



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

PARAMETRIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D

Alumno: Fernando Quevedo Pérez

Tutor: Prof. Dr. Luis A. Felipe Sesé
Prof. Dr. Fernando Suárez Guerra

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Octubre, 2017

PARAMETRIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D

D. LUIS A. FELIPE SESÉ y D. FERNANDO SUÁREZ GUERRA, como tutores del Trabajo Fin de Grado “*PARAMETRIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D*” presentado por el alumno FERNANDO QUEVEDO PÉREZ, dan su consentimiento para la defensa y posterior evaluación del mencionado trabajo en la Escuela Politécnica Superior de Linares.

Linares, OCTUBRE de 2017



QUEVEDO PÉREZ, FERNANDO
EL ALUMNO

SUÁREZ GUERRA, FERNANDO
EL TUTOR

FELIPE SESÉ, LUIS ANTONIO
EL TUTOR

*“Se lo dije entonces a mi mujer: Esta tecnología va a necesitar 30 años para madurar,
pero va a ser algo muy importante.”*

Charles W. Hull

*“Son vanas y están plagadas de errores las ciencias que no han nacido del experimento,
madre de toda incertidumbre”*

Leonardo Da Vinci

A mi Familia, a mis Tutores, a David y a Gema

ÍNDICE

1. RESUMEN	7
2. INTRODUCCIÓN	8
2.1. Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva	9
2.1.1. <i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>	9
2.1.2. <i>Estereolithography (SLA)</i>	10
2.1.3. <i>Selective Laser Melting (SLM)</i>	11
2.1.4. <i>Fused Filament Fabrication (FFF)</i>	11
2.1.5. <i>PolyJet</i>	12
2.2. Parámetros principales de impresión para tecnología FFF	12
2.2.1. <i>Velocidad de impresión</i>	13
2.2.2. <i>Perímetros laterales y capas de cierre</i>	13
2.2.3. <i>Porcentaje, patrón y ángulo de relleno</i>	14
2.2.4. <i>Altura de capa</i>	15
2.2.5. <i>Diámetro de la boquilla (Nozzle)</i>	16
2.2.6. <i>Temperatura de impresión</i>	17
2.2.7. <i>Velocidad del ventilador de capa</i>	17
2.2.8. <i>Distancia inicial entre Nozzle y cama de impresión</i>	17
2.3. Aplicaciones en la actualidad. Industria 4.0	18
2.3.1. <i>Modelado de conceptos</i>	18
2.3.2. <i>Prototipado rápido y funcional</i>	19
2.3.3. <i>Utillajes de fabricación</i>	20
2.3.4. <i>Prótesis y modelos para medicina</i>	20
3. OBJETIVOS	22
4. FUNDAMENTOS	23
4.1. Materiales empleados en impresión 3D	23
4.1.1. <i>Ácido Poliláctico (PLA)</i>	24
4.1.2. <i>Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)</i>	25
4.2. Modelización de materiales dispuestos en capas	27
4.2.1. <i>Definición de lámina</i>	27
4.2.2. <i>Ley de comportamiento de una lámina</i>	29
4.2.2.1. <i>Tensión plana en ejes principales de una lámina</i>	31
4.2.2.2. <i>Tensión plana en ejes locales de una lámina</i>	33
4.2.3. <i>Rigidez en varias láminas sometidas a tensión plana</i>	36

4.3. Ensayo de tracción.....	37
4.3.1. <i>Objetivos del ensayo.....</i>	<i>38</i>
4.4. Ensayo de flexión	40
4.4.1. <i>Objetivos del ensayo.....</i>	<i>41</i>
4.5. Métodos de medida de deformaciones	44
4.5.1. <i>Extensometría eléctrica</i>	<i>44</i>
4.5.2. <i>Correlación digital de imágenes (DIC).....</i>	<i>45</i>
4.6. Análisis con cálculo numérico. Método de elementos finitos (FEM).....	47
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	51
5.1. Filamentos utilizados para la fabricación.....	51
5.1.1. <i>Ultimaker PLA RAL 9010.....</i>	<i>51</i>
5.1.2. <i>Ultimaker ABS RAL 9003</i>	<i>52</i>
5.2. Modelado de las probetas a ensayar	53
5.2.1. <i>Geometría de las probetas empleadas en el ensayo de tracción.....</i>	<i>53</i>
5.2.2. <i>Geometría de las probetas empleadas en el ensayo de flexión</i>	<i>56</i>
5.2.3. <i>Modelado CAD en 3D de las probetas empleadas en los ensayos.....</i>	<i>57</i>
5.3. Transformación del modelo CAD-3D a lenguaje G-CODE.....	58
5.4. Características de la impresora utilizada	62
5.5. Fabricación de las probetas	64
5.5.1. <i>Adecuación de las probetas para el ensayo</i>	<i>66</i>
5.6. Metodología para obtención y análisis de resultados	68
5.6.1. <i>Ensayo de tracción</i>	<i>68</i>
5.6.2. <i>Ensayo de flexión.....</i>	<i>73</i>
5.6.3. <i>Medida de las deformaciones con Ncorr.....</i>	<i>75</i>
5.6.4. <i>Análisis con Matlab.....</i>	<i>77</i>
5.6.5. <i>Modelo numérico en software de elementos finitos (ABAQUS).....</i>	<i>80</i>
5.6.5.1. <i>Anisotropía y sistemas de referencia</i>	<i>80</i>
5.6.5.2. <i>Metodología para la creación del modelo numérico.....</i>	<i>82</i>
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	88
6.1. Resultados obtenidos en el ensayo de tracción.....	88
6.1.1. <i>PLA con orientación de fibra longitudinal (0°)</i>	<i>91</i>
6.1.2. <i>PLA con orientación de fibra transversal (90°).....</i>	<i>96</i>
6.1.3. <i>ABS con orientación de fibra longitudinal (0°)</i>	<i>102</i>
6.1.4. <i>ABS con orientación de fibra transversal (90°).....</i>	<i>107</i>
6.2. Resultados obtenidos en el ensayo de flexión	112
6.2.1. <i>PLA con orientación de fibra longitudinal (0°).....</i>	<i>112</i>

6.2.2.	<i>PLA con orientación de fibra transversal (90°)</i>	117
6.2.3.	<i>ABS con orientación de fibra longitudinal (0°)</i>	120
6.2.4.	<i>ABS con orientación de fibra transversal (90°)</i>	124
7.	CONCLUSIONES	128
8.	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	130
9.	PLANOS	132
10.	ANEXOS	136
10.1.	Programas realizados para el análisis con Matlab	136
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152

1. RESUMEN

El prototipado rápido, la personalización, y, sobre todo, el bajo coste de máquina y material hacen de la impresión 3D una de las tecnologías con más proyección de futuro actualmente. Además, la diversidad de materiales poliméricos, así como las diferentes resinas acrílicas o epóxicas, hacen que esta tecnología se esté aplicando en multitud de ámbitos y escenarios.

En la actualidad esta tecnología utiliza polímeros con gran recorrido en la industria. Pero la mejora de muchos de estos y el desarrollo de otros nuevos está muy presente, propiciado en mayor medida, por la novedosa forma de conformarlos. De ahí que conocer las propiedades mecánicas de un material conformado de esta manera, sea de vital importancia a la hora de fabricar cualquier elemento, pieza u objeto.

Entre las varias tecnologías de impresión, se destaca Fused Filament Fabrication (FFF) por su gran versatilidad ya que existen una gran cantidad de variables en el proceso de impresión, las cuales, todas y cada una pueden ser modificadas y ajustadas para diferentes fines. Además, esas variables influyen de una u otra forma en el resultado de la impresión, así como en el comportamiento mecánico del elemento impreso.

Y es por todo esto que, en este Trabajo Final de Grado se ha optado por obtener las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y a la flexión) de dos de los polímeros más empleados en impresión FFF: el polímero ingenieril Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) y el biodegradable Polylactic Acid (PLA), además de analizar cómo afecta la orientación de impresión (uno de los parámetros modificables de impresión) en las propiedades mecánicas de los mismos.

Así, en primer lugar, se ha realizado un resumen de los tipos de tecnologías de impresión existentes, seguido del modelado de probetas, procesos de fabricación y una puesta a punto de ensayos mecánicos. A continuación, se ha realizado un análisis e interpretación de resultados con las diferentes técnicas existentes, como, Correlación Digital de Imágenes (2D-DIC) y Método de Elementos Finitos (FEM), con el que se ha realizado un modelo numérico que nos permita simular el comportamiento mecánico de los materiales de elementos impresos. Para finalizar, se incluye una pequeña propuesta sobre posibles y futuras líneas de investigación.

Impresión 3D: Todo un mundo por descubrir...

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el término “*Impresión 3D*” está cada vez más extendido en la sociedad y es considerado como una tecnología novedosa. Sin embargo, fue en 1984 cuando Charles W. Hull dio vida a este concepto, donde nace la primera tecnología de impresión con material denominada “*Estereolitografía (SLA)*”.

Desde ese momento hasta nuestros días, las nociones sobre impresión 3D han sido muy difusas y distintas, dado que este concepto engloba diferentes tecnologías, con diferentes formas de fabricación y con el empleo de diferentes materiales. Todo esto apoyado en un diseño asistido por ordenador para la fabricación de la pieza capa a capa. [1]

Dentro de todas las tecnologías de fabricación aditivas, la “*Impresión por Deposición de Filamento Fundido*” fue la pionera en guiar dicha evolución convirtiéndose en la más conocida actualmente gracias a su facilidad de uso, la estabilidad mecánica y medioambiental de los termoplásticos usados y la posibilidad de construir geometrías y cavidades complejas. [2]

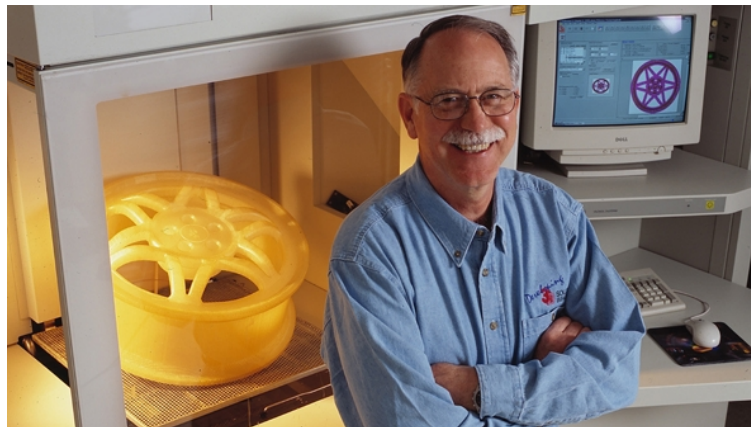


Figura 2-1 Charles W. Hull junto a un modelo por estereolitografía de una llanta de automóvil [2]

Normalmente, para hacer referencia a la tecnología de fabricación mediante filamento fundido se utiliza el término en inglés “*Fused Deposition Modeling (FDM)*”. Sin embargo, éste concepto es una marca registrada por Stratasys Inc. [3]. Es por esto que la comunidad de miembros del proyecto “*RepRap*” [4] propuso un término similar para poder hacer referencia a esta tecnología sin ningún tipo de limitación legal; “*Fabricación con Filamento Fundido*”, del inglés “*Fused Filament Fabrication (FFF)*”. [5]

Por este motivo, a lo largo de este proyecto, se empleará dicho término para hacer referencia a esta tecnología de impresión.



Figura 2-2 Impresora 3D FFF Original Prusa i3 MK2. [6]

2.1. Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva

Actualmente, existen multitud de procesos de manufactura aditiva; todas ellas diferenciadas en mayor medida por la forma de crear o depositar la capa y las limitaciones para según qué tipo de material.

Atendiendo a estos dos criterios, los tipos de tecnologías existentes más significativas son:

2.1.1. *Selective Laser Sintering (SLS)*

El sinterizado selectivo por láser (SLS) utiliza un láser para endurecer y unir pequeños granos de polímero en capas formando una estructura tridimensional.

El láser traza el patrón de cada sección transversal del diseño 3D sobre un lecho de polvo y, una vez que la capa está construida, la cama de impresión baja y otra capa se construye en la parte superior de las capas existentes. El proceso se repite tantas veces como capas tenga el modelo hasta completar el producto.

Para finalizar el proceso, se inserta el producto en una estación con enfriamiento rápido donde se elimina el polvo sobrante que rodea a la pieza. [7]

Debe realizarse en una atmósfera controlada en ausencia de oxígeno.

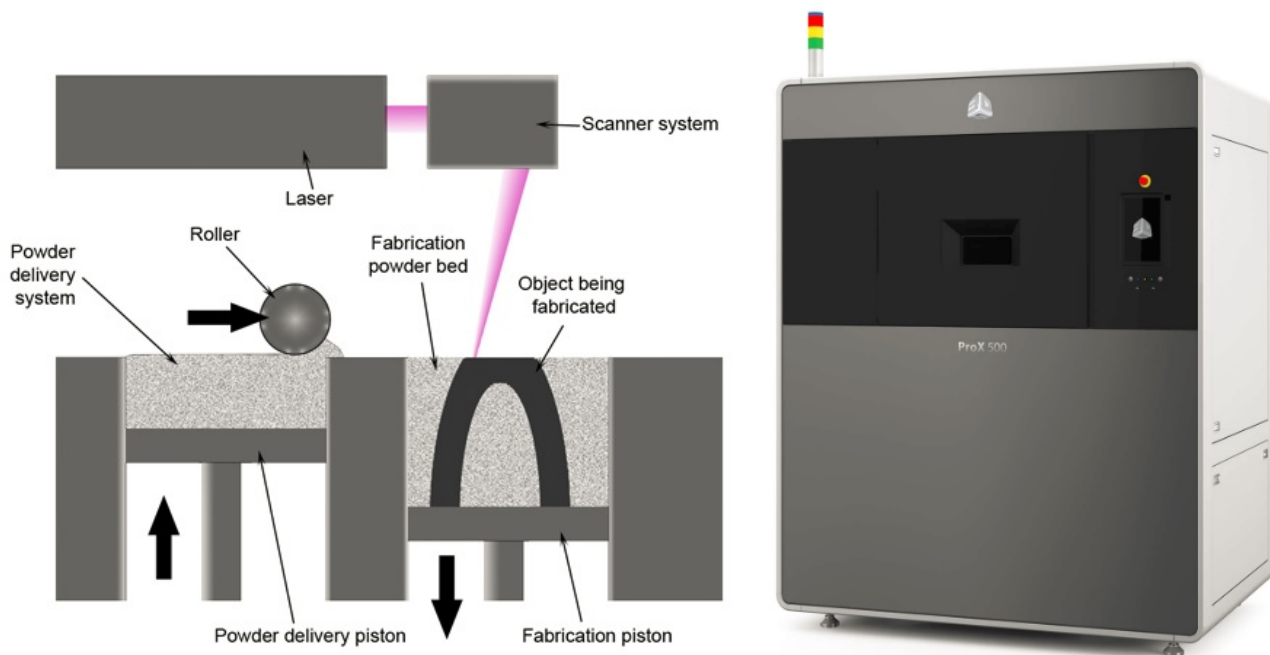


Figura 2-3 Esquema de funcionamiento [8] e impresora ProX SLS 500 de 3D Systems

2.1.2. Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía (SLA) utiliza un recipiente con resina de fotopolímero líquido la cual es curada por un láser ultravioleta (UV) para solidificar el patrón capa a capa, a fin de crear un modelo 3D sólido a partir de los datos (diseño por ordenador) suministrados por el cliente. El proceso SLA es el que posibilita el mayor abanico de aplicaciones de fabricación rápida. [9]

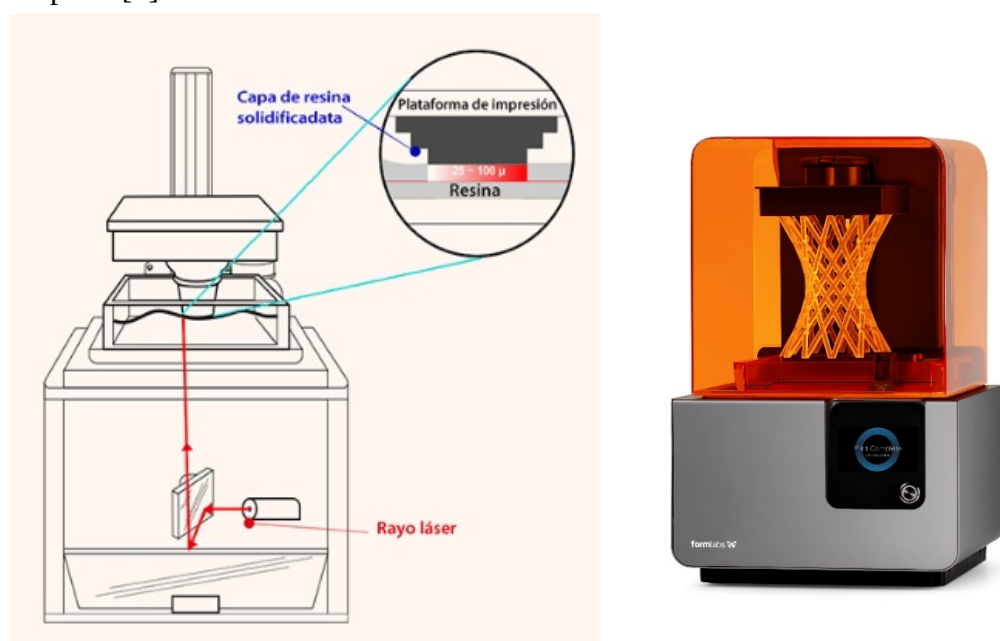


Figura 2-4 Esquema de funcionamiento [9] e impresora SLA Formlabs Form 2

2.1.3. Selective Laser Melting (SLM)

Es una tecnología similar al sinterizado selectivo por láser (SLS) pero en este caso el láser consta de mayor potencia y se usa para fundir completamente los granos de metal en una masa homogénea.



Figura 2-5 Impresora Industrial SLM 280 HL (Fuente: SLM Solutions)

2.1.4. Fused Filament Fabrication (FFF)

El método de fabricación con filamento fundido consiste en calentar y extruir un material termoplástico suministrado en hilo a través de una boquilla que va trazando la geometría de la sección transversal de la pieza capa a capa. En la construcción es necesario crear estructuras de soporte para ciertas geometrías, realizándose estas, en un material diferente al de construcción lo cual permite que pueden ser retiradas fácilmente con la mano o incluso disolverse en una solución acuosa. [10]

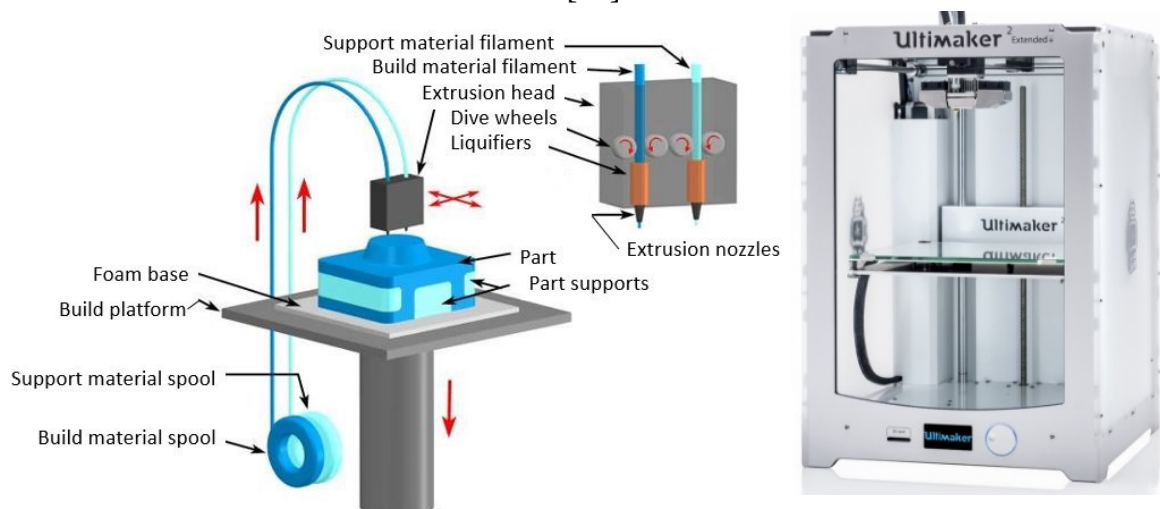


Figura 2-6 Esquema de funcionamiento [11] e impresora Ultimaker 2 Extended Plus

2.1.5. PolyJet

Esta tecnología funciona de forma que se inyectan en una bandeja capas de fotopolímero líquido que se pueden endurecer mediante luz ultravioleta, necesitando soportes para las geometrías complejas. [12]

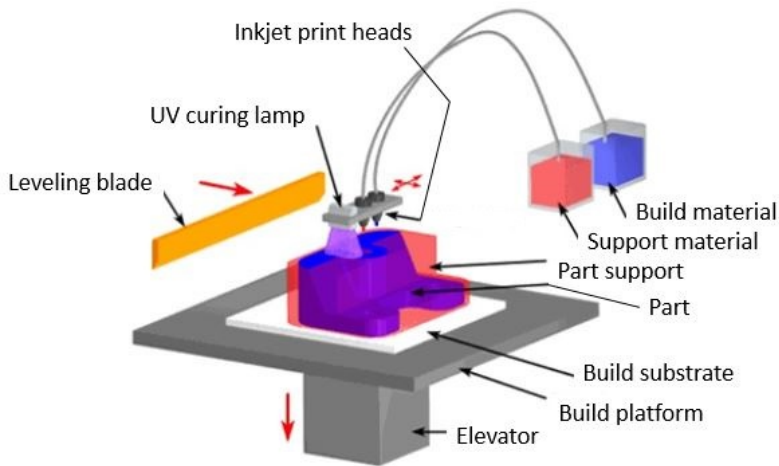


Figura 2-7 Esquema de funcionamiento [12] e impresora Objet260 Connex de Stratasys

2.2. Parámetros principales de impresión para tecnología FFF

Como se ha visto anteriormente, la tecnología de impresión FFF es la más popular de entre todas. Y si bien una de las características de esta tecnología es su sencillez, cuando hablamos de un uso profesional (optimización de tiempos de impresión, calidad superficial y mejora de propiedades mecánicas), esa sencillez se deja de lado para convertirse en un proceso complejo.

La impresión FFF es una de las tecnologías más versátiles debido a su gran cantidad de parámetros modificables, los cuales, cada uno de ellos influyen de una u otra forma en el comportamiento mecánico del elemento impreso y determinarán la resistencia, tolerancia dimensional, acabado superficial, densidad y masa total de la pieza.

Es por este motivo que se ha elegido como objeto de estudio para el presente proyecto.

Los principales parámetros son los siguientes:

2.2.1. Velocidad de impresión

La velocidad de impresión es aquella a la que se mueve el cabezal de extrusión mientras deposita el filamento fundido en la cama de impresión y es un parámetro muy importante ya que está directamente relacionado con el tiempo total de impresión (aunque también este condicionado por otros parámetros) y dependiendo de este, la pieza será más o menos costosa.

Además, dependiendo de si dicha velocidad es demasiado alta o baja producirá vibraciones en la máquina que afectarán a las dimensiones y acabados finales de la pieza o permitirá un mayor tiempo de enfriamiento a la última capa impresa antes de que se deposite sobre ella la capa consecutiva, afectando a la adhesión entre estas y, por tanto, a la resistencia mecánica, respectivamente.

Destacar que no se debe confundir este parámetro con la velocidad de flujo ya que esta última está relacionada con la velocidad de extrusión del filamento fundido.



Figura 2-8 Pieza defectuosa debido a una velocidad de impresión alta. [13]

2.2.2. Perímetros laterales y capas de cierre

Estos parámetros están relacionados con la consistencia del material, ya que modificándolos se pueden obtener comportamientos mecánicos muy diferentes.

En muchos casos en los que se quiere ahorrar material en la impresión y no por esto renunciar a la resistencia, se opta por reducir el porcentaje de relleno y añadir un par de capas laterales y de cierre, siendo estas últimas impresas en distintas orientaciones.

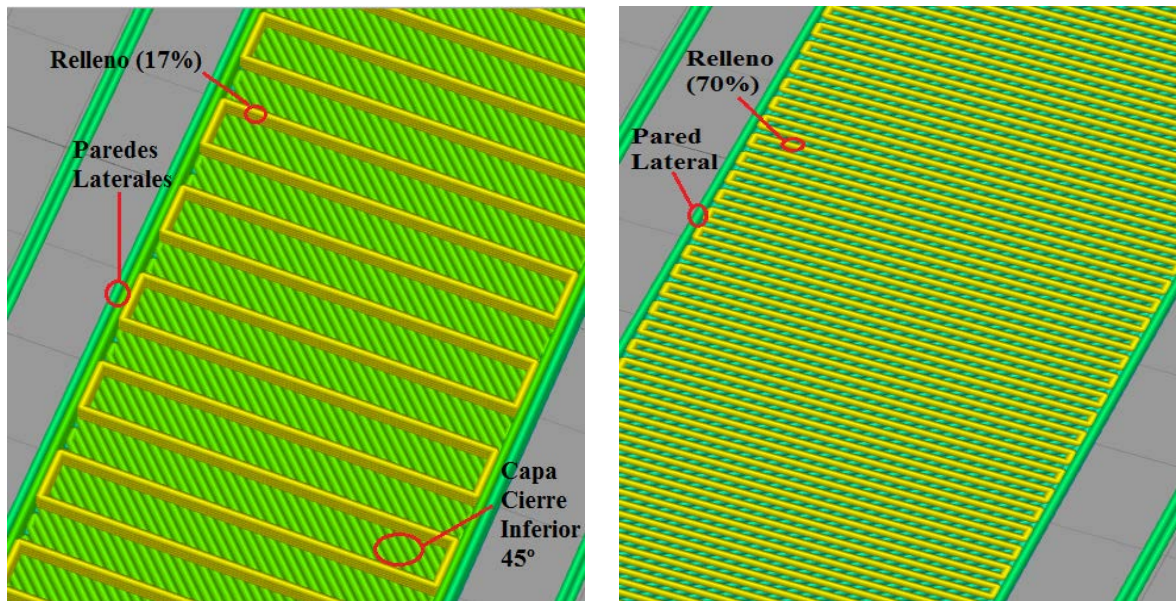


Figura 2-9 Configuración A (izquierda) y B (derecha) con misma resistencia realizada con software “Simplify3D”. (Fuente: Elaboración Propia)

Como se puede observar en la figura anterior, se ha realizado dos configuraciones totalmente diferentes, con la misma resistencia, pero con costes muy distintos; siendo la configuración A la más económica.

2.2.3. Porcentaje, patrón y ángulo de relleno

Como se ha comentado en el apartado anterior, dependiendo de los requerimientos que se desee que cumpla la pieza, se puede hacer un elemento más o menos macizo (porcentaje de relleno variable entre 0 % y 100 %) y con patrones de relleno diferentes. Entre estos, los más comunes son el rectilíneo, rejilla (45°, -45°) y el de panel de abeja.

Además, el ángulo de relleno será de vital importancia para el comportamiento mecánico del elemento impreso ya que dependiendo de cómo vaya a trabajar dicho elemento se requerirá que las fibras estén orientadas de una u otra forma. Es por esto que se ha elegido como objeto de estudio y será explicado con más detenimiento más adelante.

Estos parámetros influirán en el peso, costo y resistencia final de la pieza, habiendo siempre, multitud de configuraciones posibles

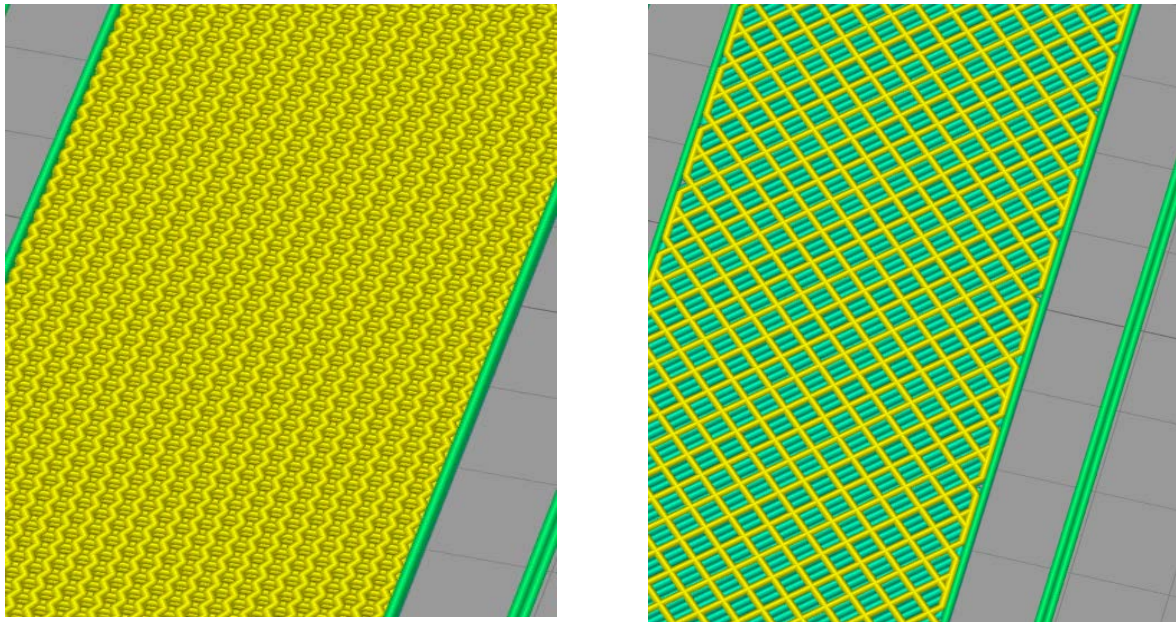


Figura 2-10 Patrón panel de abeja con 90 % de relleno (izquierda) y patrón rejilla 45°, -45° con 50 % de relleno (derecha) realizada con software “Simplify3D”.

(Fuente: Elaboración Propia)

2.2.4. Altura de capa

El grosor de cada capa o altura de capa es uno de los parámetros más importantes y útiles en el proceso de impresión ya que obtendremos un mejor o peor acabado superficial en el eje “Z” dependiendo del valor que le demos, así como una influencia en la adhesión entre las distintas capas y en el tiempo de impresión.

Actualmente, en el mercado encontramos diámetros de boquilla o “Nozzle” de 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.6 y 0.8 mm. Y dependiendo de estos diámetros, variarán los valores de la altura de capa. Normalmente, los fabricantes recomiendan valores para este parámetro entre 0.1 mm y no superiores al 80 % del mismo.

Observando la Figura 2-11, se puede ver el porqué de los valores de este parámetro y porqué están condicionados por el diámetro del Nozzle. Vemos que, si el valor de la altura de capa es superior al 80% del diámetro de la boquilla, el tiempo de impresión será reducido pero las capas tendrán muy poca o ninguna adhesión entre ellas, produciendo el llamado “warping” (mala adhesión entre las capas).

Por el contrario, si elegimos valores comprendidos entre los recomendados, aseguramos una buena unión entre las capas y permitimos que el proceso de impresión sea correcto, a cambio de un tiempo de impresión mayor.

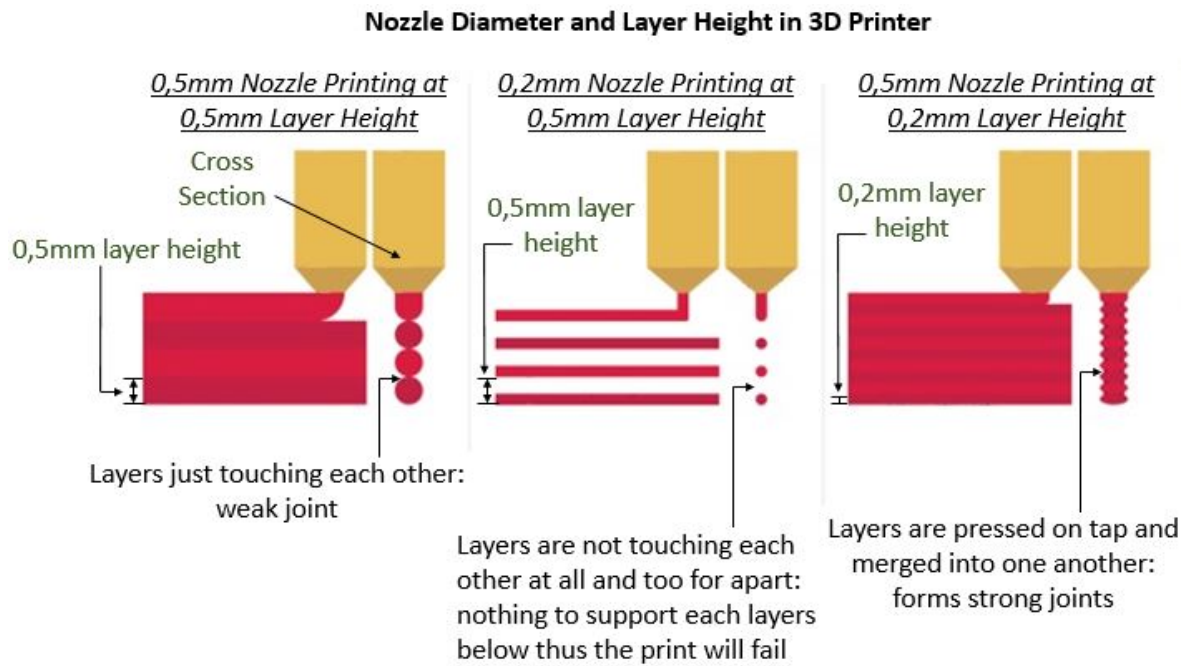


Figura 2-11 Efecto de la altura de capa con respecto al diámetro de boquilla. [14]

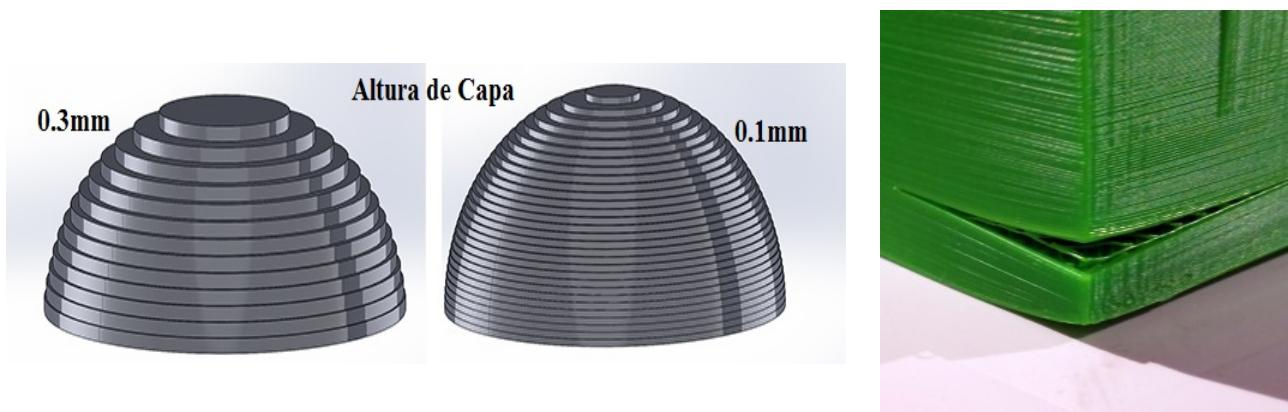


Figura 2-12 Variación de la calidad superficial (izquierda) y efecto “warping” (derecha). [14]

2.2.5. Diámetro de la boquilla (Nozzle)

El diámetro de la boquilla o Nozzle indica la cantidad de material semifundido que se va a extruir y dependiendo de si la boquilla es más gruesa o más fina se obtendrán unos u otros resultados.

Boquillas con diámetros más grandes (más gruesas), reducirán los tiempos de impresión, pero la resolución superficial será muy baja. Por el contrario, una boquilla con diámetros más pequeños (más finas), tendrán un tiempo de impresión mayor para crear la pieza, pero la resolución superficial será óptima.

El valor más usado actualmente es de 0.4 mm, que proporciona una muy buena relación entre velocidad de impresión y acabado.

2.2.6. Temperatura de impresión

Parámetro muy relacionado con la velocidad de flujo debido que a un aumento de dicho parámetro implica una mayor temperatura de impresión.

De nuevo, dependiendo de los requerimientos de la pieza o elemento a imprimir se elegirá un valor de temperatura u otro, pero evitando los extremos, es decir, una temperatura de impresión demasiado baja hará que el polímero no fluya correctamente, produciendo obstrucciones innecesarias en el extrusor o una temperatura demasiado alta, puede provocar que el filamento se degrade y pierda propiedades estructurales.

Aunque cada fabricante facilita un rango de temperaturas para obtener impresiones óptimas, este parámetro se deberá ajustar para cada impresión y para cada material.



Figura 2-13 Obstrucción en el extrusor. Temperatura de impresión incorrecta. [13]

2.2.7. Velocidad del ventilador de capa

El ventilador de capa se sitúa acoplado a una pequeña tobera que aumenta la velocidad y hace que el flujo de aire esté orientado hacia la boquilla de extrusión. Además, la velocidad del mismo permite a la última capa que solidifique más rápido.

2.2.8. Distancia inicial entre Nozzle y cama de impresión

Este parámetro suele ser imprescindible a la hora de iniciar una impresión ya que permitirá, si está bien configurado, que la impresión se lleve a cabo sin problema.

De nuevo, dependiendo del valor que se escoja se podrán obtener diferentes resultados de impresión:

Si el Nozzle se encuentra muy alejado, las capas iniciales no se adherirán bien a la cama y se obtendrá el ya mencionado “warping”.

Si por el contrario está muy cerca de la cama de impresión, se producen obstrucciones de material y surcos en las capas iniciales.



Figura 2-14 Nozzle demasiado cerca de la cama de impresión.

(Fuente: Elaboración Propia)

2.3. Aplicaciones en la actualidad. Industria 4.0

El término “Industria 4.0” fue empleado por el gobierno alemán para referirse a la fábrica inteligente; una visión de la fabricación informatizada con todos los procesos interconectados por el “Internet de las cosas” (Interconexión digital de objetos con internet).

Gracias a la Industria 4.0, las fábricas estarán “auto gestionadas”, aumentarán su eficiencia, ganarán flexibilidad y serán capaces de ofrecer productos personalizados a sus clientes, con un tiempo de entrega y costes reducidos. Y por supuesto, la impresión aditiva jugará un papel muy activo en esta cuarta revolución industrial. [15]

2.3.1. Modelado de conceptos

El modelado de conceptos proporciona un alcance más amplio en la viabilidad de ideas permitiendo desarrollar las más adecuadas, ya que, en grandes compañías, el poder obtener un modelo del elemento real a un coste relativamente bajo es un factor clave para

poder pulir las geometrías y diseños antes de ser fabricado, lo que ahorrará problemas posteriores en dicho proceso.

La tecnología FFF es muy versátil en este sentido ya que permite obtener dichos modelos en cuestión de días/horas (dependiendo de la geometría del elemento) y totalmente personalizables debido a las propiedades de los termoplásticos (pueden ser perforados, pulidos y pintados si se prefiere), lo que ayuda a ver el resultado in situ con posibilidad de probar que el diseño este correcto.



Figura 2-15 Modelo para mando de consola. [16]

2.3.2. Prototipado rápido y funcional

Crear modelos con rapidez, corregir y realizar mejoras en las primeras fases del proceso de diseño cuando el coste es menor o realizar prototipos funcionales de alto rendimiento que puedan soportar estrés térmico, químico e incluso mecánico es otra de las ventajas de las tecnologías de fabricación aditivas.



Figura 2-16 Prototipo funcional palanca de cambios de una carretilla elevadora eléctrica.

[16]

2.3.3. Utillajes de fabricación

También la tecnología FFF permite crear útiles para ayudar a la fabricación y montajes de diferentes elementos, aportando de nuevo costes y tiempos muchos más bajos que otras tecnologías.

Últimamente, se emplea mucho en la fabricación de moldes y útiles de soporte/unión.



Figura 2-17 Molde para pieza. [16]

2.3.4. Prótesis y modelos para medicina

Sin duda, el campo de la medicina es el que más innovaciones ha introducido gracias a la impresión aditiva, siendo sus aplicaciones las que más sorprenden. Y, de hecho, aunque el proceso de la “bioimpresión” esté en pleno desarrollo y evolución ya es posible imprimir células vivas en lugar de materiales plásticos. [17]

De nuevo, junto al avance de la tecnología está su materia prima y en unas pocas horas se puede lograr imprimir materiales que son aceptados por el cuerpo humano. [17]

Además, inicia una nueva forma de afrontar diferentes operaciones, ya que se puede obtener un modelo real del órgano dañado y ensayar con antelación dicha operación, evitando riesgos que hasta hace poco eran imposibles de reducir.

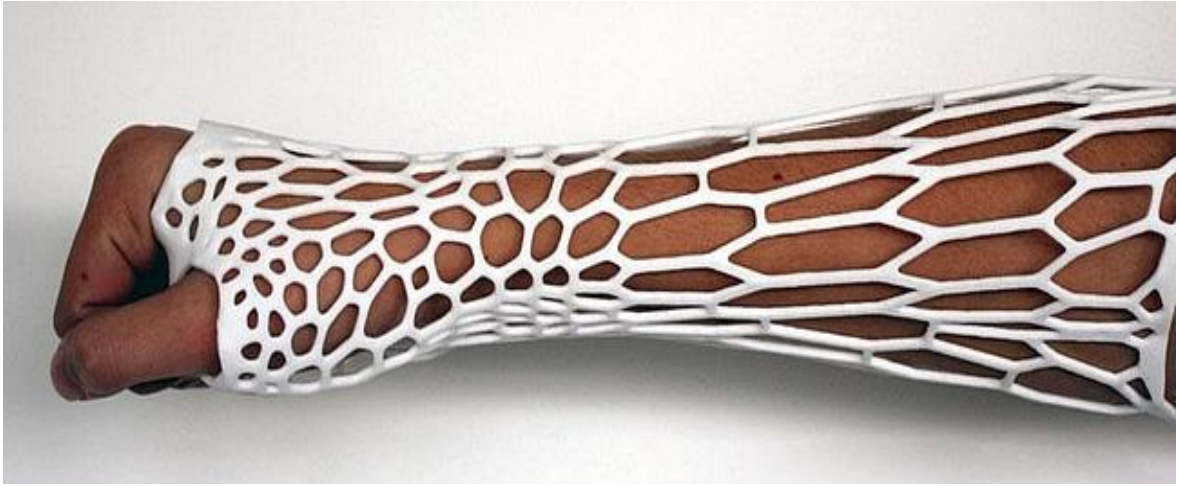


Figura 2-18 Férula impresa con tecnología FFF. [16]

3. OBJETIVOS

Como hemos visto, las posibilidades y ventajas que ofrece esta novedosa tecnología son bastante amplias, pero ante tanta variedad, pocos son los estudios que se han llevado a cabo sobre analizar qué características mecánicas tiene el elemento impreso con vista a que este pueda ser funcional [18] [19] [20]. Además, entiéndase que ver la influencia que tiene todos y cada uno de los parámetros de impresión sobre la resistencia de la pieza final es un trabajo complicado y costoso tanto en horas de impresión, material y tiempo de investigación.

Es por esto que con este Trabajo Final de Grado se pretende acercar al lector al extenso campo de la caracterización de los materiales de impresión 3D para tecnología FFF ya que es una de las más extendidas, utilizadas y desarrolladas hasta el momento.

En concreto, se va a llevar a cabo una caracterización de dos materiales muy demandados por la industria como son el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y Ácido poliláctico (PLA). Además se va a analizar la influencia que tiene la orientación de impresión (parámetro modificable en fabricación aditiva FFF) sobre sus propiedades mecánicas.

Y, en referencia a esto, se plantean los objetivos más concretos del presente texto en torno a tres ideas principales de la impresión 3D: configuración y metodología de impresión, realización de un estudio experimental y validación de los resultados mediante un modelo numérico. De esta forma, los objetivos específicos que se persiguen son:

- Impresión de probetas abordando una configuración diferente que nos permite evaluar la influencia del parámetro al 100%.
- Caracterización mecánica de las probetas fabricadas. Para ello, se realizarán diferentes ensayos de tracción y flexión ya que nos aportan las propiedades más interesantes. Así, en esta fase se utilizará una técnica óptica para la medición de las deformaciones llamada correlación digital de imágenes (DIC).
- Para terminar, se pretende comprobar que los resultados y propiedades obtenidas en los ensayos se pueden predecir a través de un modelo numérico que simule cada orientación de impresión. Para ello, se realizará un análisis mediante el método de elementos finitos (FEM) para diferentes estados de carga y se comparará con los resultados experimentales para ver que el modelo numérico es válido.

4. FUNDAMENTOS

A continuación, se explicarán los conceptos fundamentales de las nociones teóricas más importantes sobre las que se fundamentan los diferentes aspectos del presente texto, así como se dará a conocer las propiedades y composición de los materiales empleados.

4.1. Materiales empleados en impresión 3D

Como cualquier tecnología de fabricación, la impresión 3D cuenta con un abanico muy extenso de materiales. Todos ellos son de tipo polimérico pertenecientes, en su mayoría, al grupo de los termoplásticos y, atendiendo al elemento a fabricar y sus requerimientos, se deberán emplear unos u otros.

De entre todos estos, pueden mencionarse los pertenecientes al grupo de las poliamidas. Este tipo de polímeros se caracterizan por su biocompatibilidad y su buen equilibrio entre sus características mecánicas y químicas, lo que permite que tengan una gran estabilidad, rigidez, flexibilidad y resistencia a los choques. Son muy empleados en tecnología de Sinterizado Selectivo por Laser (SLS), obteniendo muy buenos acabados, y en tecnología de Fabricación por Filamento Fundido (FFF) como es el caso del Nylon.

Otros materiales interesantes son, por ejemplo, el Policarbonato (PC), el cual presenta una gran resistencia al impacto y a la deformación térmica, o el Polipropileno (PP), que presenta una gran flexibilidad muy interesante para fabricar envases para alimentos, tejidos, equipos de laboratorio, elementos de vehículos, entre otros. Ambos pertenecen al grupo de los termoplásticos y son muy usados en tecnología FFF.

También se pueden mencionar algunos polímeros compuestos como el Laybrick (mezcla de polímero y polvo de yeso) o el Laywoo-D3 (mezcla de polímero y un 40% de polvo de madera), así como algunos materiales muy utilizados para realizar soportes como son el Poliestireno de Alto Impacto (HIPS) o el Acetato de Polivinilo (PVA) cuya característica principal es la de diluirse en D-Limoneno (sustancia natural extraída de las cáscaras de los cítricos) y agua respectivamente.

Pero en esta amplia lista, existen dos materiales que, actualmente, son los más populares y empleados en impresión FFF. Estos son el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y el Ácido Poliláctico (PLA), pertenecientes ambos, a la familia de los termoplásticos.

Debido a que son los materiales más utilizados por su facilidad de impresión, sus buenas características mecánicas y los que más desarrollo están teniendo para tecnología aditiva FFF, se han escogido como objeto de estudio. Es por esto que los siguientes apartados se dedicarán a detallar las características de cada uno de ellos, dejando un poco de lado a los demás.

4.1.1. Ácido Poliláctico (PLA)

Muchos de los sectores más importantes de la industria apuestan, cada vez más, por la utilización de materiales poliméricos. Precios muy competitivos y la posibilidad del petróleo, que ofrece una mayor disponibilidad de materiales sintéticos, han permitido que estos sustituyan de forma parcial y a veces total a los naturales como la madera o el acero.

Pero la repercusión de este tipo de materiales en el medio ambiente es bastante grande generando, además, un gran impacto visual en ciudades y alrededores.

Con este panorama y debido al aumento de los costes de los polímeros de origen petroquímico [21] y a que las reservas de petróleo son cada vez más escasas [22], la necesidad de una consciencia medioambiental empieza a aumentar potenciando la investigación y el desarrollo de materiales poliméricos biodegradables.

El Ácido Poliláctico (PLA) empieza a destacar por su amistad con el ecosistema y comienza así a ser analizado con más detalle. Su biocompatibilidad, sostenibilidad y multitud de aplicaciones en referencia a sus propiedades mecánicas lo convierten en un material de lo más interesante [23].



Figura 4-1 Prototipo en PLA de botella fabricada mediante tecnología FFF. [16]

El PLA no es más que un poliéster alifático del ácido láctico que se obtiene a partir de la sacarosa, encontrada en el azúcar de caña y en la remolacha azucarera, la lactosa, proveniente del lactosuero y la dextrosa, procedente de almidón hidrolizado [24], y debido a la longitud necesaria de las cadenas que lo forman, se requieren parámetros de pureza mayores que en el caso de otros polímeros aromáticos muy utilizados en la industria como son el PET y el PBT.

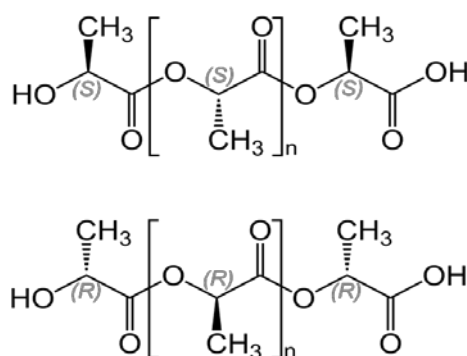


Figura 4-2 Unidad estructural del polímero PLA. [25]

En cuanto a sus propiedades mecánicas y a sus características nos encontramos que se presenta muy estable a temperaturas por debajo de su temperatura de transición vítrea (55°C), pero, sin embargo, al superar ésta se convierte en un material biológicamente degradable por microorganismos. Además, luce claro y brillante similar al poliestireno, es estable a luz U.V y cuenta también con una inflamabilidad baja, una temperatura de fusión de 175°C, requiriéndose superar esta (180°C - 190°C) para su procesamiento, y con características de transparencia en estado amorfo, las cuales se vuelven opacas a medida que este va cristalizando [25].

Con el auge de la impresión 3D, se comprobó que este material era fácil de utilizar puesto que no requiere de cama caliente (temperatura de plataforma de impresión desde ambiente hasta 60°) para su correcta impresión [25] y permite ser conformado en forma de filamento para poder ser suministrado fácilmente al extrusor de la impresora. Todo esto, sumado a las ventajas mencionadas anteriormente como su carácter biodegradable, entre otras, lo convierten en un material muy interesante.

4.1.2. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

Otros de los materiales poliméricos muy utilizados por diferentes sectores industriales es el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). Este material, debido a su rigidez,

bajo peso y su resistencia al rayado, es muy utilizado por el sector automotriz para la fabricación de pilotos de luces, rejillas o paragolpes. [26]

El ABS está considerado como un termoplástico amorfo procedente del petróleo, el cual está constituido por tres bloques principalmente: acrilonitrilo, butadieno y estireno, aportando cada uno de ellos diferentes propiedades. Es por esto que esta denominado como polímero ingenieril, debido a que su elaboración y procesamiento es más complejo que los del resto.

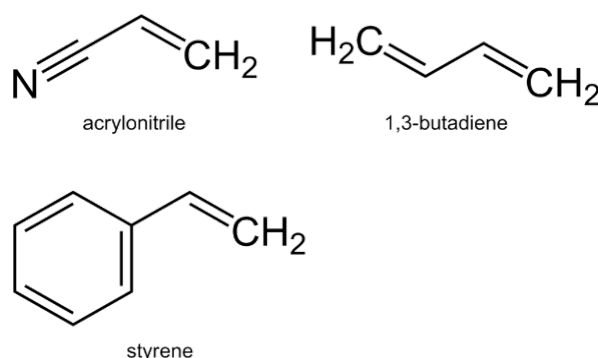


Figura 4-3 Componentes del polímero ABS. [27]

En cuanto a sus propiedades mecánicas y a sus características presenta una gran tenacidad, incluso a baja temperatura (-40°C), dureza, rigidez y alta resistencia a la abrasión, lo que lo hacen adecuado para su uso en automoción y otros usos industriales como por ejemplo en el sector juguetero [27]. De hecho, las piezas del gran conocido juego para niños, Lego, están fabricadas con este material.



Figura 4-4 Piezas de LEGO fabricadas en ABS con tecnología FFF. [28]

Su uso en impresión 3D no fue tanto por su facilidad para ser impreso (necesidad de usar una cama caliente entre 70 y 90 °C junto un adhesivo, así como la necesidad de un entorno de impresión con temperatura controlada y cerrado por los gases nocivos procedentes de su fusión) sino por el interés de realizar prototipado rápido con menor coste frente a los tradicionales moldes de inyección. [28]

4.2. Modelización de materiales dispuestos en capas

Cuando se habla de tecnología aditiva FFF, no se puede pasar por alto la forma la cual es capaz de crear elementos: adicionando capas hasta alcanzar la geometría final del objeto. En este punto, se llevó a cabo una revisión de textos sobre los diferentes modelos propuestos para hacer un estudio de los elementos fabricados con impresión 3D y, tal y como se expone en [29], se puede hacer notoria la similitud de su estructura con la de un material compuesto, ya que este se compone de un conjunto de capas, de las cuales cada lámina consiste en una fibra encerrada por un material de matriz [30].

