

The logo consists of the letters 'ULL' in a bold, purple, sans-serif font. A horizontal line is positioned below the letters.

Universidad
de La Laguna

Escuela Superior de
Ingeniería y Tecnología
Sección de Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE GRADO

PROPIEDADES MECÁNICAS DE COMPONENTES FABRICADOS MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Alumno: Alejandro Javier Del Medico Bravo

Tutora: María Milagros Laz Pavón

Julio, 2017



HOJA DE IDENTIFICACIÓN

Título del trabajo fin de grado:

Propiedades mecánicas de componentes fabricados mediante modelado por deposición fundida

Autor:	Alejandro Javier Del Medico Bravo
DNI:	42242180-N
Dirección:	Calle Eduardo Westerdahl, N°7, 8°D, 38008 S/C de Tenerife, S/C de Tenerife, España
Correo:	alu0100826005@ull.edu.es

Universidad:	Universidad de La Laguna (ULL)
Facultad/Escuela:	Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología
Dirección:	Camino San Francisco de Paula, s/n, 38200 San Cristóbal de La Laguna, S/C de Tenerife, España
Titulación:	Grado en Ingeniería Mecánica (GIM)
Curso:	2016-2017
Fecha:	Julio 2017

RESUMEN

La fabricación aditiva, mediáticamente conocida como impresión 3D, está en auge y su uso está cada vez más extendido. Los desarrollos tecnológicos en este campo, más la disminución del precio de la propia impresora y el económico precio de los materiales empleados (siendo los polímeros ABS y PLA los más populares), permite que esta tecnología esté llegando a multitud de ámbitos, entre los que se incluye la ingeniería al mejorar las prácticas de prototipado rápido, las cuales tienen la innegable ventaja de reducir costes y tiempos de fabricación, así como la capacidad de producir piezas más complejas.

Es vital asegurar unos mínimos relativos a las propiedades mecánicas para un comportamiento correcto y seguro de las piezas realizadas con estas técnicas. Sin embargo, se trata de una tecnología aún muy temprana de la que se tienen muchas dudas en cuanto a conocimiento de variables relativas al proceso de impresión, mayormente desconocidas para la mayoría de usuarios, y que influyen de forma significativa en los resultados de los productos obtenidos.

El objetivo del presente trabajo es el estudio de parámetros de impresión para la determinación de las propiedades específicas de probetas fabricadas con PLA mediante Modelado por Deposición Fundida, por sus siglas en inglés FDM (Fused Deposition Modeling).

Para ello se realizarán múltiples ensayos (tracción, flexión, dureza y termogavimetría) para analizar las propiedades de las probetas fabricadas, variando entre diversos parámetros para así optimizar los que den los mejores resultados obtenidos.

Dada la amplitud de posibilidades que se abren con este proyecto, se intentará acotar los parámetros abordados y promover, para futuras líneas de investigación, los que presenten los resultados más prometedores.

ABSTRACT

Additive manufacturing, also known as 3D printing, is booming and its use is increasingly widespread. The technological developments in this field, the decrease of the price of the printer itself and the economical price of the materials used (being ABS and PLA the most popular polymeric materials) allows this technology to reach a multitude of areas, among which includes engineering by improving rapid prototyping practices, which have the undeniable advantage of reducing costs and manufacturing times, as well as the ability to produce more complex parts.

It is vital to ensure minimum relative to the mechanical properties for a correct and safe behavior of the pieces made with these techniques. However, it is a very early technology that has many doubts as to the knowledge of variables related to the printing process, largely unknown to most users, and which have a significant influence on the results of the products obtained.

The objective of the present work is to study printing parameters for the determination of the specific properties of PLA processed by FDM (Fused Deposition Modeling).

For this purpose, multiple tests (tensile, flexure, hardness and thermogravimetry) will be carried out to analyze the properties of the manufactured samples, varying between various parameters in order to optimize the ones that give the best results.

Given the breadth of possibilities that open this project, we will try to limit the parameters treated and promote those that present the most promising results for future lines of research.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. MARCO.....	9
1.2. ANTECEDENTES.....	9
1.3. OBJETIVOS	9
1.4. ALCANCE	9
2. ESTADO DEL ARTE	13
2.1. LA FABRICACIÓN ADITIVA	13
2.2. CARACTERIZACIÓN DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)	16
2.3. EL PLA	20
3. PLAN EXPERIMENTAL DE PROBETAS	23
3.1. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO.....	23
3.2. DISEÑO DE PROBETAS	23
3.3. IMPRESIÓN SIGMA 3D	26
3.4. PARÁMETROS A ESTUDIAR.....	27
3.5. PROBETAS	29
4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN	33
4.1. TRACCIÓN	33
4.2. SIMULACIÓN DE ENSAYO A TRACCIÓN POR MEF.....	35
4.3. FLEXIÓN.....	37
4.4. DUREZA VICKERS	39
4.5. ANÁLISIS TERMOGAVIMÉTRICO.....	40
4.6. REALIZACIÓN DE MICROFOTOGRAFÍAS	41
5. ANALISIS DE RESULTADOS	43
5.1. RESULTADOS DE TRACCIÓN.....	43
5.2. ANÁLISIS VISUAL DE PROBETAS ENSAYADAS A TRACCIÓN	45
5.3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE TRACCIÓN POR MEF	48
5.4. RESULTADOS DE FLEXIÓN	49
5.5. ANÁLISIS VISUAL DE PROBETAS ENSAYADAS A FLEXIÓN	51
5.6. RESULTADOS DE DUREZA VICKERS	54
5.7. ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS GEOMÉTRICOS Y DIMENSIONALES	55
5.8. ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE CURADO	55
5.9. ANÁLISIS DEL CONTROL AMBIENTAL.....	56
5.10. ANÁLISIS DEL RELLENO CONCÉNTRICO Y FABRICACIÓN EN POSICIÓN DE CANTO.....	56
5.11. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL MATERIAL.....	56

6. CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE FUTUROS TRABAJOS.....	59
7. BIBLIOGRAFÍA.....	61
7.1. NORMAS CONSULTADAS.....	61
7.2. SOFTWARES EMPLEADOS.....	61
7.3. LISTA DE REFERENCIA.....	61
8. ANEXO I: RESULTADOS DE ENSAYOS.....	63
8.1. GRÁFICAS TENSIÓN/DEFORMACIÓN DE ENSAYOS A TRACCIÓN.....	63
8.2. GRÁFICAS CARGA/FLECHA DE ENSAYOS A FLEXIÓN.....	66
9. ANEXO II: DATOS DE PARÁMETROS.....	69
9.1. REGISTRO DE HUMEDAD Y TEMPERATURA PARA CONTROL AMBIENTAL.....	69
9.2. DIMENSIONES DE PROBETAS CON FACTOR DE ESCALA.....	69
9.3. CICLO TÉRMICO DE CURADOS.....	70
10. ANEXO III: FOTOS DE PROBETAS TRAS ENSAYO.....	71
10.1. FOTOS DE PROBETAS DE TRACCIÓN.....	71
10.2. FOTOS DE PROBETAS DE FLEXIÓN.....	73
11. ANEXO IV: MICROFOTOGRAFÍAS.....	75
11.1. MICROFOTOGRAFÍAS DE TRACCIÓN.....	75
11.2. MICROFOTOGRAFÍAS DE FLEXIÓN.....	78

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Marco

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) nace como una continuación de las actividades desarrolladas en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Dicho trabajo se ha realizado junto a el área de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalurgia del departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de la Laguna (ULL).

1.2. Antecedentes

El desarrollo en los últimos años de nuevas técnicas de fabricación ha posicionado a la fabricación aditiva (AM) como una alternativa fiable y ventajosa en muchos aspectos respecto a los métodos convencionales, lo cual le garantiza un largo recorrido futuro y un sinnfín de campos de aplicación.

Con ello se abre un nuevo abanico de posibilidades a la hora de diseñar y construir instrumentos (y componentes) para alcanzar soluciones de diseño autocontenidas, es decir, de menor peso, y de fácil montaje y alineado. Se obtendrán sistemas de alta fiabilidad, a la vez que se reducirán tanto los costes de montaje y mantenimiento, como los financieros.

En consecuencia, se ha definido como una necesidad la inmersión en el desarrollo de tecnologías de fabricación aditiva.

1.3. Objetivos

Se ha definido como objetivo principal del proyecto, el avance en el conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales empleados habitualmente en el campo de la ingeniería, principalmente PLA, y en la determinación de los factores más influyentes para la obtención de piezas con buenas propiedades, empleando Modelado por Deposición Fundida (FDM) como método de fabricación aditiva. Dicho de otra manera, conocer los parámetros clave para obtener piezas con la mejor calidad posible, dado el material y la tecnología de fabricación mencionadas.

1.4. Alcance

En función del avance del trabajo se intentará profundizar en mayor o menor medida en los siguientes aspectos de la fabricación de piezas:

- Patrón de relleno
- Parámetros geométricos
- Diversos materiales
- Parámetros ambientales
- Tratamientos post-fabricación
- Posición de fabricación de las piezas

Para desarrollar el trabajo se ha dispuesto de la máquina de ensayos mecánicos AUTOGRAPH AG-IS 50kN (Figura 1) para la realización de ensayos mecánicos, ubicada en el Aula 1-14 en la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología de la ULL. Dicha máquina se puede emplear para ensayos de tracción, de flexión y, aunque no se requirió, de compresión.



Figura 1-Máquina de ensayos mecánicos empleada

En la misma aula, se localiza el microdurómetro STRUERS DURAMIN (Figura 2) para la realización de ensayos de microdureza Vickers.



