



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Desarrollo de férulas mediante impresión
3D: comportamiento mecánico del
material y prototipado**

Autor: Valentín-Gamazo García, Jorge

Tutor: Mansilla Gallo , Alberto

Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería
Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería,
Ingeniería Cartográfica, Geodesia y
Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería
de los Procesos de Fabricación

Valladolid, Julio 2019

Resumen

El modelado por deposición fundida (FDM) es una técnica de fabricación aditiva cuyo crecimiento está en auge debido a la posibilidad de crear piezas funcionales con geometrías complejas, imposibles de lograr mediante otras técnicas de fabricación.

Las propiedades mecánicas de las piezas construidas dependen de multitud de parámetros, por eso durante este trabajo vamos a centrar nuestro interés en conocer la anisotropía existente en las piezas fabricadas mediante FDM.

El proyecto se dividirá en tres partes, en la primera se expondrá el funcionamiento teórico de una impresora FDM así como los parámetros y particularidades para lograr un desarrollo óptimo de las piezas.

La segunda parte consta de un estudio para determinar las propiedades mecánicas de las piezas desarrolladas mediante tecnología FDM en función de la orientación.

La tercera parte supondrá la aplicación práctica de los resultados obtenidos en el estudio para fabricar una férula para el antebrazo como sustituto de las escayolas tradicionales.

Palabras clave

Impresión 3D

FDM

Ensayo tracción

PETG

Órtesis de antebrazo

Índice

Resumen.....	3
Palabras clave	3
Índice.....	5
Introducción.....	7
Objetivos	7
1. Tecnología FDM	9
1.1. Fundamentos de la tecnología FDM	9
1.2 Funcionamiento de una impresora FDM.	10
1.3 Componentes de una impresora FDM	11
1.4 Parámetros principales en impresión 3D	14
1.5 Desarrollo de piezas para impresión 3D	16
1.6 Anisotropía en impresión 3D	17
1.7 Material empleado	18
1.7.1 PET-G.....	18
1.7.2 PVA	20
1.8 Acabados superficiales	21
1.9 Consideraciones previas a la impresión	23
2. Ensayo de tracción para probetas fabricadas en impresión 3D	25
2.1 Metodología de ensayo	25
2.2 Probetas empleadas	27
2.3 Parámetros en el proceso de fabricación de probetas.....	28
3.3.1. Dirección de fibra	30
3.3.1 Orientación de impresión	32
3.4 Máquina de ensayos	35
3.6 Correlación de imagen digital	38
3.7 Resultados del ensayo	41
3.7.1 Orientación Plana.....	41
3.7.2 Orientación de canto.....	43
3.7.3 Orientación de vertical.....	45
3.7.4 Análisis de la fractura de las probetas	47
3.7.5 Conclusiones del ensayo	51
4. Fabricación de una férula a medida de antebrazo y muñeca.	52
4.1. Orientación Vertical	53

4.2 Dirección Horizontal.....	55
5.Conclusiones	57
6.Lineas futuras.....	57
7.Bibliografía.....	58
Anexos	59
Anexo 1. Características de la impresora Ultimaker 3.....	59
Anexo 2. Propiedades del Material PETG.....	61
Anexo 3. Máquina de ensayos Mark 10-ES30	62
Anexo 4. Célula de carga U93	64
Anexo 5.Tarjeta adquisición de datos NI9237	67
Anexo 6. Cámara de correlación de imagen digital EX0250MU3.....	69
Anexo 7. Lente de la cámara AZURE-2514M5M.....	71

Introducción

Las tecnologías 3D son cada vez más frecuentes en el ámbito cotidiano, y una de sus aplicaciones más destacadas la encontramos en el campo de la medicina. Una de las principales ventajas que ofrecen es la posibilidad de lograr una personalización específica para cada paciente y patología.

Gracias a la tecnología FDM tenemos la oportunidad de crear un producto único, adaptado a la morfología del paciente y también a sus necesidades.

Las distintas fases del diseño partirán desde la digitalización en 3D del brazo del paciente, pasando por el posterior tratamiento de la información, para así, mediante un software de CAD diseñar una órtesis capaz de cumplir con las especificaciones previstas.

Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo presentar la metodología y los resultados de la caracterización experimental de piezas de PETG impresas en tres dimensiones mediante la tecnología de deposición de filamento fundido (FDM).

Se realizará un ensayo de tracción de en probetas normalizadas para determinar el grado de anisotropía presente en materiales impresos en 3D. Las probetas serán impresas variando tanto la orientación de la fibra como la orientación de impresión para precisar las propiedades direccionales del material.

Con la información obtenida de este estudio se procederá al diseño y fabricación de una férula a medida para antebrazo, optimizando los parámetros de fabricación para cumplir con las especificaciones requeridas.

Desarrollo del TFG

1. Tecnología FDM

1.1. Fundamentos de la tecnología FDM

Entre los distintos procesos de conformado que existen en la actualidad, la impresión 3D es el método más rentable para producciones cortas o que requiera unas condiciones de diseño sean únicas.

Dentro de las diferentes técnicas de fabricación 3D, la impresión mediante FDM se ha convertido en una de las técnicas más populares de prototipado rápido en la última década, debido a una relativa sencillez de uso y un abaratamiento de los costes tanto en componentes como en materiales.

La calidad del acabado final de la pieza está directamente relacionada con el tamaño de la boquilla del extrusor ya que este nos dictaminara el grosor de cada capa. La precisión de los movimientos del cabezal de extrusión (eje X/Y) dependerá de una calibración adecuada de la máquina.

Los materiales empleados para desarrollar esta tecnología son termoplásticos estandarizados, que ofrecen una buena estabilidad de las propiedades mecánicas a lo largo del tiempo. Los más habituales son ABS, PLA aunque debido a la gran difusión de esta tecnología se están llevando a cabo grandes avances en materiales diseñados para los sectores aeroespacial, biomédico, industrial y otras aplicaciones especializadas.

1.2 Funcionamiento de una impresora FDM.

El modelado por deposición fundida (FDM) es una técnica de fabricación aditiva, cuyo funcionamiento se basa en la extrusión de un material a través de una boquilla, calentada hasta una temperatura que permita la fusión de mismo y deposita el material en capas hasta producir la pieza deseada.

En la figura 1 podemos observar un esquema genérico de los componentes de una impresora con tecnología FDM como la que se a utilizar para llevar a cabo el proyecto.

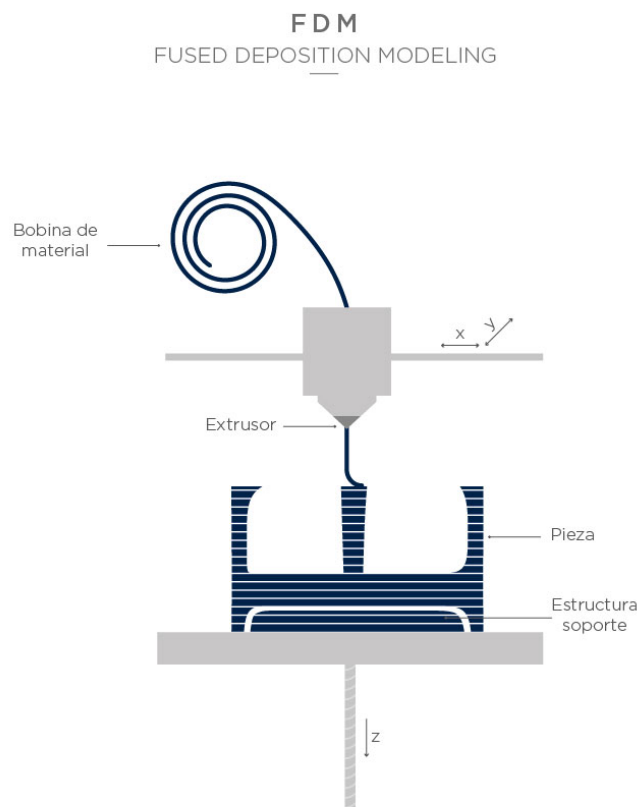


Figura 1. Esquema de una impresora FDM
(<https://eddm.es/blog-ingenius/fused-deposition-modeling-fdm/>)

1.3 Componentes de una impresora FDM

A continuación, se procederá a describir mas detalladamente, las partes que componen una impresora FDM en concreto la que hemos empleado para este trabajo la Ultimaker 3, y su función durante la fabricación de piezas.

- Alimentador: un motor acciona un mecanismo que, a través de una rueda dentada, ejerce presión sobre el filamento y hace que este se desplace hacia el interior del tubo Bowden.
- Tubo Bowden: consiste en un tubo de PTFE (Teflón™) a través del cual se mueve el filamento desde el alimentador, en la parte posterior de la máquina, hasta el extrusor dentro del propio cabezal de impresión.

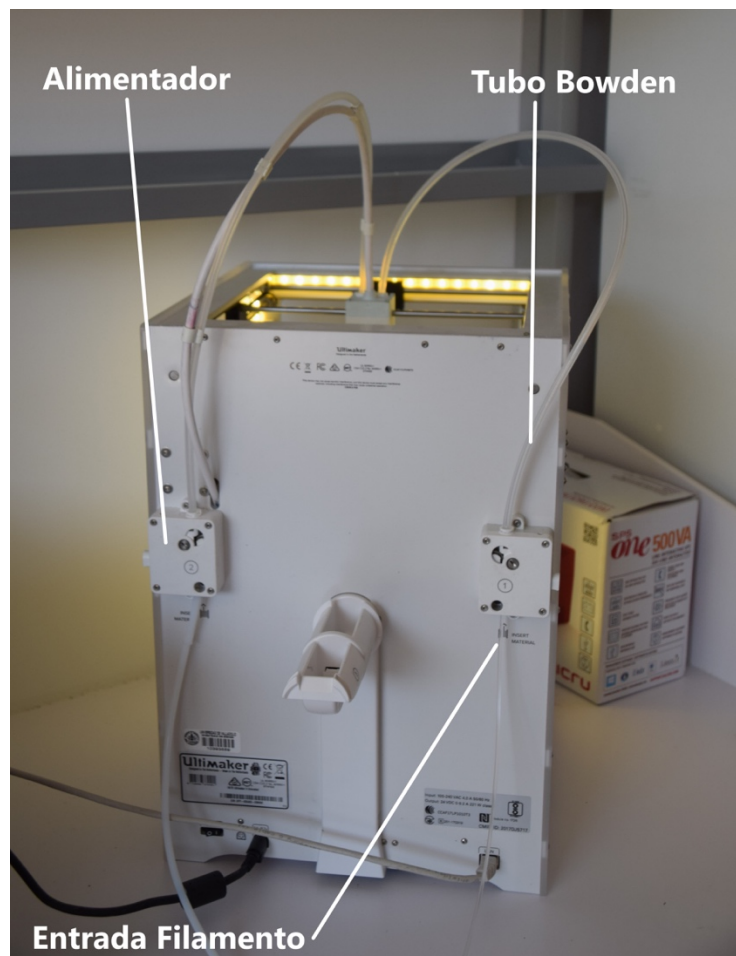


Figura 2. Parte trasera Ultimaker 3 (Elaboración propia)

- **Cabezal de impresión:** conjunto de partes de la impresora que maneja el calentamiento, enfriamiento activo y la extrusión del filamento. Esta formado por los extrusores y ventiladores:
 - **Extrusor:** el paso a estado liquido del material se logra mediante la aplicación de calor dentro del extrusor a través de una resistencia.
El extrusor registra información tanto de calibración para asegurar una correcta nivelación en las distintas zonas de la placa, como de identificación para evaluar los materiales que son compatibles.
Como se observa en la figura 3, existen dos tipos de extrusores A-A empleado para la extrusión del material principal y B-B empleado para el material soporte.
 - **Ventilador:** su objetivo es refrigerar el material a la salida del extrusor, para así lograr una solidificación mas rápida sobre la placa de impresión.

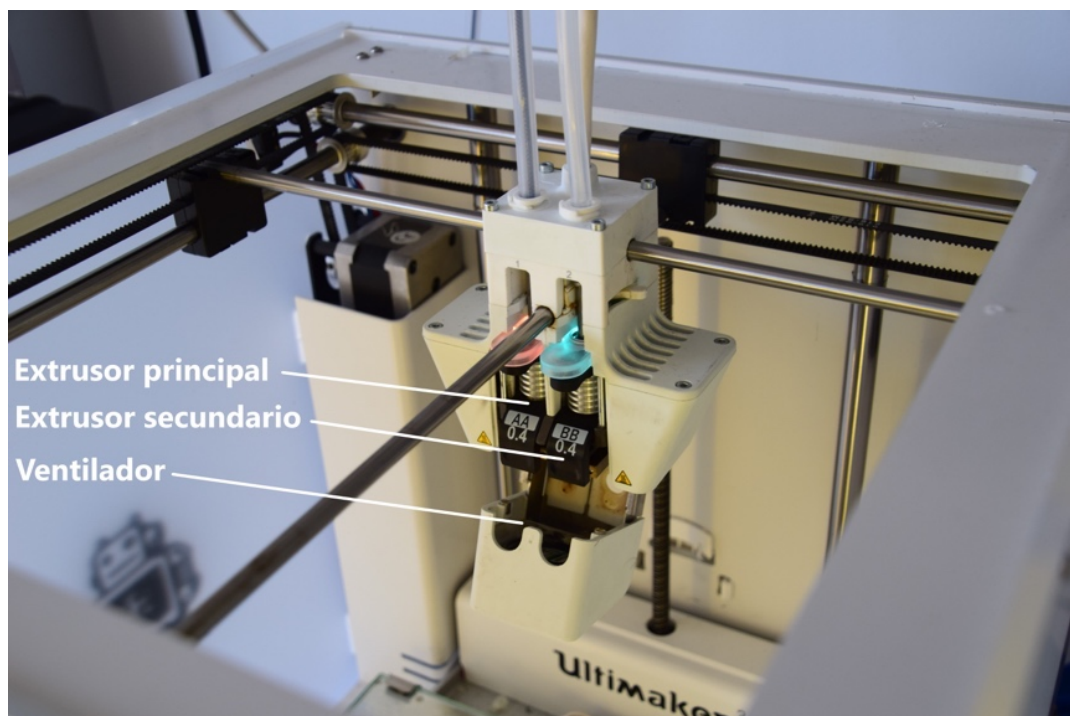


Figura 3. Cabezal de impresión (Elaboración propia)

- Sistema de desplazamiento del cabezal de impresión: mediante el uso de dos motores y un conjunto de correas se consigue un movimiento del cabezal de impresión en las direcciones X/Y sobre el plano de impresión.
- Placa de impresión: una placa de vidrio sobre la cual se deposita el material fundido, esta se calienta mediante resistencias para lograr una optima adhesión entre las capas. Dicha placa se puede mover únicamente en la dirección Z, modificando la altura a lo largo del eje Z de la pieza.

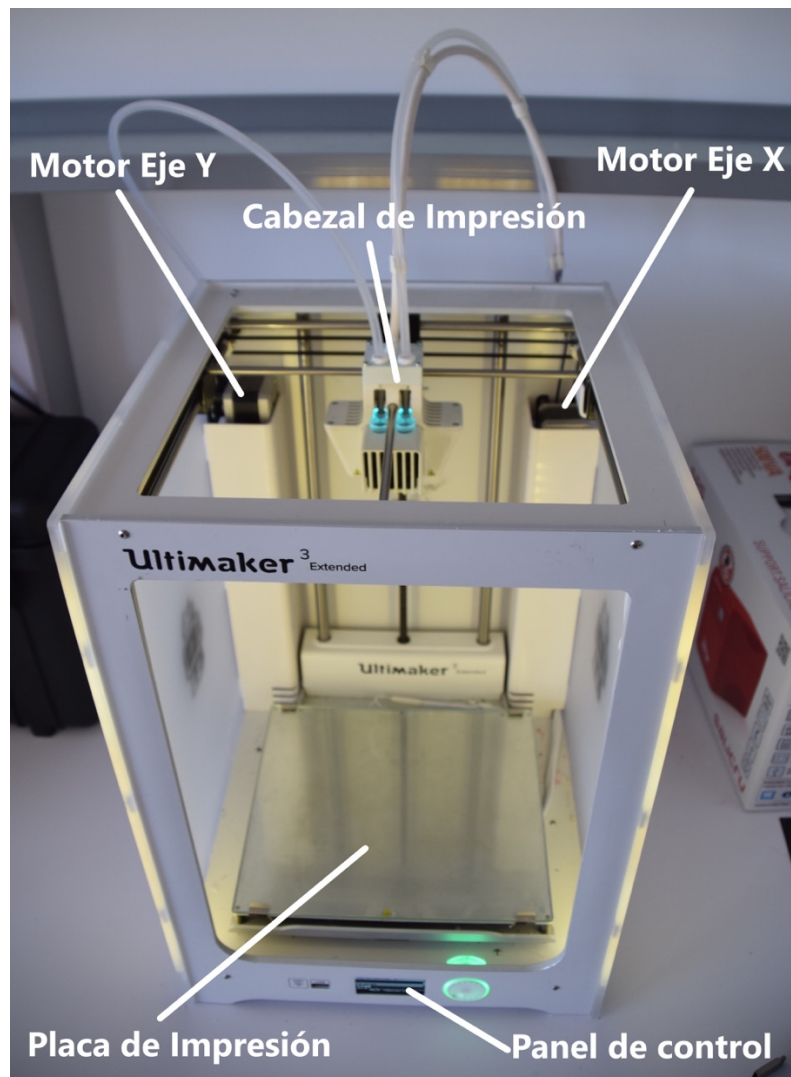


Figura 4. Parte frontal Ultimaker 3 (Elaboración propia)

Los datos técnicos de la impresora se encuentran adjuntos en el anexo 1.

1.4 Parámetros principales en impresión 3D

- Altura de capa: nos indica la dimensión vertical de cada capa, y por lo tanto la cantidad de filamento que sale por el extrusor.

Este es uno de los principales parámetros a la hora de definir la calidad de una impresión, y también influirá en gran medida en las propiedades mecánicas de la pieza. Escoger una altura de capa menor o mayor, tiene las siguientes consecuencias:

-El tiempo que se tarda en hacer una capa, es el mismo independientemente de la altura de esta, así que escoger capas más finas implica mayor tiempo de impresión.