Es por este motivo que, en los siguientes apartados, se exponen las principales características del modelo basado en la teoría clásica de laminados.

4.2.1. Definición de lámina

La lámina se define como la unidad básica del laminado. Dentro de las láminas, y referente a la fabricación aditiva, se pueden distinguir varios tipos [31]:

- Lámina unidireccional: Las fibras se disponen en una única orientación y por lo tanto todas las capas se imprimirán en una única dirección. En este tipo de láminas, existe isotropía transversal: mismas propiedades en todas las direcciones de un plano que se encuentre perpendicular al de las fibras impresas.
- Lámina tipo tejido: En este caso, las fibras se encuentran superpuestas en dos direcciones perpendiculares entre sí, y a diferencia de un laminado, estas no se entrelazan formando una trama. En FFF, este tipo de composición suele ser la más empleada (sobre todo 0°,90° y 45°,-45°) ya que suele dar más consistencia y resistencia al elemento impreso, así como facilita a que la impresión se realice correctamente. Se considerará que existe ortotropía en este tipo de lámina al igual que en un laminado.

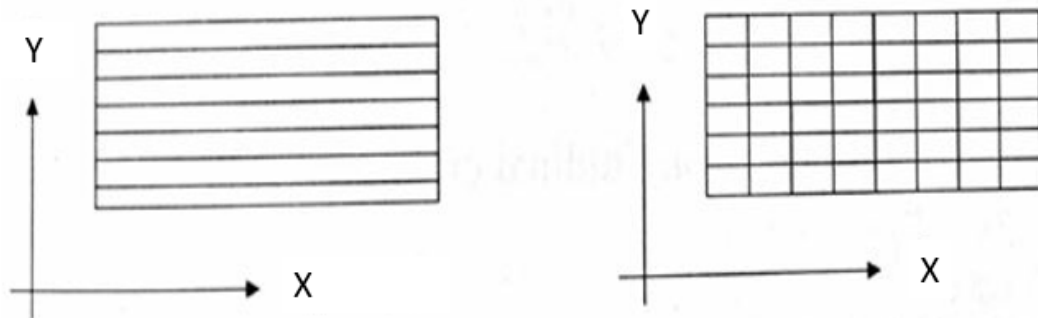


Figura 4-5 Lámina unidireccional (izquierda) y lámina tipo tejido (Derecha). [31]

Además de los ya mencionados, existen otros tipos menos usados en fabricación aditiva pero que deben ser citados. Estos son:

- Lámina tipo triangular: Geometría realmente útil ya que ofrece una gran resistencia al impacto y a cargas laterales altas.
- Lámina tipo curvilíneo (Wiggle): Muy poco utilizada por ser la que menos rigidez aporta, aunque a veces, si se quiere un elemento que pueda girar, esta lámina puede aportar un poco de flexibilidad.
- Lámina hexagonal (panal de abeja): Se considera una de las más óptimas para la mayoría de piezas impresas ya que aporta la mejor relación entre material usado y resistencia. Permite ahorrar tiempo de impresión y se adapta a la mayoría de diseños.

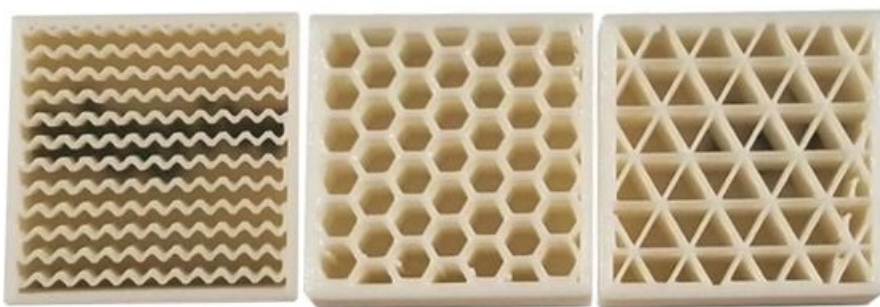


Figura 4-6 De izquierda a derecha, lámina tipo Wiggle, lámina tipo hexagonal y lámina tipo triangular. [2]

Generalmente, las láminas constan de espesores que varían entre los 0.1 mm y los 1 mm de espesor.

Para el caso concreto de este Trabajo Final de Grado, se va a centrar la atención en el primer tipo de lámina (unidireccional) ya que es la que permitirá ver el efecto de la

orientación de la fibra sobre las propiedades mecánicas del material y es factible para ser modelada con el software de elementos finitos.

4.2.2. Ley de comportamiento de una lámina

Cuando un determinado elemento es fabricado mediante FFF, el resultado es una estructura formada por líneas de material fundido apiladas en capas. Siguiendo con la semejanza propuesta anteriormente a la estructura de un material compuesto (laminado), entonces una pieza impresa se constituye por un conjunto de fibras orientadas apiladas en láminas de pequeño espesor.

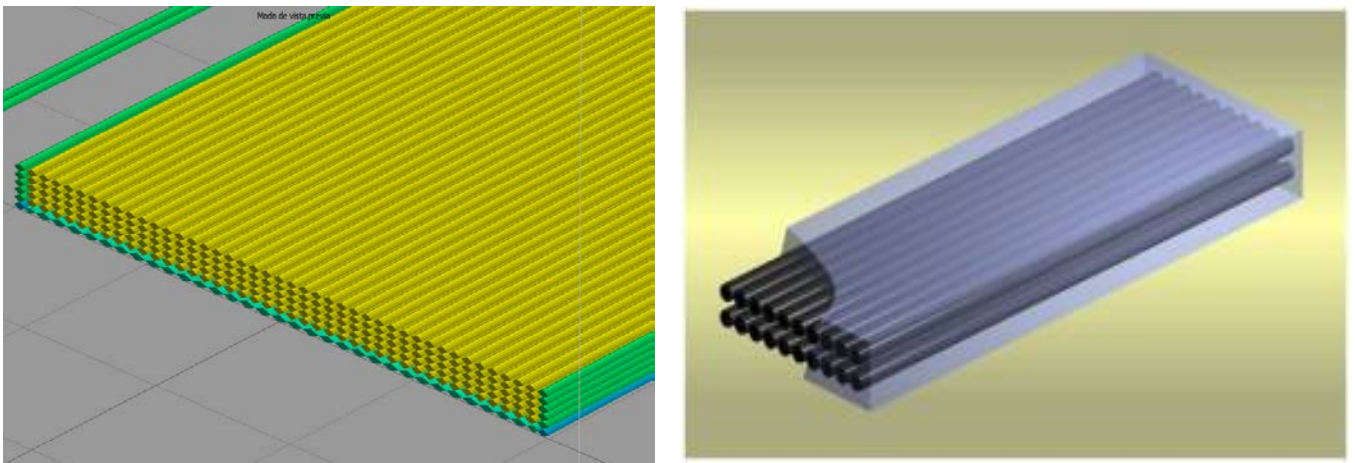


Figura 4-7 Semejanza elemento impreso FDM (izquierda) y material compuesto reforzado con fibras (derecha). [29]

Para analizar el comportamiento mecánico, se someterá a una serie de cargas externas. Los resultados dependerán de cómo se apliquen estas cargas, es decir, si dicha carga se encuentra aplicada en la misma dirección de las fibras, aparecerán deformaciones iguales (figura 4-8 a). Por el contrario, cuando la carga se aplica en dirección perpendicular a las fibras, estará presente la misma tensión (figura 4-8 b). Finalmente, si se analiza una lámina tipo tejido, la cual contiene fibras bidireccionales (perpendiculares entre sí), aparecerán valores principales en dos direcciones e intermedios en las direcciones oblicuas (figura 4-8 c).

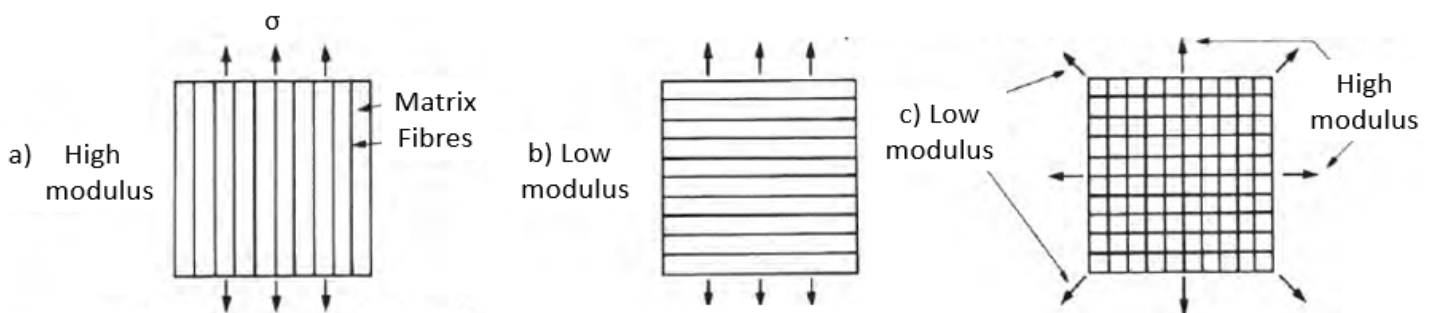


Figura 4-8 Estados de carga sobre distintas láminas [32].

La ley que establece el comportamiento de materiales elásticos lineales en un campo de tres dimensiones viene expresada de la siguiente forma:

$$\sigma_i = Q_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (1)$$

donde denominamos Q como el tensor de rigidez.

Cabe mencionar que, debido a las numerosas notaciones de los diferentes autores revisados, se ha optado por hacer uso de la siguiente. Donde:

$$\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \sigma_y & \tau_{yz} & \sigma_z \\ Sim & & \end{pmatrix} \quad \underline{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy}/2 & \gamma_{xz}/2 \\ & \varepsilon_y & \gamma_{yz}/2 \\ Sim & & \varepsilon_z \end{pmatrix}$$

De esta forma, en el caso de considerar un material completamente anisótropo, esto implica tener que trabajar con 21 constantes elásticas.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ & & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ & & & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ & sim & & & Q_{55} & Q_{56} \\ & & & & & Q_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Para el caso de estudio, esta propiedad del material queda presente pero no puede considerarse como completamente anisótropo pues dependiendo de la configuración de la impresión y las orientaciones que se establezcan, aparecerá en mayor o menor medida. Es por esto que se ha considerado ortotropía del material, ya que existe simetría en tres planos ortogonales y permite reducir el número de constantes no nulas a 12, de las cuales 9 son independientes. De esta forma se obtiene:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Si se invierte la matriz de rigidez se obtiene la matriz de flexibilidad que nos determina la relación del tensor de deformaciones en función del tensor de tensiones.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Observando la ecuación (1), los valores que componen la matriz de rigidez pueden depender de las constantes elásticas del material las cuales vienen dadas por la ley de Hooke generalizada. De este modo tenemos que:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_y + \sigma_z) & \gamma_{xy} &= 2 \cdot \frac{1 + \nu}{E} \cdot \tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_z) & \gamma_{xz} &= 2 \cdot \frac{1 + \nu}{E} \cdot \tau_{xz} \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) & \gamma_{yz} &= 2 \cdot \frac{1 + \nu}{E} \cdot \tau_{yz} \end{aligned} \quad (5)$$

En el caso de los valores que componen la matriz de flexibilidad, las constantes vienen dadas mediante las ecuaciones de Lamé:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_x + \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) & \tau_{xy} &= G \cdot \gamma_{xy} \\ \sigma_y &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y + \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) & \tau_{xz} &= G \cdot \gamma_{xz} \\ \sigma_z &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) & \tau_{yz} &= G \cdot \gamma_{yz} \end{aligned} \quad (6)$$

donde E es el módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young y G es el denominado módulo de elasticidad transversal del material, el cual es una constante del mismo y viene expresado por la ecuación:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (7)$$

4.2.2.1. Tensión plana en ejes principales de una lámina

En un ensayo, para conocer las propiedades elásticas de una lámina, coincidiendo la orientación de las fibras con la dirección de aplicación de la carga, suelen estar sometidos o trabajar bajo estados de tensión plana. Luego particularizando las ecuaciones expuestas anteriormente para este caso obtenemos:

$$\begin{aligned}
\sigma_z &= 0 & \tau_{yz} &= 0 & \gamma_{yz} &= 0 \\
\tau_{xz} &= 0 & \gamma_{xz} &= 0 & \varepsilon_z &= -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y)
\end{aligned}$$

Donde, si se aplican estos cambios en la matriz de flexibilidad mencionada anteriormente (4) y se considera despreciable la deformación en la dirección 3 (tercer eje principal asociado a la dirección del espesor), el sistema queda reducido a:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Y si se considera que tiene un comportamiento parecido a los materiales ortótropos, los valores de la matriz quedan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
S_{11} &= \frac{1}{E_1} \\
S_{22} &= \frac{1}{E_2} \\
S_{33} &= \frac{1}{G_{12}} \\
S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}
\end{aligned} \quad (9)$$

Además, si se invierte la matriz de flexibilidad presentada en (8) se puede obtener, a través de la matriz de rigidez $\bar{Q}$, una relación inversa. De esta forma obtenemos:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Donde cada uno de los términos de la matriz tomará los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \\
Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \\
Q_{33} &= G_{12}
\end{aligned} \quad (11)$$

$$Q_{12} = \frac{v_{21}E_2}{1 - v_{12} \cdot v_{21}} = \frac{v_{12}E_1}{1 - v_{12} \cdot v_{21}}$$

4.2.2.2. Tensión plana en ejes locales de una lámina

Si en ese mismo ensayo, la coincidencia entre orientación de fibra y dirección de aplicación de la carga es inexistente, se suele recurrir a un cambio de sistema de coordenadas puesto que en este caso no es posible conocer las propiedades elásticas de la lámina de una forma inmediata. Para realizar este cambio, utilizamos la matriz de cambio de base $[T]$ cuya expresión queda de la siguiente forma:

$$[T] = \begin{pmatrix} m^2 & n^2 & -2m \cdot n \\ n^2 & m^2 & 2m \cdot n \\ m \cdot n & -m \cdot n & m^2 - n^2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Donde se debe recordar que $m = \cos \theta$ y $n = \sin \theta$.

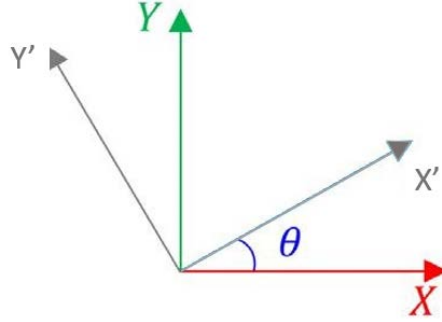


Figura 4-9 Cambio de sistema de coordenadas de ejes locales a ejes principales. (Fuente: Elaboración Propia)

De esta forma, tanto las tensiones como las deformaciones deberán de calcularse haciendo uso de dicha matriz, utilizando en el caso de las deformaciones, la traspuesta de esta. Como resultado se obtiene:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{xy'} \end{pmatrix} = [T] \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \gamma_{xy'} \end{pmatrix} = [T^T] \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (13)$$

De manera inversa, obtenemos las tensiones y deformaciones principales en función de las locales. Donde:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{xy'} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = [T^T]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \gamma_{xy'} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Ahora, haciendo uso nuevamente de la matriz de rigidez $\bar{\bar{Q}}$, se pueden calcular las tensiones y deformaciones locales tal y como se mostraba en el apartado 4.2.2.1 para las

principales. Combinando la ecuación presentada en (10) con las presentadas en (13), (14) y realizando las operaciones pertinentes, se obtiene:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{xy'} \end{pmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{pmatrix} \cdot [T^T]^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \gamma_{xy'} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Donde finalmente obtenemos que:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{xy'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11'} & Q_{12'} & Q_{13'} \\ Q_{21'} & Q_{22'} & Q_{23'} \\ Q_{31'} & Q_{32'} & Q_{33'} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \gamma_{xy'} \end{pmatrix} \quad (16)$$

Analizando cada elemento de la matriz, vemos que toman las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \overline{Q_{11'}} &= Q_{11'} \cdot \cos^4 \theta + 2(Q_{12'} + 2 \cdot Q_{33'}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22'} \sin^4 \theta \\ \overline{Q_{21'}} &= (Q_{11'} + Q_{22'} - 4 \cdot Q_{33'}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12'} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ \overline{Q_{22'}} &= Q_{11'} \cdot \sin^4 \theta + 2(Q_{12'} + 2 \cdot Q_{33'}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22'} \cos^4 \theta \\ \overline{Q_{13'}} &= (Q_{11'} - Q_{12'} - 2 \cdot Q_{33'}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12'} - Q_{22'} + 2 \cdot Q_{33'}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \overline{Q_{23'}} &= (Q_{11'} - Q_{12'} - 2 \cdot Q_{33'}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12'} - Q_{22'} + 2 \cdot Q_{33'}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \overline{Q_{33'}} &= (Q_{11'} + Q_{22'} - 2 \cdot Q_{12'} - 2 \cdot Q_{33'}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{33'} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (17)$$

De forma similar, esta relación entre tensiones y deformaciones también se puede obtener haciendo uso de la matriz de flexibilidad. Realizando las mismas operaciones comentadas anteriormente, la ecuación (8) pasa a la forma:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \gamma_{xy'} \end{pmatrix} = [T^T]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{pmatrix} \cdot [T]^{-1} \begin{pmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{xy'} \end{pmatrix} \quad (18)$$

Donde finalmente queda:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \gamma_{xy'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11'} & S_{12'} & S_{13'} \\ S_{21'} & S_{22'} & S_{23'} \\ S_{31'} & S_{32'} & S_{33'} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{xy'} \end{pmatrix} \quad (19)$$

De nuevo, analizando cada término de la matriz expuesta en (19) se obtiene:

$$\begin{aligned} \overline{S_{11'}} &= S_{11'} \cdot \cos^4 \theta + (2 \cdot S_{12'} + S_{33'}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22'} \sin^4 \theta \\ \overline{S_{21'}} &= (S_{11'} + S_{22'} - S_{33'}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{12'} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned}$$

$$\overline{S_{22'}} = S_{11'} \cdot \text{sen}^4\theta + (2 \cdot S_{12'} + S_{33'})\text{sen}^2\theta\cos^2\theta + S_{22'}\cos^4\theta \quad (20)$$

$$\overline{S_{13'}} = (2 \cdot S_{11'} - 2 \cdot S_{12'} - S_{33'})\text{sen}\theta \cos^3\theta - (2 \cdot S_{22'} - 2 \cdot S_{12'} - S_{33'})\text{sen}^3\theta \cos\theta$$

$$\overline{S_{23'}} = (2 \cdot S_{11'} - 2 \cdot S_{12'} - S_{33'})\text{sen}^3\theta \cos\theta - (-2 \cdot S_{22'} + 2 \cdot S_{12'} - S_{33'})\text{sen}\theta \cos^3\theta$$

$$\overline{S_{33'}} = 2(2 \cdot S_{11'} + 2 \cdot S_{22'} - 4 \cdot S_{12'} - S_{33'})\text{sen}^2\theta \cos^2\theta + S_{33'}(\text{sen}^4\theta + \cos^4\theta)$$

Por analogía con la ecuación (9), se pueden calcular las constantes elásticas de la lámina quedando estas como:

$$\begin{aligned} E_{1'} &= \frac{1}{\overline{S_{11'}}} \\ E_{2'} &= \frac{1}{\overline{S_{22'}}} \\ G_{12'} &= \frac{1}{\overline{S_{33'}}} \\ v_{21'} &= -\frac{\overline{S_{12'}}}{\overline{S_{11'}}} \\ v_{12'} &= -\frac{\overline{S_{12'}}}{\overline{S_{22'}}} \end{aligned} \quad (21)$$

Y cuyos valores toman las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_{1'}} &= \frac{1}{E_1} \cdot \cos^4\theta + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2 \cdot v_{21}}{E_1} \right) \cdot \text{sen}^2\theta \cdot \cos^2\theta + \frac{1}{E_2} \cdot \text{sen}^4\theta \\ \frac{1}{E_{2'}} &= \frac{1}{E_1} \cdot \text{sen}^4\theta + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2 \cdot v_{21}}{E_1} \right) \cdot \text{sen}^2\theta \cdot \cos^2\theta + \frac{1}{E_2} \cdot \cos^4\theta \\ \frac{1}{E_{1'}} &= 2 \cdot \left(\frac{2}{E_1} + \frac{2}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} + \frac{4 \cdot v_{21}}{E_1} \right) \cdot \text{sen}^2\theta \cdot \cos^2\theta + \frac{1}{G_{12}} \cdot (\text{sen}^4\theta + \cos^4\theta) \quad (22) \\ v_{21'} &= E_x \left[\frac{v_{21}}{E_1} \cdot (\text{sen}^4\theta \cos^4\theta) - \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right) \cdot \text{sen}^2\theta \cdot \cos^2\theta \right] \\ v_{12'} &= E_y \left[\frac{v_{21}}{E_1} \cdot (\text{sen}^4\theta \cos^4\theta) - \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right) \cdot \text{sen}^2\theta \cdot \cos^2\theta \right] \end{aligned}$$

4.2.3. Rigidez en varias láminas sometidas a tensión plana

En este apartado se va a analizar brevemente el comportamiento mecánico de un conjunto de láminas apiladas cuando se someten a un estado de tensión plana. Para ello, deben tenerse en cuenta las siguientes suposiciones:

- El conjunto de láminas apiladas, tienen un comportamiento elástico-lineal.
- Existe un comportamiento solidario de todas las láminas (adherencia total entre láminas)

Si se cumple todo esto, se acepta como válida la idea de que cada lámina trabaja en tensión plana, lo que implica que la interacción entre láminas consecutivas será prácticamente nula o inexistente.

Además, se debe evaluar el efecto del estado de deformaciones y tensiones en el conjunto. Si se observa la figura 4-10, se puede apreciar que el estado de deformaciones en el conjunto de láminas resulta uniforme en contraposición con el estado de tensiones, el cual, varía según la orientación de dicha lámina, siendo proporcional al módulo de Young de esta en la dirección de aplicación de la carga.

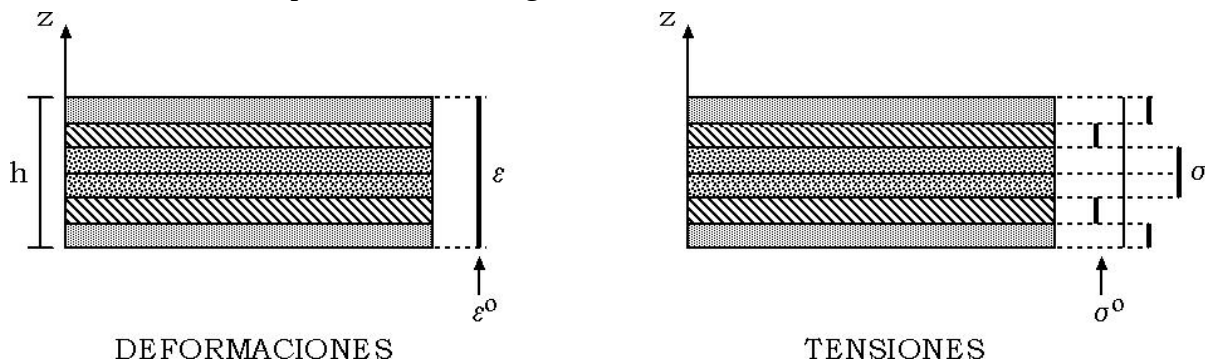


Figura 4-10 Estado de tensión y deformación en un conjunto de capas apiladas sometidas a un estado de tensión plana [33]

Pero revisando la disposición de las capas, se puede comprobar que esa segunda hipótesis de adherencia total entre láminas no se cumple cuando hablamos de tecnología aditiva FFF, ya que entre las láminas que forman el elemento impreso quedan huecos que impiden ese comportamiento solidario del conjunto de láminas.

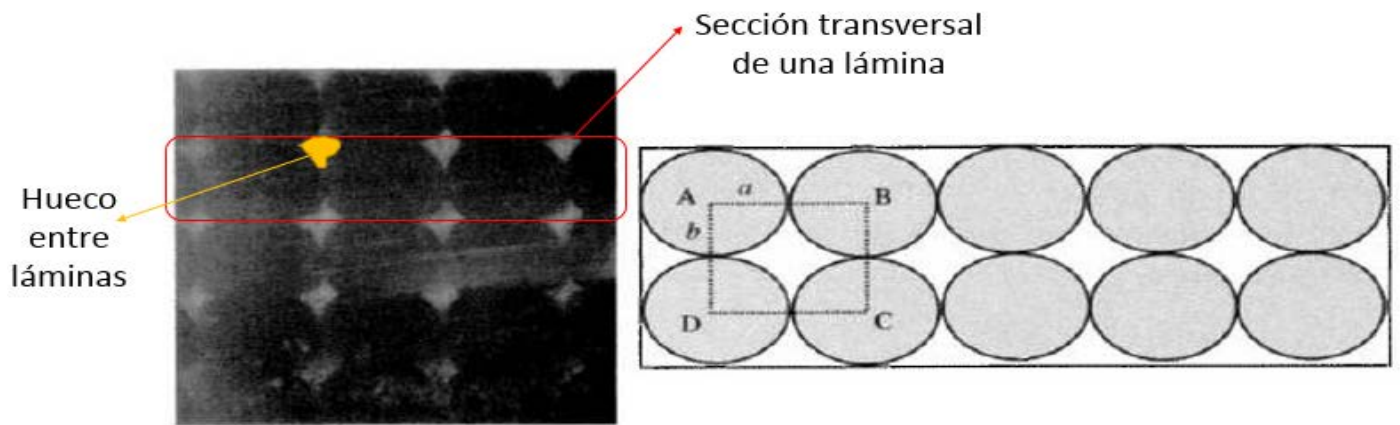


Figura 4-11 Estructura de elemento impreso (izquierda) y esquema aclarativo (derecha) [34]

Por este motivo, los autores de [34] introducen una modificación para la teoría clásica de laminados expuesta anteriormente, la cual, tiene en cuenta esos espacios vacíos. Así, se introducen 3 nuevas variables: densidad del área vacía (ρ_1), calculada a partir de la regla de las mezclas, relación de vacío lineal (ρ_2), que calcula la relación lineal de espacio vacío a lo largo de la dirección Y, y dos factores empíricos φ, φ' que varían de 0 a 1, las cuales quedan reflejadas en las siguientes expresiones:

$$E_1 = (1 - \rho_1) * E_{pl}$$

$$E_2 = \varphi * (1 - \rho_2) * E_{pl} \quad (23)$$

$$G_{12} = \varphi' * (1 - \rho_2) * G$$

donde E_{pl} es el módulo de elasticidad del filamento plástico.

Esta modificación no se tendrá en cuenta y sólo se aplicará el modelo planteado anteriormente referente a la teoría clásica del laminado. Esto es debido a que esa modificación lleva a un modelo más complejo que se escapa de los objetivos del presente Trabajo Final de Grado.

4.3. Ensayo de tracción

Uno de los métodos más empleados, a la hora de determinar propiedades fundamentales, es el ensayo de tracción.

Se lleva a cabo sometiendo una probeta normalizada o estandarizada a un esfuerzo axial de tracción creciente en el tiempo hasta que se produce la rotura de la misma. En ese

momento, dicho ensayo se detiene y, a través de un software vinculado a la máquina de ensayo, obtenemos los datos de interés del elemento analizado.

En cuanto a normativa se refiere, existe una gran variedad que determinan la estandarización del mismo. En España, existen las normas UNE (acrónimo de Una Norma Española). En concreto la norma que hace referencia a la determinación de las propiedades en tracción para materiales plásticos es la UNE-EN ISO 527 [35], estando esta, dividida en cinco partes. En América, existen las normas ASTM (acrónimo de American Society for Testing and Materials). En este caso la norma referente a este ensayo es la ASTM D638 que resulta ser la más utilizada por la industria a la hora de obtener estas propiedades.

En este trabajo, se ha optado por las UNE, ya que, al revisar las especificaciones de ambas en lo referente al mencionado ensayo, resultan prácticamente idénticas diferenciándose tan solo en algunos aspectos como geometrías y formas de las probetas, talones de amarre, entre otros.

Debe ser destacado, que, aunque se ha intentado seguir al máximo la metodología y especificaciones de la norma, en diversos aspectos, que se mencionarán más adelante, no ha sido posible debido a los objetivos que se buscaban en este trabajo, siendo los motivos más precisos de aspectos geométricos y técnicos.

4.3.1. Objetivos del ensayo

Con el ensayo de tracción se obtienen diferentes propiedades de materiales para su correcta caracterización mecánica. Se lleva a cabo aplicando una fuerza de tracción F a la probeta, con longitud de referencia L_0 y área transversal A_0 , para medir las deformaciones que sufre y las tensiones que soporta.

En primera instancia, este ensayo nos aporta con un diagrama los valores de carga (valores de F en N) y de desplazamiento del puente móvil (Δl en mm) a lo largo del ensayo.

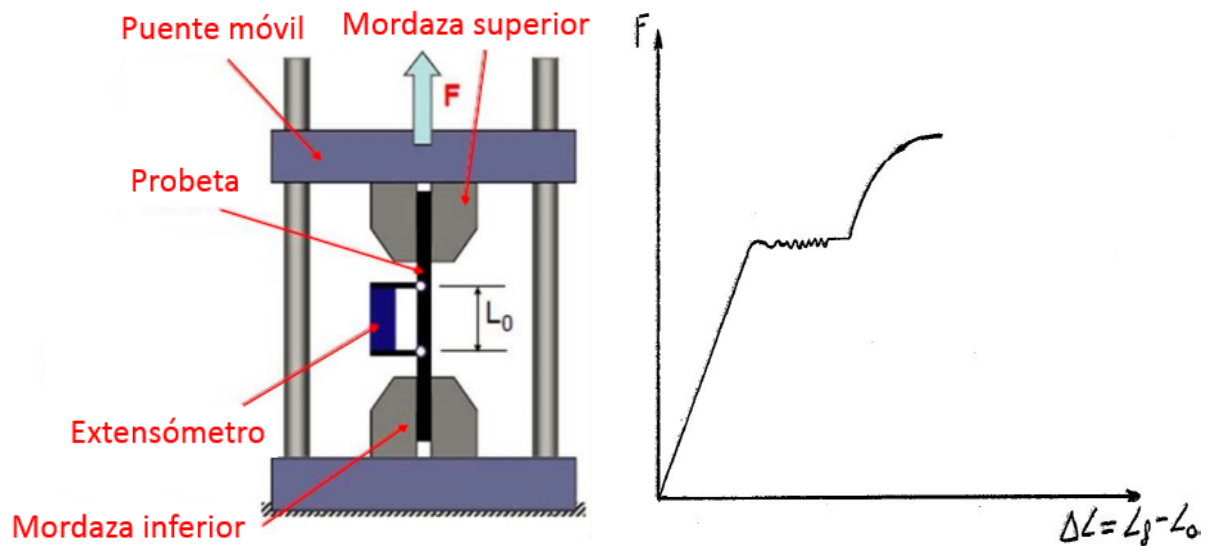


Figura 4-12 Esquema ensayo de tracción y diagrama carga-extensión típico. [35]

Con estos datos, se consiguen calcular las tensiones y deformaciones haciendo uso de las siguientes expresiones:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_0} \quad \epsilon_i = \frac{\Delta l_i}{L_0} \quad (24)$$

Así, conseguimos el diagrama tensión-deformación, el cual, nos aporta toda la información sobre las tensiones y deformaciones soportadas por el elemento analizado al igual que las diferentes propiedades del material que se pueden obtener de este ensayo.

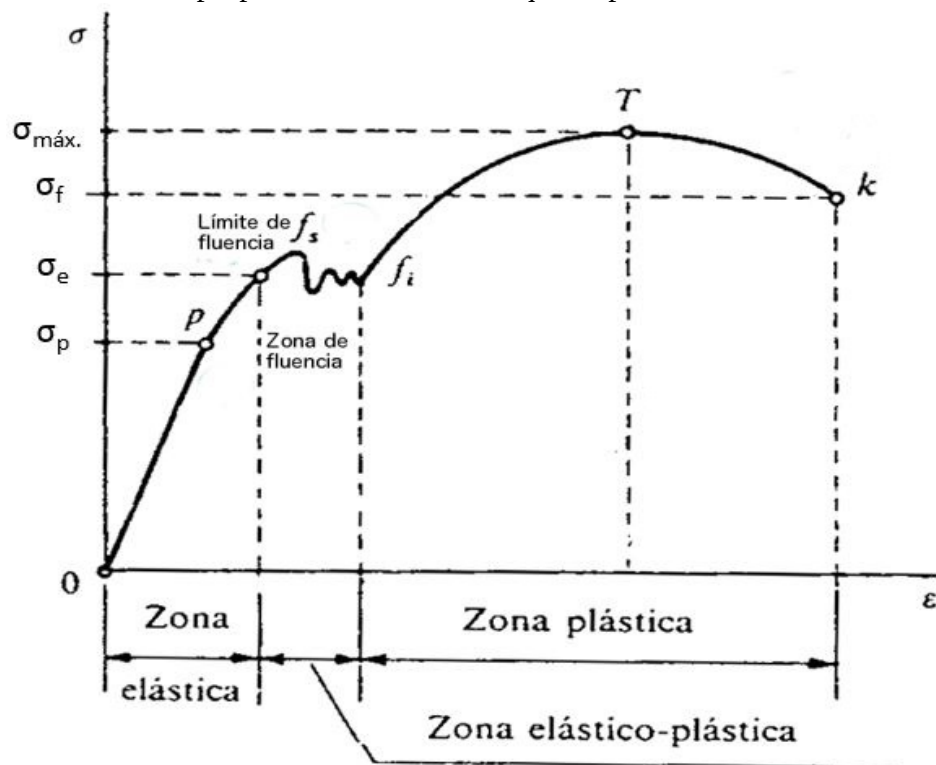


Figura 4-13 Diagrama tensión-deformación típico. [36]

Si se observa la figura 4-13, y haciendo una revisión de lo expuesto en [36], se pueden distinguir diferentes tramos que se describirán a continuación:

- Zona elástica: El material presenta un comportamiento elástico lineal, por lo que la relación entre tensión y deformación es una recta cuya pendiente toma el valor del módulo elástico del material o módulo de Young (E). Dicha relación se puede observar en la ecuación (25). En esta zona, aparecen dos de las propiedades que se pueden obtener con este ensayo, siendo estas, el límite de proporcionalidad (σ_p) y el límite de elasticidad (σ_e), tensión a partir de la cual las deformaciones dejan de ser proporcionales a las tensiones y tensión a partir de la cual las deformaciones dejan de ser reversibles respectivamente.

$$\varepsilon = \frac{1}{E} * \sigma \quad (25)$$

- Zona elástico-plástica: También llamada zona de fluencia. En esta zona, el material fluye debido a una reordenación cristalina, lo que provoca que se deforme mucho sin aplicar más carga. Aquí podemos encontrar dos puntos importantes que indican el límite superior de fluencia (f_s) y el límite inferior de fluencia (f_i).
- Zona plástica: En esta zona el material presenta un comportamiento plástico con endurecimiento por deformación. De nuevo aparecen otras dos propiedades que nos aporta dicho ensayo, como son la tensión máxima (σ_{max}) y tensión de rotura (σ_f), tensión máxima que soporta la probeta durante el ensayo y tensión soportada por la probeta en el momento de la rotura. Para esta última propiedad, siempre que la probeta no sufra estricción, su valor es próximo al de la resistencia a la tracción.

4.4. Ensayo de flexión

El ensayo de flexión es también muy empleado por la industria [36] y normalmente se suele emplear para calcular las propiedades de los materiales frágiles sometidos a tensión.

Al igual que el ensayo de tracción, aporta las propiedades de los materiales cuando estos están sometidos a un esfuerzo en flexión.

Se lleva a cabo sometiendo una probeta normalizada o estandarizada a un esfuerzo, en este caso de flexión, creciente en el tiempo hasta que se produce la rotura de la misma, momento en el que se obtienen los datos de interés.

Diferentes textos como [36] hacen una pequeña clasificación de este ensayo dependiendo de los apoyos que tenga la probeta objeto de análisis. Así, se distingue entre flexión en tres puntos (aplicación de la carga en un punto y apoyo de la probeta en dos puntos) o en 4 puntos (aplicación de la carga en dos puntos y apoyo de la probeta en dos puntos).

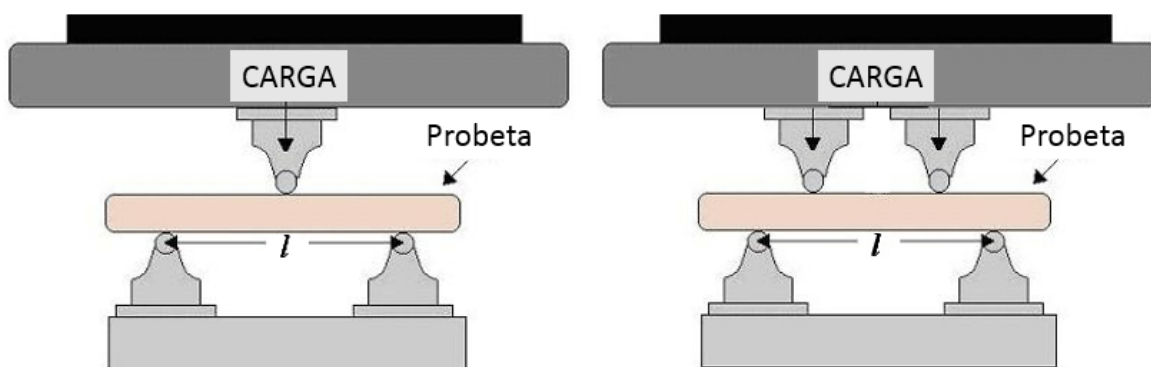


Figura 4-14 Configuración de ensayo de flexión en tres puntos (Izquierda) y ensayo de flexión en cuatro puntos (Derecha). [36]

Las normas que hacen referencia a este ensayo también serán diferentes dependiendo de si escogemos las normas españolas o las americanas, aunque en contenido vienen a ser muy similares. En España, la norma vigente y de nuevo la usada en este Trabajo Final de Grado, hasta el momento es la UNE-EN ISO 178 [37] que establece la metodología del ensayo, la geometría de las probetas a utilizar, así como la metodología para calcular los datos de interés. En América, la norma de referencia es la ASTM D790, la cual, salvo mínimas diferencias, es idéntica a la española.

4.4.1. Objetivos del ensayo

Tal y como se describe en la norma UNE-EN ISO 178 [37] para materiales poliméricos:

[] una probeta de sección rectangular, que descansa sobre dos soportes, se flexiona por un elemento de carga que actúa sobre el punto medio de la probeta entre los soportes. La probeta se flexiona de esa forma a una velocidad constante, hasta que se rompe o hasta que alcanza un máximo de deformación. Durante ese procedimiento, se mide la fuerza aplicada sobre la probeta y la flecha resultante de la probeta en el punto medio []

Hay dos ecuaciones básicas que rigen el comportamiento de una lámina sometida a flexión:

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R} \qquad \frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y} \quad (26)$$

donde M es el momento de flexión aplicado, I es el momento de inercia del área de la sección transversal con respecto al eje z, E es el módulo de elasticidad del material, R el radio de curvatura de la lámina flexionada y σ la tensión de tracción o de compresión sobre el plano situado a una distancia “y” del plano neutro.

Para una lámina de sección rectangular uniforme, se tiene:

$$I = \frac{ab^3}{12} \quad (27)$$

donde a es el ancho de la lámina y b la altura. La flexión tiene lugar en la dirección Z. Además, para una lámina con una sección simétrica con respecto al plano neutro, sustituyendo en la ecuación (26) “y” por “b/2” se obtiene la tensión en la superficie de la lámina. Cuando una lámina elástica se dobla, la tensión y la deformación varían linealmente con el espesor, y, a través de la sección, representando el plano neutro el nivel cero (Figura 4-15). [36]

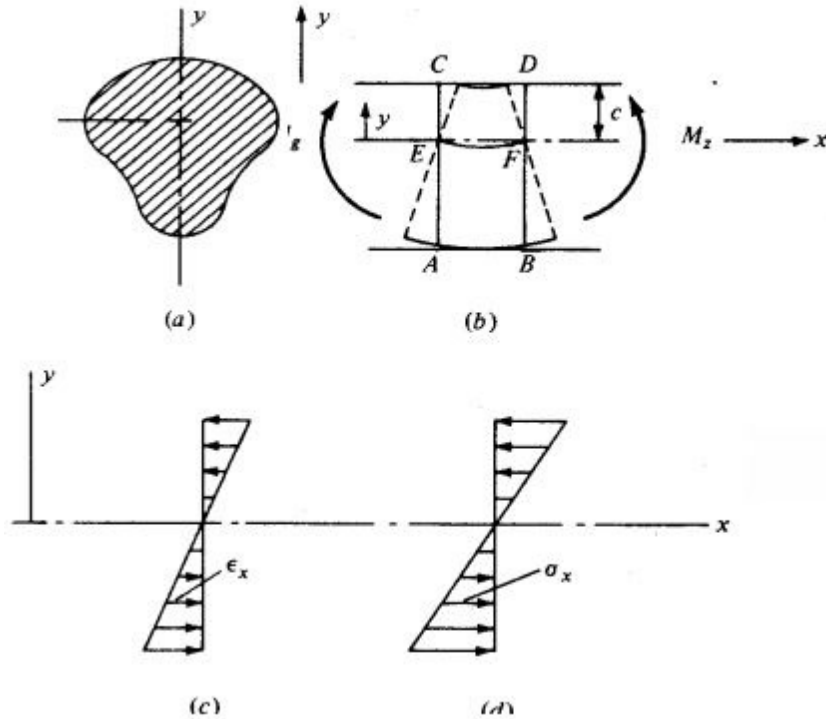


Figura 4-15 Flexión pura de lámina [36]

El material en la superficie superior está sometido a un estado de compresión, mientras que la superficie inferior está sometida a tracción. En el régimen elástico, la tensión y la deformación están relacionadas por la ley de Hooke como se puede ver en la ecuación (25).

Al igual que en el ensayo de tracción, se obtiene un diagrama tensión-deformación con el cual se obtienen las propiedades y características del material para un estado de flexión.

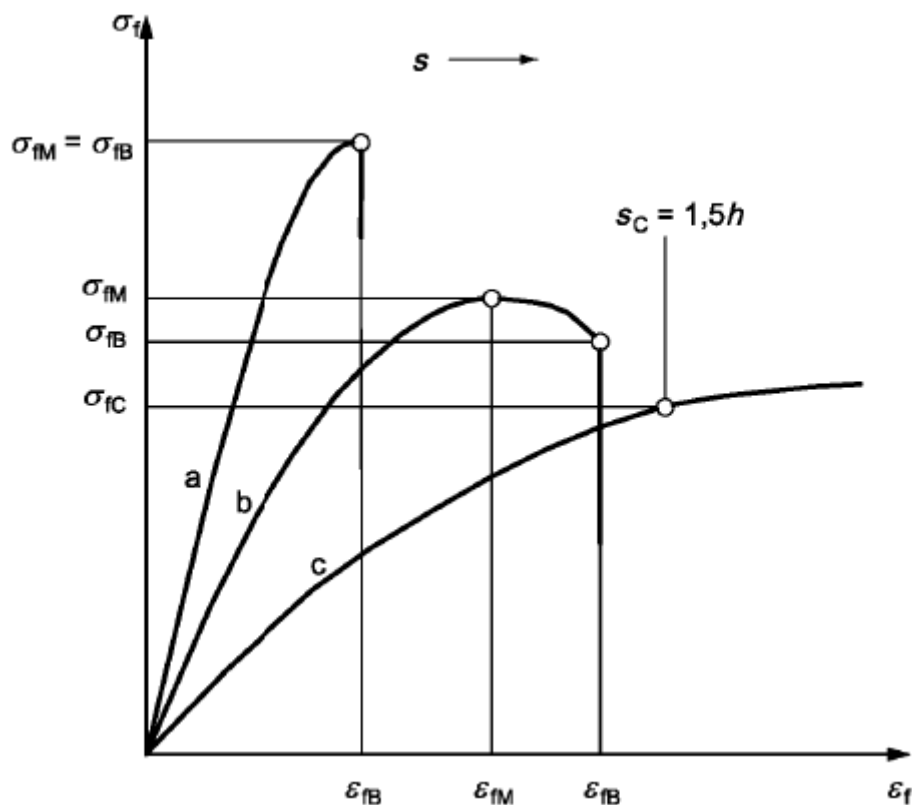


Figura 4-16 Diagrama típico tensión- deformación y flecha S. [37]

Como se observa en la figura 4-16, se pueden diferenciar tres curvas diferentes (a, b y c) que muestran comportamientos diferentes. De esta forma:

- Curva a: Probeta que rompe antes de la fluencia.
- Curva b: Probeta que muestra un máximo y rompe antes de la flecha convencional S_c .
- Curva c: Probeta que no muestra un máximo ni rompe antes de la flecha convencional S_c .

Haciendo referencia a cada comportamiento, se van a describir cada una de las propiedades que se pueden obtener con el ensayo de flexión:

- Esfuerzo de flexión (σ_f): Esfuerzo nominal de la superficie externa de la probeta en el punto de aplicación de la carga. Esta propiedad se hace presente tanto en el punto donde el material soporta el esfuerzo máximo, denominado resistencia a la flexión (σ_{fM}), como en el punto donde el material experimenta la rotura, denominado esfuerzo de flexión en la rotura (σ_{fB}). Ambas propiedades se pueden observar en las curvas a y b de la figura 4-16.
- Deformación en flexión (ε_f): Variación fraccional nominal en la longitud de un elemento de la superficie exterior de la probeta en el punto de aplicación de la carga. Al igual que sucedía con el esfuerzo de flexión, esta propiedad se hace presente justo en los puntos donde el material alcanzaba el esfuerzo máximo, denominada, para este caso, deformación en flexión en el punto de esfuerzo máximo (ε_{fM}) y donde experimentaba la rotura, denominada, para este caso, deformación en flexión en la rotura (ε_{fB}). Ambas se pueden volver a observar en las curvas a y b de la figura 4-16.
- Módulo de elasticidad en flexión (E_f): Relación entre la diferencia de esfuerzos $\sigma_{f2} - \sigma_{f1}$ correspondientes a la diferencia de deformaciones $\varepsilon_{f2}(= 0.0025) - \varepsilon_{f1}(= 0.0005)$.

4.5. Métodos de medida de deformaciones

Al realizar los ensayos, existen diversas formas de obtener los datos de interés. En este apartado se hará un repaso de las diferentes técnicas experimentales existentes:

4.5.1. Extensometría eléctrica

La extensometría eléctrica es el método más popular para la medida discreta de deformaciones, es decir, mide las deformaciones en una pequeña superficie de la probeta ensayada. Estas mediciones se realizan mediante una especie de sensor llamado galga extensiométrica, la cual está formada por una fina película metálica en forma de hilo plegado.

Cuando esta se coloca en la superficie del elemento objeto de estudio (generalmente se emplea un adhesivo de dos componentes), se aplican cargas y la probeta se deforma, la galga también lo hace. De esta forma, el hilo metálico sufre un alargamiento o acortamiento

que modifica su resistencia eléctrica, lo que permite determinar la variación de longitud midiendo dicha modificación. [38]

La modificación de la resistencia y el alargamiento o acortamiento del hilo están relacionados por una constante llamada factor de galga, dato facilitado por el fabricante de la misma.

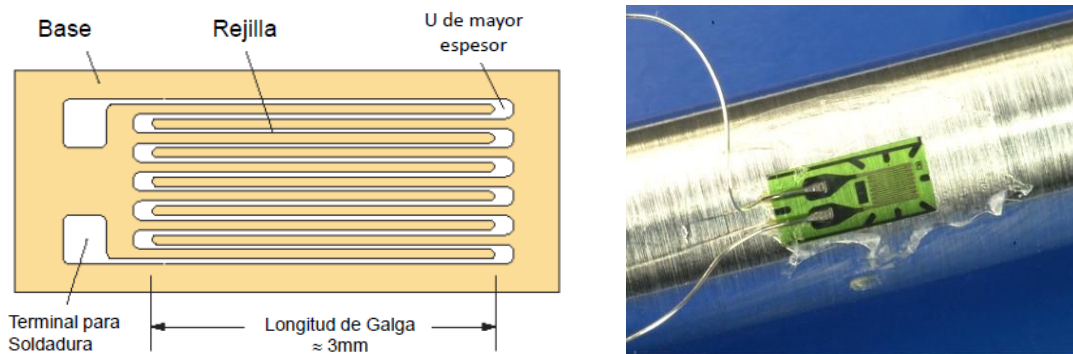


Figura 4-17 Galga extensométrica lineal (izquierda) y probeta con galga extensiométrica preparada para ensayo (Derecha). [38]

Esta técnica de medida de deformaciones tiene grandes ventajas ya que ofrece resultados exactos, se comercializan con multitud de formas y tamaños y ofrecen una gran versatilidad ya que se pueden aplicar en numerosos ensayos y a numerosos materiales, pero cuenta con una principal desventaja ya que, al ser un método de medida discreto, sólo ofrece resultados en la zona donde se encuentre la galga extensométrica.

4.5.2. Correlación digital de imágenes (DIC)

La correlación digital de imágenes o más comúnmente conocido como DIC (Digital Image Correlation) por sus siglas en inglés, es un método óptico de campo completo no intrusivo el cual se centra básicamente en la captura de varias imágenes de un sólido sometido a un estado de carga, sufriendo, por ende, una deformación. [39] Para la medida de estas deformaciones, se recurre a un recubrimiento aleatorio (speckle) del elemento a analizar, de forma que con ayuda de un software y algoritmos matemáticos es posible hacer el seguimiento de los diferentes puntos que forman dicho recubrimiento y se consigue crear un mapa de campo completo de las deformaciones del elemento analizado.

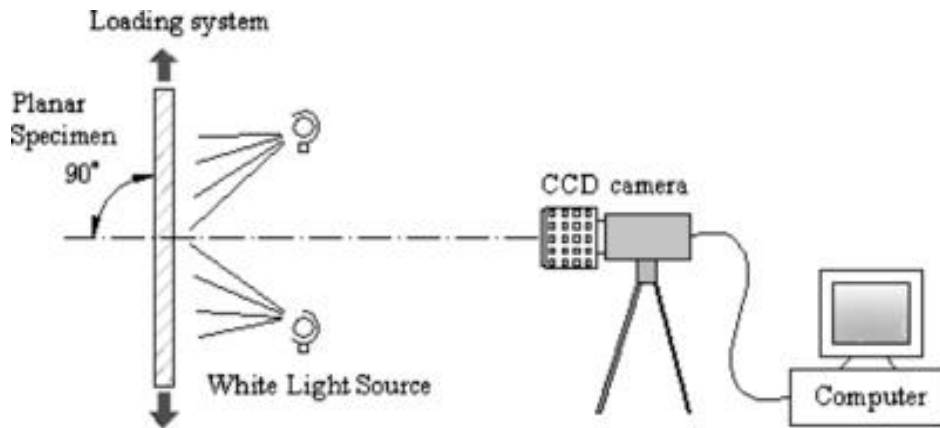


Figura 4-18 Set-Up para la técnica DIC-2D [39]

De esta técnica a su vez, se pueden diferenciar dos variantes: la técnica “DIC-2D”, la cual, mide deformaciones en una superficie o plano en dos dimensiones y la utilizada en los ensayos realizados en este trabajo, y la técnica “DIC-3D”, la cual, gracias al empleo de varias cámaras junto al uso de algoritmos de correlación cruzada se consigue un mapa en tres dimensiones del objeto a ensayar.