Figura 2-Microdurómetro para ensayos de dureza Vickers

Por último, la impresora empleada para la fabricación, por FDM, de las piezas a ensayar fue la BCN3D SIGMA 3D (Figura 16, página 26), ubicada en el Laboratorio de Integración y Verificación Mecánica dentro de las instalaciones de la sede central del Instituto de Astrofísica de Canarias.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. La fabricación aditiva

Hoy en día, la impresión 3D está siendo cada vez más extendida y popular, permitiendo que usuarios aficionados puedan adquirir una de estas máquinas y aventurarse a crear sus propios diseños, sin embargo, las nociones sobre la impresión 3D son muchas veces equivocadas y difusas, dado que dentro de este término se engloban diferentes tecnologías y métodos de fabricación.

Todas estas tecnologías comparten un factor común, que es la adición de material para lograr una pieza final. Es por esto que, el término correcto que abarca todas estas técnicas es Additive Manufacturing (AM), traducido al español como “fabricación aditiva”, “manufactura aditiva” o “técnicas aditivas”. No obstante, los materiales, resultados y métodos de fabricación son distintos en cada una de ellas, por lo que es importante distinguir entre todos estos tipos de procesos.

De forma habitual, la fabricación aditiva acuña el término impresión 3D, siendo la impresión mediante filamento la más conocida dentro del abanico de tecnologías de fabricación aditiva. Este filamento se fundirá y depositará progresivamente capa a capa conformando un prototipo impreso.

Normalmente, para denominar la tecnología de fabricación mediante filamento se utiliza el término en inglés “Fused Deposition Modeling” (FDM), traducido al español como “Modelado por Deposición Fundida” (objeto del presente estudio), sin embargo, ésta es marca registrada por Stratasys Inc. El término equivalente, “Fabricación con Filamento Fundido”, del inglés “Fused Filament Fabrication” (FFF), fue acuñado por la comunidad de miembros del proyecto RepRap para así poder referirse a esta tecnología sin ningún tipo de limitación legal, y éste es el término que ha de ser empleado por todos aquellos que se refieran a impresoras autoreplicables (RepRap), de código abierto (open-source), DIY (Do It Yourself) o simplemente, y de forma genérica, de bajo coste (low-cost).

El uso más extendido hasta hoy, desde la invención de las técnicas aditivas en tres dimensiones, se localiza en el prototipado rápido, designado por sus siglas en inglés RP (rapid prototyping). La posibilidad de fabricar prototipos de piezas a partir de modelos 3D diseñados por ordenador, acorta los tiempos de fabricación, abaratando así el proceso de diseño de una nueva pieza para cualquier tipo de ensamble o conjunto mecánico, sin necesidad de construir caros moldes o matrices, como es propio de los procesos de fabricación sustractiva (torneado, fresado, etc). Como resultado de esta reducción temporal y económica en la construcción de un prototipo, se permite un mayor número de iteraciones, dando a los diseñadores más libertad para fabricar un mayor número de reproducciones físicas de sus diseños, lo que simplifica comprobar su funcionalidad y facilidad de montaje. Consecuentemente, los errores se minimizan y los costes de desarrollo del producto y tiempos de espera se reducen sustancialmente. Se dice que el RP puede reducir los costes de desarrollo hasta en un 70% y el time-to-market hasta un 90%. [1]

Las tecnologías más actuales para la realización de dichos prototipos son [2]:

- **Estereolitografía**

La estereolitografía (Estereolithography, SLA) es un procedimiento en el cual se solidifica una resina fotocurable (resinas epoxi y resinas acrílicas) en estado líquido mediante la acción de un láser ultravioleta, el cual dibuja una sección transversal sobre la superficie del tanque de resina, solidificando así la primera capa. Posteriormente, el elevador baja el espesor indicado por la sección especificada y se repite el proceso capa a capa.

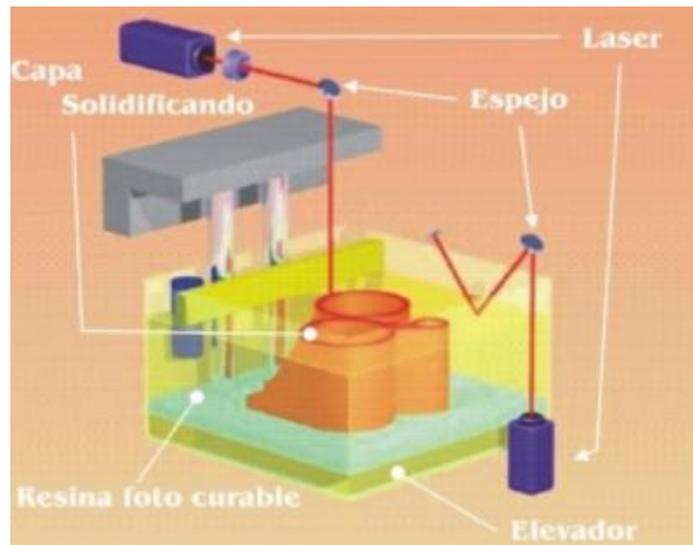


Figura 3-Esquema de Estereolitografía [2]

- **Sinterización selectiva por láser**

La sinterización selectiva por láser (Selective laser sintering, SLS) es un procedimiento prácticamente similar al anterior, pero con diferencias en cuanto al tipo de material utilizado. En este caso se utiliza un material en polvo, en lugar de utilizar líquido. El láser dibuja selectivamente una sección transversal del objeto sobre la capa de polvo, haciendo que la primera capa se sinteriza (caliente y funda) creando una masa sólida. Después se esparce otra capa de polvo y se repite el proceso hasta finalizar todas las secciones de la pieza.