-Empleando capas más finas, la boquilla del extrusor está más cerca de la capa anterior durante la impresión, generando así una mejor adhesión entre las capas además de un mejor acabado superficial.

- Ancho de línea: este parámetro está relacionado con la altura de capa, ya que cuando se realiza la extrusión de material sobre la placa de impresión este se encuentra en un estado viscoso y tiende a expandirse en dirección horizontal debido a la presión ejercida por el extrusor sobre la placa. Este concepto se ilustra en la figura 4.

Por lo tanto, ocupará un mayor volumen en la dirección horizontal que en la vertical. Como se ha comprobado experimentalmente para lograr una óptima impresión debemos asegurar que el ancho de línea sea como mínimo 1,5 veces la altura de capa.

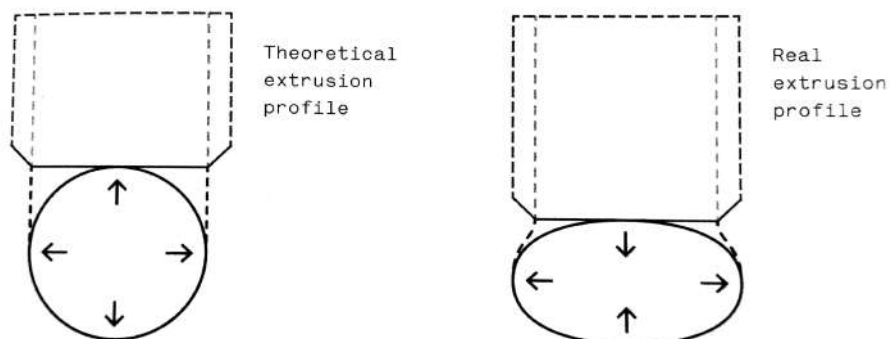


Figura 5. Comparativa entre Altura de capa teórica y real
(Redwood, Ben (2017): The 3D Printing Handbook; 3D Hubs; ISBN:978-90-827485-0-5)

- Temperatura de extrusión: este indicador hace referencia a la temperatura que ha de alcanzar el cabezal extrusor para lograr una óptima fusión del material. En el caso de este estudio vamos a ceñirnos a las recomendaciones que nos ofrece el fabricante.
- Temperatura de la placa de impresión: mediante este parámetro podemos controlar la temperatura de el cristal sobre el cual se va depositando el material. Este parámetro será fundamental a la hora de garantizar una buena adhesión entre la pieza y el cristal.
- Velocidad de extrusión: velocidad lineal de desplazamiento del cabezal extrusor sobre el plano X/Y. Debemos tener en cuenta que la velocidad de impresión influye en el acabado final de la pieza, ya que cada vez que el extrusor cambia de dirección se produce inercia, que puede causar vibraciones provocando así imperfecciones en la pieza impresa.
- Velocidad del ventilador: proporciona un enfriamiento mas rápido del material depositado sobre la placa. En materiales cuyo coeficiente de dilatación cubico es alto, conviene emplear una velocidad del ventilador reducida, haciendo así que la solidificación del material se produzca de manera mas pausada.
- Porcentaje de relleno: cantidad de material que se va a disponer en el interior de la pieza, de este factor depende la rigidez de la pieza.
- Orientación de la pieza en el plano de impresión: la forma en la que la pieza es posicionada sobre la placa de impresión es una de las primeras decisiones que debemos tomar en el proceso de fabricación 3D. De ello influirá el tiempo de ejecución, el acabado final de la pieza, las propiedades mecánicas de la misma y el uso o no de material soporte.
- Orientación de la fibra: en piezas cuyo porcentaje de relleno comienza a ser significativo, la orientación de la fibra tiene una gran repercusión a la hora de evaluar las propiedades mecánicas de la pieza.

1.5 Desarrollo de piezas para impresión 3D

El primer paso en el proceso de fabricación mediante impresión 3D es la obtención de un modelo CAD, este se puede lograr a través del diseño mediante programas como Autodesk Inventor y Fusion 360, o bien mediante un escaneado en 3D.

Una vez tenemos el archivo de CAD, debemos convertirlo a formato STL. Este formato define geometría de objetos 3D, excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas que sí incluyen otros formatos CAD.

Es el formato estándar para las tecnologías de fabricación aditiva. Utiliza una malla de triángulos cerrada para definir la forma de un objeto.

Mediante un software de laminación, en concreto Ultimaker Cura importamos el archivo STL y configuramos los parámetros de impresión. Este programa divide la pieza en capas y exporta un archivo G-Code correspondiente a la extensión aceptada por las impresoras 3D.

A continuación, se muestra un ejemplo del lenguaje G-Code:

```
G0 F4285.7 X177.647 Y79.004 Z0.27
M204 S500
M205 X5 Y5
G1 F1500 E0
G1 F1200 X77.369 Y163.097 E1.99403
G1 X76.77 Y163.547 E2.00544
G1 X76.362 Y163.801 E2.01277
G1 X74.85 Y164.672 E2.03935
G1 X74.182 Y165.011 E2.05077
```

Como se puede observar los comandos de tipo G1 y G0 especifican los movimientos que debe seguir el cabezal extrusor, así como las ordenes de tipo M modifican la temperatura del extrusor

1.6 Anisotropía en impresión 3D

Una importante limitación de la impresión FDM es la anisotropía natural de las piezas que se producen. Los materiales anisotrópicos varían sus propiedades mecánicas en función de la dirección en que son examinadas.

Como se muestra en la figura 2 podemos distinguir dos direcciones en cuanto a la unión entre las fibras del material: longitudinal y transversal.

- Dirección longitudinal: se corresponde con la dirección del extrusor en las direcciones X, Y. Cuando el material es extruido a través de la boquilla, este queda unido mediante la formación de un cordón continuo debido al estado de viscosidad que adquiere en la fusión.
- Dirección transversal: se refiere a la dirección a través de la cual se unen los sucesivos cordones gracias a la soldadura que se crea cuando el material se extruye y se apila en capas.

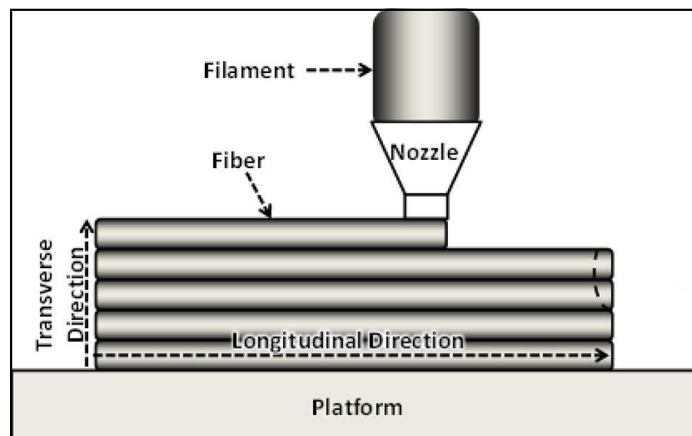


Figura 6. Direcciones de impresión longitudinal y transversal.
(Timothy J. Coogan, David Owen Kazmer, (2017) "Bond and part strength in fused deposition modeling", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23 Issue: 2, pp.414-422)

A la hora de crear piezas funcionales mediante la tecnología FDM, es importante adecuar la orientación de la impresión para asegurar que el comportamiento anisotrópico no afecta de un modo negativo al funcionamiento de la pieza.

En las zonas que están sometidas a tensiones, la impresión debe estar orientada de forma que la dirección longitudinal de extrusión sea paralela a la carga aplicada.

1.7 Material empleado

1.7.1 PET-G

El PET (Tereftalato de polietileno) es el plástico más empleado en la actualidad, se puede encontrar en botellas de agua, fibras textiles y multitud de aparatos electrónicos. Es un material transparente con buena resistencia tanto a los productos químicos como a los impactos, la rotura y el fuego.

El material empleado para este estudio es PET-G, una variante del PET la cual se obtiene modificando la estructura química del polímero.

El proceso se basa en agregar CHDM (ciclohexano dimetanol), consiguiendo un bloque de átomos más largo, lo que implica que la cadena de polímero no puede ajustarse firmemente contra su cadena vecina. Esto reduce en gran medida la cristalinidad de PET-G, convirtiéndolo en un polímero amorfo.

Esto da como resultado que PET-G tenga una temperatura de transición vítrea significativamente más bajas que el PET. Retiene muchas de las propiedades mecánicas y químicas deseables del PET y es más fácil de trabajar en impresión 3D.

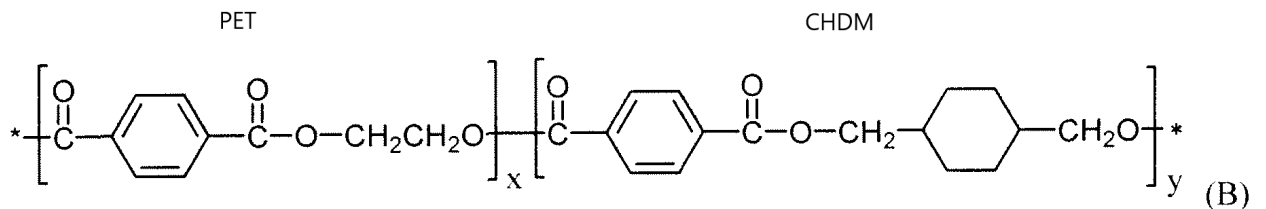


Figura 7. Estructura química me una molécula de PETG
(<https://www.filaments.directory/en/plastics/petg>)

En particular vamos a emplear el PETG del fabricante Smart Materials 3D, el cual tiene una funcionalidad muy similar al ABS, buena resistencia a la temperatura, duradero, resistente y la facilidad de ser impreso como el PLA.

La aplicación de este copoliéster en la impresión 3D se centra en la producción de piezas que necesitan cierta flexibilidad, buena resistencia a los golpes como por ejemplo: piezas sujetas a presión, piezas protectoras o recipientes para alimentos.

Además de buenas propiedades mecánicas hay otras propiedades que hacen muy interesante el PETG para usos específicos:

- Aprobación para uso alimentario y biocompatible: El PETG tiene una ventaja frente a otros materiales a la hora de fabricar todo tipo de recipientes.
- Sin olor al imprimir. A la diferencia del ABS el PETG no produce olor al imprimirse, lo que nos ofrece la posibilidad de imprimir en ambientes cerrados sin requerir ventilación o filtros para la absorción de gases.
- Reciclable: al ser el material usado en botellas y envases de comida existe una infraestructura para reciclar el PETG. Actualmente existen varias empresas en el mercado que se dedican a la fabricación de filamento PETG con material reciclado, lo que genera un abaratamiento en la fabricación y posterior venta de materiales.

Como único inconveniente que podemos señalar de este material es la dificultad de encontrar parámetros de temperatura ideales, ya que el rango que nos indica el fabricante es muy amplio.

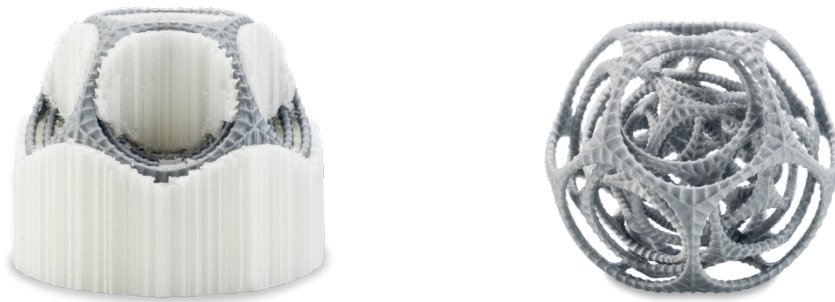
En el anexo 2 podemos encontrar la hoja técnica del material PETG del fabricante Smartmaterials.

1.7.2 PVA

El PVA (alcohol de polivinilo) es un polímero sintético blanco e inodoro. Es un material soluble en agua y 100% biodegradable. Se emplea en impresión 3D como material de soporte cuando la geometría de la pieza incluye un voladizo con un grado de inclinación mayor de 45 grados.

Se trata de un material hidróscopo, es decir absorbe humedad, por lo tanto, deberá almacenarse en recipientes herméticos donde podamos asegurar que la humedad relativa no supera el 55%.

Es compatible con una amplia gama de materiales, entre los que podemos destacar PLA, PET-G, Nylon y CPE. En las imágenes inferiores se puede observar una pieza antes y después de la completa disolución del PVA.



*Figura 8. Uso del PVA como material soporte
(<https://www.ultimaker.com>)*

1.8 Acabados superficiales

Las piezas realizadas en impresión 3D con tecnología FDM suelen tener un acabado rugoso debido a la altura de las propias capas impresas.

Actualmente existen numerosas alternativas a la hora de conseguir un acabado totalmente liso, aunque cada procedimiento dependerá de los requerimientos de calidad superficial de la pieza.

Estos tratamientos tienen como objetivo eliminar las rebabas y los restos de material no deseado que se hayan depositado sobre la pieza, generalmente esto suele producirse en zonas donde la geometría de la pieza se complica.

En otras situaciones con estos procedimientos lo que se busca es mejorar la calidad dimensional donde se requieran ajustes mas precisos, así como, así como mejorar los acabados en zonas donde se requiera una menor rugosidad superficial.

Tratamientos mecánicos:

Debemos tener en cuenta que, mediante este tipo de tratamientos, lo que se produce es una eliminación de material en nuestra pieza, algo que puede llegar a afectar a la calidad dimensional de la misma, por lo tanto, en ciertas ocasiones es preciso sobredimensionar las partes que se considere necesario para compensar la pérdida de material.

Uno de los tratamientos mas comunes, se trata del lijado, en el cual mediante un material abrasivo se consigue suavizar la pieza y eliminar marcas del material soporte.

Los resultados obtenidos dependerán en gran medida de la destreza de la persona que aplica el procedimiento, pero por lo general es lo relativamente sencillo como para obtener resultados satisfactorios

Tratamientos químicos:

El principal y mas sencillo tratamiento químico que podemos realizar en las piezas impresas consiste en la disolución en agua del material de apoyo PVA.

Esta es la principal ventaja de este material, ya que permite su completa eliminación incluso en zonas interiores de la pieza inaccesibles de llegar con otras herramientas.

Otro de los tratamientos químicos que mejores resultados ofrecen a la hora de generar un buen acabado superficial son las resinas epoxi, aplicando una capa uniforme sobre la superficie de la pieza, conseguimos generar un aspecto mas homogéneo, disimulando de este modo las marcas consecuentes de las distintas capas de la pieza.

1.9 Consideraciones previas a la impresión

El proceso de fabricación mediante FDM es un proceso complejo, en el cual para lograr resultados óptimos es preciso que todas las partes que componen la impresora estén funcionando correctamente.

Uno de los problemas mas frecuentes que encontramos en la impresión 3D es el denominado Warping, el cual produce que las esquinas de la pieza se despeguen de la placa de impresión haciendo inservible la pieza.

Este fenómeno puede explicarse debido a las contracciones que se producen cuando el material se enfría. En las primeras capas este enfriamiento se realiza de manera mas gradual, debido a que están mas cerca de la placa de impresión, la temperatura es mayor. A medida que aumenta la altura de las capas la solidificación es cada vez mas rápida, lo que produce tensiones internas en la pieza y termina despegando la pieza.

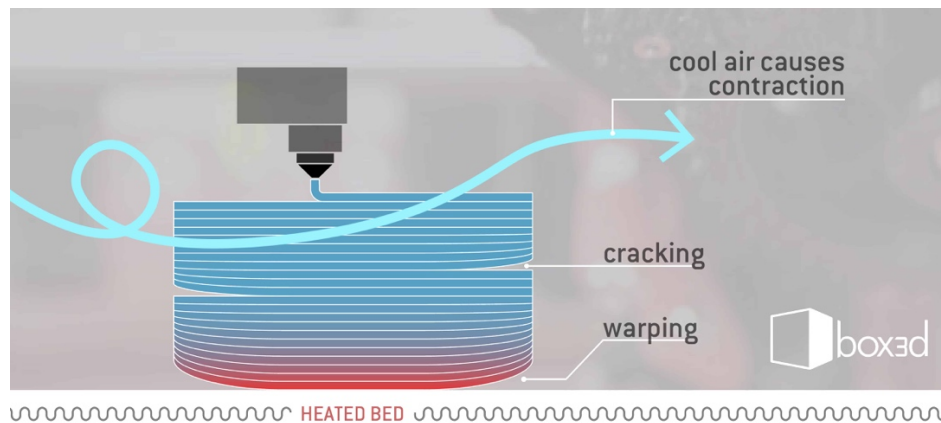


Figura 9.Efecto del warping
(<https://box3d.eu/warping-cracking-closed-environment-3d-printers/>)

Existen distintas formas de evitar este fenómeno, aunque la mayoría radican en el mismo principio, aumentar la adhesión entre la placa y la pieza.

Uno de los métodos que mejores resultados ha dado, consiste en añadir alrededor de la pieza un borde de una capa de espesor con el fin de aumentar la superficie de contacto entre la placa y la pieza.

También existen en el mercado distintos tipos de lacas y cintas adhesivas cuya función es garantizar que la pieza se adhiere correctamente a la placa. En el caso del PET-G es imprescindible aplicar esta laca para conseguir que las piezas se adhieran a la placa correctamente.



Figura 10.Laca adhesiva
(<https://www.impresoras3d.com/producto/dimafix-adhesivo-para-impresoras-3d/>)

2. Ensayo de tracción en probetas fabricadas mediante FDM

El propósito de este estudio es investigar los parámetros que dictaminan las propiedades mecánicas en piezas fabricadas mediante FDM, y determinar el efecto que tiene la anisotropía presente en los materiales impresos en 3D.

Se va a proceder a ensayar probetas normalizadas según la norma ISO 527-Determinación de propiedades en tracción de materiales Plásticos, para obtener los parámetros de tensión máxima, tensión de rotura, deformación de rotura y modulo de Young.

2.1 Metodología de ensayo

La probeta se somete a tracción a lo largo de su eje longitudinal, a una velocidad constante hasta rotura. Durante este tiempo se mide la carga que soporta la probeta y la deformación que experimenta.

