

## Parametrización mecánica de materiales para impresión 3D

L. Felipe Sesé<sup>1</sup>, F. Suárez Guerra<sup>2</sup>, E. López-Alba<sup>3</sup>, F.A. Díaz<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Campus Científico Tecnológico de Linares. Universidad de Jaén, España, lfelipe@ujaen.es

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Campus Científico Tecnológico de Linares. Universidad de Jaén, España, fsuarez@ujaen.es

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Campus Las Lagunillas (Jaén). Universidad de Jaén, España, elalba@ujaen.es

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Campus Las Lagunillas (Jaén). Universidad de Jaén, España, fdiaz@ujaen.es

---

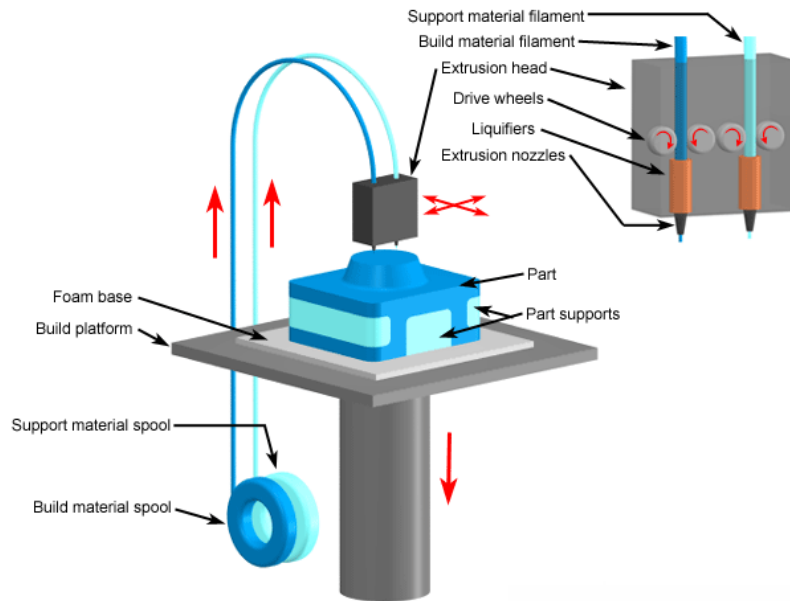
*La impresión en 3D es en la actualidad una técnica de fabricación de piezas cada vez más popular y cuyo uso se está extendiendo progresivamente a un mayor número de campos de aplicación. Una de las tecnologías de impresión en 3D más popular es la Fabricación por Fusión de Filamento (FFF), que es la que se emplea en el presente estudio. Cuando se precisa que las piezas fabricadas posean unas ciertas capacidades resistentes, resulta fundamental conocer sus características mecánicas y, por el propio método de fabricación, las probetas producidas mediante FFF presentan direcciones con propiedades mecánicas claramente diferenciadas. En este estudio se realiza una caracterización mecánica sobre probetas fabricadas con dos de los materiales más habituales cuando se emplea esta tecnología, PLA y ABS. Se estudian sus propiedades mecánicas mediante el ensayo de tracción para dos direcciones de impresión diferentes (paralela y perpendicular a la dirección de la carga) y se comparan los resultados con simulaciones numéricas realizadas en ABAQUS empleando modelos de material habituales en el campo de los materiales compuestos. Se observa que la previsible anisotropía del material no resulta notable en régimen elástico, aunque el comportamiento en rotura sí muestra claras diferencias entre probetas con distinta orientación de impresión.*

---

### 1. Introducción

Actualmente la tecnología de impresión en tres dimensiones está experimentando un gran desarrollo, no únicamente en el ámbito del prototipado rápido, sino también en la fabricación de piezas específicas e incluso en fabricación de tiradas cortas de elementos que han de poseer cierta resistencia mecánica. No obstante, debido a su procedimiento de fabricación, las piezas obtenidas mediante fabricación aditiva poseen un comportamiento intrínsecamente anisótropo.

Existen diversas tecnologías de impresión en 3D, siendo las más populares el sinterizado selectivo por láser (Selective Laser Sintering o SLS), el fundido selectivo por láser (Selective Laser Melting o SLM) la estereolitografía (SLA) y la fabricación mediante fusión de filamento (Fused Filament Fabrication o FFF). Las dos primeras emplean un láser que, aplicado sobre un lecho de polvo polimérico (SLS) o metálico (SLM), funde los granos de material uniéndolos para formar una estructura tridimensional. En el caso de la SLA, se emplea un láser ultravioleta que se aplica sobre un fotopolímero líquido contenido en un recipiente, produciendo su solidificación y dando forma a la estructura tridimensional. La FFF es, probablemente, la tecnología más popular de las mencionadas y, de hecho, pueden encontrarse impresoras que emplean esta tecnología por precios muy asequibles y en un número creciente de comercios. Este método de fabricación consiste en calentar y extruir un material termoplástico suministrado en forma de filamento a través de una boquilla que deposita el material sobre una cama siguiendo la geometría deseada, que se fabrica capa a capa. Ésta es la tecnología que se emplea en el presente trabajo y un esquema de la misma se muestra en la Figura 1.



**Figura 1:** Esquema de funcionamiento de la tecnología FFF [1].

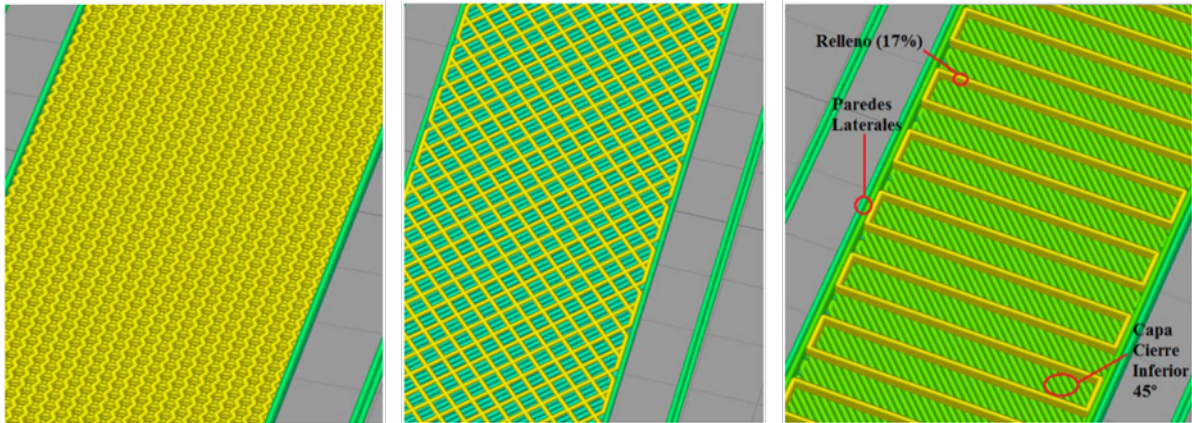
Como se ha mencionado, la tecnología FFF es, por su versatilidad y su precio competitivo, la más extendida en la actualidad, permitiendo fabricar elementos tridimensionales con relativa facilidad y sin precisar de una gran inversión económica. No obstante, cuando se desea fabricar elementos con ciertas capacidades resistentes, ha de tenerse en cuenta que, por su propio modo de fabricación, las piezas presentan una clara anisotropía debida a la orientación del filamento fundido depositado y las capas de fabricación de la pieza. Es importante, por tanto, tener en cuenta esta anisotropía y conocer las propiedades del conjunto en las distintas direcciones. A este respecto, cabe mencionar que el acabado final de la pieza depende de un gran número de parámetros que pueden modificar las propiedades mecánicas del conjunto.