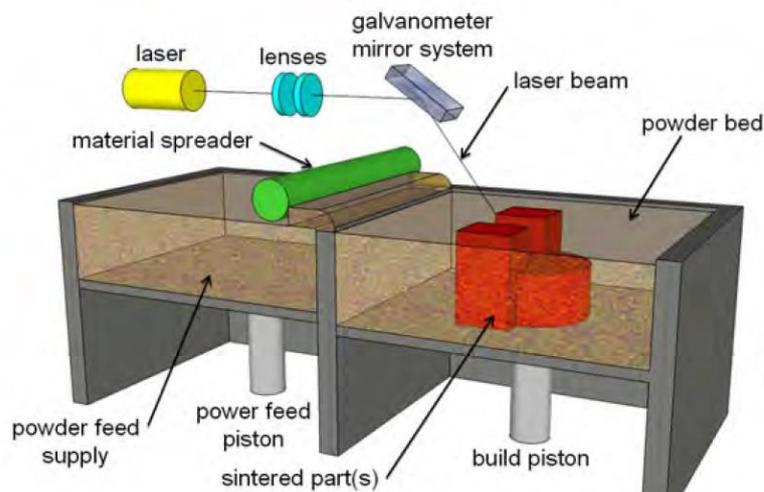


Figura 4-Esquema de Sinterización selectiva por láser [2]

- **Fabricación por corte y laminado**

La técnica de fabricación por corte y laminado (Laminated object manufacturing, LOM) está basada en la superposición y pegado sucesivo de láminas de papel cortadas por láser. Dicho láser corta los contornos de la pieza sobre un papel, de 0.1 mm de espesor, que se corresponde con la altura de capa. Los sectores de papel sobrante son cortados en cuadrículas para facilitar su remoción. A continuación, los rodillos depositan una nueva capa de papel y se repite el proceso hasta terminar todas las capas.

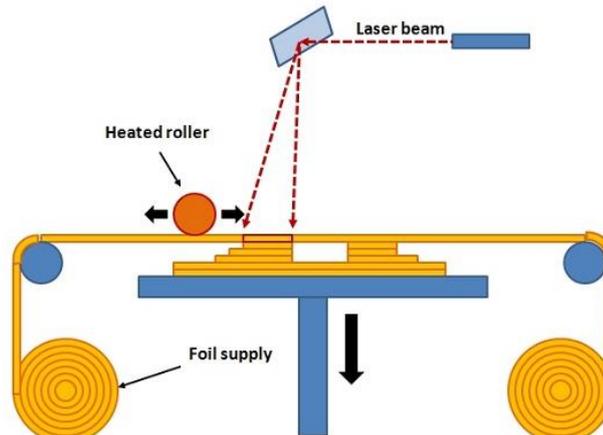


Figura 5-Esquema de Fabricación por corte y laminado [2]

- **Modelado por deposición fundida**

En el método de modelado por deposición fundida (Fused Deposition modeling, FDM) se opera extruyendo una pequeña cantidad de un termoplástico, en estado semilíquido, a través de una diminuta boquilla, formando cada sección del objetivo tridimensional sobre una plataforma que va descendiendo al finalizar cada capa.