Se define la deformación como el incremento de longitud dividido entre la longitud inicial de referencia, y se expresa como un porcentaje (Figura 11).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

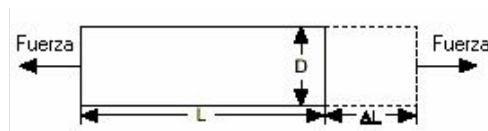


Figura 11. Representación de la deformación
(<http://www.ni.com/tutorial/7138/es/>)

A lo largo de este estudio tomamos como referencia la tensión ingenieril, la cual se obtiene dividiendo la fuerza entre el área de la sección inicial, antes de que el material comience a deformarse, sin tener en cuenta la disminución de área de la estricción.

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Por lo tanto, el esfuerzo ingenieril será mas pequeño y algo mas impreciso que el esfuerzo real, aunque nos da una buena información de como trabaja el material.

El modulo de Young se va a calcular a lo largo de el intervalo lineal de la curva tensión-deformación, aplicando un método de regresión lineal en esta zona.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Donde el modulo de Young será la pendiente de la recta ajustada por mínimos cuadrados en el intervalo de deformación $0,05\% \leq \varepsilon \leq 0,25\%$ (Figura 14).

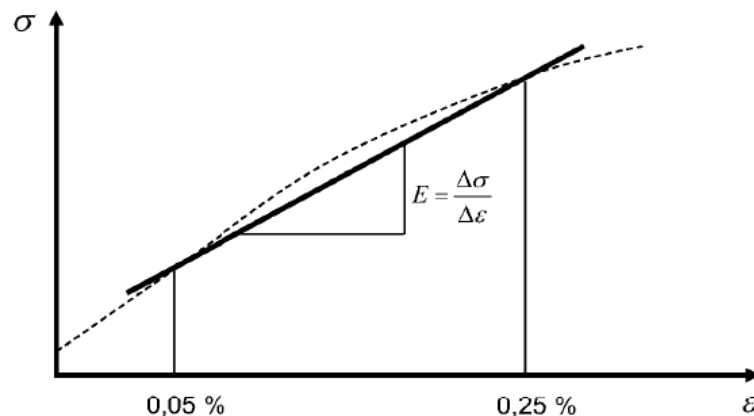


Figura 12. Zona lineal de la curva tensión-deformación (UNE-EN ISO 527)

La deformación a rotura se calculo a partir de la ultima imagen DIC disponible antes del fallo de la probeta. La tensión de rotura se corresponde en el tiempo con esta ultima imagen, tomando como referencia de rotura el método óptico.

Las probetas fueron ensayadas a una velocidad aproximada de 10mm/min, a una temperatura ambiental de 22°C

Cabe destacar la existencia de cierta variabilidad en cada ensayo realizado debido a la gran influencia de la velocidad, y la imposibilidad de lograr una velocidad constante ya que la maquina que disponemos es manual.

Se va a proceder a ensayar conjuntos de 5 probetas para cada tipo de orientación de impresión y fibra, siendo así necesario un total de 45 ensayos. Los resultados finales serán la media aritmética de los valores obtenidos de cada ensayo.

2.2 Probetas empleadas

En cuanto a la geometría de las probetas se ha seleccionado las de tipo 5A (Figura 2). Hemos elegido este tipo de probetas ya que su tamaño es el más adecuado a la hora de generar una gran cantidad de muestras.

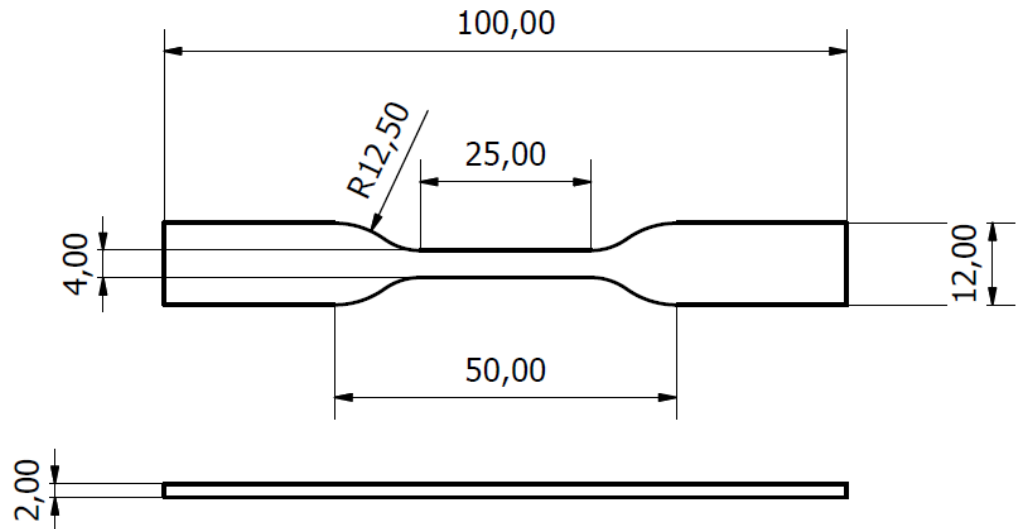


Figura 13. Representación esquemática de la probeta Tipo 5A
(Elaboración propia)

Este tipo de probetas es el más adecuado también debido a que su tamaño ofrece una mayor simplicidad de fabricación, ya que las piezas impresas mediante FDM tienden a volverse inestables a medida que se incrementa su altura.

2.3 Parámetros en el proceso de fabricación de probetas.

Mediante el software Cura de Ultimaker, podemos variar multitud de parámetros que afectan de manera esencial a el resultado final de la pieza.

Se ha seleccionado unos parámetros estándar que van a mantenerse constantes durante este estudio (Tabla 1). Nuestro interés se va a centrar en la orientación de impresión y orientación de fibra y serán estos los parámetros que variaremos durante el ensayo.

Parámetro	Ultimaker® 3 PETG Valor
Altura de capa (mm)	0,2
Ancho de línea (mm)	0,3
Relleno (%)	100
Velocidad de impresión (mm/s)	60
Tamaño del extrusor (mm)	0,4
Temperatura del extrusor (C°)	250
Temperatura plato impresión (C°)	70
Temperatura ambiente (C°)	21

Tabla 1. Principales parámetros de impresión

Las orientaciones de impresión seleccionadas para este estudio serán: Plana (Plano XY), De Canto (Plano XZ) y Vertical (Plano ZY). Así como tres direcciones de fibra: [0], [0,90], [+45, -45].

En la figura 3 se puede observar una representación grafica de las distintas orientaciones impresión y de fibra.

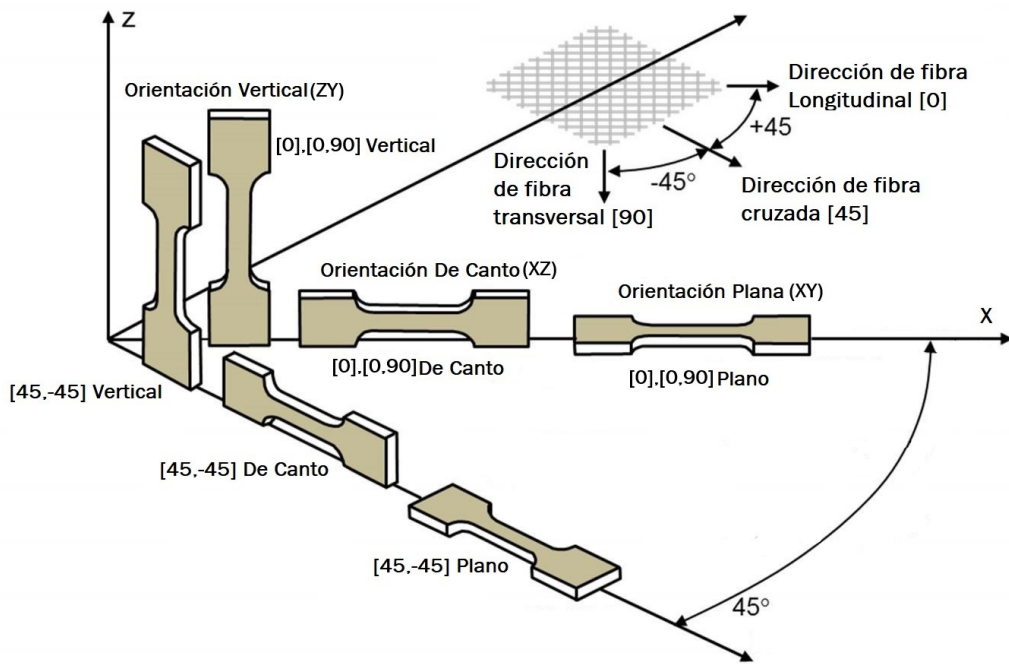


Figura 14. Representación orientación y dirección de impresión

Por lo tanto, para cada orientación de impresión se fabricaran 3 tipos de probetas variando la dirección de la fibra:

- Completamente en dirección longitudinal [0]
- Alternando capas longitudinales y transversales [0,90]
- Alternando capas en dirección cruzada [45,-45]

Serán necesarias por lo tanto un total de 45 muestras para realizar todos los ensayos.

3.3.1. Dirección de fibra

Como se va a demostrar a lo largo de este estudio la resistencia varía significativamente en función de la combinación de orientaciones de fibra elegidas.

A continuación, se muestran las distintas orientaciones de fibra que se pueden generar en capa respecto a la dirección de aplicación de la carga.

Dirección de fibra longitudinal [0]:

En esta configuración, coincide la dirección de las propias fibras con la de la carga, por lo tanto, es predecible que las probetas que poseen esta configuración sean capaces de soportar esfuerzos mayores.

Esta dirección está presente en las muestras de tipo Plano [0] y De canto [0] en todas las capas. También está presente a capas alternas en las probetas [0,90] para las mismas direcciones de impresión.



*Figura 15. Dirección de fibra longitudinal [0]
(Elaboración propia)*

Dirección de fibra Transversal [90]:

En este caso la dirección de la carga coincide con la unión entre las fibras. Es de suponer por lo tanto que las probetas que posean esta configuración tengan una resistencia significativamente menor.

La dirección de fibra transversal [90], estará presente a capas alternas en las muestras Plana y De Canto [0,90], así como en todas las probetas impresas en la dirección vertical.

Por lo tanto, cabe destacar que en las probetas verticales se varía la dirección de la fibra respecto a las capas anteriores, no respecto a la dirección de la carga.



Figura 16. Dirección de fibra transversal [90]
(Elaboración propia)

Dirección cruzada [45,-45]:

La dirección de fibra [45, -45] consiste en ir alternando capas en dirección ± 45 grados respecto al eje longitudinal de la probeta. Como se ha detallado antes, en las probetas plana y de canto la variación de la fibra será respecto a la dirección de la carga y en la vertical será respecto a las propias capas.



Figura 17. Dirección de fibra cruzada [45]
(Elaboración propia)

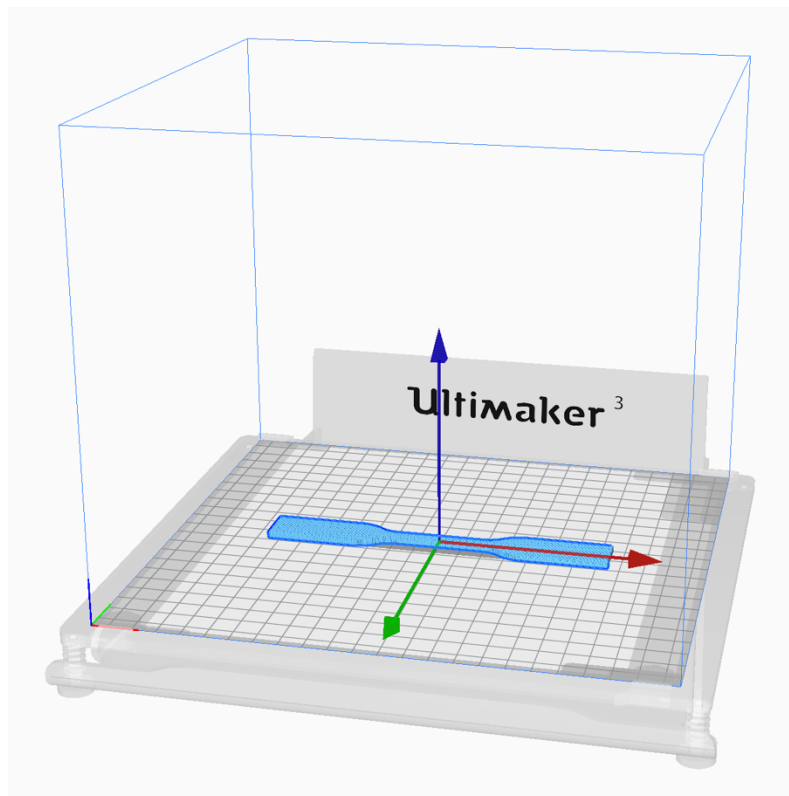
3.3.1 Orientación de impresión

La orientación según la cual son impresas las probetas dictaminara la dirección de la fibra en algunos casos, además de otros factores como la adhesión entre las capas y el tiempo de fabricación.

Orientación Plana (XY):

La fabricación de probetas planas (Figura 18) no ha supuesto ninguna complicación específica, ya que se dispone de una buena superficie de contacto con la placa de impresión, garantizando una correcta adhesión entre las capas.

Esta orientación será la que requiere un menor tiempo de impresión, además nos permite elegir libremente la orientación de fibra.



*Figura 18. Orientación plana de la probeta sobre la placa
(Elaboración Propia)*

Orientación Vertical (Plano YZ):

Esta orientación tiene el inconveniente de la dirección de fibra vendrá impuesta por el modo en que las capas se apilan a lo largo del eje longitudinal de la probeta. Por lo tanto, la orientación de la fibra será siempre transversal respecto a la dirección de aplicación de la carga.

Seleccionando esta configuración el tiempo de impresión será el mas elevado debido un mayor numero de capas, y la adhesión entre las capas será menor que en la orientación plana.

Las probetas de orientación vertical son las que mas complicaciones han generado en su fabricación. Esto es debido a que a medida que aumenta la altura, las probetas se vuelven mas inestables sobre la placa. Los movimientos del extrusor generan fuerzas cortantes sobre la probeta pudiendo hacer que esta se despegue.

Para solucionar esto será necesario imprimir las probetas en grupos de 4 (figura 19). Al elegir esta configuración se crea una estructura mas estable, donde las cargas aplicadas sobre el eje de inercia mas débil se contrarrestan con la del eje fuerte.

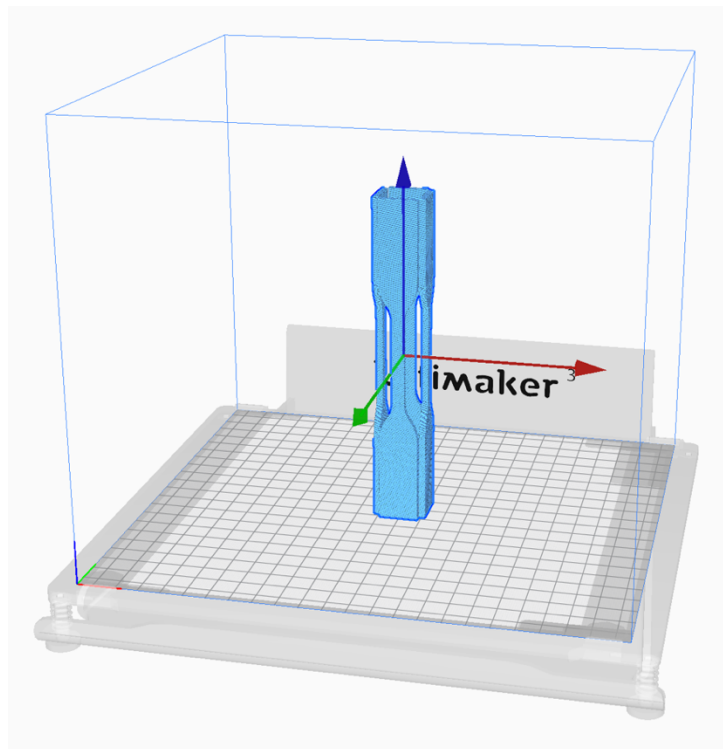


Figura 19. Orientación Vertical de la probeta sobre la placa
(Elaboración propia)

Orientación de Canto (XZ):

La orientación De Canto (XZ) nos ofrece unas propiedades de impresión similares a la orientación Plana (XY), ya que tenemos la posibilidad de poder elegir la dirección de fibra a diferencia de la orientación vertical.

El tiempo de fabricación será parecido a la orientación Plana, sin embargo la adhesión ente las capas será peor debido a una menor superficie de contacto con la placa.

En el caso de las probetas impresas de canto es necesario emplear material soporte para sustentar el material correspondiente a la distancia de referencia (imagen 20).

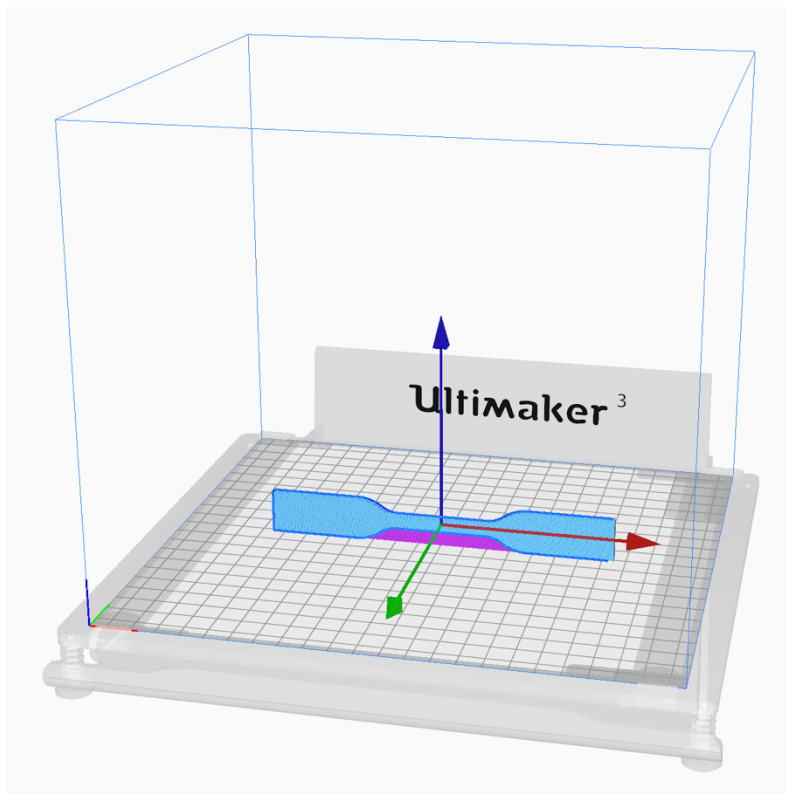


Figura 20. Orientación De Canto de la probeta sobre la placa
(Elaboración propia)

3.4 Máquina de ensayos

Para llevar a cabo los ensayos se ha empleado el modelo MARK 10, la cual esta equipada con una célula de carga capaz de medir fuerzas de hasta 1 KN conectada a través de la tarjeta de adquisición de datos al ordenador.