### 1.1. Principales parámetros de impresión en la tecnología FFF

A continuación se describen brevemente los principales parámetros de impresión en la fabricación por fusión de filamento:

- **Velocidad de impresión:** es la velocidad a la que se mueve el cabezal que deposita el material en las distintas capas en que se fabrica la pieza. Una velocidad demasiado alta o baja afectará al acabado de la pieza, pudiendo provocar defectos importantes en la misma.
- **Porcentaje, patrón y ángulo de relleno:** las capas que configuran la pieza final pueden imprimirse empleando patrones distintos y, por tanto, con ángulos de recorrido del cabezal diferentes, siendo los patrones más habituales el rectilíneo, la rejilla ( $45^\circ$ ,  $-45^\circ$ ) y el de panel de abeja. Además, la pieza puede fabricarse con porcentajes de relleno variables, no siendo necesariamente un elemento macizo. La Figura 2 muestra dos ejemplos que permiten clarificar lo anterior.
- **Perímetros laterales y capas de cierre:** en muchos casos la superficie exterior de la pieza puede reforzarse, lo que permite reducir la densidad del relleno interior sin reducir su capacidad resistente. Para aclarar este aspecto, la Figura 2 muestra un esquema en el que se realiza una capa de cierre inferior y unas paredes laterales para un relleno de únicamente el 17% de material.
- **Altura de capa:** es la altura de cada capa de fabricación de la pieza; influye decisivamente en la calidad de acabado de ésta.
- **Diámetro de la boquilla (Nozzle):** permite ajustar la resolución del acabado de la pieza, con boquillas más pequeñas la resolución es mejor, pero requiere de mayores tiempos de impresión.
- **Temperatura de impresión:** este parámetro está relacionado con la velocidad de impresión y el diámetro de la boquilla, determinando el flujo de material fundido. La modificación de uno de ellos implica un ajuste en los otros dos.
- **Velocidad del ventilador de capa:** sobre el material depositado se aplica una corriente de aire que facilita la solidificación del mismo; la velocidad del ventilador permite controlar la velocidad de solidificación.

- Distancia inicial entre Nozzle y cama de impresión: ha de ajustarse para lograr una buena adherencia entre capas y lograr un buen acabado.



**Figura 2:** Esquemas de distintos patrones de impresión mediante FFF. Izda: patrón en panel de abeja con 90% de relleno. Centro: patrón en rejilla 45°, -45° con 50% de relleno. Dcha: patrón rectilíneo con relleno del 17%, capa de cierre inferior y paredes laterales.

## 2. Objetivos

A pesar del interés suscitado por la tecnología de impresión FFF, no existe mucha información sobre las características mecánicas de los elementos fabricados con ella [2][3][4].

En este trabajo se realiza una caracterización mecánica de elementos fabricados mediante FFF. Para ello se emplean dos materiales muy utilizados por la industria, Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y Ácido Pílláctico (PLA) y se estudia la influencia de la orientación de impresión sobre sus propiedades mecánicas.

Los principales objetivos que se persiguen son:

- Impresión de probetas con diferentes ángulos de orientación del filamento.
- Caracterización mecánica de las probetas fabricadas.
- Contrastación de los resultados experimentales mediante simulación numérica empleando el método de los elementos finitos (FEM).

## 3. Materiales y métodos.

En esta apartado, se describirán las características de los materiales estudiados y maquinaria de fabricación, así como los métodos y procedimientos llevados a cabo para diseñar, fabricar, analizar y preparar las probetas para los ensayos.

### 3.1. Material de fabricación aditiva.

Los filamentos escogidos para el presente trabajo fueron seleccionados en base a su buena relación entre facilidad de impresión y características mecánicas, así como a su gran desarrollo para la tecnología FFF y gran compatibilidad para la mayoría de impresoras existentes en el mercado. Además se ha seleccionado un material que no tuviera excesivos aditivos decorativos que pudieran perjudicar o modificar el comportamiento mecánico.

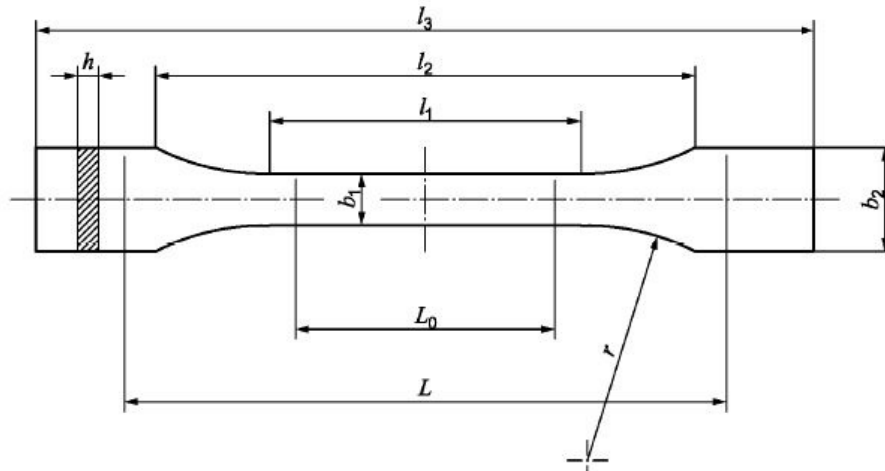
Concretamente se ha estudiado el material PLA de Ultimaker RAL 9010, muy usado por la industria para la creación de herramientas básicas para el hogar, juguetes, proyectos educativos, objetos de exposición, prototipos, modelos arquitectónicos, así como métodos de fundición perdida para crear piezas metálicas. Su intervalo de fusión se encuentra entre 145-160 °C [5].

El material ABS empleado fue del mismo fabricante Ultimaker RAL 9003, que suele escogerse específicamente para minimizar la deformación y asegurar una adhesión consistente entre capas. También pertenece al grupo de los termoplásticos con un intervalo de fusión de 225-245 °C.

### 3.2. Probetas ensayadas

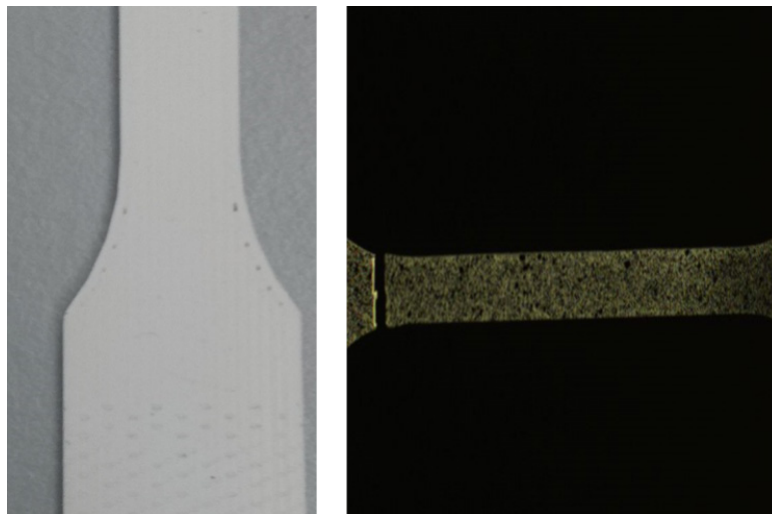
En tecnología aditiva, uno de los pasos previos fundamentales al proceso de impresión es el de elegir el diseño del objeto impreso y diseñarlo en un software dedicado para tal fin. Para el ensayo de tracción se ha hecho uso de la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 y de la UNE 116005:2012 (ver Figura 3). Inicialmente se escogió una

probeta tipo 1<sup>a</sup>, ya que era la más usual; esta era la probeta seleccionada por Ultimaker para realizar la hoja de especificaciones de sus materiales, lo que permitía comparar los resultados obtenidos con los de la hoja de especificaciones del material y comprobar la influencia de la orientación de impresión sobre las propiedades mecánicas.



