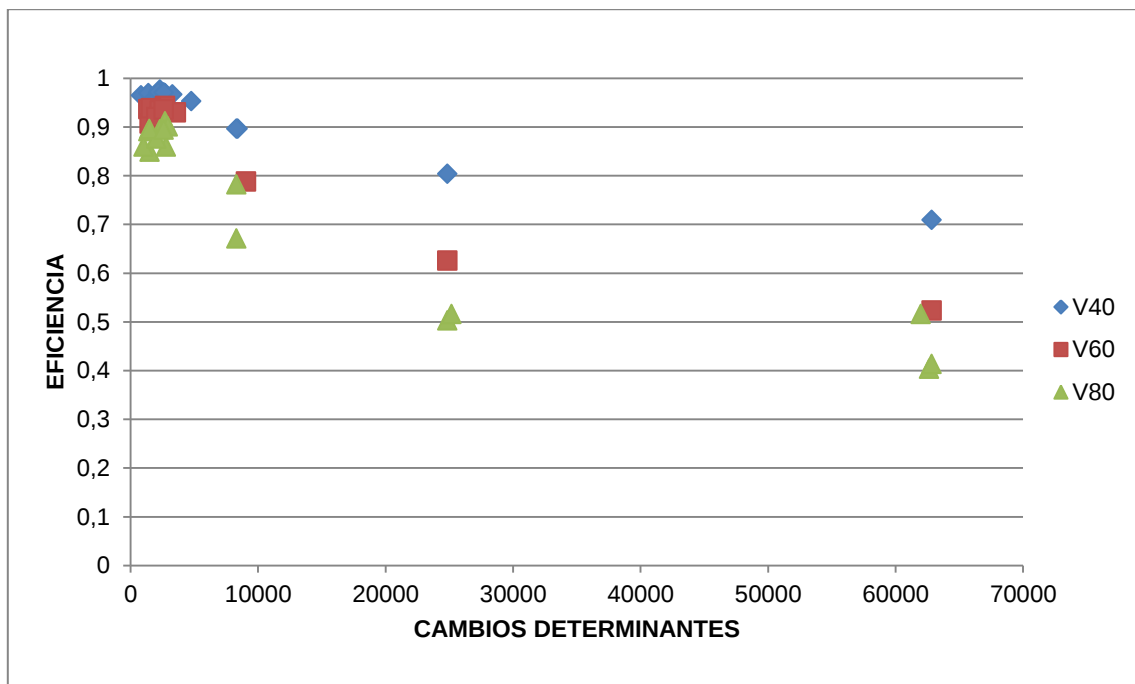
D = cambios determinantes.

La eficiencia, por consiguiente, que se obtendrá en función de estos cambios también será predecible siempre y cuando se tenga en cuenta la velocidad de avance que se quiere configurar.

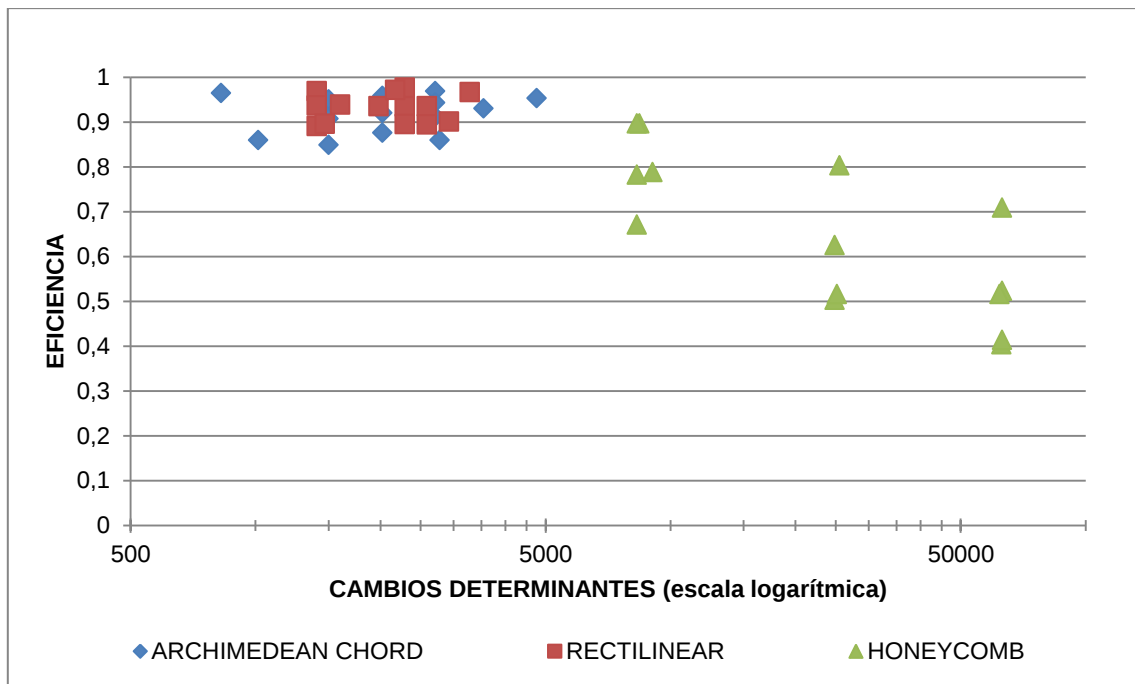
Así pues, se obtendrán las siguientes gráficas:



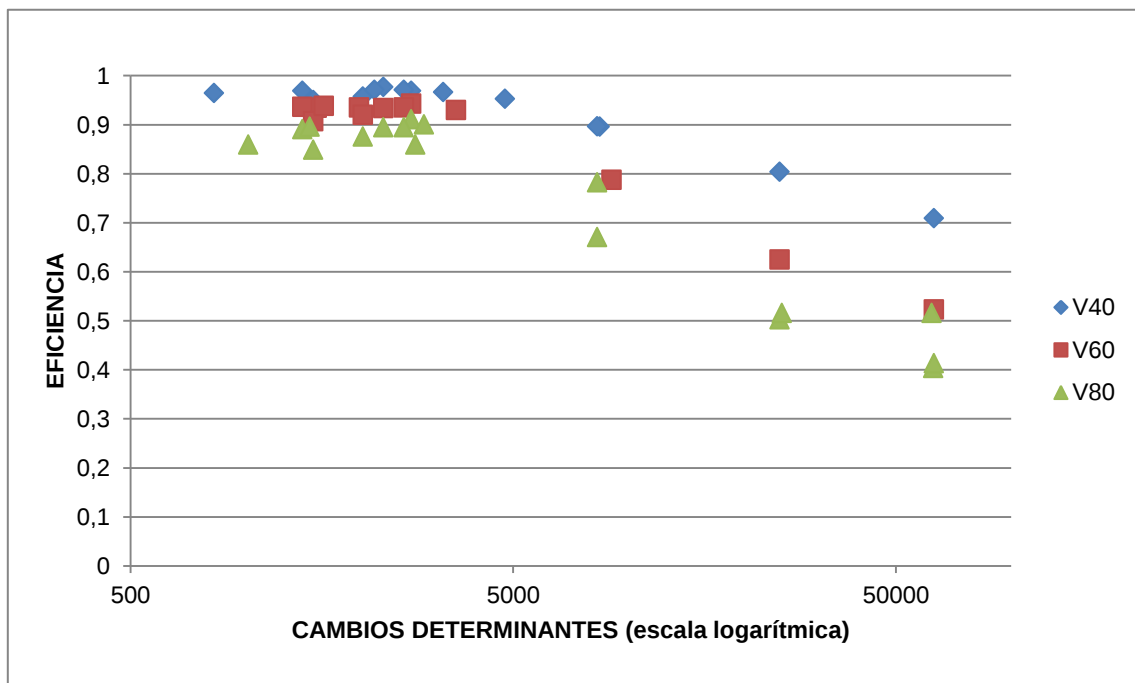
**GRÁFICA 6.72.-** Representación de la eficiencia frente a los cambios determinantes de sentido para cada geometría interna.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.73.-** Representación de la eficiencia frente a los cambios determinantes de sentido para cada velocidad.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.74.-** Representación de la eficiencia frente a los cambios determinantes de sentido en escala logarítmica de orden 10 para cada geometría interna.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.75.-** Representación de la eficiencia frente a los cambios determinantes de sentido en escala logarítmica de orden 10 para cada velocidad de avance.- Realizada con EXCEL.

## 6.2. Estudio de las dimensiones experimentales.

Dependiendo de la velocidad a la que avance el extrusor, la temperatura del hilo y de la geometría interna que contenga la probeta la precisión dimensional variará.

En primer lugar la temperatura es un factor importante, ya que el material, PLA en este caso, se contraerá cuando se enfríe. Sin embargo se ha mantenido ésta a 220°C, por lo que todas las piezas tendrán la misma contracción.

En segundo lugar, la velocidad de avance afectará a la geometría en el momento de la impresión, ya que si el extrusor realiza un cambio de sentido rápido el filamento tiene menos tiempo de adherirse a la capa anterior o incluso de ser extruido por el propio extrusor, lo que determina que las esquinas estén correctamente impresas o tengan una forma redondeadas.

Si bien la temperatura juega un papel primordial en la contracción del material, también lo hace la densidad del patrón de relleno, ya que si la densidad es muy alta la geometría tenderá a mantener la forma real (no hay suficientes huecos para adaptarse a éstos) disminuyendo el coeficiente de dilatación.

Para realizar las mediciones se ha de tener en cuenta las siguientes distancias:

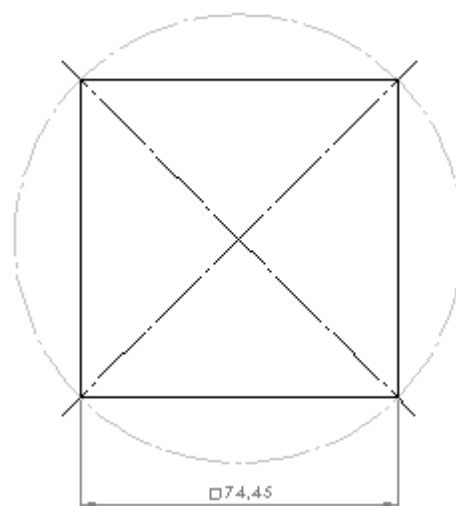
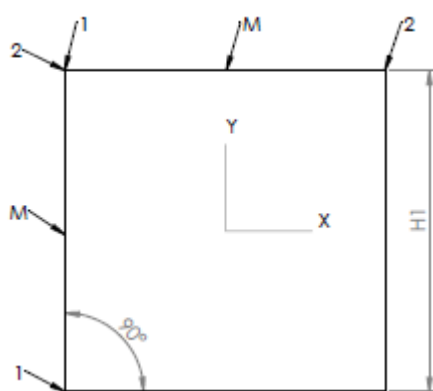


FIGURA 6.2.- Marcado de los puntos medidos.- Elaborado en Solidworks.

FIGURA 6.3.- Acotado de la figura original (dimensiones en milímetros).- Elaborado en Solidworks.

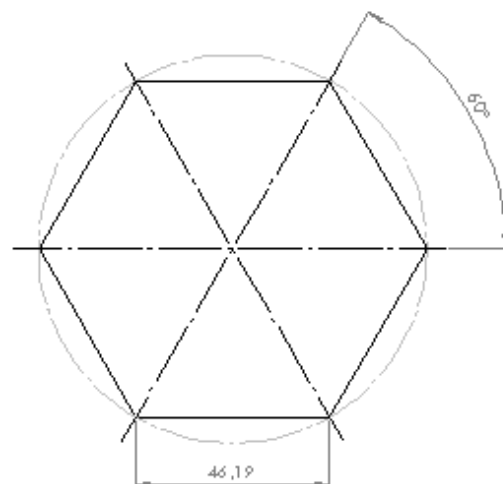
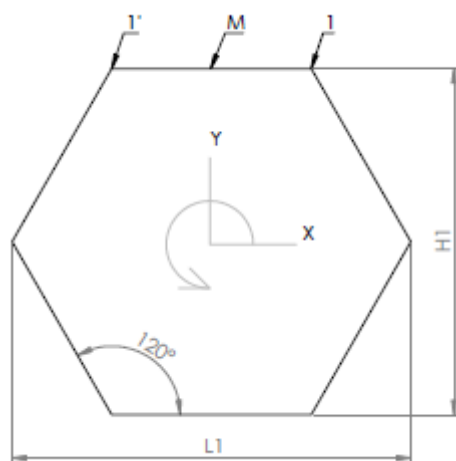


FIGURA 6.4.- Marcado de los puntos medidos.- Elaborado en Solidworks.

FIGURA 6.5.- Acotado de la figura original (dimensiones en milímetros).- Elaborado en Solidworks.

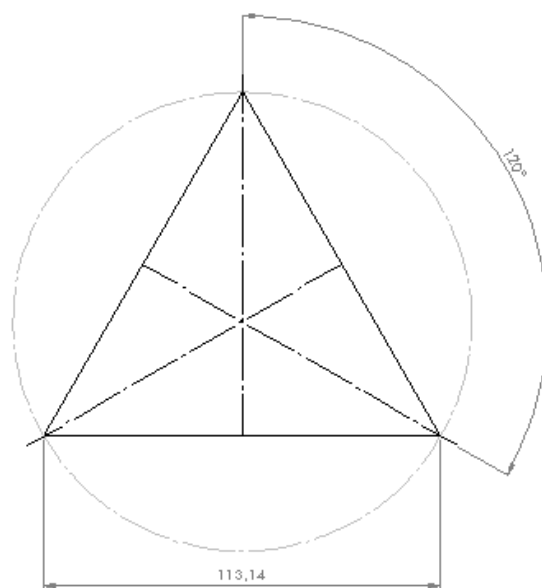
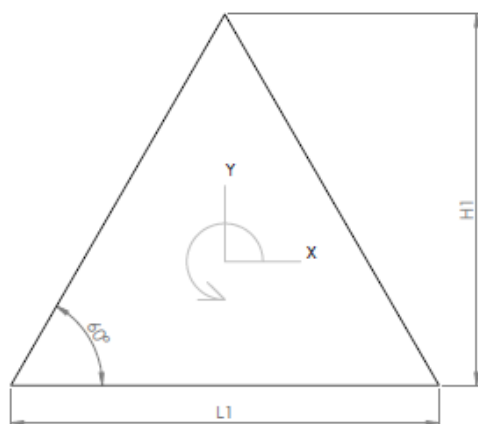


FIGURA 6.6.- Marcado de los puntos medidos.- Elaborado en Solidworks.

FIGURA 6.7.- Acotado de la figura original (dimensiones en milímetros).- Elaborado en Solidworks.

Teniendo en cuenta estos datos, se calcula el error existente entre las mediciones experimentales y los datos reales, de forma que se obtienen las tolerancias según la forma geométrica exterior.

$$E_{hi} = H_{mi} - H_{ri}$$

$$\overline{E_h} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{mi} - H_{ri})}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{hi}}{n}$$

(Fórmula 6.18)

Donde  $i$  = posición.

$E_{hi}$  = error de la medición de la altura de la medida  $i$ .

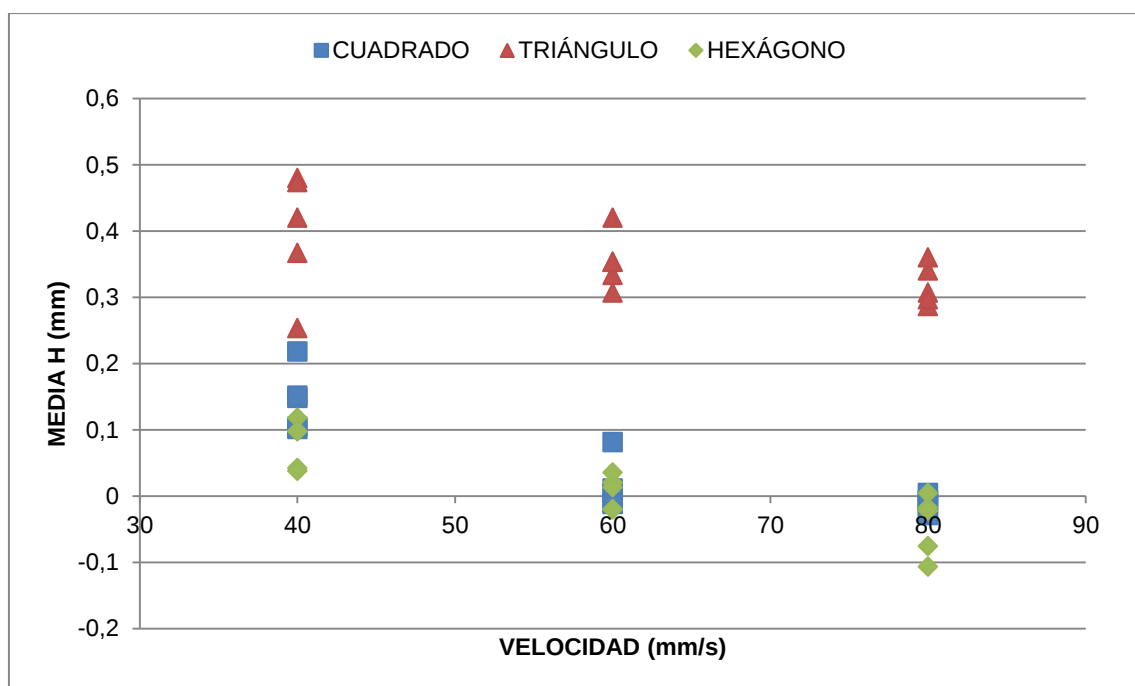
$E_h$  = error medio de todas las alturas medidas.

$H_{mi}$  = altura medida en la posición  $i$ .

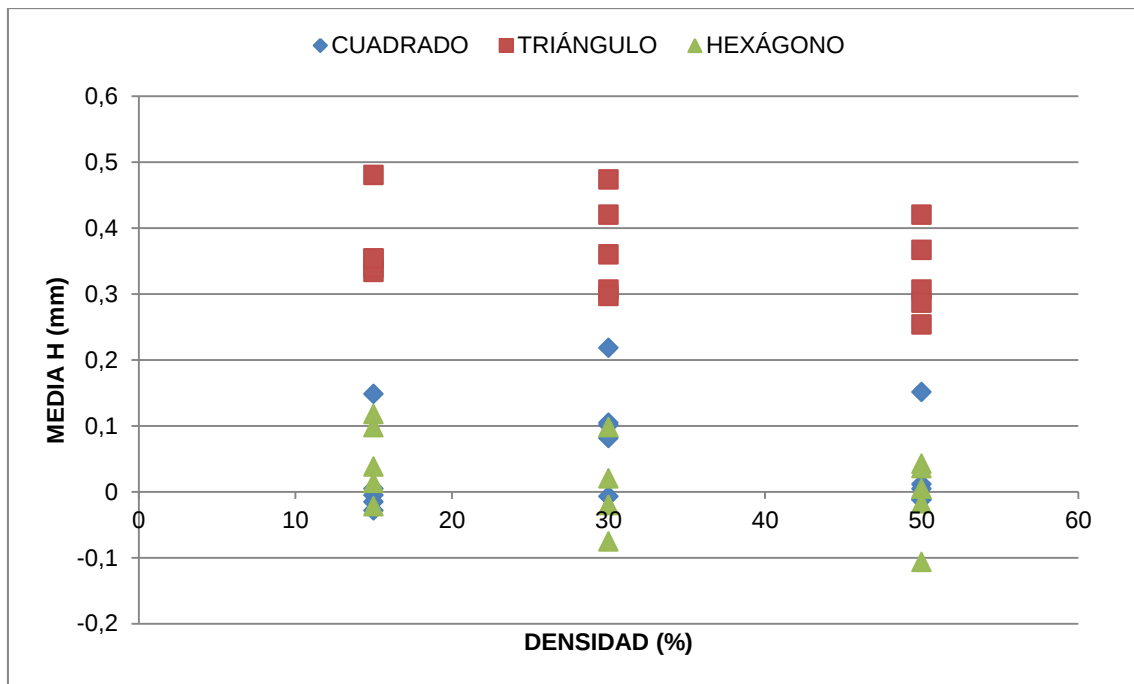
$H_{ri}$  = altura teórica en la posición  $i$ .

$n$  = número total de longitudes medidas.

A continuación se observan los errores medios según la velocidad de avance y la densidad de relleno diferenciados por geometrías externas:



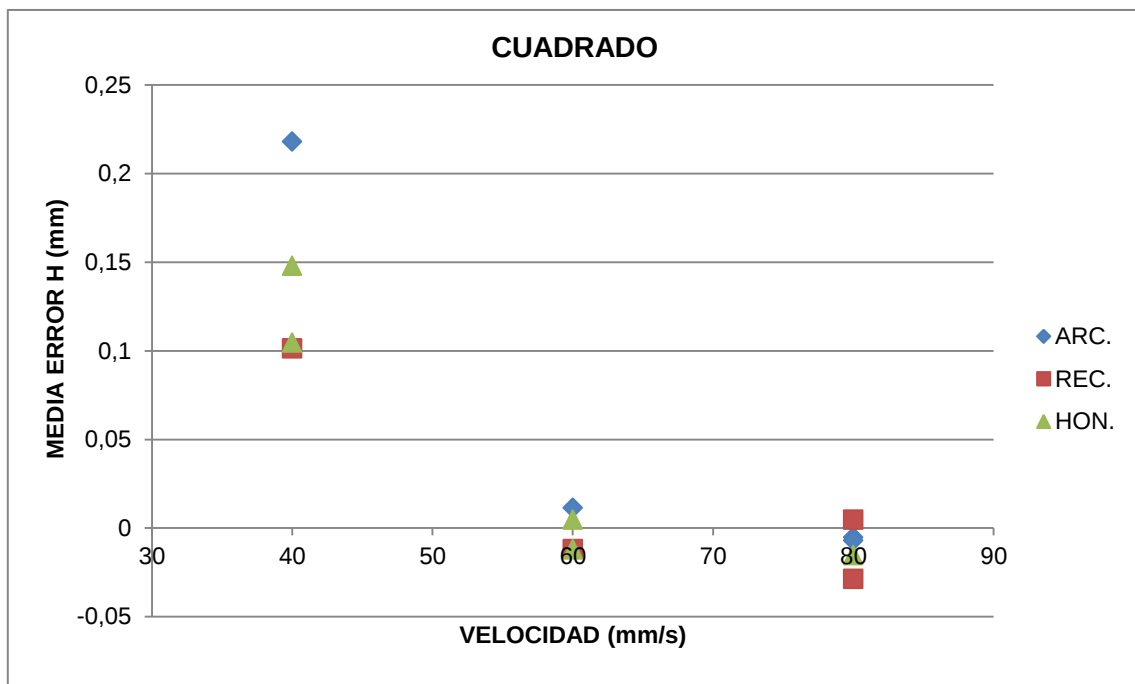
**GRÁFICA 6.76.-** Representación de la media del error de todas las alturas medidas (mm) frente a la velocidad de avance (mm/s) para todas las geometrías externas.- Realizada con EXCEL.



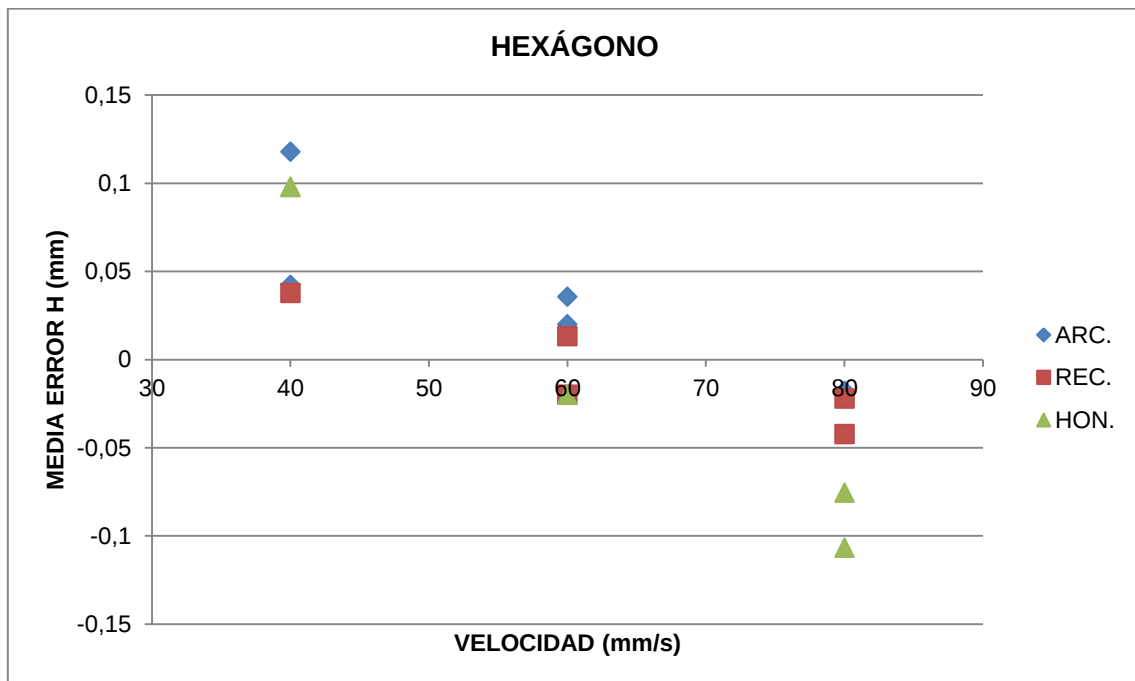
**GRÁFICA 6.77.-** Representación de la media del error de todas las alturas medidas (mm) frente a la densidad de relleno (%) para todas las geometrías externas.- Realizada con EXCEL.

Se observa en ambas gráficas que al aumentar el ángulo de la geometría el error disminuye. Así, el triángulo ( $60^\circ$ ) registra los mayores errores tendiendo a 0,3 mm, seguido por el cuadrado ( $90^\circ$ ), el que tiende a cero al aumentar la velocidad. El hexágono, que es el que tiene un ángulo mayor ( $120^\circ$ ) a pesar de ser el que menor errores tiene, cuando la velocidad de avance es alta (80 mm/s) comienza a registrar valores negativos, siendo aun así menores que los que mantiene el triángulo. En cuanto en la segunda gráfica que compara el error con la densidad de relleno, los valores se muestran muy dispersos en todas las geometrías, por lo que se podría decir que la densidad no influye en las dimensiones finales.

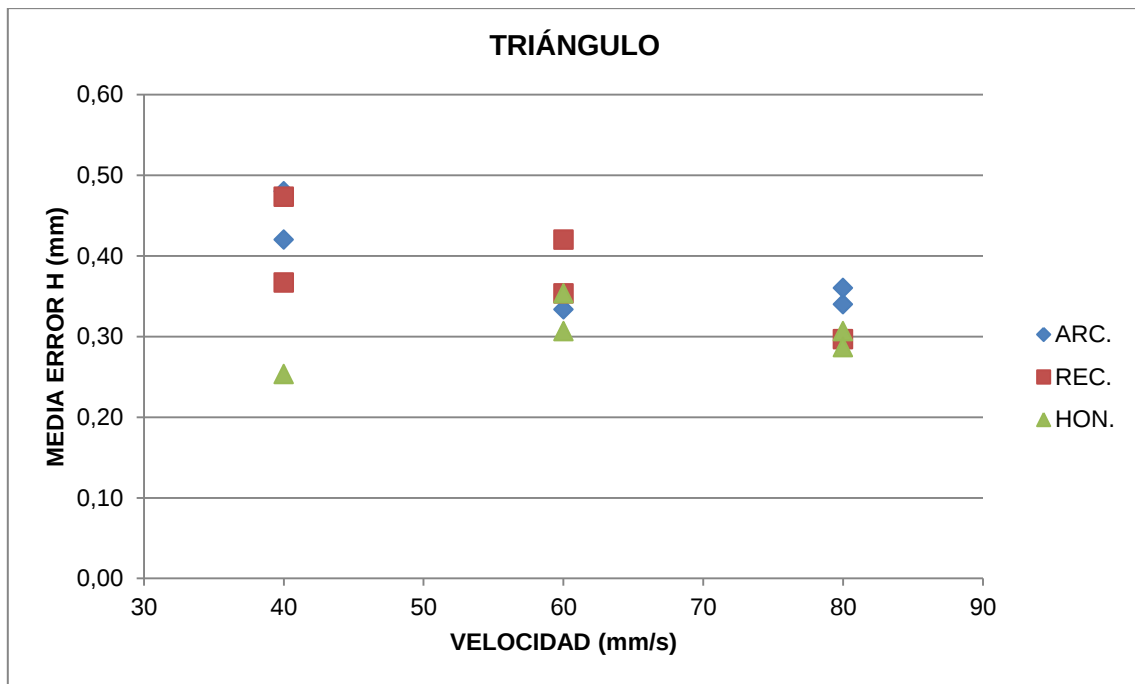
En los tres casos ocurre que a velocidades bajas el error no sólo es más alto, sino que experimentalmente obtiene valores más dispersos, siendo la diferencia entre ellos función de las geometrías de relleno que tienen las probetas, tal y como se observa en las siguientes gráficas donde se dividen los resultados por geometrías externas e internas:



**GRÁFICA 6.78.-** Representación de la media del error de todas las alturas medidas (mm) frente a la velocidad de avance (mm/s) en la geometría interna CUADRADO.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.79.-** Representación de la media del error de todas las alturas medidas (mm) frente a la velocidad de avance (mm/s) en la geometría interna HEXÁGONO.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.80.-** Representación de la media del error de todas las alturas medidas (mm) frente a la velocidad de avance (mm/s) en la geometría interna TRIÁNGULO.- Realizada con EXCEL.

Debido al contacto interior de las líneas de relleno con las paredes de la geometría externa, ésta influye en las dimensiones de forma que el patrón Archimedean Chords genera mayores errores, seguido por Rectilinear y Honeycomb. También se puede comprobar que Honeycomb en el Hexágono provoca “rechupes” en las paredes, generando resultados de valor negativo.

Así pues, la geometría externa en su mayor parte junto con la velocidad de avance y la geometría de relleno son los tres parámetros influyentes en las dimensiones finales de las probetas.

En el apartado siguiente se comparará el error dimensional con la vibración producida por la máquina.

### 6.3. Estudio de las aceleraciones.

Para estudiar las aceleraciones se ha empleado un acelerómetro. Dado que se va a comparar como afectan diferentes parámetros, se han tomado los valores de tensión proporcionados por el acelerómetro. Además se ha filtrado la señal para una mejor interpretación de los resultados.