Los valores de carga aplicada son medidos mediante el software Labview a una frecuencia de 20 Hz, posteriormente los datos son exportados en un fichero Excel.

Los datos técnicos de la maquina de ensayos se encuentran en el anexo 3.

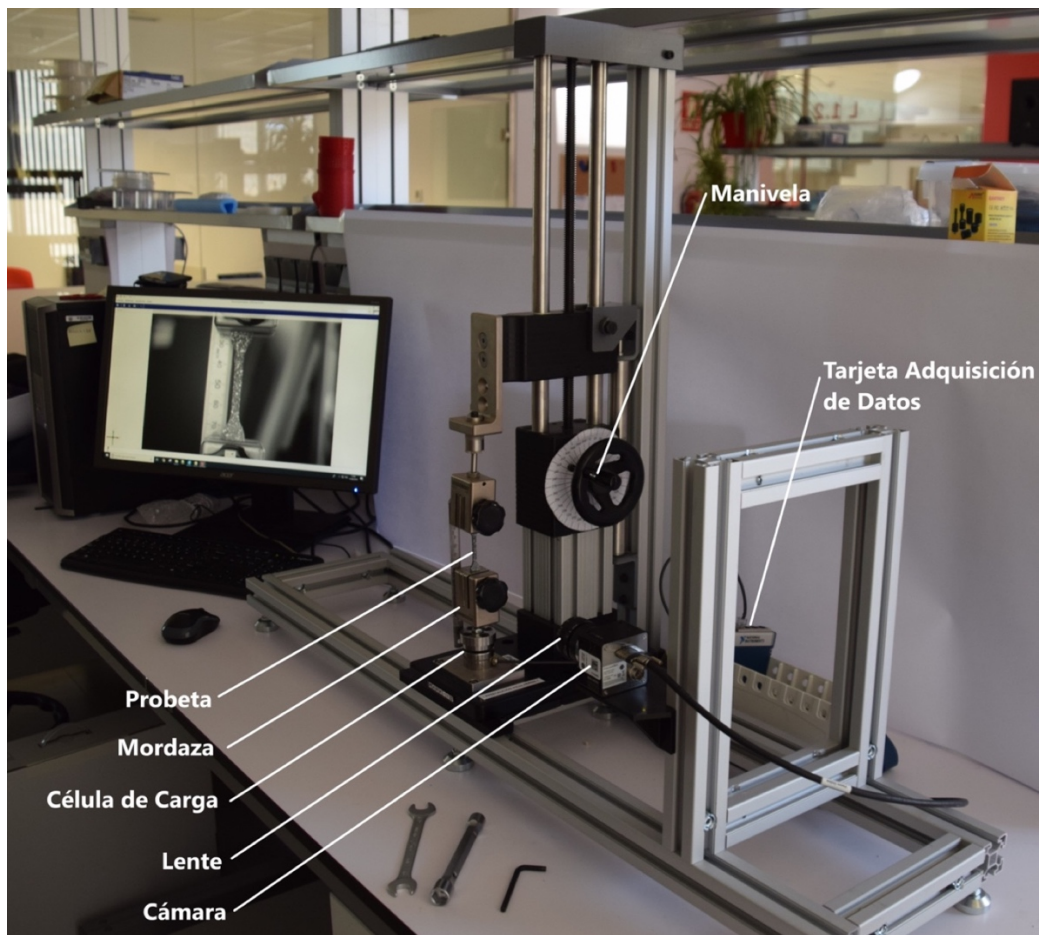


Figura 21. Máquina ensayos
(Elaboración propia)

Una célula de carga es un transductor que convierte la fuerza mecánica en señales eléctricas. Existen diferentes tipos de células de carga, pero la más común y la que vamos a emplear nosotros es la de galga extensiométrica.

Este tipo de célula de carga emplea una matriz de galgas para medir la deformación de un elemento de la estructura y convertirá en una señal eléctrica.

Cada galga que compone la célula de carga está formada por una resistencia eléctrica, que al aplicarle una fuerza se deforma. Esta variación en la longitud de la galga tiene como resultado que la resistencia eléctrica incremente su valor en caso de que se estire, y se reduzca cuando se comprime.

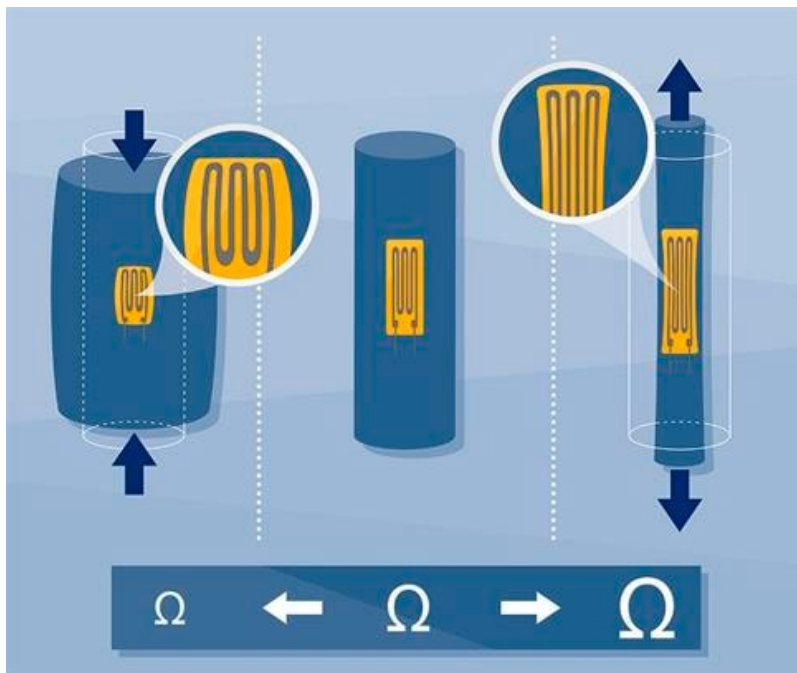


Figura 22. Funcionamiento de una galga
(<https://midebien.worldsecursystems.com>)

Por lo tanto, la variación de la resistencia eléctrica permite calcular la deformación de la galga extensiométrica. Donde llamamos k a la sensibilidad de la galga.

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R_0} k$$

Una vez conocida la deformación producida en la célula de carga podemos determinar la fuerza mediante el modulo de Young. Cuando un material es sometido a carga existe una relación lineal entre la tensión aplicada y la deformación producida, siempre y cuando estemos trabajando en el intervalo de deformación elástica.

$$F = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot E \cdot A$$

Las células de carga en general utilizan cuatro galgas extensométricas en una configuración de puente de Wheatstone, lo que implica que cada rama resistiva del circuito está activa. El uso de una configuración aumenta en gran medida la sensibilidad del circuito a los cambios de deformación, proporcionando unas medidas más precisas.

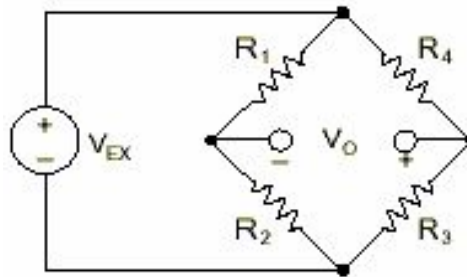


Figura 23. Puente de Wheatstone
(<http://www.ni.com/tutorial/7138/es/>)

Los datos técnicos de la célula de carga y la tarjeta de adquisición de datos que hemos empleado se encuentran en los apéndices 4 y 5.

3.6 Correlación de imagen digital

La obtención de los datos de deformación se logró mediante el uso de correlación de imágenes digitales (DIC). Esta técnica es un método óptico de medición sin contacto, que permite a partir de las imágenes tomadas durante el ensayo, medir coordenadas para la evaluación desplazamientos y deformaciones producidas.

Previamente a la realización del ensayo las probetas han de ser tratadas. Para ello se aplica una base de pintura negra sobre la superficie, y posteriormente se genera un moteado aleatorio de color blanco para generar el máximo contraste posible (Figura 24).

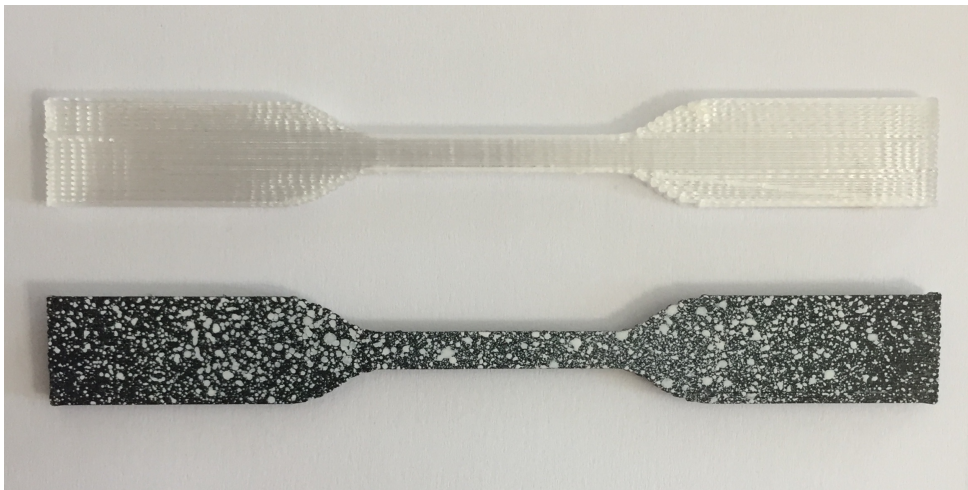


Figura 24. Probeta antes y después de ser acondicionada para realizar el ensayo a tracción. (Elaboración propia)

Se utilizan patrones de puntos para describir áreas de imagen discretas (facetas) y mediante la aplicación de algoritmos de correlación, se busca una región de la imagen de referencia en la imagen deformada, determinando el vector de desplazamientos en cada conjunto facetas procesadas.

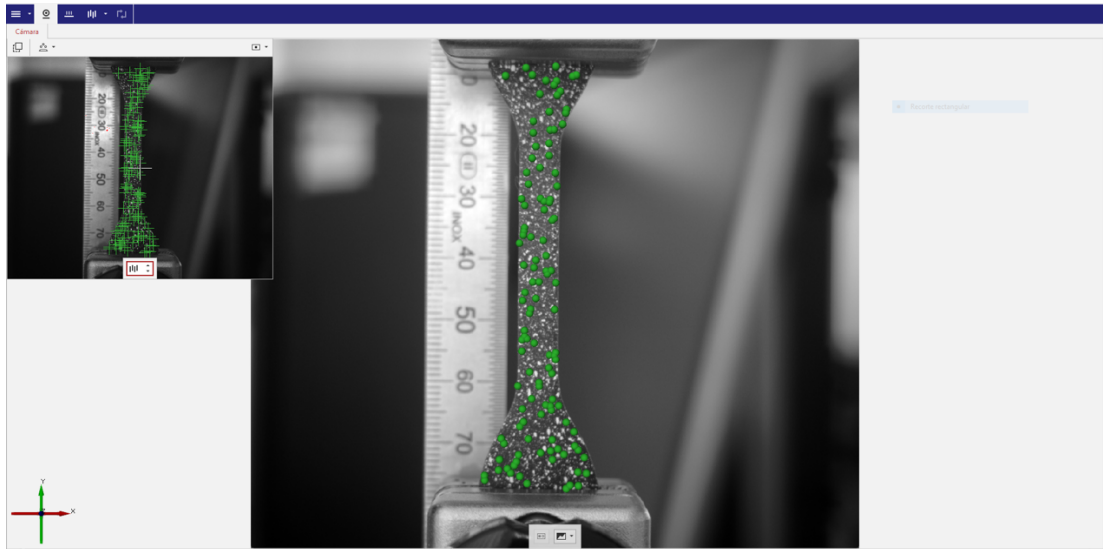
Las ventajas que presenta esta técnica respecto a otros métodos ópticos para medición de desplazamientos y deformaciones son varias:

- Mientras los extensómetros proporcionan una sola medida de desplazamiento o deformación, DIC puede capturar las deformaciones locales que surgen de la falta de homogeneidad, tales como concentraciones de tensión, inestabilidad plástica y otros fenómenos localizados.
- La luz necesaria para la medición de deformaciones puede ser natural.

- Los algoritmos que implementa la técnica tienen bajos requerimientos computacionales, pudiendo realizarse análisis en tiempo real.

Esta técnica también presenta algunas desventajas, tales como la dependencia de la calidad de las imágenes tomadas en los ensayos, y la pérdida de información de medición en las superficies donde se presente una rotura.

A la hora de tomar las imágenes en el ensayo se ha empleado el software GOM Snap 2D, el cual nos permite adquirir imágenes a una frecuencia de 20Hz, durante los 15 segundos aproximadamente que dura el ensayo, obteniendo así un total de 300 imágenes.



*Figura 25. Detalle del programa GOM Snap 2D
(Elaboración propia)*

Una vez realizado el ensayo, se procesaron las imágenes mediante el software GOM Correlate, seleccionando un intervalo de imágenes desde su estado inicial (referencia) hasta el punto de máxima deformación.

En la definición de los parámetros de correlación de imágenes las facetas fueron de 19×16 pixels. siendo la distancia entre centros de facetas 5 píxel.

Esta configuración estándar no requiere grandes tiempos de computación y nos ofrece una buena resolución a la hora de obtener información de desplazamientos y deformaciones en la superficie de la probeta. Para mejorar la precisión es necesario definir una longitud de referencia, por ello hemos colocado una regla calibrada, y tomamos una distancia real que conocemos.

A continuación, seleccionamos la longitud calibrada de la probeta y con la herramienta cambio de longitud, sabremos la deformación que experimenta a lo largo del eje vertical.

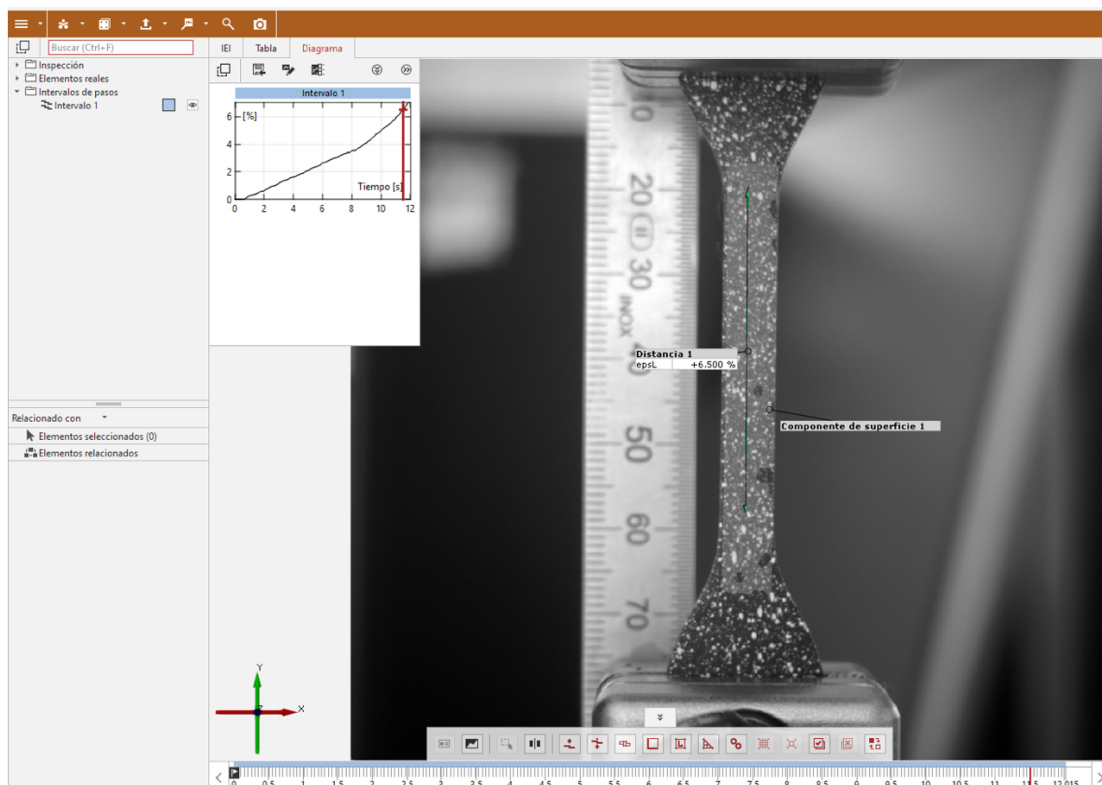


Figura 26. Detalle del programa GOM Correlate
(Elaboración propia)

Las imágenes se tomaron con una cámara digital EX0250MU3 que ofrece una resolución de 2448 x 2048 px integrada con un sensor CMOS de 2/3" y una velocidad de captura de 72 fps y una lente fija de 25 mm modelo 2514M5M de Azure Photonics.

Las especificaciones técnicas de la cámara y el sensor se adjuntan en los anexos 6 y 7.

3.7 Resultados del ensayo

3.7.1 Orientación Plana

Los datos obtenidos durante el ensayo han demostrado que esta configuración ha resultado ser la mejor en cuanto a resistencia mecánica, debido a que la adhesión entre capas es mayor gracias a que posee una mayor superficie de contacto con la placa de impresión.

Respecto a la fibra, las probetas con una orientación longitudinal [0], poseen un mejor comportamiento tanto en esfuerzos como deformación, ya que las cargas se aplicaron sobre las fibras, y no sobre la unión de estas.