En concreto, la técnica “DIC-2D” no es más que el seguimiento de cada uno de los píxeles de las capturas tomadas a lo largo del proceso de deformación del elemento que se está analizando. Para conocer cuánto se ha desplazado cada punto y con esto la deformación en cada momento, es necesario establecer una imagen de referencia (normalmente la de carga cero) y en ella una ventana cuadrada de $2M + 1$ píxeles (facet), en la cual, se establece un punto inicial $P(x_0, y_0)$ sobre el que se va a iniciar el análisis, siendo M la distancia entre ese punto de referencia y el borde de la ventana. Acto seguido, se hace un seguimiento de este facet en las diferentes capturas tomadas del proceso para localizar ese punto P en cada una de ellas y calcular así la deformación del elemento con respecto a la imagen inicial. [39]

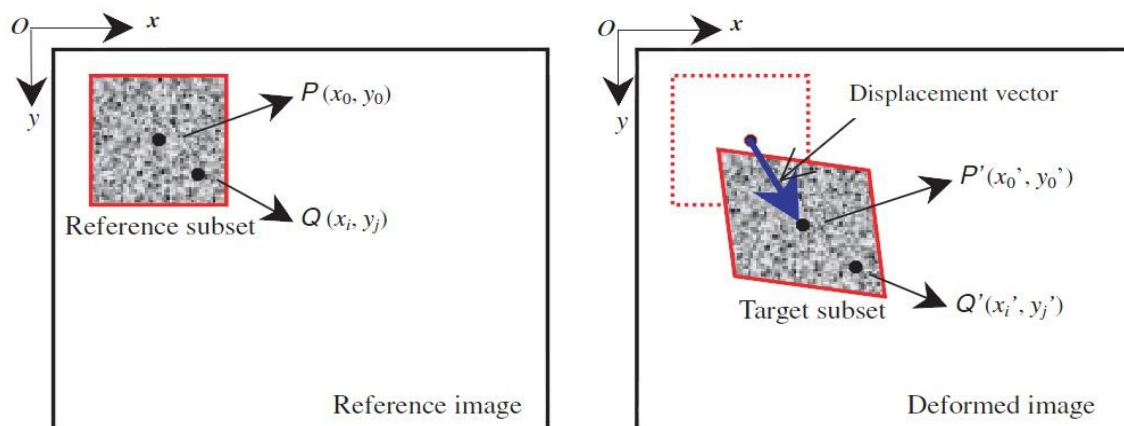


Figura 4-19 Proceso de análisis “DIC-2D” [39]

Esta técnica o método de obtención de deformaciones cuenta con numerosas ventajas sobre la extensometría eléctrica ya que te permite estudiar el elemento por completo y no solo parte de él como ocurría con las galgas. Además, es más rápido y económico, puesto que el proceso de preparación de las probetas es sencillo y sólo se precisa del conjunto de cámaras y software para llevarlo a cabo.

Pero a pesar de todas estas ventajas se puede remarcar que uno de los inconvenientes es el alto nivel de ruido en las capturas iniciales debido a la poca carga y, por ende, deformación.

4.6. Análisis con cálculo numérico. Método de elementos finitos (FEM)

El método de elementos finitos o también denominado FEM (Finite Element Method) por sus siglas en inglés, permite obtener y modelar, usando ecuaciones diferenciales y funciones de forma, una solución numérica del comportamiento del elemento a estudiar. Resumidamente, este método realiza una división del elemento en otros más pequeños de análisis más simple que el inicial. De esta forma, los cálculos quedan mucho más reducidos obteniéndose unos resultados muy aproximados a los del objeto real. [40]

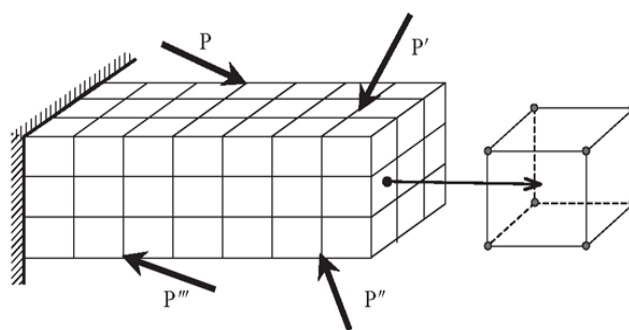


Figura 4-20 Discretización de un dominio continuo tipo “Viga en voladizo” [40]

La forma más intuitiva de comprender el método, al tiempo que la más extendida, es la aplicación a una placa sometida a tensión plana. El FEM se puede entender, desde un punto de vista estructural, como una generalización del cálculo matricial de estructuras al análisis de sistemas continuos.

Haciendo referencia a la figura 4-21, un elemento finito “e” viene definido por sus nodos (i, j, m) y por su contorno formado por líneas que los unen. Así, los desplazamientos “u” de cualquier punto del elemento se aproximan por un vector columna $\vec{u}$. [41]

$$\vec{u} = \sum N_i a_i^e = [N_i \ N_j \ \dots] \begin{pmatrix} \vec{a}_i \\ \vec{a}_j \\ \dots \end{pmatrix}^e = N a^e \quad (28)$$

donde N son las funciones de forma y a^e es un vector formado por los desplazamientos nodales de los elementos considerados.

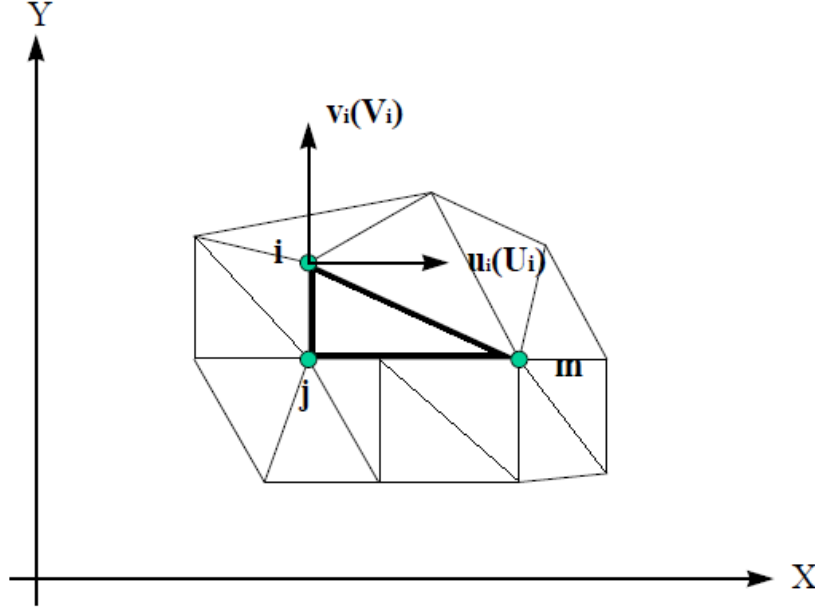


Figura 4-21 Coordenadas nodales (i, j, k) y desplazamientos de los nodos. [41]

Para el caso que se ha abordado con el modelo basado en la teoría clásica de laminados (apartado 4.2.2), estado de tensión plana, se obtendría:

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad a_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}$$

donde u son los movimientos horizontal y vertical en un punto cualquiera del elemento y a_i son los desplazamientos del nodo i . [41]

Las funciones de forma N_i , N_j , N_m , han de escogerse de tal forma que al sustituir en la ecuación (28) las coordenadas nodales, se obtengan los desplazamientos nodales. Así, conocidos todos los desplazamientos de los nodos del elemento, se pueden determinar las deformaciones (ε) en cualquier punto con la expresión:

$$\varepsilon = S \cdot u \quad (29)$$

donde S es un operador lineal adecuado. [41]

Si se sustituye la expresión (28) en (29), se obtiene:

$$\varepsilon = B \cdot a \quad B = S \cdot N \quad (30)$$

siendo B la matriz de derivadas de las funciones de forma.

Además, se han de definir las fuerzas que actúan sobre los nodos, que son estáticamente equivalentes a las tensiones en el contorno y a las fuerzas distribuidas que actúan sobre el elemento. Así, definimos q^e , para el caso de tensión plana, de la forma:

$$q_i^e = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \end{Bmatrix} \quad (31)$$

Las fuerzas distribuidas “b”, son las que actúan por unidad de volumen en direcciones correspondientes a los desplazamientos “u” en ese punto. Aplicando el método de los trabajos virtuales, la relación entre las fuerzas nodales, tensiones en el contorno y fuerzas distribuidas se puede expresar como:

$$q^e = \int_{V^e} B^T \sigma \cdot dV - \int_{V^e} N^T b \cdot dV \quad (32)$$

donde esta expresión es válida, con carácter general, cualesquiera que sean las relaciones entre tensiones y deformaciones. [41]

En el caso de que las tensiones siguieran una ley lineal, la ecuación (32) se podría reescribir de la forma:

$$q^e = K^e a^e + f^e \quad (33)$$

donde:

$$K^e = \int_{V^e} B^T D B \cdot dV \quad (34)$$

$$f^e = - \int_{V^e} N^T b \cdot dV - \int_{V^e} B^T D \varepsilon_0 \cdot dV + \int_{V^e} B^T \sigma_0 \cdot dV \quad (35)$$

siendo K^e la matriz de rigidez del elemento, ε_0 las deformaciones iniciales, σ_0 las tensiones internas residuales y D la matriz de elasticidad que contiene las propiedades del material.

Además, todas estas expresiones tomarán formas diferentes atendiendo a la geometría de dichos elementos, los cuales pueden clasificarse en lineales (elementos más simples pues sólo presentan una única dimensión), planos o bidimensionales (normalmente formulados como elementos tipo placa o membrana) y tridimensionales (cuentan con una matriz de rigidez más grande).

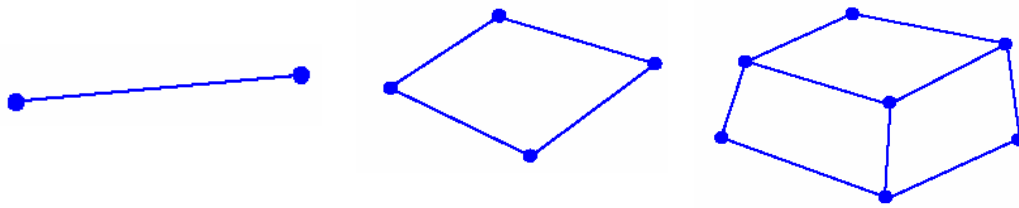


Figura 4-22 Tipos de elementos, de izquierda a derecha, lineal, plano y tridimensional.

[40]

La unión o el conjunto de todos estos elementos en los que previamente se ha dividido el dominio, es lo que se denota como “Malla” siendo los cálculos realizados sobre esta más o menos complejos en función de la geometría de los elementos de la misma, ya que se realizan sobre los puntos que los delimitan.

En función de la relación de conexión de estos nodos se establecen las incógnitas o grados de libertad, así como los sistemas de ecuaciones pertinentes para dar una solución óptima al problema. Este procedimiento está pensado para llevarse a cabo de forma computacional, ya que el número de elementos en los que se divida el problema puede ser variable y dependiendo de la geometría variará, además, la complejidad del análisis.

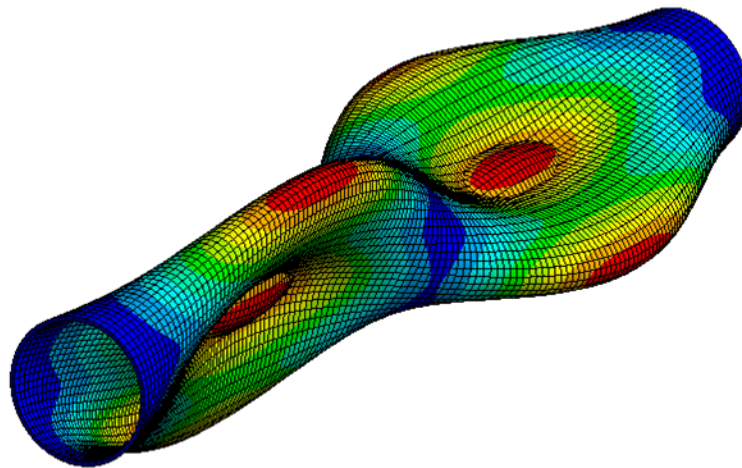


Figura 4-23 Malla de un sólido con el Método de Elementos Finitos (FEM).

(Fuente: ESSS.com)

5. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, 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.

5.1. Filamentos utilizados para la fabricación

Como se mencionó en el apartado 4.1, 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, actualmente las industrias demandan estos materiales por su gran aplicación en los diferentes sectores, por lo que cuentan con una gran aceptación. [16]

En la mayoría de los casos, los aditivos que se añaden al filamento de material para que este obtenga un color u otro, o simplemente, para que se mejoren sus propiedades mecánicas, pueden provocar una cristalización del mismo entre otros efectos. Sin embargo, debido a los objetivos que se buscan en este Trabajo Final de Grado, era de especial interés utilizar un filamento lo más puro y homogéneo posible con un número mínimo de oclusiones de aire en el interior.

A la hora de elegir al fabricante del filamento, se puso especial cuidado ya que se buscaba calidad de material a buen precio. Por esto, se ha decidido seleccionar aquel que nos garantizaba un filamento fabricado a partir de buenas materias primas, baja tolerancia en el diámetro de toda la bobina, redondez en su sección transversal y por supuesto que fuese compatible con el extenso catálogo de impresoras existentes en el mercado.

5.1.1. *Ultimaker PLA RAL 9010*

Por todos los motivos expuestos en las líneas anteriores, se decidió escoger un PLA de color blanco del fabricante Ultimaker, el cual, cumplía con creces los requerimientos necesarios.

En concreto, el PLA RAL 9010 proporciona una experiencia de impresión sin complicaciones gracias a su fiabilidad y buena calidad de superficie. Tiene buena resistencia a la tracción, fácil de trabajar con altas velocidades de impresión y permite la creación de piezas de alta resolución.

Actualmente es 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. Como se comentó en el apartado 4.1.1, pertenece a la familia de los termoplásticos, siendo su intervalo de fusión de 145-160 °C. Uso a largo plazo en exteriores o aplicaciones donde la parte impresa está expuesta a temperaturas superiores a 50 °C. [42]



<u>Filament specifications</u>	<u>Value</u>
Diameter	2.85±0.10 mm
Max roundness deviation	0.10 mm
Net filament weight	350 g / 750 g
Filament length	~44 m / ~95 m

Figura 5-1 Bobina de PLA RAL 9010 usada para la fabricación de las probetas. [42]

5.1.2. Ultimaker ABS RAL 9003

De la misma forma que se ha seleccionado el PLA, se optó por elegir también un ABS del mismo color y fabricante.

El ABS RAL 9003 es utilizado por una amplia variedad de industrias en todo el mundo y está fabricado específicamente para minimizar la deformación y asegurar una adhesión consistente entre capas (especialmente cuando se utiliza el complemento frontal). Consta de buenas propiedades mecánicas, estética agradable y adhesión de cama confiable. También pertenece al grupo de los termoplásticos con un intervalo de fusión de 225-245 °C.

Últimamente, con el auge de esta tecnología, la industria suele hacer uso de este material para prototipado visual, funcional y fabricación a corto plazo, así como aplicaciones en las que la pieza impresa está expuesta a temperaturas superiores a 85 °C. [43]



<u>Filament specifications</u>	<u>Value</u>
Diameter	2.85±0.10 mm
Max roundness deviation	0.10 mm
Net filament weight	750 g
Filament length	~107 m

Figura 5-2 Bobina de ABS RAL 9003 usada para la fabricación de las probetas. [43]

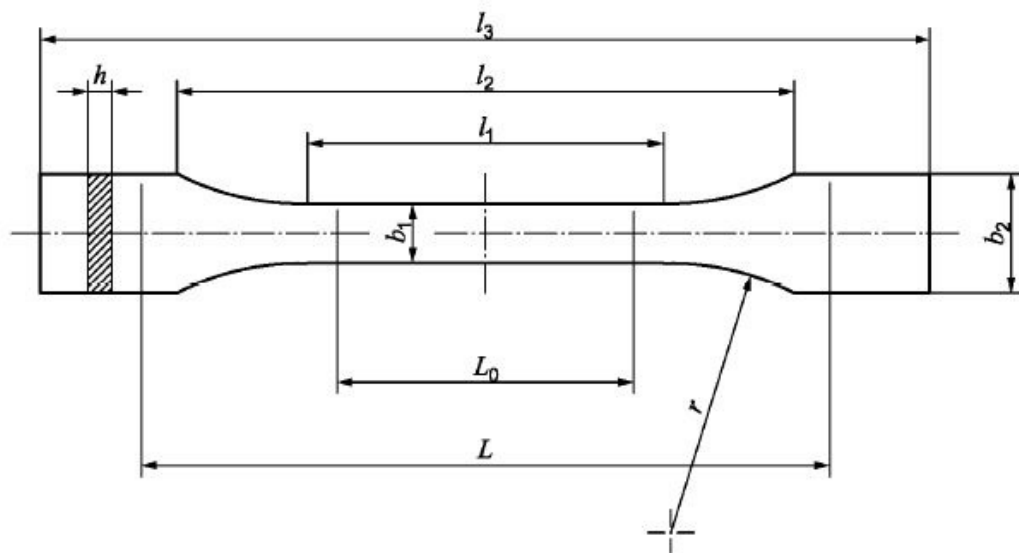
5.2. Modelado de las probetas a ensayar

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.

Como se ha visto anteriormente, todo ensayo, bien sea de tracción, de flexión, de fractura, entre otros, cuenta con una normativa específica la cual establece tanto el procedimiento seguido en el ensayo como la geometría normalizada de dichas probetas para que los resultados obtenidos sean totalmente válidos y se puedan usar en posteriores estudios. En este apartado, se describirán las peculiaridades de la geometría de cada una de las probetas empleadas para la realización de los ensayos de tracción y flexión.

5.2.1. Geometría de las probetas empleadas en el ensayo de tracción

Para el ensayo de tracción, y haciendo uso de la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 [35] y de la UNE 116005:2012 [46], inicialmente se escogió una probeta tipo 1A ya que era la más usual y la cual, Ultimaker, había seleccionado para realizar la hoja de especificaciones de sus materiales. Esto permitía poder comparar a posteriori los resultados obtenidos con los de la hoja de especificaciones del material y poder ver que influencia, en las propiedades mecánicas, tenía el parámetro seleccionado; la orientación de impresión.



Probetas tipo 1A y 1B

Figura 5-3 Geometría de probeta tipo 1A según la norma UNE-EN ISO 527-2:2012. [35]

	Tipo de probetas	1A	1B
l_3	Longitud total ^a	170	≥ 150
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r	radio	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas ^b	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Anchura en los extremos	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Anchura de la parte estrecha	$10,0 \pm 0,2$	
h	Espesor recomendado	$4,0 \pm 0,2$	
L_0	Longitud de referencia (recomendada)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
	Longitud de referencia (aceptable si se requiere para el control de calidad o cuando se especifique)	$50,0 \pm 0,5$	
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1	115 ± 1
^a La longitud total recomendada de 170 mm para el tipo 1A concuerda con las Normas ISO 294-1 e ISO 10724-1. Para algunos materiales, puede ser necesario alargar la longitud de los extremos (por ejemplo $l_3 = 200$ mm) para evitar la rotura o el deslizamiento en las mordazas de la máquina de ensayo. ^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, que resulta de l_1 , r , b_1 y b_2 , pero dentro de las tolerancias indicadas.			

Tabla 5-1 Resumen de las dimensiones de la probeta tipo 1A según la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 [35]

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° o 90°), 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 concentración de tensiones y con ello una rotura en el cambio de geometría. 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 lado, la obtención de las propiedades mecánicas del material. De esta forma, el ensayo no podía ser considerado como válido.

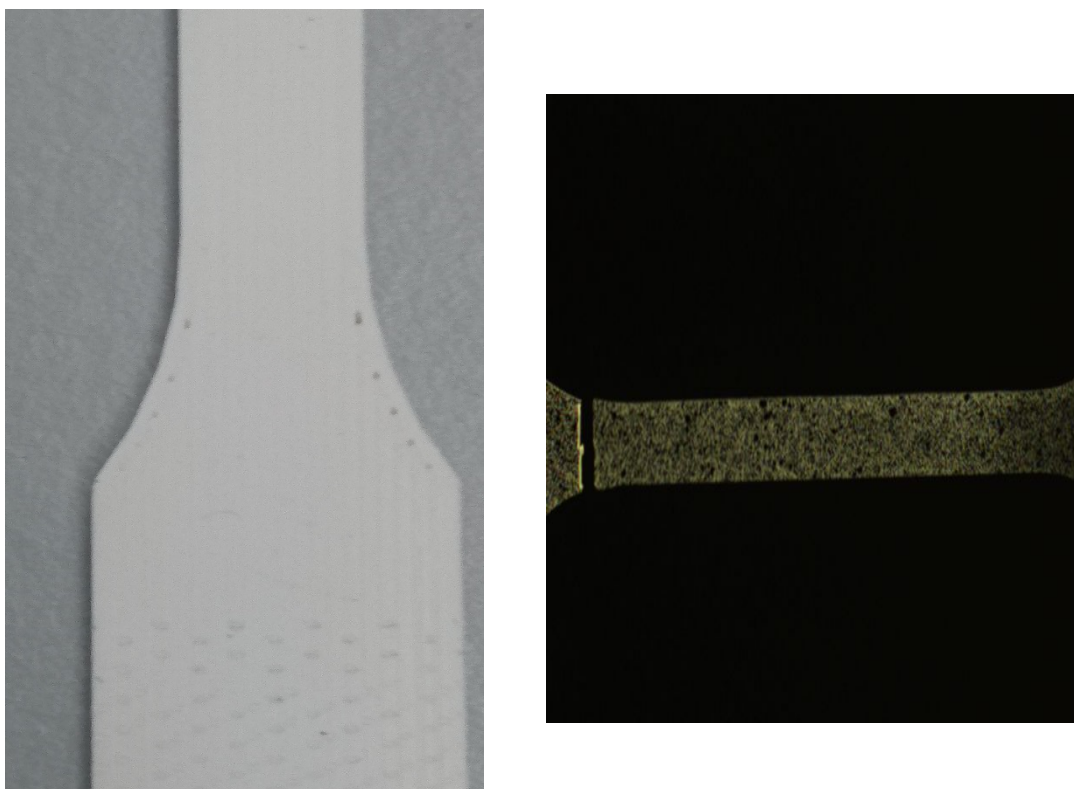


Figura 5-4 Concentrador de tensión en el cambio de sección transversal de la probeta e imagen de un ensayo no válido. (Fuente: Elaboración Propia)

Ante esta situación, se decidió realizar otro diseño el cual 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 [18], [29], [30], [44] y tras la investigación 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 [44], es decir, una probeta con geometría rectangular. Así, se reducían (que no eliminaban) los problemas en la impresión elegida para este trabajo.

De esta forma, las probetas para el ensayo de tracción serían igual que la probeta 1A mencionada, pero eliminando el cambio gradual de sección trasversal. Esto permitía obtener una probeta totalmente rectangular. Esta geometría de probeta, al no estar especificada en la

norma referente al ensayo de tracción, es uno de los motivos por los que no se ha podido cumplir en su totalidad, tal y como se especificaba en el apartado 4.3.

5.2.2. Geometría de las probetas empleadas en el ensayo de flexión

Para el ensayo de flexión, en el que se intuía que no habría tantos problemas en el diseño de las probetas, y haciendo uso de la norma UNE-EN ISO 178 [37], se escogió una geometría también rectangular con un valor de longitud recomendada de $80 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ y con una anchura y espesor condicionados por el utillaje del que se disponía en el laboratorio para llevar a cabo el ensayo. Esto es, que al disponer de un soporte de radio $R_2 = 2 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$, la norma establece que la probeta ha de tener un espesor con dimensiones $\leq 3 \text{ mm}$ y una anchura de $25 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$.

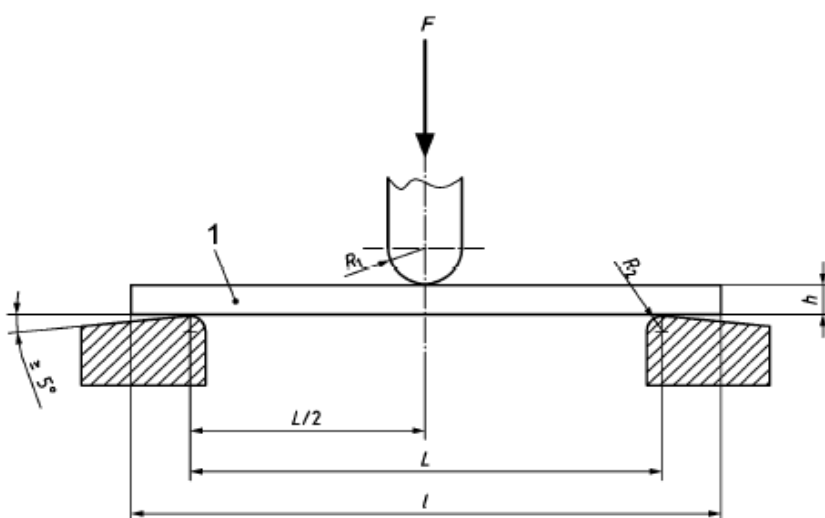


Figura 5-5 Geometría de la probeta de flexión según la norma UNE-EN ISO 178:2010. [37]

longitud, l : 80 ± 2

Dimensiones en milímetros

Espesor nominal h	Anchura b^a ($\pm 0,5$)
$1 < h \leq 3$	25,0
$3 < h \leq 5$	10,0
$5 < h \leq 10$	15,0
$10 < h \leq 20$	20,0
$20 < h \leq 35$	35,0
$35 < h \leq 50$	50,0

Tabla 5-2 Valores de espesor y anchura en función del radio R_2 . [37]

Así, la geometría y diseño final de las probetas para el ensayo de flexión sería, de nuevo, una probeta totalmente rectangular, pero con una longitud de probeta menor que las utilizadas para el ensayo de tracción.

5.2.3. Modelado CAD en 3D de las probetas empleadas en los ensayos

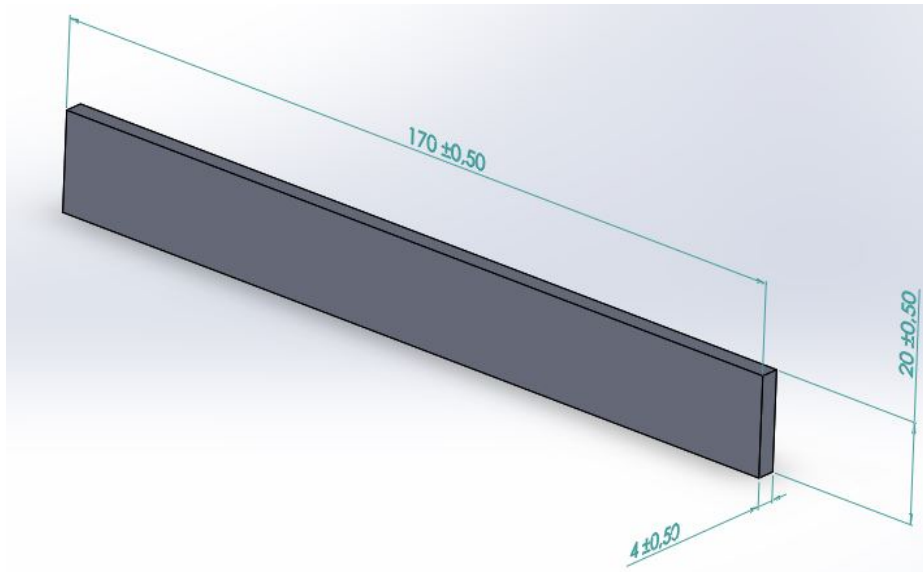
Para el modelado CAD 3D se ha utilizado el software SolidWorks [45]. SolidWorks es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes, S.A. Este software cuenta con una interfaz de usuario muy fácil y rápida, a la vez de una extensa lista de comandos agrupados en módulos, los cuales nos permiten realizar, de una forma rápida, planos en 2D, así como modelos 3D con sus correspondientes simulaciones de funcionamiento. La gran ventaja de este software es la facilidad de transformar las geometrías diseñadas a los formatos más utilizados en fabricación aditiva, motivo por el cual es el más usado por las empresas dedicadas a este tipo de fabricación. [45]



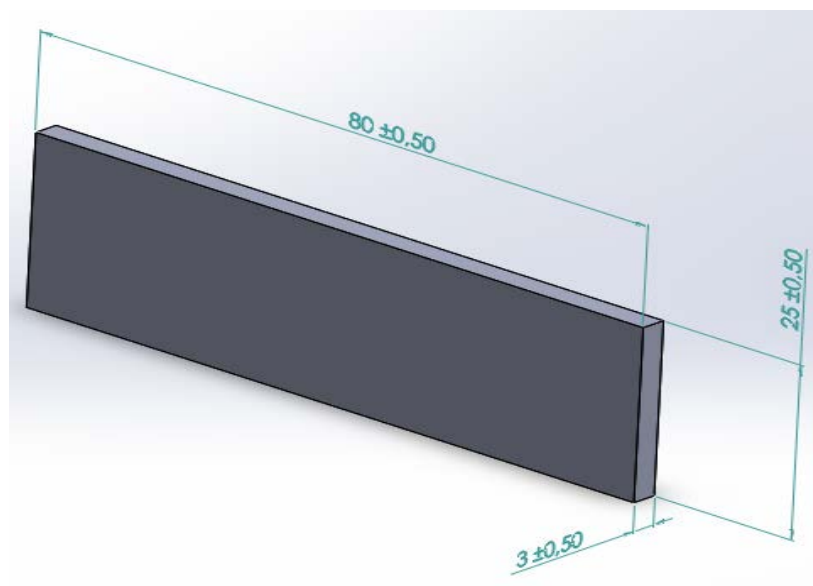
Figura 5-6 Interfaz de SolidWorks y pieza modelada para ser fabricada con impresión 3D. [45]

Para el diseño de las probetas, se ha realizado en primera instancia un croquis con las geometrías requeridas, para que más adelante, con el comando “Extruir saliente/base”, se le pudiera dar el espesor adecuado para cada una de ellas. Tras finalizar el proceso, se obtenía la probeta deseada para cada ensayo.

En la figura 5-7 y 5-8 se muestra el diseño y dimensiones finales de las probetas utilizadas en el ensayo de tracción y flexión.



*Figura 5-7 Geometría final de la probeta utilizada para el ensayo de tracción.
(Fuente: Elaboración propia)*



*Figura 5-8 Geometría final de la probeta utilizada para el ensayo de flexión.
(Fuente: Elaboración propia)*

5.3. Transformación del modelo CAD-3D a lenguaje G-CODE

Una vez realizado el modelo CAD 3D de las probetas a ensayar con el software citado, se va a convertir dicho modelo en un archivo, el cual, contenga toda la información

acerca de las superficies sobre las que se compone el objeto, en este caso, las probetas. Actualmente, el tipo de archivo más empleado por la industria y el más compatible con la mayoría de impresoras, es el llamado formato .STL, acrónimo en inglés de “Standard Triangle Language”.

Lo que ocurre al pasar a este formato .STL, es que el objeto queda dividido en una larga lista de triángulos que conforman el conjunto. [47] De esta forma, la impresora reconoce de forma rápida y sencilla el modelo y, es básicamente por esto, que se ha popularizado su uso.

Desde SolidWorks, basta con elegir la opción de “Guardar como” y seleccionar en tipo de archivo “.STL” para que el software divida el objeto. Si se observa la figura 5-9, se puede ver como el elemento diseñado queda dividido en elementos triangulares. Esto se hace notorio por las líneas que unen los vértices opuestos de cada una de las caras que conforman el objeto.

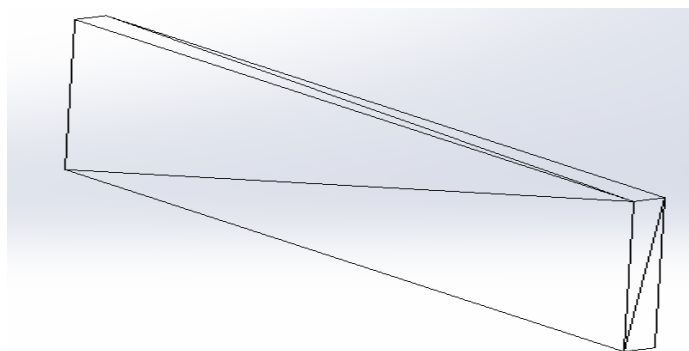


Figura 5-9 Modelo .STL de la probeta para el ensayo de flexión. (Fuente: Elaboración propia)

Tras obtener el archivo STL, toca dividir el modelo en capas que la impresora pueda entender y sobre todo generar. Para ello, se recurre a un software de laminado para esta tecnología, que de entre los muchos existentes en el mercado tanto de pago como de código libre, se ha elegido para este caso “Simplify-3D”. Simplify 3D es un software de pago (se ha hecho uso de la licencia del Grupo Sicnova 3D, empresa colaboradora para la impresión de las probetas) enfocado a la impresión profesional por su multitud de posibilidades y funciones siendo, además, uno de los primeros que permitía realizar capas con tan solo un ángulo de impresión.

Al iniciarlo y cargar el modelo, este nos muestra las características del archivo .STL generado, es decir, número de elementos triangulares así como nos indica el volumen de la

pieza a fabricar. Para el caso de estudio, y puesto que tanto las probetas para tracción como para flexión son rectangulares, están formadas por 12 triángulos y constan de un volumen de 13.6 cm^3 para la de tracción y de 6 cm^3 para la de flexión.

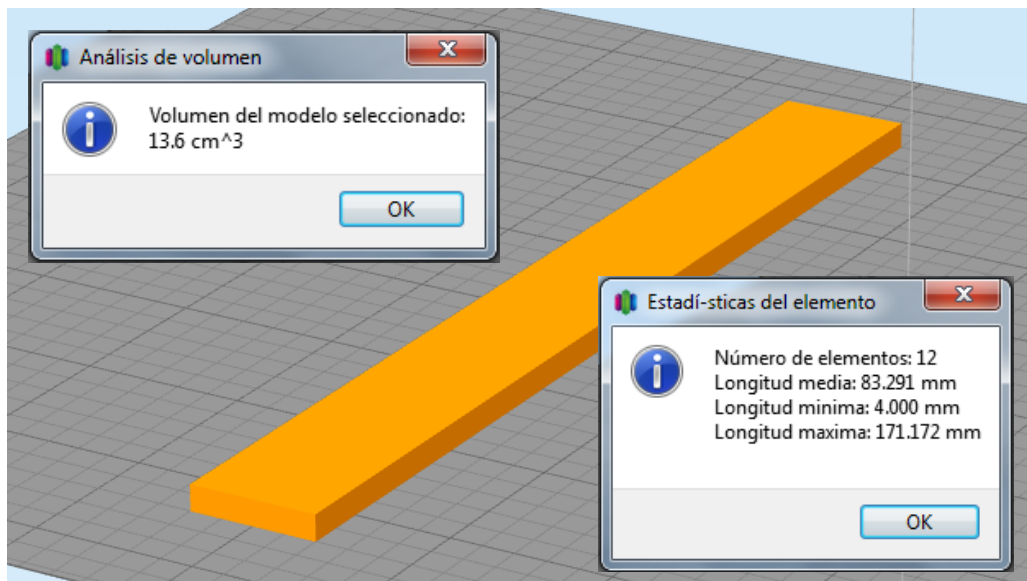


Figura 5-10 Volumen y número de elementos de la probeta para el ensayo de tracción.
(Fuente: Elaboración propia)

Ahora, se pasa a configurar los parámetros de impresión. Así, navegando por las opciones, se fue introduciendo el ángulo de relleno, que en mi caso tomó los valores de 0° y 90° así como, marcar el número de perímetros laterales y capas de cierre.

Es aquí donde se introduce la novedad, ya que las probetas están impresas sin capas laterales y de cierre lo que nos permite evaluar la influencia de la orientación de fibra al completo.

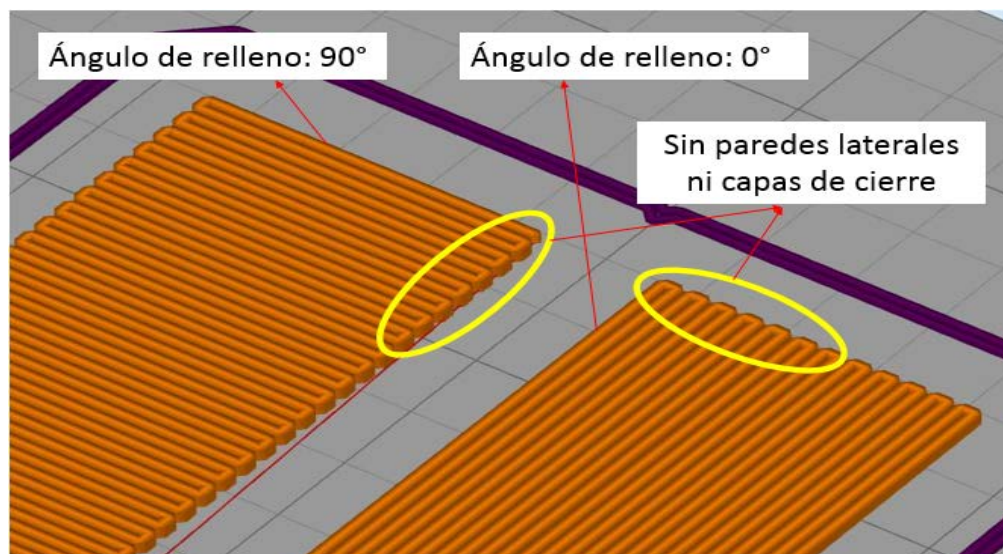


Figura 5-11 Configuraciones de impresión para las probetas a ensayar. (Fuente: Elaboración Propia)

Este tipo de impresión, al ser muy poco común en los elementos impresos demandados por las industrias, no es sencilla pues al realizar las primeras pruebas, se comprobó que las probetas contaban con una geometría menor, es decir, un 1 mm menos de anchura cuando se imprimían en dirección longitudinal (0°) y 1 mm menos de longitud cuando se imprimían en dirección transversal (90°).

Era lógico, pues el material sufre una pequeña contracción al enfriarse, y esto sumado a la ausencia de perímetros laterales provocaba ese defecto de 1mm. Así, se optó por ir modificando el ancho de extrusión, que no es más que ir introduciendo un pequeño aumento de flujo de material a la hora de realizar la impresión para que el ancho de la fibra fuera un poco mayor y así al enfriarse, quedase con la geometría perfecta.

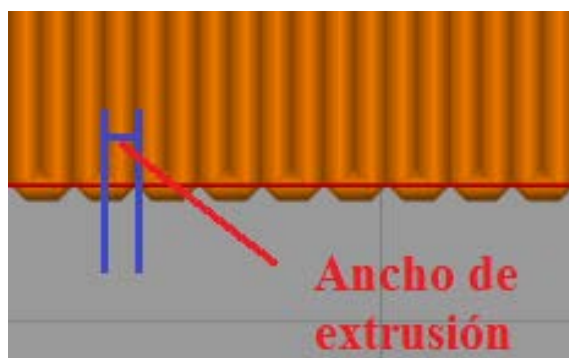
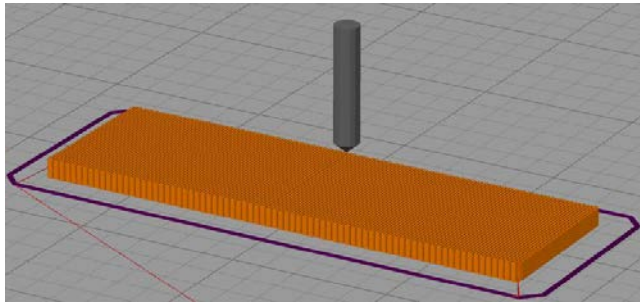


Figura 5-12 Ancho de extrusión simulado con Simplify-3D. (Fuente: Elaboración propia)

Con todo esto configurado y testado, el programa se encarga de hacer una simulación previa del proceso de laminado de las probetas, así como transformar ese conjunto de superficies y configuraciones en un código que la máquina pueda interpretar. Este es el llamado “G-Code”.

El G-Code es un lenguaje de programación que data de los años 60, el cual, nació con la finalidad de poder controlar máquinas y herramientas de manera automática con un PC. [48] Debido a su bajo coste computacional, ya que se trata de un lenguaje de nivel bajo, se ha popularizado su uso por aportar una gran flexibilidad. Una vez generado, puede cargarse en la impresora mediante una memoria USB o una tarjeta SD.



```

toolChangeExtraRestartDistance,-0.5
toolChangeRetractionSpeed,600
allowThinWallGapFill,1
thinWallAllowedOverlapPercentage,10
horizontalSizeCompensation,0
G90
M82
M106 S0
M140 S60
M190 S60
M104 S205 T0
M109 S205 T0
G28 ; home all axes
G1 X20 Y10 F3000 ; bring extruder to front
G92 E0 ; zero the extruded length
G1 Z10 ; lower
G1 E19 F200 ; purge nozzle quickly
G1 E26 F60 ; purge nozzle slowly
G92 E0 ; zero the extruded length again
G1 E-5.5 F400 ; retract
G1 X190 Z0 F9000 ; pull away filament
G1 X210 F9000 ; wipe
G1 Y20 F9000 ; wipe
G1 E0 ; feed filament back
G92 E0
G1 E-4.0000 F1500
G1 Z0.200 F1000
    layer 1, z = 0.2
T0
    tool H0.200 W0.400
    skirt
G1 X96.900 Y24.724 F6000
G1 E0.0000 F450
G92 E0
G1 X96.991 Y24.503 E0.0030 F750
G1 X99.503 Y21.991 E0.0475
G1 X99.724 Y21.900 E0.0505

```

Figura 5-13 Simulación de la impresión y G-Code generado con Simplify-3D.

(Fuente: Elaboración propia)

5.4. Características de la impresora utilizada

Puesto que el material usado pertenece a la firma Ultimaker, se decidió hacer también uso de uno de sus modelos de impresora 3D destinada para el entorno profesional. Esta es la Ultimaker 2 Extended +, cuyas características técnicas se detallan a continuación en la siguiente tabla. (Tabla 5-3)

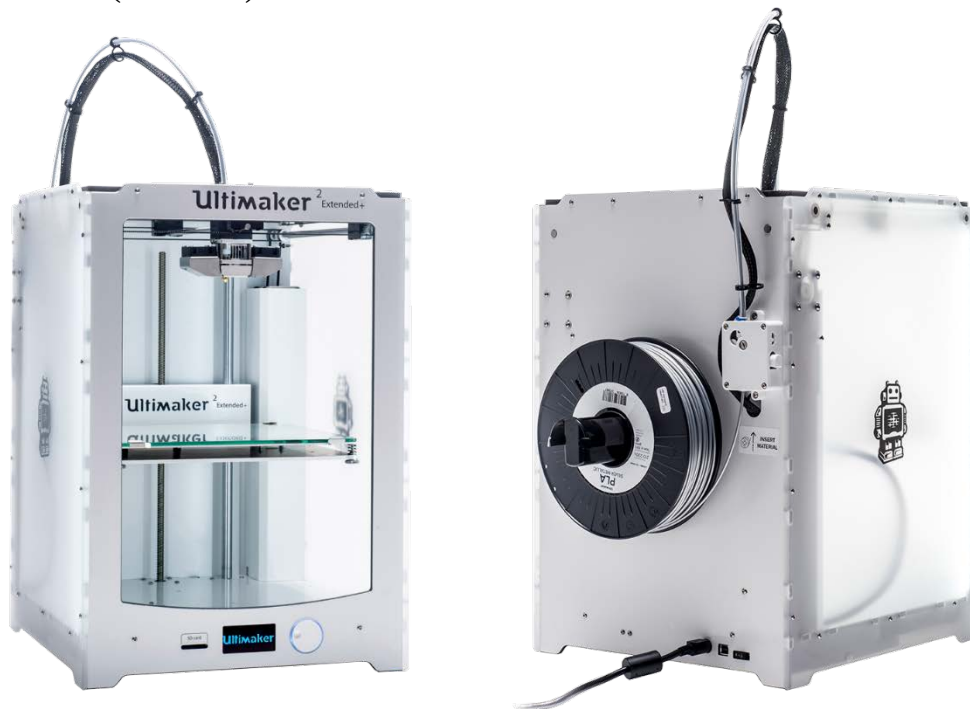


Figura 5-14 Impresora 3D Ultimaker 2 Extended +. (Fuente: Ultimaker.com)

<u>Ultimaker 2 Extended +</u>	
<u>Dimensiones</u>	35,7 x 34,2 x 48,8 cm
<u>Peso</u>	12,3 kg
<u>Volumen de impresión</u>	22,3 x 22,3 x 30,5 cm
<u>Tecnología de impresión</u>	Fused Filament Fabrication (FFF)
<u>Filamento</u>	PLA / ABS / CPE (Open Filament System) <u>Diámetro:</u> 2,85 mm
<u>Extrusor</u>	<u>Temperatura:</u> 180 - 260 °C <u>Diámetros:</u> 0,25 – 0,4 – 0,6 – 0,8 mm
<u>Precisión X,Y,Z</u>	12,5 micras : 12,5 micras : 5 micras
<u>Resolución de capa</u>	<u>Boquilla 0,25 mm:</u> 60 – 150 micras <u>Boquilla 0,4 mm:</u> 20 – 200 micras <u>Boquilla 0,6 mm:</u> 20 – 400 micras <u>Boquilla 0,8 mm:</u> 20 – 600 micras
<u>Cabezal</u>	Boquilla intercambiable <u>Velocidad:</u> 30 – 300 mm/s
<u>Velocidad de extrusión</u>	<u>Boquilla 0,25 mm:</u> hasta 8 mm ² /s <u>Boquilla 0,4 mm:</u> hasta 16 mm ² /s <u>Boquilla 0,6 mm:</u> hasta 23 mm ² /s <u>Boquilla 0,8 mm:</u> hasta 24 mm ² /s
<u>Plataforma de impresión</u>	<u>Cama calefactada:</u> 20 – 100 °C <u>Temperatura de la plataforma:</u> 50 – 100 °C
<u>Potencia requerida</u>	100 – 240 V <u>Entrada:</u> 4A, 50 – 60 Hz 221 W max. <u>Salida:</u> 24 V DC, 9,2 A
<u>S.O y ficheros soportados</u>	<u>Sistemas Operativos:</u> Windows / Linux / Mac OS X <u>Ficheros:</u> STL / OBJ / DAE

Tabla 5-3 Características técnicas de la Impresora 3D Ultimaker 2 Extended +.
(Fuente: Ultimaker.com)

5.5. Fabricación de las probetas

En el proceso de fabricación, hay que poner especial cuidado en cómo éste se lleva a cabo, pues una mala decisión puede provocar fallos en las probetas o incluso fallos en la gestión del espacio de trabajo, lo que supone coste y tiempo de impresión.

En este caso, la empresa que ha colaborado tanto en la cesión de equipos/software como en la ayuda de fabricación, propuso un precio fijo a cada probeta, 2€/probeta, y daba libertad sin coste para poder hacer probetas de prueba antes de lanzar la fabricación definitiva.

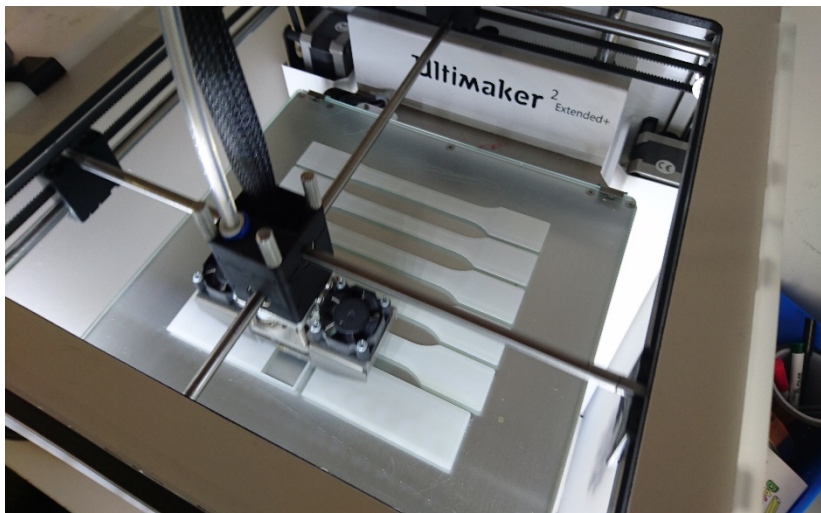


Figura 5-15 Impresión en curso de las primeras probetas de prueba. (Fuente: Elaboración propia)

Además, puesto que se ha llevado a cabo el análisis de dos orientaciones de impresión (0° y 90°) para cada material, y la norma UNE 116005 [46] establecía que se debía de realizar, como mínimo, 5 ensayos para cada dirección, se decidió hacer tiradas de 6 probetas (5 probetas para el ensayo y 1 probeta de reserva) para poder fabricarlas todas con la misma bobina de material y evitar problemas futuros.

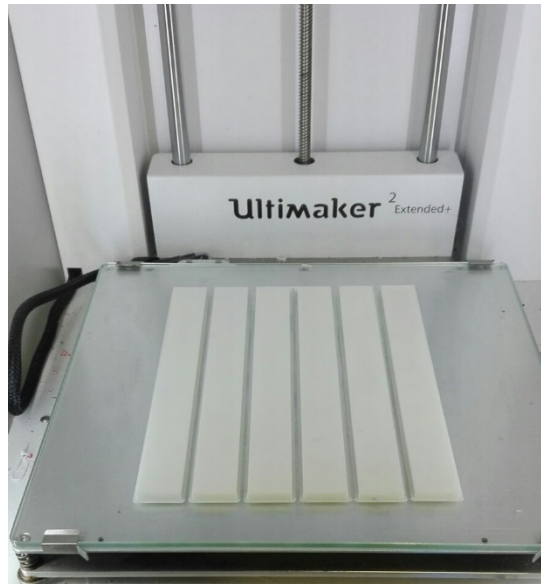


Figura 5-16 Primera tirada de 6 probetas para ensayo de tracción. (Fuente: Elaboración propia)

No se debe de olvidar que antes de lanzar la impresión es necesario aplicar una capa de adhesivo a la cama de impresión, así como calentarla a cierta temperatura, dependiendo del material con el que se esté trabajando, para que no se produzca el ya mencionado “warping”. Para el caso de este trabajo, la temperatura de la cama de impresión para el PLA rondaba los 60-65 °C, así como para el ABS ésta ascendía hasta los casi 85-90 °C.

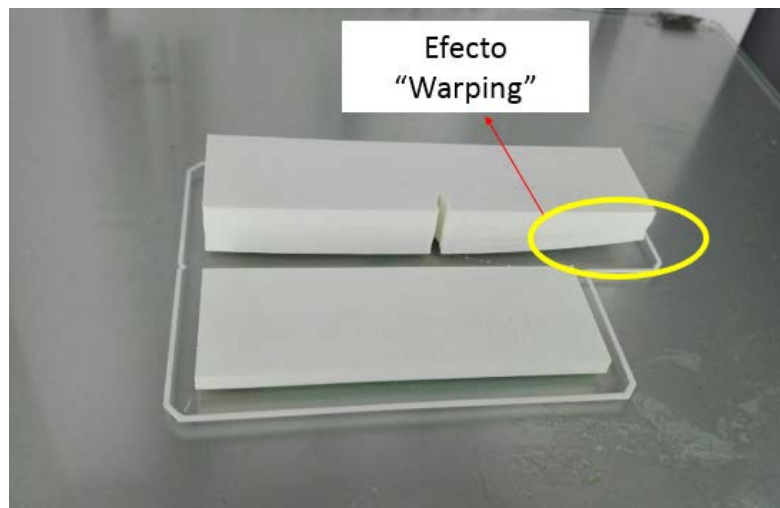


Figura 5-17 Mala adhesión entre la cama de impresión y las capas. (Fuente: Elaboración propia)

Como se comentó en el apartado 4.1.2, el ABS al fundirse emite unos gases que pueden ser nocivos. Por este motivo, se suele emplear una cubierta y un panel frontal que

permiten reproducir una atmosfera adecuada para trabajar con él, asegurando, además, que las piezas impresas salgan sin defectos.

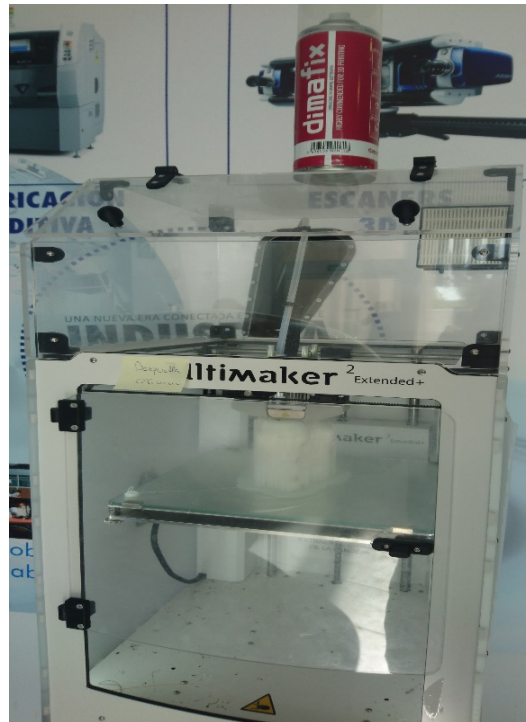


Figura 5-18 Cubierta, panel frontal y adhesivo Dimaflix para impresión de ABS.
(Fuente: Elaboración propia)

5.5.1. Adecuación de las probetas para el ensayo

Una vez se ha terminado la fabricación, solo queda preparar las probetas para realizar el ensayo. En primer lugar, se han de medir y comprobar que tienen las dimensiones correspondientes. Para ello, se hizo uso de un calibre o pie de rey de la marca Mitutoyo.



Figura 5-19 Calibre Mitutoyo. (Fuente: mitutoyo.es)

En segundo lugar, se debe de tener en cuenta que las piezas fabricadas con impresión 3D, a pesar de contar con un buen acabado superficial, tienen restos de hilos y pequeñas imperfecciones que, atendiendo a las características del ensayo, serán más o menos

importantes eliminarlas. Para el caso que se trata en este Trabajo Final de Grado, en el cual las deformaciones del material se han obtenido con técnicas ópticas experimentales, se requería que las superficies estuvieran lo suficientemente lisas para que los resultados fuesen de calidad. Por ese motivo, se ha usado un papel de lija con tamaño de grano fino de 150 y un cúter para eliminar las posibles imperfecciones con las que contaban las probetas a ensayar.