Así pues, utilizando el programa Wolfram Mathematica 9.0 versión estudiante se ha filtrado la señal del acelerómetro empleando la transformada de (el código Mathematica empleado para el filtrado se encuentra en el Anexo XXX).

En resumen, el software realiza la siguiente operación:

$$v_s = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{r=1}^n u_r e^{2\pi i(r-1)(s-1)/n}$$

(Fórmula 6.19)

Realiza una operación que se asemeja a la multiplicación de la siguiente matriz:

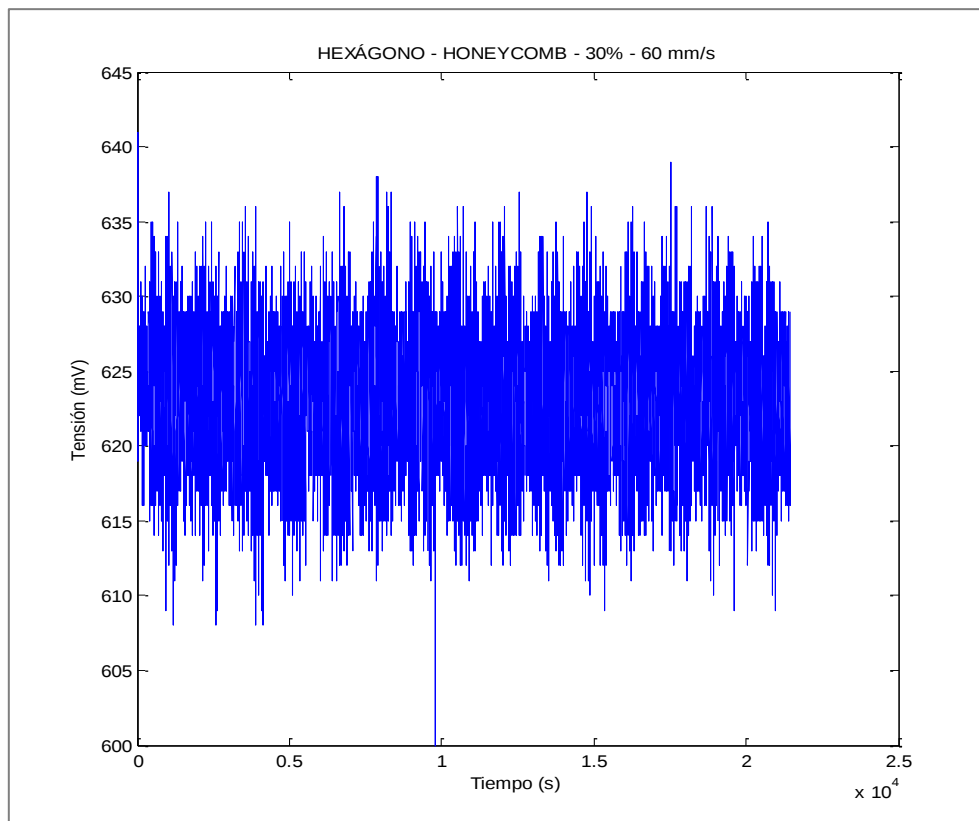
$$v_s = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{\frac{i\pi}{3}} & e^{\frac{2i\pi}{3}} & -1 & e^{-\frac{2i\pi}{3}} & e^{-\frac{i\pi}{3}} \\ 1 & e^{\frac{2i\pi}{3}} & e^{-\frac{2i\pi}{3}} & 1 & e^{\frac{2i\pi}{3}} & e^{-\frac{2i\pi}{3}} \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & e^{-\frac{2i\pi}{3}} & e^{\frac{2i\pi}{3}} & 1 & e^{-\frac{2i\pi}{3}} & e^{\frac{2i\pi}{3}} \\ 1 & e^{-\frac{i\pi}{3}} & e^{-\frac{2i\pi}{3}} & -1 & e^{\frac{2i\pi}{3}} & e^{\frac{i\pi}{3}} \end{pmatrix}$$

(Fórmula 6.20)

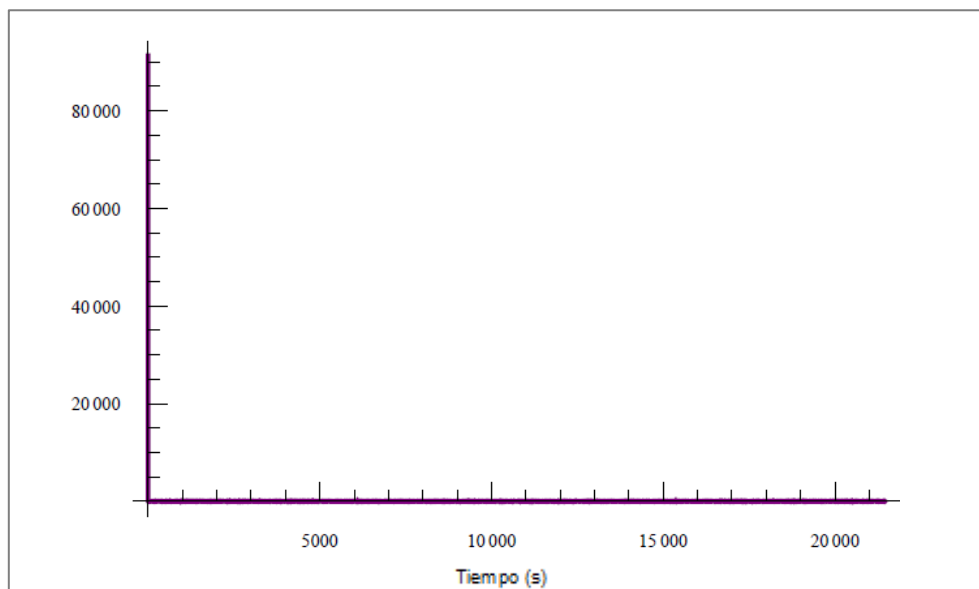
Donde  $v_s$  = Transformada de Fourier.  
 $u_r$  = lista de elementos a operar.  
 $r$  = posición horizontal.  
 $s$  = posición vertical.  
 $n$  = tamaño de la matriz.

La función principal de este cálculo es mostrar ordenadamente las frecuencias más repetidas.

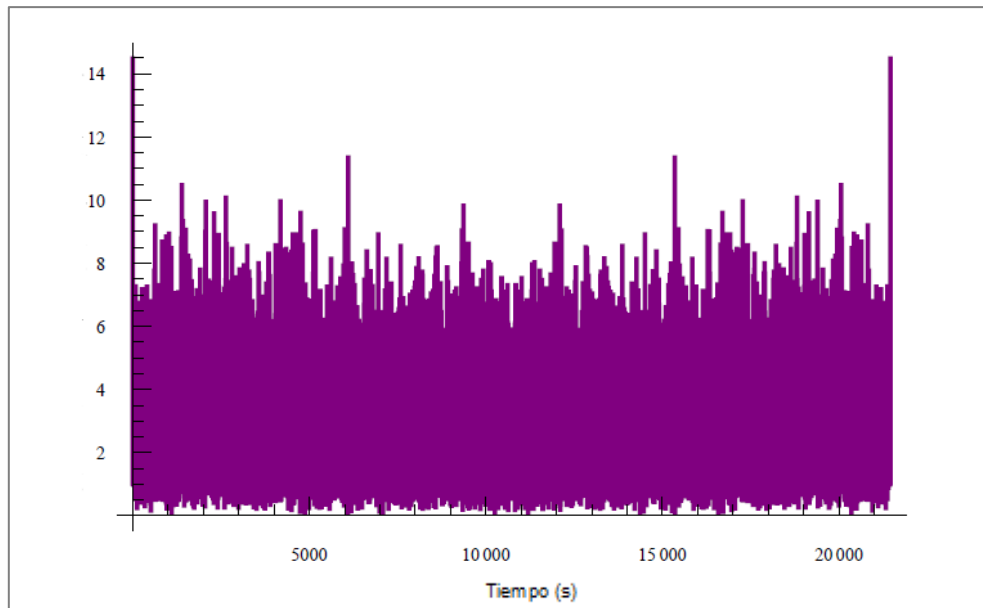
En las siguientes gráficas se observan los datos inicialmente recogidos con el acelerómetro y el resultado tras realizar la transformada:



**GRÁFICA 6.81.- Representación de la tensión registrada por el acelerómetro durante uno de los ensayos de prueba.- Realizada con MATLAB.**



**GRÁFICA 6.82.- Representación de la Transformada de Fourier de los datos representados en la gráfica 6.81.- Realizada con WOLFRAM MATHEMATICA.**



**GRÁFICA 6.83.- Ampliación de los datos secundarios de la gráfica 6.82.- Realizada con WOLFRAM MATHEMATICA.**

Tras realizar todos los cálculos correspondientes se ha estudiado el punto más alto de cada uno de los ensayos en las tres direcciones. Se realiza el módulo de los tres vectores para determinar la longitud total, de forma que se obtiene una sola columna que estudiar simplificando la observación.

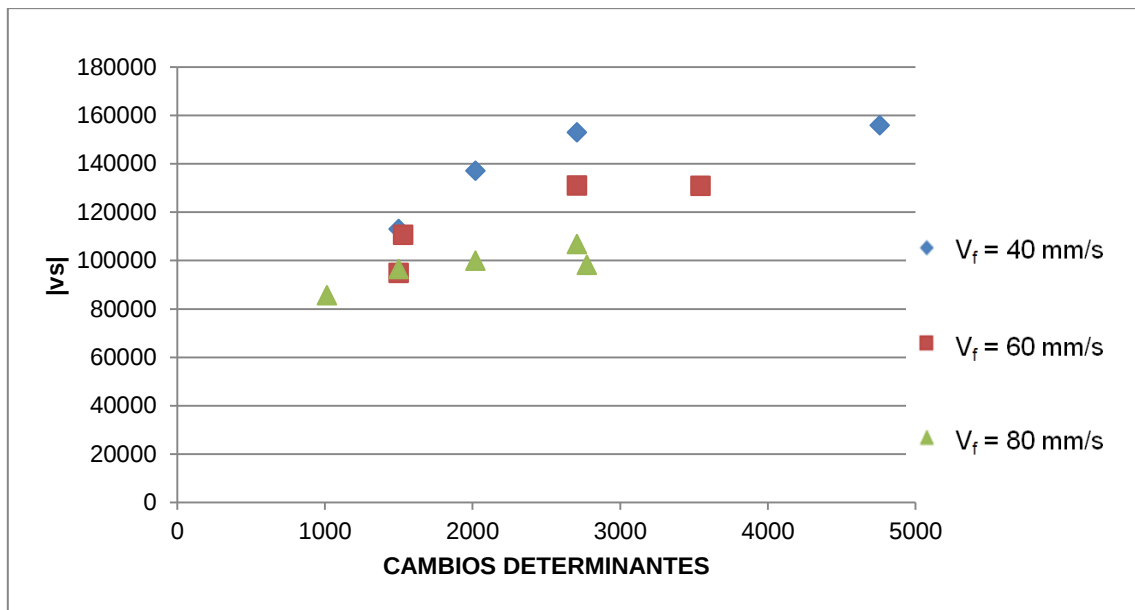
$$|v_s| = \sqrt{\max(v_{sx})^2 + \max(v_{sy})^2 + \max(v_{sz})^2}$$

(Fórmula 6.21)

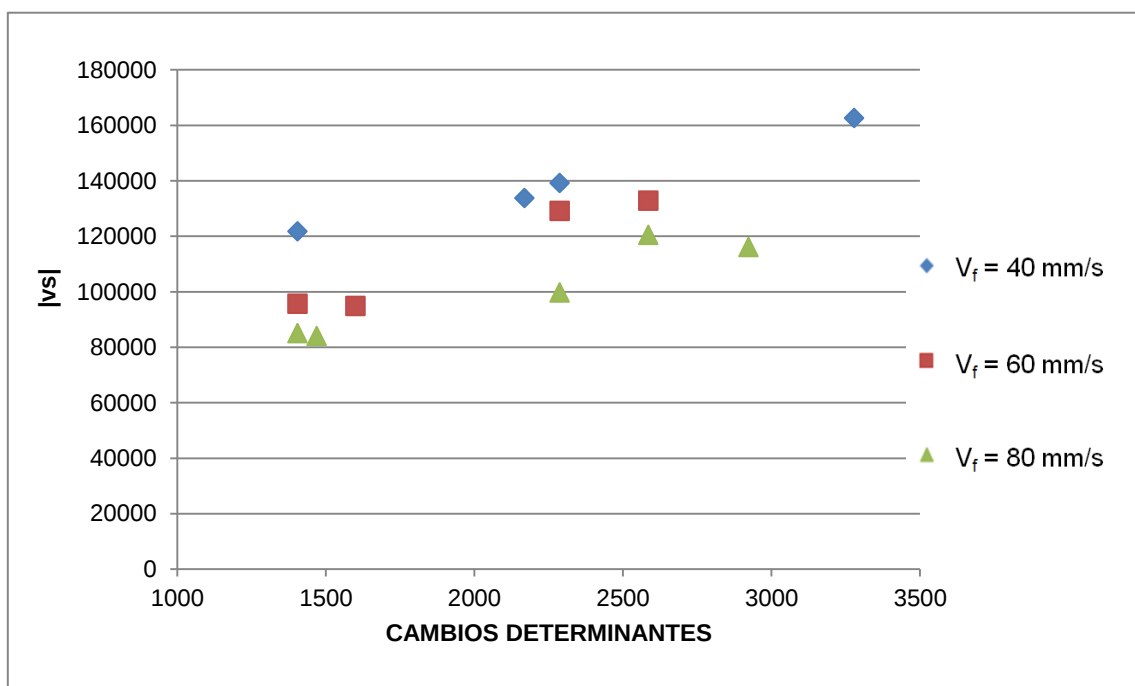
Donde  $v_{sx}, v_{sy}, v_{sz}$  = Transformada de Fourier del voltaje en X, Y, Z.

$|v_s|$  = módulo de la Transformada de Fourier.

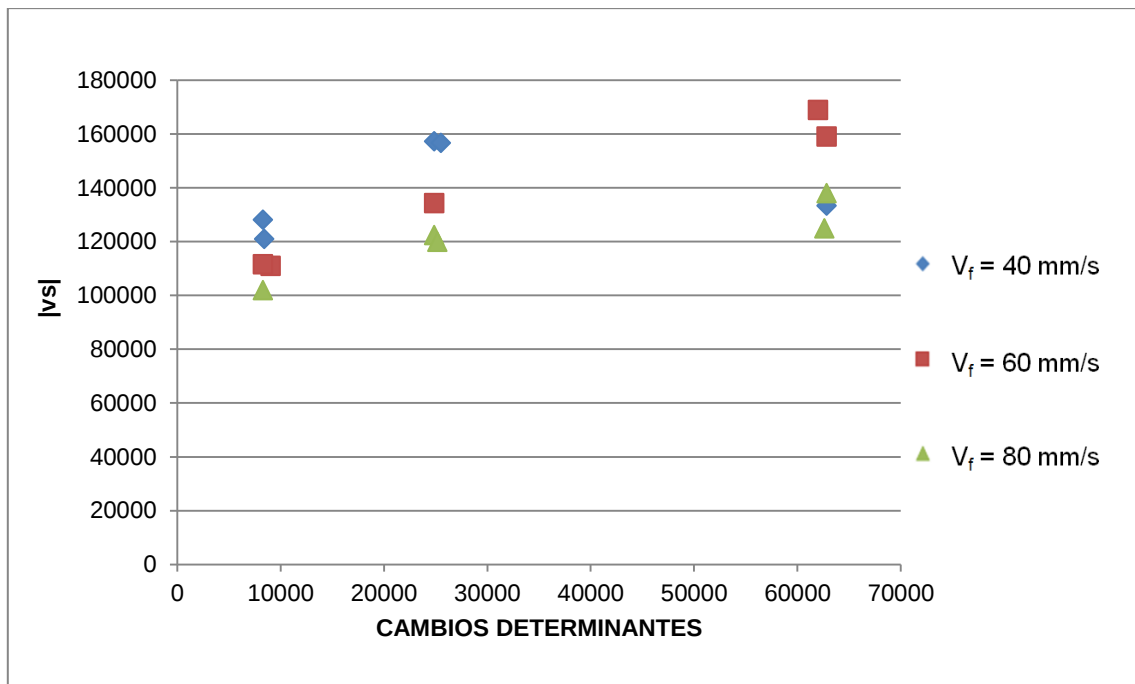
Se representan a continuación éstas longitudes frente a los cambios determinantes explicados en el apartado 6.1 y el número de líneas (los resultados serán muy parecidos a los que saldrían descomponiendo los ejes en los ejes Y y Z) y según la geometría interna de cada probeta:



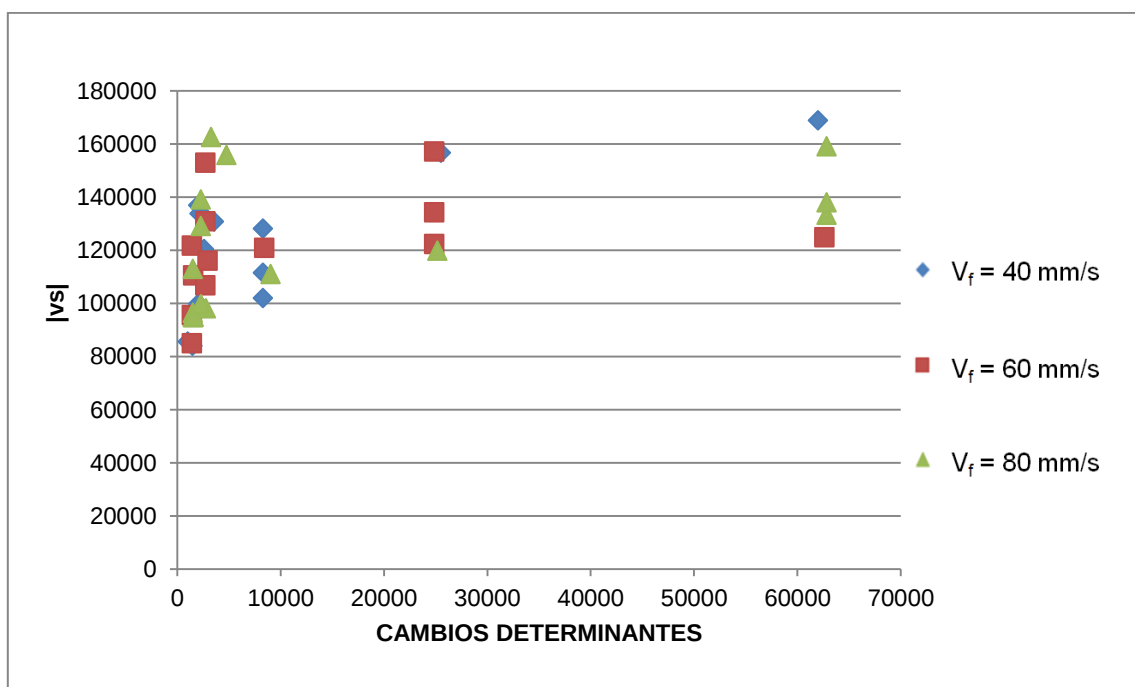
**GRÁFICA 6.84.-** Representación del módulo de la Transformada de Fourier frente al número de cambios de sentido determinantes para la geometría interna ARCHIMEDEAN CHORDS.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.85.-** Representación del módulo de la Transformada de Fourier frente al número de cambios de sentido determinantes para la geometría interna RECTILINEAR.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.86.-** Representación del módulo de la Transformada de Fourier frente al número de cambios de sentido determinantes para la geometría interna HONEYCOMB.- Realizada con EXCEL.

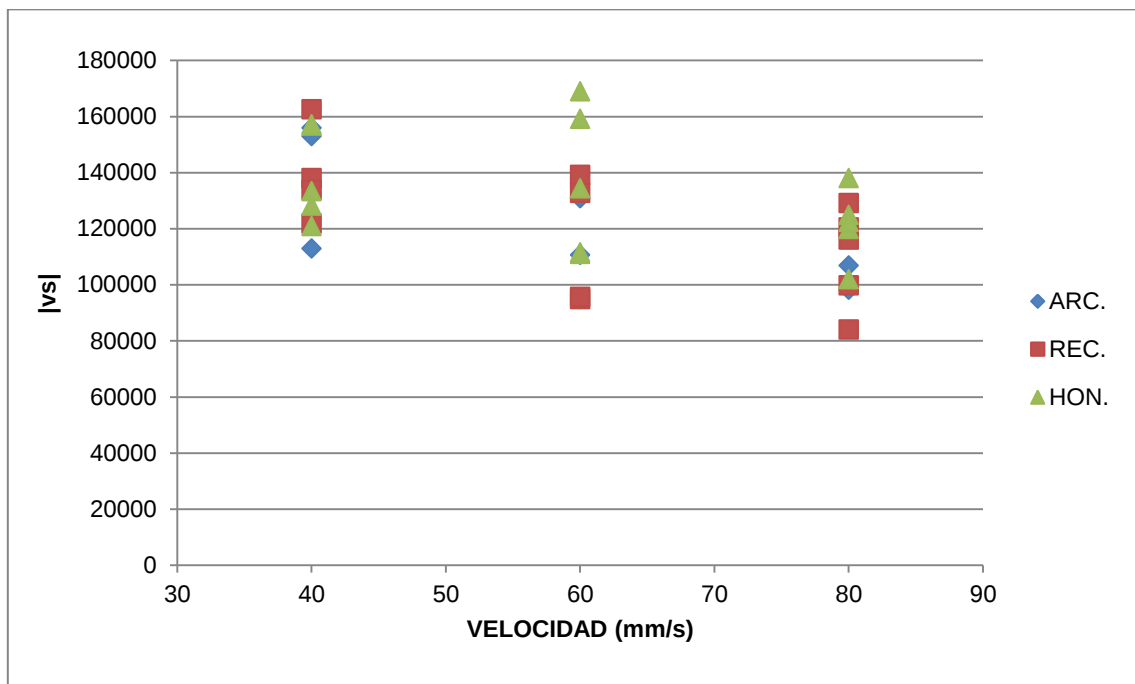


**GRÁFICA 6.87.-** Representación del módulo de la Transformada de Fourier frente al número de cambios de sentido determinantes para todas las geometrías internas.- Realizada con EXCEL.

Al aumentar el número de cambios de sentido aumenta la vibración de la máquina. Sin embargo, resulta muy interesante que conforme aumenta la velocidad

de avance a la vez que la cantidad de cambios se obtendrá una longitud menor. Independientemente del patrón el módulo parece tender a los 170000, siendo función de la geometría interna y su densidad el mínimo. Sin embargo, para una velocidad de avance de 40 mm/s, el módulo parece disminuir repentinamente con el número de cambios.

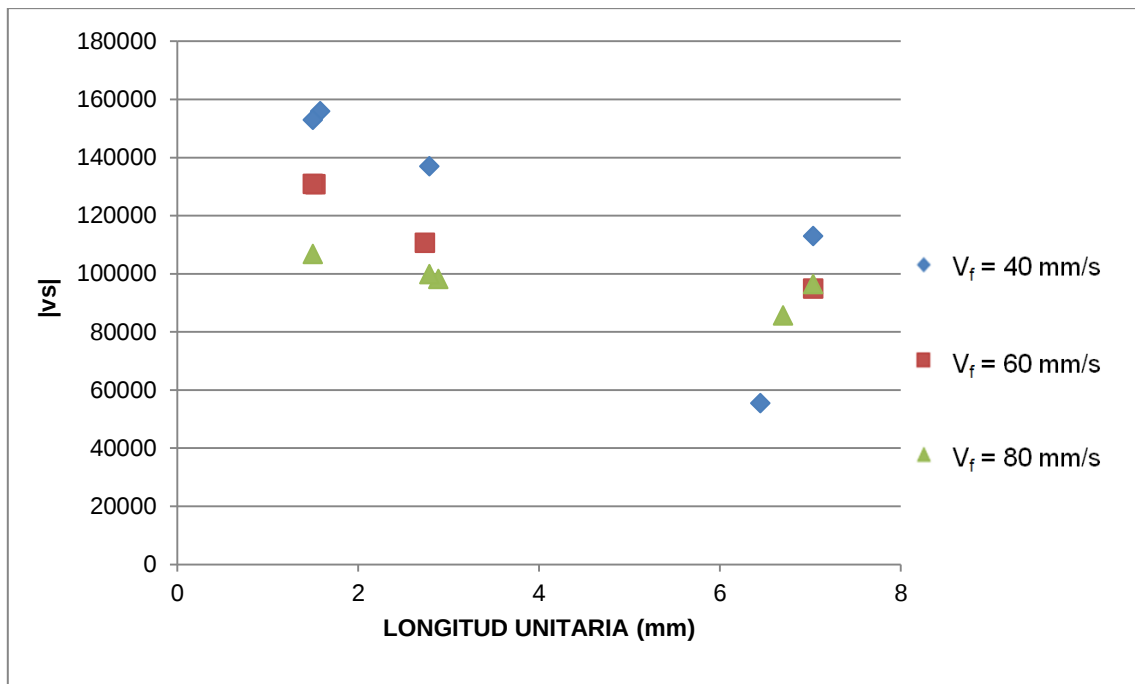
A continuación se representa el módulo frente a la velocidad de avance según la geometría de relleno:



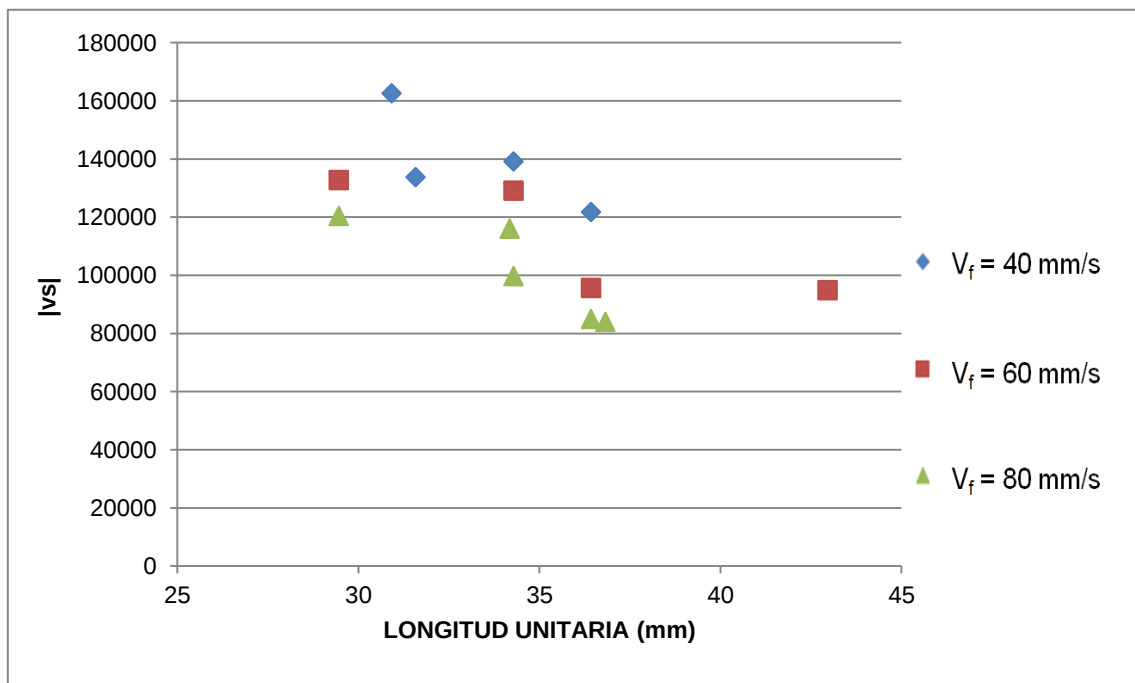
**GRÁFICA 6.88.- Representación del módulo de la Transformada de Fourier frente al número de cambios de sentido determinantes para todas las geometrías internas.- Realizada con EXCEL.**

Al aumentar la velocidad el módulo disminuye en todos los patrones, aunque para Honeycomb la pendiente es menor.

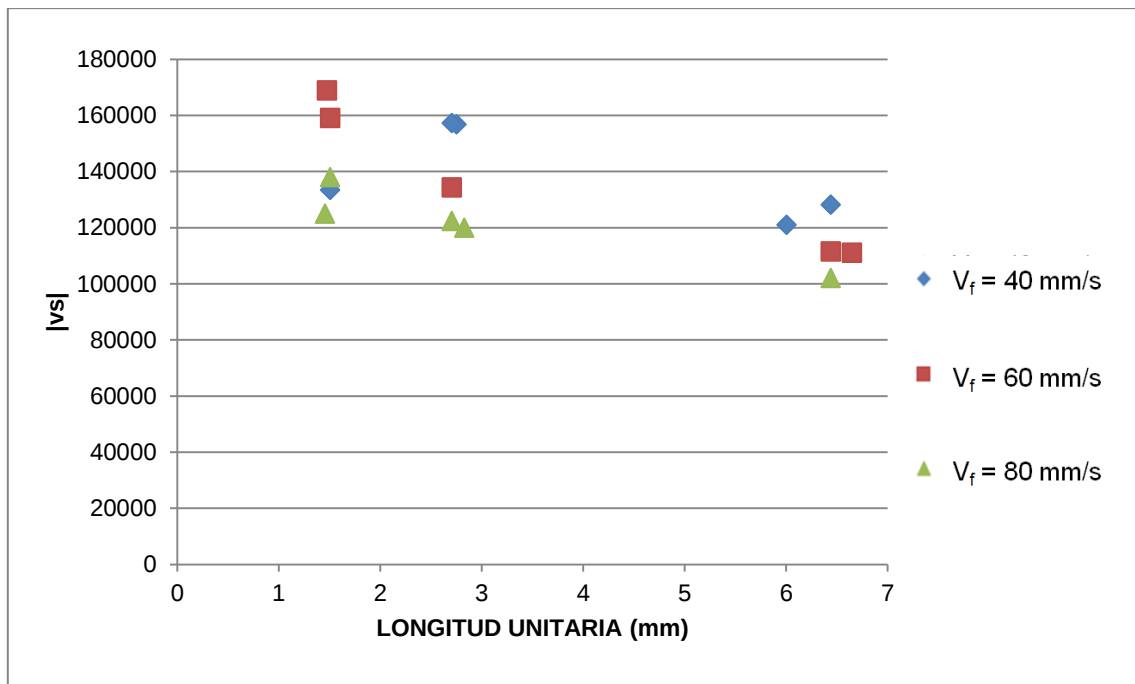
En el apartado 6.1. se veía que la longitud de cada línea influía en la diferencia temporal real-teórica que la máquina consumía. Se explicaba que al disminuir la longitud de las líneas llegaba un momento en el que la máquina mientras aceleraba y desaceleraba no llegaba a la velocidad de avance configurada. Es el momento de observar la influencia que esta longitud tiene en la vibración de la impresora:



**GRÁFICA 6.89.-** Representación del módulo de la Transformada de Fourier frente a la longitud unitaria para la geometría de relleno ARCHIMEDEAN CHORDS.- Realizada con EXCEL.