Se observa que al variar la orientación de la fibra a la configuración [0,90] se produce una disminución significativa de la tensión máxima, esto se explica debido a que ahora la mitad de las capas tienen orientación longitudinal y la otra mitad transversal cuya resistencia es menor debido a la unión discontinua entre los cordones de filamento.

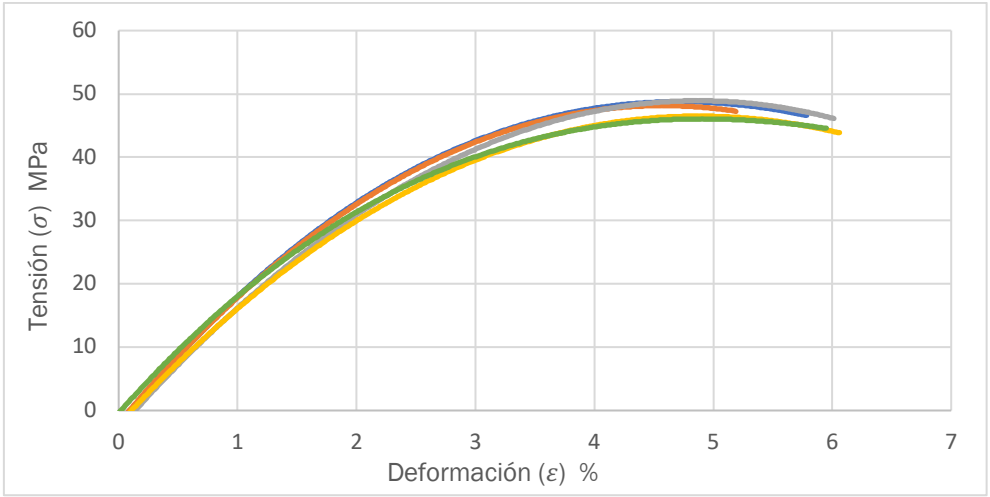
La orientación [45,-45] ha resultado ser la menos resistente, aunque se produce una deformación mayor que en la configuración [0,90].

Los resultados completos de esta orientación se muestran en la tabla 2.

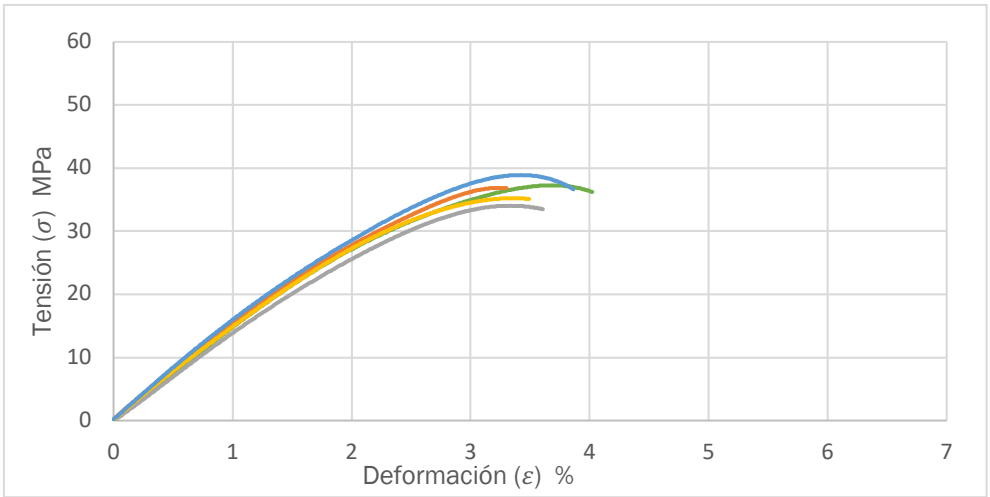
Propiedad	Orientación de fibra		
	[0]	[0,90]	[45,-45]
Tensión máxima	47,5594 MPa	36,4966 MPa	29,4554 MPa
Tensión a rotura	46,5677 MPa	35,5548 MPa	27,3979MPa
Deformación máxima	5,7771 %	3,6574%	4,3612 %
Modulo de Young	1909,76 MPa	1493,86 MPa	1304,02 MPa

Tabla 2. Resultados de ensayos a tracción en orientación plana.

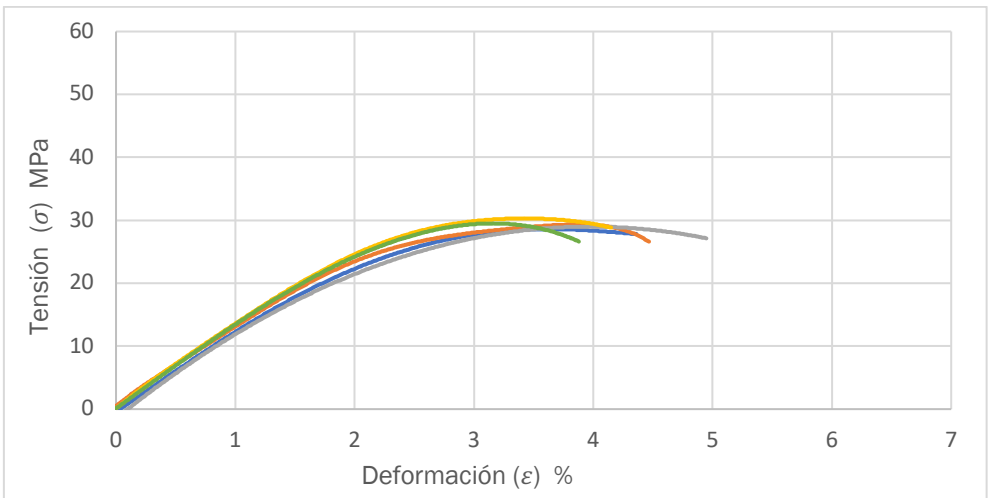
A continuación, se muestran las graficas tensión deformación para las distintas direcciones de fibra.



Grafica 1. Tensión-Deformación Plano [0]



Grafica 2. Tensión-Deformación Plano [0,90]



Grafica 3. Tensión-Deformación Plano [45,-45]

3.7.2 Orientación de canto

Esta orientación de impresión ha resultado similar a la orientación plana cuando la dirección de la fibra es longitudinal, existiendo entre ambas una diferencia del 7,16% en la tensión máxima alcanzada.

Esta diferencia se explica como hemos dicho anteriormente debido a la menor superficie de contacto con la placa de impresión. La deformación es muy similar a la producida en la orientación plana, siendo la diferencia entre ambas del 7,4%.

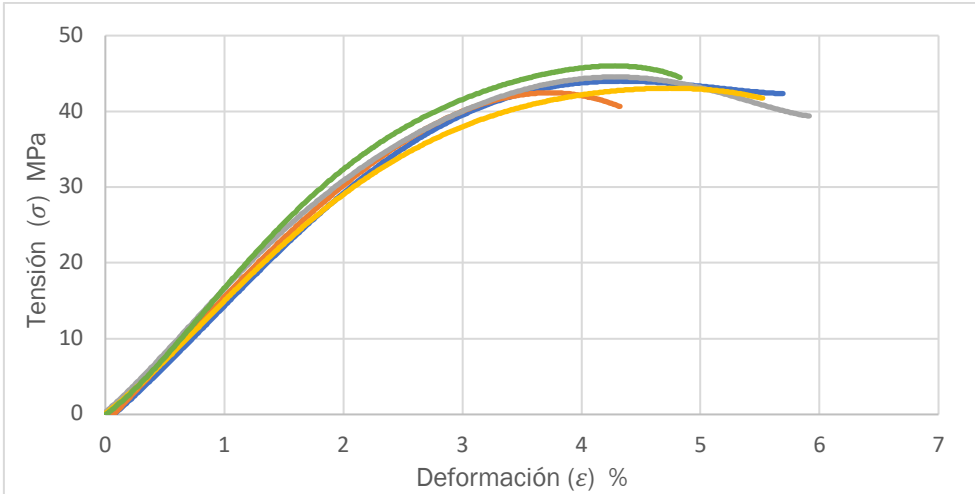
Al igual que ocurre en la orientación plana, cuando se varía la orientación de fibra de [0,90] a [45,-45] se produce una disminución de la tensión máxima y un aumento de la deformación.

Los resultados de el ensayo realizado en probetas de orientación de canto se muestran en la tabla 3.

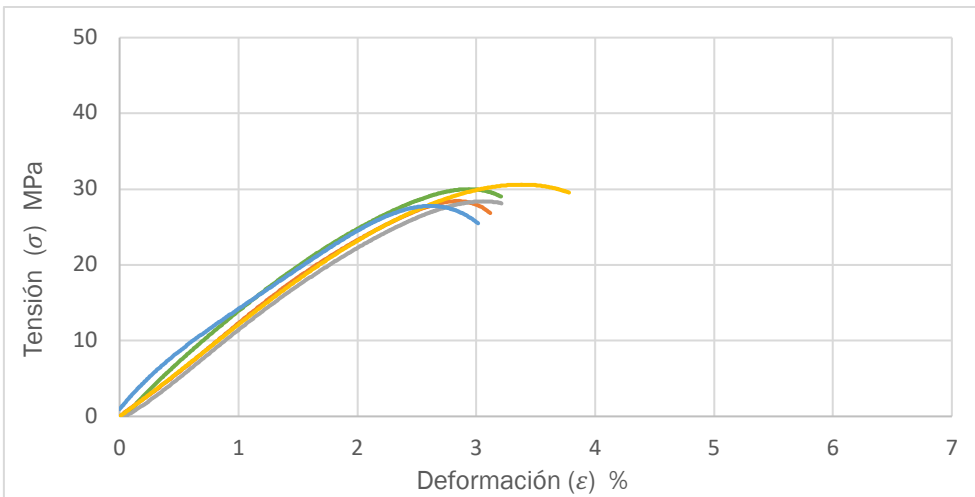
Propiedad	Orientación de fibra		
	[0]	[0,90]	[45,-45]
Tensión máxima	44,1559 MPa	29,2647 MPa	25,9282 MPa
Tensión a rotura	41,8455 Mpa	27,1407 MPa	22,5946 MPa
Deformación máxima	5,3479 %	3,2667 %	3,8753 %
Modulo de Young	1618,6 %	1214,94 MPa	1030,95 MPa

Tabla 3. Resultados de ensayo a tracción en orientación de canto.

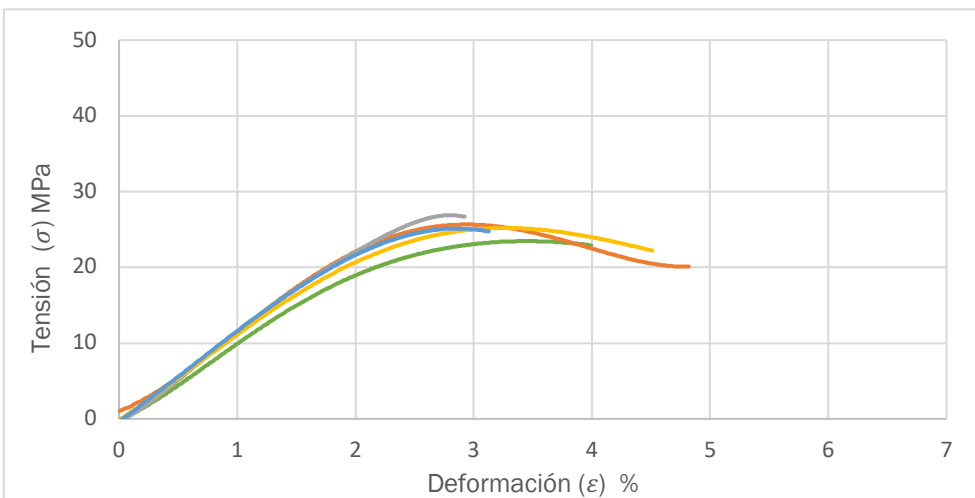
A continuación, se muestran las graficas tensión deformación para las distintas orientaciones de fibra.



Grafica 4. Tensión-Deformación Canto [0]



Grafica 5. Tensión-Deformación Canto [0,90]



Grafica 6. Tensión-Deformación Canto [45,-45]

3.7.3 Orientación de vertical

Las probetas verticales dieron como resultado un menor valor en la tensión máxima y de rotura, debido a que la resistencia de la unión de las fibras es significativamente menor que la de las propias fibras.

Esto se puede apreciar con claridad en la gráfica de tensión-deformación, ya que en muchos de los ensayos la tensión máxima coincide con la de rotura, y la deformación que se produce puede llegar a ser la mitad que para otras orientaciones de impresión.

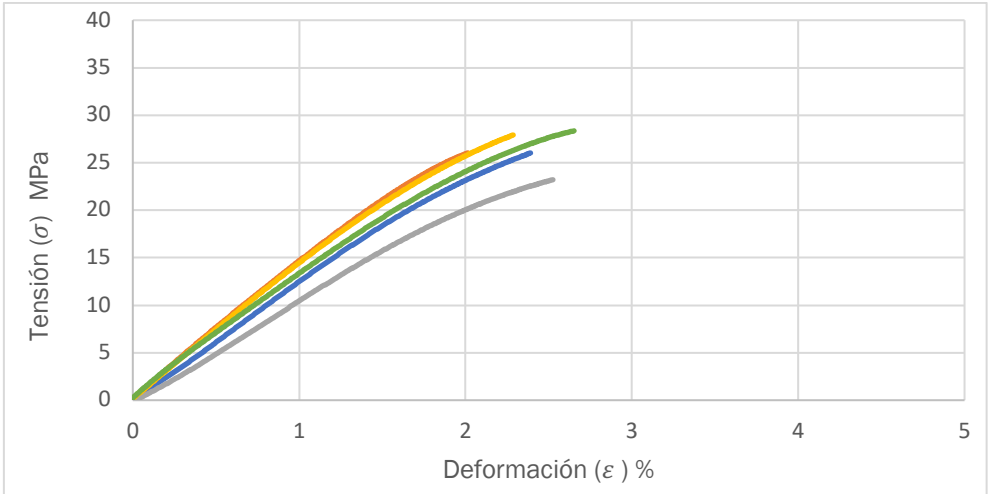
Se ha demostrado que variando la orientación de la fibra en capas alternas se logra reducir el efecto de la anisotropía. Siendo [0,90] la que ofrece una mayor resistencia y [45,-45] la que se deforma más antes de la rotura al igual que en el resto de las orientaciones de impresión.

Los resultados del ensayo en probetas de orientación vertical se muestran en la tabla 4.

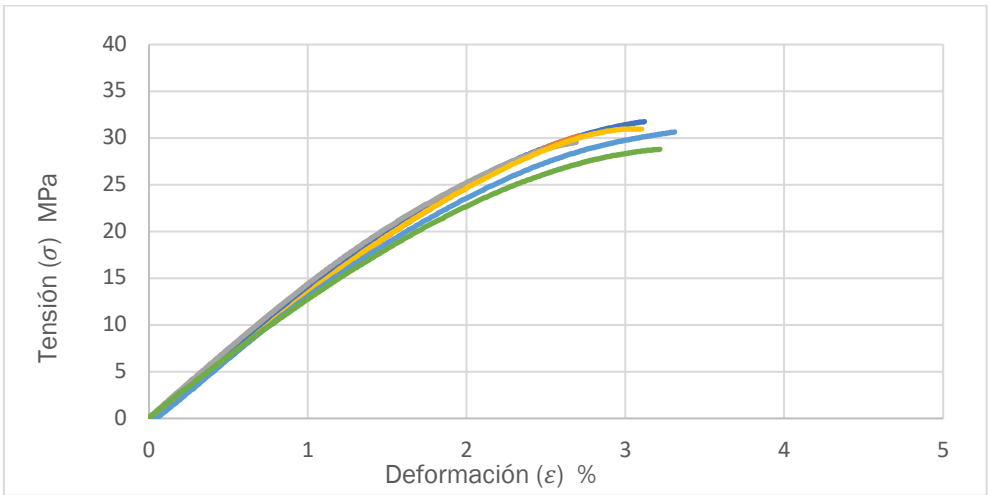
Propiedad	Orientación de fibra		
	[0]	[0,90]	[45,-45]
Tensión máxima	26,1994 MPa	30,4498 MPa	28,4139 MPa
Tensión a rotura	26,1903 MPa	30,4227 MPa	28,1836 MPa
Deformación máxima	2,3739 %	3,0251 MPa	3,2087 %
Modulo de Young	1267,456 MPa	1298,1 MPa	1134,988 MPa

Tabla 4. Resultados de ensayo a tracción en orientación vertical.

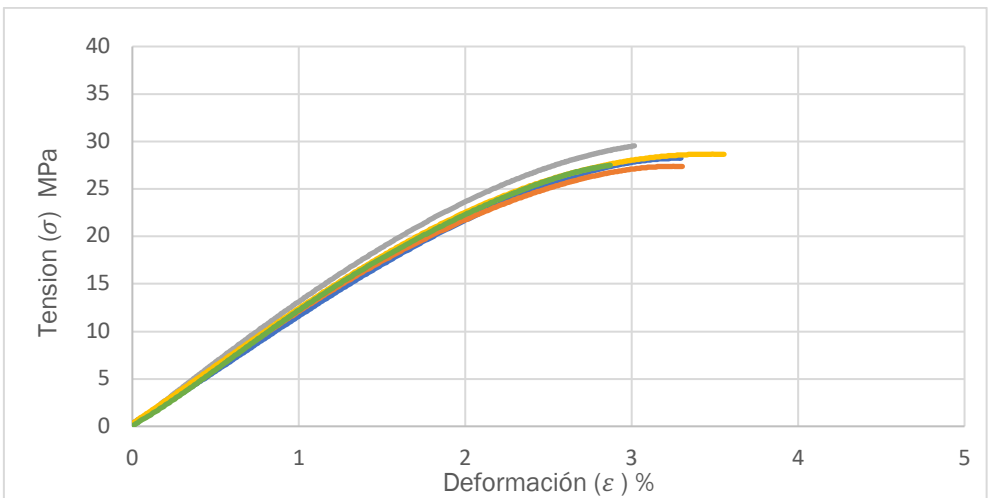
A continuación, se muestran las graficas tensión deformación para las distintas orientaciones de fibra.