También, para el caso de las probetas de tracción, se cortaron unos talones de fibra de vidrio los cuales permitían que, a la hora de fijar la probeta a las mordazas de la máquina de ensayo, la concentración de tensión en esa zona se minimizara a la vez que la fuerza de agarre se homogeneizara. Estos fueron adheridos a las probetas antes de aplicar el speckle necesario para el posterior análisis y se dejó actuar al adhesivo por un día.

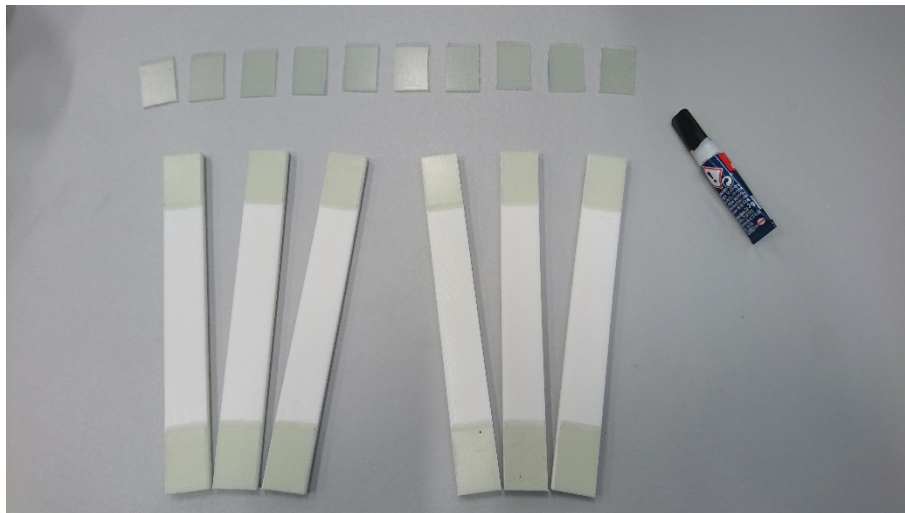


Figura 5-20 Probetas de tracción con talones, preparadas para aplicar la pintura.

(Fuente: Elaboración propia)

Queda aplicar el recubrimiento de pintura que se requiere para la técnica DIC. Para ello, se ha utilizado una pintura en spray con acabado mate en dos colores, una blanca para el recubrimiento inicial y otra negra para aplicar el moteado (speckle).

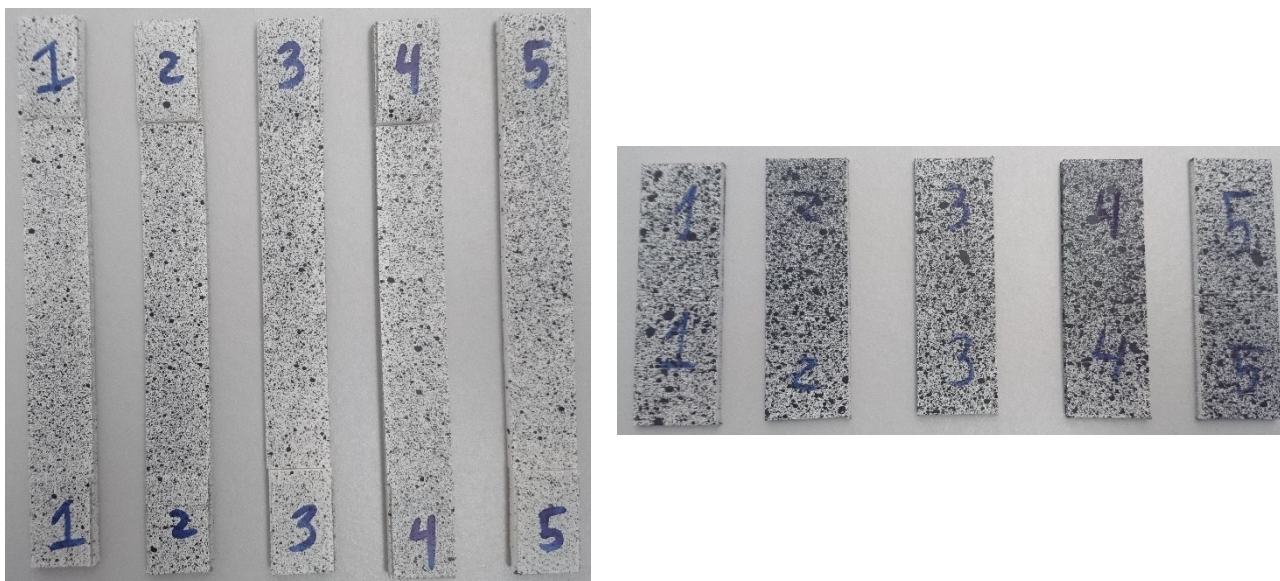


Figura 5-21 Probetas de tracción (izquierda) y flexión (derecha) preparadas para el correspondiente ensayo. (Fuente: Elaboración propia)

5.6. Metodología para obtención y análisis de resultados

La metodología seguida para los ensayos tanto de tracción como de flexión, ha sido la especificada en las correspondientes normas citadas. No obstante, el apartado de geometrías de las probetas para el ensayo de tracción (como se ha visto) o el de herramientas de medidas se han modificado y no ha sido posible ajustarse a dichas normas puesto que no eran válidas para el presente trabajo y no se disponía de algunas de ellas respectivamente.

5.6.1. Ensayo de tracción

En lo referente a este ensayo y a la máquina utilizada, pertenece a la marca INSTRON. En concreto corresponde al modelo 5967 la cual cumple con todos los requisitos que nos establece la norma para llevar a cabo los ensayos. Cuenta con una célula de carga de 30 kN y gracias a la multitud de salidas digitales de las que dispone, permite conectar varias cámaras u otros elementos que facilitan la obtención de datos. Todos los ensayos se llevaron a cabo en condiciones de temperatura y presión atmosférica.

Para el almacenamiento de datos y el control del ensayo, se hizo uso de un único ordenador para que el set-up del mismo fuese sencillo y permitir así que la obtención de los resultados fuese rápida.

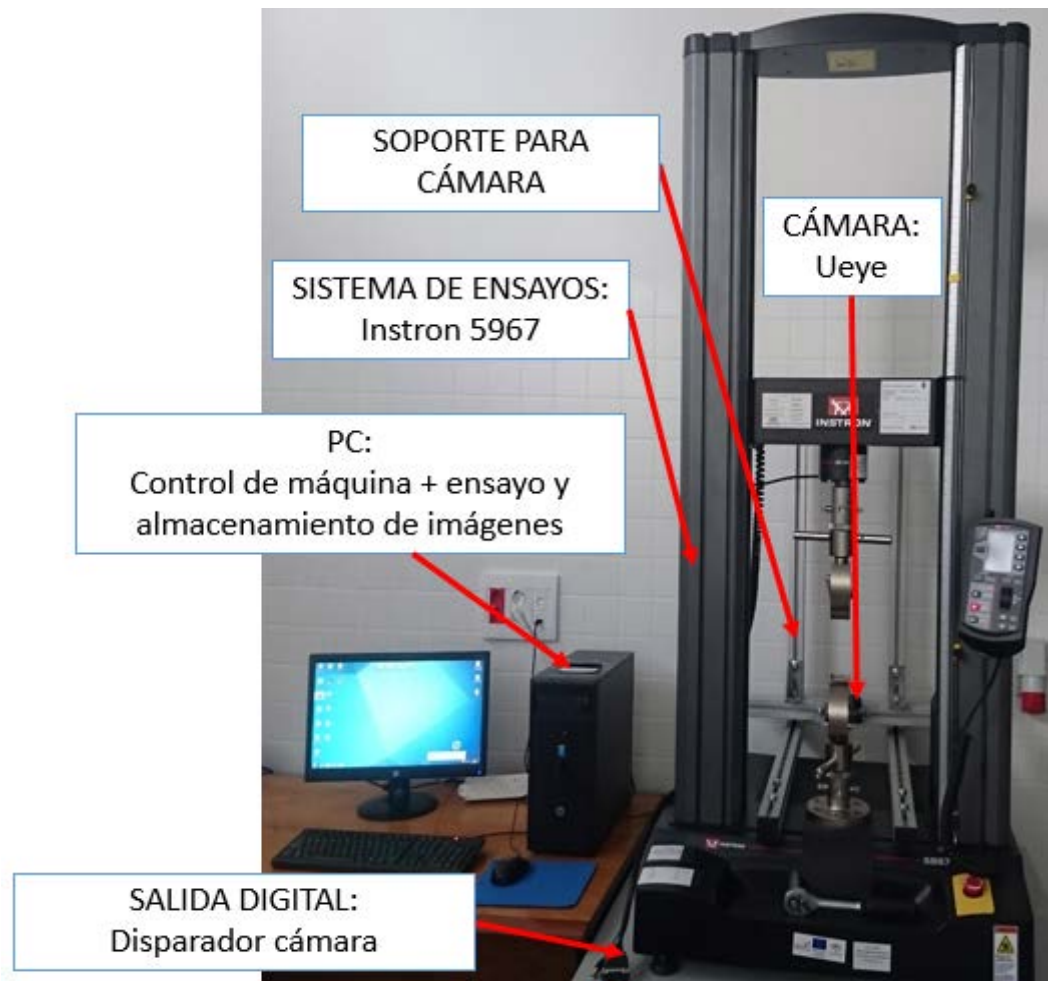


Figura 5-22 Máquina INSTRON 5967 usada para el ensayo de tracción.

(Fuente: Elaboración propia)

Para las capturas se hizo uso de una cámara de la marca uEye, así como de un soporte (regulable en ejes Y, Z) para esta, diseñado expresamente para este trabajo. Dicho soporte permite que el proceso de toma de datos sea más eficiente y menos aparatoso ya que este se amarra a la máquina colocándose en el espacio posterior, evitando así, el uso de un trípode y eliminando la posibilidad de tropezar con él y dañar o descalibrar la lente.

Para la fabricación del soporte se emplearon perfiles Bosch 45x45, así como una sierra de cinta para metal con la cual se hicieron los cortes necesarios. Los alojamientos de los tornillos con los que se permite la unión a la máquina de ensayos se mecanizaron en un torno de tres ejes de la marca Fagor.

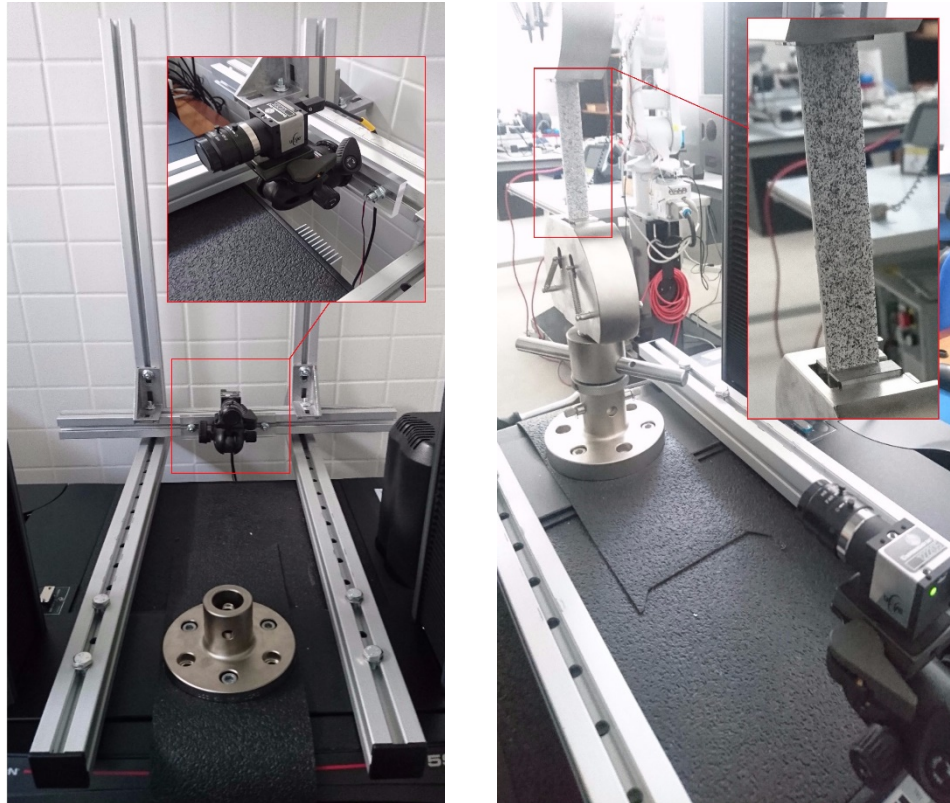


Figura 5-23 Cámara uEye con soporte regulable (izquierda) y set-up final para ensayo de tracción (derecha). (Fuente: Elaboración propia)

En cuanto al software que comandaba la máquina, se usó el INSTRON Bluehill 3. La interfaz gráfica de Bluehill 3 se encuentra dividida en pestañas de colores que facilitan al usuario la configuración y el control del sistema. Dicha interfaz se adapta a los requisitos de cada tipo de ensayo, como, por ejemplo, configuración de múltiples accesorios y puesta a punto, terminología específica del ensayo, sistema de unidades, cálculos, etc.

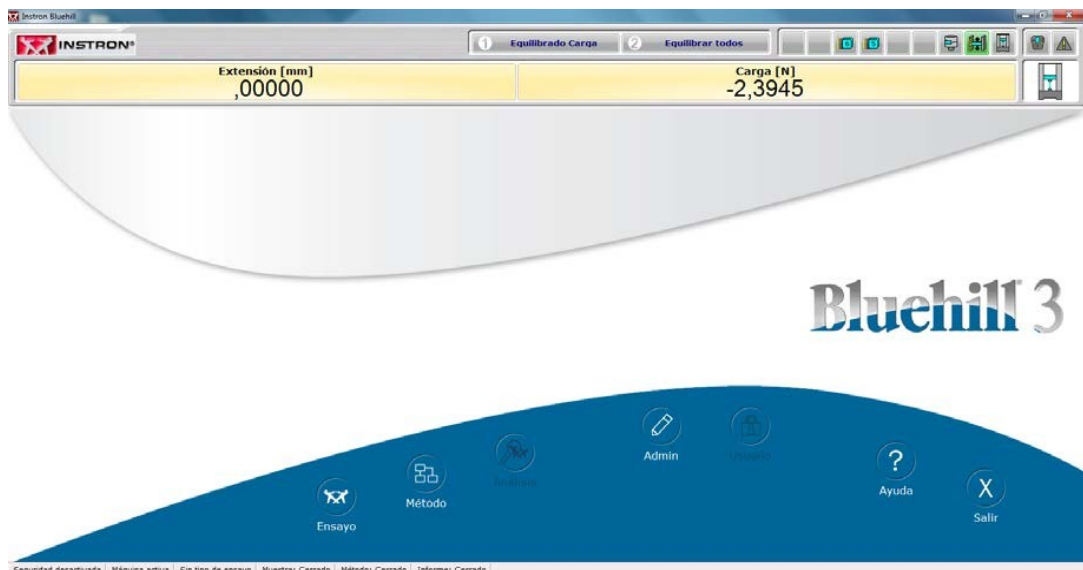


Figura 5-24 Interfaz gráfica de Bluehill 3. (Fuente: Elaboración propia)



Figura 5-25 Pestañas de control de Bluehill 3. (Fuente: Elaboración propia)

El programa se proporciona con una amplísima biblioteca de métodos de ensayo pre-configurados según la normativa vigente y distintos organismos normalizadores. Además, ofrece la posibilidad de ampliación a través de paquetes adicionales de ensayos.

A pesar de que se tuviera incorporado un método o programa de ensayo de tracción dedicado a materiales plásticos configurado bajo las especificaciones de las normas mencionadas, en este caso se decidió crear un método de ensayo personalizado mediante la herramienta de dicho software llamada Testprofiler que permitía crear eventos de carga o descarga sucesivos.

Este método permite configurar cada una de estos eventos con los parámetros que se creían oportunos para el ensayo, resultando idóneo para configurar la señal de salida que accionaba el disparador de la cámara (pulso de 0-5v) necesaria para la técnica óptica de medida de deformaciones DIC.

Así, las capturas del proceso se podían regular o bien por carga o bien por extensión, y debido a los materiales que se han analizado, se decidió escoger esta última opción. En concreto, cada 0,15 mm, ya que, con las pruebas iniciales pertinentes, se comprobó que con este intervalo se obtenían entre 30 – 50 capturas por ensayo, las cuales son más que suficientes para realizar el análisis de los resultados.

La velocidad de ensayo se estableció en 2 mm/min, y aunque la norma permite otras velocidades de ensayo e incluso los fabricantes del filamento usaron velocidades mayores para sacar las propiedades del mismo (50 mm/min), se decidió escoger esta pues se comprobó, con las diversas pruebas, que era la velocidad que mejores resultados aportaba y que mejor permitía capturar y analizar el proceso.

Además, como criterio fin de ensayo, se estableció que el proceso se detuviese si se superaban los 20 kN, lo que implicaba un margen de seguridad de 10 kN para el ensayo de tracción.

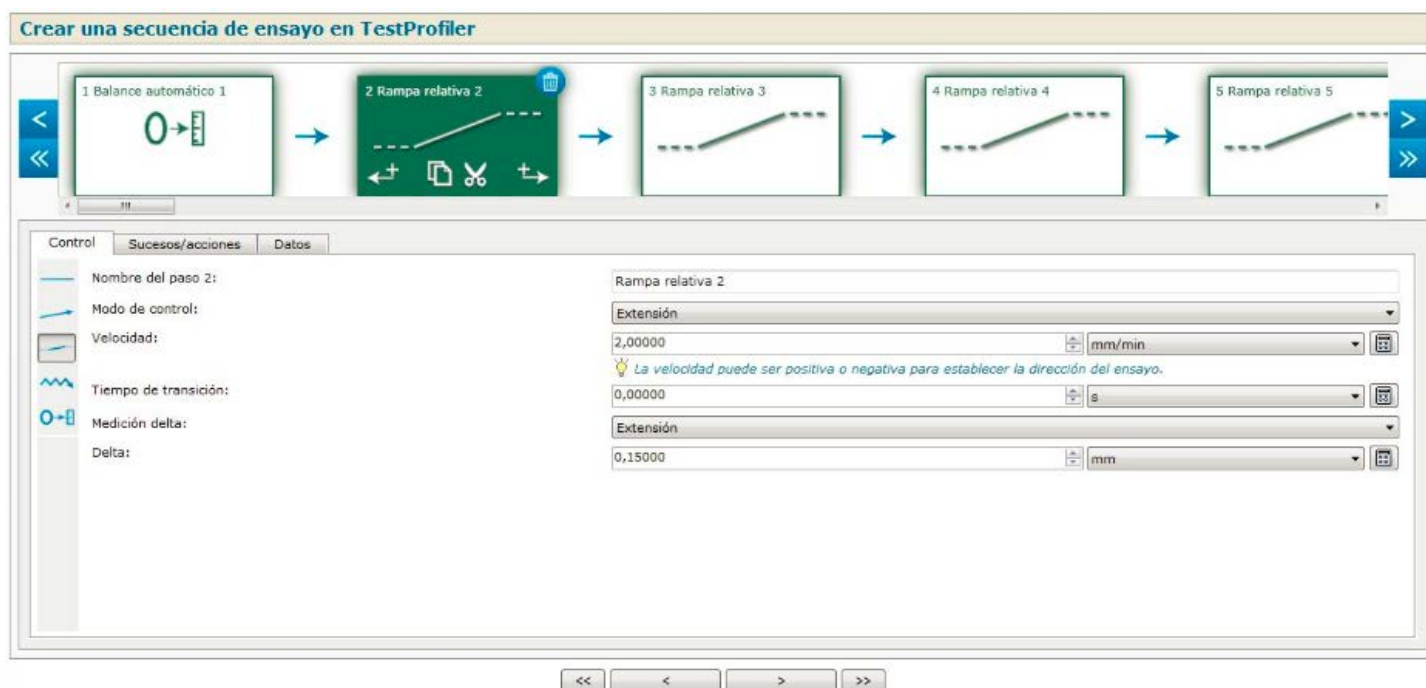


Figura 5-26 Configuración de parámetros en el método Testprofile.

(Fuente: Elaboración propia)

Bluehill 3 también permite configurar la pantalla donde se visualiza el proceso del ensayo. De esta forma, se puede modificar los estilos de las ventanas, así como establecer qué propiedades se quieren obtener al finalizar el ensayo.

Para el caso de estudio, en Bluehill se estableció que diera como resultado los datos en bruto, es decir, que al terminar el ensayo se guardara un archivo “.csv” el cual contenía en columnas los diferentes tiempos, cargas y desplazamientos experimentados a lo largo del ensayo. Estos datos, tras su correspondiente análisis, serán utilizados para obtener el diagrama tensión-deformación y con él todas las propiedades mecánicas de tracción del material como:

- E: Módulo de Young del material.
- ν_{xy} : Coeficiente de Poisson principal.
- σ_{max} : Resistencia a la tracción.
- σ_e : Límite de elasticidad.
- σ_f : Tensión de fractura.

Además, al analizar dos direcciones perpendiculares de fibra, se han obtenido los valores de E_{11} y E_{22} , los cuales se utilizarán para llevar a cabo el análisis con el método de elementos finitos (FEM) en un software destinado para tal fin.

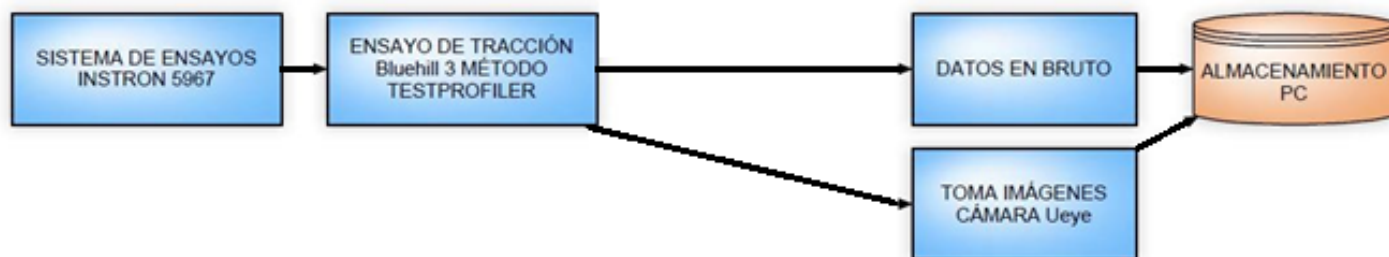


Figura 5-27 Diagrama de flujo del proceso de obtención de datos.

(Fuente: Elaboración propia)

5.6.2. Ensayo de flexión

Para el ensayo de flexión, llevándose a cabo siguiendo el mismo diagrama de flujo que para el ensayo anterior, se ha utilizado tanto la misma máquina como el mismo software con la salvedad de que al tratarse de ensayos diferentes y al calcularse otros parámetros se han utilizado set-up y configuraciones de máquina diferentes.

En concreto, la velocidad del ensayo pasa a ser negativa con valor de -2 mm/min . El motivo es que en este caso el puente se desplaza hacia abajo en lugar de hacia arriba como ocurría en el ensayo de tracción. De igual forma se modifica el criterio de seguridad, estableciéndose este, debido a las limitaciones del set-up, en un desplazamiento máximo absoluto del puente de 14 mm . Así, el intervalo de captura de imágenes pasa a ser de $0,3 \text{ mm}$ para obtener de nuevo entre 30 – 50 capturas por ensayo.

Ahora, además del soporte para la cámara, el set-up incluye un pequeño espejo colocado a 45° de la horizontal justo debajo de la probeta (Figura 5-28). Ya que se ha llevado a cabo un análisis DIC-2D, tan sólo se puede analizar la superficie lateral de la probeta, pero sería de gran interés conocer, en estudios posteriores, cómo se comporta el material en la superficie sobre la que se aplica la carga. Este es el motivo de ese espejo, ya que nos posibilita observar esa superficie.

En este caso de estudio, las capturas de la imagen en la parte inferior por medio del espejo tienen un objetivo meramente de observación. Para poder realizar un análisis de desplazamientos o deformaciones sería necesario contar con un sistema de medida DIC 3D dado que ocurren desplazamientos en tres dimensiones. [49] Esto lleva a un proceso de estudio mucho más complejo, el cual, se escapa del alcance de este TFG.

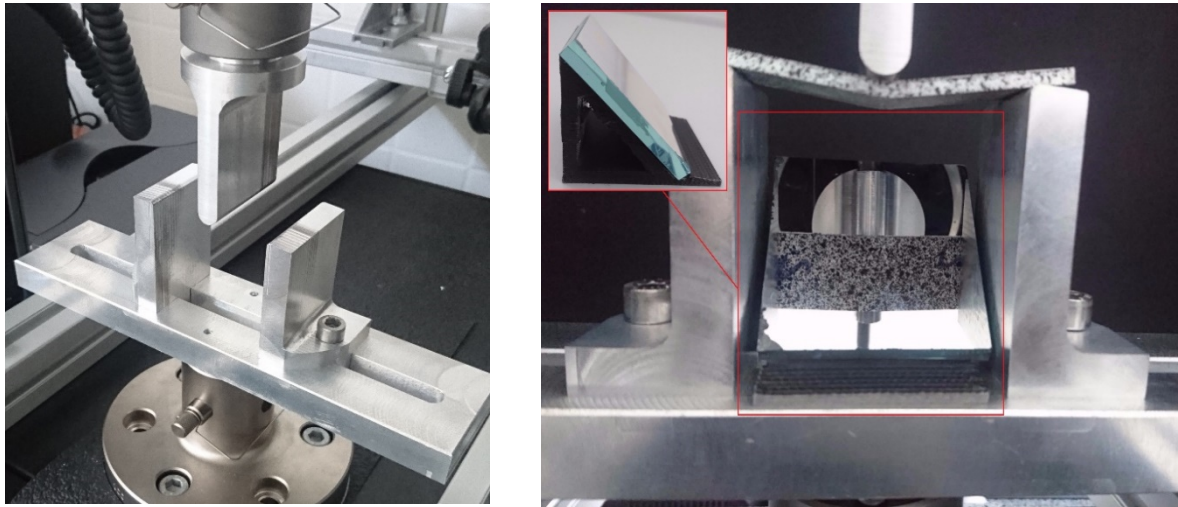


Figura 5-28 Utillaje y set-up final utilizado para el ensayo de flexión. (Fuente: Elaboración propia)

También, se ha modificado la cámara ya que, debido a que la región de interés ahora es más pequeña, se necesitaba un poco más de resolución en las imágenes. Así, he utilizado una cámara matricial de la marca Allied Vision, modelo Stingray F-033.

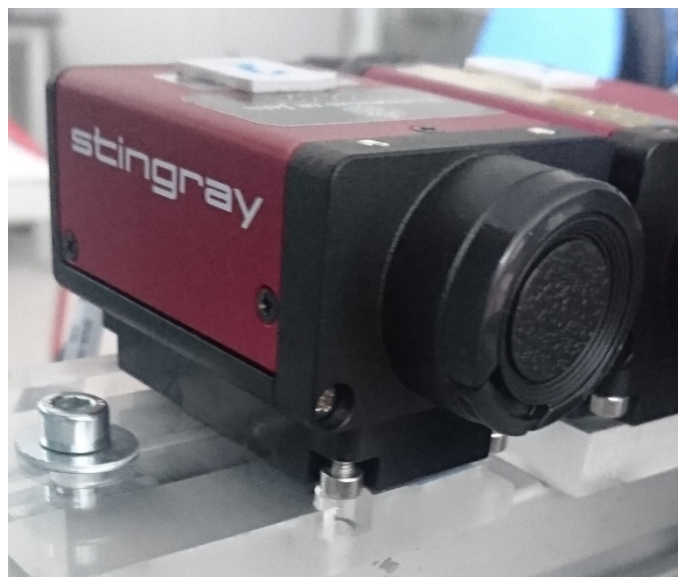


Figura 5-29 Allied Stingray F-033. (Fuente: Elaboración propia)

Al igual que se estableció en el ensayo de tracción, para este ensayo también se han obtenido los datos en bruto en un archivo “.csv”, el cual, organizado por columnas, contiene los tiempos, tensiones y deformaciones registradas a lo largo del mismo. Así, y tras su correspondiente análisis, se podrá obtener el diagrama de tensión-deformación junto con las propiedades mecánicas de flexión del material, como Módulo de Flexión (E_f) o la flecha (S).

5.6.3. Medida de las deformaciones con Ncorr

Como se ha comentado anteriormente, analizar las imágenes obtenidas exige un proceso algo más complejo. Para ello vamos a hacer uso de la herramienta Ncorr.

Ncorr es una aplicación opensource que utiliza el entorno de Matlab para realizar análisis de correlación digital de imágenes en el plano (DIC-2D). Esta, fue desarrollada por el Instituto Tecnológico de Georgia (EE.UU) bajo los requerimientos y bases establecidas por este método en el capítulo 4 apartado 5.2. [50]

Tanto el análisis de las imágenes obtenidas para el ensayo de tracción como el de las imágenes obtenidas para el ensayo de flexión, se realizan de la misma forma con diferencias en algunos valores que se irán especificando a continuación.

Al abrir la aplicación, se pide cargar las imágenes a analizar y seleccionar una región de interés sobre la que el programa empezará a realizar los cálculos. Como región de interés (ROI), se ha elegido la zona comprendida entre las mordazas (para el ensayo de tracción) ya que de esta forma se ha podido realizar un análisis de campo completo, obteniendo así, resultados muy fiables a lo largo de toda la probeta. [51] En el caso de la probeta de flexión, sólo se ha podido elegir como región de interés la superficie lateral por los motivos especificados anteriormente.

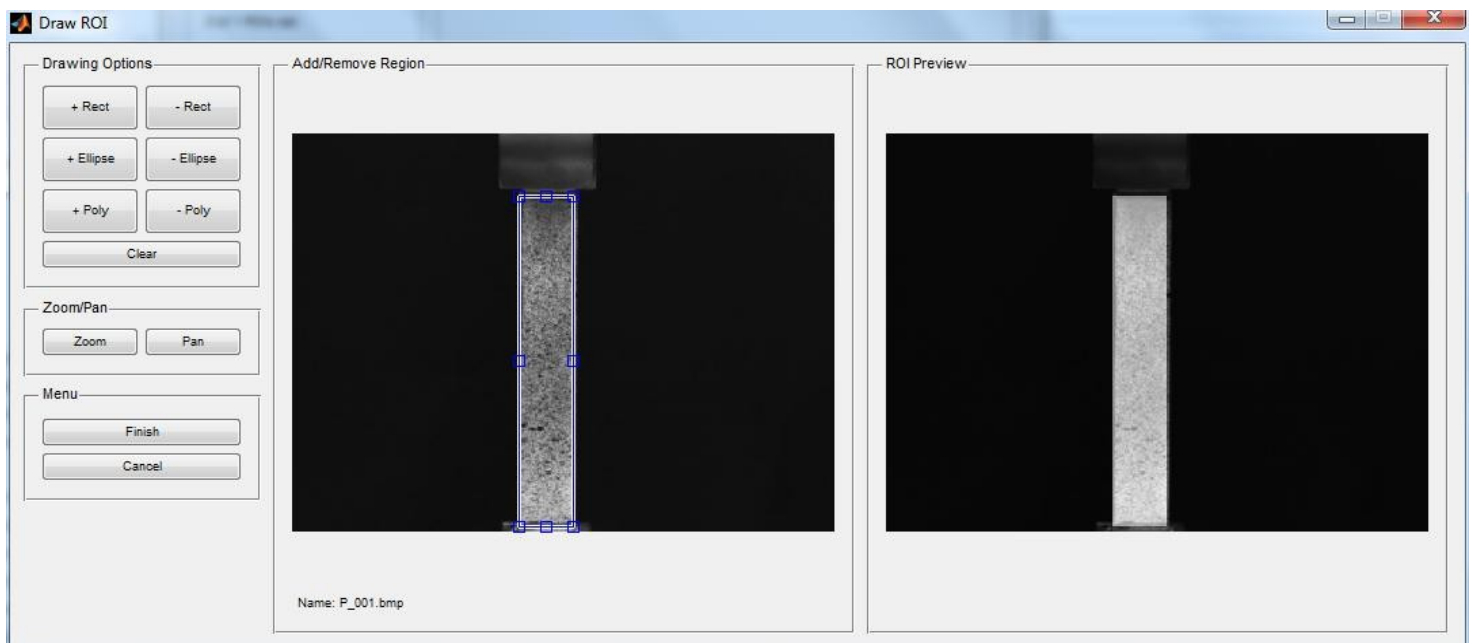


Figura 5-30 Selección de la región de interés. (Fuente: Elaboración propia)

Además, Ncorr necesita conocer una distancia o dimensión conocida de la probeta (recomendado $>33\%$ de la extensión de la imagen) para que pueda establecer o determinar

una relación mm/px, ya que el software mide los desplazamientos en píxeles. Para este caso, la distancia introducida para la probeta de tracción es la comprendida entre el final de los dos talones de la probeta, es decir, la longitud de la región de interés. Para el caso de flexión se ha optado por escoger también la dimensión de la región de interés ya que es un dato conocido. Con esto, se realiza un primer análisis de los desplazamientos que experimentan las probetas.

En base a este primer análisis de desplazamientos, el programa permite calcular las deformaciones unitarias (strains) que se producen en la probeta. Este cálculo se lleva a cabo a través de una derivada espacial de los desplazamientos tomados entre distintos puntos, para el cual, Ncorr pide que se determine un parámetro llamado “Strain Radius” que en realidad indica el porcentaje de puntos de la región de interés sobre los que se realiza la derivada.

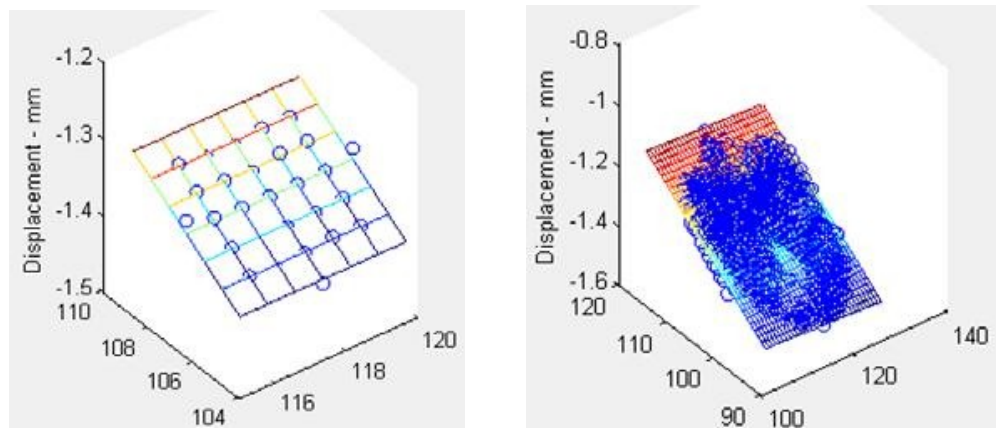


Figura 5-31 “Strain Radius” con valor 3 (izquierda) y con valor 16 (derecha).

(Fuente: Elaboración propia)

Tras varios análisis de prueba, hacer algunas revisiones en textos en los que se realizan análisis muy similares [51] y probar distintos porcentajes, se optó por un valor que estuviera entorno al 20%, ya que porcentajes menores desembocaban en mediciones muy ruidosas, mientras que porcentajes mayores introducían un suavizado demasiado alto. En concreto, para los objetivos buscados en este trabajo, se optó por un valor del 16% para los ensayos de tracción y un valor del 26% para los ensayos de flexión ya que se obtenían resultados bastante buenos.

Cuando Ncorr realiza el análisis de las imágenes, almacena todos los datos de cada imagen en una matriz. Dicha matriz está organizada de tal forma que contiene todas las variables que analiza el programa: deformación unitaria en x (e_{xx}), deformación unitaria en y (e_{yy}), deformación unitaria en xy (e_{xy}), desplazamiento horizontal (U) y desplazamiento

vertical (V). Además, se debe tener en cuenta que el programa analiza toda la imagen y es por esto que los tamaños de las matrices serán iguales que los tamaños de las imágenes (ancho x longitud). Así, estas contarán con ceros en los pixeles que se encuentren fuera de la región de interés.

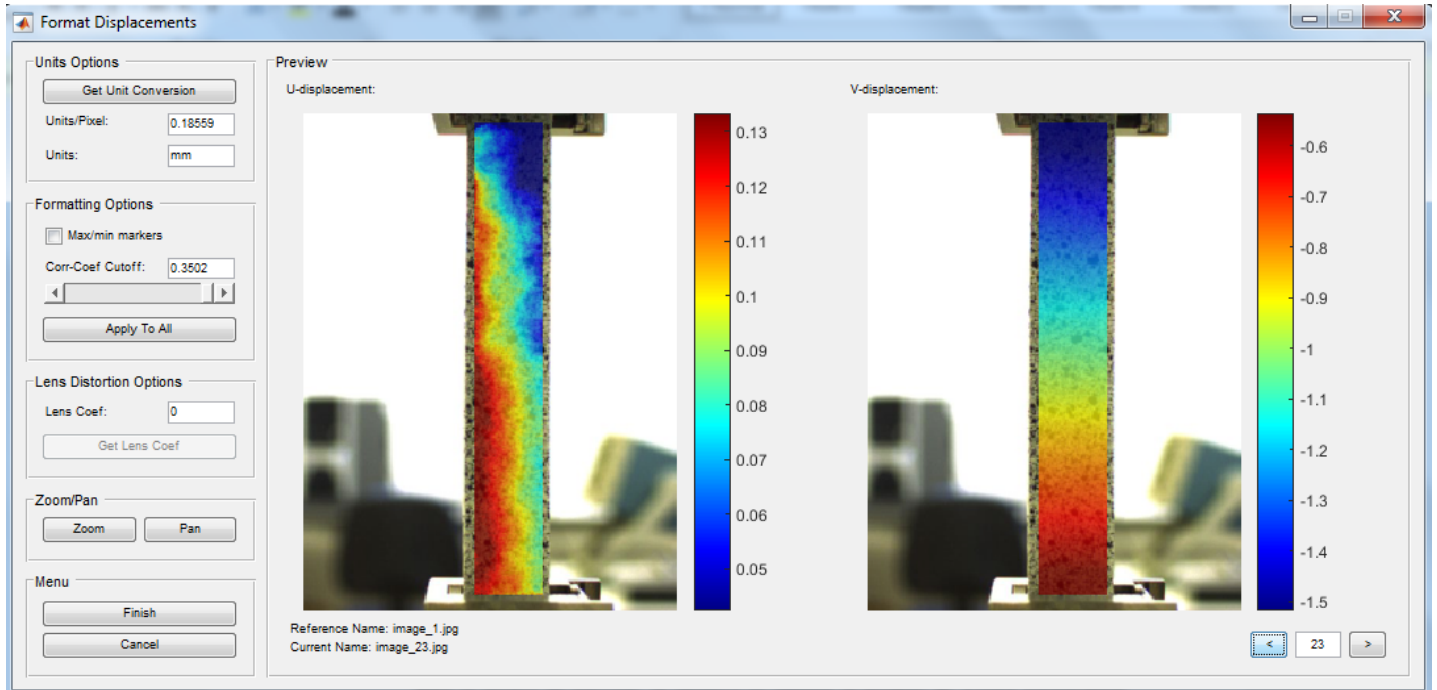


Figura 5-32 Desplazamientos calculados con Ncorr. (Elaboración propia)

En este punto, sólo quedaría calcular las propiedades del material haciendo uso de las matrices resultantes del análisis DIC-2D.

5.6.4. Análisis con Matlab

Para realizar todos los cálculos necesarios para obtener las propiedades de los materiales, así como las representaciones gráficas pertinentes, se ha hecho uso de la herramienta Matlab.

La premisa de usar esta potente herramienta de cálculo, fue la de programar un menú de opciones que permitiese hacer todos los cálculos en cuestión de minutos y de una forma intuitiva. Además, el menú de opciones se ha programado para que sea lo más general posible, es decir, que cualquier persona que realice un ensayo experimental con su posterior análisis DIC-2D, pueda usar este menú para realizar sus cálculos de forma rápida y sencilla.

Para el ensayo de tracción, el objetivo es obtener el módulo de Young longitudinal (E_1), el módulo de Young transversal (E_2) y el coeficiente de Poisson principal (ν_{12}) así como de obtener las curvas de tensión-deformación para cada material. Para esto, ha sido necesario

calcular la media de las tensiones y deformaciones unitarias correspondientes a los 5 ensayos de cada dirección y material.

Para las tensiones se han usado los datos de carga obtenidos del ensayo de tracción. Como se comentó en el apartado 5.6.1, el programa Bluehill 3 crea un archivo .csv en el cual están recogidos por columnas los datos de tiempo de ensayo (s), estado de carga a lo largo del ensayo (N) y la extensión del puente (mm). Con esto, y puesto que las capturas de cada imagen se han realizado por extensión, se procedió a cargar el archivo .csv en Matlab (comando `uiimport`), recoger los datos de carga que correspondiesen al dato de extensión con el que se realizó la captura, dividirlo entre la sección transversal conocida y guardar el valor en una matriz, la cual se ha denominado T. Esta matriz estará formada por 5 filas, correspondientes a los 5 ensayos de las 5 probetas, y n columnas, siendo n el nº de imágenes realizadas por ensayo.

Para las deformaciones, se ha procedido a cargar en Matlab los archivos .mat procedentes de los análisis DIC para cada ensayo e ir accediendo a esos archivos para ir haciendo la media de las deformaciones unitarias, así como ir eliminando los ceros correspondientes a los pixeles que se quedaban fuera de la región de interés. De esta forma lo que se ha ido creando es una matriz para cada uno de los 5 parámetros (e_{xx} , e_{yy} , e_{xy} , U y V) las cuales está formadas, de nuevo, por 5 filas, correspondientes a los 5 ensayos de las 5 probetas, y n columnas, siendo n el nº de imágenes realizadas por ensayo.

De esta forma, y una se dispone de las matrices de tensiones y deformaciones, resulta muy fácil calcular los módulos de Young y el coeficiente de Poisson, así como realizar las gráficas pertinentes.

Para el caso del ensayo de flexión, los cálculos se reducían bastante puesto que no se tenía que hacer uso de los datos recogidos del análisis DIC-2D. Esto es debido a que la norma ya establece una formulación para calcular las deformaciones, las tensiones y el módulo de flexión. De esta forma:

$$\begin{aligned}\sigma_f &= \frac{3FL}{2bh^2} \\ \varepsilon_f &= \frac{6sh}{L^2} \\ s_i &= \frac{\varepsilon_{fi}L^2}{6h}\end{aligned}\tag{36}$$

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}$$

donde:

σ_f Parámetro de esfuerzo de flexión

F Fuerza aplicada (N)

L Distancia entre apoyos (mm)

b Anchura de la probeta (mm)

h Espesor de la probeta (mm)

ε_f Deformación de flexión

s Flecha (mm)

E_f Módulo de flexión

Recurriendo de nuevo a Matlab, se volvió a cargar el archivo .csv proveniente de los resultados del ensayo y se fueron aplicando las ecuaciones expresadas en (36) para ir calculando las tensiones y deformaciones.

Para el módulo de flexión (E_f), se han de calcular primeramente las flechas s_1 y s_2 correspondientes a los valores de deformación dados por la norma $\varepsilon_{f1} = 0.0005$ y $\varepsilon_{f2} = 0.0025$. Una vez se tienen esas flechas, se interpola en el archivo .csv para buscar los valores de carga correspondientes a esas flechas y acto seguido con estas cargas se calculan las tensiones pedidas σ_{f1} y σ_{f2} .

Una vez obtenidos todos los datos calculados, tanto los del ensayo de tracción como los de el de flexión, se realiza una simulación numérica del ensayo (ver apartado 5.6.5) con el fin de comparar los resultados con los obtenidos del análisis con Matlab y comprobar así, que la simulación es correcta. De esta forma, los resultados procedentes de las simulaciones se guardan en otro archivo “.csv”, el cual será cargado en Matlab y posteriormente representado en los diagramas tensión-deformación para ver la correlación que tienen todos los datos.

Como se mencionó al inicio de este apartado, todos estos procesos de cálculos y representaciones gráficas se llevan a cabo de forma automática, dejando tan solo para el

usuario, la labor de ir introduciendo los archivos correspondientes cuando el menú se los solicite.

```
Command Window

ANÁLISIS DE DATOS PARA ENSAYOS DIC
1. Ensayos de Tracción.
2. Ensayos de Flexión.
3. Finalizar el programa.
    Introduce la opcion deseada:1
    1.1 Lectura de datos y cálculo de resultados.
    1.2 Generar gráficos representativos y mostrar los resultados calculados.
    1.3 Guardar resultados calculados.
    1.4 Volver al Menú Principal.
        Introduce la opcion deseada: 1.1
        Introduce el valor de la Sección Transversal en mm^2: 80
        Introduzca el número de ensayos realizados: 30
        Cargue el archivo .csv con los datos obtenidos de las simulaciones numéricas. Pulsa 1 para continuar: 1
        Cargue el archivo de resultados .mat del análisis DIC del ensayo 1. Pulsa 1 para continuar: |
```

Figura 5-33 Menú de opciones para los cálculos de las propiedades del material.

(Fuente: Elaboración propia)

Observando la figura 5-33, se puede ver como Matlab va solicitando, de manera clara y ordenada al usuario, cada uno de los archivos o datos necesarios para realizar los cálculos.

Además, en vista a comprobar que la región de interés escogida para el análisis DIC-2D es la que ofrece mejores resultados, como se analizó en [51], se ha hecho otro programa, de forma adicional, para Matlab el cual permite analizar las diferentes regiones de interés y comparar los resultados con los obtenidos de las simulaciones numéricas

Se recomienda que, para comprender la estructura y el funcionamiento de los programas, se revise el anexo 10.1.

5.6.5. Modelo numérico en software de elementos finitos (ABAQUS)

Como ya se expuso en el apartado 4.6, el método de los elementos finitos (FEM) permite obtener un modelo numérico, mediante una serie de formulaciones matemáticas, para predecir el comportamiento mecánico de un elemento. Para ello se ha utilizado Abaqus de la compañía Dassault Systèmes, un software comercial dedicado a esta tarea del cálculo numérico.

5.6.5.1. Anisotropía y sistemas de referencia

Antes de pasar a la creación del modelo numérico, se ha de tener en cuenta la presencia de anisotropía en el material puesto que, al tratarse de un método de fabricación por capas y al usar comúnmente configuraciones parecidas a las del tipo tejido (apartado 4.2.1), la aparición de esta propiedad en el elemento impreso es notoria ya que tendrán

diferentes propiedades dependiendo de la orientación de las fibras. Es por esto que se debe establecer un sistema de referencia bien definido a la hora de realizar tanto la impresión del elemento como los ensayos pertinentes. De igual forma, ese sistema de referencia se deberá tener en cuenta a la hora de crear el modelo numérico, teniendo muy presente la orientación de fibra para cada caso.

Según la norma UNE 116005:2012, [46] establece que se deberá registrar la orientación de las probetas y realizar los ensayos atendiendo a las tres direcciones principales, donde normalmente se considera la dirección donde se va aplicar el esfuerzo como dirección principal del laminado.

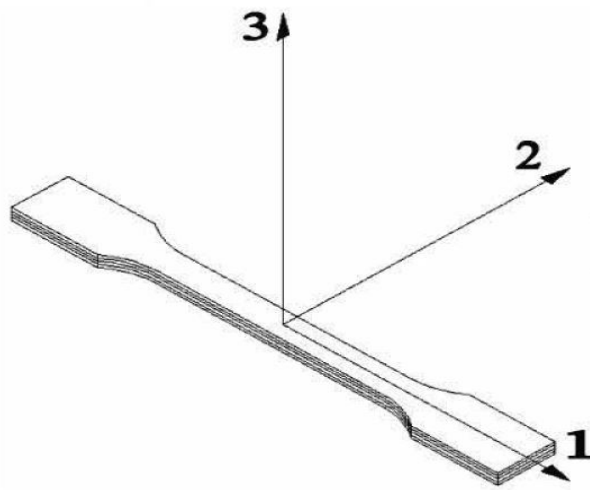


Figura 5-34 Sistema de referencia establecido según la norma UNE 116005:2012.

[46]

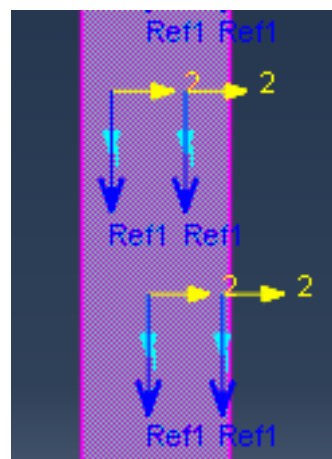


Figura 5-35 Sistema de referencia en una lámina del modelo numérico con ABAQUS. (Fuente: Elaboración propia)

5.6.5.2. Metodología para la creación del modelo numérico

A continuación, se hará una breve explicación del procedimiento seguido para crear el modelo numérico referente al ensayo de tracción.

En primer lugar, se debe definir la geometría del objeto que se va a someter al proceso de cálculo, así como indicar el tipo de elemento a analizar. En este caso se ha trabajado con un espacio modelo 3D definiendo un elemento tipo placa.

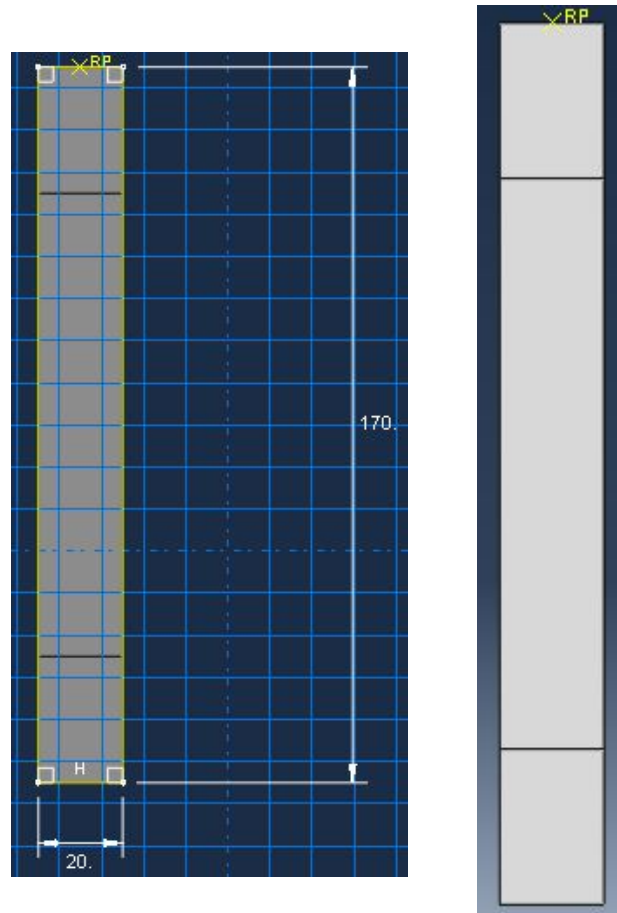


Figura 5-36 Croquis con la geometría de la probeta (izquierda) y parte creada con elemento tipo placa (derecha). (Fuente: Elaboración propia)

Es muy importante no olvidar introducir todas las restricciones existentes para que así el modelo se ajuste lo máximo posible a la realidad. Por esto, y viendo que en el ensayo de tracción, los talones de amarre al estar en contacto con las mordazas no sufren deformaciones a lo largo de sus superficies, se crearon dos particiones en los extremos de la probeta con las dimensiones de estos para poder simular dicha situación. (figura 5-36)

Además, se ha añadido un punto (RP) en la parte superior donde se aplicará la carga con el objetivo de provocar que los desplazamientos sean constantes en esta zona. Así, la única zona que queda libre es la zona central, es decir, la región de interés. (figura 5-36)

Ahora se definen las características del material. Para ello, se han introducido los datos obtenidos del análisis de Matlab. Estos son:

- E_1 : Módulo de elasticidad en la dirección principal.
- E_2 : Módulo de elasticidad en la dirección transversal.
- ν_{12} : Coeficiente de Poisson principal.
- G_{12} , G_{13} , G_{23} : Módulos de cizalladura. Para este caso de estudio, se ha considerado una simplificación que permite tratar al material como isótropo.