**Figura 3:** Geometría de probeta tipo 1A según la norma UNE-EN ISO 527-2:2012

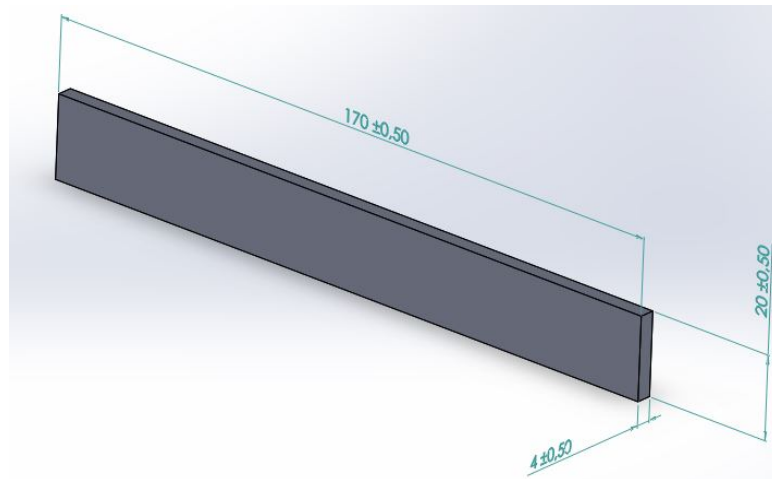
Tras imprimir los primeros ejemplares de prueba, resultó ser un modelo no válido debido a que al elegir una configuración de impresión con una única orientación de capa ( $0^\circ$  o  $90^\circ$ ), aparecían unos huecos a lo largo de la curva de transición donde se producía el cambio gradual de sección transversal de la probeta tipo 1A. Al realizar los primeros ensayos, se observó que esos huecos propiciaban una concentración de tensiones y con ello una rotura en el cambio de geometría (ver Figura 4). Esto impedía, por un lado, saber con certeza cuál era el valor de la sección transversal en el momento de tensión final, y, por otro, la obtención de las propiedades mecánicas del material. De esta forma, el ensayo no podía ser considerado como válido.



**Figura 4:** Concentrador de tensión en el cambio de sección transversal de la probeta e imagen de un ensayo no válido

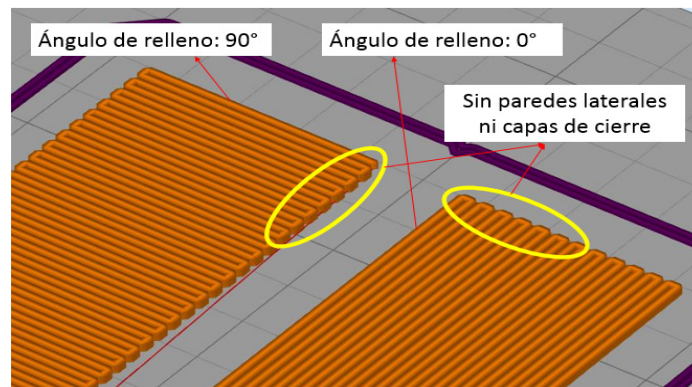
Ante esta situación se decidió realizar otro diseño que tuviera un radio de curvatura y una longitud de probeta mayor con el fin de que, al realizar la impresión, esos concentradores de tensiones se redujeran. De nuevo, no se obtuvieron buenos resultados ya que las probetas seguían rompiendo por la misma zona y los ensayos seguían sin ser válidos. A raíz de esto, se decidió hacer una revisión en diversas publicaciones relacionadas con estos ensayos y tecnología [3][4][5][6] y se observó que estos problemas no eran un caso aislado. De hecho, la solución se centraba principalmente en aumentar considerablemente el radio de la curva o en realizar un diseño de probeta parecido al que se suele emplear en ensayos de materiales compuestos [6], es decir, una probeta con geometría rectangular. De este modo, se reducían los problemas en la impresión elegida para este trabajo.

De esta forma, las probetas para el ensayo de tracción son iguales que la probeta 1A mencionada, pero eliminando el cambio gradual de sección trasversal, resultando una probeta totalmente rectangular. En la Figura 5 se muestra el diseño y dimensiones finales de la probeta utilizadas en el ensayo de tracción.



**Figura 5:** Geometría final de la probeta utilizada para el ensayo de tracción

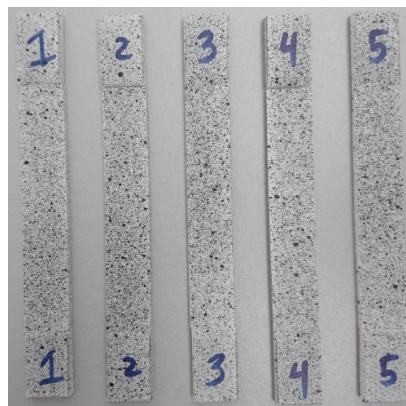
Una vez realizado el modelo CAD 3D de las probetas a ensayar con el software citado, el modelo se almacena en un archivo .STL (Standard Triangle Language), que contiene toda la información acerca de las superficies sobre las que se compone la probeta. Dentro de la configuración de los parámetros de impresión se introducen ángulos de relleno de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  y se configura la impresión para que no se añadan capas laterales o de cierre, de esta manera se busca evaluar la influencia de la orientación de fibra sin que estos elementos afecten a los resultados (ver Figura 6).



**Figura 6:** Configuraciones de impresión para las probetas a ensayar.

La medida de la deformación unitaria durante el ensayo de tracción se realiza con la técnica óptica DIC (Digital Image Correlation). Para ello, se incorpora un patrón de pequeñas manchas aleatorias denominado “speckle”, generado mediante un spray de pintura.

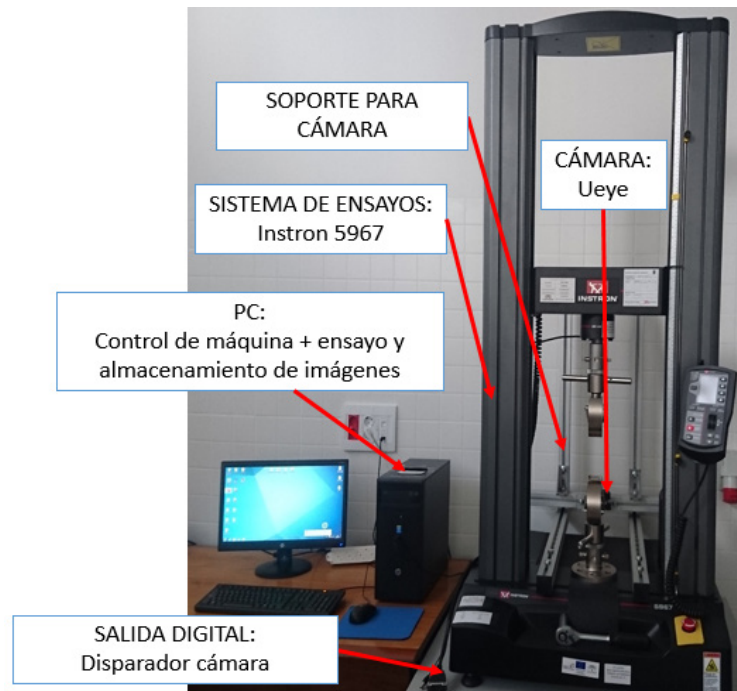
También, para homogeneizar el apriete de la mordaza sobre la probeta, se añaden unos tacones de fibra de vidrio, similares a los utilizados para ensayos de material compuesto. De esta manera se minimiza la concentración de tensión en esa zona. Estos se adhieren a las probetas antes de aplicar el “speckle” necesario para el posterior análisis, dejando actuar al adhesivo durante un día (ver Figura 7).



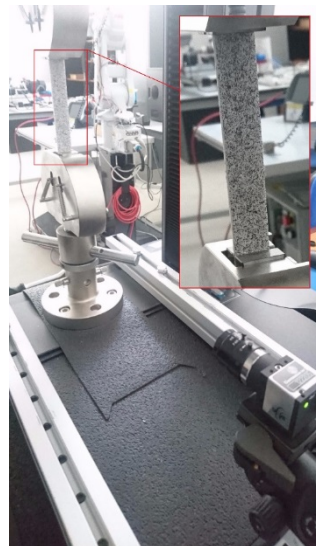
**Figura 7:** Probetas de tracción

### 3.3. Metodología experimental

En lo referente a la ejecución del ensayo, éste se realiza en una máquina Instron 5967 de capacidad máxima de carga de 30kN (Figura 10) la cual aplica una carga mediante el control del desplazamiento del puente fijado en 2 mm/min, según normativa. La medida de las deformaciones unitarias se realiza procesando imágenes capturadas durante el ensayo mediante el software libre de Correlación Digital de Imágenes denominado Ncorr [7] como se muestra en la Figura 11. Concretamente, el sistema de control de esta máquina de ensayo permite realizar un programa por el cual se lanza una serie de pulsos sincronizados a diferentes niveles de desplazamiento, en concreto, cada 0,15 mm. De esta manera, estos pulsos se recogen por una cámara Ueye SE USB 2.0 de 640x480 píxeles de resolución, la cual emplea una lente de 25mm de distancia focal para visualizar región de interés de la probeta como se observa en la figura Figura 10. Así se obtienen datos sincronizados de la deformación medida en las imágenes y el nivel de carga de la probeta.