Gráfica 7. Tensión-Deformación Vertical [0]



Gráfica 8. Tensión-Deformación Vertical [0,90]



Gráfica 9. Tensión-Deformación Vertical [45,-45]

3.7.4 Análisis de la fractura de las probetas

Además de los resultados de la curva de tensión-deformación, se evaluaron las superficies de fractura de las probetas ensayadas a de tracción. La relación entre la orientación de fibra y los modos de rotura requirieron observaciones microscópicas.

Las probetas se fracturaron de varias maneras y los modos de rotura más comunes para cada orientación se muestran en la Figura 27.

Estos resultados indican que se puede obtener una idea de las propiedades generales del material simplemente observando los modos de rotura de la muestra.

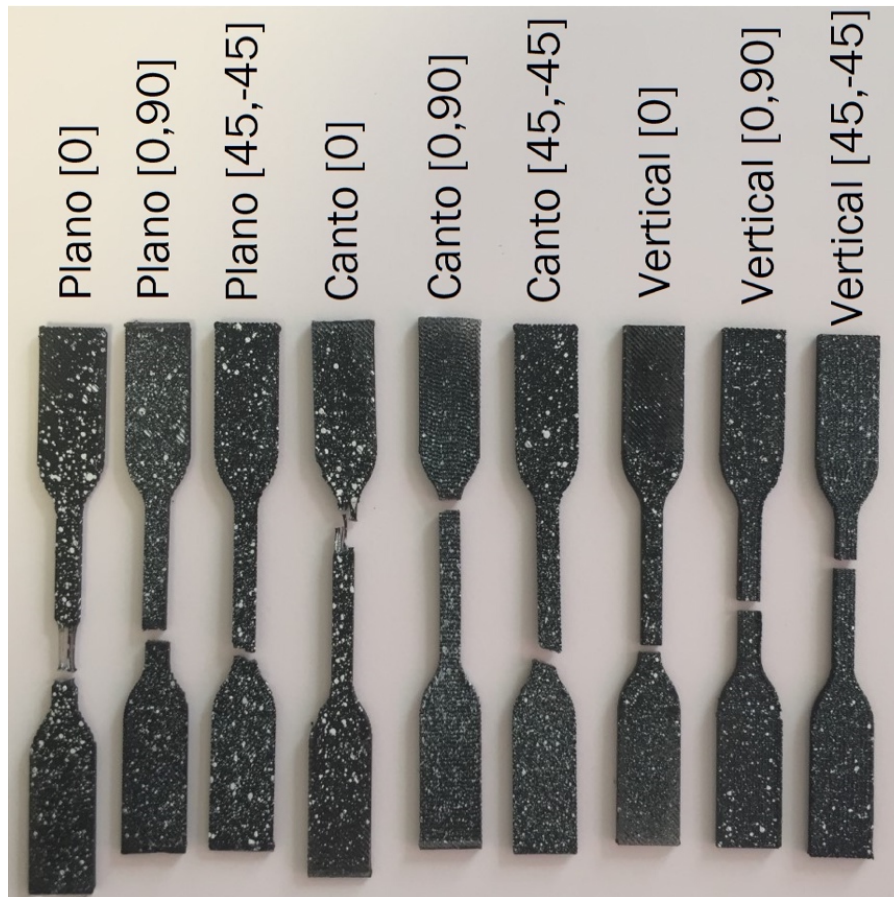


Figura 27. Vista macroscópica de la rotura en cada tipo de probeta
(Elaboración propia)

En función de la dirección que tienen las fibras respecto a la aplicación de la carga obtendremos distintos modos de rotura:

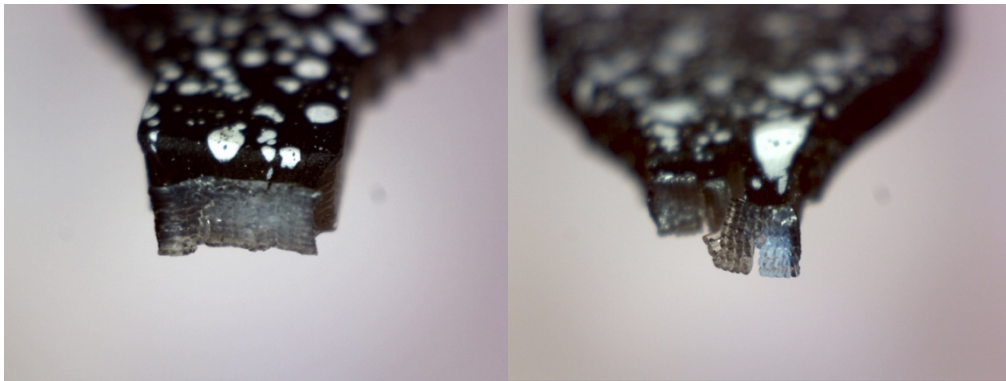
Dirección de fibra longitudinal [0]

Esta configuración ha sido la que mejores resultados ha dado, debido a que las fibras del material soportan una mayor tensión y se deforman más que la unión entre las propias fibras.

Las muestras axiales mostraron fallas de tracción de las fibras individuales, precedida de una gran deformación en la zona de estricción.

En la figura 14 podemos apreciar la diferencia entre la rotura de una muestra plana y otra impresa de canto respectivamente. La muestra Plana alcanzará una mayor resistencia a la tracción y deformación a rotura debido a una mejor adhesión entre las fibras.

La muestra De Canto presenta una rotura escalonada a lo largo de distintas zonas en longitud de referencia, lo que indica una menor adhesión entre las fibras.



*Figura 28. Zona de rotura en probetas longitudinales Plana y De Canto
(Elaboración propia)*

Dirección de fibra transversal [90]

Las probetas impresas en dirección vertical se comportaron de manera similar en la fractura, debido a que, en todas las configuraciones, las fibras se unen de manera transversal respecto a la dirección de aplicación de la carga.

Estas muestras fracturaron limpiamente en el plano perpendicular a la dirección de carga (Figura 13).

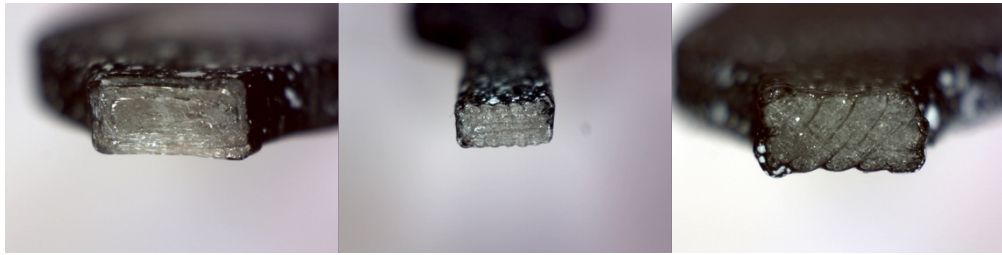


Figura 29. Zona de rotura en probetas verticales para las orientaciones de fibra [0], [0,90], [45,-45] respectivamente.
(Elaboración propia)

Las probetas verticales que mantienen constante la orientación de fibra en las distintas capas, fallaran prematuramente ya que el apilamiento de capas en tres dimensiones crea aproximaciones lineales en la zona de los radios, y por lo tanto aparecerán concentraciones de tensión (Figura 30).

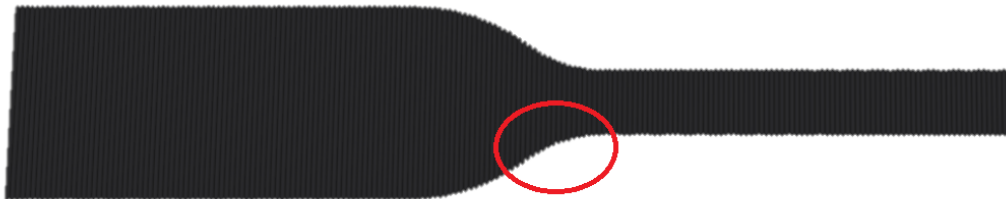


Figura 30. Concentraciones de tensión en probetas verticales
(Elaboración propia)

Variando la orientación de las fibras en capas alternas se logra reducir el efecto de la anisotropía, incrementando la resistencia de las probetas, y reduciendo su fragilidad.

Dirección de fibra [0,90]

La orientación de fibra [0,90] consiste en una capa de fibras orientadas en la dirección longitudinal, seguidas de una capa en la dirección transversal. Por lo tanto, como podría esperarse la tensión de rotura será un valor comprendido entre la tensión de la orientación longitudinal y transversal.

La superficie de rotura para la mayoría de las muestras se lleva a cabo limpiamente a lo largo del Plano perpendicular (Figura 15).

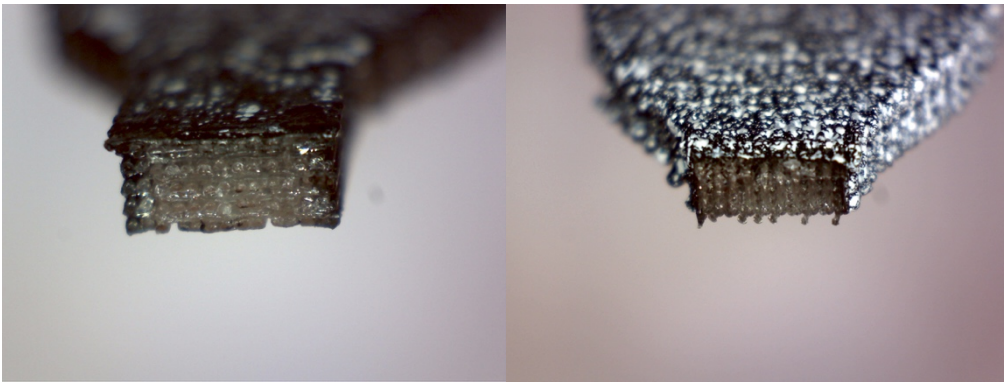


Figura 31. Zona de rotura en probetas con orientación de fibra [0,90]

Dirección de fibra [45,-45]

La muestra entrecruzada [45,-45] mostró una falla de corte a lo largo de la línea 45 en la vista macroscópica (Figura 11), pero la vista microscópica reveló fallas repetidas de fibras individuales por cizallamiento y tensión.

Esto es debido a que las fibras tendían a desgarrarse en lugar de romperse limpiamente, dando como resultado un patrón similar al de una sierra (Figura 16). Se puede apreciar que esta configuración aporta una menor resistencia, pero se incrementa la ductilidad.

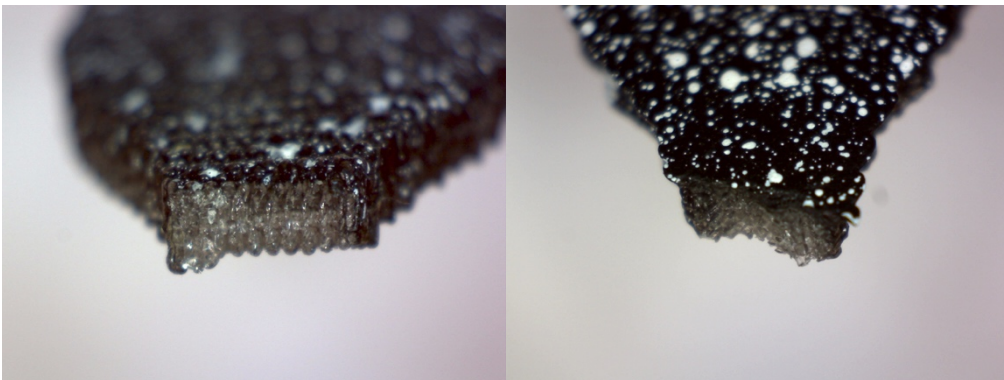


Figura 32. Zona de rotura en probetas con orientación de fibra [45,-45]

3.7.5 Conclusiones del ensayo

De los resultados obtenidos se ha observado que la orientación de impresión influye de manera significativa en la adhesión que tienen las fibras entre sí.

A menudo la adhesión entre las capas influye en mayor medida en la resistencia, que el material del que se compone. La adhesión entre las capas depende de parámetros que pueden ser controlados mediante el software de la impresora. Por lo tanto, será necesario elegir correctamente la orientación de impresión ya que esta puede condicionar la dirección de fibra.

La orientación de impresión que genera una mejor adhesión entre las capas será la orientación plana, debido a que es la más estable y que posee la mayor superficie de contacto con la placa.

En cuanto a la dirección de la fibra, las muestras que mejores resultados han ofrecido son aquellas en las que las cargas de tracción se transporten axialmente a lo largo de las fibras.

La diferencia de la tensión máxima alcanzada entre una muestra con orientación de fibra transversal y longitudinal en algunos casos puede llegar a ser casi del doble, de ahí la importancia de este parámetro.

En general las probetas que mostraron superficies de fracturas más limpias tuvieron una tensión notablemente menor en comparación con el resto de las orientaciones anteriormente mencionadas.

4. Fabricación de una férula a medida de antebrazo y muñeca.

La tecnología de impresión 3D se complementa con las actuales técnicas de escaneo y digitalización en 3D, para desarrollar piezas cuyas concepciones de diseño las hacen únicas.

La finalidad de esta pieza es crear un sustituto a las escayolas de yeso como método para inmovilizar ciertas extremidades del cuerpo, adaptadas a la anatomía y patología de cada paciente.

Las ventajas que nos ofrece esta férula frente a las escayolas tradicionales son numerosas, entre las que cabe destacar:

- Son livianas: pueden llegar a ser hasta un 75% más ligeras que una escayola convencional, además ocupan menos espacio, por lo que pueden ser cubiertas por la ropa del paciente.
- Posee una morfología con multitud de aperturas que permiten la circulación del aire, por lo que no dan calor ni generan olor. Estos huecos permiten la incorporación de electrodos para realizar terapias de electro estimulación que aceleran la recuperación del paciente.
- Al ser una pieza realizada en PET-G nos ofrece cierta flexibilidad y buen comportamiento ante los golpes. Otra de las ventajas que nos aporta es que al tratarse de un material biocompatible nos aseguramos que puede cumplir con todas las garantías sanitarias.

El primer paso en la fabricación es la obtención de un Modelo CAD, partiendo de la digitalización de la zona afectada del paciente. Este trabajo, al tratarse de un proyecto en grupo la fase de diseño ha sido realizada por mis compañeros.

En función de la orientación de la pieza sobre la placa de impresión hemos de configurar unos parámetros para lograr un desarrollo óptimo de la pieza.

4.1. Orientación Vertical

Esta configuración nos ofrece una mayor calidad en el producto final, debido a un mayor número de capas, como contraprestación tendremos un peor comportamiento de la pieza frente a cargas a flexión y tracción.

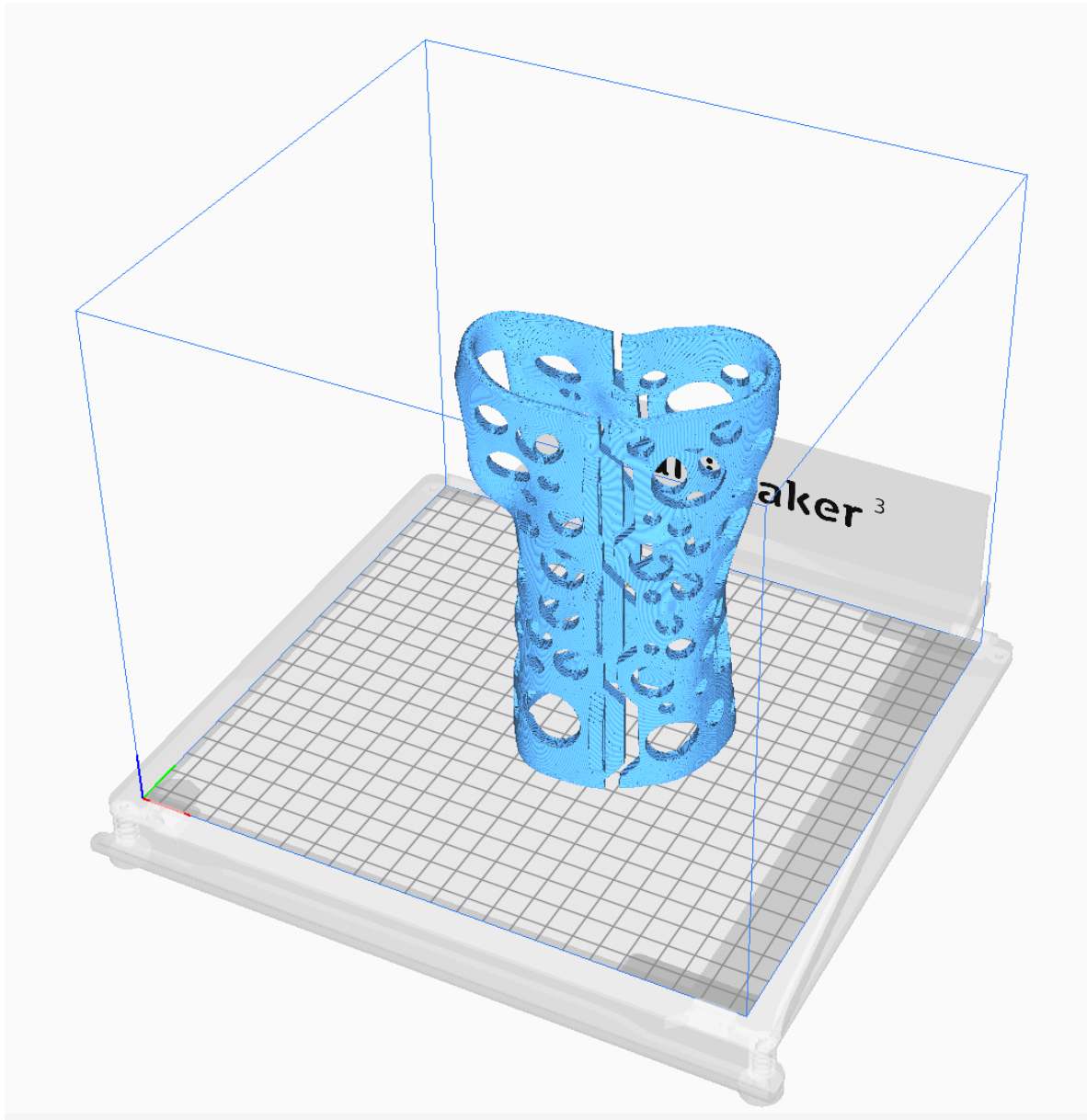
Uno de los parámetros que más influencia tendrá será la velocidad de extrusión, ya que debemos asegurar que esta sea lo suficientemente lenta como para lograr que el material se solidifique con rapidez cuando se forman voladizos de ángulo mayor de 45°. Para lograr esto es preciso activar los ventiladores al máximo de su capacidad, y reducir ligeramente la temperatura de extrusión.