Esto implica que: $G_{12} = G_{13} = G_{23}$

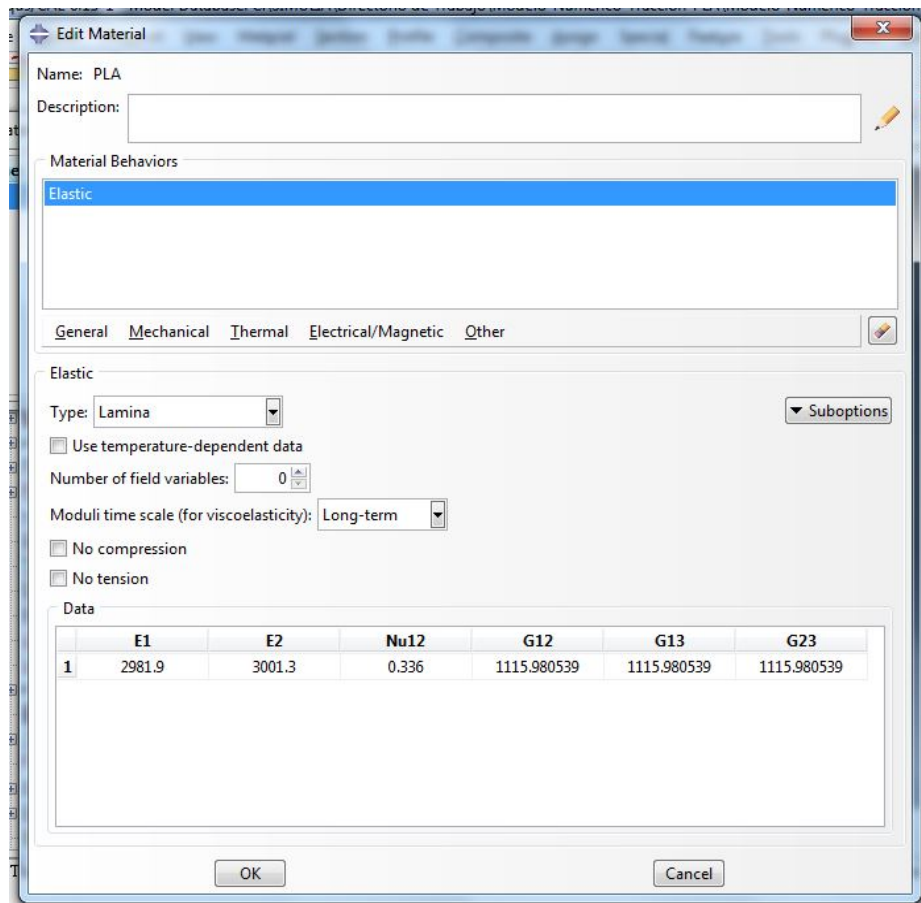
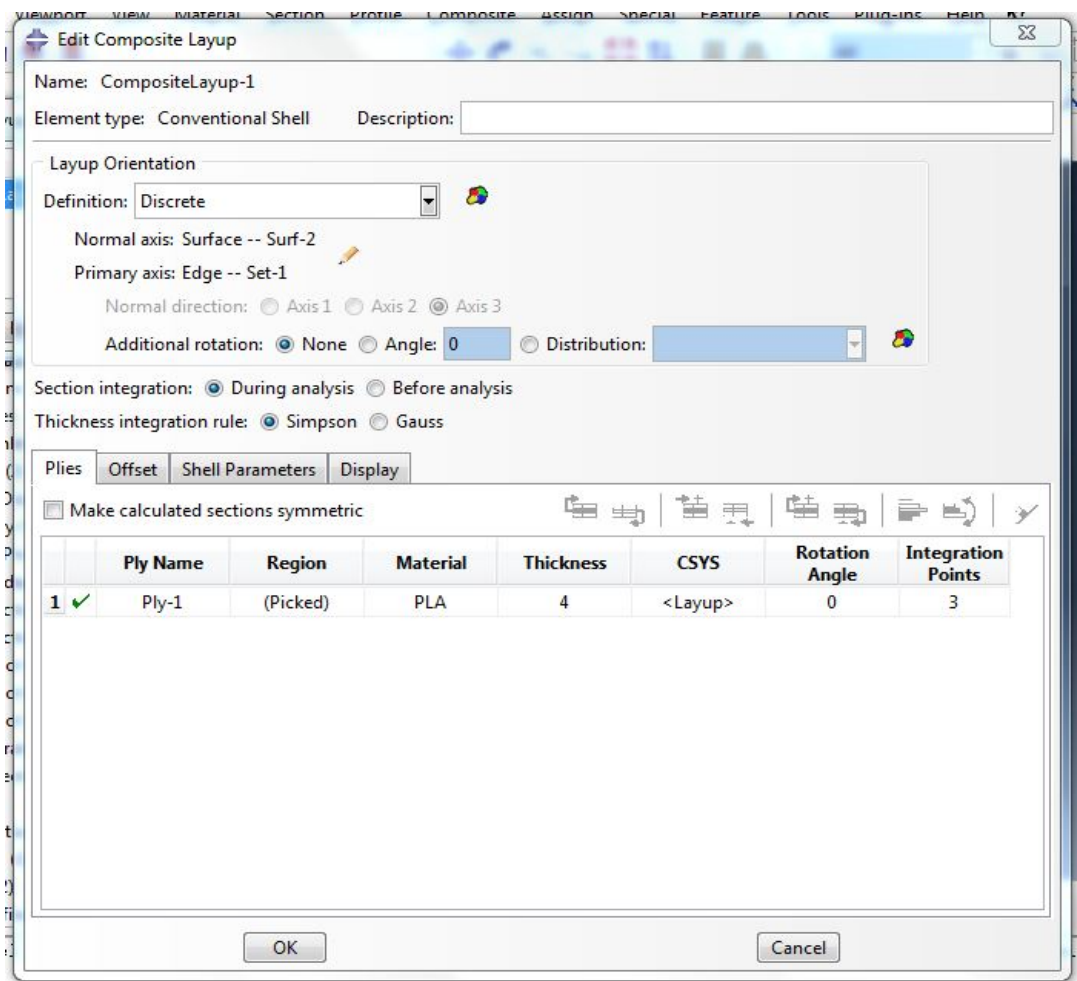


Figura 5-37 Definición de las características del PLA en el software ABAQUS.

(Fuente: Elaboración propia)

Una de las partes fundamentales de este trabajo, es ver la influencia del ángulo de relleno en las propiedades mecánicas. Como se ha comentado en el apartado 4.2.2, debido a

la similitud entre un elemento impreso y un material compuesto, se ha utilizado la herramienta “Composite Lay-Up” de ABAQUS para crear las láminas. Esta herramienta permite elegir orientaciones, sistemas de referencia y nº de láminas presentes. De esta forma, y debido a que para este estudio se han impreso laminados en una única dirección, se ha creado un modelo de una única lámina con espesor el de la probeta impresa.



*Figura 5-38 Características de las capas o láminas que conforman la pieza.
(Fuente: Elaboración propia)*

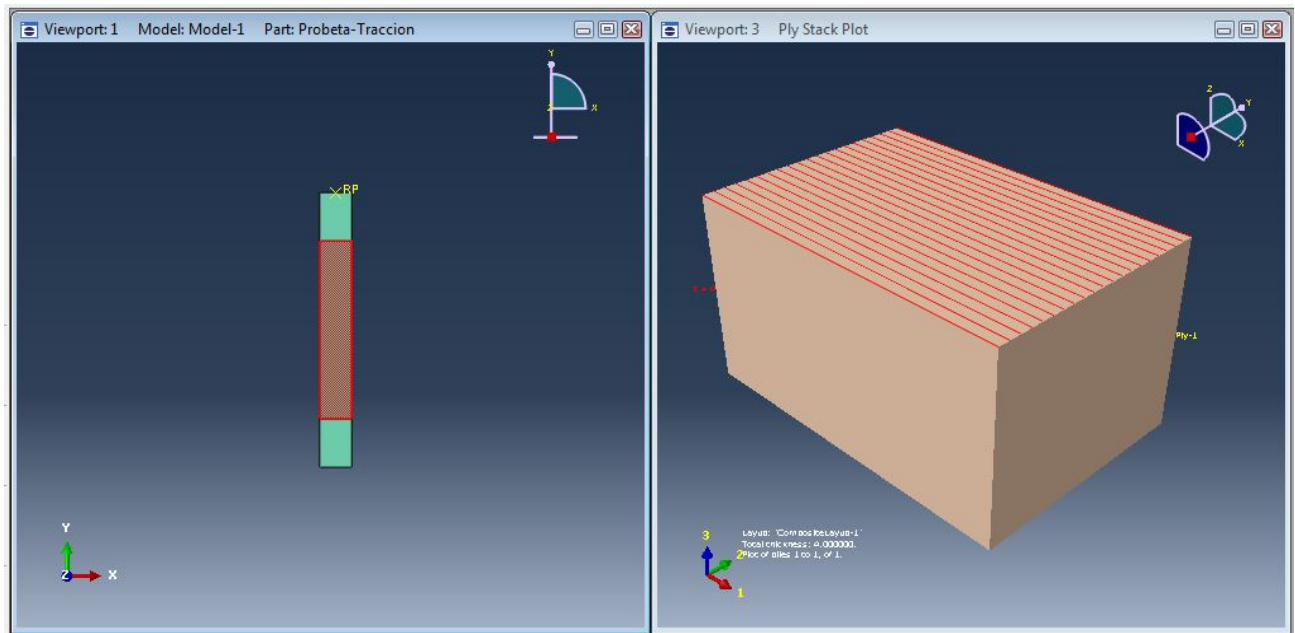


Figura 5-39 Secuencia de apilamiento de las capas y orientación de las fibras.

(Fuente: Elaboración propia)

De nuevo, como se ha comentado en el apartado 4.6, para realizar el análisis con el método de elementos finitos (FEM) es necesaria una malla que divida al objeto en elementos más pequeños y fáciles de procesar. En la pestaña “Mesh” se puede asignar dicha malla al objeto de estudio. Ésta está formada por elementos, de los cuales se pueden elegir diferentes tipos atendiendo a la geometría de la probeta. Debido a que esta geometría de probetas es sencilla (rectangular) y a que se ha modelado como placa delgada, se ha elegido una malla con elementos tipo S4R, los cuales ofrecen buenos resultados. [52]

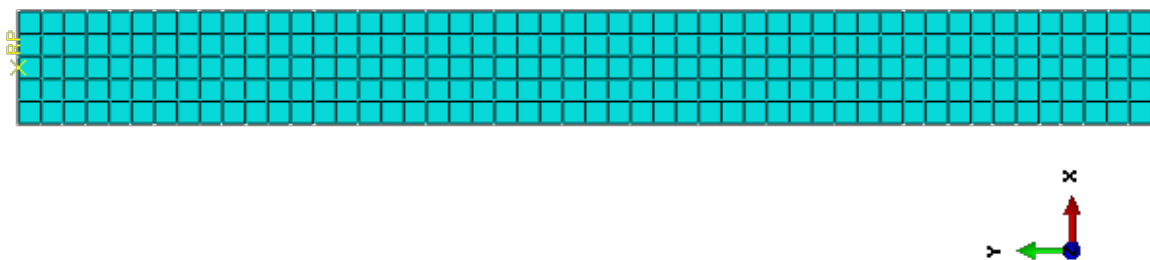
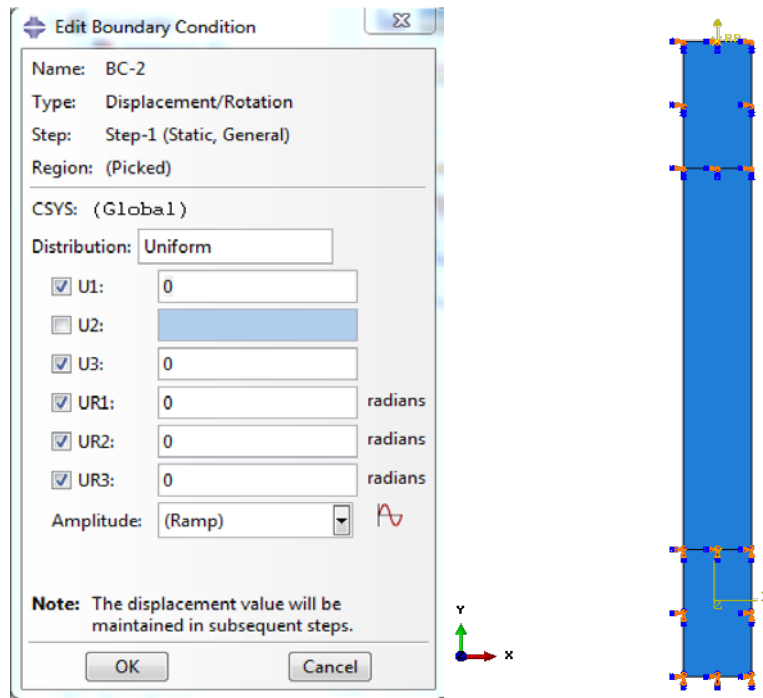


Figura 5-40 Mallado de la probeta. (Fuente: Elaboración propia)

Ahora, se van a definir las condiciones de contorno para que la simulación sea semejante al proceso real. Para ello se ha creado un “Step” donde se han restringido todos los giros y desplazamientos en el área del talón inferior, simulando así el amarre de las

mordazas. En la parte superior se ha procedido de igual forma, pero permitiendo, en este caso, el desplazamiento vertical (U2).

A la hora de establecer la carga superior de tracción, se ha optado por introducir una carga puntual. Para el presente modelo, se han simulado 4 estados de carga correspondientes al 25-50-75 y 100% de la carga máxima de cada laminado y material. En la tabla 5-4 se detallan estos estados de carga.



*Figura 5-41 Condiciones de contorno para el análisis numérico.
(Fuente: Elaboración propia)*

PLA 0°	PLA 90°	ABS 0°	ABS 90°
1080,264 N	960,2663 N	720,152 N	480,0894 N
2160,464 N	1920,5 N	1440,3 N	960,1741 N
3360,688 N	2880,7 N	2280,4 N	1560,3 N
4440,912 N	3840,856 N	3000,304 N	2040,3 N

Tabla 5-4 Estados de carga simulados en ABAQUS para las diferentes orientaciones. (Fuente: Elaboración propia)

Una vez se ha terminado el modelo numérico y se ha realizado la simulación, se lleva a cabo una comparación de los resultados. Para este caso de estudio, se han obtenido las deformaciones, tanto en el eje principal (E_{yy}) como en el transversal (E_{xx}), en el centro de la probeta correspondientes a cada estado de carga simulado. Con estos datos, se ha creado un archivo “.csv”, el cual ha sido cargado a posteriori en Matlab, para así poder representar estos resultados junto a los diagramas tensión-deformación que se han obtenido de los ensayos experimentales.

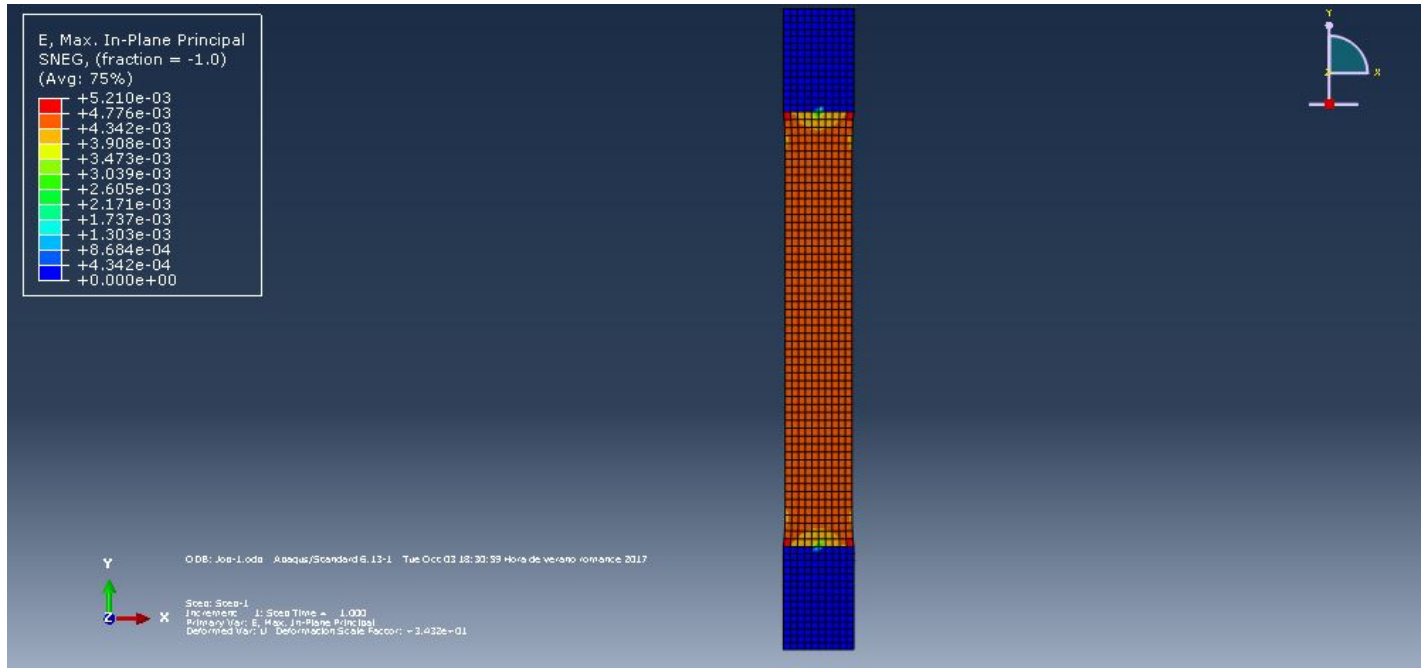


Figura 5-42 Resultados del análisis numérico. (Fuente: Elaboración propia)

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este punto se expondrán, los resultados obtenidos de los ensayos realizados a lo largo de este trabajo a través de los métodos experimentales desarrollados en secciones anteriores. Cada ensayo con su correspondiente material y orientación de fibra se irá detallando en diferentes apartados. Para concentrar toda la información que se ha obtenido, estos resultados se presentarán en forma de gráficas.

6.1. Resultados obtenidos en el ensayo de tracción

En esta sección se mostrarán, por medio de gráficos y tablas, los resultados obtenidos en los ensayos de tracción, junto con los resultados correspondientes al modelo numérico.

En primer lugar, tal y como se describe en [51], es interesante analizar diferentes zonas de análisis DIC (región de interés) para comprobar cuál de ellas ofrece unos resultados más fiables. Para este caso, se ha decidido realizar un análisis de tres zonas diferentes en la probeta de tracción (figura 6-1) y, posteriormente comparar los resultados obtenidos con los de las simulaciones numéricas realizadas en ABAQUS para así ver qué región de interés ofrece menores diferencias.

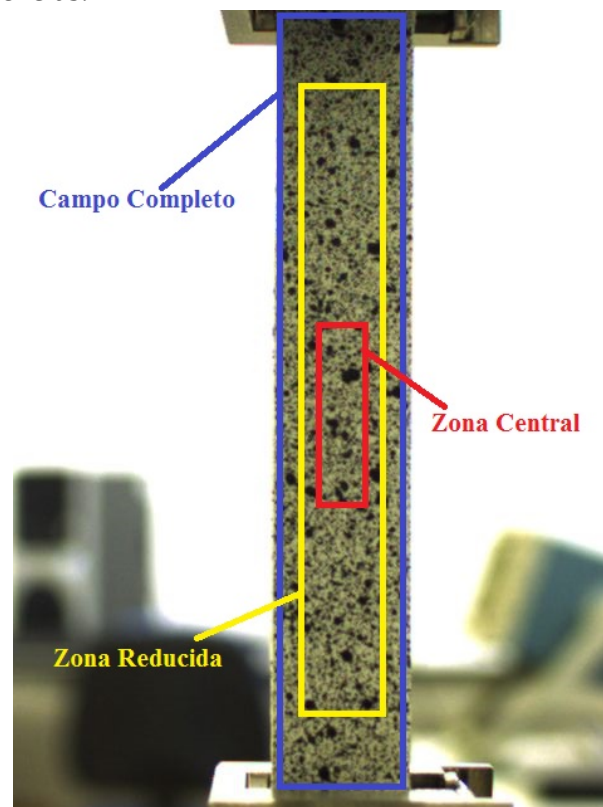


Figura 6-1 Diferentes regiones de interés en la probeta de tracción.

Los análisis se llevaron a cabo en las probetas de PLA con orientación de fibra 0° y los resultados se muestran en las Tablas 6-1, 6-2 y 6-3.

Probeta Tracción PLA 0° Campo Completo	CARGA (N)	Eyy (με)		Diferencias (%)	Exx (με)		Diferencias (%)
		DIC	FEM		DIC	FEM	
	0	0	0	0	0	0	0
	1080,264	0,0041	0,00419536	2,32585366	-0,0014	-0,00146122	4,37285714
	2160,464	0,0087	0,00839049	3,55758621	-0,003	-0,00292236	2,588
	3360,688	0,0146	0,0130518	10,6041096	-0,005	-0,00454586	9,0828
	4440,912	0,0192	0,017247	10,171875	-0,0076	-0,00600703	20,9601316

Tabla 6-1 Diferencias de resultados DIC-FEM Campo Completo.

Probeta Tracción PLA 0° Zona Reducida	CARGA (N)	Eyy (με)		Diferencias (%)	Exx (με)		Diferencias (%)
		DIC	FEM		DIC	FEM	
	0	0	0	0	0	0	0
	1080,264	0,0038	0,00419536	10,4042105	-0,0014	-0,00146122	4,37285714
	2160,464	0,008	0,00839049	4,881125	-0,0031	-0,00292236	5,73032258
	3360,688	0,0132	0,0130518	1,12272727	-0,0051	-0,00454586	10,8654902
	4440,912	0,0188	0,017247	8,2606383	-0,0077	-0,00600703	21,9866234

Tabla 6-2 Diferencias de resultados DIC-FEM Zona Reducida.

Probeta Tracción PLA 0° Zona Centro	CARGA (N)	Eyy (με)		Diferencias (%)	Exx (με)		Diferencias (%)
		DIC	FEM		DIC	FEM	
	0	0	0	0	0	0	0
	1080,264	0,0037	0,00419536	13,3881081	-0,0014	-0,00146122	4,37285714
	2160,464	0,0079	0,00839049	6,20873418	-0,0031	-0,00292236	5,73032258
	3360,688	0,0132	0,0130518	1,12272727	-0,0051	-0,00454586	10,8654902
	4440,912	0,0187	0,017247	7,77005348	-0,0078	-0,00600703	22,9867949

Tabla 6-3 Diferencias de resultados DIC-FEM Zona Centro.

Para ver los resultados con más claridad, se ha representado gráficamente las diferencias de los resultados (errores) frente a la carga. De esta forma, observando las figuras 6-2 y 6-3, se aprecia claramente como la región de interés de campo completo ofrece unos resultados más coherentes y precisos, ya que muestra errores muy pequeños con cargas bajas y conforme la carga va aumentando lo va haciendo también el error.

La simulación con ABAQUS que se ha realizado para comparar los resultados, solo reproduce el comportamiento elástico del material. Esto explica por qué el error debe

aumentar con la carga ya que, a esfuerzos mayores, el material va tomando un comportamiento más plástico y el modelo numérico sigue interpretándolo como elástico.

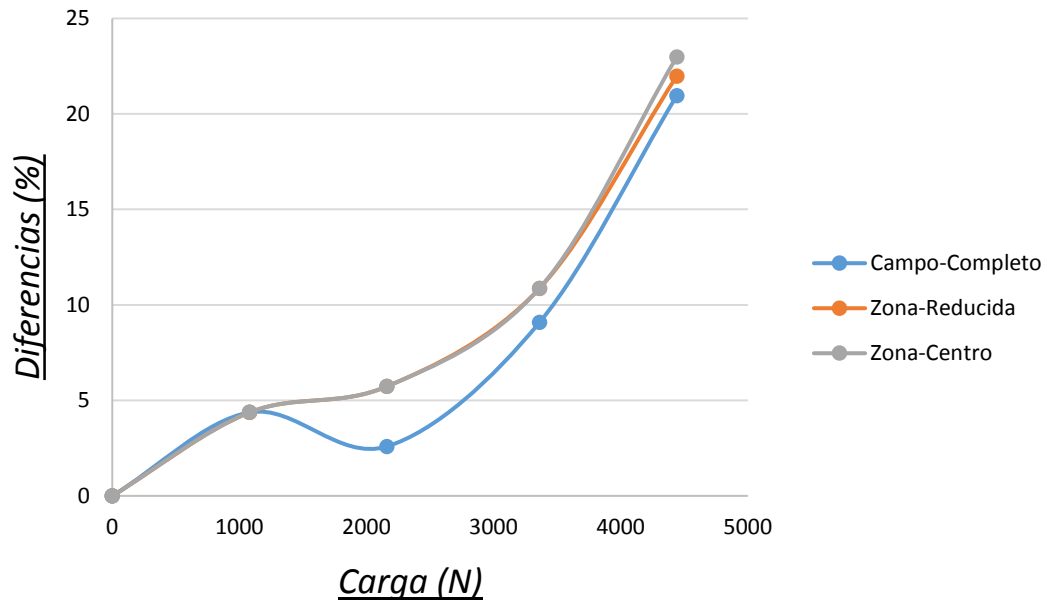


Figura 6-2 Diferencias DIC-FEM para las deformaciones E_{xx} .

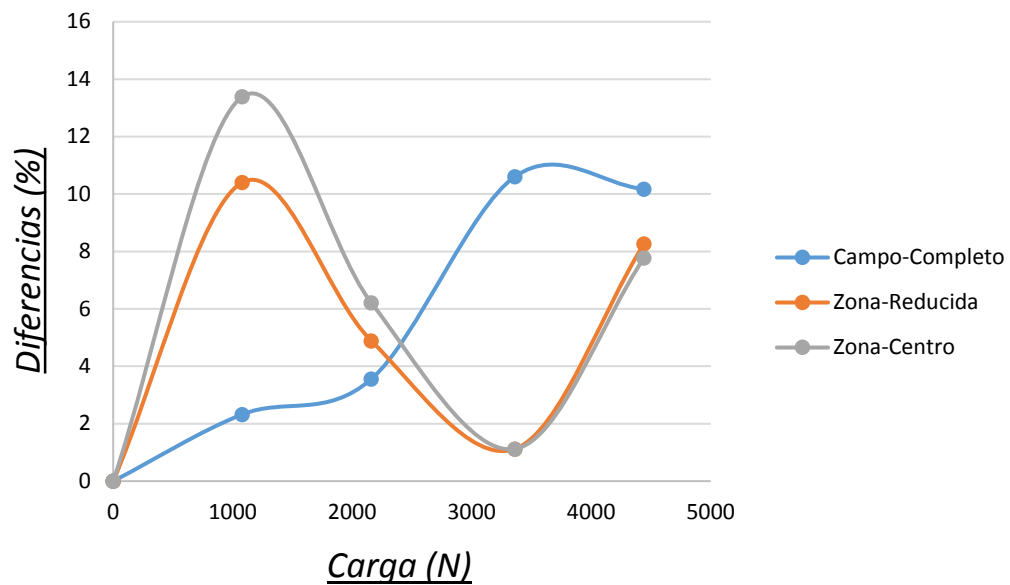


Figura 6-3 Diferencias DIC-FEM para las deformaciones E_{yy} .

Una vez se ha decidido cuál es la región de interés óptima, se va a proceder a mostrar los resultados obtenidos. En concreto, para cada uno de los materiales y orientaciones estudiadas se presentará un primer diagrama de carga-extensión del puente, que, aunque la normativa utilizada indica que no se debe tomar en cuenta, se ha considerado interesante incluirlo ya que muestra el comportamiento de las probetas durante los ensayos, y un

segundo y tercer diagrama de tensión-deformación longitudinal y tensión-deformación transversal respectivamente, donde se mostrarán los datos referentes al método de correlación digital de imágenes, junto con los resultados de las simulaciones llevadas a cabo sobre los modelos numéricos creados en ABAQUS.

6.1.1. PLA con orientación de fibra longitudinal (0°)

A continuación, se muestran los diagramas y resultados especificados para las probetas impresas en PLA con una orientación de fibra de 0° . (Angulo de relleno 0°).

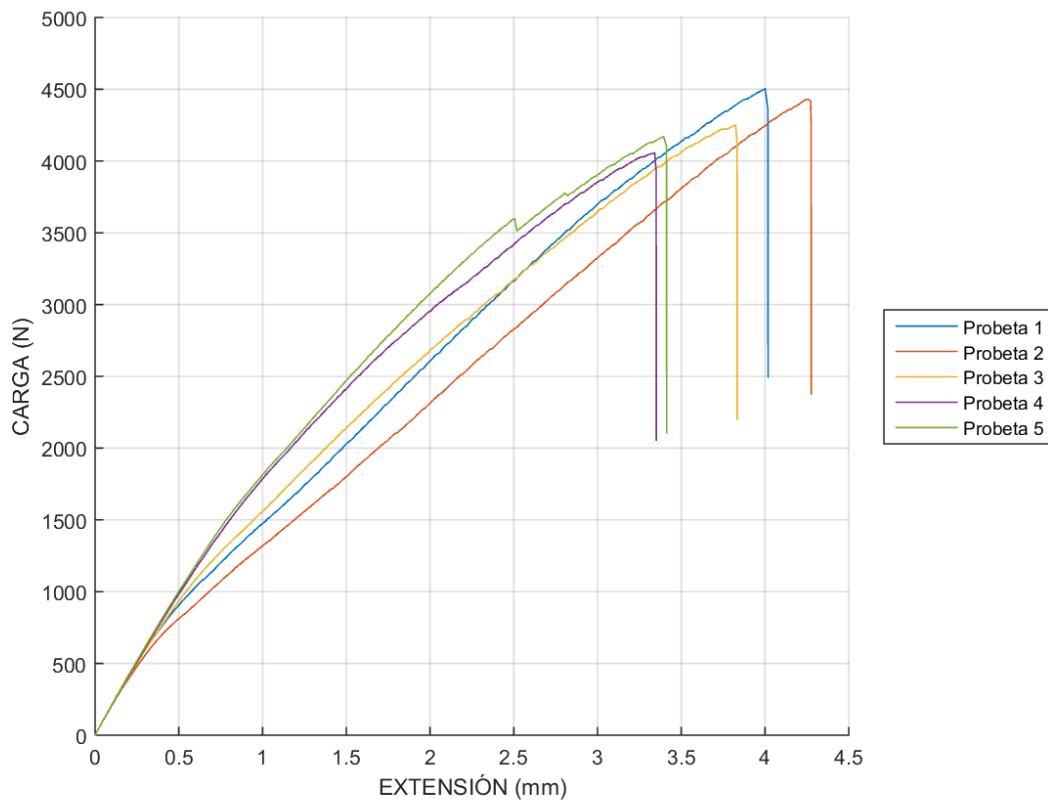


Figura 6-4 Diagrama carga-extensión.

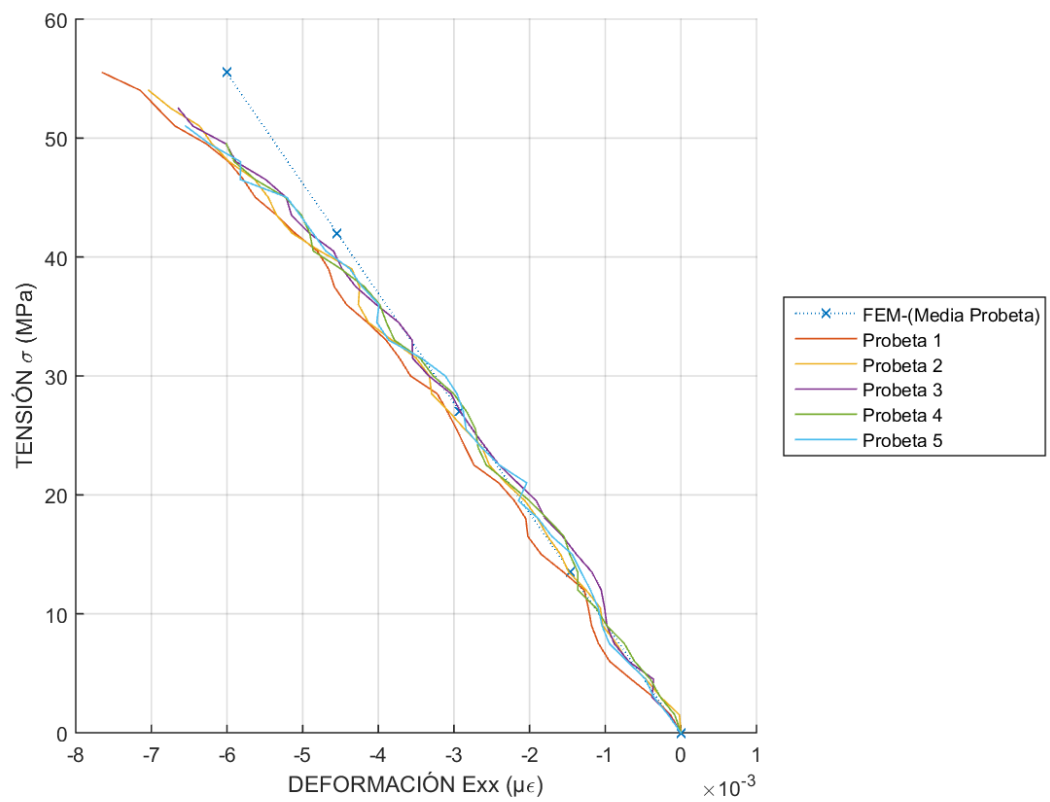


Figura 6-5 Diagrama tensión-deformación Exx .

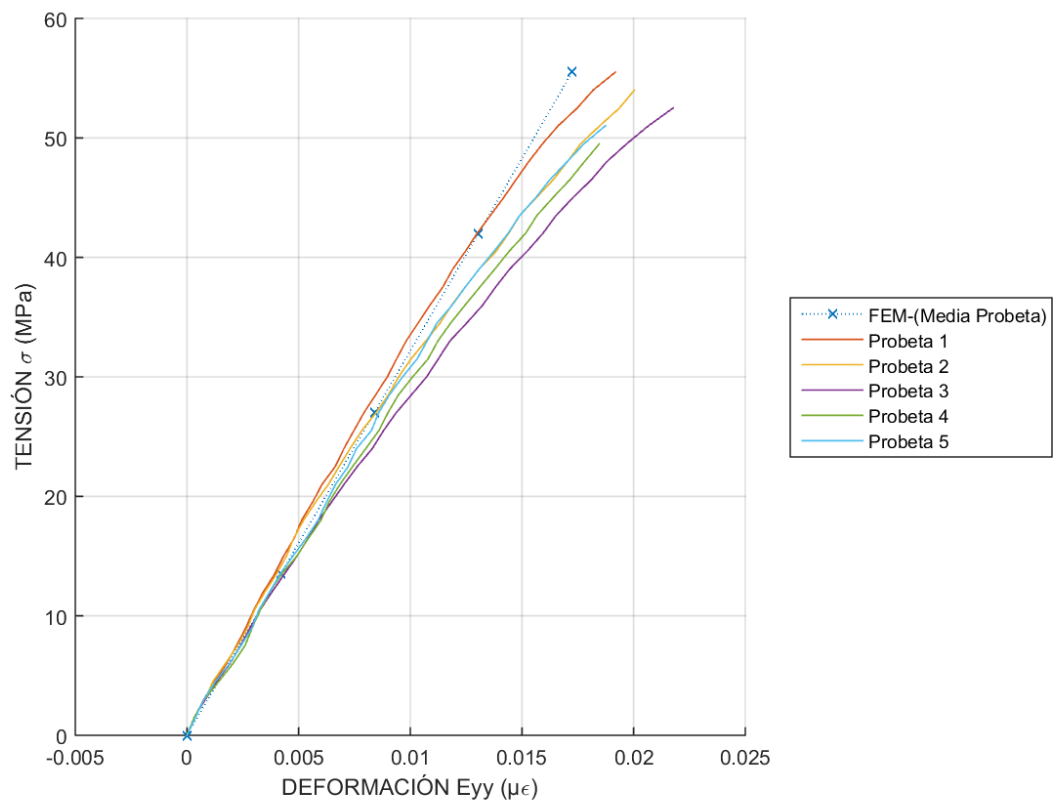


Figura 6-6 Diagrama tensión-deformación Eyy .

Observando los diagramas presentados, vemos que se trata de un material frágil ya que se fractura con poca deformación y, 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. 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 este motivo, la posición de la rotura no ha afectado a la toma de datos.

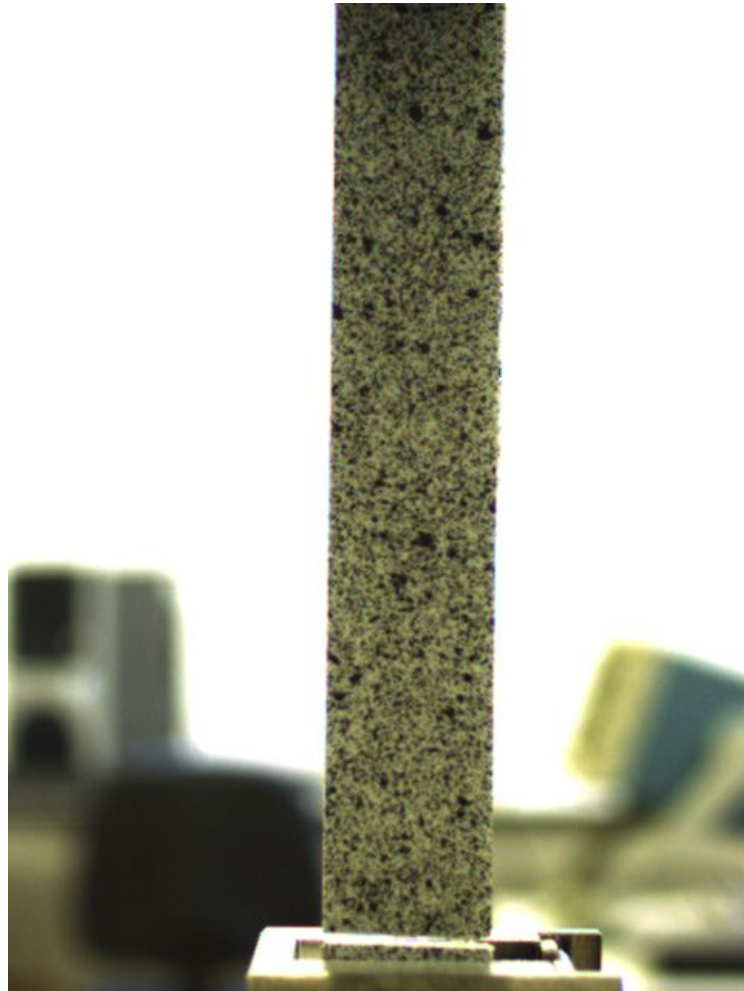


Figura 6-7 Rotura de probeta 2 de PLA con orientación 0°.

Además, se observa una buena correlación entre los resultados DIC y FEM al igual que se muestra de forma clara, más en la deformación E_{xx} , ese aumento de las diferencias en la zona de tensión máxima.

Acto seguido, se muestran los resultados obtenidos durante el ensayo de tracción para el PLA con orientación de fibra 0° en la Tablas 6-4.

RESULTADOS DIC PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL 0°					
Probeta	Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_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

Tabla 6-4 Resultados obtenidos durante el ensayo.

A la vista de los resultados, se realizó la media aritmética para obtener un valor promedio de cada una de las propiedades del material. Además, se ha incluido la desviación típica del módulo de Young y del coeficiente de Poisson para ver las diferencias entre los valores. Todo esto queda reflejado en la Tabla 6-5.

RESULTADOS MEDIOS DIC PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL 0°						
Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	D. Típica Módulo de Young	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	D. Típica C. de Poisson	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_f) (MPa)
3218,6	188,55	0,3483	0,0426	1193,6	52,51	52,51

Tabla 6-5 Propiedades del PLA con orientación de fibra 0°.

Seguidamente, se comparan los resultados de las deformaciones experimentales DIC-2D obtenidos con los de las simulaciones numéricas (FEM) realizadas en ABAQUS. Esto se muestra en la Tabla 6-6.

Probeta Tracción PLA 0°	CARGA (N)	Eyy ($\mu\epsilon$)		Diferencias (%)	Exx ($\mu\epsilon$)		Diferencias (%)
		DIC	FEM		DIC	FEM	
	0	0	0	0	0	0	0
	1080,264	0,0041	0,00419536	2,32585366	-0,0014	-0,00146122	4,372857143
	2160,464	0,0087	0,00839049	3,55758621	-0,003	-0,00292236	2,588
	3360,688	0,0146	0,0130518	10,6041096	-0,005	-0,00454586	9,0828
	4440,912	0,0192	0,017247	10,171875	-0,0076	-0,00600703	20,96013158

Tabla 6-6 Comparación de resultados DIC-FEM.

De nuevo, para ver de forma clara las diferencias de los resultados, se ha realizado una gráfica de las diferencias (%) frente a la carga. En ella, 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 buena precisión el comportamiento del material. Como se comentó 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 muy clara en las deformaciones E_{xx} , donde se registran diferencias alrededor del 20% - 25%.

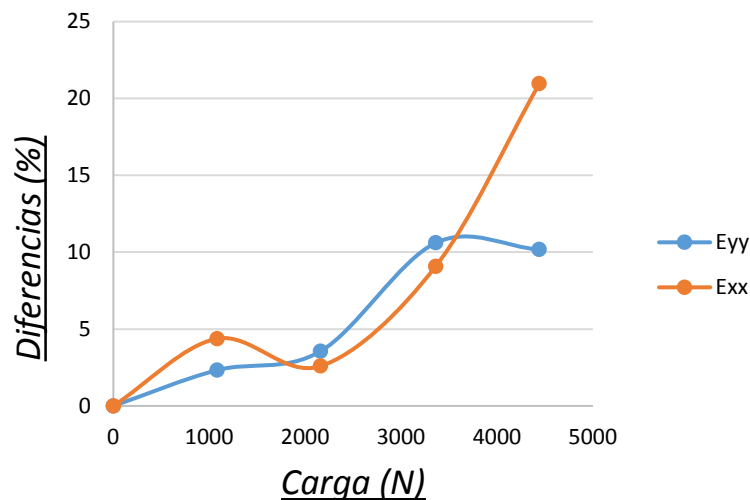


Figura 6-8 Diferencias deformaciones DIC-FEM.

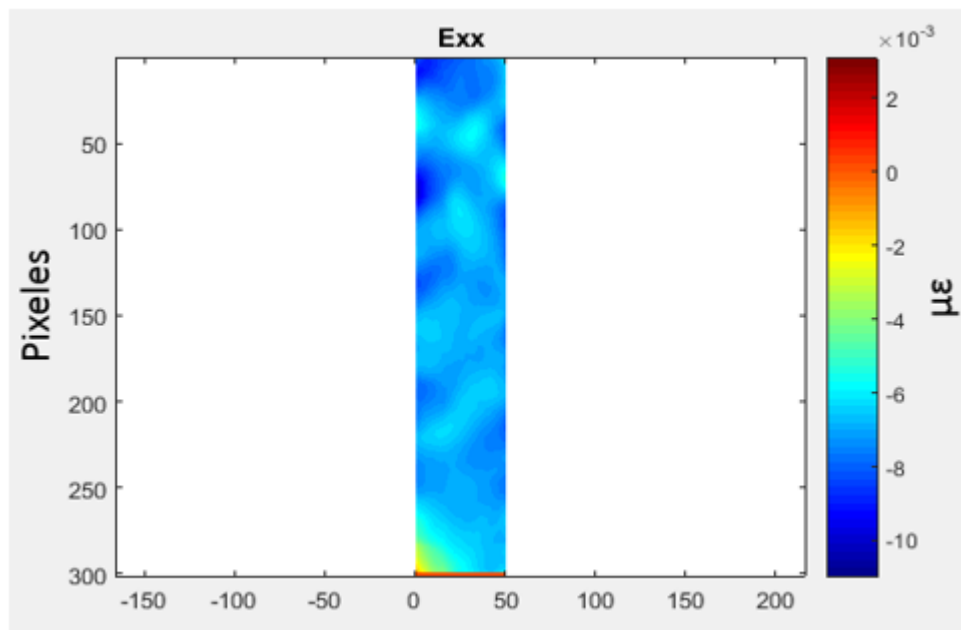


Figura 6-9 Resultados DIC probeta 1 PLA 0° cargada con 4200 N.

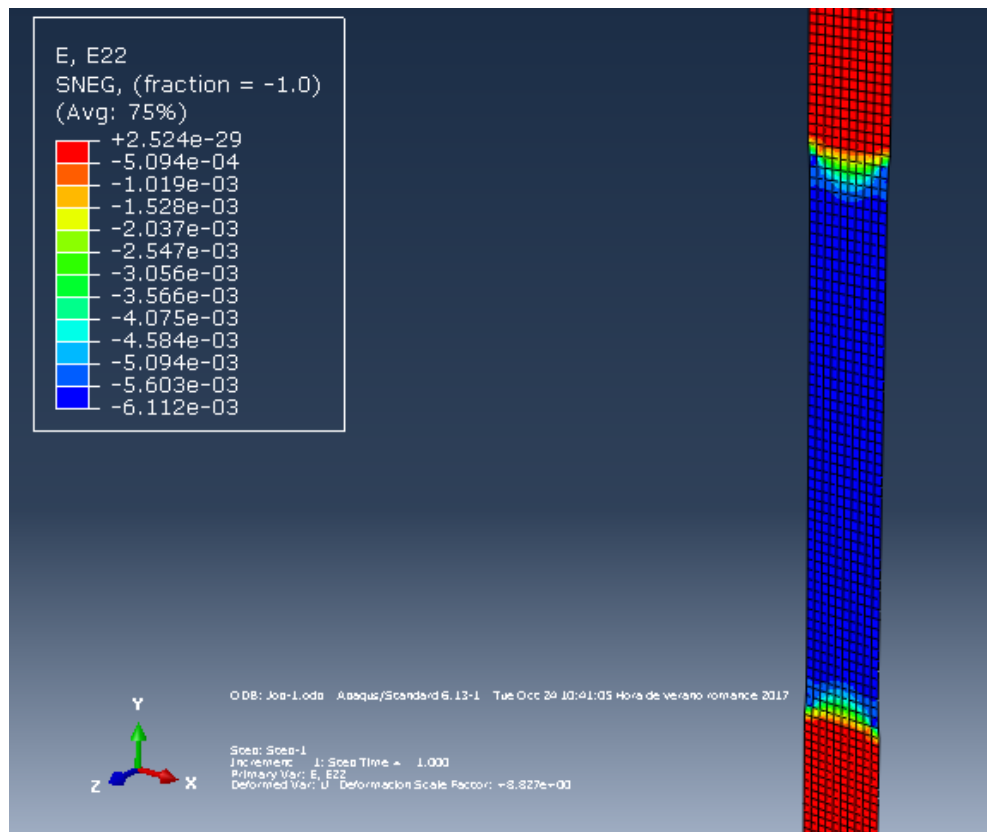


Figura 6-10 Resultados FEM probeta 1 PLA 0° cargada con 4200 N.

Observando las figuras 6-9 y 6-10, se aprecia con mejor detalle como en la zona de rotura de la probeta las diferencias entre las deformaciones E_{xx} son importantes por lo comentado anteriormente.

Además, la figura 6-9 muestra un claro ejemplo de la homogenización de la probeta, lo que lleva a observar dónde la concentración de fibra es mayor, y por lo tanto la unión entre capas. Las zonas azules turquesa denotan una mayor concentración de fibra, ya que la deformación es menor, mientras que las zonas marcadas en color más azul más oscuro apuntan una concentración menor debido a que estas deformaciones son mayores. Aun 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.

6.1.2. PLA con orientación de fibra transversal (90°)

De la misma forma, se muestran los diagramas y resultados especificados para las probetas impresas en PLA, pero con una orientación de fibra de 90°. (Angulo de relleno 90°).

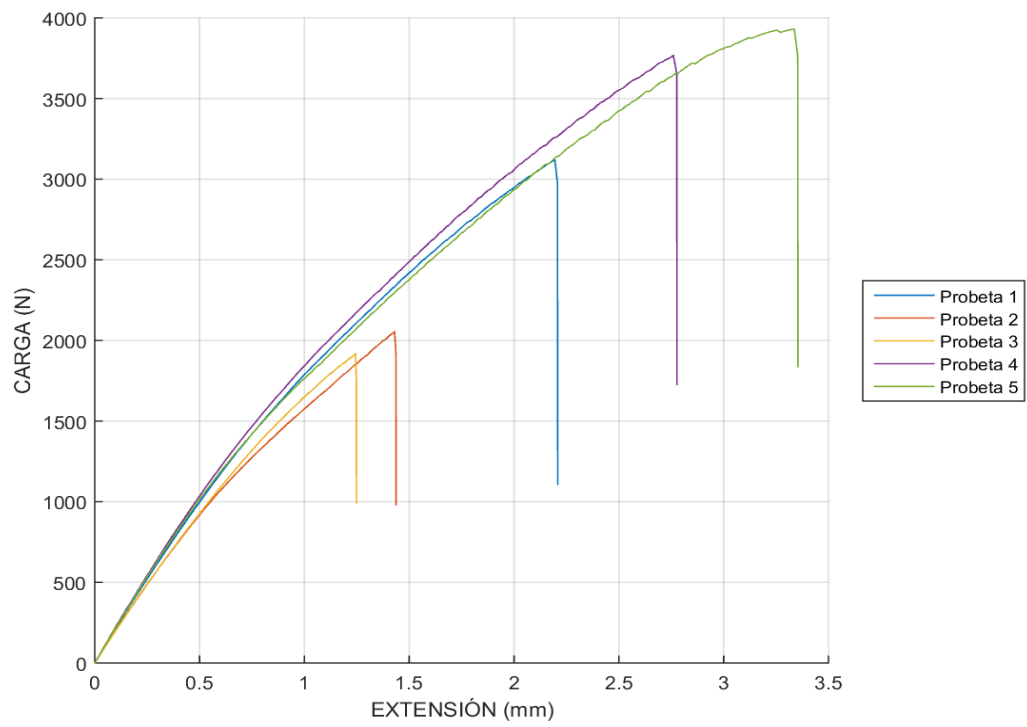


Figura 6-11 Diagrama carga-extensión.

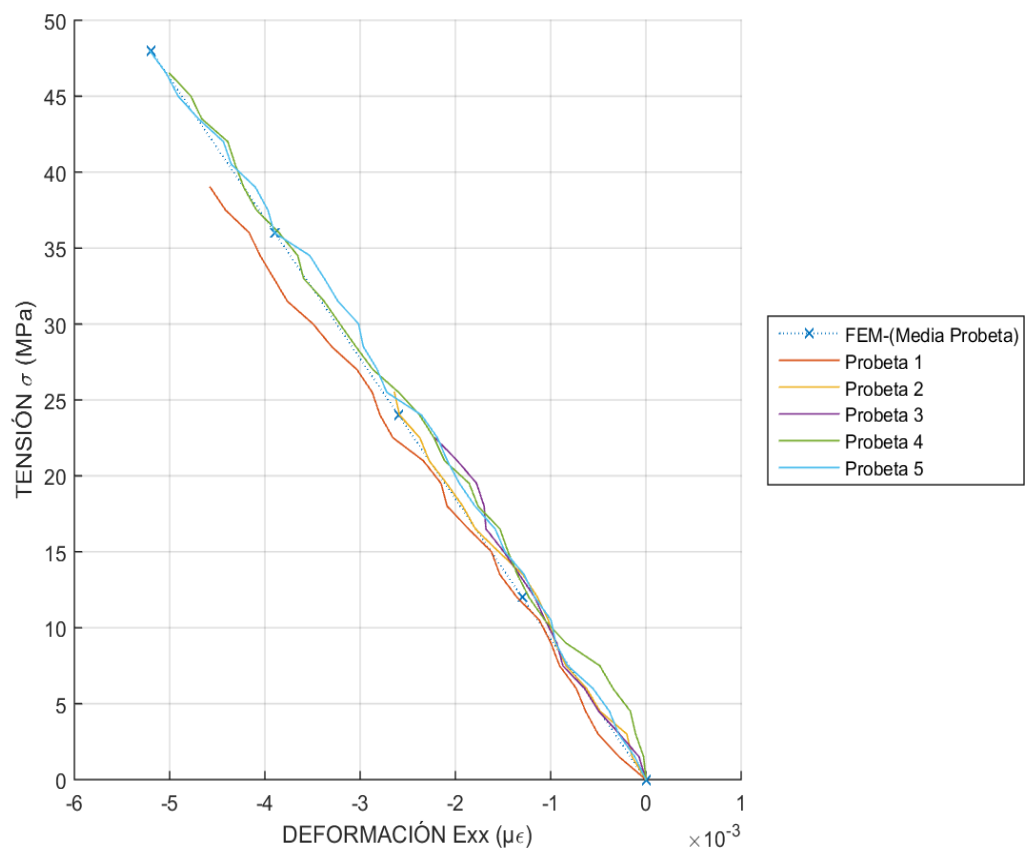


Figura 6-12 Diagrama tensión-deformación E_{xx} .