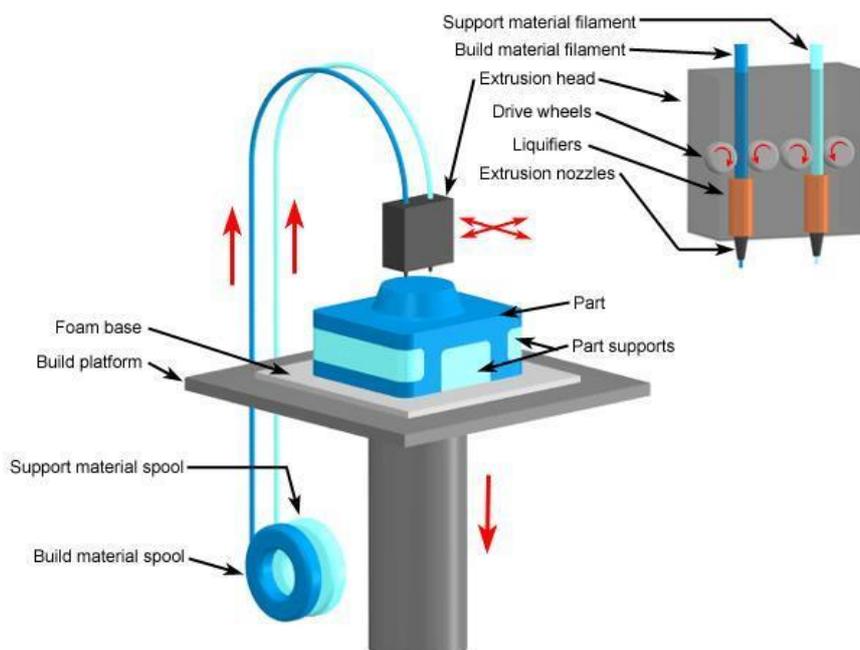


Figura 6-Esquema de Modelado por deposición fundida[2]

Las tecnologías de impresión 3D a nivel industrial son muy eficaces para segmentos en los que el volumen de piezas no es muy elevado. En el sector aeroespacial, por ejemplo, ha permitido reducir el ratio “buy to fly” – ratio de peso entre la materia prima y el producto acabado- en más de la mitad. [3]

A pesar de los evidentes avances que puede aportar a la industria por sus indiscutibles ventajas, existen limitaciones que hacen que las tecnologías AM no se hayan implantado aún de manera generalizada en muchos sectores. Estas limitaciones son debidas, sobre todo, a la reciente introducción de la AM en la industria, cuyos procesos aún están en fase de perfeccionamiento, y al desconocimiento de los diseñadores en el desarrollo orientado a estos procesos. [1]

2.2. Caracterización de Modelado por Deposición Fundida (FDM)

La fabricación mediante tecnologías FDM ha experimentado un gran auge a lo largo de los últimos años. De forma paralela, las investigaciones para conocer el comportamiento de los materiales impresos también han ido en aumento, aunque si bien es cierto, aún son escasas. Es erróneo pensar que las propiedades del material, una vez procesado con esta tecnología, seguirán siendo las mismas. Estas tenderán a verse reducidas, en mayor o menor medida, en función de los parámetros establecidos a la hora de fabricar las piezas. [4]

Los materiales más empleados en este campo son los polímeros ABS y PLA, aunque también existen otros materiales de uso mucho menos extendido, bien por el precio o bien porque la finalidad del producto no demanda exigencias específicas en el material, como el ULTEM, PC, Nylon, PET, etc.

Estos materiales poseen ciertos aditivos, los cuales pueden provocar variabilidad en las capacidades y propiedades, tanto mecánicas como térmicas, de los diferentes polímeros. Es considerado aditivo todo aquel material que va disperso físicamente en la matriz polimérica sin afectar con ello a la estructura molecular. Por ejemplo, el color del material ha de ser un factor tenido en cuenta a la hora de caracterizar las muestras, ya que, aditivos como colorantes y pigmentos están presentes. El envejecimiento y la degradación del material también se ve afectado por estos factores. [5]

Por otra parte, el espacio entre dos filamentos contiguos se define como air gap (Figura 7). Un air gap positivo indica que dos filamentos consecutivos no tienen contacto, mientras que, si este valor es negativo, la distancia entre centros es menor que el ancho de filamento. Un air gap negativo contribuye a una mayor resistencia a tracción de las piezas, ya que se rellenan los huecos vacíos entre filamentos, aumentando la densidad, y por tanto aumentando la resistencia de las uniones. Sin embargo, puede aparecer un exceso de material, que lleva consigo un mal acabado, o incluso que los filamentos contiguos presenten deformaciones. [6]



Figura 7-Tipología de air gap [5]

La dirección de extrusión del filamento también tiene una gran importancia en las propiedades mecánicas. Las piezas fabricadas manifiestan mayor resistencia en la dirección de extrusión del filamento y menor en la unión entre estos. Esta diferencia de propiedades según la dirección es lo que se conoce como anisotropía [7]. Parte del presente trabajo abordará este comportamiento.

El laminado de las capas en el eje vertical genera un efecto escalera en las geometrías curvas (Figura 8), cuya magnitud dependerá de la altura de capa. Este es un factor importante en la rugosidad y acabado superficial. A menor altura de capa, menor rugosidad y mejor acabado superficial, pero se incrementará el tiempo de fabricación.