En la tabla 3 se muestran los principales parámetros elegidos para esta configuración:

Parámetro	Ultimaker® 3 PETG Valor
Tamaño del extrusor (mm)	0,4
Altura de capa (mm)	0,2
Ancho de línea (mm)	0,3
Grosor de pared (mm)	0,6
Relleno (%)	20
Dirección de líneas de relleno	[0,90]
Temperatura del extrusor (C°)	240
Temperatura plato impresión (C°)	70
Velocidad de impresión (mm/s)	25
Velocidad del ventilador (%)	100

Tabla 5. Parámetros de impresión para fabricación de férula Vertical

La principal ventaja que obtenemos de esta configuración es la posibilidad de fabricar la pieza sin la necesidad de emplear material soporte, el cual tiene un precio bastante superior al material principal, abaratando de este modo el precio del producto.



*Figura 13. Férula impresa en orientación Vertical
(Elaboración propia)*

La cantidad de material empleada para esta configuración será 92 gramos, lo que conlleva un precio de 4,11 euros.

El tiempo de fabricación para la pieza en orientación vertical son 18 horas.

4.2 Dirección Horizontal

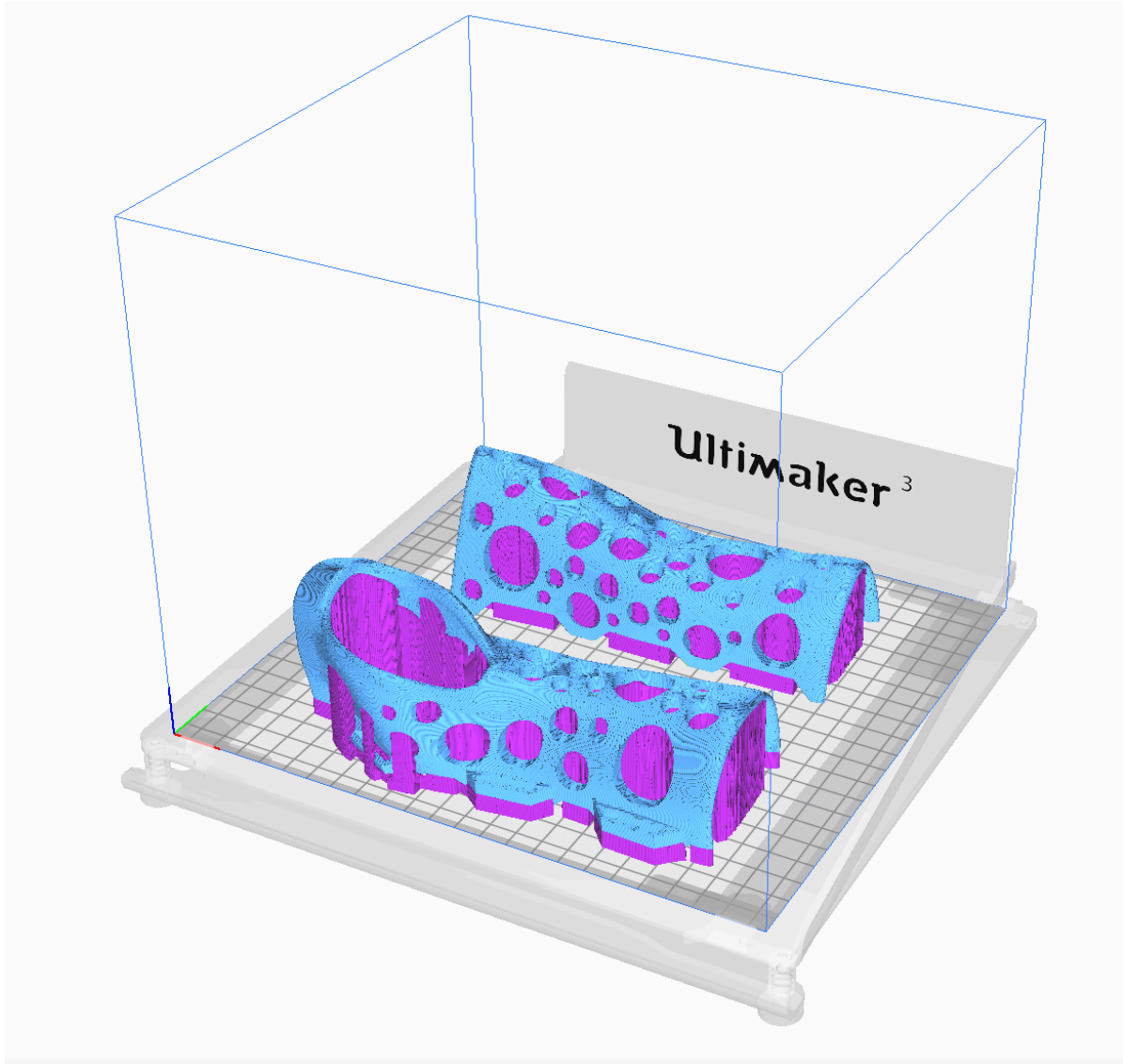
Esta configuración ofrece un mejor comportamiento frente a cargas y flexión tracción, si embargo será necesario emplear material auxiliar para desarrollar esta pieza, lo que supondrá un incremento tanto en coste como en tiempo de fabricación.

Se puede aumentar la temperatura de extrusión, ya que no existe la necesidad de solidificar el material con la misma rapidez que en la orientación vertical y se puede incrementar la temperatura de extrusión, mejorando las propiedades mecánicas.

Parámetros empleados en la impresión de la férula horizontal (tabla 6):

Parámetro	Ultimaker® 3 PETG Valor
Tamaño del extrusor (mm)	0,4
Altura de capa (mm)	0,2
Ancho de línea (mm)	0,3
Grosor de pared (mm)	0,6
Relleno (%)	20
Dirección de líneas de relleno	[0]
Temperatura del extrusor (C°)	240
Temperatura plato impresión (C°)	70
Velocidad de impresión (mm/s)	25
Velocidad del ventilador (%)	100

Tabla 6. Parametros de impresión para fabricación de férula horizontal



*Figura 34. Ferula impresa en orientación horizontal
(Elaboración propia)*

La cantidad de PETG necesaria para esta pieza es de 75 gramos, así como 87 de material soporte PVA, lo que supone un precio total de la pieza de 12,2, casi tres veces superior que para la orientación vertical.

El tiempo de fabricación para esta orientación serán 19 horas, una hora más que para la pieza vertical.

5. Conclusiones

A lo largo de este proyecto se ha demostrado la viabilidad de crear piezas funcionales en 3D para campos de aplicación como la medicina y la ortopedia, ya que estas suponen un importante avance en el proceso de rehabilitación del paciente, ya sea en términos de confort, así como en la resistencia y durabilidad que ofrecen las férulas desarrolladas.

A partir de los resultados que se han obtenido en los ensayos de tracción de probetas, se ha conseguido optimizar tanto el diseño como los parámetros de impresión para lograr un mejor comportamiento mecánico de los prototipos.

En el aspecto personal se han adquirido amplios conocimientos sobre fabricación mediante impresión 3D, así como el manejo de distintos programas de diseño asistido por ordenador como Autodesk Inventor y Fusion 360.

Como resultado del trabajo en equipo se han logrado cumplir con éxito las fases de diseño, fabricación y prueba de prototipos, que esperamos no se quede únicamente en un trabajo fin de grado, sino que sirva como base de un futuro negocio a través de la colaboración con ortopedias.

6. Líneas futuras

Actualmente se está trabajando para acoplar un sensor de desplazamiento a la mordaza de la máquina de ensayo para así poder obtener otra medida de deformación a parte del método DIC, que como se ha visto a veces este método genera pérdida de información a la hora de medir los desplazamientos en la superficie de la probeta.

También se pretende incorporar a la máquina de ensayos un motor eléctrico capaz de fijar una velocidad de ensayo concreta constante, para obtener unos resultados más precisos.

Con estas mejoras en un futuro se espera poder caracterizar otros materiales para aplicaciones que requieran unas propiedades mecánicas de los materiales más exigentes tales como el Nylon.

En cuanto al desarrollo de prototipos, espero que este proyecto sirva como base y ayuda para desarrollar distintas órtesis para otras partes del cuerpo y patologías, ya que el proceso que se ha seguido puede ser extrapolado a todo tipo de productos de apoyo.

7. Bibliografía

Impresión 3D:

Redwood, Ben (2017): The 3D Printing Handbook; 3D Hubs; ISBN:978-90-827485-0-5 [1]

<https://www.3dnatives.com/es/fdm-o-sla-impresion-3d-131220172/> [2]

<https://www.materialise.com/es/manufacturing/tecnologia-de-impresion-3d/modelado-por-deposicion-fundida> [3]

Enrique Pérez. Memoria de TFG. Grado en Ingeniería Mecánica. [4]

PETG:

<https://bitfab.io/es/blog/petg-impresion-3d/> [5]

<https://www.filaments.directory/en/plastics/petg> [6]

https://filament2print.com/es/blog/49_petg.html [7]

Ensayo de materiales:

Jason T. Cantrell, (2017) "Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts", Rapid Prototyping Journal, Vol. 23 Issue: 4, pp.811-824, <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2016-0042> [8]

Sung-Hoon Ahn, Michael Montero, Dan Odell, Shad Roundy, Paul K. Wright, (2002) "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS", Rapid Prototyping Journal, Vol. 8 Issue: 4, pp.248-257 [9]

DIC:

<https://digitalimagecorrelation.org> [11]

Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto E. López-Alba(1) R. López-García(1) , R. Dorado(1), F. A. Díaz (1) [10]

Celula de carga:

<http://www.ni.com/tutorial/7138/es/> [12]

<https://www.hbm.com/es/6768/funcionamiento-de-una-celula-de-carga-de-galgas-extensometricas/> [13]

Anexos

Anexo 1. Características de la impresora Ultimaker 3

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y PROPIEDADES DE ULTIMAKER 3	
Tecnología	Fabricación con Filamento Fundido (FFF)
Cabezal de impresión	Doble extrusor, con mecanismo retráctil en el segundo extrusor. Extrusores fácilmente intercambiables.
Bandeja de impresión	Boquilla Izquierda: 213 x 213 x 200 mm. Boquilla Derecha: 213 x 213 x 200 mm. Doble extrusor: 197 x 215 x 200 mm.
Diámetro del filamento	2.85mm.
Resolución de capa	Boquilla 0.4mm: 20-200 micras
Precisión X, Y, Z	12.5, 12.5, 2.5 micras
Velocidad recorrido del cabezal	30 – 300 mm/s.
Velocidad del flujo de material	0.40: 16mm ³ /s
Materiales Ultimaker	PLA, PVA, ABS, CPE y Nylon
Diámetro de boquilla	0.4mm.
Temperatura de boquilla	180 – 280 °C
Temperatura bandeja de impresión	20 – 100 °C
Tiempo de calentamiento de boquilla	< 2 minutos
Tiempo de calentamiento bandeja	< 4 minutos (20 – > 60 °C)
Nivel de ruido	50 dBA
Cambio de boquilla extrusor	Sistema push & clic: fácilmente intercambiables
Sistema de Filamento	Abierto, con soporte para 2 bobinas de 750g incluido. Sistema NFC para detectar automáticamente el tipo de material (compatible con bobinas Ultimaker)
Contectividad	WiFi, Ethernet y USB
Nivelación de bandeja de impresión	Sistema de nivelación automático
Cámara de vídeo	Integrada

DIMENSIONES FÍSICAS

Impresora con accesorios montados	49,3 x 33,8 x 58,8 cm.
Impresora sin accesorios montados	35,3 x 33,8 x 38,8 cm.
Peso Neto	10,6 Kg.
Peso de envío	15,5 Kg.
Dimensión de caja de envío	39,0 x 38,0 x 56,5 cm.

REQUISITOS ELÉCTRICOS	
Input	100 - 240V 4A, 50-60Hz 221 W max.
Output	24 V DC, 9.2 A

CONDICIONES AMBIENTALES	
Condiciones de trabajo ambiental	15 - 32 °C, 10 - 90% de humedad relativa sin condensación. Consulte las especificaciones técnicas de material para las optimas condiciones de trabajo.
Condiciones de almacenamiento	0 - 32 °C

SOFTWARE ULTIMAKER 3	
Software suministrado	Cura 2 - Software Oficial de Ultimaker
Sistemas Operativos soportados	Windows, Mac, Linux
Tipo de archivos	STL, OBJ, 3MF
Tranferencia de archivos	Impresión directa desde Cura vía Network/WiFi, Impresión mediante conector USB

Anexo 2. Propiedades del Material PETG



SMARTFIL® PETG

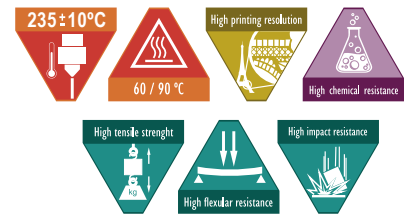
Copolyester con un 91% de transparencia en su estado natural, de gran parecido al vidrio y con una gran resistencia química también. Es muy fácil de imprimir, ya que tiene muy baja contracción y puede imprimirse sin cama caliente.

Copolyester with 91% transparency in its natural state, it is very glass like, with high chemical resistance. Accepted for use with food products (FDA). It is very easy to print, as it has very low shrinkage and requires no warm bed.

PETG

Colores Disponibles / Available Colours

Color	Name	Colour
Natural	Natural	Nature
Negro	True Black	Black



Physical Properties	Typical Value	Test Method		
Material Density	1,27 g/cm ³	ASTM D792		
Chemical Name	Polyethylene Terephthalate Glycol			
Mechanical Properties	Typical Value	Test Method		
Flexural Modulus	2100 MPa	ASTM D790		
Flexural Strength	69 MPa	ASTM D790		
Notched Izod Impact	105 J/m	ASTM D256		
Rockwell Hardness (R Scale)	108 R	ASTM D785		
Specific Gravity	1.27	ASTM D1505		
Tensile Yield Strength	50 MPa	ASTM D638		
Thermal Properties	Typical Value	Test Method		
Heat Distorsion Temperature	70 °C	ASTM D648		
Vicat Softening Temperature	85 °C	ASTM D1525		
Printing Properties	Typical Value			
Print Temperature	235±10 °C			
Hot Pad	60-90 °C			
Fan Layer	On (100%)			
Size	Net W.	Gross W.	Diameters	Packaging Characteristics
M	750 g	975 g	1.75/2.85 mm	SmartBag, security seal
XL ¹	3300 g	3864 g	1.75/2.85 mm	SmartBag, security seal
XXL ¹	5600 g	6346g	1.75/2.85 mm	SmartBag, security seal
XXXL ¹	7000 g	7746 g	1.75/2.85 mm	SmartBag, security seal

(1) XL, XX and XXL son fabricados bajo demanda. Plazo de entrega entre 1 y 5 semanas.
XL, XX and XXL spools are made under order. Delivered term between 1 and 5 weeks.



Recyclable
Recyclable
Recyclable



Apto para contacto
con alimentos
Food Approved
Aliments approuvés

Nota: Ninguno de nuestro filamentos contiene material reciclado con el fin de ofrecer filamentos de la mejor calidad.

Note: None of our filaments is produced with recycled material in order to get the highest quality filaments.

Anexo 3. Máquina de ensayos Mark 10-ES30

Data Sheet

32-1048 REV 0618

Manual Force Test Stand ES30

Page 1 of 2

The ES30 is a versatile test stand ideal for many compression and tensile testing applications. It can accept a wide variety of sample shapes and sizes and can be configured in many positions due to modular design. Convenient side-mounted hand wheel operation enables the user to easily and accurately test up to 200 lbf (1 kN) of force, with repeatable results. Use the ES30 with any Mark-10 force gauge and force gripping fixtures to create a complete testing solution.

Specifications

Load capacity:	200 lbf [1,000 N]
Loading method:	Side-mounted hand wheel
Maximum travel:	13 in [330 mm]
Travel Rate:	0.05 in [1.27 mm] per rev.
Warranty:	3 years (see individual statement for details)

Optional Equipment

Digital travel display ESM001	6 in [150 mm] travel, 0.0005 in [0.01 mm] resolution (150 mm x 0.01), SPC output for automated data collection.
Digital travel display ESM004	Same as above, 12 in [300 mm] travel.
Column extensions	Available in 6 in, 12 in, and 24 in, and custom lengths



Digital travel display

In The Box

The ES30 test stand is shipped as shown at right, and includes the following accessories:

- (1) G1024 extension rod, 2"
- (1) G1028 small hook
- (1) G1038 medium hook
- (1) G1009 compression plate, 2" dia.
- (1) G1039 coupling, #10-32F/F
- (1) Allen wrench set
- (1) Hand wheel
- (4) Thumb screw for force gauge
- (1) Resource CD



The ES30 is shown in a typical peel testing application, with Series 5 digital force gauge, digital travel display, and film & paper grips.