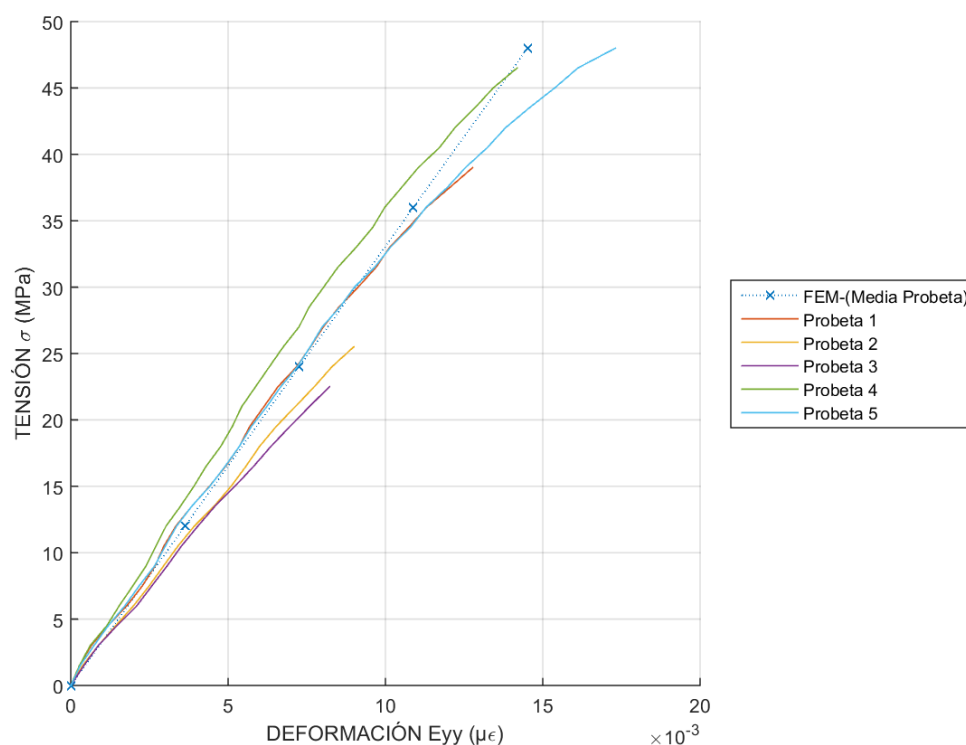


Figura 6-13 Diagrama tensión-deformación Eyy.

Observando el diagrama carga-extensión y los diagramas tensión- deformación (figuras 6-11, 6-12 y 6-13), se puede apreciar, al igual que en los diagramas anteriores, que el material sigue presentando un comportamiento frágil y que existe buena correlación entre los datos DIC-FEM. Esta orientación de impresión (90°) podrían permitir no solo medir la resistencia a la tracción si no la calidad de la adhesión entre fibras, lo que lleva a un tratamiento de los datos diferentes, cosa que se escapa de los objetivos de este trabajo.

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 [53], 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.

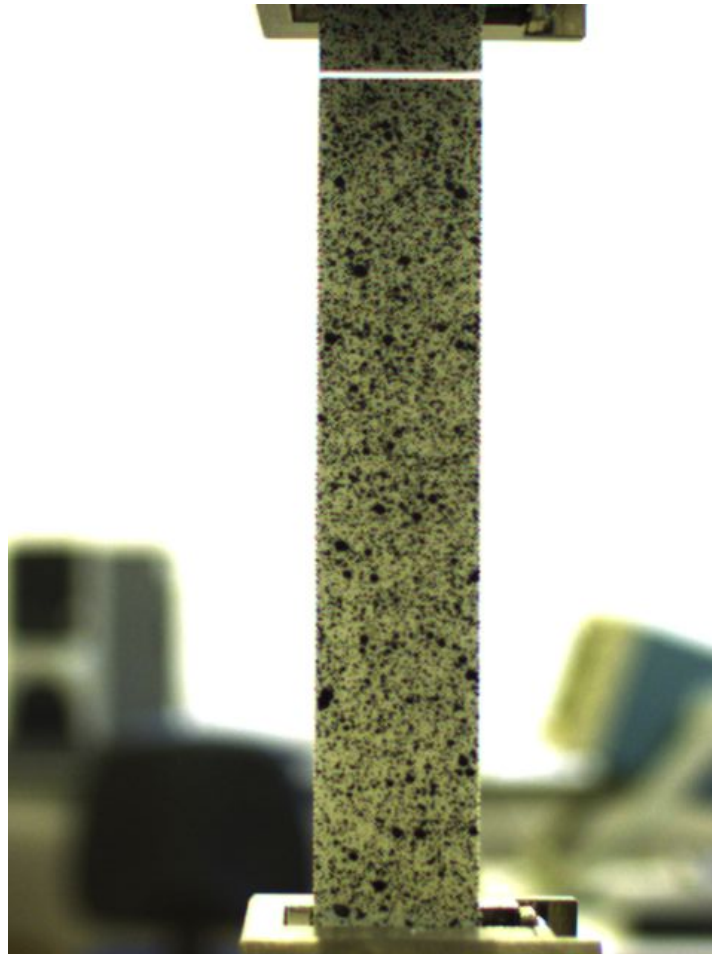


Figura 6-14 Rotura probeta 3 PLA con orientación de fibra 90°.



Figura 6-15 Sección transversal probeta PLA con orientación de fibra 90°. [53]

Los resultados obtenidos durante el ensayo de tracción para el PLA con orientación de fibra 90° se muestran en las Tablas 6-7 y 6-8.

RESULTADOS DIC PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL 90°					
Probeta	Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_f) (MPa)
1	3432,1	0,3952	1229,9	39,0081	39,0081
2	2967,1	0,3092	1133,2	25,5065	25,5065
3	2867,3	0,2817	1118,6	22,5053	22,5053
4	3848,3	0,3606	1414,2	46,51	46,51
5	3419,1	0,3383	1277,4	48,0107	48,0107

Tabla 6-7 Resultados obtenidos durante el ensayo.

RESULTADOS MEDIOS DIC PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL 90°						
Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	D. Típica Módulo de Young	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	D. Típica C. de Poisson	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_f) (MPa)
3306,8	396,8936	0,3370	0,0441	1234,66	36,309	36,309

Tabla 6-8 Propiedades del PLA con orientación de fibra 90°.

De nuevo, se comparan los resultados de las deformaciones experimentales DIC-2D obtenidos con los de las simulaciones numéricas (FEM) realizadas en ABAQUS. Esto se muestra en la Tabla 6-9.

Probeta Tracción PLA 90°	CARGA (N)	Eyy ($\mu\epsilon$)		Diferencias (%)	Exx ($\mu\epsilon$)		Diferencias (%)
		DIC	FEM		DIC	FEM	
	0	0	0	0	0	0	0
	960,2663	0,0035	0,00362987	3,71057143	-0,0012	-0,00129889	8,24083333
	1920,5	0,0072	0,00725962	0,82805556	-0,0025	-0,00259776	3,9104
	2880,7	0,0109	0,0108891	0,1	-0,004	-0,00389648	2,588
	3840,856	0,0173	0,0145187	16,0768786	-0,0052	-0,00489535	5,85865385

Tabla 6-9 Comparación de resultados DIC-FEM.

Al hacer el gráfico de las diferencias (%) frente a la carga para clarificar los resultados, de nuevo se puede observar ese aumento de las diferencias en las zonas de máxima carga, pero en este caso se observa como las diferencias mayores se obtienen para las deformaciones Eyy al contrario que ocurría en la figura 6.8, donde estas diferencias mayores se encontraban para la deformación Exx. Esto puede deberse a la propia orientación de fibra.

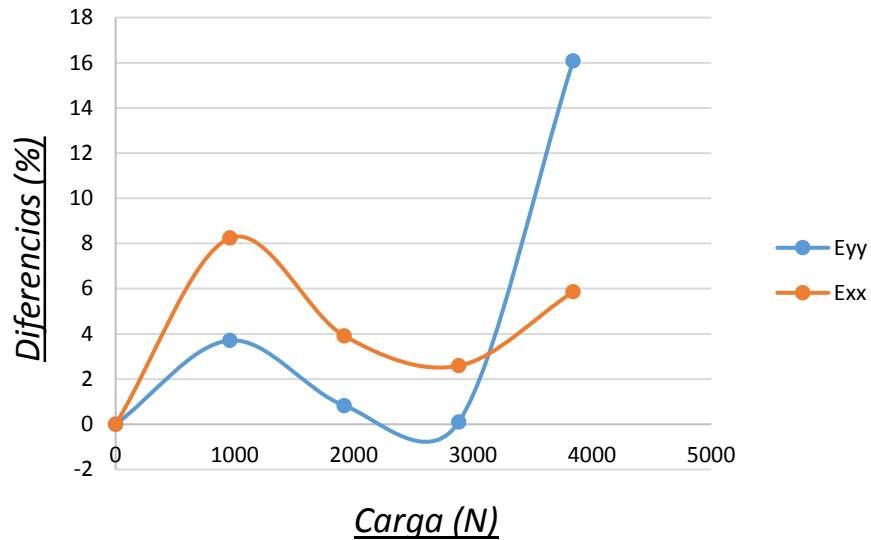


Figura 6-16 Diferencias deformaciones DIC-FEM.

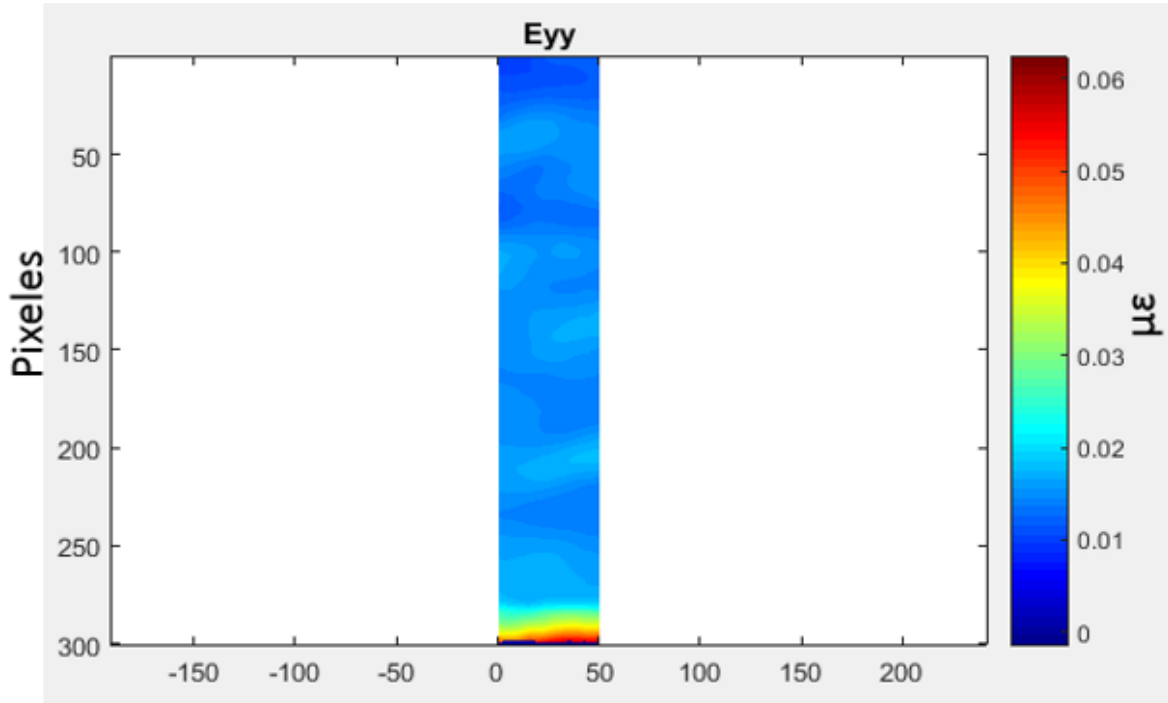


Figura 6-17 Resultados DIC probeta 5 PLA 90° cargada con 3720 N.

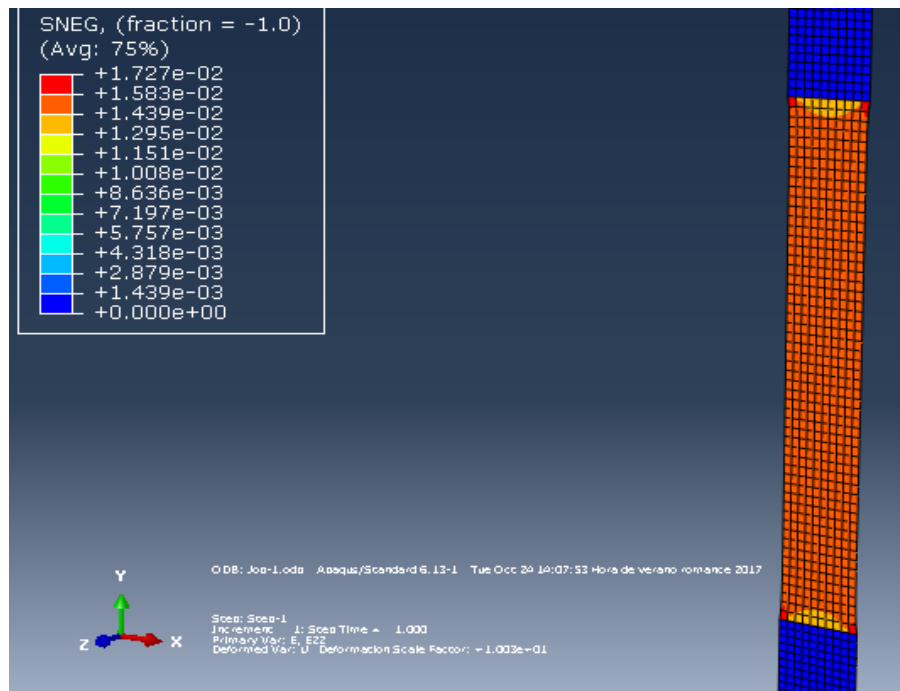


Figura 6-18 Resultados FEM deformaciones Eyy probeta 5 PLA 90° cargada con 3720 N.

6.1.3. ABS con orientación de fibra longitudinal (0°)

Los diagramas y resultados obtenidos para las probetas impresas en ABS con una orientación de fibra de 0° (Angulo de relleno 0°) se muestran a continuación en las figuras 6-19, 6-20 y 6-21.

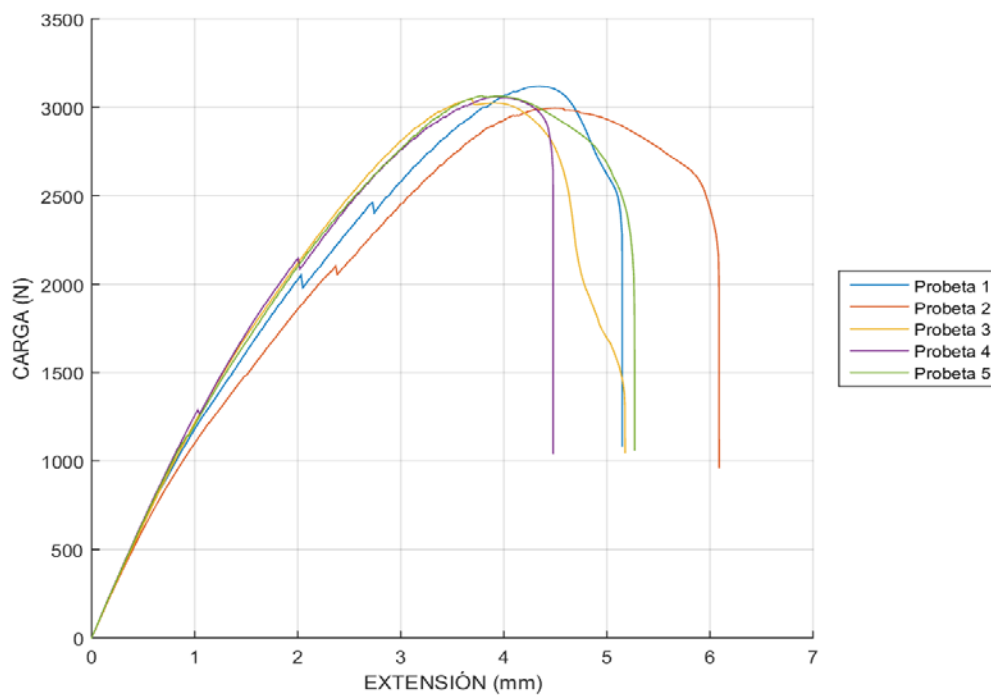


Figura 6-19 Diagrama carga-extensión.

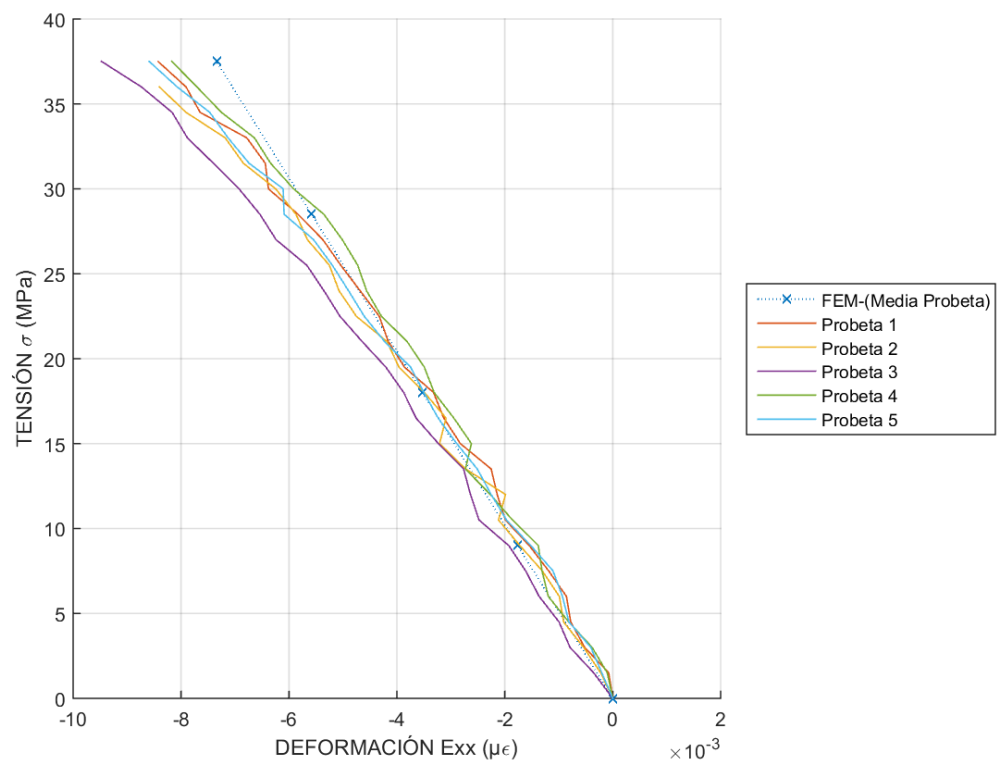


Figura 6-20 Diagrama tensión-deformación E_{xx} .

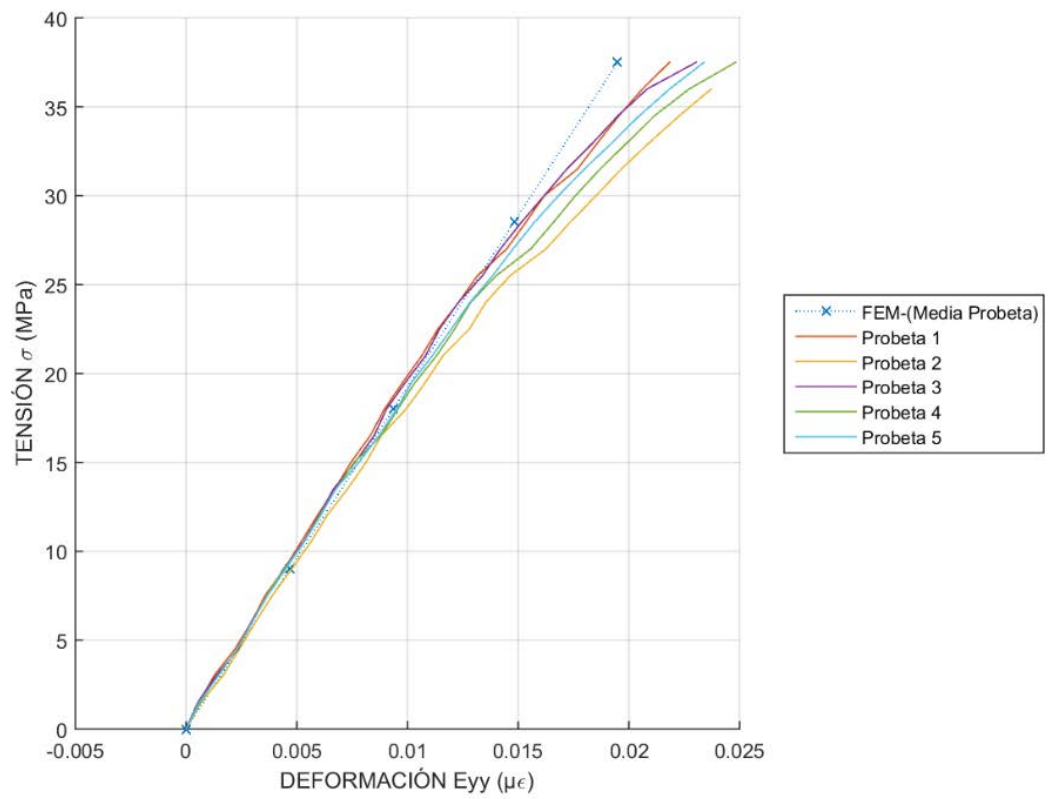


Figura 6-21 Diagrama tensión-deformación E_{yy} .

Observando los diagramas carga-extensión y tensión- deformación anteriores, se puede apreciar que el material también presenta un comportamiento frágil, pero experimenta una pequeña zona plástica donde se alcanza la tensión última de las probetas. Si se observa la figura siguiente (figura 6-22), vemos que esa pequeña zona plástica queda justificada por la forma en la que se produce la rotura. 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 6-22 Rotura probeta 3 ABS con orientación de fibra 0°.

Los resultados obtenidos durante el ensayo de tracción para el ABS con orientación de fibra 0° se muestran en las Tablas 6-10 y 6-11.

RESULTADOS DIC ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL 0º					
Probeta	Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_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

Tabla 6-10 Resultados obtenidos durante el ensayo.

RESULTADOS MEDIOS DIC ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL 0º						
Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	D. Típica Módulo de Young	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	D. Típica C. de Poisson	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_f) (MPa)
1924,6	69,0667	0,3768	0,034	699,07004	37,40404	31,75

Tabla 6-11 Propiedades del ABS con orientación de fibra 0º.

La comparación de los resultados obtenidos de las deformaciones con DIC y FEM se muestran en la tabla siguiente (tabla 6-12).

Probeta Tracción ABS 0º	CARGA (N)	Eyy ($\mu\epsilon$)		Diferencias (%)	Exx ($\mu\epsilon$)		Diferencias (%)
		DIC	FEM		DIC	FEM	
	0	0	0	0	0	0	0
	720,152	0,0045	0,00467724	3,93866667	-0,0016	-0,00176234	10,14625
	1440,3	0,0094	0,00935446	0,48446809	-0,0035	-0,00352466	0,70457143
	2280,4	0,016	0,0148106	7,43375	-0,0059	-0,00558045	5,41610169
	3000,304	0,0233	0,0194862	16,3682403	-0,0087	-0,00734214	15,6075862

Tabla 6-12 Comparación de resultados DIC-FEM.

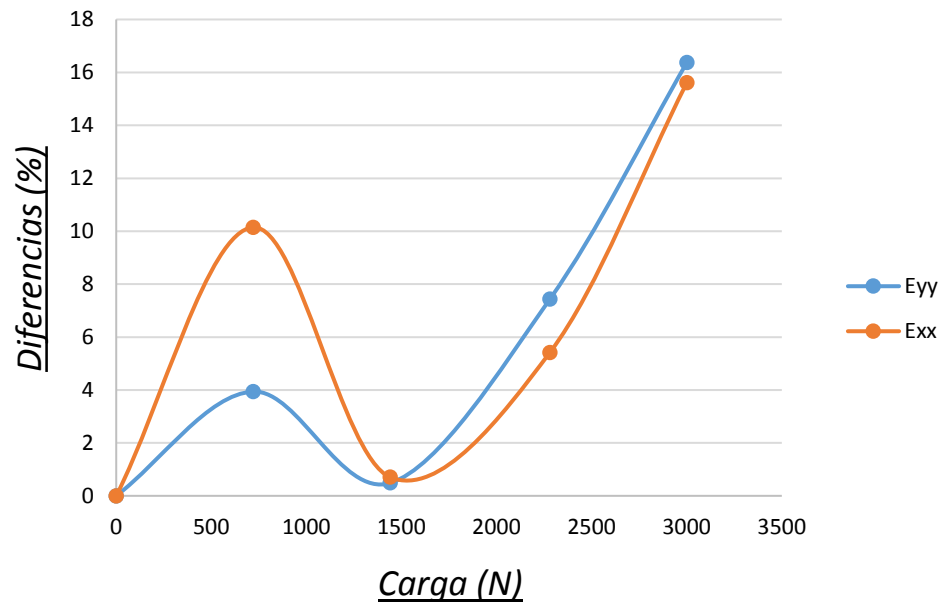


Figura 6-23 Diferencias deformaciones DIC-FEM.

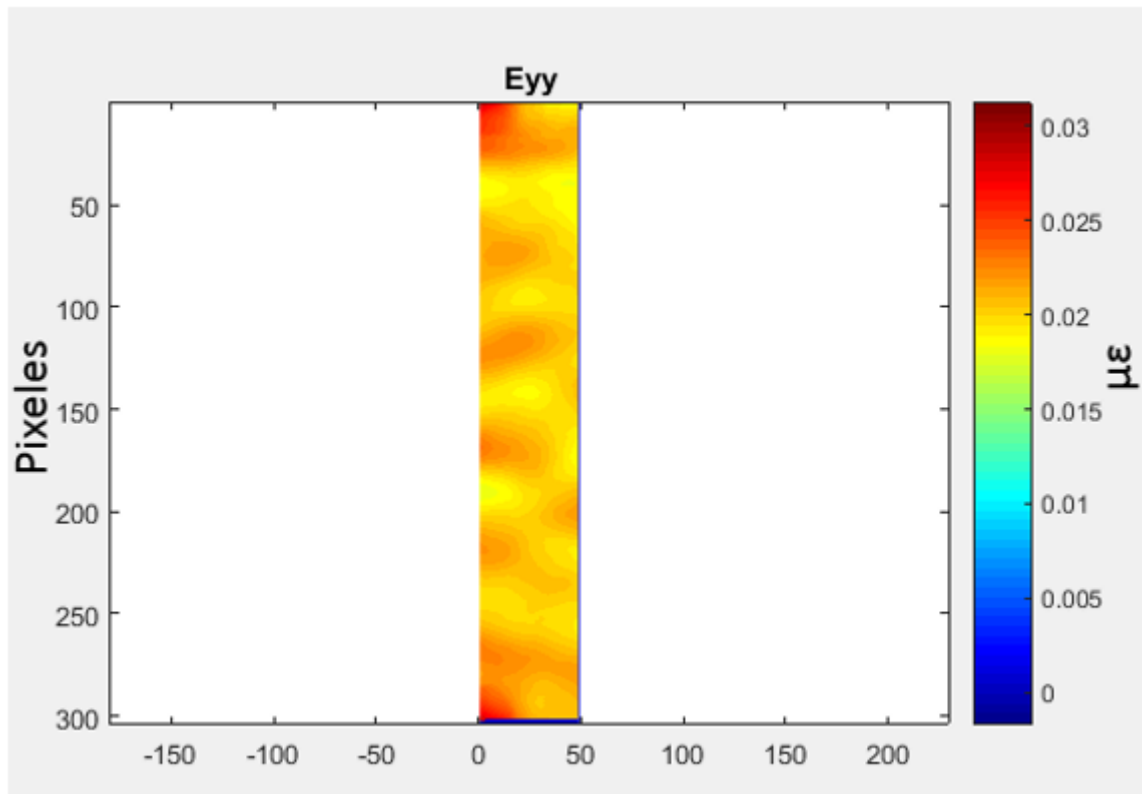


Figura 6-24 Resultados DIC probeta 1 ABS 0° cargada con 2880 N.

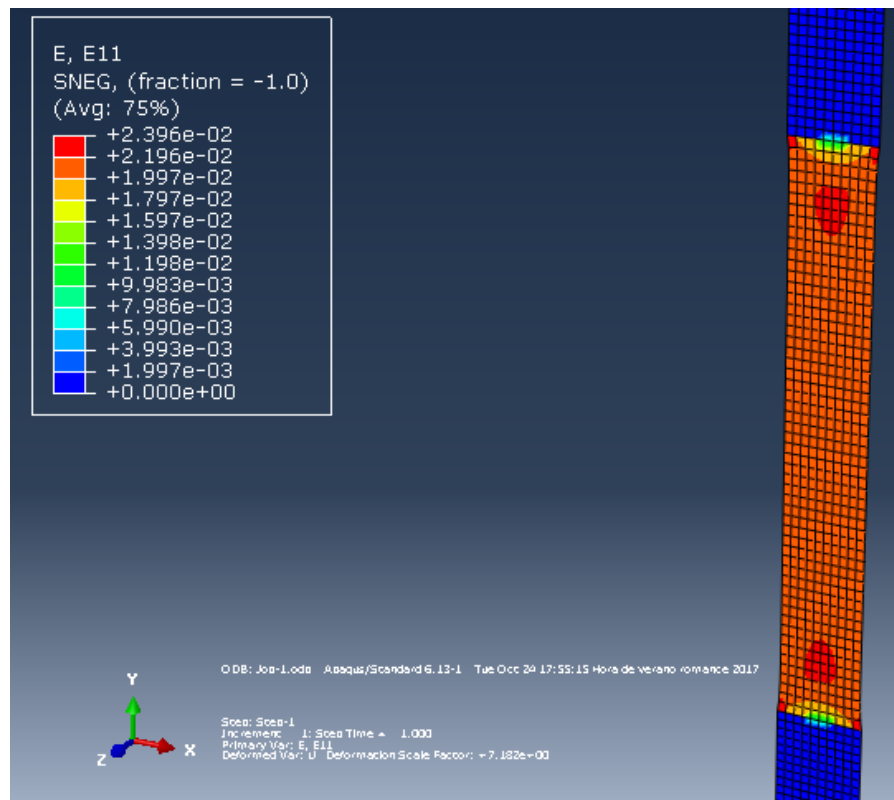


Figura 6-25 Resultados FEM deformaciones Eyy probeta 1 ABS 0° cargada con 2280 N.

Observando las figuras 6-24 y 6-25, vemos de nuevo la buena semejanza de los datos obtenidos. En el modelo numérico se puede observar cómo se produce una pequeña concentración de deformaciones en unas zonas un poco más alejadas de las mordazas. Esto explica las diferentes zonas de rotura. Además, la figura 6-24 muestra como las deformaciones quedan más repartidas que en los casos anteriores a lo largo de toda la probeta.

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

Los diagramas y resultados obtenidos para las probetas impresas en ABS con una orientación de fibra de 90° (Angulo de relleno 90°) se muestran a continuación en las figuras 6-26, 6-27 y 6-28.

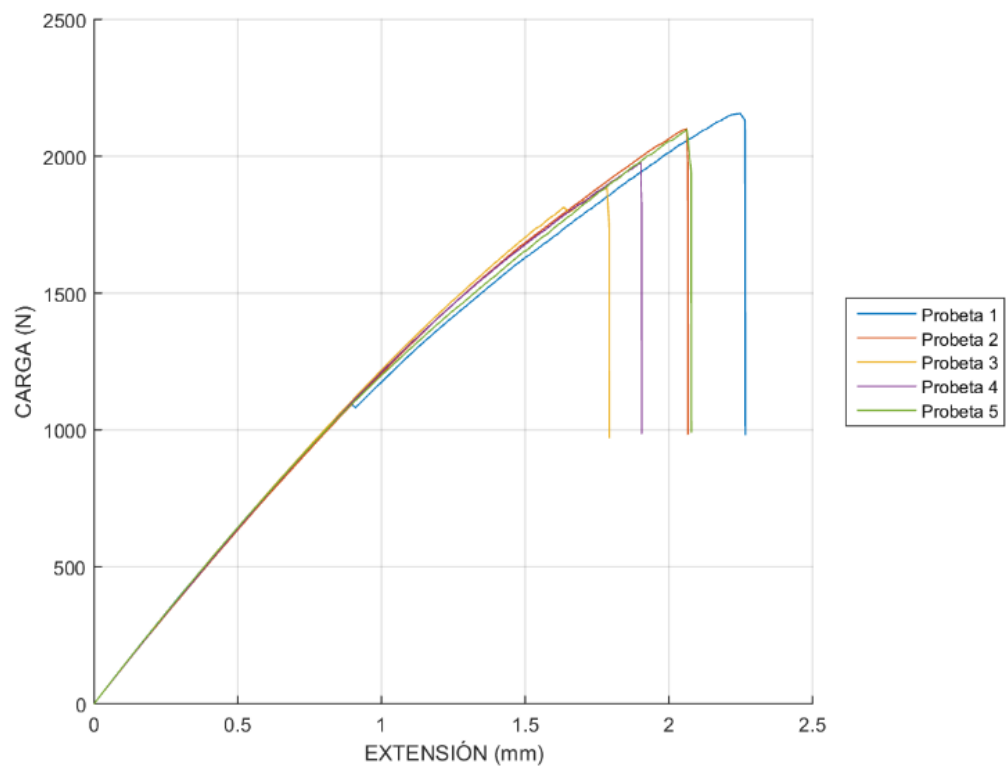


Figura 6-26 Diagrama carga-extensión.

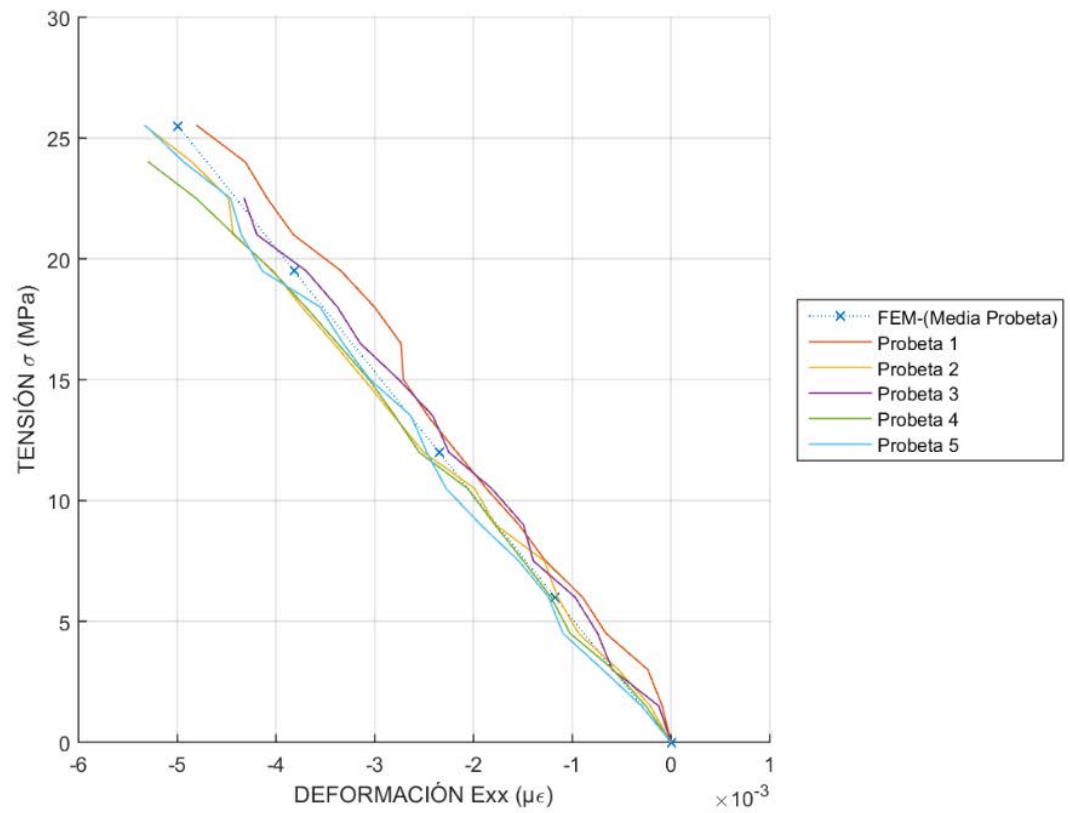


Figura 6-27 Diagrama tensión-deformación E_{xx} .

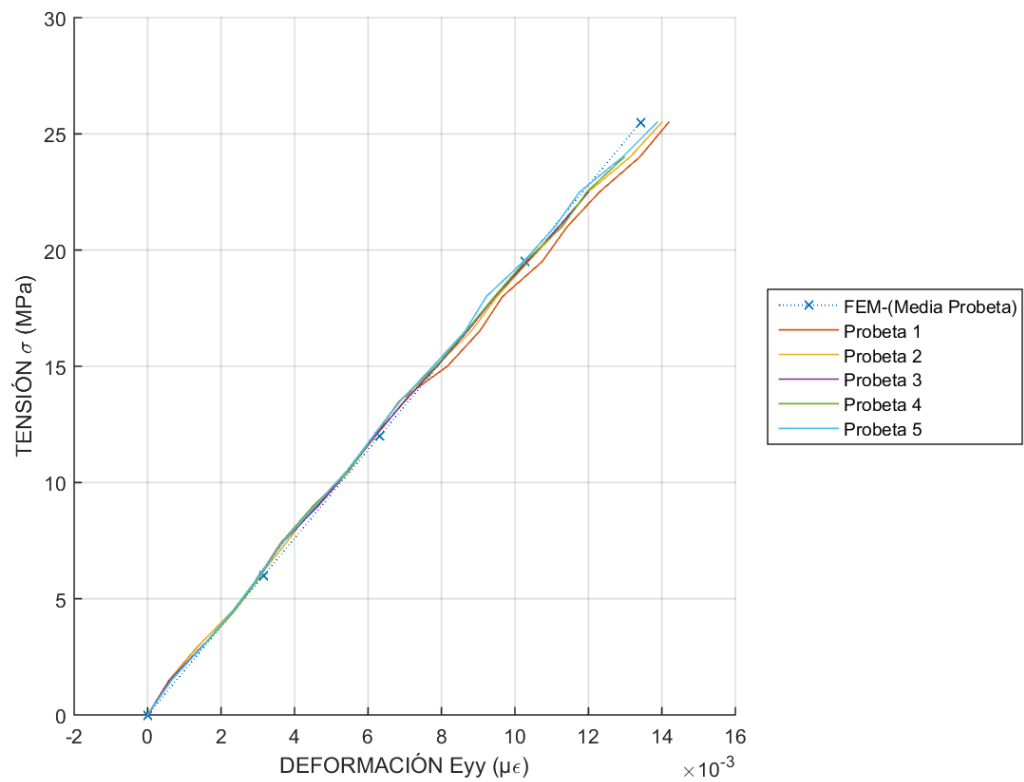


Figura 6-28 Diagrama tensión-deformación Eyy.

Como se puede observar en estos diagramas, el material vuelve a presentar un comportamiento frágil incluyendo, esta vez, la zona de tensión última. Esto ocurre ya que las fibras, al ser perpendiculares a la carga aplicada, la resistencia se basa en la adhesión entre estas.

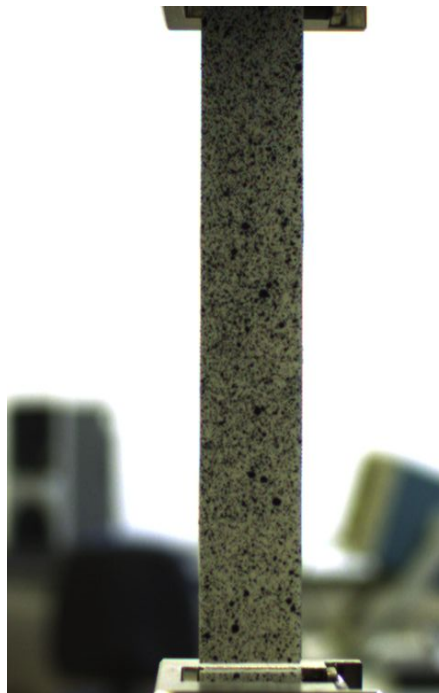


Figura 6-29 Rotura probeta 3 ABS con orientación de fibra 90°.

Los resultados obtenidos durante el ensayo se presentan en las tablas 6-13 y 6-14.

RESULTADOS DIC ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL 90°					
Probeta	Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_f) (MPa)
1	1865,2	0,3251	703,8179	27,5045	27,5045
2	1892,3	0,3840	683,6452	25,5036	25,5036
3	1912,9	0,3538	706,5177	22,5034	22,5034
4	1911,2	0,3977	683,6990	24,0036	24,0036
5	1916,3	0,3949	686,8805	25,4035	25,4035

Tabla 6-13 Resultados obtenidos durante el ensayo.

RESULTADOS MEDIOS DIC ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL 90°						
Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	D. Típica Módulo de Young	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	D. Típica C. de Poisson	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_f) (MPa)
1899,6	21,3634	0,3711	0,0311	692,91206	24,98372	24,98372

Tabla 6-14 Propiedades del ABS con orientación de fibra 90°.

La comparación de los resultados obtenidos de las deformaciones con DIC y FEM se muestran en la tabla 6-15.

Probeta Tracción ABS 90°	CARGA (N)	Eyy ($\mu\epsilon$)		Diferencias (%)	Exx ($\mu\epsilon$)		Diferencias (%)
		DIC	FEM		DIC	FEM	
	0	0	0	0	0	0	0
	480,0894	0,0031	0,00315912	1,90709677	-0,0011	-0,00117486	6,80545455
	960,1741	0,0062	0,00631818	1,90612903	-0,0024	-0,00234968	2,09666667
	1560,3	0,0104	0,0102671	1,27788462	-0,0038	-0,00381819	0,47868421
	2040,3	0,014	0,0134257	4,10214286	-0,0051	-0,00499291	2,09980392

Tabla 6-15 Comparación de resultados DIC-FEM.

De nuevo, en la gráfica de las diferencias (%) frente a la carga se puede apreciar como los resultados son muy fiables debido a que existen diferencias pequeñas entre ellos (errores entre 0,5 y 7%), lo que indica que el modelo numérico simula con muy buena precisión el caso real.

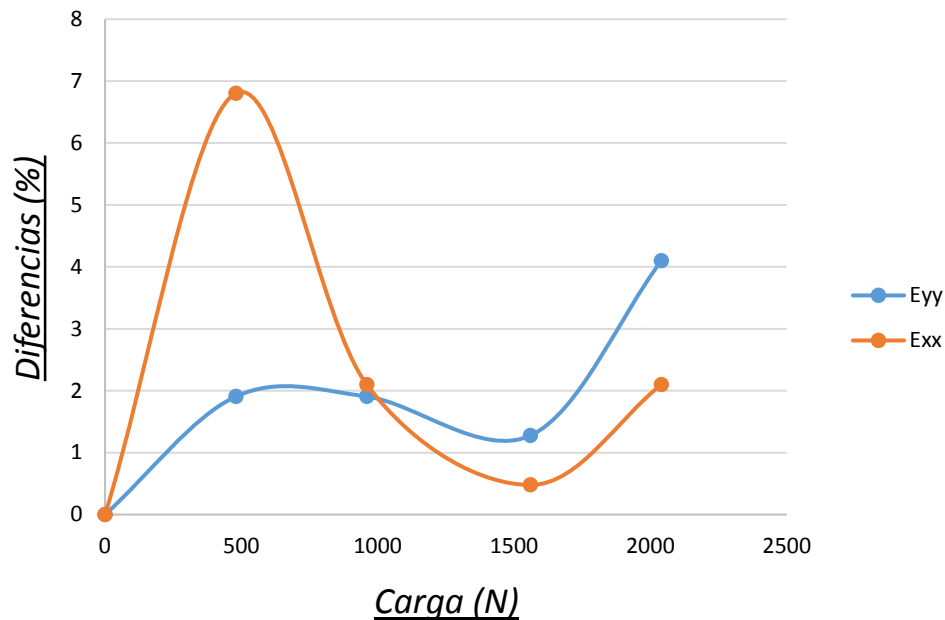


Figura 6-30 Diferencias deformaciones DIC-FEM.

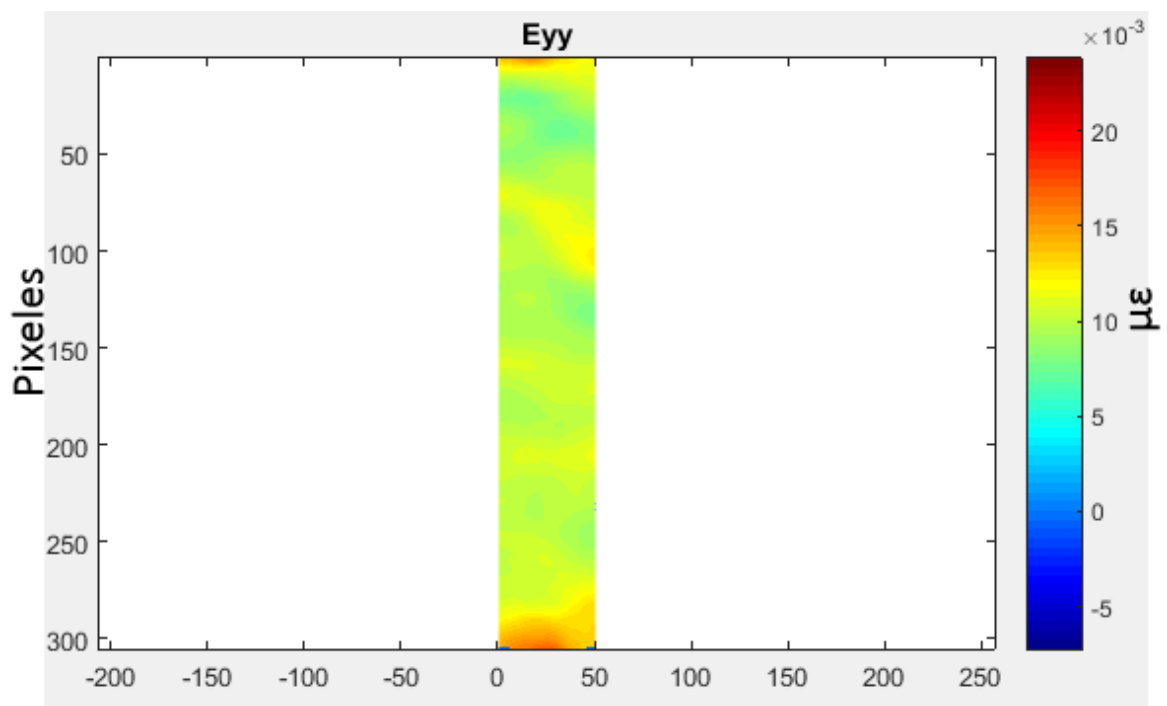


Figura 6-31 Resultados DIC probeta 4 ABS 90° cargada con 1680 N.

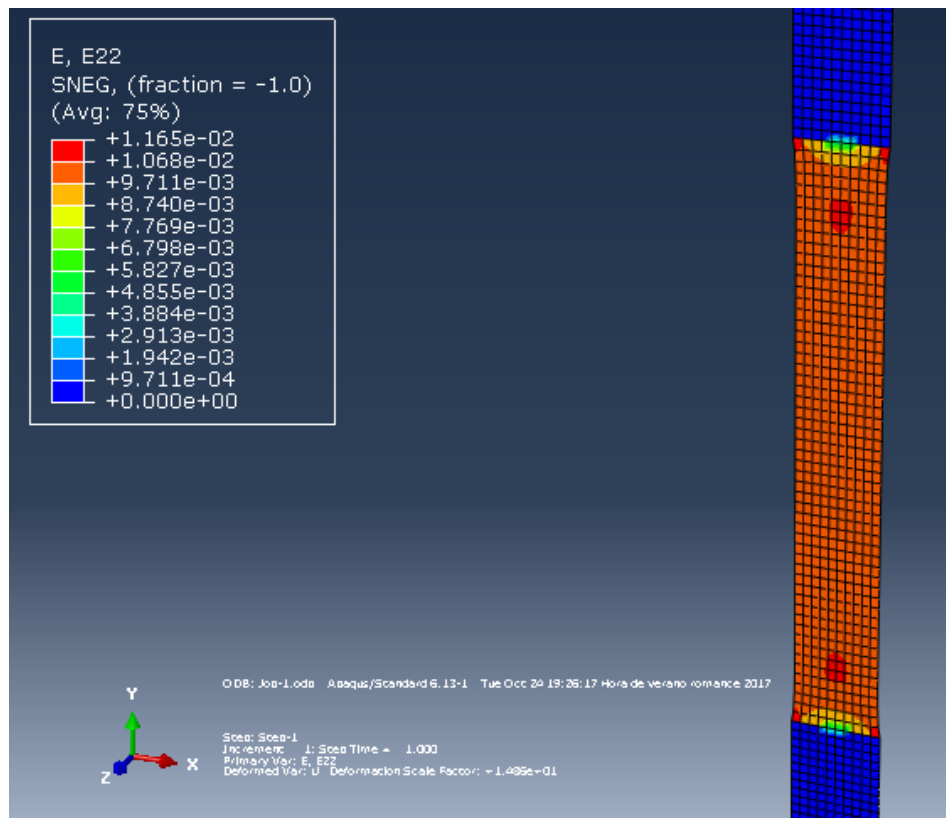


Figura 6-32 Resultados FEM deformaciones Eyy probeta 4 ABS 90° cargada con 1680 N.

6.2. Resultados obtenidos en el ensayo de flexión

En esta sección se mostrarán los resultados experimentales obtenidos para los ensayos de flexión.

De forma similar al apartado anterior, para cada uno de los materiales y orientaciones estudiadas se presentará un primer diagrama de carga-extensión del puente y, a continuación, un segundo diagrama de tensión-deformación donde se mostrarán los datos referentes a la formulación establecida en la respectiva norma. [37] Acto seguido se mostrarán en forma de tabla las propiedades de flexión para cada material estudiado.

6.2.1. PLA con orientación de fibra longitudinal (0°)

A continuación, los diagramas y resultados experimentales obtenidos para las probetas impresas en PLA con una orientación de fibra de 0° (Angulo de relleno 0°) se muestran en las figuras 6-33 y 6-34.

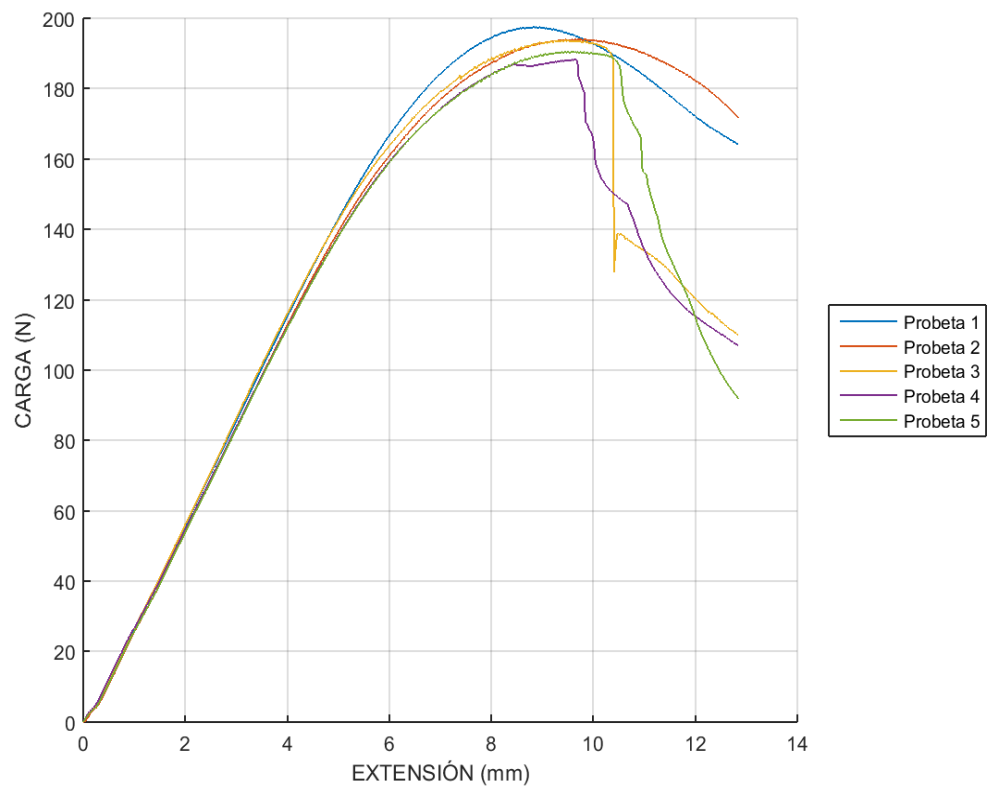


Figura 6-33 Diagrama carga-extensión.