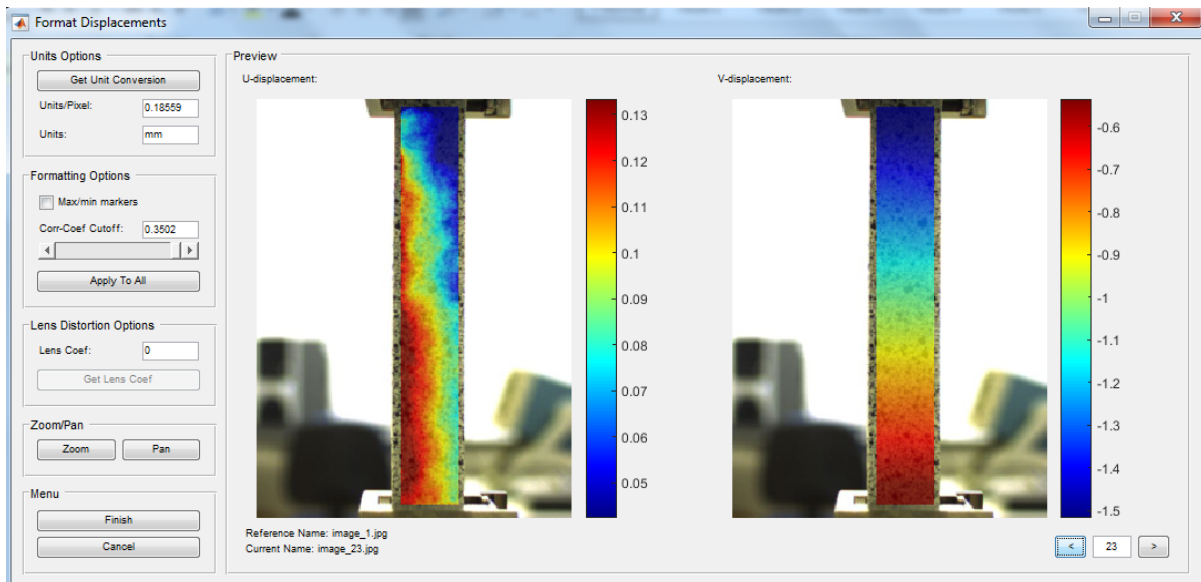


**Figura 8:** Máquina INSTRON 5967 usada para el ensayo de tracción.



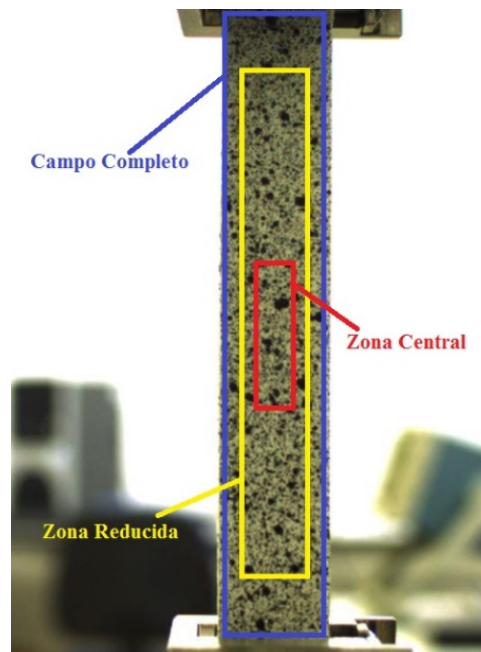
**Figura 9:** Cámara uEye con soporte regulable (izquierda) y set-up final para ensayo de tracción (derecha).

Los datos de fuerza y deformación, tras su correspondiente análisis, son utilizados para obtener el diagrama tensión-deformación y con él todas las propiedades mecánicas de tracción del material. Además, al analizar dos direcciones perpendiculares de fibra, se obtienen los valores de  $E_{11}$  y  $E_{22}$ , los cuales se utilizan más adelante para llevar a cabo el análisis con el método de elementos finitos (FEM) en un software destinado para tal fin.



**Figura 10:** Desplazamientos calculados con Ncorr.

Específicamente, las tensiones se calculan a partir de la geometría de la probeta y los datos de carga obtenidos del ensayo de tracción. Para las deformaciones, se realiza una media de los resultados de  $\varepsilon_y$  en una región de interés representada con un rectángulo azul en la Figura 11

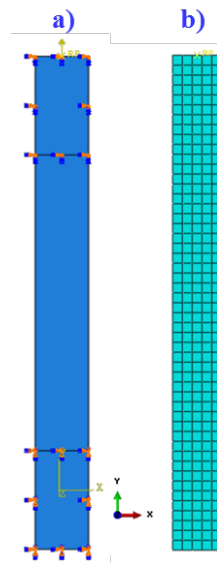


**Figura 11:** Diferentes regiones de interés en la probeta de tracción.

### 3.4. Modelos numéricos

Para realizar los modelos numéricos se ha empleado el Método de los Elementos Finitos (MEF), utilizando el software comercial ABAQUS [8].

El ensayo de tracción se ha modelado mediante un modelo plano utilizando elementos rectangulares. En la parte superior e inferior se han definido unas regiones con mayor espesor de elemento para reproducir el efecto de los talones de agarre adheridos a las probetas ensayadas experimentalmente. Las condiciones de contorno del ensayo se han reproducido definiendo apoyos fijos en los puntos inferiores del talón inferior y definiendo apoyos con bloqueo de desplazamientos en X y en Y para el resto de puntos del talón inferior y para todos los puntos del talón superior. La carga se aplica imponiendo un desplazamiento según la dirección positiva de Y en el punto central del borde superior del talón superior. En la Figura 12 pueden apreciarse los dos talones mencionados así como las condiciones de contorno descritas.



**Figura 12:** Imágenes del modelo numérico. Izda: talones y condiciones de contorno. Dcha: malla de elementos finitos empleada.

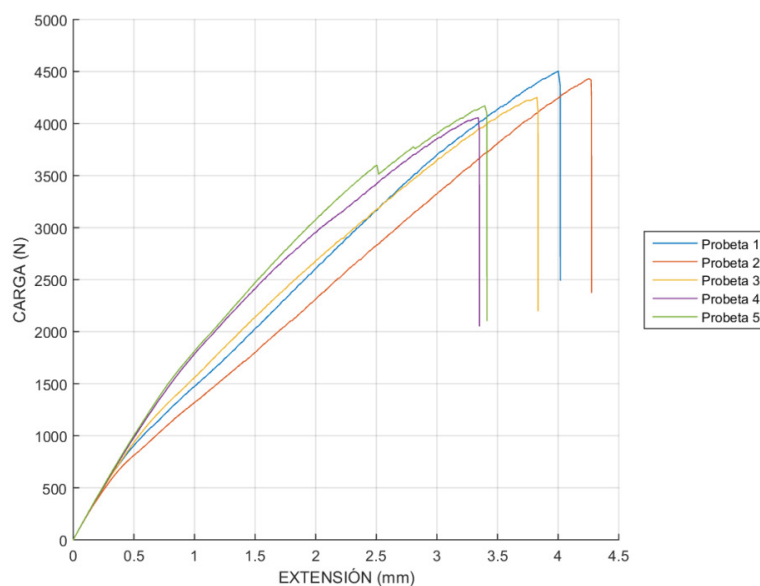
El material utilizado es elástico y ortótropo, con las siguientes propiedades mecánicas:

- $E_{11}$ : Módulo elástico en la dirección 1: 2981.9 N/mm<sup>2</sup>.
- $E_{22}$ : Módulo elástico en la dirección 2: 3001.3 N/mm<sup>2</sup>.
- $\nu_{12}$ : Coeficiente de Poisson para el plano 12: 0.336.
- $G_{12} = G_{13} = G_{23}$ : Módulos de cizalladura: 1115.95 N/mm<sup>2</sup>.