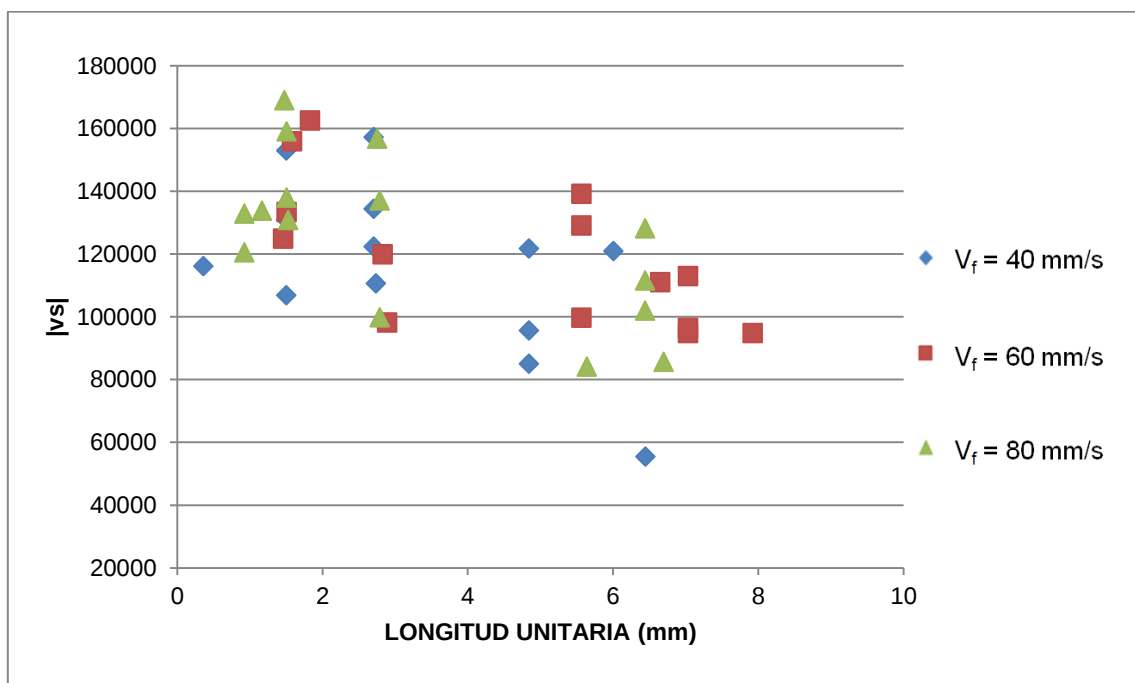


**GRÁFICA 6.90.-** Representación del módulo de la Transformada de Fourier frente a la longitud unitaria para la geometría de relleno RECTILINEAR.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.91.-** Representación del módulo de la Transformada de Fourier frente a la longitud unitaria para la geometría de relleno HONEYCOMB.- Realizada con EXCEL.

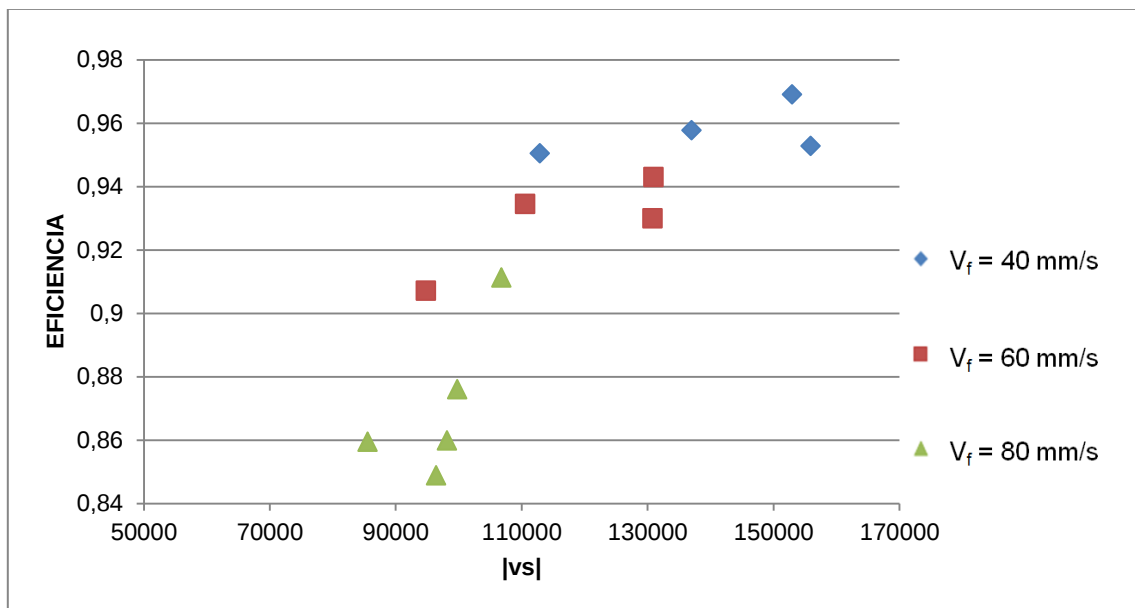
Si se considera que la longitud unitaria en este caso es la longitud de la línea más pequeña, se tiene que el patrón Rectilinear cambia completamente desplazándose a valores inferiores y obteniéndose lo siguiente:



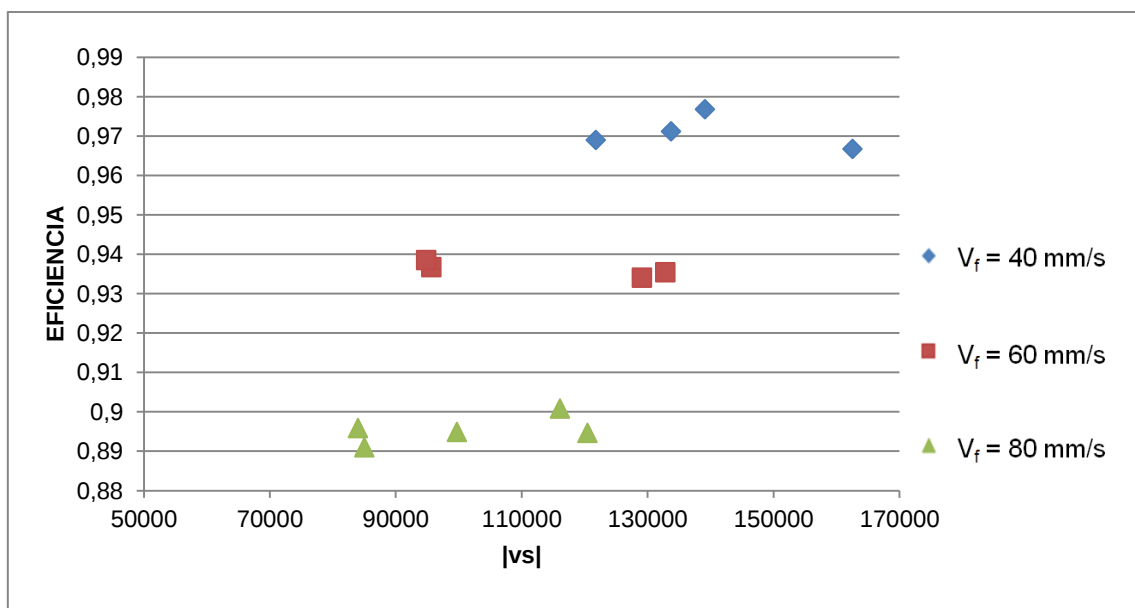
**GRÁFICA 6.92.-** Representación del módulo de la Transformada de Fourier frente a la longitud unitaria (editada para Rectilinear) para todas las geometrías de relleno.- Realizada con EXCEL.

Puesto que todos los puntos a pesar de estar dispersos están concentrados en un intervalo concreto se podría decir que el módulo de la tensión del acelerómetro será función de la longitud de la línea más pequeña de cada patrón.

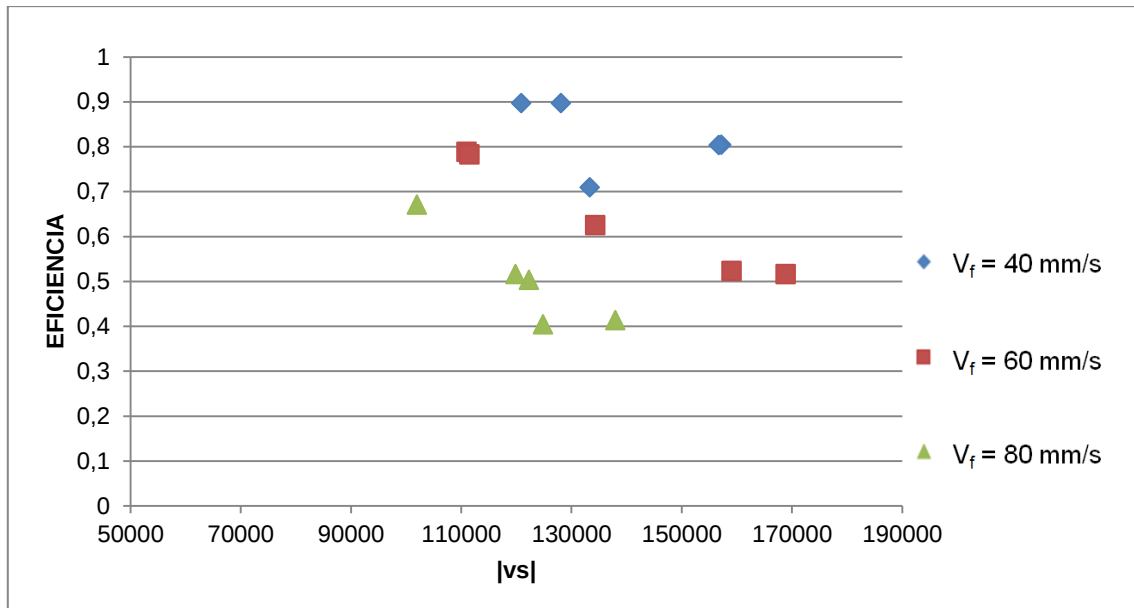
Si se examina la eficiencia en función de la velocidad media diferenciando las geometrías de relleno se obtienen las Gráficas 6.93 a 6.95.



**GRÁFICA 6.93.-** Representación de la eficiencia temporal frente al módulo de la transformada de Fourier para la geometría ARCHIMEDENA CHORDS.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.94.-** Representación de la eficiencia temporal frente al módulo de la transformada de Fourier para la geometría RECTILINEAR.- Realizada con EXCEL.

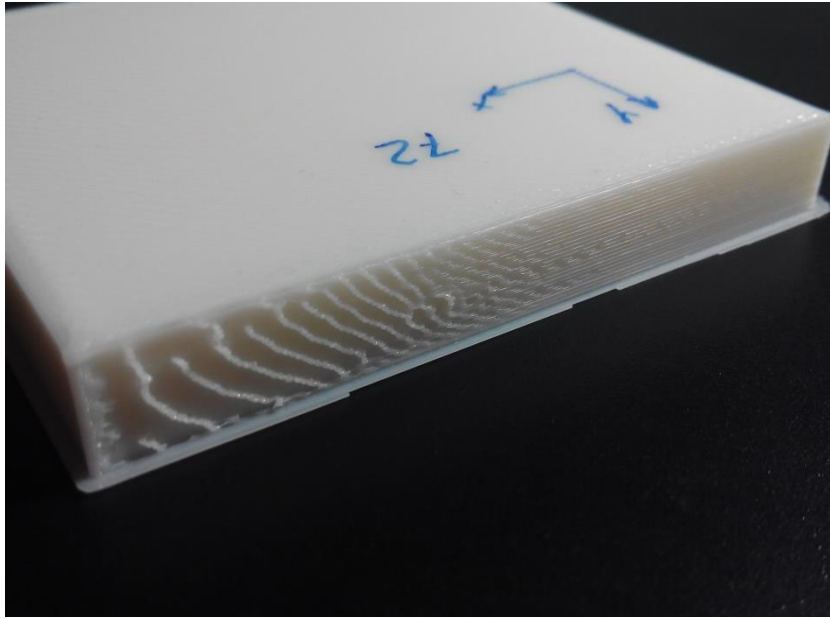


**GRÁFICA 6.95.- Representación de la eficiencia temporal frente al módulo de la transformada de Fourier para la geometría HONEYCOMB.- Realizada con EXCEL.**

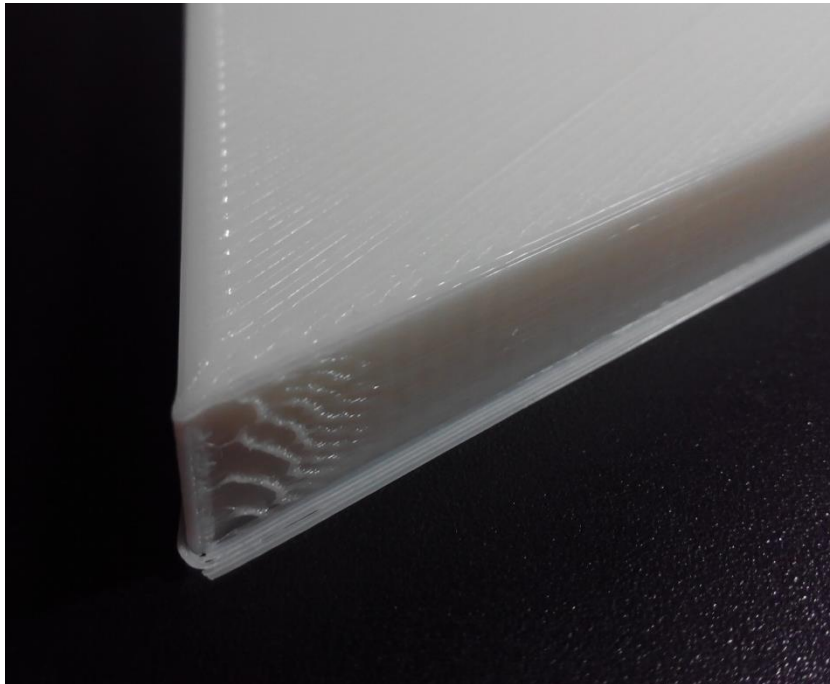
Al aumentar la velocidad la eficiencia temporal de la impresión disminuye, mientras que también lo hace el módulo de la transformada de Fourier. Así pues, se puede llegar a la conclusión de que en este caso la vibración de la máquina es útil para detectar fallos superficiales en las probetas.

La influencia de la geometría en la vibración de la máquina es función de la densidad que ésta tenga y de los cambios de sentido que realiza el extrusor. Así pues, si se evalúa en la otra dirección, la vibración de la máquina influye en la calidad superficial que tiene la probeta, provocando que durante la extrusión la boquilla se desvíe unas décimas de milímetros del punto exacto.

Estas desviaciones generan una rugosidad en una de las paredes laterales de las probetas, siendo similar para todas según su forma externa tal y como se muestran en las Figuras 6.10 a 6.12.



**FIGURA 6.8.-** Vista del lateral horizontal superior de una probeta cuadrada.- Fotografía propia.



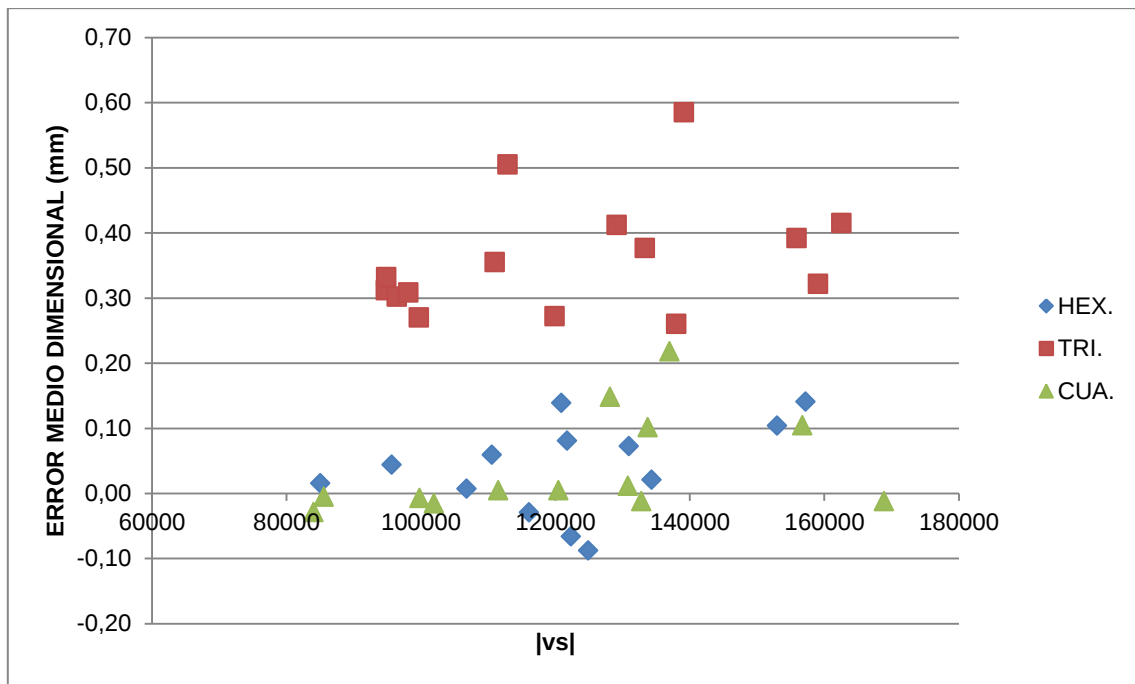
**FIGURA 6.9.-** Vista de la esquina inferior derecha de una probeta triangular.- Fotografía propia.



**FIGURA 6.10.- Vista del lateral derecho superior de una probeta hexagonal.- Fotografía propia.**

La que tiene el lateral más deformado es el cuadrado seguido por el hexágono. El triángulo apenas presenta esta rugosidad. Lo que tienen en común estos laterales es que se pone en marcha el motor horizontal en el sentido contrario a las agujas del reloj, por lo que cuanto más horizontal está esta trayectoria (siendo menor la influencia del eje Y) mayor es la dispersión del filamento por la vibración al ponerse en marcha el motor.

El que exista esta rugosidad genera que las tolerancias dimensionales aumenten, de forma que al medir la longitud final de la probeta darán un error más alto. Por ello, se representa el error dimensional frente al módulo de la transformada de Fourier según su geometría exterior.



**GRÁFICA 6.96.- Representación del error medio dimensional frente al módulo de la transformada de Fourier diferenciado por geometría externa.- Realizada con EXCEL.**

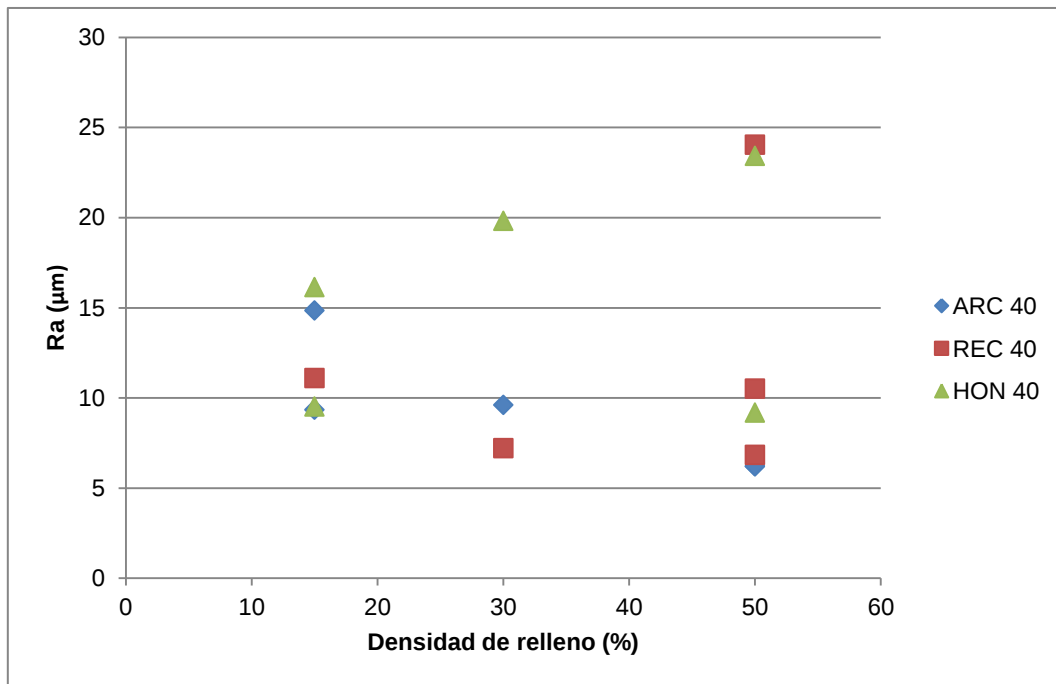
Se observa cómo la forma de triángulo tiene un error mayor que los otros dos, para un módulo similar. También se comprueba que al aumentar el módulo la dispersión aumenta para las tres geometrías junto con el error en los tres casos (se observa más limpiamente en la geometría cuadrada).

Así pues se puede concluir que mientras que la densidad y la geometría interna determinan la vibración de la máquina, mientras que ésta, a su vez, afecta a las dimensiones finales de la geometría exterior.

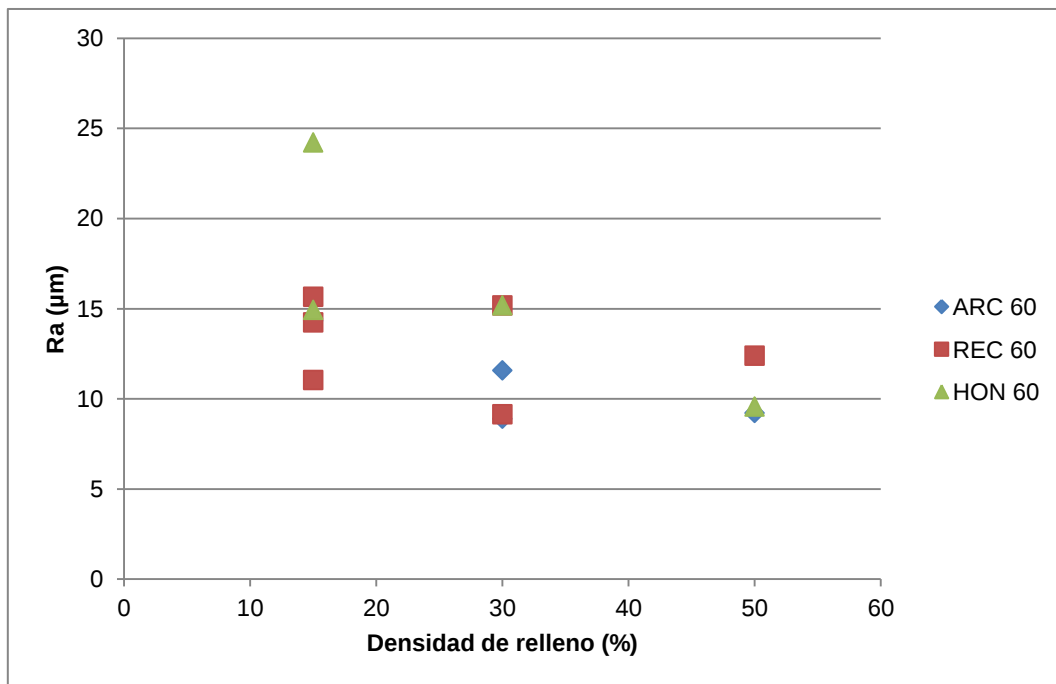
#### **6.4. Estudio de la rugosidad superficial.**

La rugosidad superficial es, junto con la medida de las dimensiones finales, la que se valora a la hora de decidir si una pieza tiene la calidad superficial adecuada. En producciones en masas, la rugosidad que tiene una pieza determina si esta se puede vender o si es descartada.

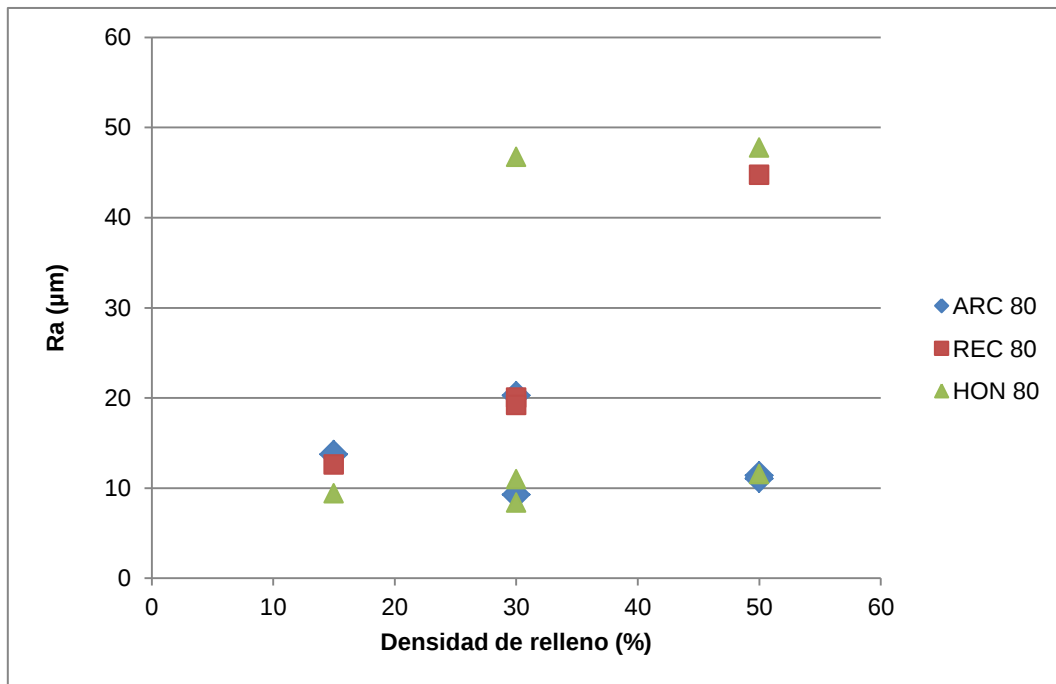
Así pues, tras la medición de ésta en la superficie superior de cada probeta se representan a continuación los resultados frente a la densidad y velocidad de avance:



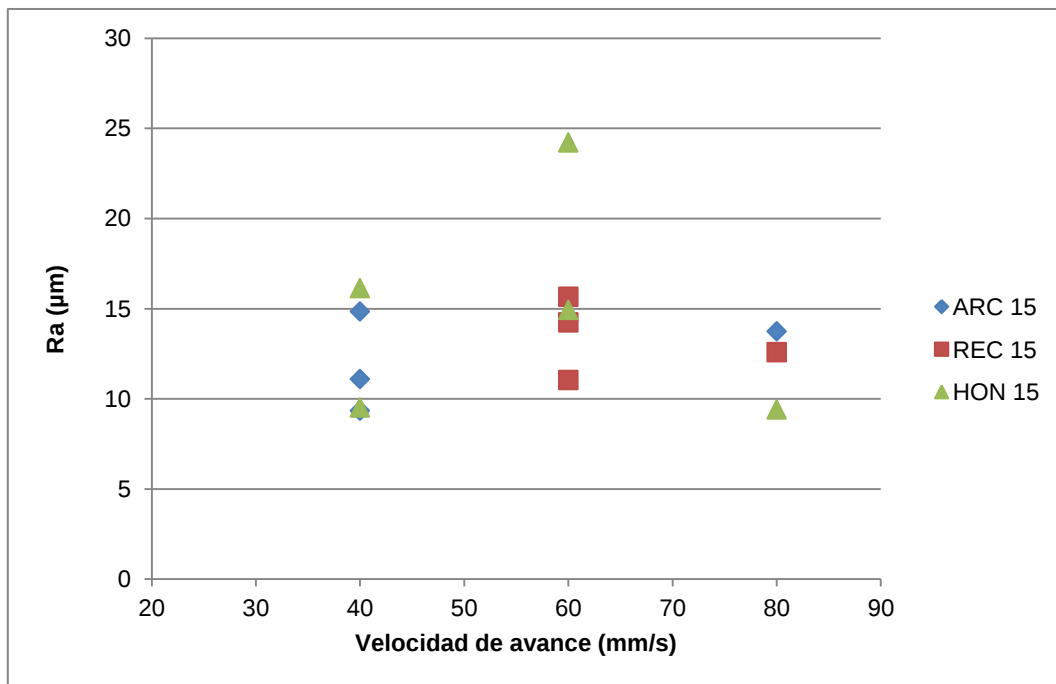
**GRÁFICA 6.97.-** Representación de la rugosidad ( $\mu\text{m}$ ) frente a la densidad de relleno (%) para una velocidad de avance de 40 mm/s.- Realizada con EXCEL.