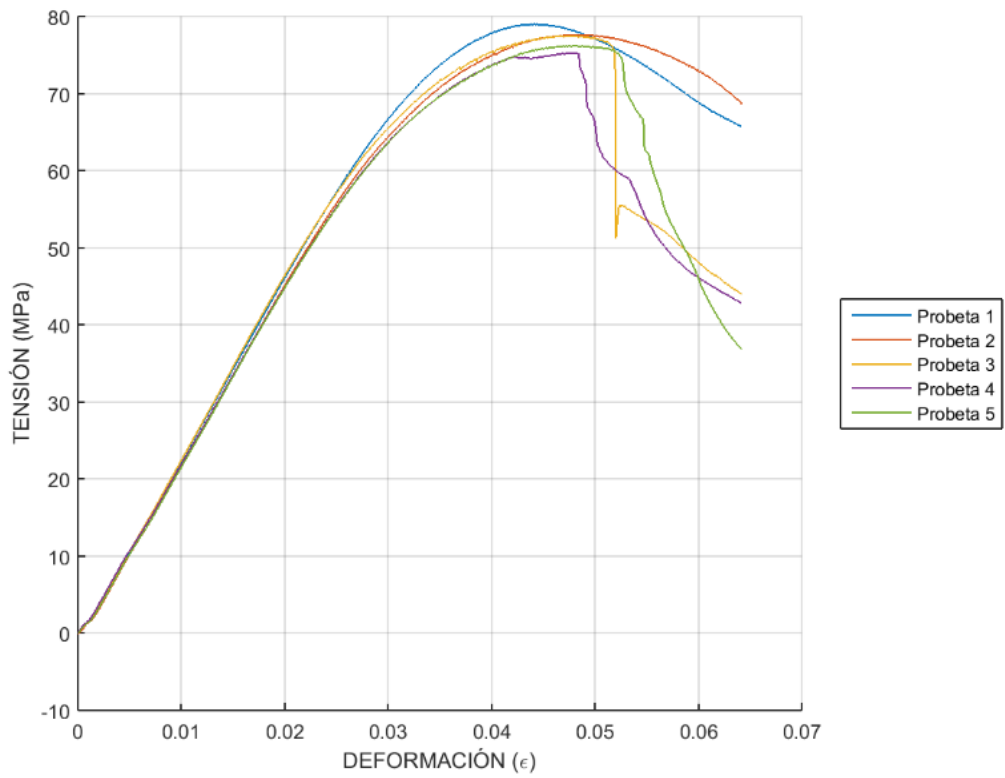


Figura 6-34 Diagrama tensión-deformación.

Observando las figuras 6-33 y 6-34 se puede apreciar, en general, cómo, en la zona de tensión última, el material presenta un comportamiento más plástico que para los ensayos de tracción además de ver como algunas probetas presentan rotura y otras no. Las que no presenta fisura del material (probetas 1 y 2) se debe a la propia limitación del set-up, ya que el espejo colocado en la parte inferior para poder visionar la superficie inferior de la probeta impedía seguir desplazando el puente móvil. No obstante, se puede observar como el material alcanza su tensión máxima y va plastificando poco a poco hasta llegar a su tensión de fractura.

Las probetas que presenta fisura del material, puede deberse, como se comentó para las probetas de tracción, a defectos internos como huecos existentes entre capas que hacen que la adhesión de algunas de las fibras presentes sea menos resistente que las demás. En la figura 6-35 se aprecia que la rotura de la probeta es inesperada, ya que una parte de las fibras presenta un comportamiento plástico, como se esperaba, y otras directamente rompen.

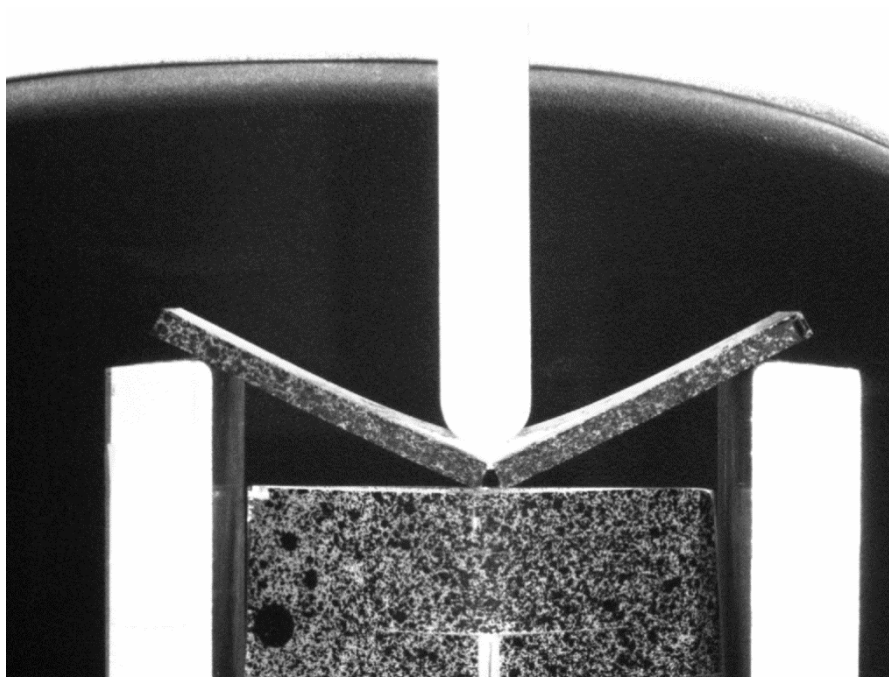


Figura 6-35 Rotura inesperada de algunas fibras en probeta 3 PLA con orientación 0°.

Los resultados obtenidos durante el ensayo de flexión para el PLA con orientación de fibra longitudinal 0° se muestran en las Tablas 6-16 y 6-17.

RESULTADOS FLEXIÓN PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL 0º			
Probeta	Módulo de Flexión (E_f) (MPa)	Flecha (s) (mm)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)
1	1843,5	13,00112	79,62834
2	1823,8	13,00111	77,7513
3	1893,1	13,001	77,306021
4	1912,5	13,00101	75,51302
5	1783,9	13,00112	76,4035

Tabla 6-16 Resultados obtenidos durante el ensayo.

RESULTADOS MEDIOS FLEXIÓN PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL 0º			
Módulo de Flexión (E_f) (MPa)	D. Típica Módulo de Flexión	Flecha (s) (mm)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)
1851,4	52,1153	13,001072	77,32043

Tabla 6-17 Propiedades del PLA con orientación de fibra 0º.

En vista de los resultados obtenidos, y atendiendo a lo comentado en el apartado 5.6.2, se ha llevado a cabo un análisis, con el método de correlación digital de imágenes DIC-2D, para obtener las deformaciones en la superficie lateral de la probeta. Además, aunque se vaticinaba que los resultados serían bastante dispersos y ruidosos debido a la pequeña superficie de análisis, llegando, en algunas de las probetas, a ser este análisis erróneo, se realizó una pequeña simulación numérica para poder comparar los resultados obtenidos.

Observando las figuras 6-36 y 6-37, se puede apreciar como existe una aproximación para las deformaciones E_{xx} y como para los valores de las deformaciones E_{yy} los valores difieren en gran medida, debido, quizá, a la longitud pequeña en esa dirección.

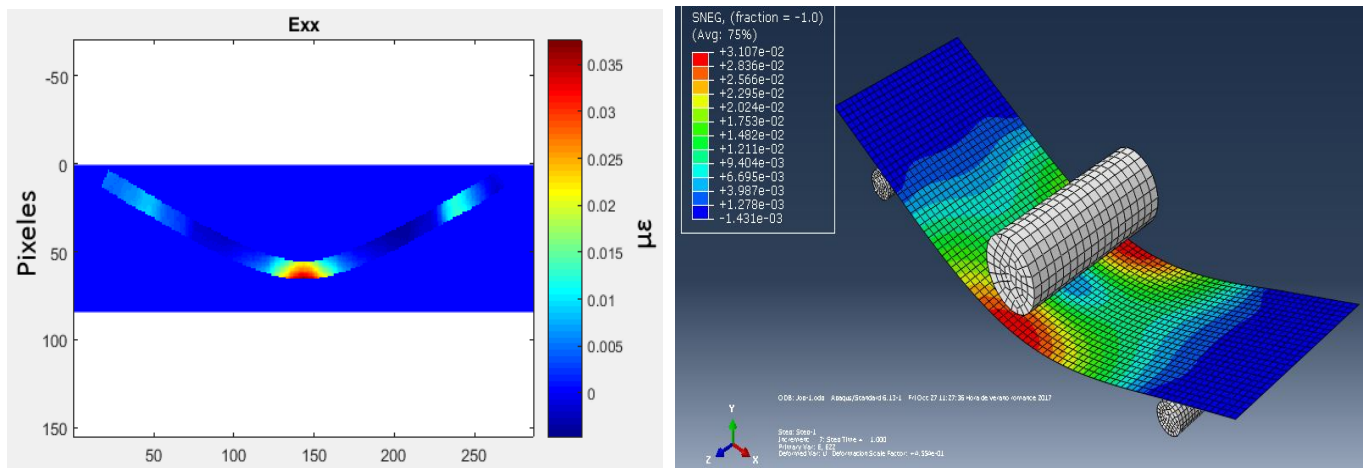


Figura 6-36 Deformación E_{xx} probeta 2 PLA 0° DIC-2D (izquierda) y FEM (derecha).

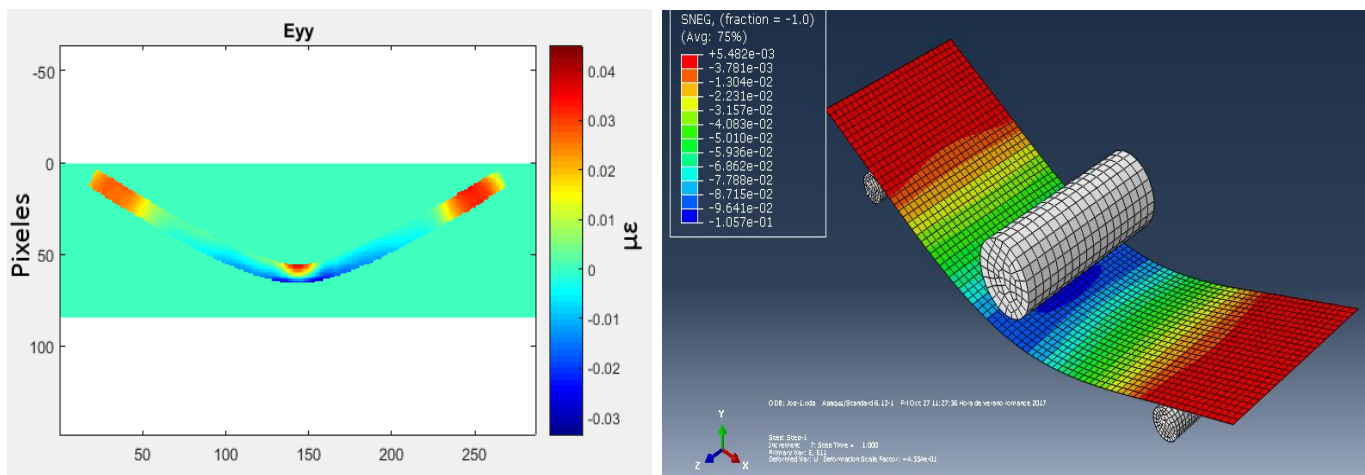


Figura 6-37 Deformación E_{yy} probeta 2 PLA 0° DIC-2D (izquierda) y FEM (derecha).

No obstante, del análisis DIC-2D, se ha podido obtener el desplazamiento vertical de la probeta (flecha) con bastante precisión como se muestra en la figura 6-38.

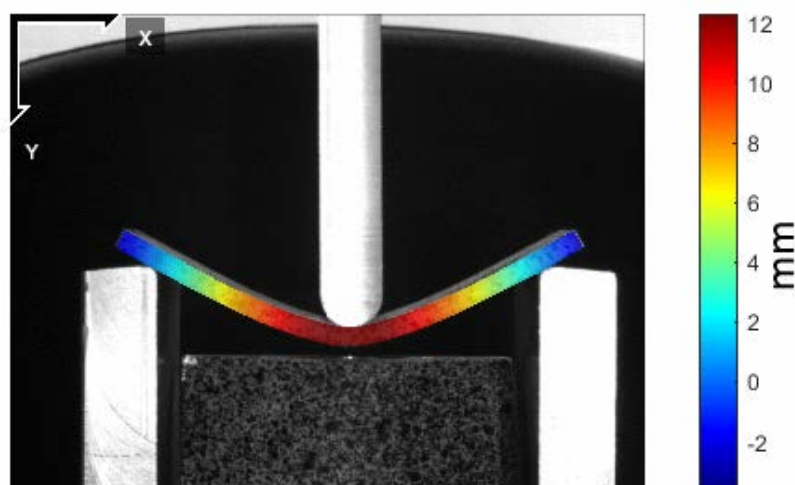


Figura 6-38 Flecha DIC-2D probeta 2 PLA 0°.

6.2.2. PLA con orientación de fibra transversal (90°)

De forma similar al apartado anterior, los diagramas y resultados experimentales obtenidos para las probetas impresas en PLA con una orientación de fibra de 90° (Angulo de relleno 90°) se muestran en las figuras 6-39 y 6-40.

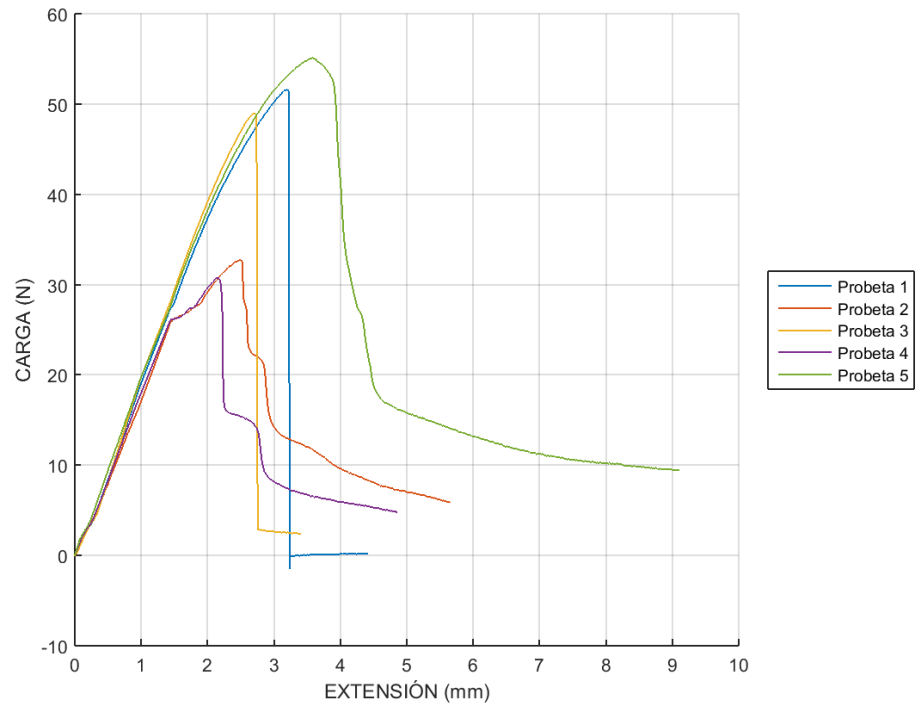


Figura 6-39 Diagrama carga-extensión.

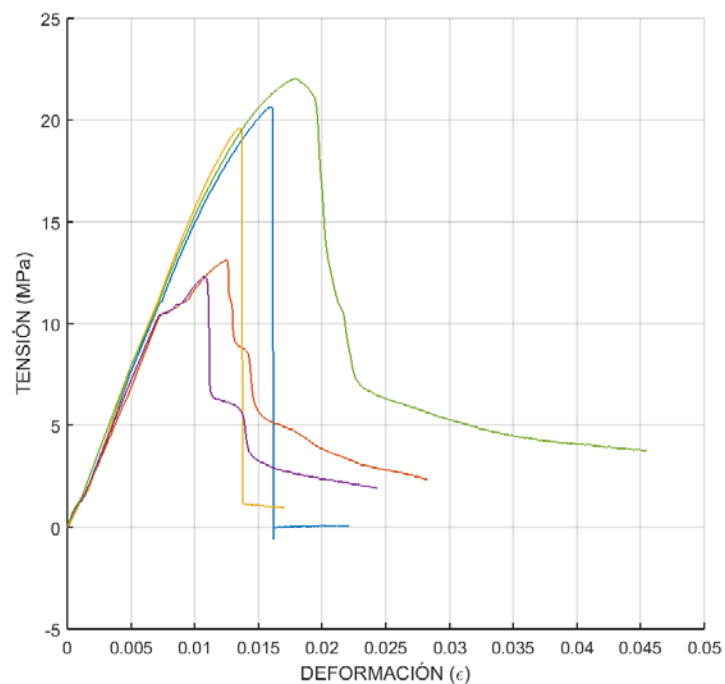


Figura 6-40 Diagrama tensión-deformación.

En este caso, en las figuras 6-39 y 6-40 se observa como el material presenta roturas frágiles a la vez que desaparece la repetitividad de resultados obtenida con la orientación de fibra longitudinal 0°. Esto se debe, como se comentó anteriormente, al propio ángulo de la impresión, mostrando con claridad como la adhesión entre las fibras no es constante en todas las probetas.

En la figura 6-41 se muestra una rotura inesperada, en la zona donde las fibras tienen mala adhesión entre sí, de una de las probetas ensayadas. Además, se hace patente una flecha muy pequeña debido a que el material no llega a deformarse.



Figura 6-41 Rotura de probeta 2 PLA orientación de fibra 90°.

Los resultados obtenidos durante el ensayo de flexión para el PLA, en este caso, con orientación de fibra transversal 90° se muestran en las Tablas 6-18 y 6-19.

RESULTADOS FLEXIÓN PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL 90º			
Probeta	Módulo de Flexión (E_f) (MPa)	Flecha (s) (mm)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)
1	1356,3	4,58743	20,63701
2	1193,4	5,80258	13,4703
3	1364,5	3,57214	19,747
4	1286,1	5,01949	12,22125
5	1461,2	9,26388	22,5052

Tabla 6-18 Resultados obtenidos durante el ensayo.

RESULTADOS MEDIOS FLEXIÓN PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL 90º			
Módulo de Flexión (E_f) (MPa)	D. Típica Módulo de Flexión	Flecha (s) (mm)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)
1332,3	99,5539	5,649104	17,7161

Tabla 6-19 Propiedades PLA con orientación de fibra 90º.

Observando las figuras 6-42 y 6-43, para este caso, las deformaciones E_{xx} han experimentado unas diferencias mayores con los resultados FEM, posiblemente debido a que DIC-2D tiene en cuenta el momento de la rotura, donde al ser ésta frágil, provoca un salto repentino en estas. Para el caso de las deformaciones E_{yy} la aproximación con los valores de las simulaciones numéricas sigue siendo inexistente.

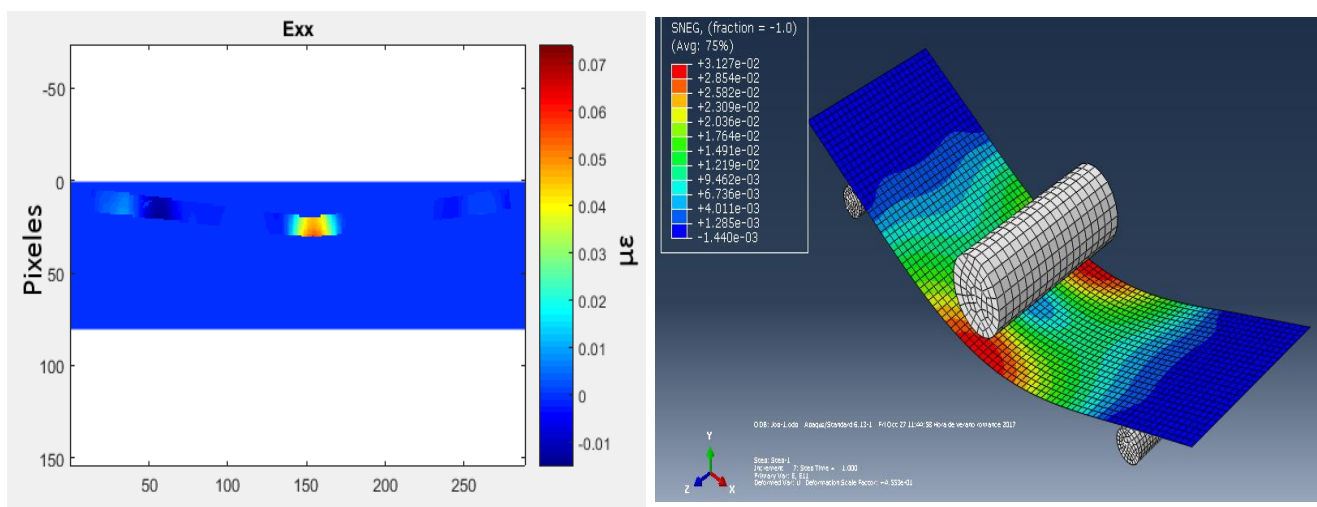


Figura 6-42 Deformación E_{xx} probeta 1 PLA 90º DIC-2D (izquierda) y FEM (derecha).

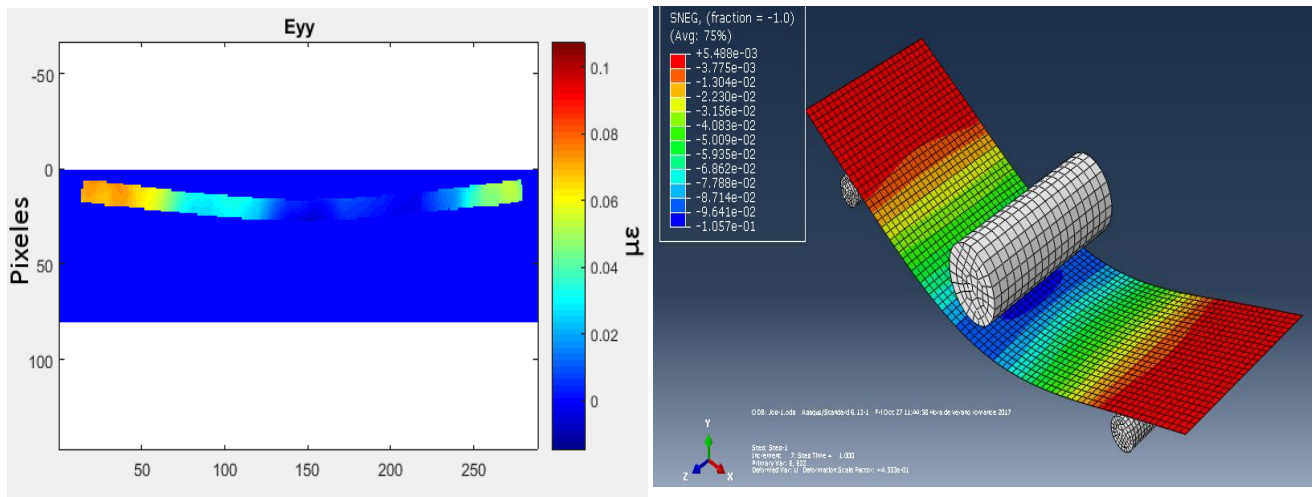


Figura 6-43 Deformación E_{yy} probeta 1 PLA 90° DIC-2D (izquierda) y FEM (derecha).

De nuevo, en las figuras 6-44 se puede comprobar la buena aproximación del análisis DIC-2D de la flecha obtenida durante el ensayo.

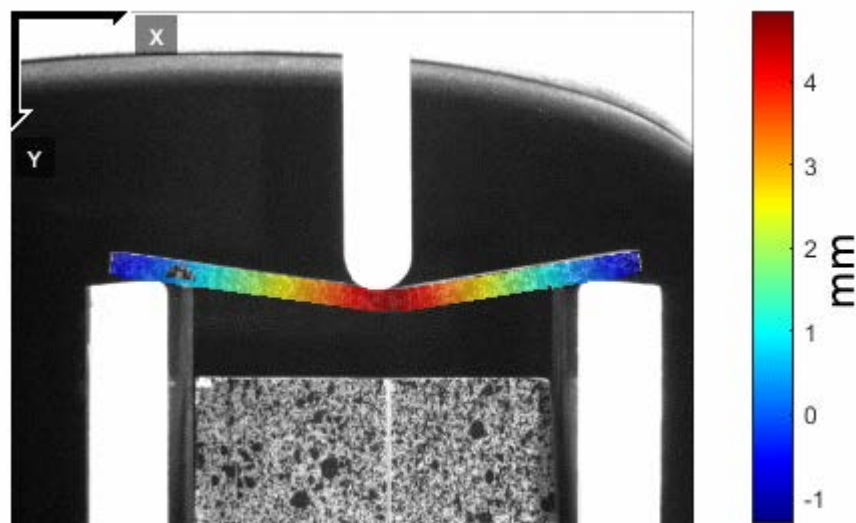


Figura 6-44 Flecha DIC-2D probeta 1 PLA 90°.

6.2.3. ABS con orientación de fibra longitudinal (0°)

En este apartado, se mostrarán los diagramas y resultados experimentales obtenidos para el ensayo de flexión de las probetas impresas en ABS con una orientación de fibra longitudinal de 0° (Angulo de relleno 0°). Estos corresponden a las figuras 6-45 y 6-46.

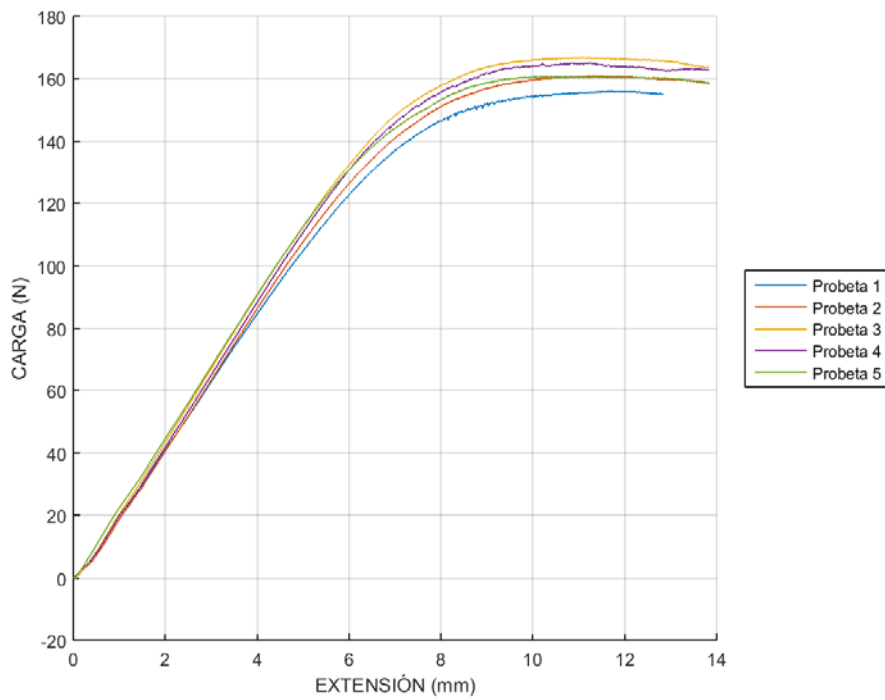


Figura 6-45 Diagrama carga-extensión.

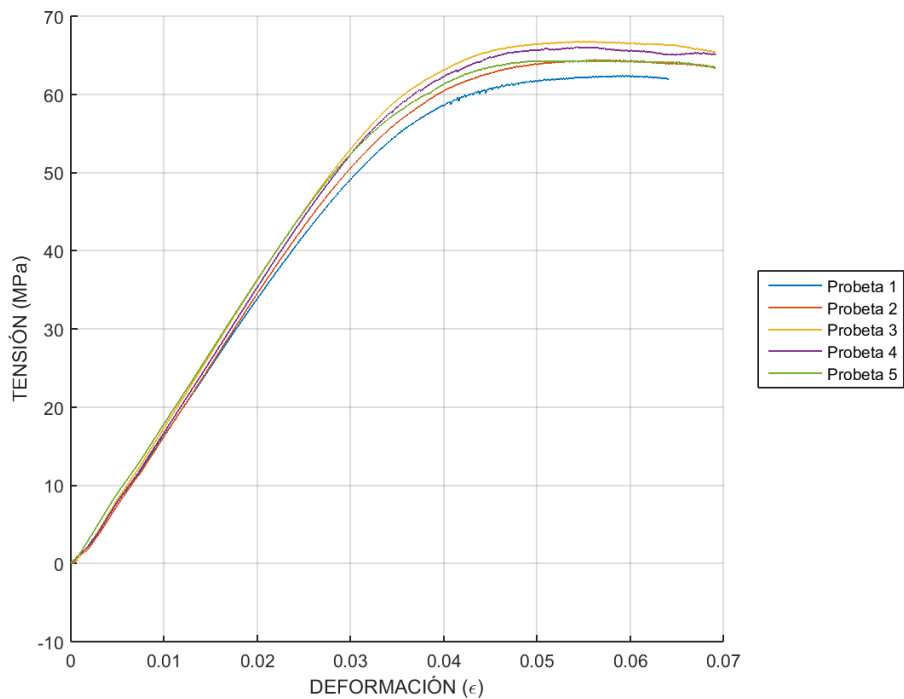


Figura 6-46 Diagrama tensión-deformación.

En este caso, en las figuras 6-45 y 6-46 se observa cómo este material, al ser un poco más dúctil que el PLA, tiene un comportamiento mucho más elástico, llegando a tener una pequeña recuperación al detener el ensayo y retirar la carga. Además, presentará

comportamientos plásticos en la zona de tensión última. Realmente esas zonas no se muestran en las figuras debido a las limitaciones del set-up como se comentó en secciones anteriores. También se observan repetitividad de resultados, lo que indica que, en este caso, la impresión no ha propiciado tantas imperfecciones internas como en casos anteriores.

En la figura 6-47 se muestra ese comportamiento elástico mencionado.

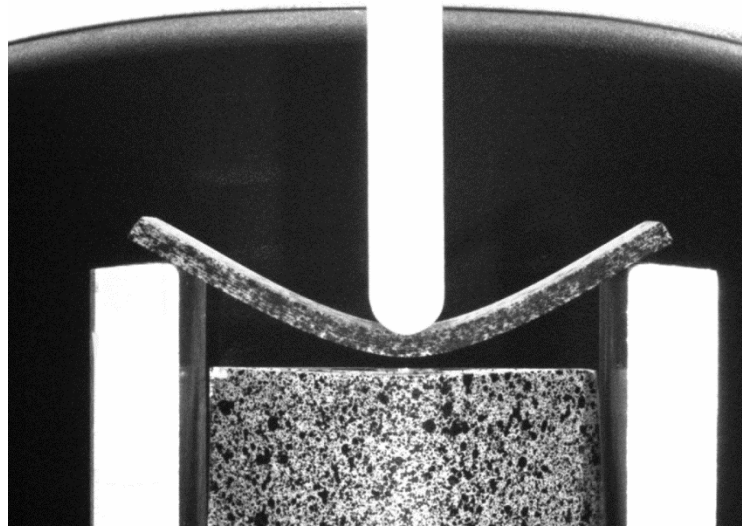


Figura 6-47 Probeta 1 ABS orientación de fibra 0°.

Los resultados obtenidos durante el ensayo de flexión, en este caso, para el ABS con orientación de fibra longitudinal 0° se muestran en las Tablas 6-20 y 6-21.

RESULTADOS FLEXIÓN ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL 0°			
Probeta	Módulo de Flexión (E_f) (MPa)	Flecha (s) (mm)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)
1	1383	13,00104	62,4012
2	1309,9	14,00097	64,410
3	1466,6	14,0013	66,7772
4	1302,2	14,00125	65,388
5	1762,7	14,00125	64,3981

Tabla 6-20 Resultados obtenidos durante el ensayo.

RESULTADOS MEDIOS FLEXIÓN ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL 0°			
Módulo de Flexión (E_f) (MPa)	D. Típica Módulo de Flexión	Flecha (s) (mm)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)
1444,9	189,6289	13,801162	64,6749

Tabla 6-21 Propiedades ABS con orientación de fibra 0°.

Al igual que ocurría en el caso del PLA con orientación de fibra 0°, para este caso también existe una buena aproximación de los valores de las deformaciones Exx obtenidas con DIC-2D y FEM y una correlación, algo mejor pero todavía con muchas diferencias, para los valores de las deformaciones Eyy. Todo esto se puede observar en las figuras 6-48 y 6-49.

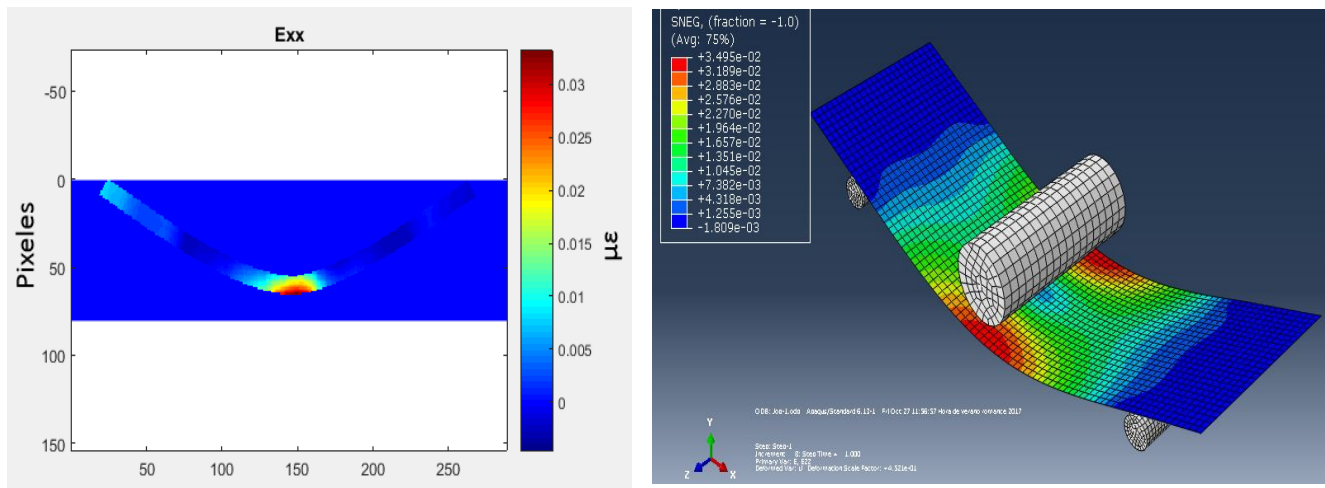


Figura 6-48 Deformación Exx probeta 2 ABS 0° DIC-2D (izquierda) y FEM (derecha).

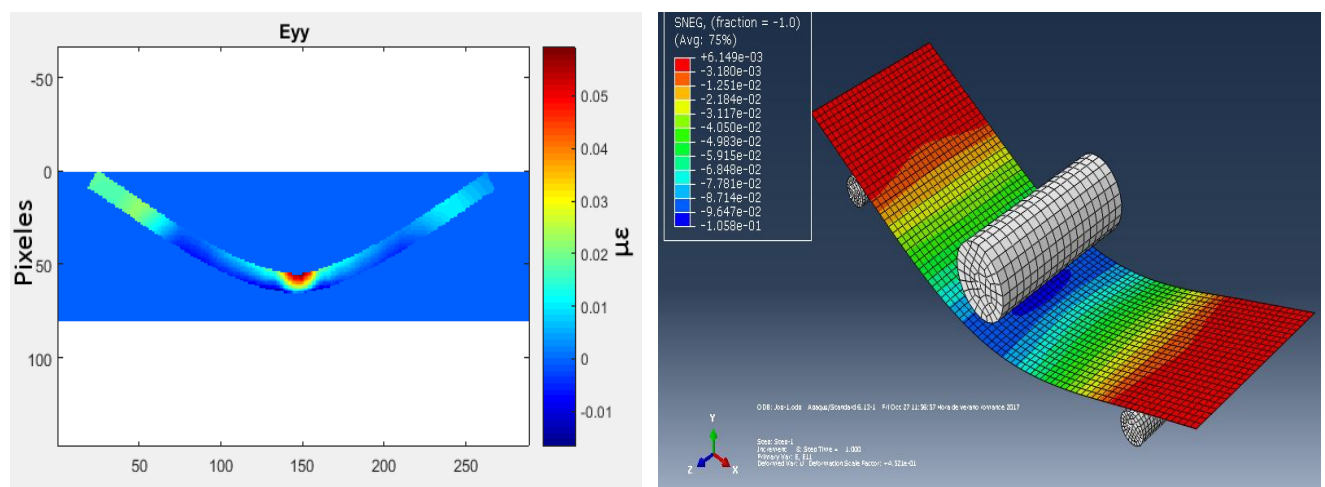


Figura 6-49 Deformación Eyy probeta 2 ABS 0° DIC-2D (izquierda) y FEM (derecha).

En la figura 6-50 se muestra la flecha obtenida con DIC-2D durante el ensayo. En ella se puede observar el comportamiento elástico mencionado anteriormente, ya que se deforma aproximadamente 13 mm y la probeta no muestra ninguna zona de rotura.

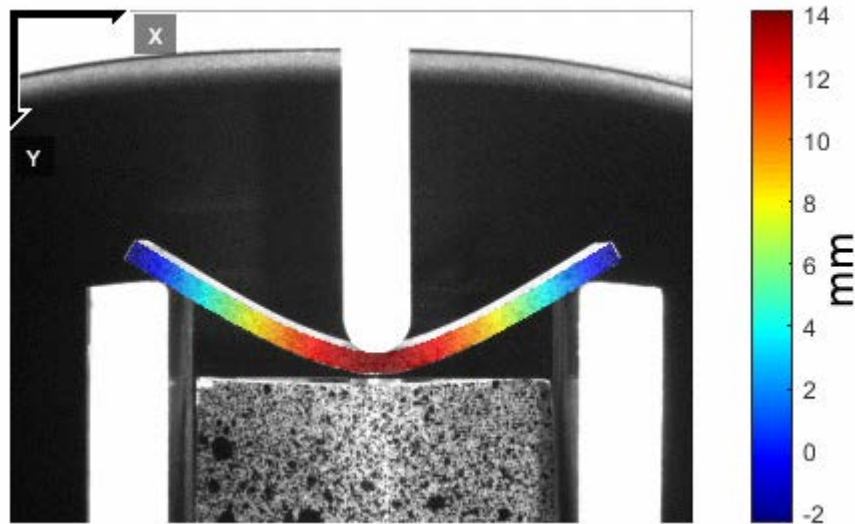


Figura 6-50 Flecha DIC-2D probeta 2 ABS 0°.

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

A continuación, se mostrarán los diagramas y resultados experimentales obtenidos para el ensayo de flexión de las probetas impresas en ABS con una orientación de fibra transversal de 90° (Angulo de relleno 90°). Estos corresponden a las figuras 6-51 y 6-52.

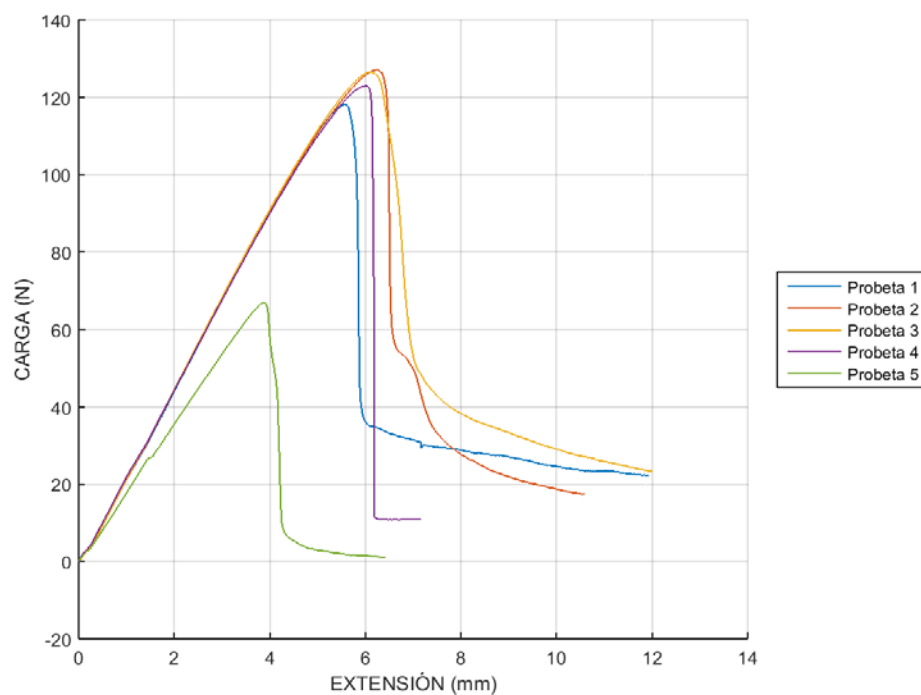


Figura 6-51 Diagrama carga-extensión

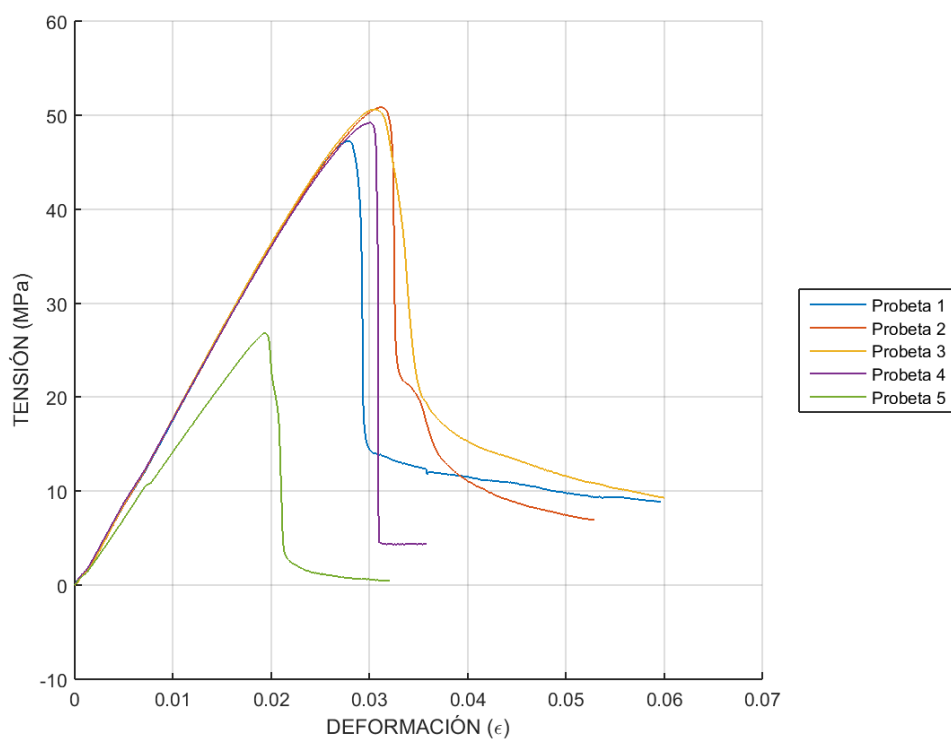


Figura 6-52 Diagrama tensión-deformación.

Observando las figuras 6-51 y 6-52 se vuelven a apreciar diferencias entre las distintas probetas, haciéndose notoria en la probeta 5, así como un comportamiento frágil en las zonas de rotura.

En la figura 6-53 se muestra de nuevo la discontinuidad en la adhesión entre las fibras.

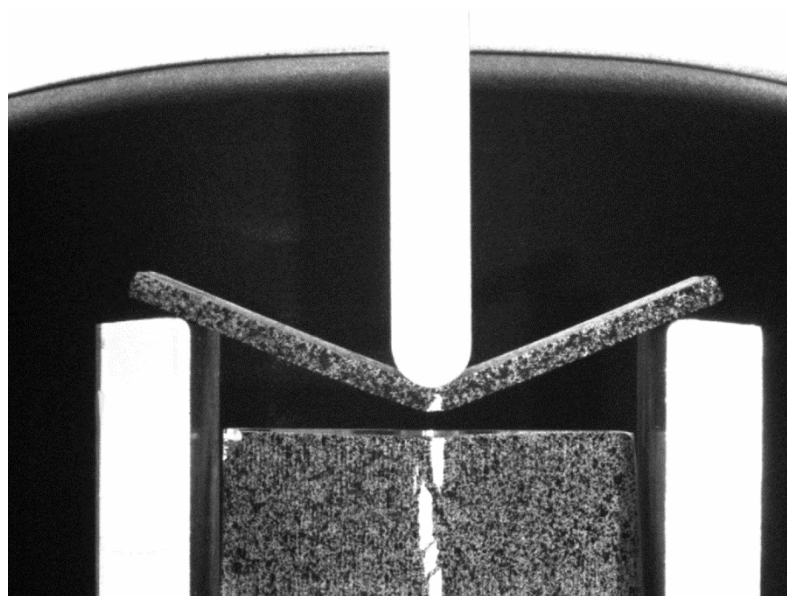


Figura 6-53 Probeta 3 ABS orientación de fibra 90°.

Los resultados obtenidos durante el ensayo de flexión, en este caso, para el ABS con orientación de fibra transversal 90° se muestran en las Tablas 6-22 y 6-23.

RESULTADOS FLEXIÓN ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL 90°			
Probeta	Módulo de Flexión (E_f) (MPa)	Flecha (s) (mm)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)
1	1494,1	12,09573	48,7201
2	1413,7	10,75605	51,37
3	1517	12,17466	51,1702
4	1549	7,33215	49,858
5	1261,5	6,57873	27,2212

Tabla 6-22 Resultados obtenidos durante el ensayo.

RESULTADOS MEDIOS FLEXIÓN ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL 90°			
Módulo de Flexión (E_f) (MPa)	D. Típica Módulo de Flexión	Flecha (s) (mm)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)
1447,1	115,1316	9,787464	44,6679

Tabla 6-23 Propiedades ABS con orientación de fibra 90°.

De manera similar al PLA con orientación de fibra 90°, en las figuras 6-54 y 6-55 se puede observar cómo, de nuevo debido a esa rotura frágil del material, DIC-2D introduce un salto apreciable en los valores de las deformaciones Exx, motivo por el que los valores pueden aproximarse, en cierta forma a los obtenidos con FEM.

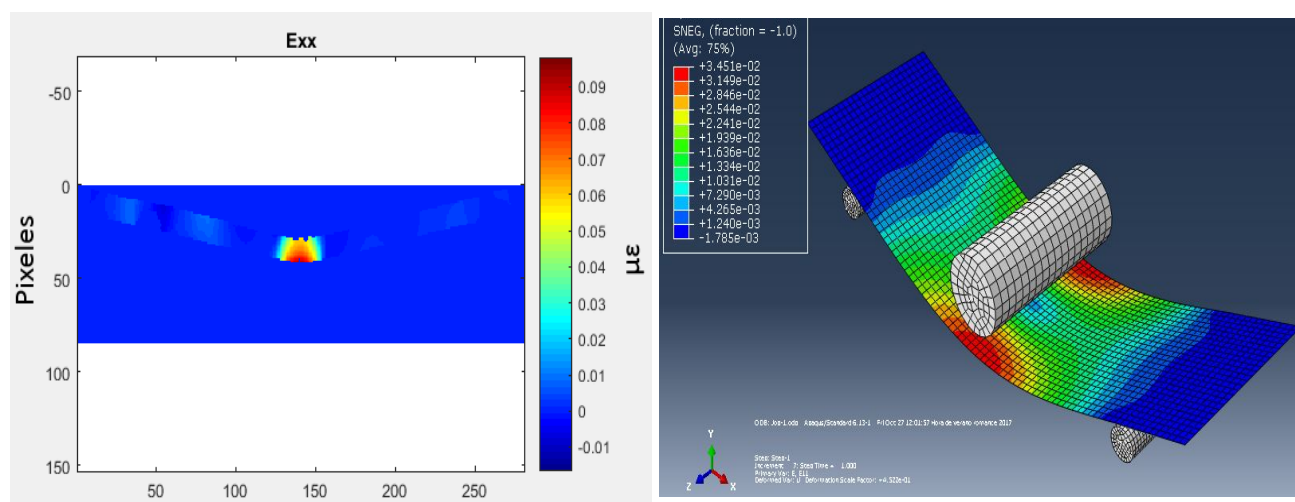


Figura 6-54 Deform. Exx probeta 3 ABS 90° DIC-2D (izquierda) y FEM (derecha).

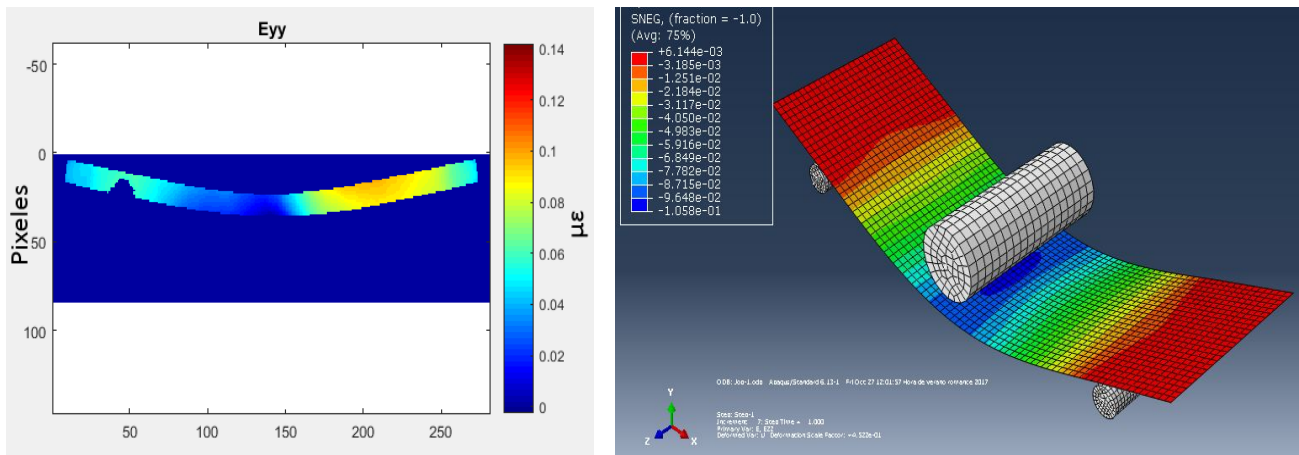


Figura 6-55 Deform. Eyy probeta 3 ABS 90° DIC-2D (izquierda) y FEM (derecha).

En la figura 6-56 de nuevo se muestra la flecha obtenida con DIC-2D durante el ensayo. En ella se puede observar las zonas donde las fibras tienen mejor adhesión y donde no.

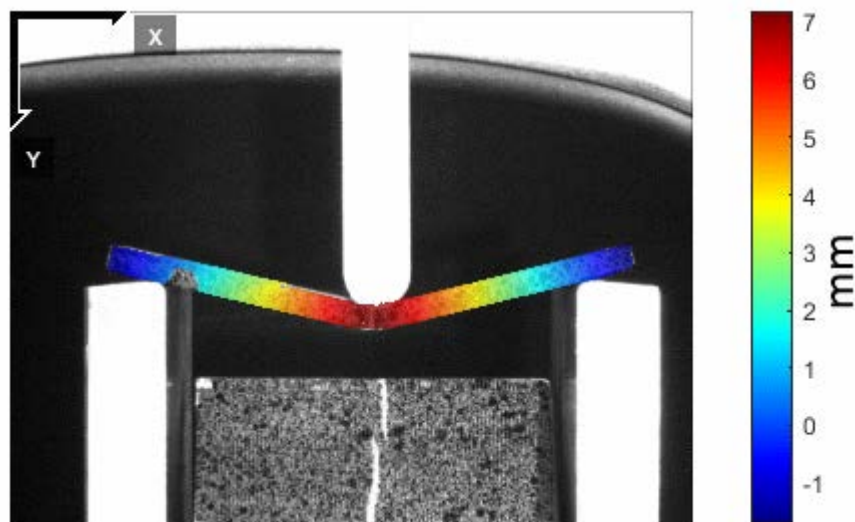


Figura 6-56 Flecha DIC-2D probeta 3 ABS 90°.

7. CONCLUSIONES

Con este Trabajo Final de Grado se ha pretendido realizar un acercamiento al campo de los materiales para impresión 3D, poniendo como ejemplo dos de los más empleados y desarrollados para la tecnología aditiva FFF, el Ácido Poliláctico (PLA) y el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y enfocando el estudio a través de tres ejes fundamentales: fabricación, análisis experimental y desarrollo y ajuste de un modelo numérico.