Para tener en cuenta la orientación del filamento en la impresión, se ha empleado un modelo de capas, habitualmente utilizado para reproducir el comportamiento de materiales compuestos, definiendo una única capa con la dirección de orientación deseada en cada caso.

## 4. Resultados

En este apartado se muestran los resultados experimentales junto con los de las simulaciones numéricas llevadas a cabo a partir de los parámetros medidos experimentalmente. En primer lugar se muestran los resultados obtenidos con el material PLA y a continuación los del material ABS, ambos con las orientaciones de 0° y 90°.

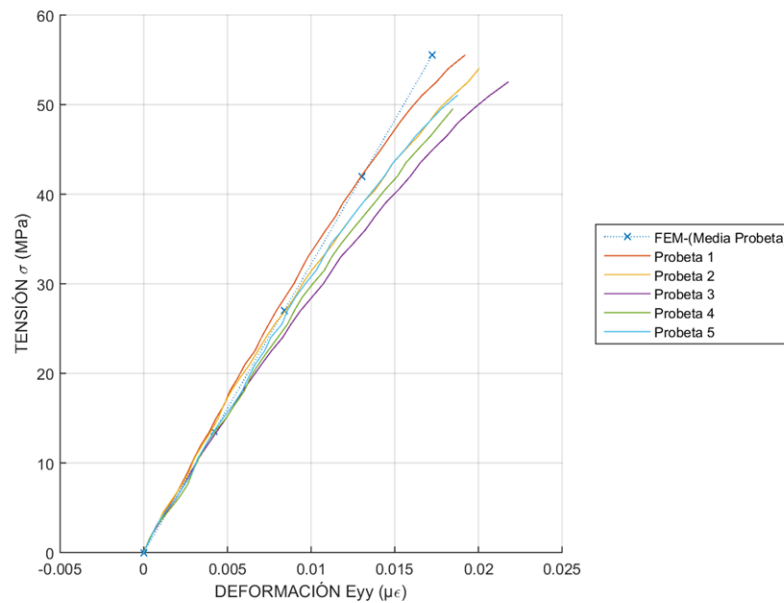


**Figura 13:** Diagrama carga-extensión de probetas PLA con orientación de fibra a 0°.

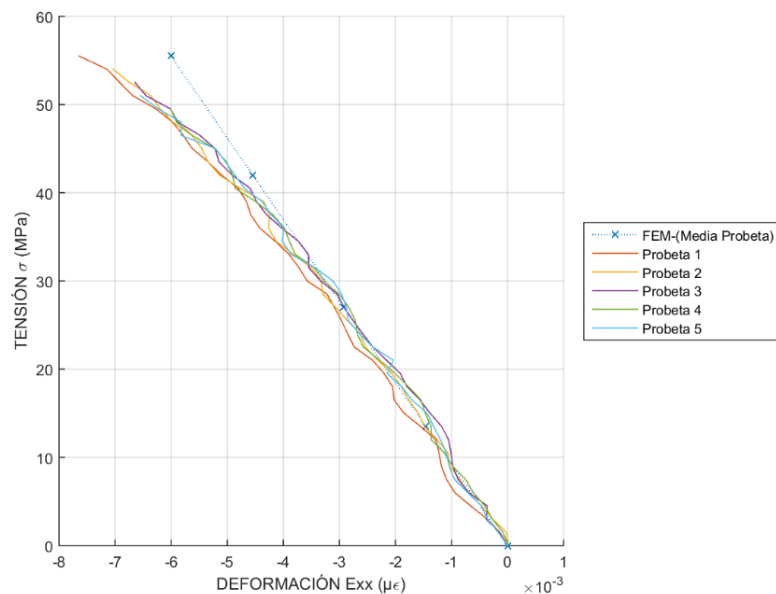
#### 4.1. PLA con orientación de fibra longitudinal ( $0^\circ$ )

A continuación, se muestran los diagramas y resultados especificados para las probetas impresas en PLA con una orientación de fibra de  $0^\circ$ , paralela a la aplicación de la carga (ángulo de relleno  $0^\circ$ ). En primer lugar, como ejemplo, se muestra una gráfica de fuerza en función del desplazamiento generado por la máquina de ensayo. Estos resultados son muy sensibles a las holguras o ajustes que puedan generarse durante el ensayo, por lo que su utilidad es simplemente cualitativa a nivel de carga como se puede apreciar a partir de la gran dispersión de los resultados de las 5 probetas ensayadas mostrados en la Figura 13.

A partir de estos datos se obtienen los diagramas de tensión-deformación y se comparan con los resultados mediante un modelo de elementos finitos, resultados que se muestran en las Figuras 14 y 15. Se puede observar que la dispersión de los resultados es mucho menor y los datos de la simulación concuerdan razonablemente bien con los experimentales, esto es así tanto para las deformaciones longitudinales (Figura 14) como para las transversales (Figura 15).



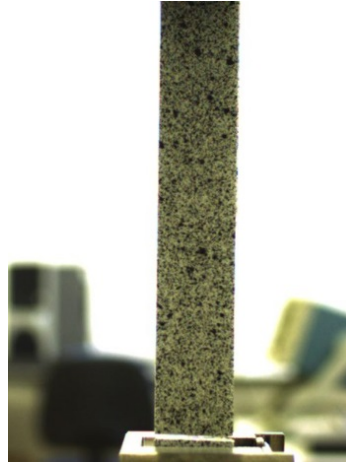
**Figura 14:** Diagrama tensión-deformación longitudinal de probetas PLA  $0^\circ$ .



**Figura 15:** Diagrama tensión-deformación transversal de probetas PLA  $0^\circ$ .

En ambas gráficas de tensión deformación, tan sólo se observa una mayor discrepancia en el tramo final en el que experimentalmente se observa un comportamiento plástico que el modelo FEM no estaba programado para presentar.

Observando los diagramas presentados se aprecia que se trata de un material relativamente frágil, ya que se fractura con poca deformación y plasticidad además de presentar una rotura perpendicular a la línea de carga. Además, debido a esta propiedad del material, las roturas de las probetas se producían cerca de la zona de las mordazas, ya que es ahí donde se concentraban las tensiones como se observa en la Figura 15. No obstante, en algunos ensayos se obtuvieron roturas por zonas intermedias de la probeta y se comprobó que las tensiones registradas eran muy similares, por lo que la zona de la rotura no afectó a la toma de datos.



**Figura 16:** Rotura de probeta 2 de PLA con orientación 0°

Finalmente se recogen las propiedades mecánicas obtenidas para el material PLA con orientación a 0° en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Propiedades mecánicas experimentales de PLA 0°

Probeta	PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL				
	Módulo de Young ( $E_{11}$ ) (MPa)	C. de Poisson Principal ( $\nu_{xy}$ )	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima ( $\sigma_{max}$ ) (MPa)	Tensión de Fractura ( $\sigma_f$ ) (MPa)
1	3457,7	0,4143	1222,5	55,5114	55,5114
2	3375,2	0,3643	1237,1	54,0097	54,0097
3	3037,1	0,3072	1161,6	52,5093	52,5093
4	3063,7	0,3199	1160,5	49,5092	49,5092
5	3159,1	0,3356	1182,7	51,0111	51,0111
<b>Media</b>	<b>3220</b>	<b>0,35</b>	<b>1194</b>	<b>52,5</b>	<b>52,5</b>