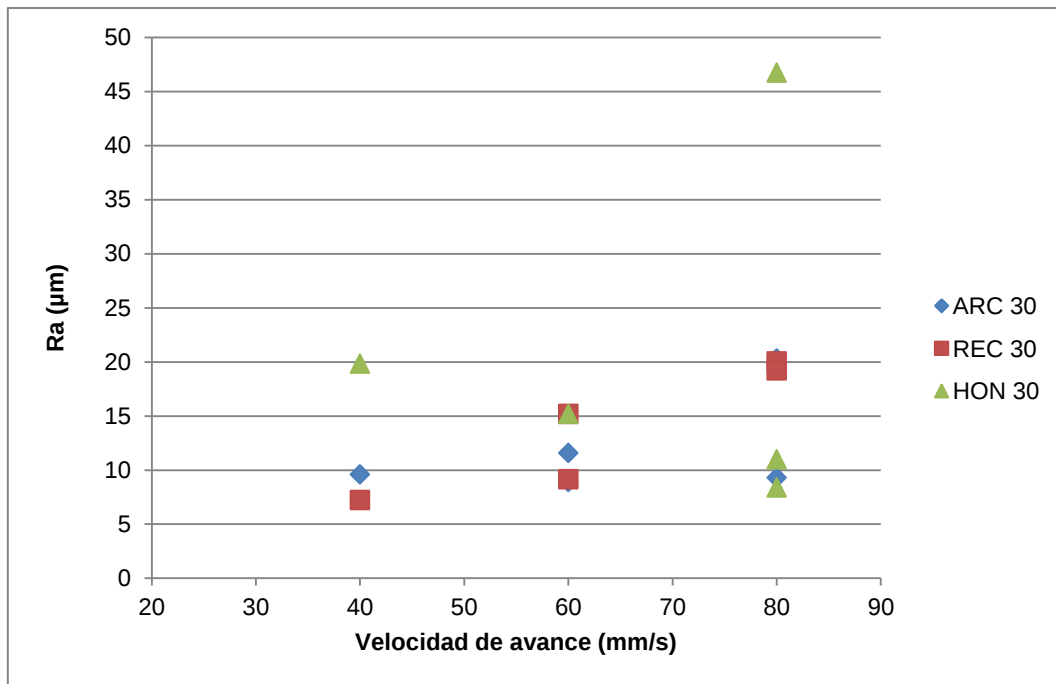
**GRÁFICA 6.98.-** Representación de la rugosidad ( $\mu\text{m}$ ) frente a la densidad de relleno (%) para una velocidad de avance de 60 mm/s.- Realizada con EXCEL.



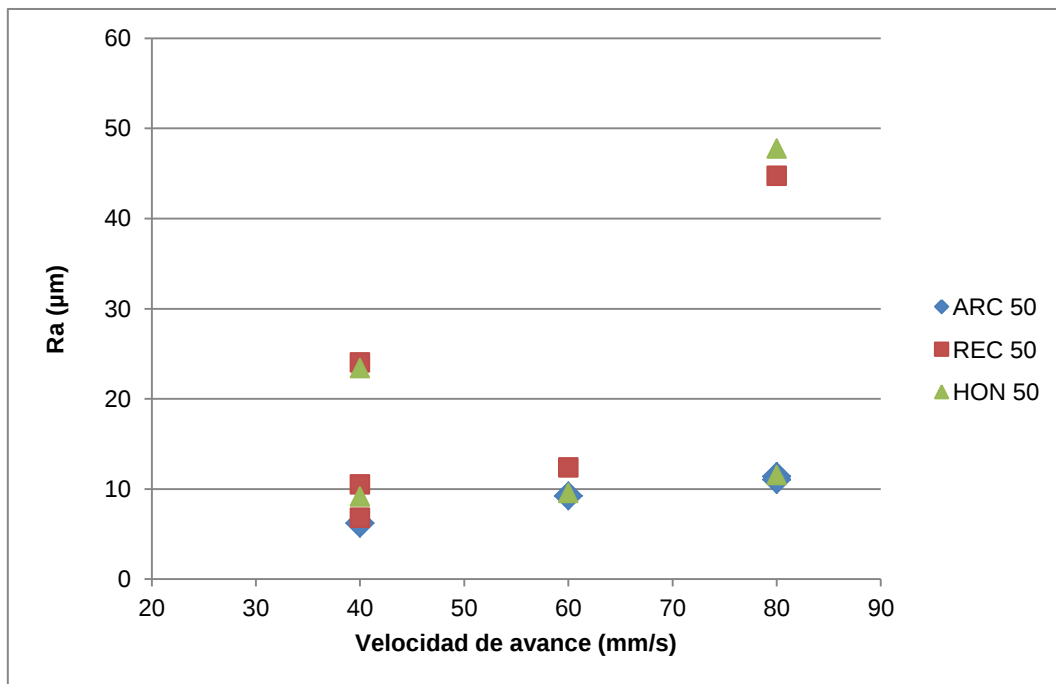
**GRÁFICA 6.99.-** Representación de la rugosidad ( $\mu\text{m}$ ) frente a la densidad de relleno (%) para una velocidad de avance de 80 mm/s.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.100.-** Representación de la rugosidad ( $\mu\text{m}$ ) frente a la velocidad de avance (mm/s) para una densidad de relleno del 15%.- Realizada con EXCEL.

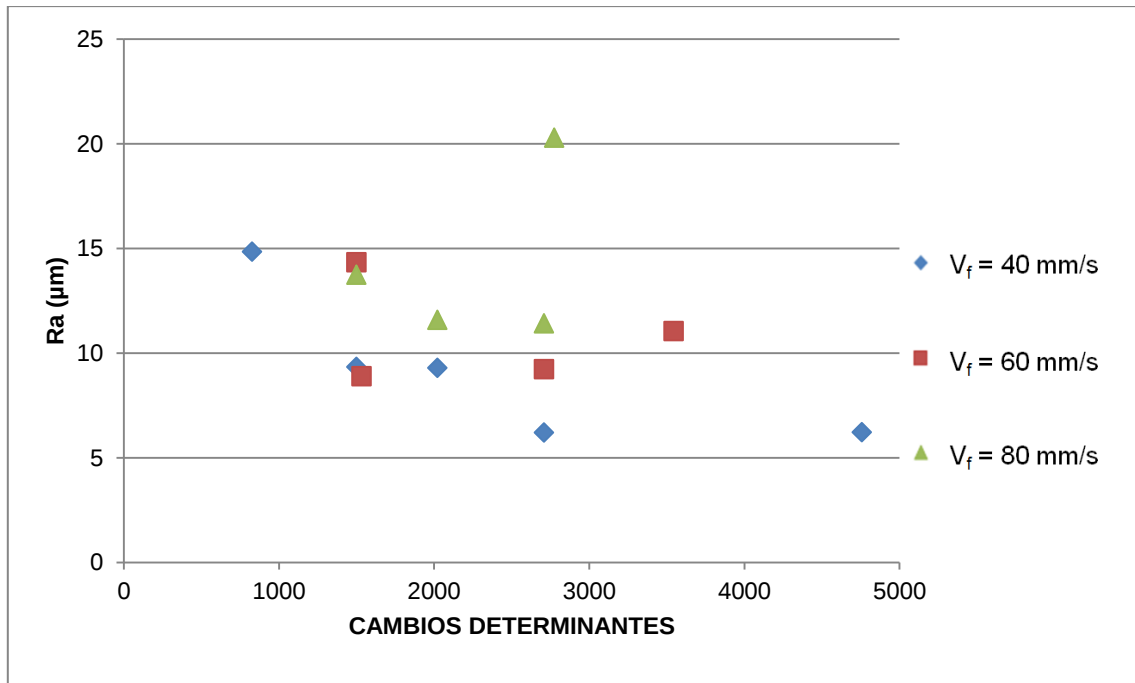


**GRÁFICA 6.101.-** Representación de la rugosidad ( $\mu\text{m}$ ) frente a la velocidad de avance (mm/s) para una densidad de relleno del 30%.- Realizada con EXCEL.

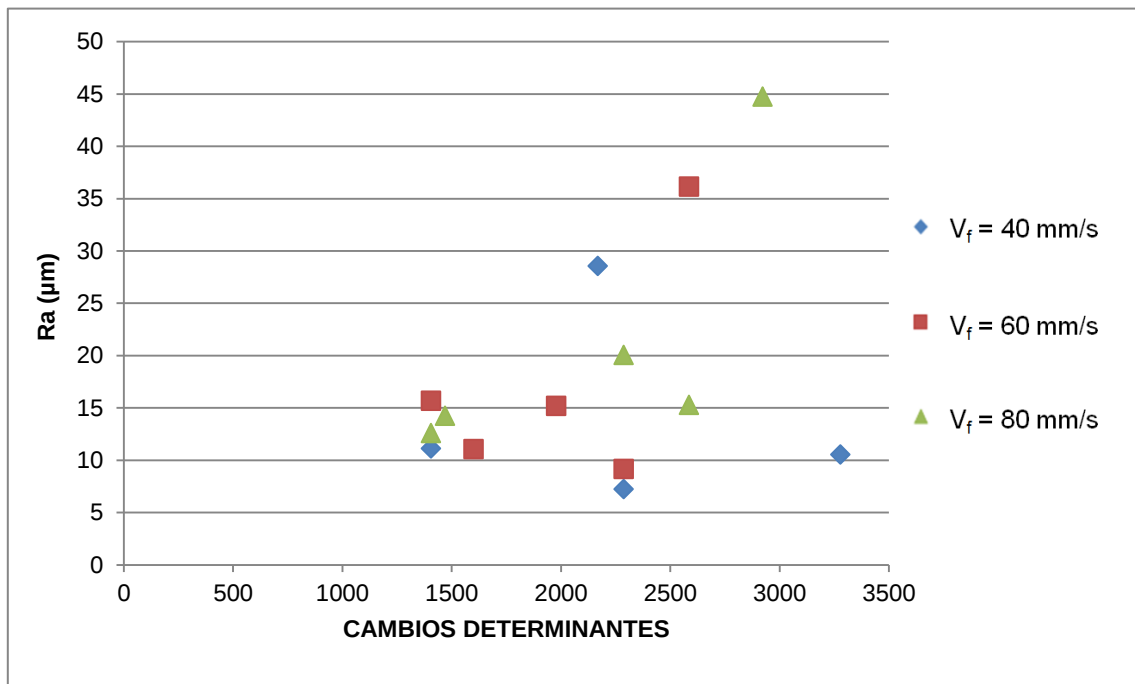


**GRÁFICA 6.102.-** Representación de la rugosidad ( $\mu\text{m}$ ) frente a la velocidad de avance (mm/s) para una densidad de relleno del 50%.- Realizada con EXCEL.

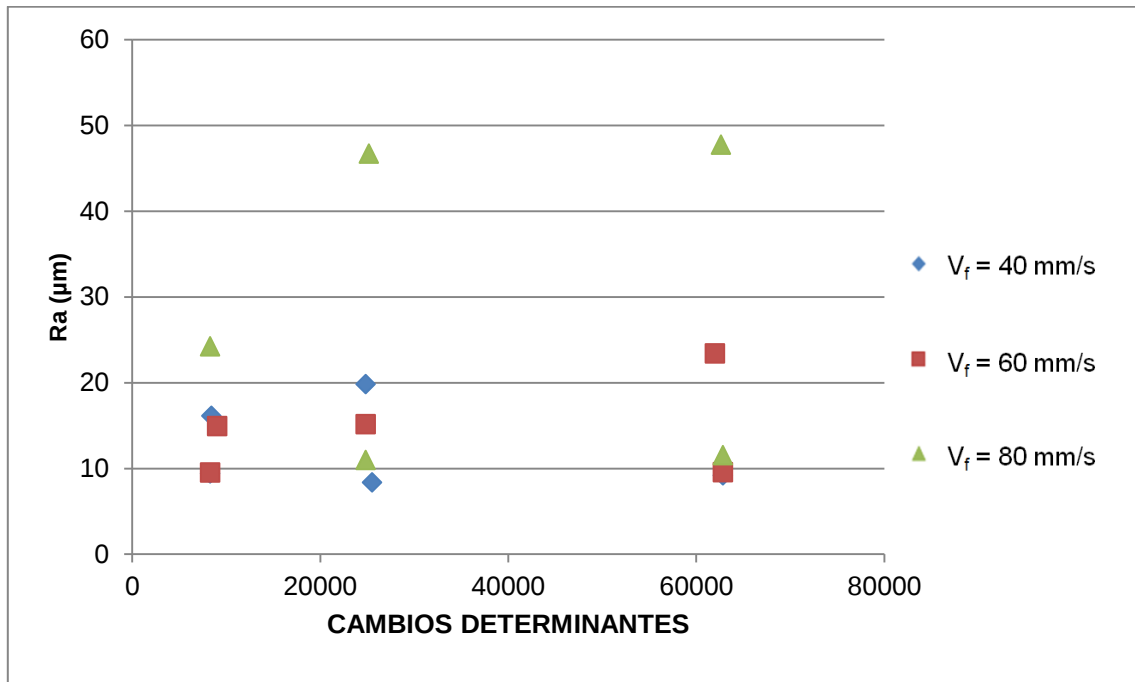
En primer lugar, se estudia la influencia que tiene la velocidad de avance en las últimas capas. Por ello se ha graficado el valor  $R_a$  frente a los cambios determinantes que se definían a final del apartado 6.1.4.



**GRÁFICA 6.103.-** Representación de la rugosidad frente a los cambios de sentido determinantes para el patrón ARCHIMEDEAN CHORDS.- Realizada con EXCEL.



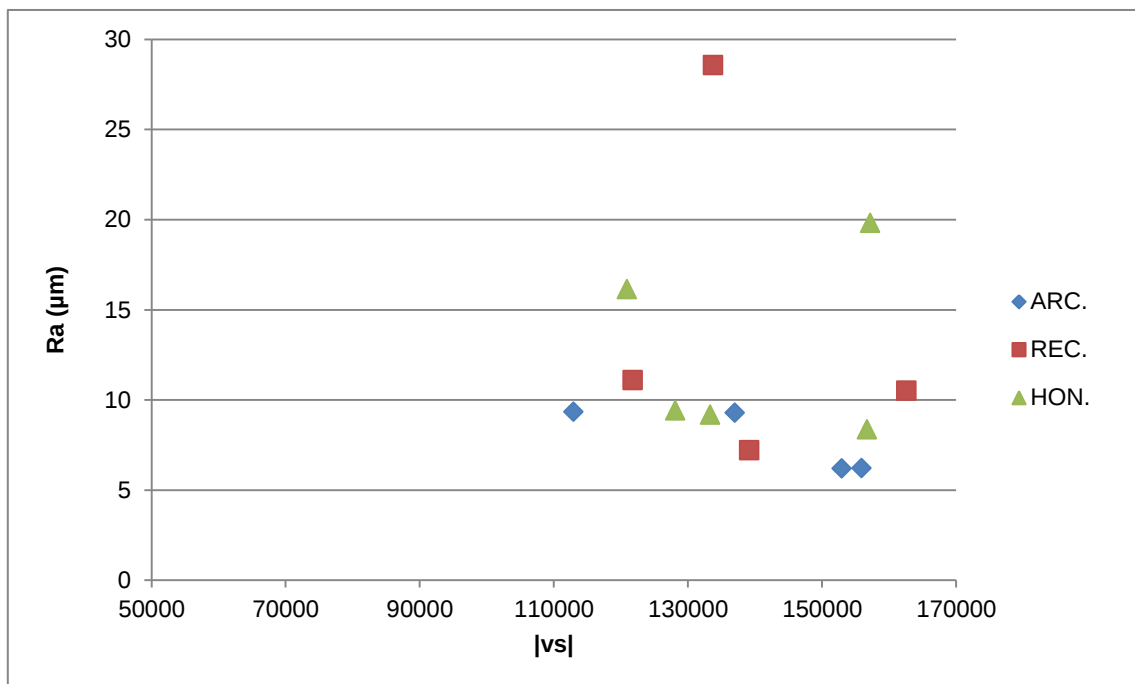
**GRÁFICA 6.104.-** Representación de la rugosidad frente a los cambios de sentido determinantes para el patrón RECTILINEAR.- Realizada con EXCEL.



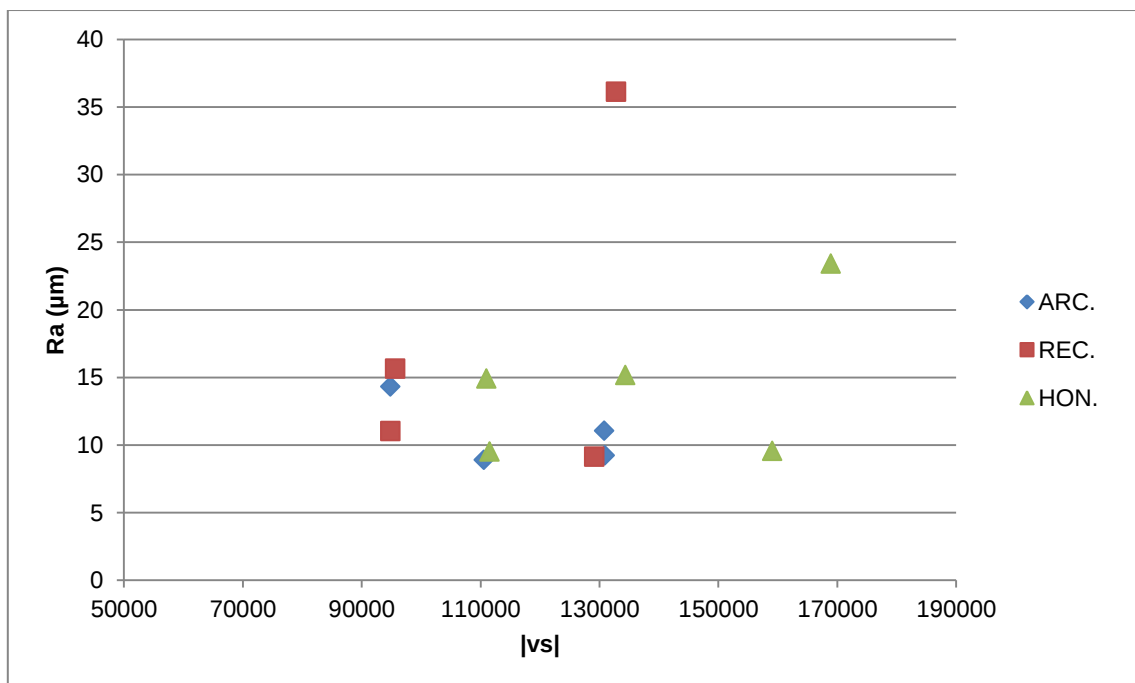
**GRÁFICA 6.105.-** Representación de la rugosidad frente a los cambios de sentido determinantes para el patrón HONEYCOMB.- Realizada con EXCEL.

Se observa que el patrón que mejores resultados tiene es el Archimedean Chords. También se puede comprobar cómo los puntos son más dispersos conforme más aumenta la velocidad de avance en los tres casos, consiguiéndose rugosidades menores a velocidades de 40 y 60 mm/s y, dependiendo del patrón, conforme aumenta el número de líneas o densidad, ya que tiene más soporte a la hora de inyectar material en las últimas capas.

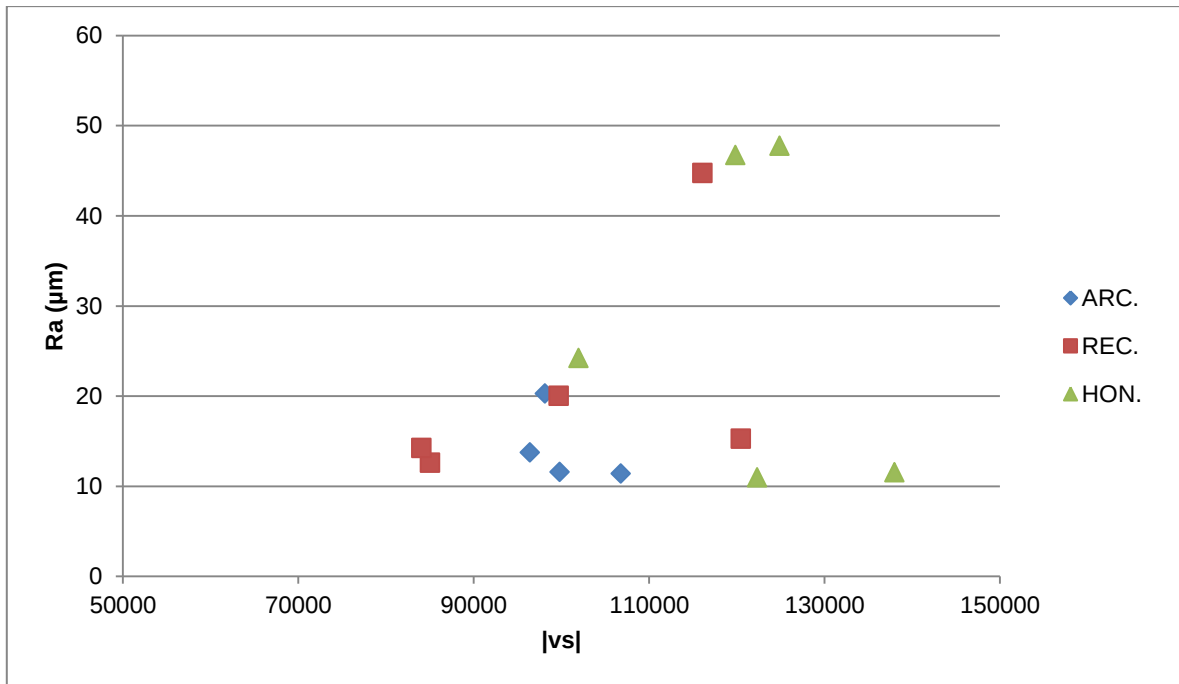
Si se representan ahora los resultados anteriores frente al módulo de la Transformada de Fourier calculado tras la medición con el acelerómetro y separados según patrón interno y velocidad se obtienen las siguientes curvas:



**GRÁFICA 6.106.-** Representación de la rugosidad frente al módulo de la Transformada de Fourier para una velocidad de avance de 40 mm/s.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.107.-** Representación de la rugosidad frente al módulo de la Transformada de Fourier para una velocidad de avance de 60 mm/s.- Realizada con EXCEL.



**GRÁFICA 6.108.- Representación de la rugosidad frente al módulo de la Transformada de Fourier para una velocidad de avance de 80 mm/s.- Realizada con EXCEL.**

Se puede ver difusamente cómo al aumentar la velocidad y, con ella la vibración de la máquina se obtienen resultados más altos de  $R_a$ , siendo peor la calidad superficial. También se observa que el patrón Archimedean Chords es el que menos rugosidad tiene siendo más predecible su comportamiento en todos los casos al estar los puntos experimentales menos dispersos.

Así pues se puede concluir este apartado señalando que la rugosidad depende tanto de la geometría de relleno como de la vibración que se producen en la máquina durante la impresión, consecuencia de la velocidad de avance y la longitud de las líneas junto con la severidad de los cambios de sentidos.

También es hay que tener en cuenta que la rugosidad superficial puede tener gran variación debido a la calidad de la impresión, queriendo decir con esto que depende del mantenimiento que se le haga a la boquilla y de que el extrusor deje fluir el filamento libremente.

## 6.5. Planteamiento de modelo y validación con ensayos.

Una vez realizados los estudios, hay que realizar una validación para comprobar que con los cálculos propuestos se puede llegar a una aproximación lo

suficientemente buena a las variables experimentales. Es por ello por lo que se ha decidido utilizar geometrías de relleno distintas a las anteriormente estudiadas.

### 6.5.1. Parámetros seleccionados.

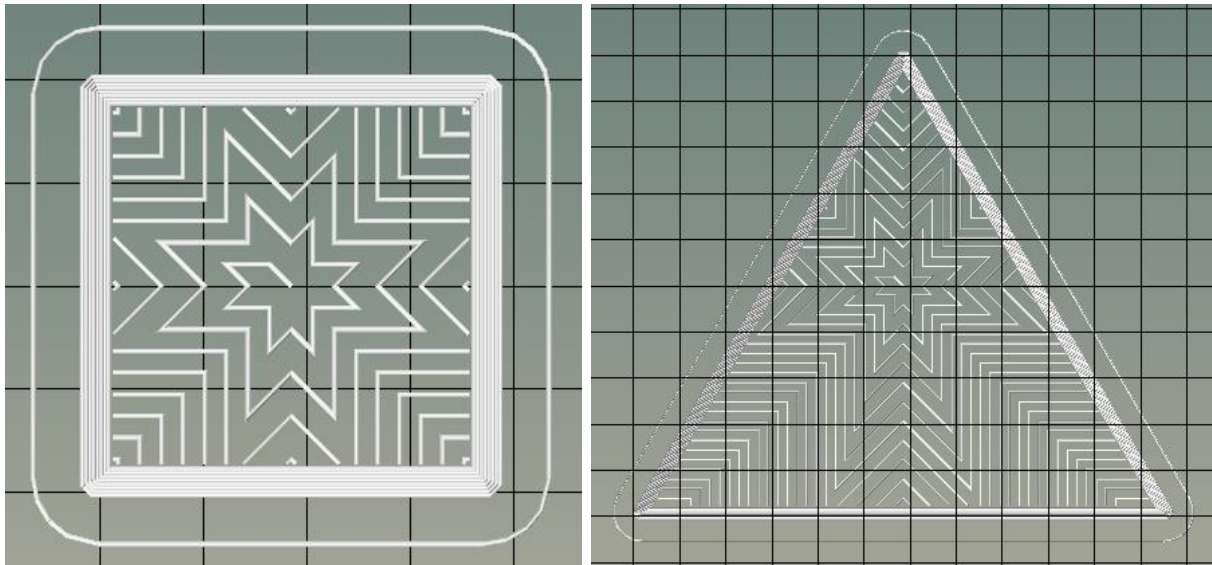
En la Tabla 6.2 se recogen resumidamente los parámetros elegidos en este caso al azar para realizar la validación posterior.

| COMBINACIÓN | GEOMETRÍA EXTERNA. | ESCALA | GEOMETRÍA INTERNA O DE RELLENO | AVANCE (mm/s) | DENSIDAD DE RELLENO (%) |
|-------------|--------------------|--------|--------------------------------|---------------|-------------------------|
| 1           | CUADRADO           | 1:2    | OCTAGRAM SPIRAL                | 60            | 30                      |
| 2           | TRIÁNGULO          | 1:1    | OCTAGRAM SPIRAL                | 60            | 30                      |
| 3           | TRIÁNGULO          | 1:1    | HILBERT CURVE                  | 80            | 30                      |
| 4           | HEXÁGONO           | 1:1    | 3D HONEYCOMB                   | 60            | 15                      |

TABLA 6.2.- Parámetros escogidos al azar para validación.- Elaboración propia.

#### 6.5.1.1. Octagram Spiral

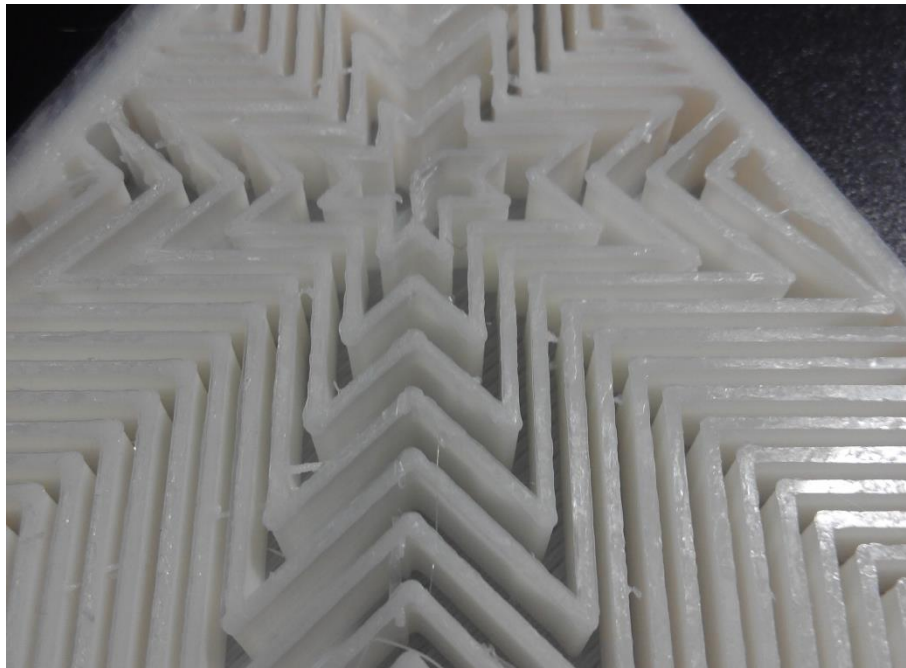
El patrón Octagram Spiral traza una espiral donde en vez de ser la trayectoria circular será un conjunto de rectas que combinan cambios de sentidos de 45° y 90°, formando una estrella. En la Figura 6.11 y 6.12 se pueden observar las geometrías elegidas para la validación.



(a)

(b)

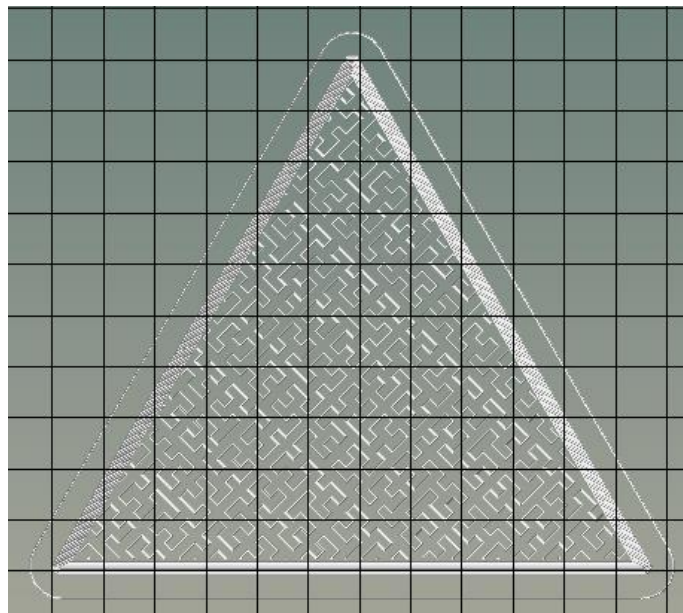
**FIGURA 6.11.- (a) CUADRADO con geometría interna OCTAGRAM SPIRAL. (b) TRIÁNGULO con geometría interna OCTAGRAM SPIRAL.- Elaborado en Repetier-Host.**



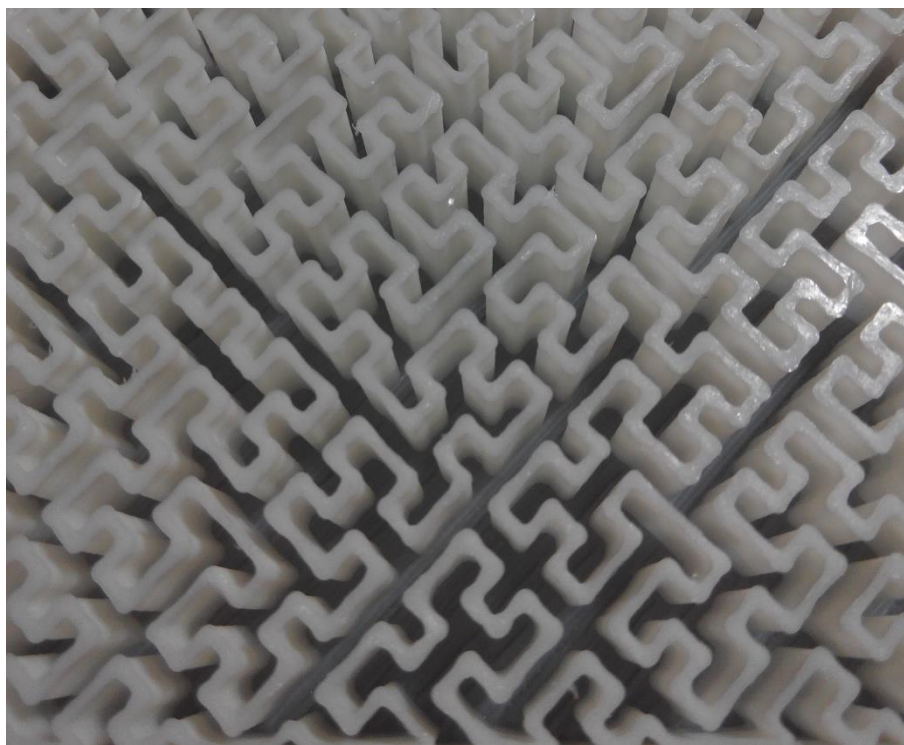
**FIGURA 6.12.- Probeta con la geometría TRIÁNGULO y OCTAGRAM SPIRAL.- Fotografía propia.**

#### 6.5.1.2. Hilbert Curve

El patrón Hilbert Curve traza un laberinto de rectas perpendiculares entre ellas. En la Figura 6.13 y 6.14 se pueden observar las geometrías elegidas para la validación.