Figura 8-Aproximación de las capas a la curvatura. Efecto escalera [5]

La diferencia de temperatura entre el material en estado fluido, a la salida de la boquilla de extrusión y el ambiente que rodea a la plataforma, produce una contracción y solidificación del material que conlleva una mala unión entre capas y una alta porosidad. Este calor se pierde mediante conducción. El enfriamiento produce tensiones internas en el material, debido a la velocidad desigual en la extrusión de las diferentes partes, pudiendo aparecer agrietamiento, contracción excesiva y por tanto dar lugar a una inexacta geometría de la pieza. Cuanto menor sea el tiempo entre dos filamentos contiguos menor será el gradiente térmico y mejor la precisión dimensional. [8]

Se han realizado diferentes modelos matemáticos sobre la transmisión de calor en FDM. Se ha demostrado de manera experimental que la calidad de la unión entre dos filamentos, depende de la temperatura del entorno y de las variaciones de las condiciones de convección durante la fabricación de la pieza. El seguimiento de temperaturas revela que las capas inferiores alcanzan temperaturas por encima de la transición vítrea y la temperatura se reduce rápidamente en la dirección de movimiento del cabezal de extrusión. El flujo de calor depende del flujo de aire, el tamaño, forma, número y distribución de las piezas en el entorno de fabricación. [9]

La formación de las uniones entre los filamentos en piezas fabricadas mediante FDM, se debe a la energía térmica del material. La historia térmica del material juega un papel fundamental en la calidad de las uniones. La calidad de la unión dependerá de la formación de un cuello de unión entre dos filamentos adyacentes y de la difusión de las cadenas a través de la unión. [10]

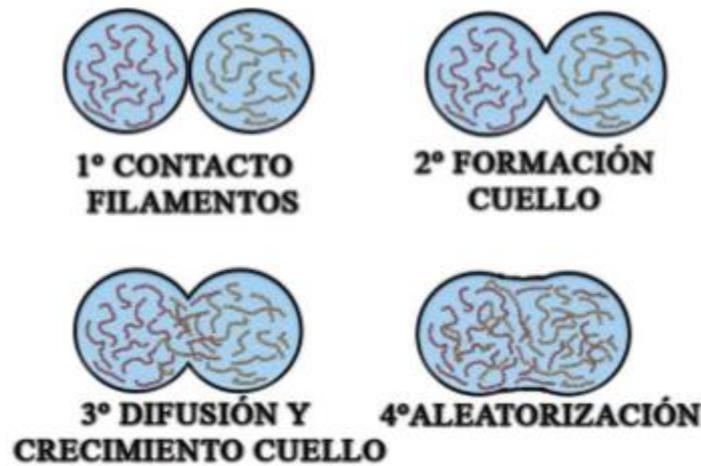


Figura 9-Formación de uniones de filamentos en FDM [5]

Como vimos en el apartado anterior, las tecnologías FDM y FFF son procesos muy similares, y los resultados entre piezas fabricadas pueden ser comparados, al menos en lo referente a la resistencia a tracción y módulo de elasticidad. [11] [12]

Las piezas impresas mediante FDM no suelen ser macizas (relleno al 100%). A mayor porcentaje de relleno, mayor tiempo de impresión y mayor consumo de plástico. En piezas destinadas al prototipado rápido, piezas con las que un diseñador sólo quiere hacerse una idea tangible de cómo serán sus diseños, los requerimientos mecánicos de la pieza no son tales como para necesitar un relleno totalmente sólido y se suele optar por el ahorro de tiempo y material. Esto determinará la masa y densidad de la pieza, así como su robustez. [13]

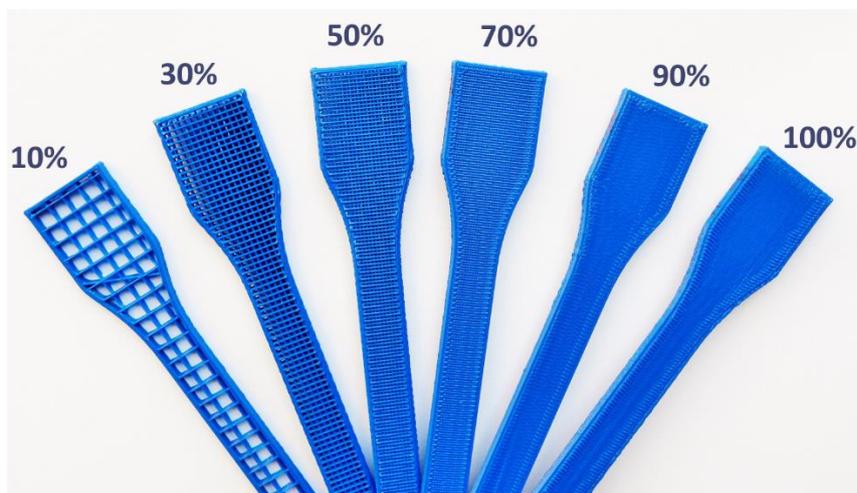


Figura 10-Diferentes porcentajes de relleno en probetas fabricadas por FDM [13]

Los patrones de relleno (Figura 11) también juegan un papel fundamental en la resistencia de las piezas, ya que, según como sea relleno el interior de la pieza, los filamentos se orientarán de un

forma u otra. Como vimos anteriormente, esto influirá en los efectos anisotrópicos de los productos fabricados. Los patrones de relleno más usados suelen ser el rectangular (también conocido como lineal o rectilinear) y el de panal de abeja (o HoneyComb). Algunos están basados en el uso de curvas, pero su uso es muy poco frecuente. [13] [14]