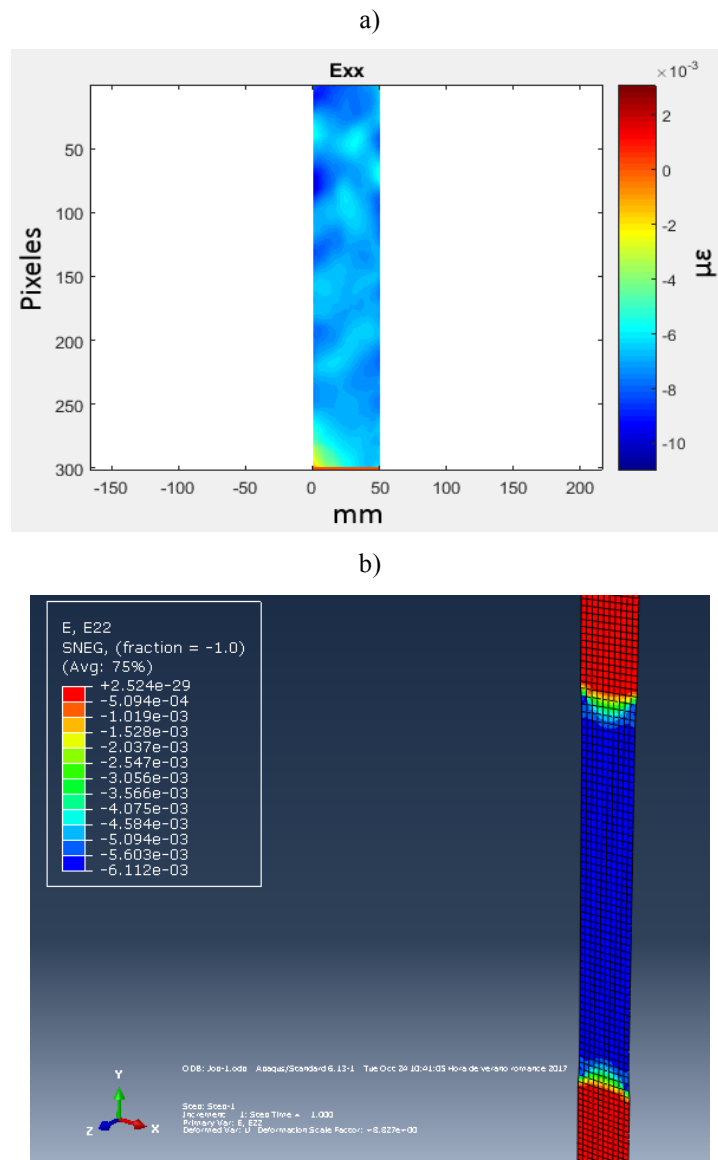
Seguidamente, se comparan los resultados de las deformaciones experimentales con los obtenidos con los de las simulaciones numéricas (FEM) realizadas en ABAQUS. Esto se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Comparación de resultados DIC-FEM para Probeta Tracción PLA 0°.

Carga (N)	$E_{yy}$ ( $\mu\epsilon$ )			$E_{xx}$ ( $\mu\epsilon$ )		
	DIC	FEM	Error (%)	DIC	FEM	Error (%)
0	0	0	0	0	0	0
1080	0,0041	0,00419536	2,3	-0,0014	-0,00146122	4,37
2160	0,0087	0,00839049	3,55	-0,003	-0,00292236	2,58
3360	0,0146	0,0130518	10,6	-0,005	-0,00454586	9,08
4440	0,0192	0,017247	10,17	-0,0076	-0,00600703	20,9

En la Tabla 2 se observa que existen unas diferencias pequeñas, alrededor del 5% - 10%, entre los resultados de DIC y FEM en la zona donde el material presenta un comportamiento elástico, lo que indica que el modelo numérico es capaz de reproducir con precisión razonable el comportamiento del material. Como se mencionó anteriormente, en las zonas donde se registran las cargas máximas, las diferencias son mayores debido a que el modelo numérico no simula un comportamiento plástico del material sino elástico, siendo esto muy evidente en el caso de las deformaciones  $E_{xx}$ , donde se registran diferencias de alrededor del 20%.

Por otro lado, por motivos ilustrativos, se muestran en la Figura 17 los resultados experimentales (a) y numéricos (b) de las deformaciones transversales a un mismo estado de carga de 4200N.



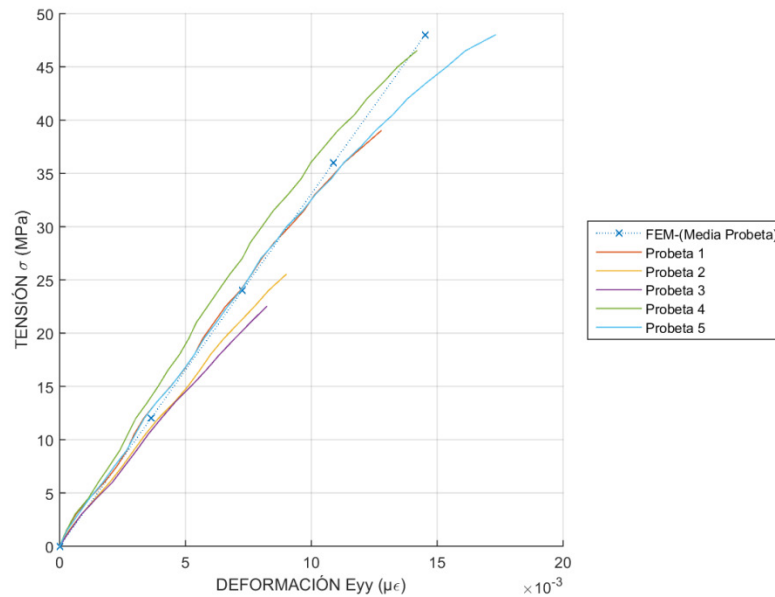
**Figura 17:** Resultados para una probeta de PLA con orientación de filamento a  $0^\circ$  cargada con 4200 N: a) Resultados experimentales (DIC); b) Resultados numéricos (FEM).

La Figura 17a muestra un claro ejemplo de la homogenización de la deformación en la superficie de la probeta, así, las diferencias de deformaciones entre estas zonas son pequeñas con lo que se puede ver que la probeta es bastante homogénea y que la impresión con un porcentaje de relleno del 100% es estable y correcta.

#### 4.2. PLA con orientación de fibra transversal ( $90^\circ$ )

De la misma forma, en la Figura 18 se muestran los diagramas y resultados especificados para las probetas impresas en PLA, pero con una orientación de fibra de  $90^\circ$ , perpendicular a la aplicación de la carga (ángulo de relleno  $90^\circ$ ).

Observando el diagrama tensión- deformación, al igual que en los diagramas anteriores, se puede apreciar que el material sigue presentando un comportamiento frágil y que existe buena correlación entre los datos DIC-FEM. No obstante se observa una interesante dispersión en la tensión de rotura final. Esto es debido a que esta orientación de impresión ( $90^\circ$ ) permite no sólo medir la resistencia a la tracción si no la calidad de la adhesión entre fibras, lo que lleva a observar que el nivel de adhesión de estas capas no ha sido el mismo pese a realizar las probetas en una misma impresión. La diferencia más notoria se encuentra en las probetas 2 y 3, las cuales no han soportado el rango de tensiones esperado. Esto se debe a que en la impresión de estas probetas quedaron huecos internos, así como defectos que provocaron una rotura prematura. Revisando lo expuesto en Arribas *et al.* [9], cuando una impresora lleva horas funcionando, es probable que en el extrusor queden restos de plástico que provocan que el flujo de material no sea el correcto o incluso un pequeño cambio de temperatura en el ambiente pueden ser la causa de estos defectos que provocan que la probeta rompa antes de lo esperado.



**Figura 18:** Diagrama tensión-deformación  $E_{yy}$  de probetas PLA 90°

Los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas durante el ensayo de tracción para el PLA con orientación de fibra 90° se muestran en las Tabla 3.

**Tabla 3:** Propiedades del PLA con orientación de fibra 90°.

PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL					
Probeta	Módulo de Young ( $E_{11}$ ) (MPa)	C. de Poisson Principal ( $\nu_{xy}$ )	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima ( $\sigma_{max}$ ) (MPa)	Tensión de Fractura ( $\sigma_f$ ) (MPa)
1	3432	0,3952	1229	39,0081	39,0081
2	2967	0,3092	1133	25,5065	25,5065
3	2867	0,2817	1118	22,50	22,50
4	3848	0,3606	1414	46,5	46,5
5	3419	0,3383	1277	48,0	48,0
<b>Media</b>	<b>396,8</b>	<b>0,337</b>	<b>1234,6</b>	<b>36,3</b>	<b>36,3</b>

En la Tabla 4 se comparan los resultados de las deformaciones experimentales (DIC) obtenidos con los de las simulaciones numéricas (FEM) realizadas en ABAQUS.