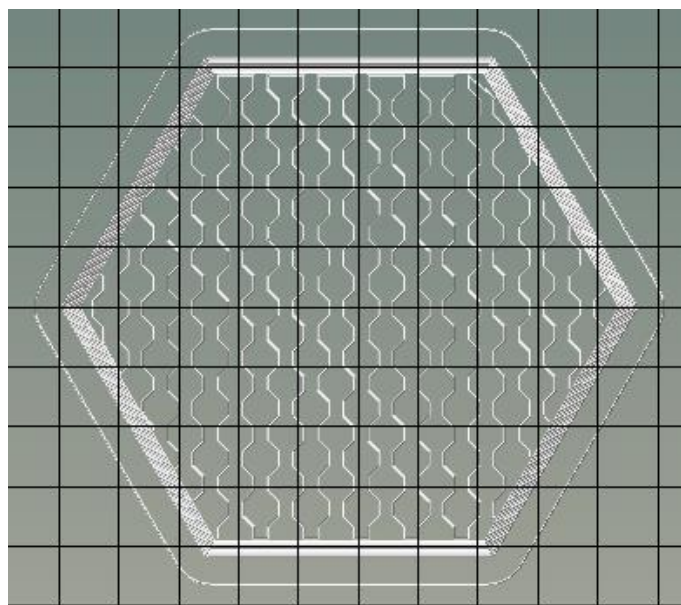
**FIGURA 6.13.- TRIÁNGULO con geometría interna HILBERT CURVE.- Elaborado en Repetier-Host.**



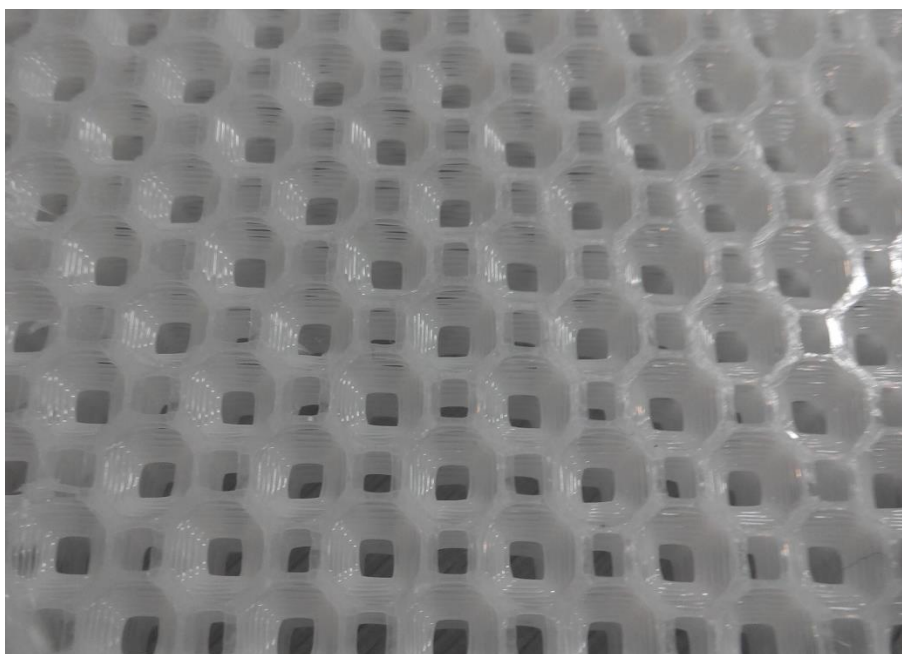
**FIGURA 6.14.- Probeta con la geometría TRIÁNGULO y HILBERT CURVE.- Fotografía propia.**

#### 6.5.1.3. 3D Honeycomb.

El patrón 3D Honeycomb es una variación del patrón ya estudiado Honeycomb que se diferencia en el original en que en cada capa la distancia entre cada línea de pasada se distancian equitativamente de forma que va creando una geometría hexagonal tridimensional. En la Figura 6.15 y 6.16 se pueden observar las geometrías elegidas para la validación.



**FIGURA 6.15.- HEXÁGONO con geometría interna 3D HONEYCOMB.- Elaborado en Repetier-Host.**

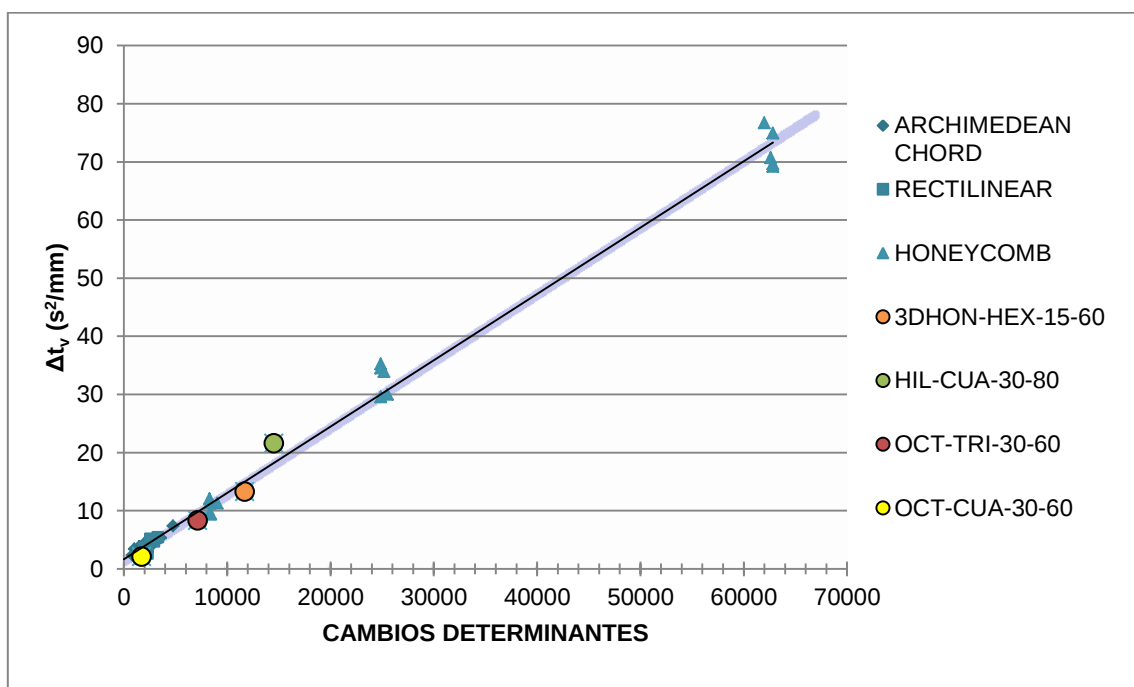


**FIGURA 6.16.- Probeta con la geometría HEXÁGONO y 3D HONEYCOMB.- Fotografía propia.**

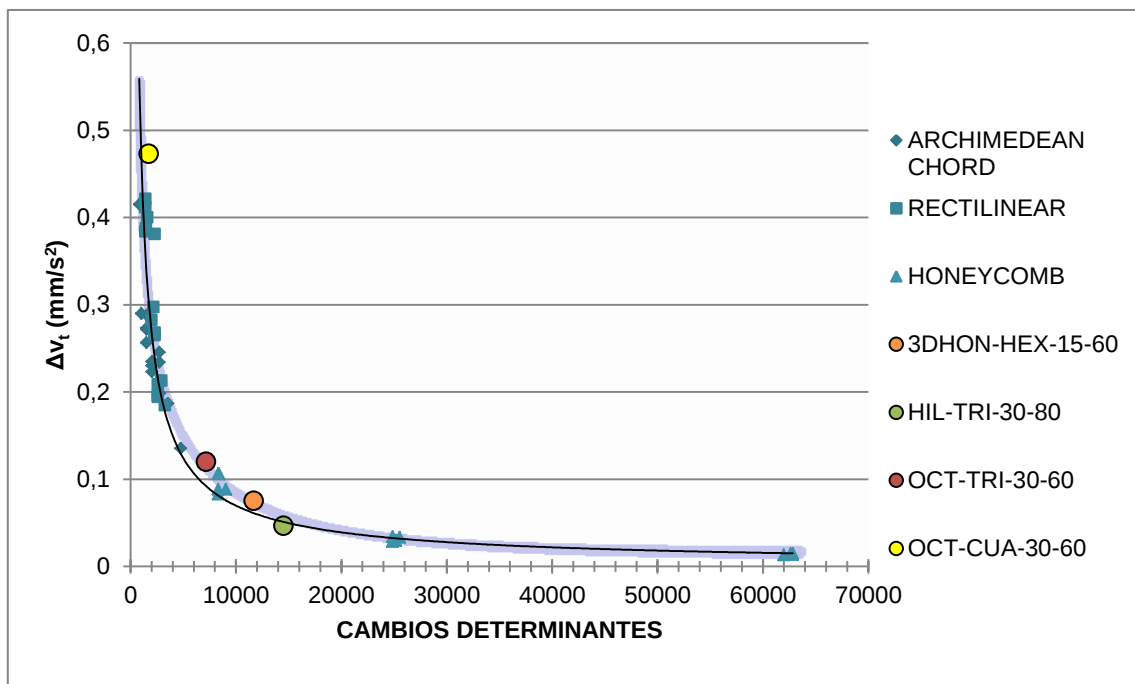
## 6.5.2. Representación de los resultados experimentales.

### 6.5.3.1. Tiempo.

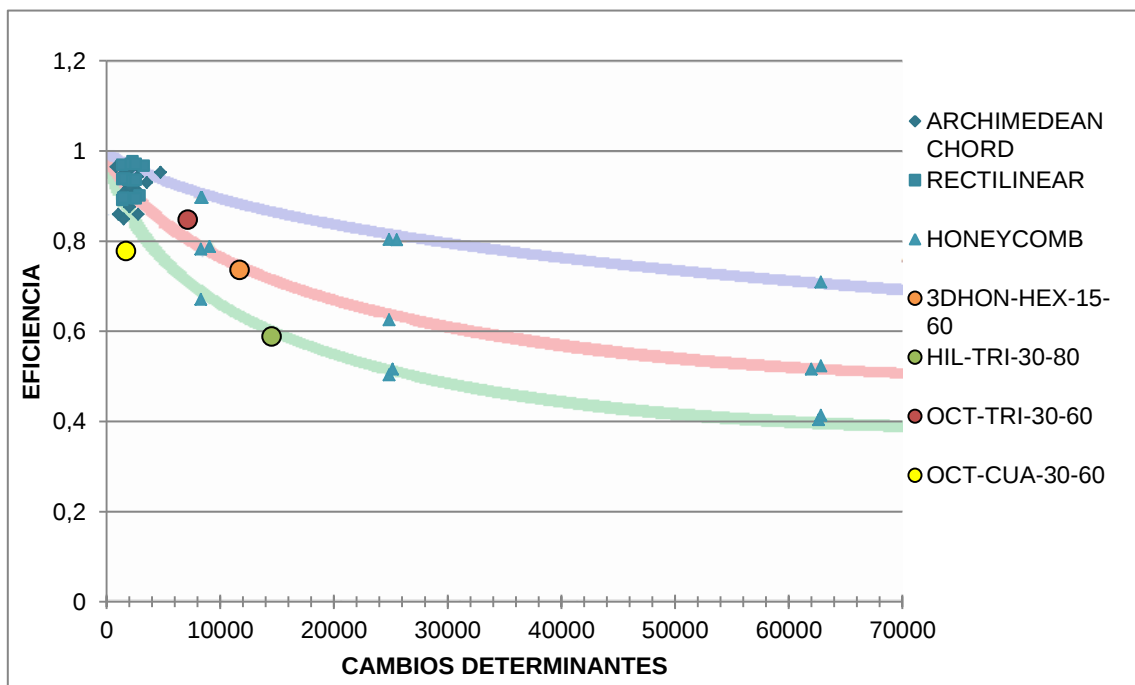
Para validar los modelos temporales planteados, se ha representado en las Gráficas 6.109 a 6.112 los resultados obtenidos experimentalmente, de forma que los resultados deben de coincidir con las líneas obtenidas en las Gráficas 6.70 a 6.75.



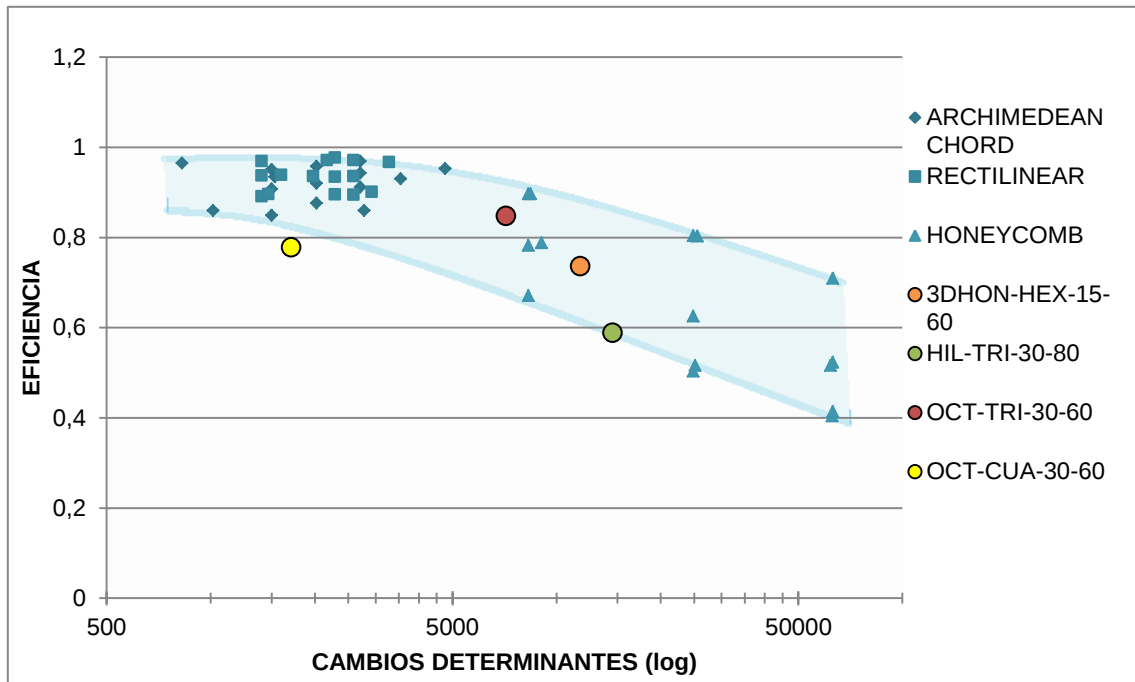
**GRÁFICA 6.109.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según su variación temporal y cambios determinantes. Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.



**GRÁFICA 6.110.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según la inversa de variación temporal y cambios determinantes. Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.



**GRÁFICA 6.111.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según su eficiencia y cambios determinantes. Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.

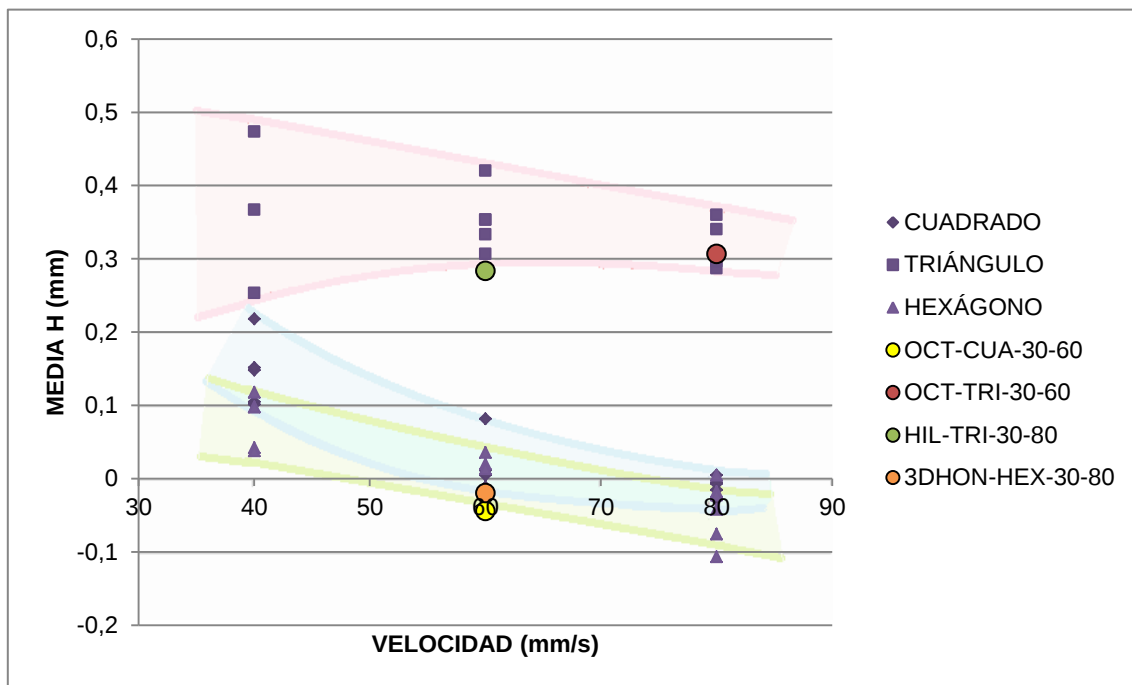


**GRÁFICA 6.112.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según su eficiencia y cambios determinantes (logaritmo en base 10). Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.

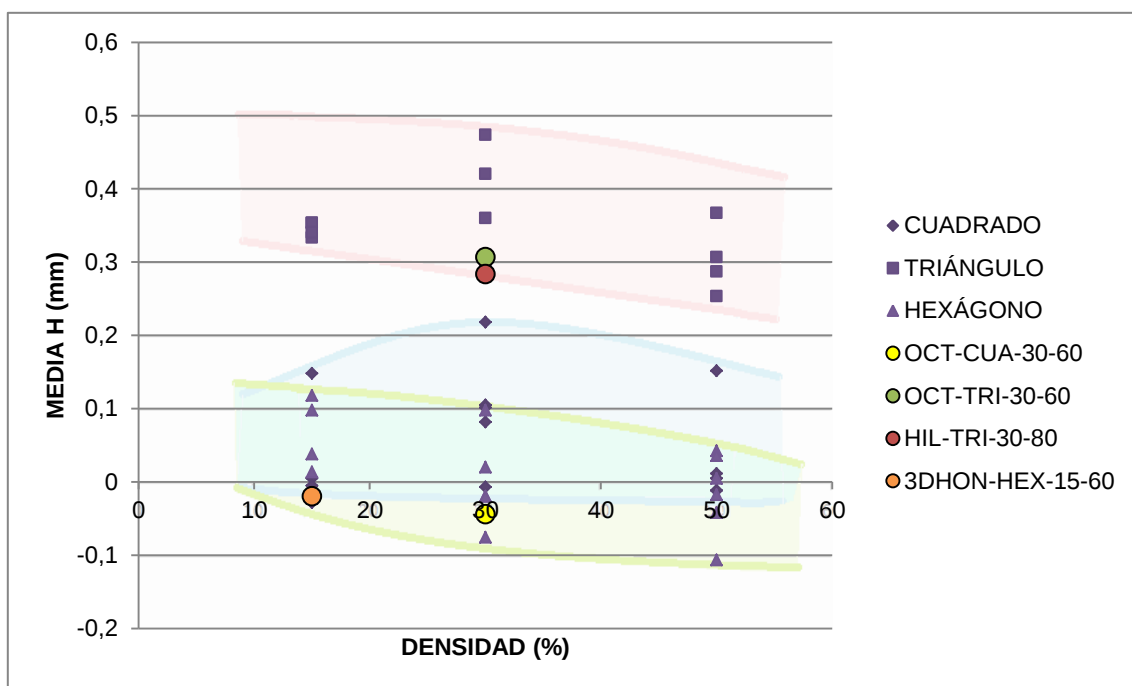
Efectivamente se comprueba que los puntos representados coinciden, de forma que se puede decir que las curvas de éstas gráficas son aplicables a todos los tipos de geometrías.

#### 6.5.3.2. Dimensiones.

Para validar los modelos dimensionales se ha representado en las Gráficas 6.113 y 6.114 los resultados obtenidos experimentalmente, de forma que los resultados deben entrar dentro del rango marcado en las Gráficas 6.76 y 6.77.



**GRÁFICA 6.113.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según su media del error dimensional (mm) y su velocidad de avance (mm/s). Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.

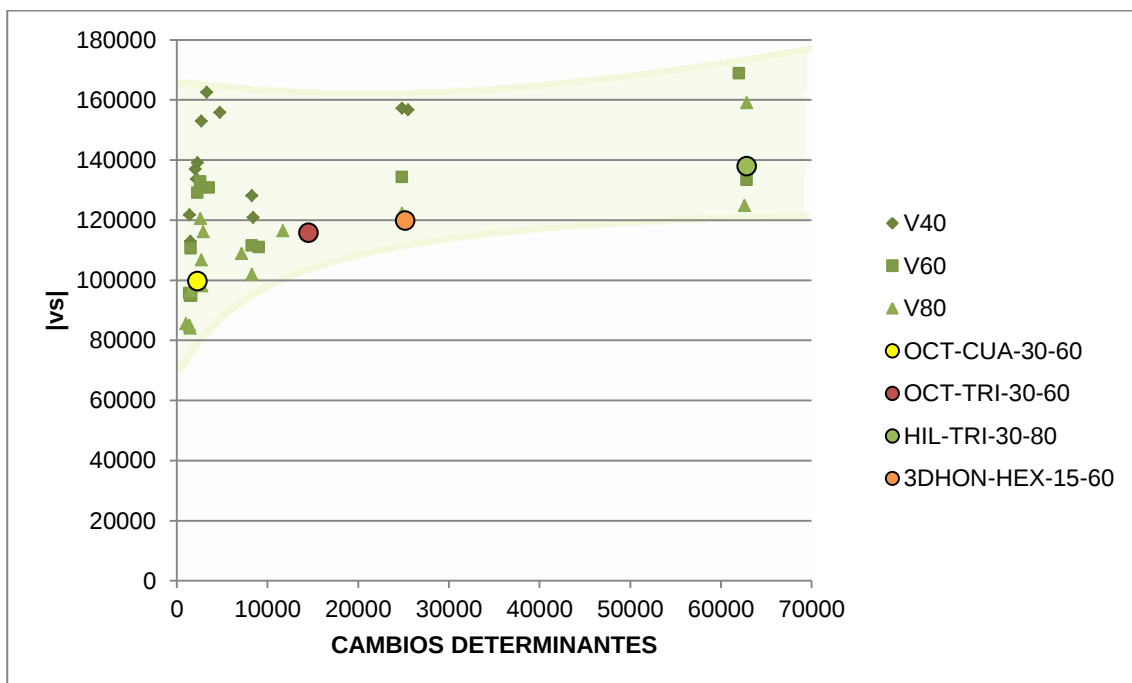


**GRÁFICA 6.114.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según su media del error dimensional (mm) y su densidad (%). Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.

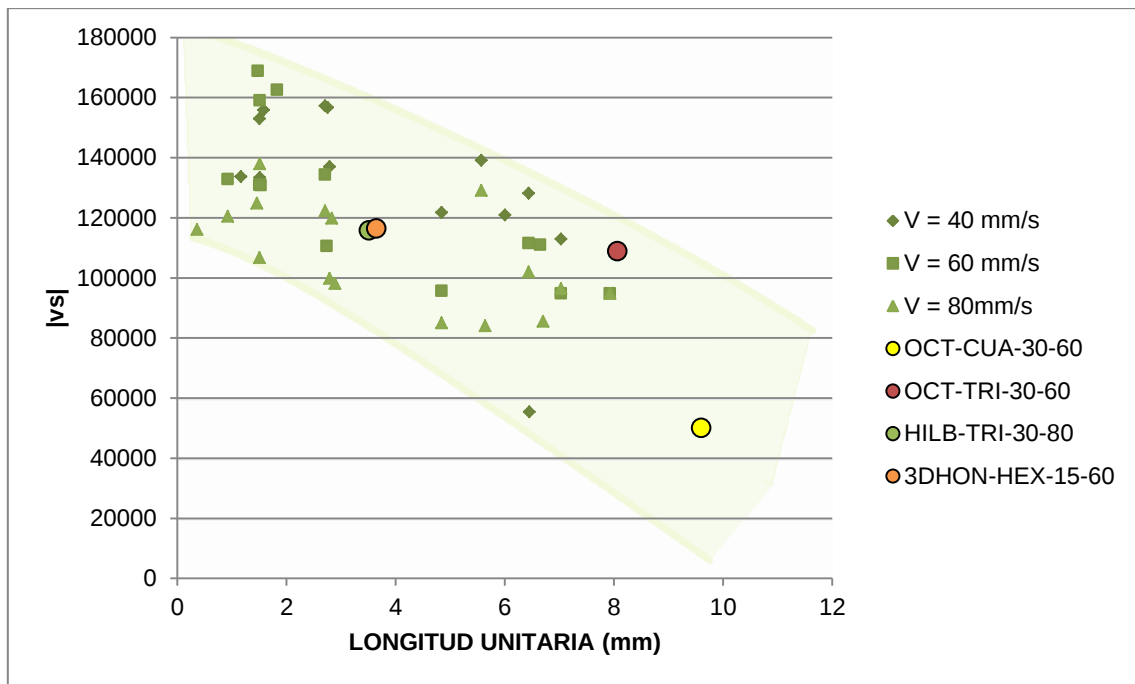
Los puntos entran dentro de los rangos marcados, por lo que se darán como válidas las gráficas.

#### 6.5.3.3. Vibración.

En las Gráficas 6.115 y 6.116 de a continuación se verá si los resultados de los experimentos de validación entran en el rango marcado por los anteriores.



**GRÁFICA 6.115.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según el módulo de la Transformada de Fourier y los cambios de sentido determinantes. Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.

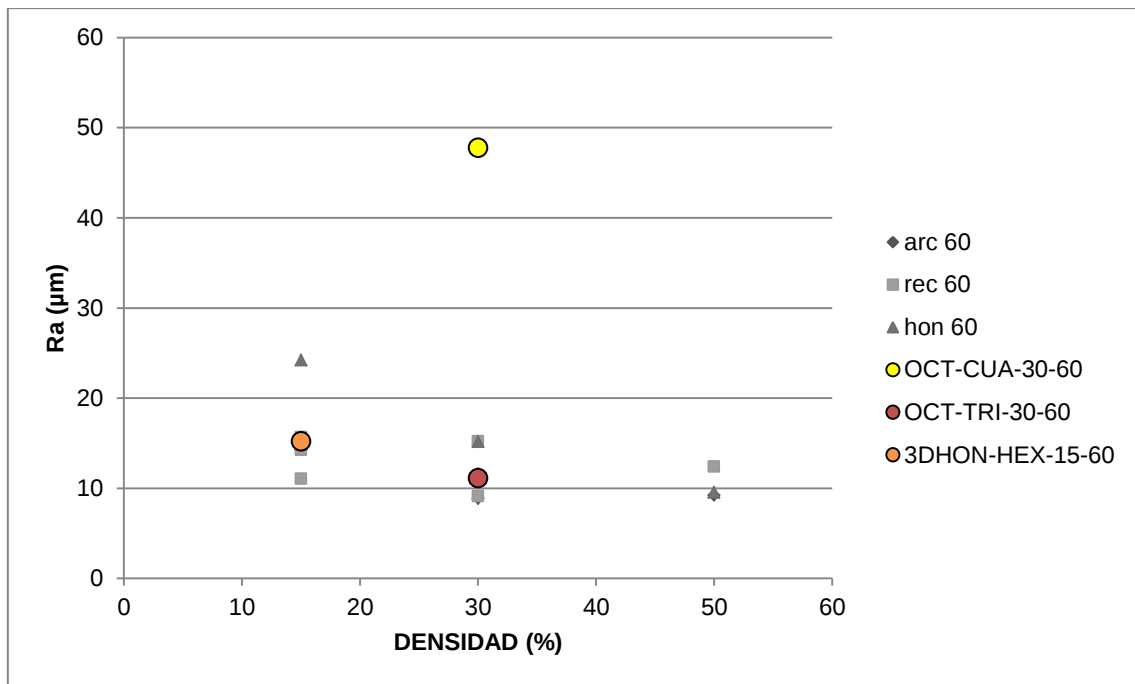


**GRÁFICA 6.116.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según el módulo de la Transformada de Fourier y la longitud media de la línea. Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.