A raíz de los resultados presentados a lo largo del apartado 6 de este trabajo y teniendo en cuenta todo lo que se ha explicado durante el desarrollo de este texto, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

- El método de correlación digital de imágenes DIC-2D resulta muy interesante para el estudio de deformaciones de un sólido, presentando numerosas ventajas como la posibilidad del estudio de campo completo, permitiendo la apreciación de regiones particulares del elemento estudiado donde se puedan dar variaciones de comportamiento a causa de discontinuidades o imperfecciones en el material, defectos de fabricación, etc.; el bajo coste del ensayo, una vez se dispone del equipo necesario o el hecho de ser un método no intrusivo, entre otras.
- Sin embargo, el empleo de DIC-2D en situaciones tales como, estudio de las deformaciones en dirección transversal de la carga, en estados tensionales bajos y medición precisa de deformaciones en dicha dirección resulta complejo, siendo necesarias cámaras de mayor resolución.
- Debido a la gran variabilidad de resultados obtenidos en algunos ensayos, se puede decir que este tipo de impresión no es del todo fiable. Se precisan de más estudios para poder mejorar este tipo de tecnología, incidiendo, sobre todo, en mejorar la adhesión de las capas y reducción de imperfecciones internas.
- El método de los elementos finitos (FEM) constituye una herramienta de gran utilidad para el análisis del comportamiento mecánico de un sólido ante distintas solicitaciones. Aunque ha quedado probada la fiabilidad del método, incluso a un modesto nivel de detalle en el modelado, en este trabajo se ha puesto de manifiesto que las simulaciones pueden reducir, mas no sustituir, la fase de experimentación sobre prototipos reales. De hecho, los resultados

experimentales han sido necesarios para poder ajustar y afinar el modelo numérico.

- Teniendo en cuenta todas y cada una de las limitaciones y consideraciones para la técnica experimental DIC-2D y la simulación numérica, sus resultados han mostrado un alto grado de similitud, ya que han obtenido errores pequeños comprendidos entre un 0,5 – 15%.
- Con este trabajo se ha conseguido obtener las propiedades de los materiales y comprobar cómo afecta la orientación de impresión a estas. De esta forma se concluye que la orientación de impresión es un parámetro muy importante en tecnología aditiva FFF ya que se deberá escoger en función de las cargas externas aplicadas sobre el objeto en cuestión, asegurando una buena resistencia del material si dicha orientación coincide con la de aplicación de la carga.

8. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

- **Influencia de la temperatura de la cama**

Siguiendo esta línea, se propone un estudio de cómo afectan las condiciones del entorno y la temperatura ambiente a las propiedades del material impreso, así como la forma en que el gradiente de temperatura provocado por la cama caliente, influye en las propiedades del material en función de la altura de la pieza.

- **Adherencia de la pieza a la cama**

En la impresión, la adherencia de la pieza a la cama es fundamental, pues un despegue hará que la pieza no pueda seguir siendo impresa y, por tanto, deberemos desecharla.

Existen diferentes formas de ayudar a esta adherencia, tales como lacas específicas como variedad de cintas especiales para este uso.

Sin embargo, el uso de materiales como ABS, hace que la contracción que se manifiesta en la pieza pueda ocasionar un despegue con mayor facilidad que si usamos filamentos como PLA. Por tanto, es conveniente evaluar el mejor tipo de elementos que ayuden a la fijación en cada caso.

- **Boquilla y cabezal extrusor**

Si bien se empiezan a observar los primeros estudios sobre la influencia de la geometría, así como del diámetro de la boquilla del cabezal de extrusión; un estudio detallado sobre cómo ésta afecta a la extrusión del filamento ayudaría al desarrollo de una boquilla optimizada en función de las necesidades de impresión.

La aparición de filamentos especiales de tipo cerámico o de madera entre otros, hace que las boquillas tradicionales fabricadas en latón presenten un deterioro extremadamente acusado cuando se usan este tipo de materiales. La fabricación de boquillas especiales, adaptadas a cada tipo de material es una tarea pendiente actualmente. Este desarrollo posibilitaría multiplicar las posibilidades de fabricación de la tecnología FFF. Si bien es cierto que existen ciertas iniciativas de crowdfunding al respecto, no existe un interés empresarial pese al alto potencial económico.

Un elemento que este autor considera especialmente interesante, es el diseño de un cabezal de extrusión multifilamento que permita intercambiar el filamento usado de forma

sencilla. En esta línea también tiene cabida la idea de un fusor con varias entradas de colores que permitan crear piezas con una amplia gama cromática de colores a gusto del usuario.

Actualmente podemos vislumbrar los primeros proyectos en esta línea, pero aún presentan grandes dificultades y restricciones debido a la tricotomía relativa al desarrollo mecánico, electrónico y de programación informática.

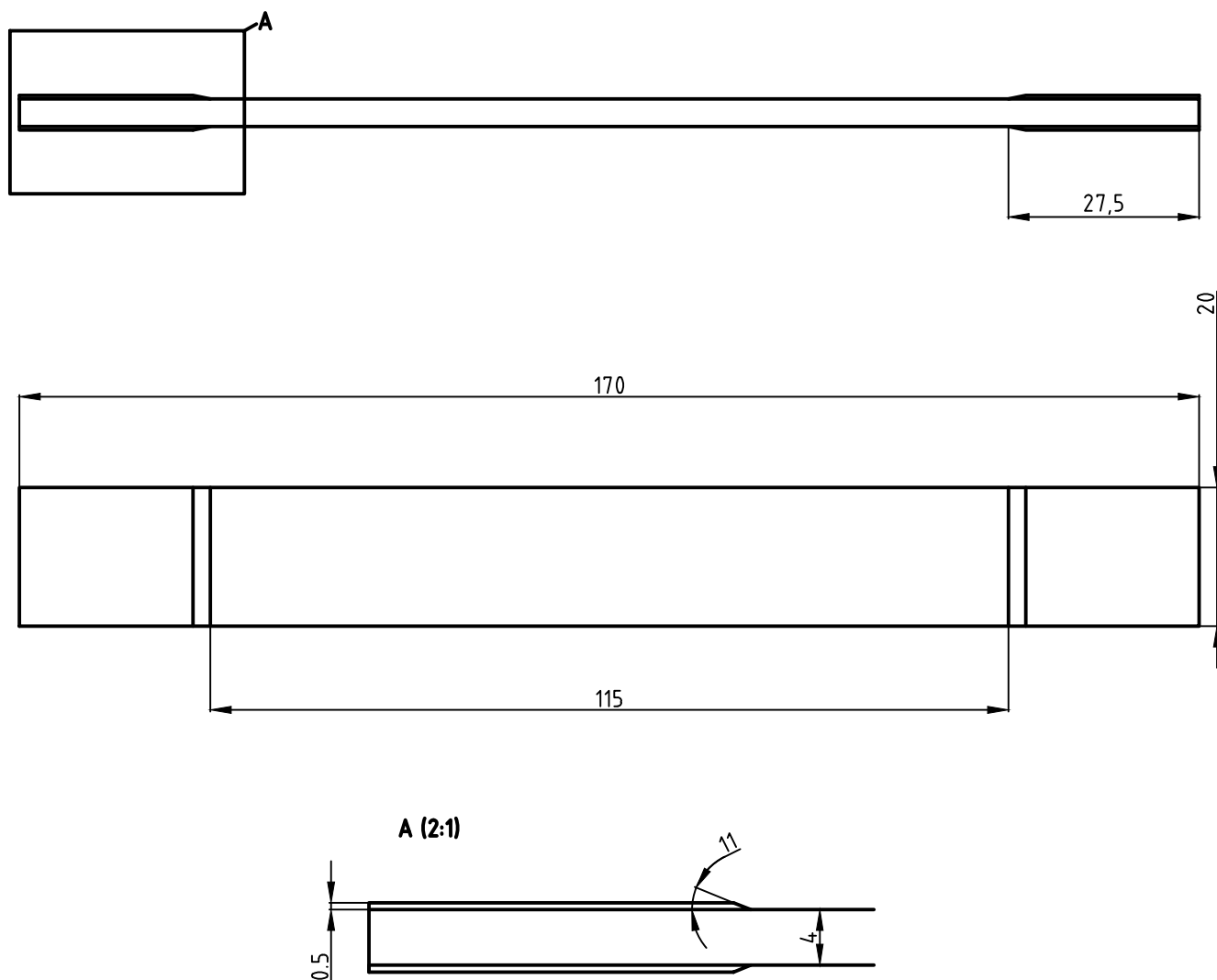
- **Ensayos y simulaciones numéricas con otros materiales**

Al igual que se ha realizado en el presente trabajo, y puesto que cada vez las piezas van a tender a ser funcionales, se precisa como otra posible línea de investigación el realizar pruebas y sobre todo simulaciones numéricas con otros materiales, ya que es ese modelo numérico, el que en un futuro ahorrará tiempo y costes.

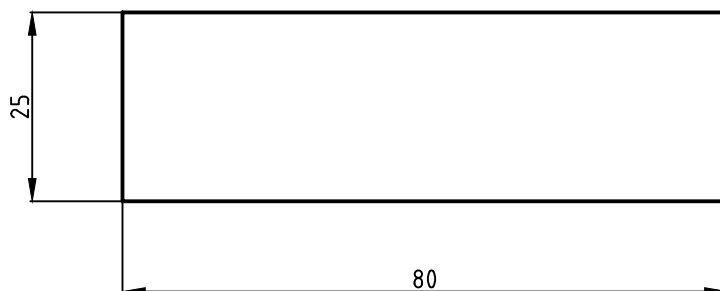
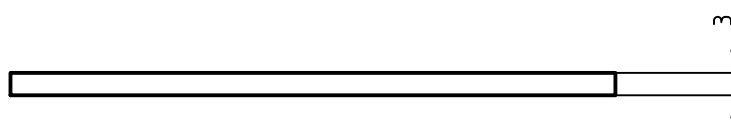
9. PLANOS

En esta sección se detallarán los siguientes planos:

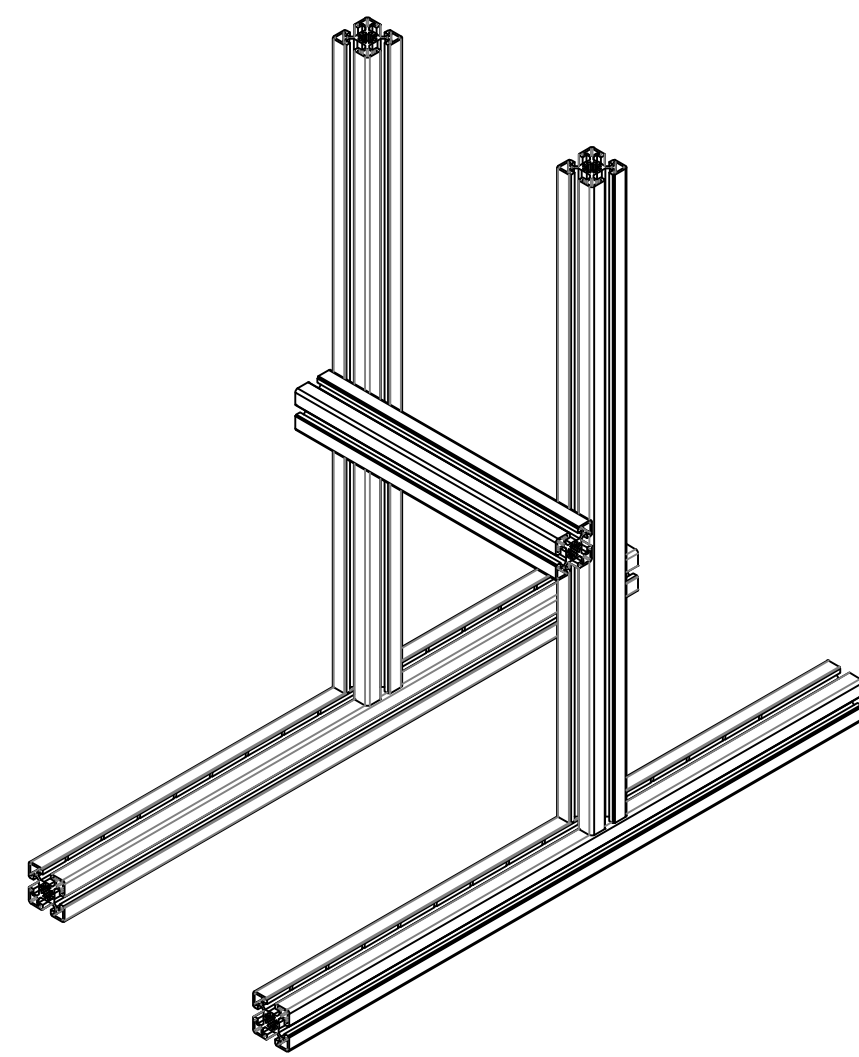
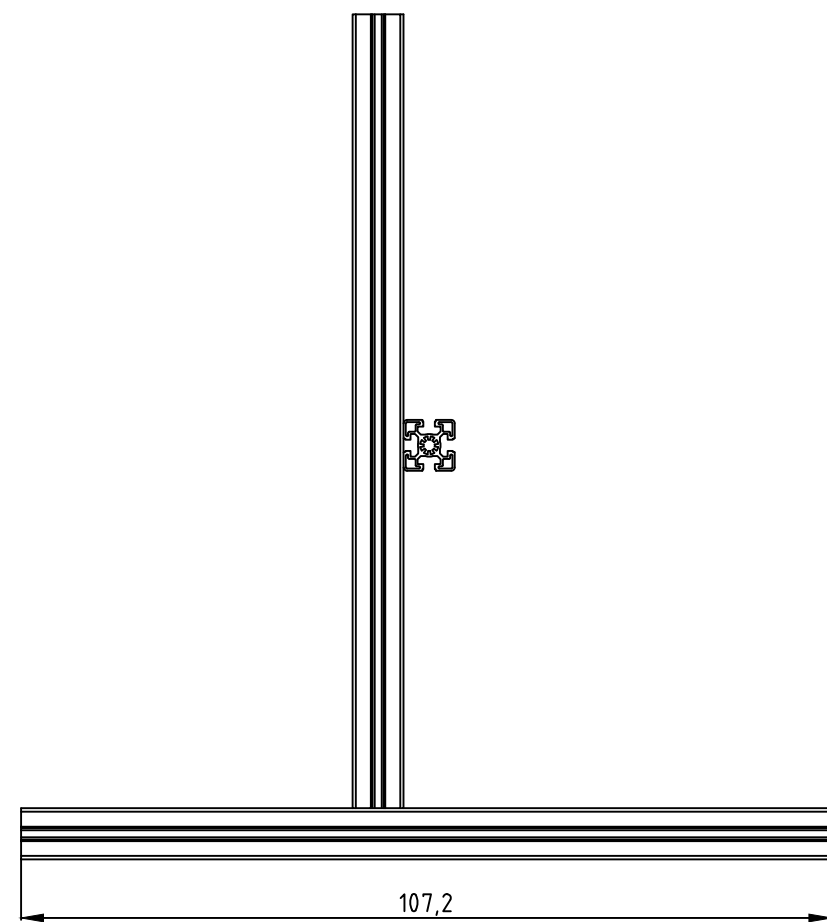
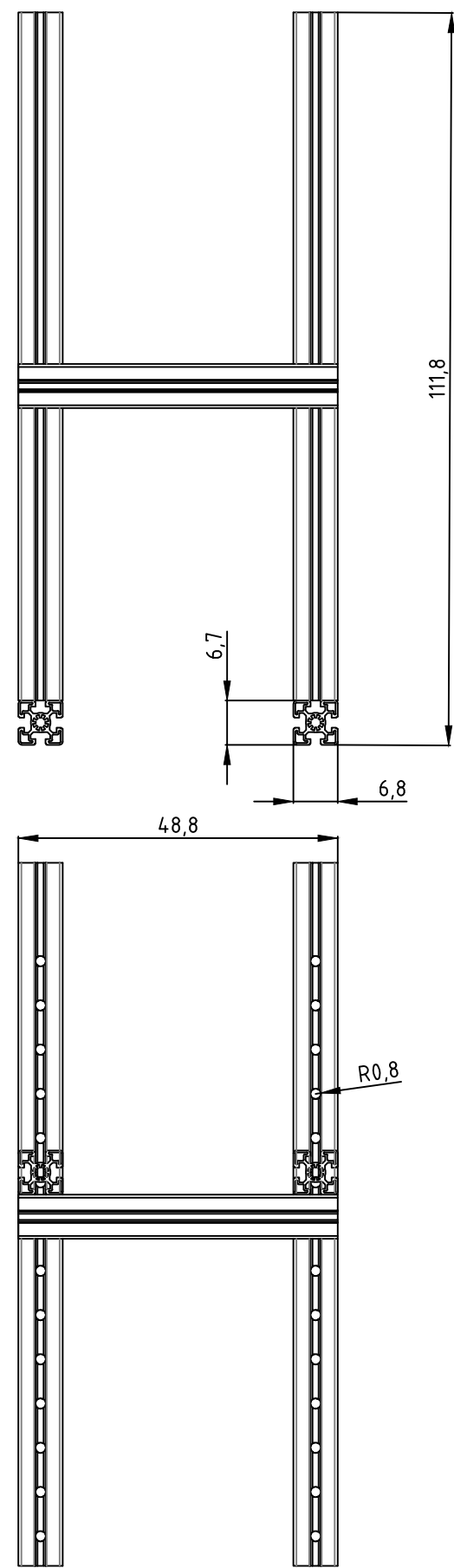
- Plano de la geometría de las probetas utilizadas para cada ensayo:
 - Probeta tipo 1-A para ensayo de tracción sin disminución de sección transversal – A3 (1/3)
 - Probeta rectangular para ensayo de flexión – A3 (2/3)
- Plano del soporte para cámara utilizada con método DIC-2D – A3 (3/3).



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	04/10/2017	Quevedo		
COMPROBADO		Pérez		
		Fernando		
ESCALA:	Designación PROBETA TRACCIÓN			Nº PLANO 1/3
1:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	04/10/2017	Quevedo		
COMPROBADO		Pérez		
		Fernando		
ESCALA:	Designación PROBETA FLEXIÓN			Nº PLANO 2/2
1:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES	
DIBUJADO	04/10/2017	Quevedo			
COMPROBADO		Pérez			
		Fernando			
ESCALA:	Designación				Nº PLANO 3/3
3:20	SOPORTE CÁMARA				SUSTITUYE A:
					SUSTITUIDO POR:

10. ANEXOS

10.1. Programas realizados para el análisis con Matlab

Como se comentó en secciones anteriores (apartado 5.6.4), para calcular las propiedades de los materiales se ha usado la herramienta Matlab. En concreto, se ha programado un menú de opciones, el cual, va preguntando de forma ordenada al usuario que cálculos y gráficos quiere ir realizando.

La estructura de dicho menú se compone de un bucle “while”, el cual permite mostrar las opciones en pantalla y elegir al usuario la que desee, y dentro de este, encontramos un bucle “switch” el cual va ejecutando los comandos necesarios en función de la opción escogida. La programación de dicho menú se muestra a continuación:

```
%Limpiamos y cerramos todas las variables y procesos para evitar errores.
clear all;
close all;
clc

opcion1=0; % Se utiliza para que el programa se repita hasta pulsar la opción 3.

disp ('                ANÁLISIS DE DATOS PARA ENSAYOS DIC');

while (opcion1~=3)
    disp('1. Ensayos de Tracción. ');
    disp('2. Ensayos de Flexión. ');
    disp('3. Finalizar el programa. ');

    opcion1=input('                Introduce la opcion deseada: ');

    switch (opcion1) %Nos permite elegir la opción que queramos.
        case 1
            [opcion]=Traccion;
        case 2
            [opcion]=Flexion;
        case 3
            disp('                El programa a finalizado correctamente. ');
    end
end
```

Para que la programación sea amena y fácil de revisar en caso de algún error, todos los cálculos se han programado por funciones; una para cada ensayo realizado. Así, los diferentes casos del bucle “switch” van llamando a dichas funciones atendiendo a las operaciones que el usuario quiera realizar.

De esta forma, con el comando “[function](#)” se crea una función para el ensayo de tracción, la cual contiene toda la programación necesaria para que las operaciones se realicen de forma rápida e intuitiva, ya que va preguntando al usuario, en cada momento, lo que desea calcular, creando un submenú con diferentes opciones:

- Opción 1: Lectura de datos y cálculo de resultados. En primer lugar, pregunta al usuario que introduzca valores constantes como la sección transversal de la probeta o el número de ensayos realizados (número de probetas analizadas) por material y orientación de fibra. Acto seguido, se pide de nuevo al usuario que introduzca todos los archivos “. mat” y “. csv” que contienen los datos brutos procedentes del análisis DIC-2D, simulaciones numéricas y ensayos experimentales, preguntando, además, si las capturas de las imágenes se han realizado por extensión o por carga con el fin de que el programa pueda calcular las tensiones con los datos de fuerza procedentes del ensayo en cuestión. Con todo esto, se procede a realizar las operaciones pertinentes para calcular las propiedades del material de cada probeta ensayada y realizando una media de estos para calcular un valor medio, que, en el caso del ensayo de tracción, son el módulo de Young y el coeficiente de Piosson así como las desviaciones típicas de los diferentes valores obtenidos.
- Opción 2: Generar gráficos representativos y mostrar los resultados calculados. Con esta opción, el programa muestra todos los resultados obtenidos, así como los tres diagramas representativos para el ensayo de tracción como el diagrama de carga-extensión, así como los diagramas de tensión-deformación E_{xx} y tensión-deformación E_{yy} .
- Opción 3: Guardar resultados calculados: Ahora, el programa guarda todos los resultados obtenidos, tanto gráficos como numéricos, permitiendo al usuario elegir la ubicación donde se desean guardar.
- Opción 4: Volver al menú principal. Esta opción permite, una vez se han calculado y guardado los resultados, volver al menú inicial para llevar a cabo otro proceso de cálculo.

Así, la programación de esta función quedaría de la siguiente forma:

```

function [opcion]=Traccion

opcion=0; % Se utiliza para que el programa se repita hasta pulsar la opción 1.4.
introducidas=false; % Se utiliza para que se ejecute primero la opción 1.1, que
lee los datos.
introducidas1=false; %Se utiliza para que la opción 1.3 guarde los datos de la
opción 1.1 sin haber generado los gráficos de la opción 1.2.

while (opcion~=1.4) %Nos permite ir repitiendo el programa continuamente hasta
pulsar la opción 1.4 que nos devuelve al Menú Principal.
    disp('    1.1 Lectura de datos y cálculo de resultados. ');
    disp('    1.2 Generar gráficos representativos y mostrar los resultados
calculados. ');
    disp('    1.3 Guardar resultados calculados. ');
    disp('    1.4 Volver al Menú Principal. ');

    opcion=input('                Introduce la opcion deseada: ');

    switch (opcion) %Nos permite elegir la opción que queramos.
        case 1.1
            choice=questdlg({'Será necesario introducir los archivos de
resultados';'.mat obtenidos del análisis DIC. Si no dispone de ellos,;'realice
el análisis DIC y vuelva para introducirlos. ';'¿Desea Continuar?'}','!! Warning
!!','Si','No','No');
            switch choice
                case 'Si'
                    St=input('                Introduce el valor de la Sección
Transversal en mm^2: ');
                    x=input('                Introduzca el número de ensayos
realizados: ');
                    G=input('                Cargue el archivo .csv con los datos
obtenidos de las simulaciones numéricas. Pulsa 1 para continuar: ');
                    if G==1
                        uiimport('-file')
                    end
                    for i=1:x
                        G=input(['                Cargue el archivo de resultados .mat
del análisis DIC del ensayo ',num2str(i),'. Pulsa 1 para continuar: ']);
                        if G==1
                            uiopen
                        end
                        G=input(['                Cargue el archivo .csv del ensayo
',num2str(i),'. Pulsa 1 para continuar: ']);
                        if G==1
                            uiimport('-file')
                        end
                        G=input('                ¿Cómo se han realizado las capturas de
las imágenes?. CARGA: Pulsa 1 / EXTENSIÓN: Pulsa 2: ');

```

```

        if G==1
            c=input('          Introduce el incremento de carga
en (N): ');

            [k,j]=eval(['size(SpecimenRawDataTrac' num2str(i)
            ');']);

            N1=0;
            R=0;
            cont=0;
            for n=2:k
                N2=eval(['(SpecimenRawDataTrac' num2str(i)
            '(n,2));']);

                if abs(N1-R)>abs(N2-R)&&N2>N1
                    N1=N2;
                end
                if abs(N1-R)<abs(N2-R)&&N2>N1
                    cont=cont+1;
                    T(i,cont)=N1/St;
                    R=R+c;
                end
            end
        end
        if G==2
            c=input('          Introduce el incremento de
extensión en (mm): ');

            [k,j]=eval(['size(SpecimenRawDataTrac' num2str(i)
            ');']);

            N1=0;
            R=0;
            cont=0;
            for n=2:k
                N2=eval(['(SpecimenRawDataTrac' num2str(i)
            '(n,1));']);

                if abs(N1-R)>abs(N2-R)&&N2>N1
                    N1=N2;
                    q=n;
                end
                if abs(N1-R)<abs(N2-R)&&N2>N1
                    cont=cont+1;
                    T(i,cont)=eval(['(SpecimenRawDataTrac'
num2str(i) '(q,2)/St);']);

                    R=R+c;
                end
            end
        end

        w=input(['          Introduzca el número de imágenes
analizadas en el ensayo ',num2str(i), ': ']);
        mediaE(i)=0;

```

```

mediav(i)=0;
for n=1:w
    %Cálculo de EXX media para cada estado de carga y
ensayo.

    exx_1=data_dic_save.strains(n);
    exx_1=exx_1.plot_exx_cur_formatted;
    exx_2=exx_1;
    exx_2(exx_2==0)=[];
    exx(i,n)=mean(mean(exx_2));
    %Cálculo de EXY media para cada estado de carga y
ensayo.

    exy_1=data_dic_save.strains(n);
    exy_1=exy_1.plot_exy_cur_formatted;
    exy_2=exy_1;
    exy_2(exy_2==0)=[];
    exy(i,n)=mean(mean(exy_2));
    %Cálculo de EYY media para cada estado de carga y
ensayo.

    eyy_1=data_dic_save.strains(n);
    eyy_1=eyy_1.plot_eyy_cur_formatted;
    eyy_2=eyy_1;
    eyy_2(eyy_2==0)=[];
    eyy(i,n)=mean(mean(eyy_2));
    %Cálculo de U máxima para cada estado de carga y
ensayo.

    U_1=data_dic_save.displacements(n);
    U_1=U_1.plot_u_cur_formatted;
    U_2=U_1;
    U_2(U_2==0)=[];
    U(i,n)=max(max(U_2));
    %Cálculo de V mínima para cada estado de carga y
ensayo.

    V_1=data_dic_save.displacements(n);
    V_1=V_1.plot_v_cur_formatted;
    V_2=V_1;
    V_2(V_2==0)=[];
    V(i,n)=min(min(V_2));
end
%Cálculo del Módulo de Young E(MPa).

mediaE(i)=((T(i,2)+T(i,3)+T(i,4)+T(i,5)+T(i,6)+T(i,7)+T(i,8)+T(i,9)+T(i,10)+T(i,11)+T(i,12)+T(i,13)+T(i,14)+T(i,15)+T(i,16)+T(i,17)+T(i,18))/17)/((eyy(i,2)+eyy(i,3)+eyy(i,4)+eyy(i,5)+eyy(i,6)+eyy(i,7)+eyy(i,8)+eyy(i,9)+eyy(i,10)+eyy(i,11)+eyy(i,12)+eyy(i,13)+eyy(i,14)+eyy(i,15)+eyy(i,16)+eyy(i,17)+eyy(i,18))/17);
%Cálculo del Coeficiente de Poisson.

mediav(i)=((exx(i,2)+exx(i,3)+exx(i,4)+exx(i,5)+exx(i,6)+exx(i,7)+exx(i,8)+exx(i,9)+exx(i,10)+exx(i,11)+exx(i,12)+exx(i,13)+exx(i,14)+exx(i,15)+exx(i,16)+exx(i,17)

```

```

)+exx(i,18))/17)/((eyy(i,2)+eyy(i,3)+eyy(i,4)+eyy(i,5)+eyy(i,6)+eyy(i,7)+eyy(i,8)
+eyy(i,9)+eyy(i,10)+eyy(i,11)+eyy(i,12)+eyy(i,13)+eyy(i,14)+eyy(i,15)+eyy(i,16)+e
yy(i,17)+eyy(i,18))/17);
    end
    introducidas=true;
    E=mean(mediaE); %Módulo de Young total de los 5 ensayos en
MPa.
    v=mean(mediav); %Coeficiente de Poisson total de los 5
ensayos.
    s_E=std(mediaE); %Desviación típica de los valores del módulo
de young para cada ensayo.
    s_v=std(mediav); %Desviación típica de los valores del
coeficiente de poisson para cada ensayo.
    disp('                LECTURA DE DATOS Y CÁLCULOS: CORRECTA');
    case 'No'
        disp('                Pulse 1.4 para volver al Menú Principal
y despues, pulse 3 para finalizar el programa.');
```

end

```

    case 1.2
        if (introducidas)
            disp('                La desviación típica o estandar del Módulo de
Young es:');
                s_E
            disp('                El Módulo de Young calculado en (MPa) es:');
                E
            disp('                La desviación típica o estandar del Coeficiente
de Poisson es:');
                s_v
            disp('                El Coeficiente de Poisson calculado es:');
                v

            [x,l]=size(T);
            %Gráfico Tensión-Deformación Exx de los resultados de las
simulaciones numéricas.
            figure(1);
            hold on;

            plot(ProbetaTraccPLALongitudinalAbaqus(:,2),ProbetaTraccPLALongitudinalAbaqus(:,1
)/St,'x:');

            grid on;
            hold off;
            %Gráfico Tensión-Deformación Eyy de los resultados de las
simulaciones numéricas.
            figure(2);
            hold on;

            plot(ProbetaTraccPLALongitudinalAbaqus(:,3),ProbetaTraccPLALongitudinalAbaqus(:,1
)/St,'x:');

            grid on;

```



```

hold off;
for i=1:x
    for j=1:l
        if T(i,j)~=0
            t(j)=T(i,j);
        end
        if exx(i,j)~=0
            Exx(j)=exx(i,j);
        end
        if eyy(i,j)~=0
            Eyy(j)=eyy(i,j);
        end
    end
    end
    %Gráfico Tensión-Deformación Exx para cada conjunto de
ensayos.

    figure(1);
    hold on;
    plot(Exx,t);
    xlabel('DEFORMACIÓN Exx ( $\mu\epsilon$ )');
    ylabel('TENSIÓN  $\sigma$  (MPa)');
    legend('FEM-(Media Probeta)', 'Probeta 1', 'Probeta 2', 'Probeta
3', 'Probeta 4', 'Probeta 5', 'Location', 'eastoutside');
    grid on;
    hold off;
    %Gráfico Tensión-Deformación Eyy para cada conjunto de
ensayos.

    figure(2);
    hold on;
    plot(Eyy,t);
    xlabel('DEFORMACIÓN Eyy ( $\mu\epsilon$ )');
    ylabel('TENSIÓN  $\sigma$  (MPa)');
    legend('FEM-(Media Probeta)', 'Probeta 1', 'Probeta 2', 'Probeta
3', 'Probeta 4', 'Probeta 5', 'Location', 'eastoutside');
    grid on;
    hold off;
    %Gráfico Carga-Extensión para cada conjunto de ensayos.
    figure(3);
    hold on;
    eval(['plot(SpecimenRawDataTrac' num2str(i)
'(:,1),SpecimenRawDataTrac' num2str(i) '(:,2));'])
    xlabel('EXTENSIÓN (mm)');
    ylabel('CARGA (N)');
    A{i}=['Probeta ',num2str(i)];
    set(legend(A), 'Location', 'eastoutside');
    grid on;
    hold off;

    clear t

```

```

        clear Exx
        clear Eyy
    end
else
    disp('                Los datos en la opcion 1.1 todavia no han
    sido introducidos. Introducelos para empezar a utilizar el programa.');
```

end

```

    introducidas1=true;
case 1.3
    if (introducidas)
        if (introducidas1)
            G=input('                ¿Desea guardar los gráficos generados?
Y(Pulsa 1) / N(Pulsa 0): ');
            if G==1
                nombre1='Gráfico Tracción 1';
                nombre2='Gráfico Tracción 2';
                nombre3='Gráfico Tracción 3';
                carp=uigetdir();
                nombre1=[carp, '\', nombre1];
                nombre2=[carp, '\', nombre2];
                nombre3=[carp, '\', nombre3];
                figure(1);
                saveas(gcf, nombre1, 'tiff');
                figure(2);
                saveas(gcf, nombre2, 'tiff');
                figure(3);
                saveas(gcf, nombre3, 'tiff');

                K=input('                ¿Desea guardar los datos calculados?
Y(Pulsa 1) / N(Pulsa 0): ');
                if K==1
                    nombre4='Resultados_Campo_Completo_Tracción';
                    carp=uigetdir();
                    nombre4=[carp, '\', nombre4];
                    save(nombre4);
                end
                disp('                Los resultados han sido guardados
con éxito.');
```

end

```

            if G==0
                G=input('                ¿Desea guardar los datos calculados?
Y(Pulsa 1) / N(Pulsa 0): ');
                if G==1
                    nombre4='Resultados_Campo_Completo_Tracción';
                    carp=uigetdir();
                    nombre4=[carp, '\', nombre4];
                    save(nombre4);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

                                disp('          Los resultados han sido
guardados con éxito.');
```

```

                                end
                                end
                                else
                                    G=input('          ¿Desea guardar los datos calculados?
Y(Pulsa 1) / N(Pulsa 0): ');
                                    if G==1
                                        nombre4='Resultados_Campo_Completo_Tracción';
                                        carp=uigetdir();
                                        nombre4=[carp, '\', nombre4];
                                        save(nombre4);
                                        disp('          Los resultados han sido guardados
con éxito.');
```

```

                                end
                                end
                                else
                                    disp('          Los datos en la opcion 1.1 todavia no han
sido introducidos. Introducelos para empezar a utilizar el programa.');
```

```

                                end
                                case 1.4
                                    disp('          MENÚ PRINCIPAL');
```

```

                                end
                                end
                                close all

```

De forma similar, se crea otra función correspondiente, en este caso, al ensayo de flexión. De nuevo, esta crea otro submenú con diferentes opciones:

- Opción 1: Lectura de datos y cálculos de resultados. En primer lugar, el programa pide al usuario que introduzca los valores constantes como la distancia entre los apoyos, anchura y espesor de la probeta y el número de ensayos realizados (número de probetas analizadas) por material y orientación de fibra. A continuación, se pide que introduzcan los archivos “.csv”, que contienen los datos brutos con los que se calcularán las propiedades del material y se realizan las operaciones necesarias para calcular, en este caso, el módulo de flexión para cada probeta analizada y el valor medio, así como, la desviación típica de dichos valores.
- Opción 2: Generar gráficos representativos y mostrar los resultados calculados. Con esta opción, se muestran todos los resultados y gráficas de los diagramas representativos para este ensayo como los diagramas de carga-extensión y los diagramas tensión- deformación.

- Opción 3: Guardar resultados calculados. Ahora, se procede a guardar todos los resultados obtenidos permitiendo, de nuevo al usuario, elegir la ubicación donde alojar toda esta información.
- Opción 4: Volver al menú principal. Permite, una vez se han calculado y guardado los resultados, volver al menú inicial para llevar a cabo otro proceso de cálculo.

Así, la programación de esta función quedaría de la siguiente forma:

```
function [opcion]=Flexion

opcion=0;
introducidas=false;
introducidas1=false;

while (opcion~=2.4) %Nos permite ir repitiendo el programa continuamente hasta
pulsar la opción 5 que finaliza el programa.
    disp('    2.1 Lectura de datos y cálculo de resultados. ');
    disp('    2.2 Generar gráficos representativos y mostrar los resultados
calculados. ');
    disp('    2.3 Guardar resultados calculados. ');
    disp('    2.4 Volver al Menú Principal. ');

    opcion=input('        Introduce la opcion deseada: ');

    switch (opcion) %Nos permite elegir la opción que queramos.
        case 2.1
            x=input ('        Introduzca el número de ensayos realizados: ');

            for i=1:x
                G=input(['        Cargue el archivo .csv del ensayo ',num2str(i),'.
Pulsa 1 para continuar: ']);
                if G==1
                    uiimport('-file')
                end
            end

            L=input ('        Introduce la distancia entre apoyos en mm: ');
            b=input ('        Introduce la anchura de la probeta en mm: ');
            h=input ('        Introduce el espesor de la probeta en mm: ');
            sigma_f=((3*L)/(2*b*h^2));
            epsilon_f=((6*h)/(L^2));

            for i=1:x
                X=eval(['(SpecimenRawDataFlex' num2str(i) '(:,1)*-1)']);
                Y=eval(['(SpecimenRawDataFlex' num2str(i) '(:,2)*-1)']);
```

```

        s1=((0.0005*L^2)/(6*h));
        s2=((0.0025*L^2)/(6*h));
        xx=[s1 s2];
        yy=interp1(X,Y,xx, 'linear');
        esfuerzo_flexion1=yy(1)*sigma_f;
        esfuerzo_flexion2=yy(2)*sigma_f;
        mediaEf(i)=(esfuerzo_flexion2-esfuerzo_flexion1)/(0.0025-
0.0005));
    end

    introducidas=true;
    Ef=mean(mediaEf);
    s_Ef=std(mediaEf);
    disp('                                LECTURA DE DATOS Y CÁLCULOS: CORRECTA');
case 2.2
    if (introducidas)
        disp('        La desviación típica o estandar del Módulo de Flexión
es:');

        s_Ef
        disp('        El Módulo de Flexión calculado en (MPa) es:');
        Ef
        for i=1:x
            [n,m]=eval(['size(SpecimenRawDataFlex' num2str(i) ');']);
            cont=0;
            for j=1:n
                if eval(['(SpecimenRawDataFlex' num2str(i) '(j,1));'])>=-
1.0 || eval(['(SpecimenRawDataFlex' num2str(i) '(j,1));'])<=-1.6
                    cont=cont+1;
                    if eval(['(SpecimenRawDataFlex' num2str(i)
'(j,1));'])<=-1.6
                        H(cont,1)=eval(['(SpecimenRawDataFlex' num2str(i)
'(j,1)+0.16);']);
                    else
                        H(cont,1)=eval(['(SpecimenRawDataFlex' num2str(i)
'(j,1));']);
                    end
                    H(cont,2)=eval(['(SpecimenRawDataFlex' num2str(i)
'(j,2));']);
                end
            end
        end
        %Gráfico Tensión-Deformación para cada conjunto de ensayos.
        figure(1);
        hold on;
        plot(H(:,1)*-epsilon_f,H(:,2)*-sigma_f)
        xlabel('DEFORMACIÓN (\epsilon)');
        ylabel('TENSIÓN (MPa)');
        A{i}=['Probeta ',num2str(i)];
        set(legend(A), 'Location', 'eastoutside');
    end
end

```

```

        grid on
        hold off
        %Gráfico Carga-Extensión para cada conjunto de ensayos.
        figure(2);
        hold on;
        plot(H(:,1)*-1,H(:,2)*-1)
        xlabel('EXTENSIÓN (mm)');
        ylabel('CARGA (N)');
        A{i}=['Probeta ',num2str(i)];
        set(legend(A), 'Location', 'eastoutside');
        grid on
        hold off
        clear H
    end
else
    disp('                Los datos en la opcion 2.1 todavia no han
    sido introducidos. Introducelos para empezar a utilizar el programa. ');
    end
    introducidas1=true;
case 2.3
    if (introducidas)
        if (introducidas1)
            G=input('                ¿Desea guardar los gráficos generados? Y(Pulsa
1) / N(Pulsa 0): ');
            if G==1
                nombre1='Gráfico Flexión 1';
                nombre2='Gráfico Flexión 2';
                carp=uigetdir();
                nombre1=[carp, '\', nombre1];
                nombre2=[carp, '\', nombre2];
                figure(1);
                saveas(gcf, nombre1, 'tiff');
                figure(2);
                saveas(gcf, nombre2, 'tiff');

                K=input('                ¿Desea guardar los datos calculados?
Y(Pulsa 1) / N(Pulsa 0): ');
                if K==1
                    nombre4='Resultados_Campo_Completo_Flexión';
                    carp=uigetdir();
                    nombre4=[carp, '\', nombre4];
                    save(nombre4);
                end
                disp('                Los resultados han sido guardados
con éxito. ');
            end
            if G==0

```

```

                                G=input('      ¿Desea guardar los datos calculados?
Y(Pulsa 1) / N(Pulsa 0): ');
                                if G==1
                                    nombre4='Resultados_Campo_Completo_Flexión';
                                    carp=uigetdir();
                                    nombre4=[carp, '\', nombre4];
                                    save(nombre4);
                                    disp('          Los resultados han sido
guardados con éxito.');
```

```

                                end
                                end
                                else
                                    G=input('      ¿Desea guardar los datos calculados? Y(Pulsa 1)
/ N(Pulsa 0): ');
                                    if G==1
                                        nombre4='Resultados_Campo_Completo_Flexión';
                                        carp=uigetdir();
                                        nombre4=[carp, '\', nombre4];
                                        save(nombre4);
                                        disp('          Los resultados han sido guardados
con éxito.');
```

```

                                    end
                                    end
                                    else
                                        disp('          Los datos en la opcion 2.1 todavia no han
sido introducidos. Introducelos para empezar a utilizar el programa.');
```

```

                                        end
                                        case 2.4
                                            disp('      MENÚ PRINCIPAL');
```

```

                                        end
                                    end
                                end
                                close all

```

Como complemento, se ha realizado otro programa que permite crear un archivo “.GIF”, acrónimo en inglés de Graphics Interchange Format, para representar como se distribuyen las deformaciones Exx y Eyy a lo largo de las probetas objeto de estudio. Para ello, se empleó el comando “**imagesc**” para representar, de forma gráfica, todos los valores procedentes del análisis DIC-2D.

De esta forma, la estructura del programa queda de la siguiente forma:

```

x=input ('          Introduzca el número de ensayos realizados: ');

for i=1:x
    G=input (['          Cargue el archivo de resultados .mat del análisis DIC
del ensayo ',num2str(i), '. Pulsa 1 para continuar: ']);
    if G==1
        uiopen
    end
    r=1;
    RECT=0;
    nombre='';
    w=input (['          Introduzca el número de imágenes analizadas en el ensayo
',num2str(i), ': ']);
    for n=1:w
        exx_1=data_dic_save.strains(n);
        exx_1=exx_1.plot_exx_cur_formatted;
        minimo=min(min(min(exx_1)));
        maximo=max(max(max(exx_1)));
        miniexx(n)=minimo;
        maxiexx(n)=maximo;

        exy_1=data_dic_save.strains(n);
        exy_1=exy_1.plot_exy_cur_formatted;
        minimo=min(min(min(exy_1)));
        maximo=max(max(max(exy_1)));
        miniexy(n)=minimo;
        maxiexy(n)=maximo;

        eyy_1=data_dic_save.strains(n);
        eyy_1=eyy_1.plot_eyy_cur_formatted;
        minimo=min(min(min(eyy_1)));
        maximo=max(max(max(eyy_1)));
        minieyy(n)=minimo;
        maxieyy(n)=maximo;
    end

    Minexx=min(min(min(miniexx)));
    Maxexx=max(max(max(maxiexx)));

    Minexy=min(min(min(miniexy)));
    Maxexy=max(max(max(maxiexy)));

    Mineyy=min(min(min(minieyy)));
    Maxeyy=max(max(max(maxieyy)));

    filename='exx.gif';
    filename1='exy.gif';
    filename2='eyy.gif';

```



```

carp=uigetdir();
filename=[carp, '\', filename];
filename1=[carp, '\', filename1];
filename2=[carp, '\', filename2];

for n=1:w
    exx_1=data_dic_save.strains(n);
    exx_1=exx_1.plot_exx_cur_formatted;
    figure(1), I=imagesc(exx_1);
    if RECT==0
        [exx_2, RECT]=imcrop(I);
    else
        [exx_2]=imcrop(exx_1, RECT);
    end
    figure(r), imagesc(exx_2), axis equal, colorbar, colormap jet,
    caxis([Minexx, Maxexx]), title Exx;
    frame = getframe(ffigure(r));
    im = frame2im(frame);
    [imind, cm] = rgb2ind(im, 256);
    if n == 1
        imwrite(imind, cm, filename, 'gif', 'Loopcount', inf, 'DelayTime', 1);
    else
        imwrite(imind, cm, filename, 'gif', 'WriteMode', 'append', 'DelayTime', 1);
    end

    exy_1=data_dic_save.strains(n);
    exy_1=exy_1.plot_exy_cur_formatted;
    figure(1), I=imagesc(exy_1);
    if RECT==0
        [exy_2, RECT]=imcrop(I);
    else
        [exy_2]=imcrop(exy_1, RECT);
    end
    figure(r), imagesc(exy_2), axis equal, colorbar, colormap jet,
    caxis([Minexy, Maxexy]), title Exy;
    frame = getframe(ffigure(r));
    im = frame2im(frame);
    [imind, cm] = rgb2ind(im, 256);
    if n == 1
        imwrite(imind, cm, filename1, 'gif', 'Loopcount', inf, 'DelayTime', 1);
    else
        imwrite(imind, cm, filename1, 'gif', 'WriteMode', 'append', 'DelayTime', 1);
    end

    eey_1=data_dic_save.strains(n);
    eey_1=eey_1.plot_eey_cur_formatted;
    figure(1), I=imagesc(eey_1);
    if RECT==0

```

```

        [eyy_2,RECT]=imcrop(I);
    else
        [eyy_2]=imcrop(eyy_1,RECT);
    end
    figure(r),imagesc(eyy_2),axis equal, colorbar, colormap jet,
    caxis([Mineyy,Maxeyy]), title Eyy;
    frame = getframe(figure(r));
    im = frame2im(frame);
    [imind,cm] = rgb2ind(im,256);
    if n == 1
        imwrite(imind,cm,filename2,'gif', 'Loopcount',inf,'DelayTime',1);
    else
        imwrite(imind,cm,filename2,'gif','WriteMode','append','DelayTime',1);
    end

    r=r+1;
end
end

```

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B. Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing; 2010.
- [2] Impresoras3d <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102825479-breve-historia-de-la-impresion-3d> (accessed August 01, 2017).
- [3] Ford, M. FDM Technology. *Strat. Technol.* 2015, 1–24.
- [4] Sells, E.; Smith, Z.; Bailard, S.; Bowyer, A.; Olliver, V. RepRap: The Replicating Rapid Prototyper: Maximizing Customizability by Breeding the Means of Production. SSRN eLibrary 2010.
- [5] Bogue, R. 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing? *Assem. Autom.* 2013, 33, 307–311.
- [6] All3dp <https://all3dp.com/original-prusa-i3-mk2-review-reprap-3d-printer-kit/> (accessed August 01, 2017).
- [7] 3D Systems <https://es.3dsystems.com/resources/information-guides/selective-laser-sintering/sls> (accessed August 05, 2017).
- [8] Clone3d <http://www.clone3d.co.nz/printer-and-plastic/> (accessed August 05, 2017).
- [9] 3D Systems <https://es.3dsystems.com/resources/information-guides/stereolithography/sla> (accessed August 11, 2017).
- [10] Stratasys <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/fdm-technologies/fdm-technology> (accessed August 11, 2017).
- [11] Custompartnet <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling> (accessed August 11, 2017).
- [12] Stratasys <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/polyjet-technology> (accessed August 15, 2017).
- [13] Leon-3d <http://www.leon-3d.es/guia-de-resolucion-de-problemas/> (accessed August 15, 2017).

- [14] Unrobotica <http://www.unrobotica.com/3D/3D.html> (accessed August 15, 2017).
- [15] Dima3d <http://www.dima3d.com/industria-4-0-y-fabricacion-aditiva-la-impresion-3d-como-pieza-clave-en-la-nueva-revolucion-industrial/> (accessed September 14, 2017).
- [16] Stratasys <http://www.stratasys.com/es/aplicaciones> (accessed September 16, 2017)
- [17] Cyrille Norotte; Francois S. Marga; Laura E. Niklason; Gabor Forgacs. Scaffold-free vascular tissue engineering using bioprinting. *Biomaterials* 30 (2009) 5910–5917.
- [18] 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.
- [19] Jason Cantrell; Sean Rohde; David Damiani; Rishi Gurnani; Luke DiSandro; Josh Anton; Andie Young; Alex Jerez; Douglas Steinbach; Calvin Kroese; Peter Ifju. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts. Research paper.
- [20] Todd Letcher; Megan Waytashek. Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer. November 14-20, 2014, Montreal, Quebec, Canada. DOI: 10.1115/IMECE2014-39379
- [21] Ojumu, T.; Yu, J.; Solomon, B. Production of Polyhydroxyalkanoates, a bacterial biodegradable polymers. *African J. Biotechnol.* 2004, 3, 18–24.
- [22] Yu, L.; Dean, K.; Li, L. Polymer blends and composites from renewable resources. *Prog. Polym. Sci.* 2006, 31, 576–602.
- [23] Ishida, N.; Saitoh, S.; Ohnishi, T.; Tokuhiko, K.; Nagamori, E.; Kitamoto, K.; Takahashi, H. Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for efficient production of pure L-(+)-lactic acid. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2006, 131, 795–807.
- [24] Giita Silverajah, V. S.; Ibrahim, N. A.; Zainuddin, N.; Wan Yunus, W. M. Z.; Hassan, H. A. Mechanical, thermal and morphological properties of

poly(lactic acid)/epoxidized palm olein blend. *Molecules* 2012, 17, 11729–11747.

- [25] Garlotta, D. A Literature Review of Poly (Lactic Acid). 2002, 9.
- [26] Pérez García, M^a Concepción. Tendencias en los materiales plásticos del automóvil. Centro Zaragoza, Instituto de Investigación sobre Vehículos, S.A. N° 62, Octubre/Diciembre 2014.
- [27] SIIM, «Propiedades físico-mecánicas del ABS,» [En línea]. Available: <http://www.siim.com/docs/RAE-1018.pdf>.
- [28] Thingiverse <https://www.thingiverse.com/> (accessed September 26, 2017).
- [29] Robert Sayre III. A Comparative Finite Element Stress Analysis of Isotropic and Fusion Deposited 3D Printed Polymer. Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut December, 2014.
- [30] R. F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics 3rd Edition, Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [31] MIRAVETE, A. et Al. Materiales Compuestos I y II. Barcelona: Ed. Reverté 2007. ISBN (I): 84-921349-8-4 ISBN (II): 84-921349-9-2.
- [32] BARBERO, E. J .Finite Element Analysis of Composite Materials Using AbaqusTM. Boca Raton. FL.: CRC Press. 2013. ISBN: 978-1-4665-1663-2.
- [33] BARBERO PUZUELO, E. GARCÍA CASTILLO, S. K. SÁNCHEZ SÁEZ, S. Mecánica de Materiales Compuestos. Universidad Carlos III de Madrid. 2010.
- [34] L. Li, Q. Sun, C. Bellehumeur and P. Gu, "Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 4, no. 2, pp. 129-141, 2002.
- [35] UNE-EN ISO 527. Determinación de las propiedades en tracción. ISO 527:2012. Noviembre 2012.
- [36] William F. Smith; Javad Hashemi. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Mc Graw Hill. Cuarta edición revisada.

- [37] UNE-EN ISO 178. Determinación de las propiedades de flexión. ISO 178:2010. Septiembre 2011.
- [38] CARAZO D. Integridad estructural en elementos mecánicos. Tema 6: métodos experimentales para la medida de tensiones y deformaciones. 2016. Universidad de Jaén.
- [39] PAN B, QIAN K, XIE H Y ASUNDI A. Two-dimensional image correlation for in- plane displacement and strain measurement: a review. Measurement Science Technology, 2009, Vol. 20 Núm. 6
- [40] PEZZOTTI S. ANTICO F. Estructuras III – Introducción a la Teoría de Elementos Finitos. 2007. Universidad de La Plata.
- [41] Eduardo Frías Valero. Aportaciones al estudio de las maquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Septiembre 2004.
- [42] Ultimaker, Technical Data Sheet PLA, Version 3.011, 16-05-2017.
- [43] Ultimaker, Technical Data Sheet ABS, Version 3.012, 06-06-2017.
- [44] 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.
- [45] Solidworks http://www.solidworks.com/sw/docs/student_wb_2011_esp.pdf
- [46] UNE 116005:2012. Fabricación por adición de capas en materiales plásticos. Fabricación aditiva. Preparación de probetas. Abril 2012
- [47] R3ald <http://www.r3ald.com/que-es-un-fichero-stl> (accessed October 14, 2017).
- [48] <http://reprap.org/wiki/G-code/es> (accessed October 15, 2017)
- [49] FELIPE SESÉ, L. SIEGMANN, P. DÍAZ, F. A. PATTERSON, E. A. Simultaneous in-and-out-of-plane displacement measurements using fringe projection and digital image correlation. Optics and Lasers in Engineering 2013. 52 (2014) 66-74.

- [50] Justin Blaber; Antonia Antoniou. NCORR. Instruction Manual. Versión 1.2.1. Georgia Institute of Technology. February, 2015.
- [51] LÓPEZ DÍAZ, E. Estudio experimental y numérico de materiales compuestos 2017. 102-104
- [52] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60195/fichero/2.pdf>
- [53] 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