**Tabla 4:** Comparación de resultados DIC-FEM para Probeta Tracción PLA 90°.

Carga	$E_{yy}$ ( $\mu\epsilon$ )			$E_{xx}$ ( $\mu\epsilon$ )		
	DIC	FEM	Error (%)	DIC	FEM	Error (%)
0	0	0	0	0	0	0
960	0,0035	0,00362987	3,71	-0,0012	-0,00129889	8,24
1920	0,0072	0,00725962	0,82	-0,0025	-0,00259776	3,91
2880	0,0109	0,0108891	0,1	-0,004	-0,00389648	2,59
3840	0,0173	0,0145187	16,08	-0,0052	-0,00489535	5,85

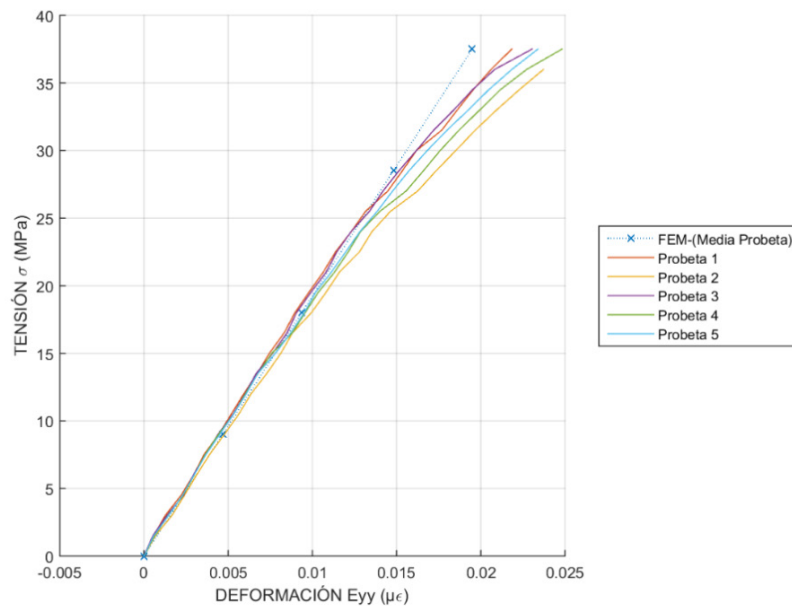
De nuevo se puede observar ese aumento de las diferencias en las zonas de máxima carga, pero en este caso se observa cómo las diferencias mayores se obtienen para las deformaciones  $E_{yy}$  al contrario que ocurría para la orientación 0°. Esto puede deberse a que no se llega a un nivel de plastificación tan elevado.

Por otro lado, comparando los resultados de módulo de Young y del coeficiente de Poisson, se observa que son muy similares a los obtenidos para la probeta con la dirección de impresión de 0°. Esto es lógico ya que el material es el mismo y previsiblemente ha de presentar las mismas propiedades elásticas. Por lo tanto, la dirección de impresión afecta principalmente a la tensión máxima soportada, la cual se reduce al 70%.

#### 4.3. ABS con orientación de fibra longitudinal (0°)

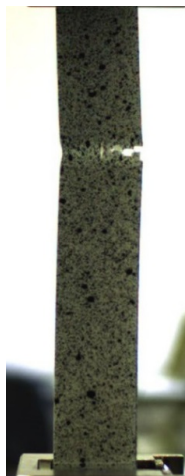
La Figura 18 muestra los diagramas obtenidos para las probetas impresas en ABS con una orientación de fibra de 0°, paralela a la aplicación de la carga (ángulo de relleno 0°). Se observa que este material también presenta

un comportamiento relativamente frágil pero, al igual que el PLA, experimenta una pequeña zona plástica donde se alcanza la tensión última de las probetas. No obstante, se observa una mayor repetitividad en los ensayos.



**Figura 19:** Diagrama tensión-deformación  $E_{yy}$  de probetas ABS  $0^\circ$ .

En la Figura 20 se muestra la probeta tras la rotura y se aprecia que esa pequeña zona plástica queda justificada por la forma en la que se produce la rotura ya que hay una cierta estricción. Además, todas las probetas alcanzan casi la misma tensión máxima, aunque, algunas de ellas, presente una zona de rotura más centrada, lo que justifica lo comentado anteriormente.



**Figura 20:** Rotura de probeta de ABS con orientación de fibra  $0^\circ$

La Tabla 5 muestra las propiedades mecánicas medidas.

**Tabla 5:** Propiedades mecánicas experimentales de ABS  $0^\circ$

Probeta	ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL				
	Módulo de Young (E11) (MPa)	C. de Poisson Principal ( $\nu_{xy}$ )	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima ( $\sigma_{max}$ ) (MPa)	Tensión de Fractura ( $\sigma_f$ ) (MPa)
1	1998,9	0,3718	728,5880	38,4972	32,5
2	1820,7	0,3611	668,8151	36,0050	30,625
3	1974,8	0,4353	687,9232	37,5048	31,25
4	1910,2	0,3478	708,6572	37,5067	36,25
5	1918,7	0,3678	701,3667	37,5065	28,125
Media	<b>1924</b>	<b>0,377</b>	699	<b>37</b>	<b>31</b>

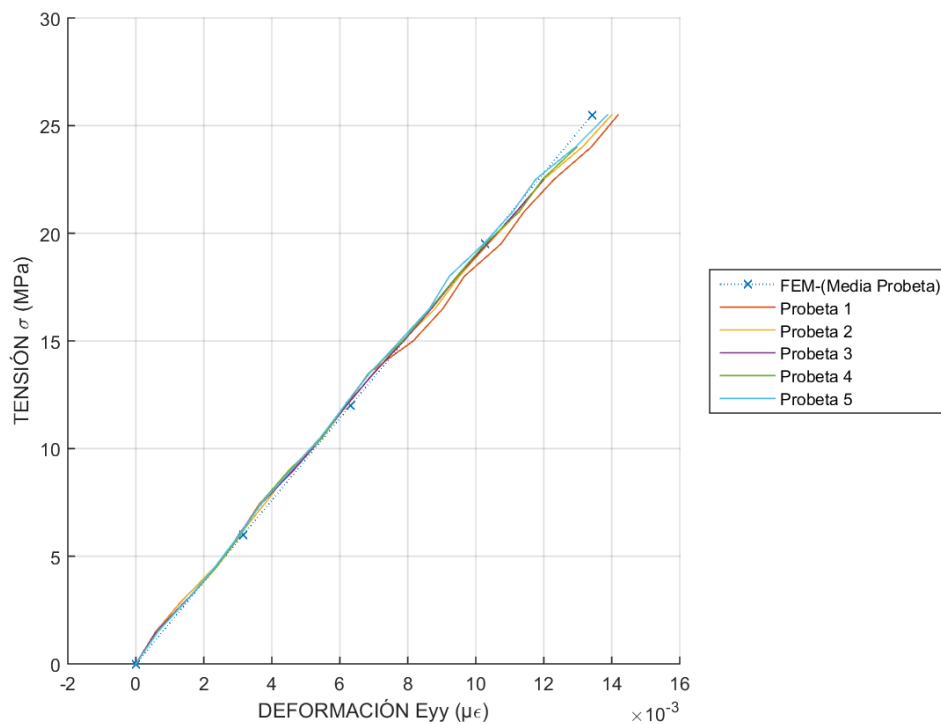
Finalmente, la Tabla 6 muestra la comparación de los resultados de las deformaciones experimentales con los obtenidos mediante las simulaciones numéricas (FEM) realizadas en ABAQUS.