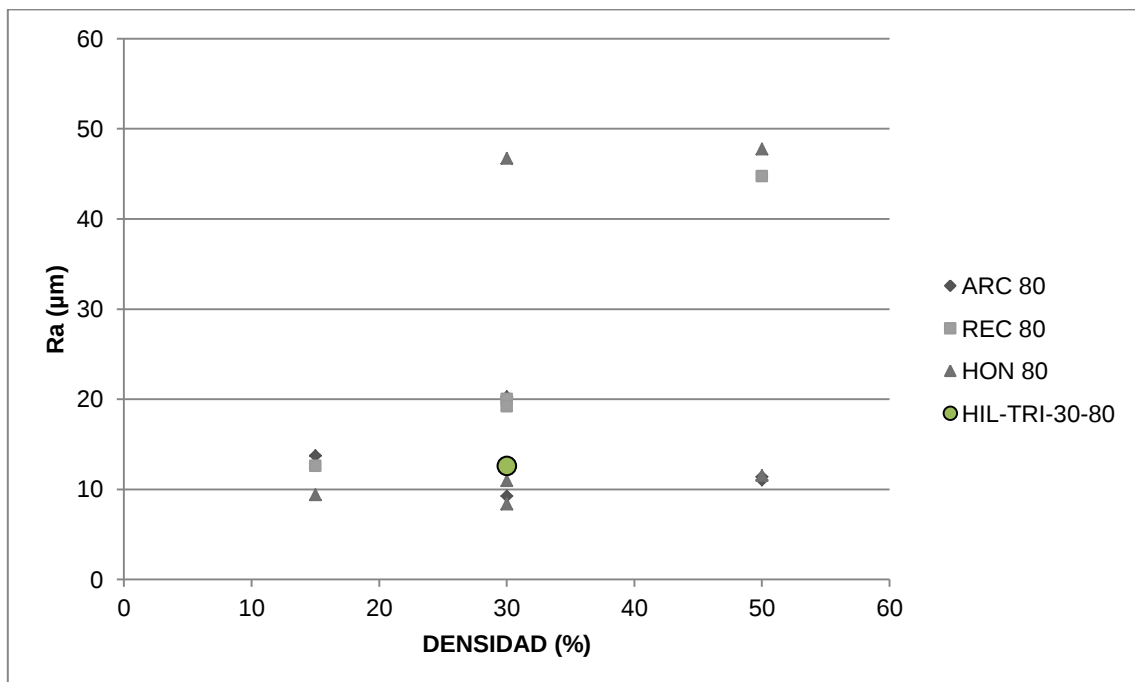
Nuevamente los puntos entran dentro de los límites marcados, por lo que se puede tomar como válido.

#### 6.5.3.4. Rugosidad superficial.

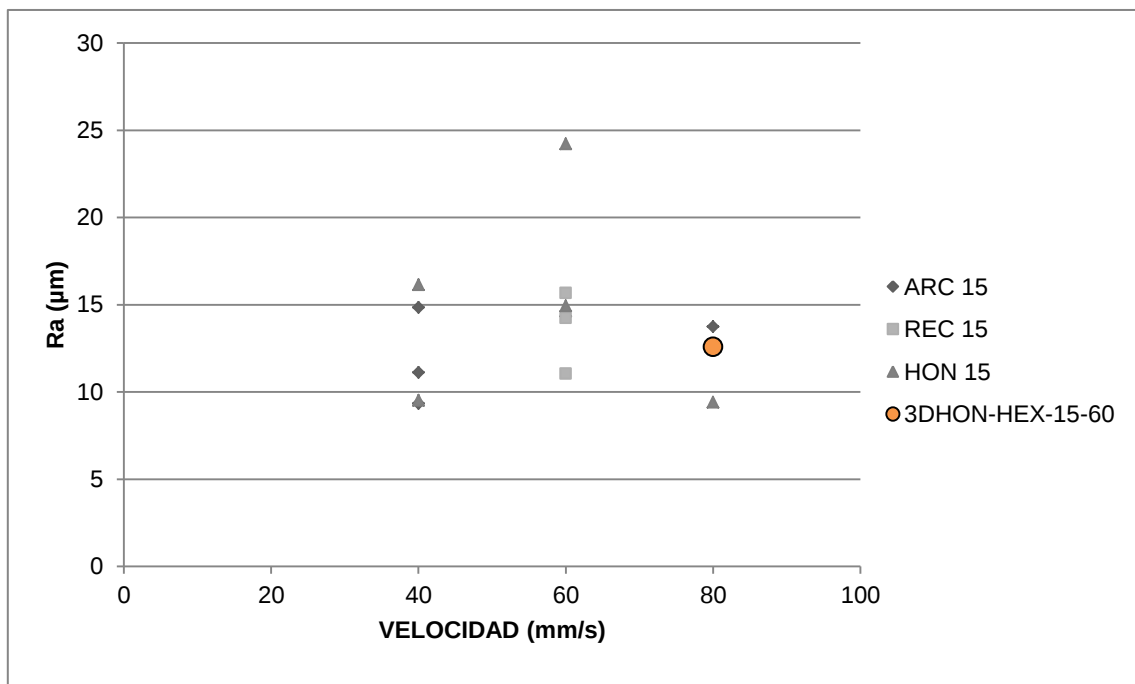
Se comprueba a continuación si la rugosidad también entra dentro de los intervalos anteriormente estudiados en el apartado 6.4. Para ello se representan las gráficas 6.117 a 6.120.



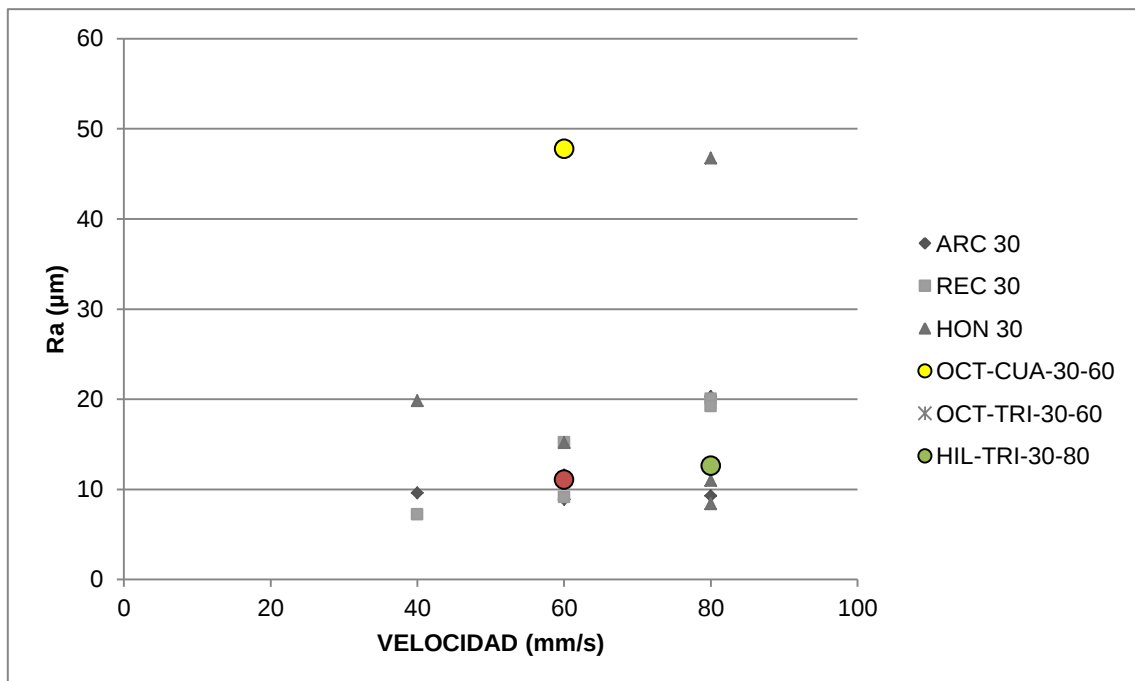
**GRÁFICA 6.117.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según la rugosidad superficial ( $\mu\text{m}$ ) y la densidad de relleno (%) para una velocidad de avance de 60 mm/s. Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.



**GRÁFICA 6.118.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según la rugosidad superficial ( $\mu\text{m}$ ) y la densidad de relleno (%) para una velocidad de avance de 80 mm/s. Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.



**GRÁFICA 6.119.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según la rugosidad superficial ( $\mu\text{m}$ ) y velocidad de avance (mm/s) para una densidad del 15%. Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.



**GRÁFICA 6.120.-** Representación de los resultados de los experimentos de validación según la rugosidad superficial ( $\mu\text{m}$ ) y velocidad de avance (mm/s) para una densidad del 30%. Leyenda (Patrón-Geometría externa-densidad (%)-Velocidad (mm/s).- Realizado en EXCEL.

En el caso de la Rugosidad, en la probeta cuadrada con patrón Octagram Spiral se comprueba que no encaja con los datos experimentales de las demás geometrías. Esto puede haber ocurrido debido a que el filamento utilizado en esa probeta era nuevo y podría tener una variación en la composición, lo que provocaría un cambio en el acabado superficial.

El resto parece encajar con la tendencia según sus velocidades y densidades.

## 7. CONCLUSIONES

Tras los estudios anteriores se puede concluir que, a pesar de que en un principio se pueda pensar que cuanto más aumente la velocidad de avance o menos densidad tenga el relleno de la pieza peores resultados se obtendrán, resulta que no tiene por qué ser así.

En primer lugar se ha visto cómo la eficiencia temporal de la máquina aumenta con el aumento de la densidad de relleno, lo que a pesar de estar en la dirección de lo que todos podemos pensar la mayor culpa no la tiene la densidad, sino la geometría interna de la pieza. Si ésta tiene demasiados elementos en cada pasada y para realizarlos se producen cambios de sentido bruscos la eficiencia empeorará notablemente. Sin embargo, si una pieza es densa interiormente pero su geometría interna consiste en trayectorias sencillas y sin cambios bruscos se obtendrán eficiencias altas, las anteriores con una densidad menor.

Al igual que las altas cantidades de cambios de sentidos bruscos a los que se les ha denominado en este trabajo “determinantes” influyen negativamente en la eficiencia, también lo hace el aumento de la velocidad de avance, por lo que se combinan ambos parámetros afectará negativamente en el aumento de la variación temporal entre lo estimado y lo que se obtiene realmente. Esta combinación negativa es influida por la longitud de cada línea, pues al aumentar la densidad de relleno en geometrías internas complejas no sólo aumenta el número de cambios determinantes, sino que disminuye esta longitud provocando que el extrusor no alcance la velocidad programada a tiempo antes de realizar otro cambio de sentido, donde desacelera. Este conjunto de aceleraciones y desaceleraciones serán las provocantes de la pérdida de tiempo, a las que si se suma el que no alcance la velocidad configurada se obtendrán eficiencias aún más bajas. La disminución de la longitud de línea ocasionará un aumento en la vibración de la máquina, que afectará a la rugosidad superficial.

También se ha comprobado que la geometría externa influye cuando se aplican geometrías de relleno que al aumentar la densidad provocan un aumento proporcional de saltos en los que el cambio brusco de velocidad y posicionamiento

de la boquilla del extrusor genera otra pérdida temporal que se suma a las anteriormente nombradas.

En cuanto al acabado superficial y dimensional, se ha observado que se obtienen resultados variables según la velocidad y la densidad de relleno. Dimensionalmente hablando, el aumento de la velocidad de avance disminuye el rango de error, siendo óptimo experimentalmente para 60 mm/s. Sin embargo, es a velocidades bajas (de 40 mm/s) donde se obtienen los mejores resultados en la rugosidad superficial de la pieza. Si se comparan los resultados con la cantidad de cambios de sentidos bruscos, como se mencionaba anteriormente ocurre que aumenta la vibración de la máquina, ocasionando un empeoramiento de la rugosidad superficial. Esta vibración afectará en la trayectoria horizontal de la geometría exterior, donde si se observara una probeta se verifica que la pared tiene una rugosidad notoria exclusiva en esa zona, donde el filamento se ha balanceado debido a esta vibración.

El mantenimiento de la máquina es también muy importante en cuanto a los resultados a obtener, ya que un extrusor atrancado, un ventilador roto o una base de impresión sucia empeoran notablemente el acabado superficial fácilmente comprobable visualmente.

Es necesario añadir en este apartado de conclusiones que este trabajo muestra apenas una pequeña parte de lo que se puede llegar a estudiar en tecnología de impresión por FDM, dejando abierta la posibilidad de ser reanudado para realizar una ampliación y mejora de los resultados obtenidos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

[01] *Manual de Cura.* (s.f.). Obtenido de [https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Manual\\_de\\_Cura-1429600430.pdf](https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Manual_de_Cura-1429600430.pdf)

[02] *Manual Slic3r.* (s.f.). Obtenido de [https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Manual\\_Slic3r-1429600617.pdf](https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Manual_Slic3r-1429600617.pdf)

[03] *Manual de Repetier-Host.* (s.f.). Obtenido de [https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Manual\\_de\\_Repetier-Host-1429600371.pdf](https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Manual_de_Repetier-Host-1429600371.pdf)

[04] *Witbox - Guía rápida.* (s.f.). Obtenido de [https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Witbox\\_Guia\\_rapida-1429599892.pdf](https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Witbox_Guia_rapida-1429599892.pdf)

[05] *Witbox - Manual de usuario.* (s.f.). Obtenido de [https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Witbox\\_Manual\\_de\\_usuario-1429600248.pdf](https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Witbox_Manual_de_usuario-1429600248.pdf)

[06] *Wikipedia - Políácido Láctico.* (s.f.). Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Pol%C3%A1cido\\_l%C3%A1ctico](https://es.wikipedia.org/wiki/Pol%C3%A1cido_l%C3%A1ctico)

[07] *www.eis.uva.es - Políácido Láctico.* (s.f.). Obtenido de <http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/alberto/pla.htm>

[08] *Bioplásticos.* (s.f.). Obtenido de [http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/alberto/\\_private/bioplasticos\\_pdf.pdf](http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/alberto/_private/bioplasticos_pdf.pdf)

[09] *Ciencia y Tecnología Alimentaria.* (s.f.). Obtenido de Sociedad Mexicana de Nutrición y Tecnología de Alimentos: [http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/alberto/\\_private/acido%20lactico.pdf](http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/alberto/_private/acido%20lactico.pdf)

[10] *Evaluation of Polylactic Acid and Sugar Beet Pulp Green Composites.* (s.f.). Obtenido de Willett, Victoria L. Finkenstadt, LinShu Liu, J. L. Willett: [http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/alberto/\\_private/Lactico\\_Remolacha.pdf](http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/alberto/_private/Lactico_Remolacha.pdf)

[11] *Diseño Experimental.* (s.f.). Obtenido de <http://es.slideshare.net/CARRROM/sintesis-metodos>

[12] *Stratasys.* (s.f.). Obtenido de <http://www.stratasys.com/>

[13] *ABS.* (s.f.). Obtenido de <http://www.quiminet.com/articulos/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-descripcion-propiedades-y-aplicaciones-4433.htm>

[14] *Historia del futuro industrial.* (s.f.). Obtenido de <https://telecotowalk.wordpress.com/2013/11/01/la-historia-del-futuro-industrial-como-surgio-la-impresion-3d/>

[15] *Wikipedia - Impresión 3D.* (s.f.). Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n\\_3D](https://es.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n_3D)

[16] *Impresoras 3D.* (s.f.). Obtenido de [http://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local\\_repository/documents/17854.pdf](http://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf)

[17] *Xataka - Tecnologías 3D.* (s.f.). Obtenido de <http://www.xataka.com/perifericos/estas-son-las-tecnologias-de-impresion-3d-que-hay-sobre-la-mesa-y-lo-que-puedes-esperar-de-ellas>

[19] Wolfram Mathematica 9.0. (s.f.). *Help.*

Evans, B. (2011). [18] *Beggining Arduino Programming.*

*WitBox - Guía rápida.* (s.f.). Obtenido de [4]: [https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Witbox\\_Guia\\_rapida-1429599892.pdf](https://it-bqcom15-media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Witbox_Guia_rapida-1429599892.pdf)

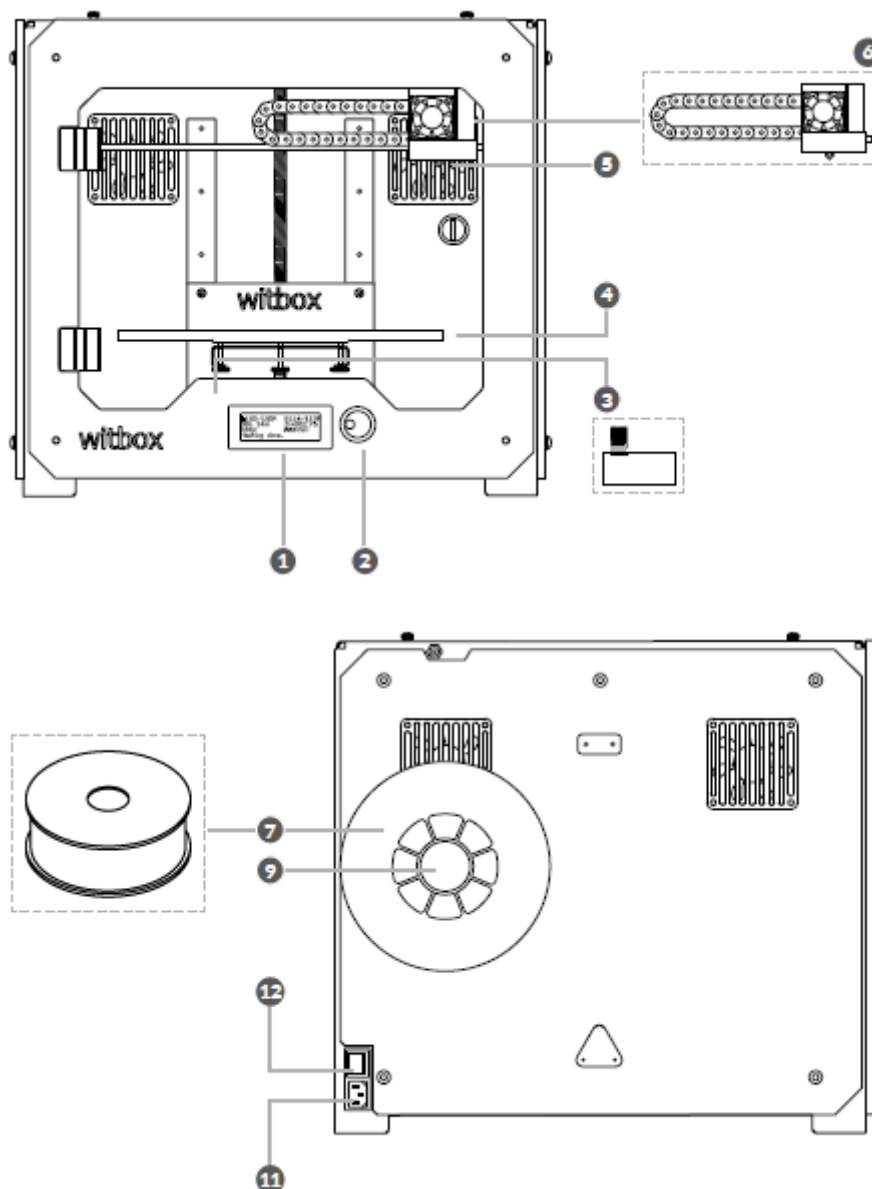
## **9. ESQUEMAS Y ANEXOS.**

### **9.1. WITBOX.**

#### **9.1.1. Partes de la impresora.**

La impresora Witbox cuenta con las siguientes partes [04]:

- 1) Panel LCD: se encuentra en la parte delantera inferior de la máquina y es la ventana donde se muestra la información del estado de la impresora.
- 2) Rueda de control: junto al panel LCD, permite controlar los diferentes menús.
- 3) Ranura SD: situada en el interior de la impresora, conectada al panel LCD por la parte trasera, donde se introduce la tarjeta SD.
- 4) Base de Impresión o “cama”: cristal grueso rectangular que sirve de soporte para la impresión.
- 5) Hot-End: punta metálica del extrusor por donde sale el plástico y que adquiere alta temperatura.
- 6) Extrusor: formado por el Hot-End, el motor de arrastre del filamento y el ventilador.
- 7) Bobina de filamento: carrete donde se encuentra enrollado el material termoplástico de 1,75 mm de grosor.
- 8) Bobina de PLA.
- 9) Soporte de bobina: pieza de metal que se encuentra en la parte trasera de la máquina y que sujeta la bobina de filamento.
- 10) Guía Fibonacci: tubo flexible de plástico que cubre el filamento protegiéndolo y conduciéndolo hasta el extrusor.
- 11) Toma de alimentación: se encuentra en la parte trasera de la máquina.
- 12) Interruptor de encendido/apagado: junto a la toma de alimentación, es un botón para encender/apagar la Witbox.
- 13) Puerto USB: situado en el lateral derecho.



**FIGURA 9.1.- Partes de Witbox.- Imagen obtenida del manual de instrucciones de Witbox.**

### **9.1.2. Funcionamiento principal de la impresora.**

La pantalla LCD es lo primero que funciona al encender la impresora. Todo el funcionamiento de ésta está condicionado por ella. Así pues, girando la rueda y pulsando se configurará todo el proceso de impresión.

#### **9.1.2.1. Calibrado.**

Antes de imprimir, es aconsejable haber calibrado la base de impresión para una correcta adhesión del filamento.

En primer lugar, se limpia la base y se le aplica una ligera capa de laca para evitar que el filamento resbale durante la impresión.

Tras colocar la base en su posición dentro de la impresora, se selecciona en el menú *Control > Level Plate*. Una vez el extrusor haya enfriado, se pulsará la rueda para que la boquilla tome su primera posición.

Cuando la boquilla se encuentre en la posición de calibrado se ha de comprobar con la hoja de calibración o, en su defecto, una cartulina de un grosor similar, que la distancia entre la boquilla y la base es la correcta. Para saber si es así la hoja debe de estar lo suficientemente ajustada que cueste moverla pero lo suficientemente libre para poder sacarla sin dificultad.

Si la distancia no es correcta, se ajustará girando el tornillo que se encuentra en la parte inferior de la base de forma que ésta subirá o bajará, hasta que el ajuste sea el adecuado.

Cuando el calibrado del punto sea correcto, se pulsará la rueda para que la boquilla tome su segunda posición y se repetirán los pasos anteriores.

Cuando los tres puntos están calibrados, la boquilla se situará en el centro para que el usuario compruebe si la calibración finalmente es válida. Si no es así, se comenzará el proceso de calibrado desde el principio.

#### 9.1.2.2. *Inserción del filamento.*

Para insertar el filamento se debe marcar en el menú la opción *Control > Filament > Load*. Seguidamente, el extrusor comenzará a calentarse hasta que llegue a la temperatura de 220°C, y entonces dará la opción de *Insert & Press*. Cuando se seleccione, el usuario debe de introducir el filamento al que previamente debe de haber cortado la punta en un ángulo para facilitar la inserción en los rodillos que se encuentran en el extrusor.

Cuando el filamento haya sido insertado, se pulsa la rueda para que los rodillos comiencen a girar y el filamento comenzará a ser inyectado por la boquilla. Este proceso dura unos segundos, por lo que siempre se puede volver a pulsar la rueda para que vuelva a extruir si el proceso no ha tenido éxito la vez anterior.

Es probable que durante la impresión se agote la bobina de filamento, por lo que haya que cambiarla. Para ello, el panel LCD tiene una opción mediante la cual la impresión se para temporalmente, devuelve la boquilla a la posición origen, expulsa el filamento, espera a que se introduzca el nuevo material y lo extruye. Una vez ocurrido todo esto, regresa a la coordenada donde se quedó la impresión y continúa con ella.

#### *9.1.2.3. Puesta en marcha.*

Se inserta la tarjeta SD detrás de la pantalla en la ranura SD, y una vez insertada, en el menú se selecciona *Print from SD*, donde se encuentra el código con el nombre que previamente se le haya configurado. Cuando se selecciona, el extrusor y la base se posicionarán en el origen mientras el extrusor comenzará a precalentarse para comenzar la impresión.

## 9.2. Programas desarrollados.

### 9.2.1. Programación de Arduino UNO.

```
void setup() {  
    Serial.begin(250000); // opens serial port, sets data rate to xxx  
    bps  
    Serial.println("CLEARDATA");  
    Serial.println("LABEL,Time,x,y,z");  
}  
  
void loop() {  
  
    row++;  
    x++;  
    int xPin=3;  
    int yPin=2;  
    int zPin=1;  
  
    int x = 0; // declaración de la variable "x" en la que se  
    almacenará el valor leído por el conversor.  
    int y = 0; // declaración de la variable "y" en la que se  
    almacenará el valor leído por el conversor.  
    int z = 0; // declaración de la variable "z" en la que se  
    almacenará el valor leído por el conversor.  
  
    x = analogRead(xPin); // lee el valor de tensión del pin  
    analógico 3  
    y = analogRead(yPin); // lee el valor de tensión del pin  
    analógico 2  
    z = analogRead(zPin); // lee el valor de tensión del pin  
    analógico 1  
  
    Serial.print(x); Serial.print(",");  
    Serial.print(y); Serial.print(",");  
    Serial.print(z); Serial.print(","); Serial.print("\n");  
    delay(1);  
}
```

### 9.2.2. Lectura y guardado de datos de Arduino UNO.

```
close all; clear all;clc;  
% Captura de voltaje en tiempo real con Arduino.  
  
%INPUT  
  
num=input('Experimento número: ');  
intent=input('Intento número: ');  
combin=input('Combinación: ');  
vez=input('¿Veces realizado el experimento con dicha combinación? ');  
tiempo=input('¿Cuánto prevees que durará la impresión (en segundos)? ');  
factor=input('Factor tardanza: ');  
  
% Apertura de COM.  
  
delete(instrfind({'Port'},{'COM3'}));  
%crear objeto serie
```

```

s = serial('COM3','BaudRate',250000,'Terminator','CR/LF');
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
%abrir puerto
fopen(s);

% Medir.

% Parámetros de medidas
tmax = tiempo*factor; %tiempo de captura v2 en segundos.
rate = 20; % resultado experimental (comprobar).

% Preparar figura.
f = figure('Name','Captura');
a = axes('XLim',[0 tmax],'YLim',[400 700]);
l1 = line(nan,nan,'Color','r','LineWidth',2);
l2 = line(nan,nan,'Color','m','LineWidth',2);
l3 = line(nan,nan,'Color','g','LineWidth',2);

xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (mV)')
%title('Captura de voltaje en tiempo real con Arduino')
grid on
hold on

% Bucle
v1 = zeros(1,tmax*rate);
v2 = zeros(1,tmax*rate);
v3 = zeros(1,tmax*rate);
pt = zeros(1,tmax*rate);
i = 1;
t = 0;

% Ejecutar bucle cronometrado.
tic

while t<tmax
    t = toc;
    a = fscanf(s,'%d,%d,%d');
    v1(i)=a(1);%*5/1023/1000;
    v2(i)=a(2);%*5/1023/1000;
    v3(i)=a(3);%*5/1023/1000;
    x = linspace(0,i/rate,i);
    set(l1,'YData',v1(1:i),'XData',x);
    set(l2,'YData',v2(1:i),'XData',x);
    set(l3,'YData',v3(1:i),'XData',x);
    pt(i)=t;
    drawnow
    i = i+1;
end
%clc;
fprintf('%g s de captura a %g cap/s \n',t,i/t);
matrizt=[pt' v1' v2' v3'];

%GUARDAR DATOS

%Obtener el Path de la carpeta Actual
[stat,estruc]=fileattrib;
PathCurrent='C:\Users\Milagros\Desktop\IMPORTANTE\aaaaa COSAS QUE HACER\4º\zzz PROYECTO FIN DE GRADO\5. ENSAYOS';

```

```

%Crear las rutas (Path) para carpetas y archivos
FolderName=[num2str(vez) '.num' num2str(num) '.int' num2str(intent)
'.combin.' num2str(combin)];
PathFolder=[PathCurrent '/RESULTADOS/' FolderName];
NameFilex=[PathFolder '/datos_x.txt'];
NameFiley=[PathFolder '/datos_y.txt'];
NameFilez=[PathFolder '/datos_z.txt'];
NameFiledatt=[PathFolder '/datos.txt'];

%Crear carpetas para guardar resultados.
mkdir([PathCurrent '/RESULTADOS'], FolderName);

disp('Creada carpeta.')

%Crear un archivo .txt con datos
fileIDx = fopen(NameFilex,'w');
fileIDy = fopen(NameFiley,'w');
fileIDz = fopen(NameFilez,'w');
fileIDdat = fopen(NameFiledatt,'w');
fprintf(fileIDx, '\n%4s %10s\n\n', 'Valores de x: ');
fprintf(fileIDx, '%10.1f %10.1f\n\n', v1);
fprintf(fileIDy, '\n%4s %10s\n\n', 'Valores de y: ');
fprintf(fileIDy, '%10.1f %10.1f\n\n', v2);
fprintf(fileIDz, '\n%4s %10s\n\n', 'Valores de z: ');
fprintf(fileIDz, '%10.1f %10.1f\n\n', v3);
fprintf(fileIDdat, '\n%4s %10s\n\n', 'Datos: ');
fprintf(fileIDdat, '\n\n Elapsed time is: %f segundos; \n', toc);
fprintf(fileIDdat, '\n\n Tiempo impresión acumulado: %f capturas/segundo; \n', t);
fprintf(fileIDdat, '\n\n Capturas: %f capturas/segundo ;\n', i/t);
fprintf(fileIDdat, '\n\n Tiempo teórico introducido: %f segundos; \n', tiempo);
fprintf(fileIDdat, '\n\n Factor de tardanza: %f ; \n', factor);
fclose(fileIDx);
fclose(fileIDy);
fclose(fileIDz);
fclose(fileIDdat);

disp('Archivos *.txt creados.')

%GRÁFICAS

fig6 = figure(6);
plot(pt, v1, 'r', 'linewidth', 2); hold on;
plot(pt, v2, 'm', 'linewidth', 2); hold on;
plot(pt, v3, 'g', 'linewidth', 2); hold on;
title('ACELERÓMETRO');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Voltaje (mV)');
legend('x', 'g', 'z');

fig7 = figure(7);
plot(pt, v1, 'or', 'linewidth', 2); hold on;
plot(pt, v1, 'k'); hold on;
title('Tensión eje X');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Voltaje (mV)');

fig8 = figure(8);