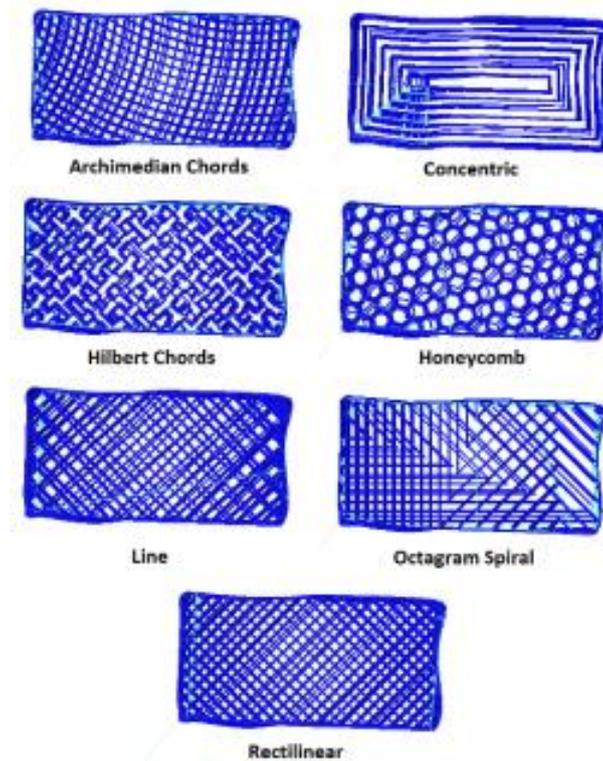


Figura 11-Tipos de patrones de relleno [14]

El *warping* (*pandeo* en español) es un fenómeno que consiste en el despegue espontáneo de la pieza durante el proceso de impresión, provocando que el cabezal de la máquina no pueda depositar las capas sucesivas de material en el lugar correcto. Es un error muy común en el uso de este tipo de tecnologías, sobre todo en usuarios poco experimentados que no tratan la superficie de impresión adecuadamente al no limpiarla o no aplicar un buen tratamiento adherente, ya sea con lacas, pegamentos o parámetros de impresión como bordes en contacto con el contorno de la base de la pieza.

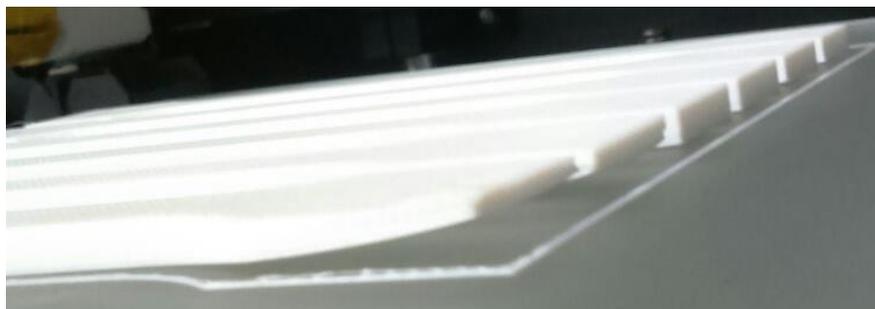


Figura 12-Ejemplo de "warping"

2.3. El PLA

El PLA (ácido poliláctico) es un poliéster termoplástico. Su forma molecular es $(C_3H_4O_2)_n$. Está siendo estudiado de forma intensiva debido a sus características amigables con el medio ambiente, su biocompatibilidad, sostenibilidad, y su uso potencial en base a sus propiedades mecánicas.

PROPIEDADES DEL PLA	
Densidad	1210 - 1250 Kg/m ³
Módulo de Young	3.45 - 3.83 GPa
Módulo de flexión [15]	2.3 - 4.9 GPa
Limite elástico	48 - 60 MPa
Resistencia a tracción	48 - 60 MPa
Resistencia a compresión	48 - 60 MPa
Elongación	5 - 7 %
Dureza Vickers	14 - 18 HV
Temperatura de fusión	160 - 177 °C
Temperatura de transición vítrea	56 - 58 °C
Temperatura máxima de servicio	70 - 80 °C

Tabla 1-Propiedades del PLA [16]

Se obtiene a partir de la sacarosa proveniente de azúcar de caña y remolacha azucarera, la lactosa proveniente de lactosuero y la dextrosa procedente de almidón hidrolizado. El proceso de fabricación más usado comienza con el ácido láctico producido por la fermentación de la dextrosa, seguido de una reacción de condensación continua de ácido láctico acuoso para producir un prepolímero de peso molecular bajo. El prepolímero se convierte en una mezcla de isómeros de lactida que junto a un catalizador realiza la reacción de ciclo. Esta mezcla de lactida se purifica con destilación en vacío.