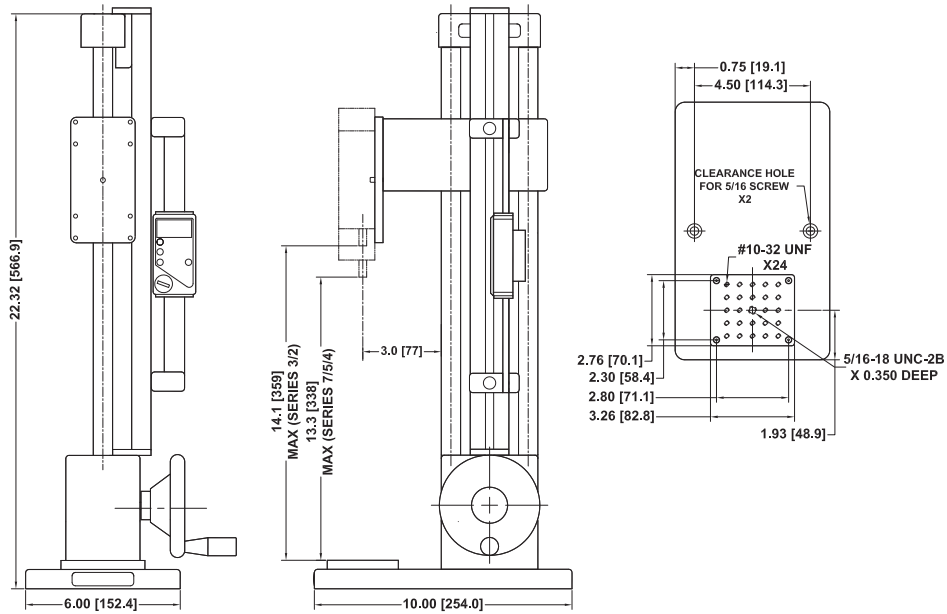
MARK-10

Mark-10 Corporation ■ www.mark-10.com ■ info@mark-10.com
Toll-free: 888-MARK-TEN ■ Tel: 631-842-9200 ■ Fax: 631-842-9201

3 YEAR
WARRANTY

Specifications subject to change without prior notice

Dimensions in [mm]



Ordering Information

Model No.	Description
ES30	Test stand, 200 lbf
ESM001	Digital travel display, 6"
ESM004	Digital travel display, 12"
ESM003-1	Column extension for ES30, 6"
ESM003-2	Column extension for ES30, 12"
ESM003-3	Column extension for ES30, 24"



Mark-10 Corporation ■ www.mark-10.com ■ info@mark-10.com
 Toll-free: 888-MARK-TEN ■ Tel: 631-842-9200 ■ Fax: 631-842-9201



Specifications subject to change without prior notice

Anexo 4. Célula de carga U93



U93

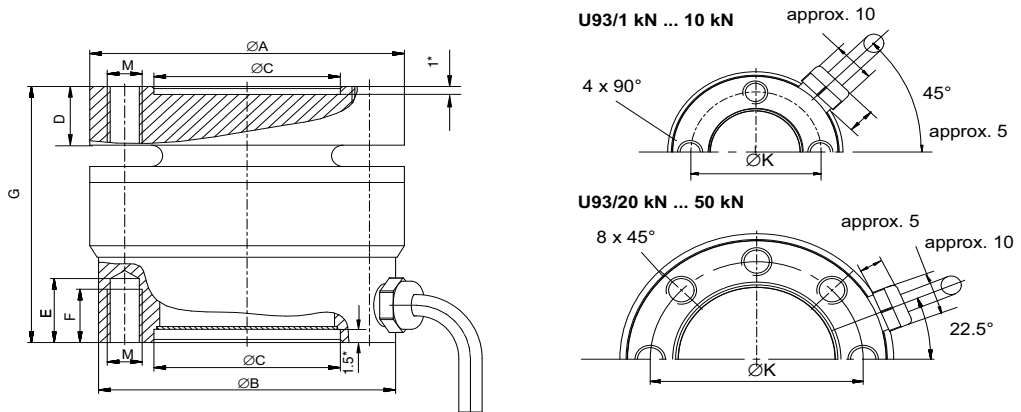
Force Transducer

Special features

- Tensile/compressive force transducer
- Simple installation thanks to flange connection on both sides
- Integrated TEDS electronic data sheet
- Compact
- Robust
- Stainless steel transducer
- Suitable for cable drag chains

Data sheet

Dimensions (in mm; 1 mm = 0.03937 inches)



Nominal (rated) force	ØA	ØB	ØCH ⁸	D	E	F	G	ØK ^{±0.1}	M
U93/1 kN ... 10 kN	35	33	18	6.2	9	7	30.5	26	M5
U93/20 kN ... 50 kN	54	51	32	11	12	10	48	42	M6

* admissible centering depth

B02083_03_E00_00 HBM: public

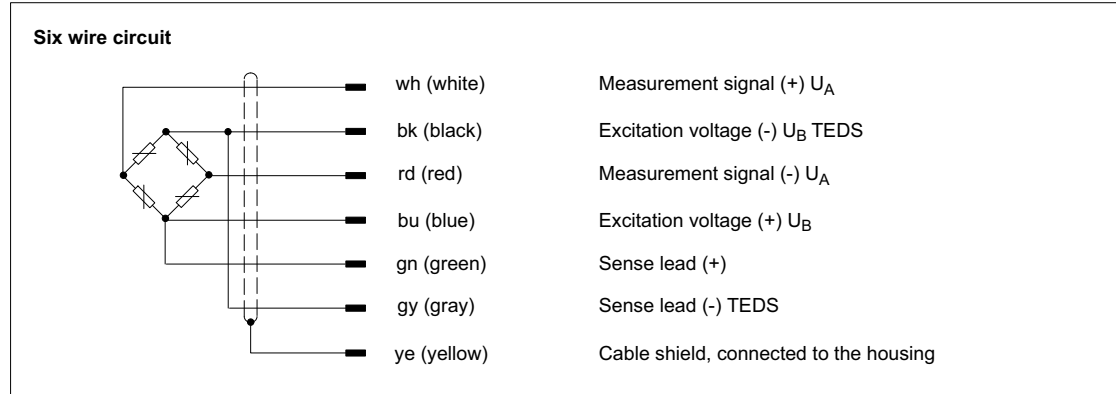


Specifications (data per VDI/VDE 2638 standards)

Type	U93							
	F _{nom}	kN	1	2	5	10	20	50
Nominal (rated) force	F _{nom}	kN	1	2	5	10	20	50
Nominal (rated) sensitivity	C _{nom}	mV/V	0.5	1	0.5	1	0.5	1
Relative sensitivity error (compression)	d _c	%	<±0.5					
Relative zero signal error	d _{s,0}	mV/V	<±0.075					
Rel. reversibility error (0.5 F_{nom})	v _{0.5}	%	<±0.5					
Relative linearity error	d _{lin}	%	<±0.5					
Effect of temperature on sensitivity/ 10 K, related to nominal (rated) sensitivity	TK _C	%	<±0.5					
Effect of temperature on zero signal/ 10 K, related to nominal (rated) sensitivity	TK ₀	%	<±0.8	<±0.5	<±0.8	<±0.5	<±0.8	<±0.5
Relative creep over 30 min	d _{crF+E}	%	<±0.2					
Effect of lateral forces (lateral force 10%F_{nom})¹⁾	d _Q	%	< 0,2		< 0,5		< 0,4	
Effect of eccentricity per mm	d _E	%	< 0.07		< 0.03		< 0.12	
Input resistance	R _i	Ω	> 295					
Output resistance	R _o	Ω	190 ... 400					
Isolation resistance	R _{is}	Ω	>1·10 ⁹					
Reference excitation voltage	U _{ref}	V	5					
Operating range of the excitation voltage	B _{U,G}	V	0.5...12					
Nominal temperature range	B _{t,nom}	°C	-10...+70					
Operating temperature range	B _{t,G}	°C	-30...+85					
Storage temperature range	B _{t,S}	°C	-50...+85					
Reference temperature	t _{ref}	°C	+23					
Max. operating force	(F _G)	%	180					
Breaking force	(F _B)	%	> 400		> 300		> 300	
Lateral force limit¹⁾	(F _Q)	%	100		80		40	
Permissible force application eccentricity	e _G	mm	1.5		3		6	
Nominal (rated) displacement (±15%)	S _{nom}	mm	0.01	0.02	0.02	0.04	0.01	0.03
Fundamental resonance frequency	f _G	kHz	7.9		11.7		10.3	
Weight with cable, approx.		g	200					
Relative permissible oscillatory stress	F _{rb}	%	15 0					
Cable connection, six-wire connection			3 m cable length; outside diameter 4 mm; 6 x 0.08 mm ² ; polyurethane sheath; min. bending radius R10					
Degree of protection per DIN 60529			IP67					
Transducer identification			TEDS, as per IEEE 1451.4					

¹⁾ relative to a point of contact on the force application surface

Pin assignment




Order Nos.: Force Transducer

Order Code	Nominal (rated) force						Unit
	1	2	5	10	20	50	
1-U93 ...							kN

Options: U93 force transducer, version options

Code	Nominal (rated) force
1K00	1 kN
2K00	2 kN
5K00	5 kN
10K0	10 kN
20K0	20 kN
50K0	50 kN

 Preferred version available soon

Code	Cable length
03	3 m
06	6 m
12	12 m

Code	Cable version
Y	free ends
F	15-pin D-Sub plug
N	MS3106PEMV plug
Q	Sub-HD plug (QuantumX)

K-U93 - | 2K00 | - | 03 | - | Y

Anexo 5. Tarjeta adquisición de datos NI9237

DATASHEET

NI 9237

4 AI, ± 25 mV/V, 24 Bit, 50 kS/s/ch Simultaneous, Bridge Completion



- 4 channels, 50 kS/s per channel simultaneous AI
- ± 25 mV/V input range, 24-bit resolution
- Programmable half- and full-bridge completion with up to 10 V internal excitation
- 60 VDC, Category I bank isolation
- RJ50 or D-SUB connectivity options
- -40 °C to 70 °C operating range, 5 g vibration, 50 g shock

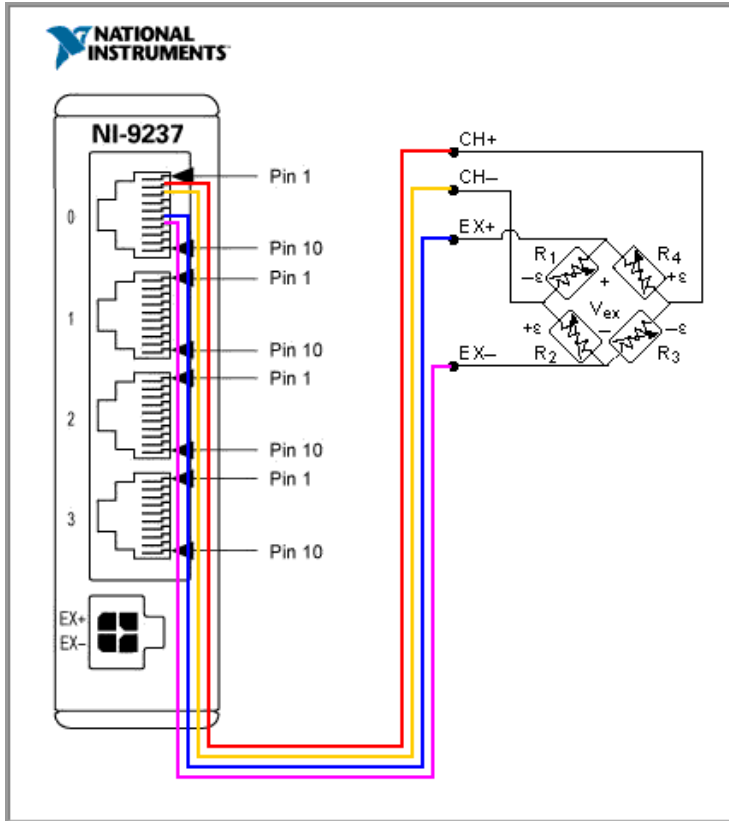
The NI 9237 simultaneous bridge module for use with CompactDAQ and CompactRIO contains all the signal conditioning required to power and measure up to four bridge-based sensors simultaneously. The four RJ50 jacks provide direct connectivity to most torque or load cells and offer custom cable solutions with minimal tools. The high sampling rate and bandwidth of the NI 9237 offer a high-quality, high-speed strain or load measurement system with zero interchannel phase delay. With 60 VDC isolation and 1,000 Vrms transient isolation, the NI 9237 has high-common-mode noise rejection and increased safety for both the operator and test system.

The NI 9237 can perform offset/null as well as shunt calibration and remote sense, making the module the best choice for strain and bridge measurements.

The NI 9944 and NI 9945 are accessories for use with quarter-bridge sensors. These accessories have a female RJ50 connector on one end and screw terminals on the other end.



Connection to the bridge:



Anexo 6. Cámara de correlación de imagen digital EXO250MU3



exo250MU3

EXO USB3 Vision



The SVCam EXO is one of the most flexible and scalable cameras for the industrial market segment. The USB3 Vision interface is easy to integrate in your system, with a data rate up to effective 360 MB/sec. The time to market for applications is shortened, saving cost even further. Power the camera via the interface and reduce cable complexity. EXO provides Plug-and-play capability for the whole range of 2.3 to 12 MP resolutions.

Technical Highlights

- > Up to 360 MB/s effective transfer rate
- > Leverages existing infrastructure for cables and connectors
- > Powers camera with up to 4.5 W
- > GenICam compliant
- > Cost effective / Easy implementation and interfacing

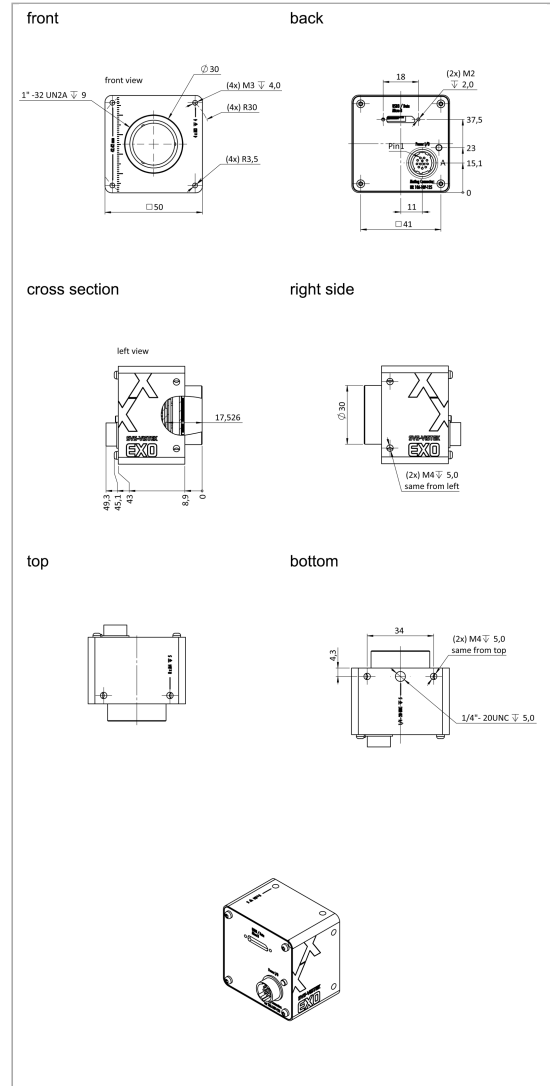
SVS-Vistek GmbH - Mühlbachstraße 20 - 82229 Seefeld - Germany - Telephone +49 8152 9985-0
Information accurate as to: 27.06.2019, errors and omissions excepted.
© 2019 - SVS-Vistek GmbH, all rights reserved.

EXO Series

exo250MU3

Resolution	2448 x 2048 px
Frame rate (max.)	75 fps
Chroma	mono
Interface	USB3 Vision
Sensor	
Sensor	IMX250LLR
Manufacturer	Sony
Sensor type	Area CMOS
Shutter type	global shutter
Sensor size (h x v)	8.45 x 7.07 mm
Optical diagonal	11.01 mm
Sensor format	2/3"
Pixel size (h x v)	3.45 x 3.45 μm
Camera	
Exposure modes	MANUAL;AUTO;EXTERNAL
Trigger modes	INTERNAL;SOFTWARE;EXTERNAL
Exposure time (min)	21 μs
Exposure time (max)	1 sec (external ∞)
Pixel format / max	mono8, mono12packed / 12 bit
Gain modes / max	manual, auto / 48 dB
S/N ratio	40 dB (dep. on environment)
Dynamic range	72 dB (dep. on environment)
Internal memory	256 MB SDRAM, 32 MB Flash
Feature Set	
AOI	yes
LUT	yes
Offset	yes
Binning	yes
Image flip	yes
Sequencer	yes
Housing	
Lens mount	C-Mount
Dimensions (w x h x d)	50 x 50 x 34.1 mm
Weight	138 g
Operating temperature (housing)	-10 to 60 °C
Ambient humidity	10 to 90 % (non-condensing)
Protection class	IP40
I/O-Interfaces	
Input up to 24V	2 x
Input OPTO	1 x
Output open drain	4 x
I/O RS-232	1 x
Power supply	10 to 25 V (DC)
Power consumption	4.5 W (dep. on operating mode)

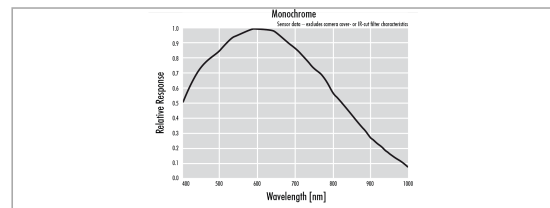
Dimensions [mm]



Pinout

Hirose 12 Pin	1	VIN - (GND)	7	OUT 1 (open drain)
	2	VIN + (10 V to 25 V DC)	8	OUT 2 (open drain)
	3	IN 4 (RXD RS232)	9	IN 3 + (opto In +)
	4	OUT 4 (TXD RS232)	10	IN 3 - (opto In -)
	5	IN 1 (0-24V)	11	OUT 3 (open drain)
	6	IN 2 (0-24V)	12	OUT 0 (open drain)

Spectral Response *



* Sensor data - excludes camera cover- or IR-cut filter characteristics

Anexo 7. Lente de la cámara AZURE-2514M5M

AZURE-2514M5M



SPECIFICATIONS

Resolution:	150lp/mm (5MP)	
Format :	2/3"	
Mount :	C	
Focal Length:	25mm	
F/No :	F1.4~F32	
Back Focus :	9.97mm	
Iris Type :	Manual Iris	
Horizontal Angle :	2/3"	19.96°
	1/2"	14.59°
	1/3"	10.97°
	1/4"	8.24°
Distortion :	<-0.1%	
Focusing Range:	$\infty \sim 0.15\text{m}$	
Coating Wavelength:	400nm~950nm	
Filter Thread :	M35.5x 0.5	
Dimension :	$\varnothing 38.5 \times 34.61\text{mm}$	
Weight :	110g	

Dimension