```

```

plot(pt,v2,'om','linewidth',2); hold on;
plot(pt,v2,'k');hold on;
title('Tensión eje Y');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Voltaje (mV)');

fig9 = figure(9);
plot(pt,v3,'og','linewidth',2); hold on;
plot(pt,v3,'k');hold on;
title('Tensión eje Z');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Voltaje (mV)');

%guardar figura en la carpeta

saveas(fig6, [PathFolder 'fig05.pdf'], 'pdf');
saveas(fig7, [PathFolder 'fig06.pdf'], 'pdf');
saveas(fig8, [PathFolder 'fig07.pdf'], 'pdf');
saveas(fig9, [PathFolder 'fig08.pdf'], 'pdf');
saveas(fig6, [PathFolder 'fig05.eps'], 'eps');
saveas(fig7, [PathFolder 'fig06.eps'], 'eps');
saveas(fig8, [PathFolder 'fig07.eps'], 'eps');
saveas(fig9, [PathFolder 'fig08.eps'], 'eps');

disp('Gráficas guardadas.')

%Guardar workspace.
save([PathFolder '/workspace.mat']);

disp('workspace.mat guardado')

%Aviso
disp('DATOS GUARDADOS')

fclose(s);
delete(s);
clear s;

```

### 9.2.3. Corrección del programa del apartado 9.9.1. Limpieza.

```

clear all; close all; clc;

%En este fichero se limpian los datos registrados. Previamente se debe de
%haber insertado un salto de línea en el archivo .txt que se va a leer.

[archivo,ruta]=uigetfile('*.txt','ABRIR ARCHIVO');
if archivo==0
    return;
else
    fid =fopen([ruta archivo],'r');
    A=textscan(fid,'%f %f','headerlines',2);
    A=cell2mat(A);
    fclose(fid);
    %display(A)
end

```

```

%Introducción de datos:

name=input('Nombre del archivo = ');
eje=input('Eje (1=x, 2=y, 3=z) = ');
capt=input('Capturas/segundo = ');

%Creación de matriz A corregida.
i=1;
j=1;
k=1;
for i=1:length(A)
    for j=1:2
        B(k)=A(i,j);
        k=k+1;
    end
    i=i+1;
end

disp('Matriz A corregida')

figure(1)
plot(B)
title('DATOS')

%Eliminar datos sobrantes:

for i=1:length(B)
    if B(i)+B(i+1)+B(i+2)>0
        C(i)=B(i);
    else
        break
    end
end

%Creación del vector t:

for i=1:length(C)
    t(i)=capt^-1*i;
end

tmax=t(end);

figure(2)
plot(t,C,'g')
title('DATOS/TIEMPO')

%Eliminar ruido:

for i=1:length(C)
    if eje==3
        if C(i)<550
            D(i)=0;
            t_d(i)=-1;
        else
            D(i)=C(i);
            t_d(i)=t(i);
        end
    else
        if C(i)<450

```

```

        D(i)=0;
        t_d(i)=-1;
    else
        D(i)=C(i);
        t_d(i)=t(i);
    end
end
end

figure(3)
plot(t,D)
hold on
plot(t,D,'*')
title('DATOS/TIEMPO')

D(D==0)=[];
t_d(t_d==-1)=[];

fig4=figure(4);
plot(t_d,D);
%hold on;
%plot(t_d,D,'o');
title('DATOS/TIEMPO');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Voltaje (mV)');

disp('Matriz limpia')

%GUARDAR DATOS

%Obtener el Path de la carpeta actual.
%[stat,struc]=fileattrib;
PathCurrent='C:\Users\Milagros\Desktop\IMPORTANTE\aaaaa COSAS QUE
HACER\4º\zzz PROYECTO FIN DE GRADO\5. ENSAYOS';
%crear las rutas (Path) para carpetas y archivos
FolderName=[num2str(name)];
PathFolder=[PathCurrent '/RESULTADOS_corregidos/' FolderName];
%crear las carpetas para guardar los resultados
mkdir([PathCurrent '/RESULTADOS_corregidos/'], FolderName);

disp('Creada carpeta.')

switch eje
case 1
    NameFilex=[PathFolder '/datos_x_corregidos.txt'];
    fileIDx = fopen(NameFilex,'w');
    fprintf(fileIDx,'%10.1f\n',D);
    fclose(fileIDx);
    NameFilet1=[PathFolder '/datos_tx_corregidos.txt'];
    fileIDt1 = fopen(NameFilet1,'w');
    fprintf(fileIDt1,'%10.1f\n',t_d);
    fclose(fileIDt1);
case 2
    NameFiley=[PathFolder '/datos_y_corregidos.txt'];
    fileIDy = fopen(NameFiley,'w');
    fprintf(fileIDy,'%10.1f\n',D);
    fclose(fileIDy);
    NameFilet2=[PathFolder '/datos_ty_corregidos.txt'];
    fileIDt2 = fopen(NameFilet2,'w');
    fprintf(fileIDt2,'%10.1f\n',t_d);

```

```

        fclose(fileIDt2);
    case 3
        NameFilez=[PathFolder '/datos_z_corregidos.txt'];
        fileIDz = fopen(NameFilez,'w');
        fprintf(fileIDz,'%10.1f\n',D);
        fclose(fileIDz);
        NameFilet3=[PathFolder '/datos_tz_corregidos.txt'];
        fileIDt3 = fopen(NameFilet3,'w');
        fprintf(fileIDt3,'%10.1f\n',t_d);
        fclose(fileIDt3);
    otherwise
        disp('error guardando datos')
end
disp('Archivos *.txt creados.')

%guardar figura en la carpeta
switch eje
    case 1
        saveas(fig4, [PathFolder '_tension-tiempo-x.pdf'],'pdf');
    case 2
        saveas(fig4, [PathFolder '_tension-tiempo-y.pdf'],'pdf');
    case 3
        saveas(fig4, [PathFolder '_tension-tiempo-z.pdf'],'pdf');
    otherwise
        disp('error guardando gráfica')
end
disp('Gráficas guardadas.')

%guardar workspace en la carpeta
switch eje
    case 1
        save([PathFolder '/workspacex.mat']);
    case 2
        save([PathFolder '/workspacey.mat']);
    case 3
        save([PathFolder '/workspacez.mat']);
    otherwise
        disp('error guardando workspace')
end
disp('workspace.mat guardado')

%guardar datos de archivo EXCEL
Nameexcel=[PathFolder '/hoja.xls'];
switch eje
    case 1
        titulo1={'tiempo' 'eje x' 'tiempo real' 'capturas/s'};
        datos1=vertcat(t_d,D)';
        xlswrite(Nameexcel,titulo1,1,'A1');
        xlswrite(Nameexcel,datos1,1,'A2');
        xlswrite(Nameexcel,max(t_d),1,'C2');
        xlswrite(Nameexcel,capt,1,'D2');
    case 2
        titulo2={'tiempo' 'eje y' 'tiempo real' 'capturas/s'};
        datos2=vertcat(t_d,D)';
        xlswrite(Nameexcel,titulo2,2,'A1');
        xlswrite(Nameexcel,datos2,2,'A2');
        xlswrite(Nameexcel,max(t_d),2,'C2');
        xlswrite(Nameexcel,capt,2,'D2');
    case 3
        titulo3={'tiempo' 'eje z' 'tiempo real' 'capturas/s'};
        datos3=vertcat(t_d,D)';

```

```

        xlswrite(Nameexcel,titulo3,3,'A1');
        xlswrite(Nameexcel,datos3,3,'A2');
        xlswrite(Nameexcel,max(t_d),3,'C2');
        xlswrite(Nameexcel,capt,3,'D2');
    otherwise
        disp('error guardando datos')
end

disp('Excel guardado')

%aviso
disp('DATOS GUARDADOS')

```

#### 9.2.4. Transformada de Fourier en Wolfram Mathematica 9.

```

dataA=Import["C:\\Users\\Milagros\\Desktop\\IMPORTANTE\\aaaaa COSAS QUE
dataA=Import["C:\\Users\\Milagros\\Desktop\\IMPORTANTE\\aaaaa COSAS QUE
HACER\\4°\\zzz PROYECTO FIN DE GRADO\\5.
ENSAYOS\\RESULTADOS_corregidos\\1.1\\hojax.xls"][[1]];
dataB=Import["C:\\Users\\Milagros\\Desktop\\IMPORTANTE\\aaaaa COSAS QUE
HACER\\4°\\zzz PROYECTO FIN DE GRADO\\5.
ENSAYOS\\RESULTADOS_corregidos\\1.1\\hojay.xls"][[1]];
dataC=Import["C:\\Users\\Milagros\\Desktop\\IMPORTANTE\\aaaaa COSAS QUE
HACER\\4°\\zzz PROYECTO FIN DE GRADO\\5.
ENSAYOS\\RESULTADOS_corregidos\\1.1\\hojaz.xls"][[1]];

dataAFiltered=Select[dataA[[1;;-1]],#[[2]]<=1000&][[All,2]];
Mean[dataAFiltered]
StandardDeviation[dataAFiltered]
Manipulate[ListPlot[Table[dataAFiltered[[i]],{i,1,Length[dataAFiltered],f}]
,Joined->True],{{f,1},1,200,1}]
dataBFiltered=Select[dataB[[1;;-1]],#[[2]]<=1000&][[All,2]];
Mean[dataBFiltered]
StandardDeviation[dataBFiltered]
Manipulate[ListPlot[Table[dataBFiltered[[i]],{i,1,Length[dataBFiltered],f}]
,Joined->True],{{f,1},1,200,1}]
dataCFiltered=Select[dataC[[1;;-1]],#[[2]]<=1000&][[All,2]];
Mean[dataCFiltered]
StandardDeviation[dataCFiltered]
Manipulate[ListPlot[Table[dataCFiltered[[i]],{i,1,Length[dataCFiltered],f}]
,Joined->True],{{f,1},1,200,1}]

ListLinePlot[Abs[Fourier[dataAFiltered]][[1;;-1]],PlotRange->All]
Max[Abs[Fourier[dataAFiltered]][[1;;-1]]]
Mean[Abs[Fourier[dataAFiltered]][[1;;-1]]]
ListLinePlot[Abs[Fourier[dataAFiltered]][[2;;-1]],PlotRange->All]
Max[Abs[Fourier[dataAFiltered]][[2;;-1]]]
Mean[Abs[Fourier[dataAFiltered]][[2;;-1]]]
Abs[Fourier[dataAFiltered]];
ordenA=Sort[Abs[Fourier[dataAFiltered]],Greater];
ordenAselect=ordenA[[1;;10]]

ListLinePlot[Abs[Fourier[dataBFiltered]][[1;;-1]],PlotRange->All]
Max[Abs[Fourier[dataBFiltered]][[1;;-1]]]
Mean[Abs[Fourier[dataBFiltered]][[1;;-1]]]
ListLinePlot[Abs[Fourier[dataBFiltered]][[2;;-1]],PlotRange->All]
Max[Abs[Fourier[dataBFiltered]][[2;;-1]]]
Mean[Abs[Fourier[dataBFiltered]][[2;;-1]]]

```



```

        if C(i,j)==8
            M(i,1)=C(i,j+1);
        elseif C(i,j)==7
            M(i,2)=C(i,j+1);
        elseif C(i,j)==6
            M(i,3)=C(i,j+1);
        elseif C(i,j)==5
            M(i,4)=C(i,j+1);
        elseif C(i,j)==1
            M(i,5)=C(i,j+1);
        elseif C(i,j)==2
            M(i,6)=C(i,j+1);
        elseif C(i,j)==3
            M(i,7)=C(i,j+1);
        elseif C(i,j)==4
            M(i,8)=C(i,j+1);
        end
    end
end

%REPRESENTACIÓN 1
%fig1=figure;
%plot(M(:,5),M(:,6)); title('PRIMERA VISTA - MATRIZ INICIAL');
%xlabel('X'); ylabel('Y');

%valorm=zeros(1,length(M)); %Informativo.
%valorg=zeros(1,length(M)); %Informativo.
%valors=zeros(1,length(M)); %Informativo.
valorf=zeros(1,length(M)); %Informativo.
valorz=zeros(1,length(M));
valore=zeros(1,length(M)); %Informativo+cálculo.
for i=1:length(M)
    %   valorm(i)=M(i,1);
    %   valorg(i)=M(i,2);
    %   valors(i)=M(i,3);
    valorf(i)=M(i,4);
    valorz(i)=M(i,7);
    valore(i)=M(i,8);
end
ooo=isnan(valore); uuu=isnan(valorf);
for i=1:length(valore)
    if ooo(1,i)==1
        valore(1,i)=0;
    end
    if uuu(1,i)==1
        valorf(1,i)=0;
    end
end
clear ooo uuu;
valorz2=[]; valorf2=[];
j=2; k=1;
for i=1:length(valorz)
    if valorz(i)>0
        valorz2(j)=valorz(i);
        j=j+1;
    end
    if valorf(i)>0
        valorf2(k)=valorf(i);
        k=k+1;
    end
end
end

```

```

N=M;
for i=1:(length(N)-1)
    for j=1:length(valorz2)
        if N(i,7)==valorz2(j)
            if N(i+1,7)==0
                N(i+1,7)=valorz2(j);
            end
        end
    end
    for j=1:length(valorf2)
        if N(i,4)==valorf2(j)
            if N(i+1,4)==0
                N(i+1,4)=valorf2(j);
            end
        end
    end
end

end

%ELIMINAR datos (ruido):
%ETAPA 1
for i=1:length(N)
    if N(i,1)==82
        cortel=i-1;
    end
end
for i=1:length(N)
    if N(i,1)==84
        corte2=i;
    end
end
total=corte2-cortel;
L=zeros(total,8);
for i=1:total
    L(i,:)=N(i+cortel,:);
end

%ETAPA 2 (REDUCIENDO MATRIZ - paso a paso para localizar errores de
codificación).
B=[];
j=1;
for i=1:length(L)
    if L(i,5)==0&&L(i,6)==0
        i=i+1;
    else
        B(j,1)=L(i,4); %B(j,1)=velocidad.
        B(j,2)=L(i,5); %B(j,2)=x.
        B(j,3)=L(i,6); %B(j,3)=y.
        B(j,4)=L(i,7); %B(j,4)=z.
        B(j,5)=L(i,8); %B(j,5)=E.
        j=j+1;
    end
end

end

%Capas (z):
j=1;
for i=1:(length(B)-1)
    if B(i,4)~=B(i+1,4)
        valorz3(j)=B(i,4);
        j=j+1;
    end
end

```

```

end
if B(end,4)~=valorz3(end)
    valorz3(end+1)=B(end,4);
end

%Conversión de L: 0 --> NaN:
for i=1:length(L)
    for j=1:8
        if L(i,j)==0
            L(i,j)=0/0;
        end
    end
end
end

%REPRESENTACIÓN 2.
fig2=figure;
subplot(2,2,1); plot(L(:,5),L(:,6),'m','LineWidth',0.1); hold on;
plot(L(:,5),L(:,6),'o','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',2);
title('MATRIZ CORREGIDA 1'); xlabel('X'); ylabel('Y'); subplot(2,2,2);
plot3(L(:,5),L(:,6),L(:,7),'m','LineWidth',0.1);
%hold on;
%plot3(L(:,5),L(:,6),L(:,7),'ok','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',2);
title('MATRIZ CORREGIDA 1'); xlabel('X'); ylabel('Y'); zlabel('Z');
subplot(2,2,3); plot(B(:,2),B(:,3),'r','LineWidth',0.1);
%hold on;
%plot(A(:,2),A(:,3),'ok','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',2);
title('MATRIZ DEFINITIVA'); xlabel('X'); ylabel('Y'); subplot(2,2,4);
plot3(B(:,2),B(:,3),B(:,4),'r','LineWidth',0.1);
%hold on;
%plot3(A(:,2),A(:,3),A(:,4),'ok','MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','k','MarkerSize',2);
title('MATRIZ DEFINITIVA'); xlabel('X'); ylabel('Y'); zlabel('Z');

%Hallando ángulos:
    %u=(x2-x1,y2-y1);v=(x3-x2,y3-y2);
    %ang=acosd((u1*v1+u2*v2)/((u1^2+u2^2)^(1/2)*(v1^2+v2^2)^(1/2)));
for i=2:(length(B))
    uv(i,1)=B(i,2)-B(i-1,2); %X;
    uv(i,2)=B(i,3)-B(i-1,3); %Y;
end
for i=1:(length(uv)-1)
    ang(i)=180-
    acosd((uv(i,1)*uv(i+1,1)+uv(i,2)*uv(i+1,2))/((uv(i,1)^2+uv(i,2)^2)^(1/2)*(uv(i+1,1)^2+uv(i+1,2)^2)^(1/2)));
end
cont30=0; cont60=0; cont90=0; cont120=0; cont150=0; cont180=0;
for i=1:length(ang)
    if ang(1,i)>0&&ang(1,i)<=30
        cont30=cont30+1;
    elseif ang(1,i)>30&&ang(1,i)<=60
        cont60=cont60+1;
    elseif ang(1,i)>60&&ang(1,i)<=90
        cont90=cont90+1;
    elseif ang(1,i)>90&&ang(1,i)<=120
        cont120=cont120+1;
    elseif ang(1,i)>120&&ang(1,i)<=150
        cont150=cont150+1;
    elseif ang(1,i)>150&&ang(1,i)<=180

```

```

        cont180=cont180+1;
    end
end
contador_ang_total=[cont30 cont60 cont90 cont120 cont150 cont180];
clear cont30 cont60 cont90 cont120 cont150 cont180;

cont22=0; cont45=0; cont67=0; cont90=0; cont112=0; cont135=0; cont157=0;
cont180=0;
for i=1:length(ang)
    if ang(1,i)>0&&ang(1,i)<=22
        cont22=cont22+1;
    elseif ang(1,i)>22&&ang(1,i)<=45
        cont45=cont45+1;
    elseif ang(1,i)>45&&ang(1,i)<=67
        cont67=cont67+1;
    elseif ang(1,i)>67&&ang(1,i)<=90
        cont90=cont90+1;
    elseif ang(1,i)>90&&ang(1,i)<=112
        cont112=cont112+1;
    elseif ang(1,i)>112&&ang(1,i)<=135
        cont135=cont135+1;
    elseif ang(1,i)>135&&ang(1,i)<=157
        cont157=cont157+1;
    elseif ang(1,i)>157&&ang(1,i)<=180
        cont180=cont180+1;
    end
end
contador_ang_total2=[cont22 cont45 cont67 cont90 cont112 cont135 cont157
cont180];
clear cont22 cont45 cont67 cont90 cont112 cont135 cont157 cont180;

for i=1:length(uv)
    long_mod(j)=(uv(i,1)^2+uv(i,2)^2)^(1/2);
    if long_mod(j)>0
        j=j+1;
    end
end

ordenang=sort(ang);
mediaang=zeros(1,length(ordenang));
mediaang(:, :)=median(ang);
ordenlong=sort(long_mod);
medialong=zeros(1,length(long_mod));
medialong(:, :)=median(long_mod);

%EJES:
for i=1:(length(uv))
    ang_x(i)=asind(uv(i,2)/uv(i,1));
    ang_y(i)=90-ang_x(i);
end
ordenang_x=sort(ang_x);
mediaang_x=zeros(1,length(ordenang_x));
mediaang_x(:, :)=median(ang_x);
cont30=0; cont60=0; cont90=0; cont120=0; cont150=0; cont180=0;
for i=1:length(ang_x)
    if ang_x(1,i)>=-90&&ang_x(1,i)<=-60
        cont30=cont30+1;
    elseif ang_x(1,i)>-60&&ang_x(1,i)<=-30
        cont60=cont60+1;
    end
end

```

```

elseif ang_x(1,i)>-30&&ang_x(1,i)<=0
    cont90=cont90+1;
elseif ang_x(1,i)>0&&ang_x(1,i)<=30
    cont120=cont120+1;
elseif ang_x(1,i)>30&&ang_x(1,i)<=60
    cont150=cont150+1;
elseif ang_x(1,i)>60&&ang_x(1,i)<=90
    cont180=cont180+1;
end
end
contador_ang_total_x=[cont30 cont60 cont90 cont120 cont150 cont180];
clear cont30 cont60 cont90 cont120 cont150 cont180;

cont22=0; cont45=0; cont67=0; cont90=0; cont112=0; cont135=0; cont157=0;
cont180=0;
for i=1:length(ang_x)
    if ang_x(1,i)>=-90&&ang_x(1,i)<=-67
        cont22=cont22+1;
    elseif ang_x(1,i)>-67&&ang_x(1,i)<=-45
        cont45=cont45+1;
    elseif ang_x(1,i)>-45&&ang_x(1,i)<=-22
        cont67=cont67+1;
    elseif ang_x(1,i)>-22&&ang_x(1,i)<=0
        cont90=cont90+1;
    elseif ang_x(1,i)>0&&ang_x(1,i)<=22
        cont112=cont112+1;
    elseif ang_x(1,i)>22&&ang_x(1,i)<=45
        cont135=cont135+1;
    elseif ang_x(1,i)>45&&ang_x(1,i)<=67
        cont157=cont157+1;
    elseif ang_x(1,i)>67&&ang_x(1,i)<=90
        cont180=cont180+1;
    end
end
contador_ang_total_x2=[cont22 cont45 cont67 cont90 cont112 cont135 cont157
cont180];
clear cont22 cont45 cont67 cont90 cont112 cont135 cont157 cont180;

cont89=0; cont91=0; pos89=0; pos91=0; cont88=0; cont92=0; pos88=0; pos92=0;
for i=1:length(ang)
    cambio(1,i)=ang(1,i)+ang_x(1,i+1);
    cambio2(1,i)=ang(1,i)+ang_y(1,i+1);
    if cambio(1,i)<=90
        cont89=cont89+1;
        pos89(i,1)=i;
    else
        cont91=cont91+1;
        pos91(i,1)=i;
    end
    if cambio2(1,i)<=90
        cont88=cont88+1;
        pos88(i,1)=i;
    else
        cont92=cont92+1;
        pos92(i,1)=i;
    end
end
end
cambio_x=zeros(length(cambio),2);
cambio_x(1,:)= [cont89 cont91];
for i=1:length(pos89)
    cambio_x(i+1,1)=pos89(i,1);

```

```

end
for i=1:length(pos91)
    cambio_x(i+1,2)=pos91(i,1);
end
cambio_y=zeros(length(cambio2),2);
cambio_y(1,:)=[cont88 cont92];
for i=1:length(pos88)
    cambio_y(i+1,1)=pos88(i,1);
end
for i=1:length(pos92)
    cambio_y(i+1,2)=pos92(i,1);
end

clear cont89 cont91 pos89 pos91 cont88 cont92 pos88 pos92;

capas=valorz3(end)/valorz3(1);

%REPRESENTACIÓN 3.
fig3=figure;
subplot(3,2,[3 4 5 6]); bar(ang); hold on; plot(mediaang,'k');
title('VECTOR - ÁNGULOS'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
subplot(3,2,1); bar(ordenang); hold on; plot(mediaang,'k');
title('ORDENADOS'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
subplot(3,2,2); hist(ang); title('HISTOGRAMA - ÁNGULOS');
xlabel('INTERVALOS - Ángulos (°)'); ylabel('Cantidad');

%REPRESENTACIÓN 4.
fig4=figure;
subplot(3,2,[3 4 5 6]); bar(ang_x); hold on; plot(mediaang_x,'k');
title('VECTOR - ÁNGULOS_x'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
subplot(3,2,1); bar(ordenang_x); hold on; plot(mediaang_x,'k');
title('ORDENADOS_x'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
%subplot(3,2,2); hist(ang_x); title('HISTOGRAMA - ÁNGULOS_x');
%xlabel('INTERVALOS - Ángulos (°)'); ylabel('Cantidad');

%REPRESENTACIÓN 5.
fig5=figure;
subplot(3,2,[3 4 5 6]); bar(long_mod,'m'); hold on;
plot(medialong,'k'); title('VECTOR - LONGITUD RECTAS'); xlabel('i');
ylabel('Longitud (mm)');
subplot(3,2,1); bar(ordenslong,'m'); hold on; plot(medialong,'k');
title('ORDENADOS'); xlabel('i'); ylabel('Longitud (mm)');
subplot(3,2,2); hist(long_mod); title('HISTOGRAMA - LONGITUD RECTAS');
xlabel('INTERVALOS - Longitud (mm)'); ylabel('Cantidad');

for i=1:length(uv)
    MT(i,3)=B(i,4);
    MT(i,2)=(uv(i,1)^2+uv(i,2)^2)^(1/2);
    MT(i,1)=B(i,1);
end

%Fileteando:
for i=1:length(valorz3)
    k=1;
    l=1;
    for j=1:length(B)
        if B(j,4)==valorz3(i)
            D(k,(i*5-4):(i*5))=B(j,1:5);
            k=k+1;
        end
    end
end

```

```

        if MT(j,3)==valorz3(i)
            MT_cap(1,(i*3-2):(i*3))=MT(j,1:3);
            l=l+1;
        end
    end
end

%TIEMPO:
T=MT(:,2)./(MT(:,1)/60);
for i=1:capas
    T_cap(:,i)=MT_cap(:,(3*i-1))./(MT_cap(:,(3*i-2))/60);
end
isnan_T_cap=isnan(T_cap);
for i=1:capas
    for j=1:length(T_cap)
        if isnan_T_cap(j,i)==1;
            T_cap(j,i)=0;
        end
    end
end
t_total=sum(T);
tcap_total=sum(T_cap);
t_total_cap=sum(tcap_total);
error_tiempo=t_total-t_total_cap;
prop_t_cap=tcap_total./t_total;

k=1;
vel(k,1)=B(1,1);
for i=1:length(B)
    if B(i,1)~=vel(k,1)
        k=k+1;
        vel(k,1)=B(i,1);
    end
end
k=3; veloz(1:2,1)=vel(1:2,1);
for i=1:length(vel)
    if vel(i,1)~=veloz(k-1,1)&&vel(i,1)~=veloz(k-2,1)
        veloz(k,1)=vel(i,1);
        k=k+1;
    end
end
veloz(4,1)=0;
veloz=sort(veloz);

%Longitud a cada velocidad.
cont_veloz=zeros(3,length(veloz)); cont_veloz(1,:)=veloz';
cont_veloz(2,:)=1;
format long;
for i=1:length(MT)
    if MT(i,1)==cont_veloz(1,1)
        cont_veloz(2,1)=cont_veloz(2,1)+1;
        cont_veloz(3,1)=cont_veloz(3,1)+MT(i,2);
    elseif MT(i,1)==cont_veloz(1,2)
        cont_veloz(2,2)=cont_veloz(2,2)+1;
        cont_veloz(3,2)=cont_veloz(3,2)+MT(i,2);
    elseif MT(i,1)==cont_veloz(1,3)
        cont_veloz(2,3)=cont_veloz(2,3)+1;
        cont_veloz(3,3)=cont_veloz(3,3)+MT(i,2);
    elseif MT(i,1)==cont_veloz(1,4)
        cont_veloz(2,4)=cont_veloz(2,4)+1;
        cont_veloz(3,4)=cont_veloz(3,4)+MT(i,2);
    end
end

```

```

end
end
%a capas:
cont_veloz_cap=zeros(3,(length(veloz)*capas));
cont_veloz_cap(1,1:4:end)=veloz(1,1)';
cont_veloz_cap(1,2:4:end)=veloz(2,1)';
cont_veloz_cap(1,3:4:end)=veloz(3,1)';
cont_veloz_cap(1,4:4:end)=veloz(4,1)';
cont_veloz_cap(2,:)=1;
format long;
for j=3:3:(capas*3)
    for i=1:length(MT_cap)
        if MT_cap(i,j-2)==cont_veloz_cap(1,j/3*4-3)
            cont_veloz_cap(2,j/3*4-3)=cont_veloz_cap(2,j/3*4-3)+1;
            cont_veloz_cap(3,j/3*4-3)=cont_veloz_cap(3,j/3*4-3)+MT_cap(i,j-
1);
        elseif MT_cap(i,j-2)==cont_veloz_cap(1,j/3*4-2)
            cont_veloz_cap(2,j/3*4-2)=cont_veloz_cap(2,j/3*4-2)+1;
            cont_veloz_cap(3,j/3*4-2)=cont_veloz_cap(3,j/3*4-2)+MT_cap(i,j-
1);
        elseif MT_cap(i,j-2)==cont_veloz_cap(1,j/3*4-1)
            cont_veloz_cap(2,j/3*4-1)=cont_veloz_cap(2,j/3*4-1)+1;
            cont_veloz_cap(3,j/3*4-1)=cont_veloz_cap(3,j/3*4-1)+MT_cap(i,j-
1);
        elseif MT_cap(i,j-2)==cont_veloz_cap(1,j/3*4)
            cont_veloz_cap(2,j/3*4)=cont_veloz_cap(2,j/3*4)+1;
            cont_veloz_cap(3,j/3*4)=cont_veloz_cap(3,j/3*4)+MT_cap(i,j-1);
        end
    end
end
end

%Conversión de D(:,2:3): 0 --> NaN:
E=D;
for i=1:length(D)
    for j=1:(length(valorz3)*5)
        if D(i,j)==0
            D(i,j)=0/0;
        end
    end
end
end

%REPRESENTACIÓN 6.
fig6=figure;
for i=1:length(valorz3)
    if i==1
        subplot(3,2,1); plot(D(:,2),D(:,3),'m'); hold on;
        plot(D(:,2),D(:,3),'ok','MarkerSize',2);
    elseif i>1 && i<(length(valorz3)-3)
        subplot(3,2,3); plot(D(:,2+5),D(:,3+5),'g'); hold on;
        plot(D(:,2+5),D(:,3+5),'ok','MarkerSize',2);
        subplot(3,2,5);
        plot(D(:,2+5*2),D(:,3+5*2),'g'); hold on;
        plot(D(:,2+5*2),D(:,3+5*2),'ok','MarkerSize',2);
    elseif i==(length(valorz3))
        subplot(3,2,2); plot(D(:,2+5*(i-1)),D(:,3+5*(i-1)),'c');
        hold on; plot(D(:,2+5*(i-1)),D(:,3+5*(i-1)),'ok','MarkerSize',2);
        subplot(3,2,4); plot(D(:,2+5*(i-2)),D(:,3+5*(i-2)),'c');
        hold on; plot(D(:,2+5*(i-2)),D(:,3+5*(i-2)),'ok','MarkerSize',2);
        subplot(3,2,6); plot(D(:,2+5*(i-3)),D(:,3+5*(i-3)),'r');
        hold on; plot(D(:,2+5*(i-3)),D(:,3+5*(i-3)),'ok','MarkerSize',2);
    end
end