**Tabla 6:** Comparación de resultados DIC-FEM para Probeta Tracción ABS 0°.

Carga	DIC	$E_{yy}$ ( $\mu\epsilon$ )		DIC	$E_{xx}$ ( $\mu\epsilon$ )	
		FEM	Error (%)		FEM	Error (%)
0	0	0	0	0	0	0
720	0,0045	0,00467724	3,93	-0,0016	-0,00176234	10,14
1440	0,0094	0,00935446	0,484	-0,0035	-0,00352466	0,704
2280	0,016	0,0148106	7,43	-0,0059	-0,00558045	5,41
3000	0,0233	0,0194862	16,37	-0,0087	-0,00734214	15,60

4.4. ABS con orientación de fibra transversal (90°)

La Figura 21 muestra los diagramas correspondientes a las probetas impresas en ABS con una orientación de fibra de 90°, perpendicular a la aplicación de la carga (ángulo de relleno 90°).



**Figura 21:** Diagrama tensión-deformación  $E_{yy}$  de probetas ABS 90°

Como se puede observar en estos diagramas, el material presenta un comportamiento frágil, incluyendo esta vez la zona de tensión última. Esto ocurre debido a que la rotura no se produce a causa del fallo del material de los filamentos, sino al fallo de la interfaz de adhesión entre ellos.

**Tabla 7:** Propiedades mecánicas experimentales de ABS 90°

Probeta	ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL				
	Módulo de Young (E11) (MPa)	C. de Poisson Principal (vxy)	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima ( $\sigma_{max}$ ) (MPa)	Tensión de Fractura ( $\sigma_f$ ) (MPa)
1	1865,2	0,3251	703,8179	27,5	27,5
2	1892,3	0,3840	683,6452	25,5	25,5
3	1912,9	0,3538	706,5177	22,5	22,5
4	1911,2	0,3977	683,6990	24,0	24,0
5	1916,3	0,3949	686,8805	25,4	25,4
<b>Media</b>	<b>1899</b>	<b>0,37</b>	<b>693</b>	<b>24,9</b>	<b>24,9</b>

En la Tabla 8 se comparan los resultados de las deformaciones experimentales con los obtenidos con los de las simulaciones numéricas (FEM) realizadas en ABAQUS.

**Tabla 8:** Comparación de resultados DIC-FEM para Probeta Tracción ABS 90°.

Carga	$E_{yy}$ ( $\mu\epsilon$ )			$E_{xx}$ ( $\mu\epsilon$ )		
	DIC	FEM	Error (%)	DIC	FEM	Error (%)
0	0	0	0	0	0	0
480	0,0031	0,00315912	1,907	-0,0011	-0,00117486	6,80
960	0,0062	0,00631818	1,906	-0,0024	-0,00234968	2,09
1560	0,0104	0,0102671	1,277	-0,0038	-0,00381819	0,478
2040	0,014	0,0134257	4,10	-0,0051	-0,00499291	2,09

De nuevo, analizando el porcentaje de error, se observa que existen diferencias pequeñas entre los resultados experimentales y los numéricos (entre 0,5% y 7%), lo que indica que el modelo numérico simula con una precisión razonable el caso real.

Al igual que ocurría con el caso del PLA, las características elásticas del material no se ven influidas por la dirección de impresión. No ocurre así con la tensión máxima, que en este caso se reduce al 67% , lo que representa un reducción muy similar al caso del PLA.

## 5. Conclusiones y trabajo futuro

Analizando los resultados presentados anteriormente, se pueden concluir lo siguiente:

- La técnica de correlación digital de imágenes (DIC) presenta interesantes ventajas para el estudio de deformaciones de un sólido, como la posibilidad de obtener el campo completo de deformaciones e identificar comportamientos particulares en algunas zonas del mismo, como pueden ser debidos a imperfecciones del material o defectos de fabricación de la pieza. Además, es una técnica que puede emplearse con una inversión en material relativamente baja.
- En el caso analizado, la técnica DIC ha proporcionado buenos resultados para el estudio de las deformaciones longitudinales; no obstante, los resultados correspondientes a las deformaciones transversales han presentado un ruido mayor, aspecto que podría solucionarse empleando cámaras de mayor resolución o tomando imágenes más cercanas a la zona de estudio.
- Los resultados obtenidos relacionados con el instante de rotura muestran una cierta variabilidad. En primer lugar se concluye que la impresión de las probetas, a pesar de haber sido cuidadosamente realizada, presenta diferencias entre unas probetas y otras. Además, este efecto se hace especialmente patente en las probetas impresas con dirección perpendicular a la carga, en las que la rotura viene determinada por la interfaz de adhesión entre filamentos.
- La orientación de los filamentos en la impresión en 3D ha mostrado ser decisiva en la obtención de las propiedades mecánicas de las probetas, lo que confirma la fuerte anisotropía que presentan las probetas dependiendo del patrón de impresión utilizado. En concreto, se ha observado reducciones del 30% en la tensión de rotura debido a este efecto.

Finalmente, como posibles líneas de trabajo futuras, pueden citarse las siguientes:

- Además de la influencia del ángulo de impresión, estudiada en este trabajo, existen otros parámetros de que pueden ser analizados, como el diámetro de la boquilla, la temperatura y la velocidad de impresión, que están relacionados entre sí.
- La adherencia de la pieza a la cama resulta fundamental para lograr una pieza con un buen acabado. Para este propósito existen lacas específicas para cada tipo de material, no obstante, puede estudiarse el empleo de distintas sustancias y evaluar su idoneidad para cada material de impresión.
- En este estudio se han analizado dos de los materiales más utilizados con FFF, pero puede ampliarse el estudio a otros materiales disponibles para esta tecnología.

## 6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Grupo Sicnova por su ayuda con la fabricación de las probetas que han sido utilizadas en este estudio.

## 7. Referencias

- [1] CustomPartNet <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling> (accessed August 11, 2017)

- [2] Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid prototyping journal*, 8(4), 248-257.
- [3] Cantrell, J. T., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton, J., ... & Ifju, P. G. (2017). Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23(4), 811-824.
- [4] Letcher, T., & Waytashek, M. (2014, November). Material property testing of 3d-printed specimen in PLA on an entry-level 3d printer. In ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (pp. V02AT02A014-V02AT02A014). American Society of Mechanical Engineers.
- [5] Ultimaker, Technical Data Sheet PLA, Version 3.011, 16-05-2017.
- [6] UNE-EN ISO 527. Determinación de las propiedades en tracción. ISO 527:2012. Noviembre 2012.
- [7] Ahn, S.-H.; Montero, M.; Odell, D.; Roundy, S.; Wright, P. K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyp. J.* 2002, 8, 248–257.
- [8] Robert Sayre III. A Comparative Finite Element Stress Analysis of Isotropic and Fusion Deposited 3D Printed Polymer. Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut December, 2014.
- [9] R. F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics 3rd Edition, Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [10] Lanzotti, A.; Grasso, M.; Staiano, G.; Martorelli, M. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyp. J.* 2015, 21, 604–617.
- [11] Justin Blaber; Antonia Antoniou. NCORR. Instruction Manual. Versión 1.2.1. Georgia Institute of Technology. February, 2015.
- [12] Hibbit, H. D.; Karlsson, B. I.; Sorensen, E.P. ABAQUS User Manual, Version 6.12. Simulia, Providence, RI, 2012.
- [13] Arribas Subiñas P.J.; M.H. Verbeeten W.; Lorenzo Bañuelos M. Procedimiento de caracterización de probetas de plástico fabricadas mediante la impresión 3D. Universidad de Burgos. Octubre 2015 – Julio 2016.
- [14] Anderson N. E., Loewental S. H., “Efficiency of non-standard and high contact ratio involute spur gears”, *Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design* **108**, 49-67 (1986)
- [15] Niemann G., Winter H., *Maschineelement, vol. 2*, Springer, Berlin (1989)
- [16] Blanco, P., “Optimización del cálculo de flujos mediante algoritmos genéticos”, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid (2012)
- [17] Agudo, J. *et al.*, “Influencia de la frecuencia de vibración del soporte en la eficiencia mecánica de aerogeneradores”, *Actas del XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica* **2**, 184-192, Elche (2016)
- [18] ISO Standard 6336-2:2006, “Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 2: Calculation of surface durability (pitting)”, International Organization for Standardization, Geneva, 2006
- [19] Worraker, W. J., “Grazing flow effects on the impedance of cavity liners”, *Institute of Sound and Vibration Research, Memorandum No. 114*, Ann Arbor (1998)