```

```

end

%Datos por capa:
k=1;
for i=5:5:(capas*5) %horizontal.
    for j=2:length(E) %vertical.
        uv2(j,k)=E(j,i-3)-E(j-1,i-3); %X;
        uv2(j,k+1)=E(j,i-2)-E(j-1,i-2); %Y;
    end
    k=k+2;
end
for i=2:2:(capas*2)
    k=1;
    for j=1:(length(uv2)-1)
        ang_cap(k,i/2)=180-acosd((uv2(j,i-1)*uv2(j+1,i-1)+uv2(j,i)*uv2(j+1,i))/((uv2(j,i-1)^2+uv2(j,i)^2)^(1/2)).*(uv2(j+1,i-1)^2+uv2(j+1,i)^2)^(1/2)));
        k=k+1;
    end
end
k=1;
for i=2:2:(capas*2)
    for j=1:length(uv2)
        long_modcap(j,k)=(((uv2(j,i-1))^2+(uv2(j,i))^2)^(1/2));
    end
    k=k+1;
end
for i=1:capas
    k=1;
    for j=1:length(long_modcap)
        modcap(1,k)=long_modcap(j,i);
        if modcap(1,k)>0
            k=k+1;
        end
    end
    contlong_cap(1,i)=length(modcap);
    medialongcap(1,i)=median(modcap);
    clear modcap
end
for i=1:capas
    k=1;
    for j=1:length(ang_cap)
        ancap(1,k)=ang_cap(j,i);
        k=k+1;
    end
    v_isnan=isnan(ancap);
    k=1;
    for j=1:length(ancap)
        ancap2(1,k)=ancap(1,j);
        k=k+1;
        if v_isnan(1,j)==1 || ancap(1,j)==0
            k=k-1;
        end
    end
    cont30=0; cont60=0; cont90=0; cont120=0; cont150=0; cont180=0;
    for j=1:length(ancap2)
        if ancap2(1,j)>0&&ancap2(1,j)<=30
            cont30=cont30+1;
        elseif ancap2(1,j)>30&&ancap2(1,j)<=60

```

```

        cont60=cont60+1;
    elseif ancaps(1,j)>60&&ancaps(1,j)<=90
        cont90=cont90+1;
    elseif ancaps(1,j)>90&&ancaps(1,j)<=120
        cont120=cont120+1;
    elseif ancaps(1,j)>120&&ancaps(1,j)<=150
        cont150=cont150+1;
    elseif ancaps(1,j)>150&&ancaps(1,j)<=180
        cont180=cont180+1;
    end
end
contador_ang(:,i)=[cont30; cont60; cont90; cont120; cont150; cont180];
clear cont30 cont60 cont90 cont120 cont150 cont180;
cont22=0; cont45=0; cont67=0; cont90=0; cont112=0; cont135=0;
cont157=0; cont180=0;
for j=1:length(ancaps)
    if ancaps(1,j)>0&&ancaps(1,j)<=22
        cont22=cont22+1;
    elseif ancaps(1,j)>22&&ancaps(1,j)<=45
        cont45=cont45+1;
    elseif ancaps(1,j)>45&&ancaps(1,j)<=67
        cont67=cont67+1;
    elseif ancaps(1,j)>67&&ancaps(1,j)<=90
        cont90=cont90+1;
    elseif ancaps(1,j)>90&&ancaps(1,j)<=112
        cont112=cont112+1;
    elseif ancaps(1,j)>112&&ancaps(1,j)<=135
        cont135=cont135+1;
    elseif ancaps(1,j)>135&&ancaps(1,j)<=157
        cont157=cont157+1;
    elseif ancaps(1,j)>157&&ancaps(1,j)<=180
        cont180=cont180+1;
    end
end
contador_ang2(:,i)=[cont22 cont45 cont67 cont90 cont112 cont135 cont157
cont180];
clear cont22 cont45 cont67 cont90 cont112 cont135 cont157 cont180;
contang_cap(1,i)=length(ancaps);
mediaangcap(1,i)=median(ancaps);
clear ancaps; clear ancaps2; clear v_isnan;
end
ordenlongcap=sort(long_modcap);
ordenangcap=sort(ang_cap);

%EJES/capa:
for i=2:2:(capas*2)
    k=1;
    for j=1:(length(uv2))
        ang_x_cap(k,i/2)=asind(uv2(j,i)/uv2(j,i-1));
        ang_y_cap(k,i/2)=90-ang_x_cap(k,i/2);
        k=k+1;
    end
end
for i=1:capas
    k=1;
    for j=1:length(ang_x_cap)
        ancaps(1,k)=ang_x_cap(j,i);
        k=k+1;
    end
    v_isnan=isnan(ancaps);
    k=1;

```

```

for j=1:length(ancap)
    ancap2(1,k)=ancap(1,j);
    k=k+1;
    if v_isnan(1,j)==1 || ancap(1,j)==0
        k=k-1;
    end
end

cont30=0; cont60=0; cont90=0; cont120=0; cont150=0; cont180=0;
for j=1:length(ancap2)
    if ancap2(1,j)>=-90&&ancap2(1,j)<=-60
        cont30=cont30+1;
    elseif ancap2(1,j)>-60&&ancap2(1,j)<=-30
        cont60=cont60+1;
    elseif ancap2(1,j)>-30&&ancap2(1,j)<=0
        cont90=cont90+1;
    elseif ancap2(1,j)>0&&ancap2(1,j)<=30
        cont120=cont120+1;
    elseif ancap2(1,j)>30&&ancap2(1,j)<=60
        cont150=cont150+1;
    elseif ancap2(1,j)>60&&ancap2(1,j)<=90
        cont180=cont180+1;
    end
end
contador_ang_x(:,i)=[cont30; cont60; cont90; cont120; cont150;
cont180];
clear cont30 cont60 cont90 cont120 cont150 cont180;
cont22=0; cont45=0; cont67=0; cont90=0; cont112=0; cont135=0;
cont157=0; cont180=0;
for j=1:length(ancap2)
    if ancap2(1,j)>=-90&&ancap2(1,j)<=-67
        cont22=cont22+1;
    elseif ancap2(1,j)>-67&&ancap2(1,j)<=-45
        cont45=cont45+1;
    elseif ancap2(1,j)>-45&&ancap2(1,j)<=-22
        cont67=cont67+1;
    elseif ancap2(1,j)>-22&&ancap2(1,j)<=0
        cont90=cont90+1;
    elseif ancap2(1,j)>0&&ancap2(1,j)<=22
        cont112=cont112+1;
    elseif ancap2(1,j)>22&&ancap2(1,j)<=45
        cont135=cont135+1;
    elseif ancap2(1,j)>45&&ancap2(1,j)<=67
        cont157=cont157+1;
    elseif ancap2(1,j)>67&&ancap2(1,j)<=90
        cont180=cont180+1;
    end
end
contador_ang_x2(:,i)=[cont22 cont45 cont67 cont90 cont112 cont135
cont157 cont180];
clear cont22 cont45 cont67 cont90 cont112 cont135 cont157 cont180;
contang_cap_x(1,i)=length(ancap2);
mediaangcap_x(1,i)=median(ancap2);
clear ancap; clear ancap2; clear v_isnan;
end

ordenang_x_cap=sort(ang_x_cap);

cont89=0; cont91=0; pos89=0; pos91=0; cont88=0; cont92=0; pos88=0; pos92=0;
for j=1:capas
    cont89=0; cont91=0; cont88=0; cont92=0;

```

```

for i=1:(length(ang_x_cap)-1)
    cambio_cap(i,j)=ang_cap(i,j)+ang_x_cap(i+1,j);
    cambio2_cap(i,j)=ang_cap(i,j)+ang_y_cap(i+1,j);
    if cambio_cap(i,j)<=90
        cont89=cont89+1;
        pos89(i,j)=i;
    else
        cont91=cont91+1;
        pos91(i,j)=i;
    end
    if cambio2_cap(i,j)<=90
        cont88=cont88+1;
        pos88(i,j)=i;
    else
        cont92=cont92+1;
        pos92(i,j)=i;
    end
end
cont89_cap(1,j)=cont89; cont91_cap(1,j)=cont91;
cont88_cap(1,j)=cont88; cont92_cap(1,j)=cont92;
clear cont89 cont91 cont88 cont92;
end
cambio_x_cap=zeros(length(cambio_cap),2*capas);
cambio_y_cap=zeros(length(cambio_cap),2*capas);
for j=2:2:capas*2
    cambio_x_cap(1,(j-1):j)=[cont89_cap(1,j/2) cont91_cap(1,j/2)];
    cambio_y_cap(1,(j-1):j)=[cont88_cap(1,j/2) cont92_cap(1,j/2)];
    for i=1:length(pos89)
        cambio_x_cap(i+1,j-1)=pos89(i,j/2);
    end
    for i=1:length(pos91)
        cambio_x_cap(i+1,j)=pos91(i,j/2);
    end
    for i=1:length(pos88)
        cambio_y_cap(i+1,1)=pos88(i,j/2);
    end
    for i=1:length(pos92)
        cambio_y_cap(i+1,2)=pos92(i,j/2);
    end
end
clear cont89 cont91 pos89 pos91 cont88 cont92 pos88 pos92;

%REPRESENTACIÓN 7, 8.
fig7=figure;
subplot(2,2,1); bar(ang_cap(:,1)); hold on; plot(mediaangcap(:,1),'k');
title('VECTOR 1 - ÁNGULOS'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
subplot(2,2,2); hist(ang_cap(:,1)); title('HISTOGRAMA 1 - ÁNGULOS');
xlabel('INTERVALOS - Ángulos (°)'); ylabel('Cantidad');
subplot(2,2,3); bar(ang_cap(:,2)); hold on; plot(mediaangcap(:,2),'k');
title('VECTOR 2 - ÁNGULOS'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
subplot(2,2,4); hist(ang_cap(:,2)); title('HISTOGRAMA 2 - ÁNGULOS');
xlabel('INTERVALOS - Ángulos (°)'); ylabel('Cantidad');
fig8=figure; %%gr.2.
subplot(3,2,1); bar(ang_cap(:,end-2)); hold on;
title('VECTOR end-2 - ÁNGULOS'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
subplot(3,2,2); hist(ang_cap(:,end-2));
title('HISTOGRAMA end-2 - ÁNGULOS'); xlabel('INTERVALOS - Ángulos (°)');
ylabel('Cantidad');
subplot(3,2,3); bar(ang_cap(:,end-1)); hold on;
plot(mediaangcap(:,end-1),'k'); title('VECTOR end-1 - ÁNGULOS');
xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');

```

```

subplot(3,2,4); hist(ang_cap(:,end-1)); title('HISTOGRAMA end-1 -
ÁNGULOS');
xlabel('INTERVALOS - Ángulos (°)'); ylabel('Cantidad');
subplot(3,2,5); bar(ang_cap(:,end)); hold on; plot(mediaangcap(:,end), 'k');
title('VECTOR end - ÁNGULOS'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
subplot(3,2,6);
hist(ang_cap(:,end)); title('HISTOGRAMA end - ÁNGULOS');
xlabel('INTERVALOS - Ángulos (°)'); ylabel('Cantidad');

%REPRESENTACIÓN 9, 10.
fig9=figure;
subplot(2,2,1); bar(long_modcap(:,1), 'm'); hold on;
plot(medialongcap(:,1), 'k');
title('VECTOR 1 - LONGITUD RECTAS'); xlabel('i'); ylabel('Longitud (mm)');
subplot(2,2,2); hist(long_modcap(:,1)); hold on;
plot(medialongcap(:,1), 'k');
title('HISTOGRAMA 1 - LONGITUD RECTAS'); xlabel('INTERVALOS - Longitud
(mm)');
ylabel('Cantidad');
subplot(2,2,3); bar(long_modcap(:,2), 'm'); hold on;
plot(medialongcap(:,2), 'k');
title('VECTOR 2 - LONGITUD RECTAS'); xlabel('i'); ylabel('Longitud (mm)');
subplot(2,2,4); hist(long_modcap(:,2)); hold on;
plot(medialongcap(:,2), 'k');
title('HISTOGRAMA 2 - LONGITUD RECTAS'); xlabel('INTERVALOS - Longitud
(mm)');
ylabel('Cantidad');
fig10=figure; %%gr.2.
subplot(3,2,1); bar(long_modcap(:,end-2), 'm'); hold on;
plot(medialongcap(:,end-2), 'k'); title('VECTOR end-2 - LONGITUD RECTAS');
xlabel('i'); ylabel('Longitud (mm)');
subplot(3,2,2); hist(long_modcap(:,end-2));
title('HISTOGRAMA end-2 - LONGITUD RECTAS'); xlabel('INTERVALOS - Longitud
(mm)');
ylabel('Cantidad');
subplot(3,2,3); bar(long_modcap(:,end-1), 'm'); hold on;
plot(medialongcap(:,end-1), 'k'); title('VECTOR end-1 - LONGITUD RECTAS');
xlabel('i'); ylabel('Longitud (mm)');
subplot(3,2,4); hist(long_modcap(:,end-1)); title('HISTOGRAMA end-1 -
LONGITUD RECTAS');
xlabel('INTERVALOS - Longitud (mm)'); ylabel('Cantidad');
subplot(3,2,5); bar(long_modcap(:,end), 'm'); hold on;
plot(medialongcap(:,end), 'k'); title('VECTOR end - LONGITUD RECTAS');
xlabel('i'); ylabel('Longitud (mm)');
subplot(3,2,6);
hist(long_modcap(:,end)); title('HISTOGRAMA end - LONGITUD RECTAS');
xlabel('INTERVALOS - Longitud (mm)'); ylabel('Cantidad');

%REPRESENTACIÓN 11, 12.
fig11=figure;
subplot(2,2,1); bar(ang_x_cap(:,1)); hold on; plot(mediaangcap_x(:,1), 'k');
title('VECTOR 1 - ÁNGULOS_x'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
%subplot(2,2,2); hist(ang_x_cap(:,1)); title('HISTOGRAMA 1 - ÁNGULOS_x');
%xlabel('INTERVALOS_x - Ángulos (°)'); ylabel('Cantidad');
subplot(2,2,3); bar(ang_x_cap(:,2)); hold on; plot(mediaangcap_x(:,2), 'k');
title('VECTOR 2 - ÁNGULOS_x'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
%subplot(2,2,4); hist(ang_x_cap(:,2)); title('HISTOGRAMA 2 - ÁNGULOS_x');
%xlabel('INTERVALOS - Ángulos (°)'); ylabel('Cantidad');
fig12=figure; %%gr.2.
subplot(3,2,1); bar(ang_x_cap(:,end-2)); hold on;
title('VECTOR end-2 - ÁNGULOS_x'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');

```

```

%subplot(3,2,2); hist(ang_x_cap(:,end-2));
%title('HISTOGRAMA end-2 - ÁNGULOS_x'); xlabel('INTERVALOS - Ángulos (°)');
%ylabel('Cantidad');
subplot(3,2,3); bar(ang_x_cap(:,end-1)); hold on;
plot(mediaangcap_x(:,end-1),'k'); title('VECTOR end-1 - ÁNGULOS_x');
xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
%subplot(3,2,4); hist(ang_x_cap(:,end-1)); title('HISTOGRAMA end-1 -
ÁNGULOS_x');
%xlabel('INTERVALOS - Ángulos (°)'); ylabel('Cantidad');
subplot(3,2,5); bar(ang_x_cap(:,end)); hold on;
plot(mediaangcap_x(:,end),'k');
title('VECTOR end - ÁNGULOS_x'); xlabel('i'); ylabel('Ángulo (°)');
%subplot(3,2,6); hist(ang_x_cap(:,end)); title('HISTOGRAMA end -
ÁNGULOS_x');
%xlabel('INTERVALOS - Ángulos (°)'); ylabel('Cantidad');

%REPRESENTACIÓN 13.
fig13=figure;
subplot(2,1,1); bar(contang_cap,'c'); hold on;
%plot(median(contang_cap(:,:)),'k');
title('CAMBIO DE SENTIDO POR CAPA'); xlabel('Capa'); ylabel('Núm.
cambios');
subplot(2,1,2); bar(contlong_cap,'g'); hold on;
%plot(median(contlong_cap(:,:)),'k');
title('NÚM. LÍNEAS POR CAPA'); xlabel('Capa'); ylabel('Núm. líneas');

%REPRESENTACIÓN 14.
fig14=figure;
subplot(1,2,1); bar(contador_ang); title('Histograma total de capas:
VECTORES');
xlabel('Intervalos de 30 (0°, 180°)'); ylabel('Cantidad');
subplot(1,2,2); bar(contador_ang); title('Histograma total de capas:
HORIZONTAL');
xlabel('Intervalos de 30 (-90°, 900°)'); ylabel('Cantidad');

%REPRESENTACIÓN 15.
fig15=figure;
bar(tcap_total); title('Tiempo según la capa'); xlabel('capa');
ylabel('tiempo (s)');

%Contando cuántas veces cambia de velocidad por capa:
cambio_pos=zeros(1,capas); k=1;
for i=1:(length(D)-1)
    for j=5:5:5*capas
        if D(i,j-4)~=D(i+1,j-4)
            cambio_pos(k,j/5)=cambio_pos(k,j/5)+0.5;
        end
    end
end
end

%DATOS:

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
format long
suma=sum(long_mod);
suma_cap=sum(long_modcap);
error_suma=suma-sum(suma_cap);
prop_suma=suma_cap/suma;

```

```

disp('Longitud total recorrida: ')
disp(suma)
disp('La longitud y la proporción con respecto a éste será: ')
disp('PRIMERA CAPA: ')
disp(suma_cap(1,1))
disp(prop_suma(1,1))
disp('CAPAS INTERMEDIAS: ')
disp(sum(suma_cap(1,2:(end-3))))
disp(sum(prop_suma(1,2:(end-3))))
disp('ÚLTIMAS TRES CAPAS: ')
disp(sum(suma_cap(1,end-2:end)))
disp(sum(prop_suma(1,end-2:end)))

disp('El tiempo teórico total será: ')
disp(t_total)
disp('La cantidad de tiempo y la proporción con respecto el total será: ')
disp('PRIMERA CAPA: ')
disp(tcap_total(1,1))
disp(prop_t_cap(1,1))
disp('CAPAS INTERMEDIAS: ')
disp(sum(tcap_total(1,2:(end-3))))
disp(sum(prop_t_cap(1,2:(end-3))))
disp('ÚLTIMAS TRES CAPAS: ')
disp(sum(tcap_total(1,end-2:end)))
disp(sum(prop_t_cap(1,end-2:end)))
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%5
disp('_____')

disp('Número de capas:')
disp(capas)

numesquinas=length(ang);
disp('Número de cambios de sentido:')
disp(numesquinas)
%disp('Número de cambios de sentido por capa:')
%disp(contlong_cap)

numlineas=length(long_mod)+capas;
disp('Número de líneas:')
disp(numlineas)
%disp('Número de líneas por capa:')
%disp(contang_cap)

filamento=sum(valore);
disp('Longitud total filamento: ')
disp(filamento)

%(Copiar y pegar directamente en EXCEL)
A_EXCEL=[capas numesquinas numlineas filamento 0 suma suma_cap(1,1)
prop_suma(1,1) sum(suma_cap(1,2:(end-3))) sum(prop_suma(1,2:(end-3)))
sum(suma_cap(1,end-2:end)) sum(prop_suma(1,end-2:end)) t_total
tcap_total(1,1) prop_t_cap(1,1) sum(tcap_total(1,2:(end-3)))
sum(prop_t_cap(1,2:(end-3))) sum(tcap_total(1,end-2:end))
sum(prop_t_cap(1,end-2:end))];
A_EXCEL2=[contador_ang_total capas contador_ang(:,1)' 1
sum(contador_ang(:,2:(end-3)))' 46 sum(contador_ang(:,(end-2):end))' 3 0
contador_ang_total_x capas contador_ang_x(:,1)' 1
sum(contador_ang_x(:,2:(end-3)))' 46 sum(contador_ang_x(:,(end-2):end))'
3];
A_EXCEL3_TOTAL=[A_EXCEL 0 A_EXCEL2];

```

```

A_EXCEL4=[contador_ang_total2 capas contador_ang2(:,1)' 1
sum(contador_ang2(:,2:(end-3))) 46 sum(contador_ang2(:,(end-2):end)) 3 0
contador_ang_total_x2 capas contador_ang_x2(:,1)' 1
sum(contador_ang_x2(:,2:(end-3))) 46 sum(contador_ang_x2(:,(end-2):end))
3];
A_EXCEL5=[cambio_x_cap(1,1:2) sum(cambio_x_cap(1,3:2:(end-3*2)))
sum(cambio_x_cap(1,4:2:(end-3*2))) sum(cambio_x_cap(1,(end-5):2:end))
sum(cambio_x_cap(1,(end-4):2:end)) 0 cambio_y_cap(1,1:2)
sum(cambio_y_cap(1,3:2:(end-3*2))) sum(cambio_y_cap(1,4:2:(end-3*2)))
sum(cambio_y_cap(1,(end-5):2:end)) sum(cambio_y_cap(1,(end-4):2:end))];
A_EXCEL6=[cambio_pos(1,1) cambio_pos(1,2) cambio_pos(1,end-2)
cambio_pos(1,end-1) cambio_pos(1,end)];
A_EXCEL7=[cont_veloz zeros(3,1) cont_veloz_cap];
close all;

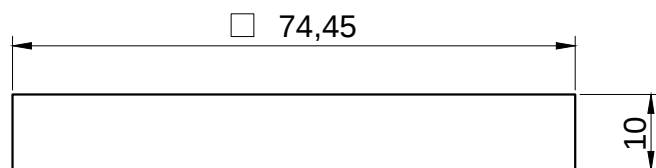
```

### **9.3. Planos de las piezas.**

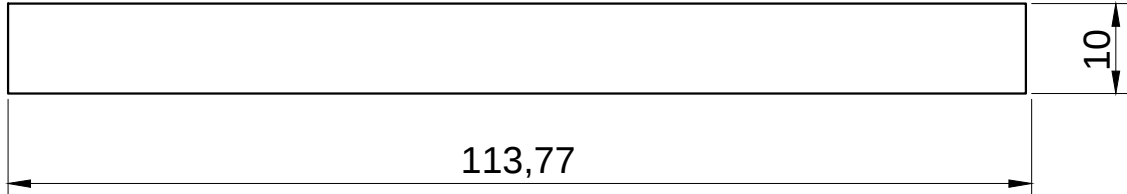
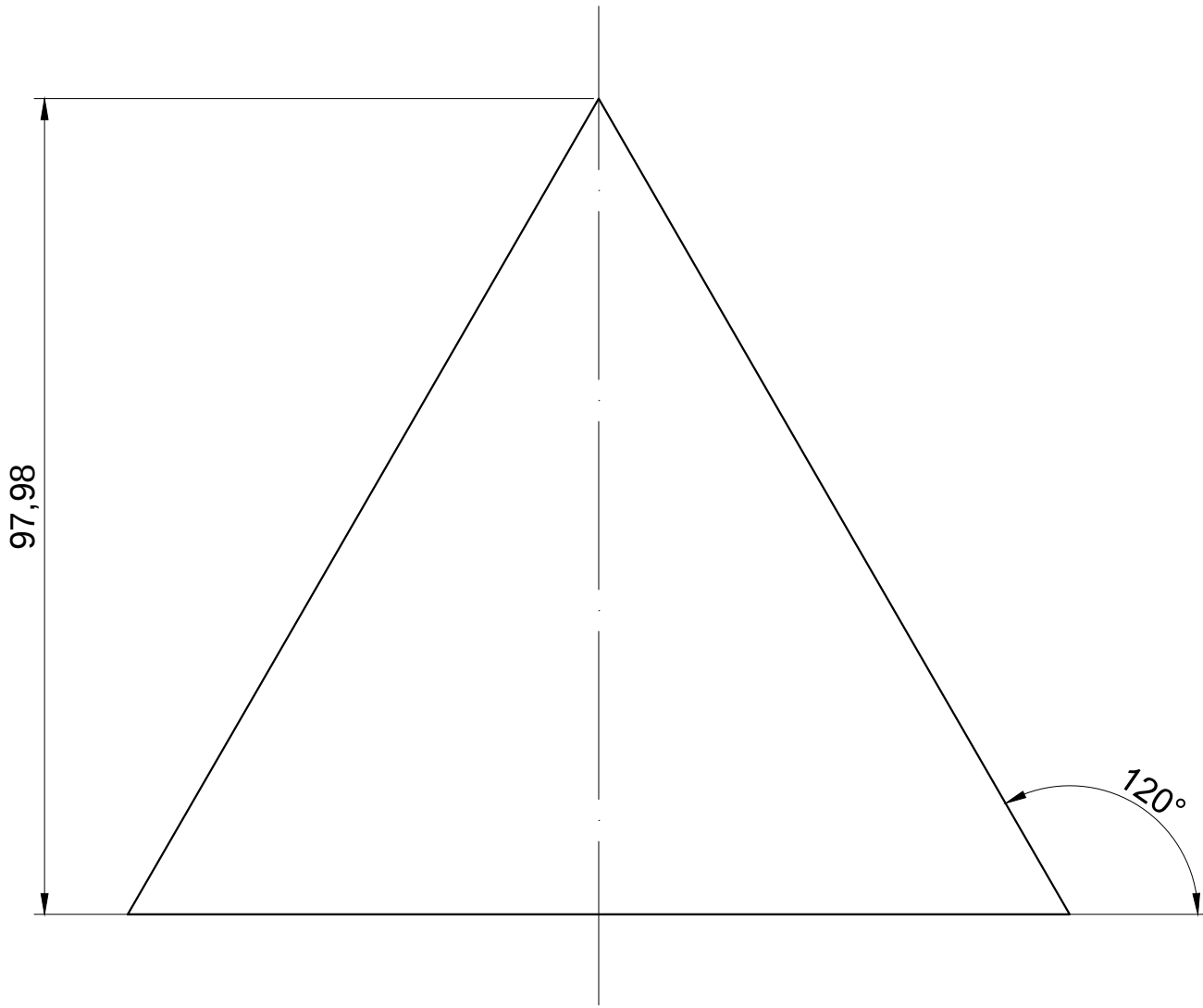
**9.3.1. GEOMETRÍA CUADRADO.- PLANO 1/3**

**9.3.2. GEOMETRÍA TRIÁNGULO.- PLANO 2/3**

**9.3.3. GEOMETRÍA HEXÁGONO.- PLANO 3/3**



|                                                                                                                     |                                                            |                                                |                           |                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| <br>Universidad de Jaén          | DEPARTAMENTO DE<br><b>Ingeniería Mecánica<br/>y Minera</b> | CREADO POR:<br>Milagros María Montijano Ortega |                           | UNIDADES<br>milímetros         |
|                                                                                                                     |                                                            | APROBADO POR:                                  |                           | Fecha de edición:<br>02/09/16  |
| TÍTULO/SUBTÍTULO:<br><br><b>GEOMETRÍA CUADRADO</b><br><br>TFG - INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA EN LA IMPRESIÓN POR FDM. |                                                            | Tipo de documento:                             | Escala:<br><br><b>1:1</b> | Nº identif.:<br><br><b>1/3</b> |



Universidad de Jaén

DEPARTAMENTO DE  
Ingeniería Mecánica  
y Minera

CREADO POR:  
Milagros María Montijano Ortega

APROBADO POR:

Fecha de edición:  
02/09/16

UNIDADES  
milímetros

TÍTULO/SUBTÍTULO:

GEOMETRÍA TRIÁNGULO

TFG - INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA EN LA IMPRESIÓN POR FDM.

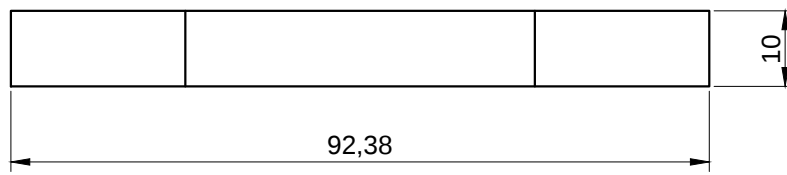
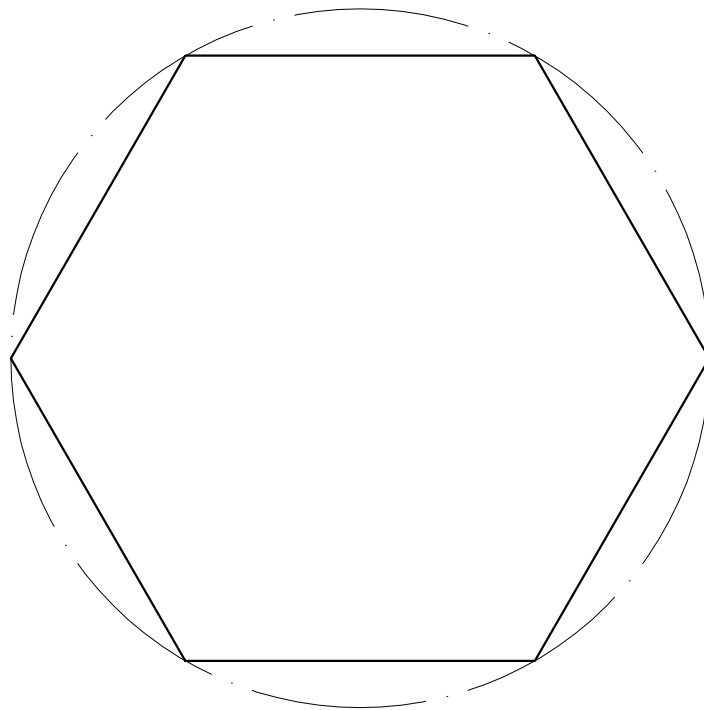
Tipo de documento:

Escala:

1:1

Nº identif.:

2/3



|                                                                                                                 |                                                            |                                                |                           |                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| <br>Universidad de Jaén      | DEPARTAMENTO DE<br><b>Ingeniería Mecánica<br/>y Minera</b> | CREADO POR:<br>Milagros María Montijano Ortega |                           | UNIDADES<br>milímetros         |
|                                                                                                                 |                                                            | APROBADO POR:                                  |                           | Fecha de edición:<br>02/09/16  |
| TÍTULO/SUBTÍTULO:<br><b>GEOMETRÍA HEXÁGONO</b><br><br>TFG - INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA EN LA IMPRESIÓN POR FDM. |                                                            | Tipo de documento:                             | Escala:<br><br><b>1:1</b> | Nº identif.:<br><br><b>3/3</b> |