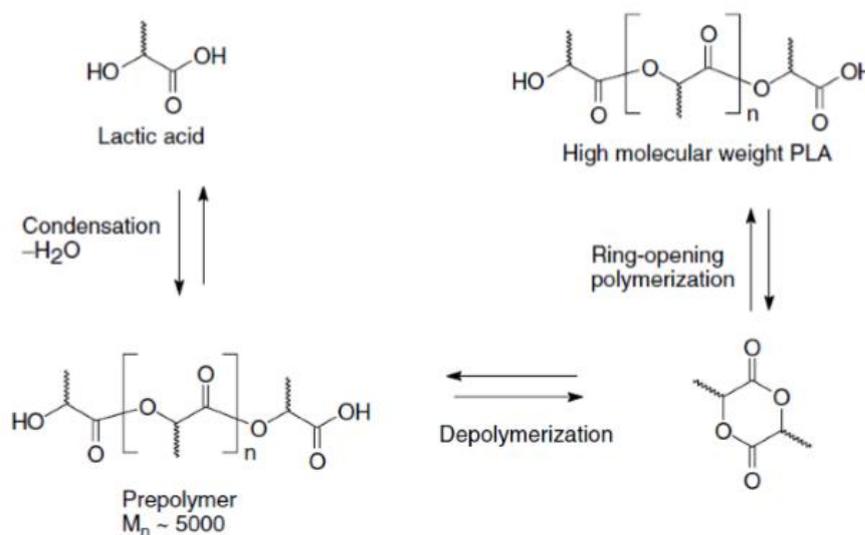


Figura 13-Esquema de la producción del PLA [3]

Por debajo de su temperatura de transición vítrea, el PLA es altamente estable, sin embargo, es propenso a degradarse con facilidad por encima de ésta temperatura y en especial si le ha dado el sol (es fotodegradable, por tanto, ha de ser aditivado para mejorar su resistencia fotoquímica). En presencia de la humedad requerida, se produce la hidrólisis, siendo el PLA biológicamente degradable por microorganismos comunes. [4]

Al igual que otros biopolímeros, es frecuentemente criticado por la necesidad de energía a veces obtenida de recursos fósiles para su fabricación. No obstante, su proceso de obtención requiere de entre un 20 a 50% menos de recursos fósiles que los materiales petroquímicos. [5]

El PLA es un material transparente en estado amorfo y a medida que va cristalizando se vuelve opaco. Así mismo, tiene una temperatura de transición vítrea y de fusión de 55°C y 175°C respectivamente. Requiere temperaturas superiores a 180°C-190°C para su procesamiento. [16]

Tiene propiedades mecánicas similares a los polímeros petroquímicos, a excepción de una baja elongación. Posee propiedades semejantes a la fuerza extensible y el módulo de elasticidad del PET. Es rígido y frágil, con una baja deformación por rotura y buena plasticidad térmica. Sus acabados son suaves, resistentes al rayado y al desgaste. [17]

En el caso de la impresión 3D, son múltiples sus ventajas. Además de un precio competitivo, permite imprimir con buena calidad (sin presencia de humedad) y puede incluso no necesitar tratamientos antes de la impresión. No es indispensable imprimirlo sobre cama caliente, aunque si es recomendable. Puede ser tan duro como el PMMA o tan blando como el polietileno o flexible como un elastómero. Además, puede ser formulado para dar una variedad de resistencias. Sin embargo, también presenta algunos inconvenientes como material para impresión; el proceso posterior de su uso en impresión (mecanizado, pintar y pegar) es mucho más complicado que el de su competidor, ABS. Puede producirse warping durante el procedimiento de enfriamiento, aunque tiene menos tendencia a producir este efecto en comparación al ABS. [17]

3. PLAN EXPERIMENTAL DE PROBETAS

3.1. Procedimiento de trabajo

El desarrollo del trabajo consistió en fijar una serie de parámetros (listados en el apartado Parámetros a estudiar, más adelante) para definir un modelo de probeta. Esta probeta sería la referencia a la hora de comparar los resultados de las otras probetas, de las cuales, solo se varió uno de esos parámetros establecidos en la referencia. Por tanto, para comparar adecuadamente los resultados entre series de probetas, las variaciones de los parámetros deben ser de 1 en 1.

Como veremos más adelante, se realizaron ensayos mecánicos de tracción y flexión. Cada uno de estos ensayos tendrían su propia probeta de referencia, ya que los resultados obtenidos en estos ensayos, no son comparables entre sí.

Por tanto, una vez fijados los parámetros a variar, se diseñan las probetas para ser fabricadas y finalmente ensayadas por los medios anteriormente dichos.

3.2. Diseño de probetas

Se han diseñado probetas para ensayo de tracción según la norma ISO 527-2:2012, y flexión según la norma ISO 178:2010. En el caso de tracción, en la norma se especificaba la probeta de tipo 1A para la realización de estos ensayos. No obstante, también se definía la probeta tipo 5A (de menores dimensiones con respecto a la 1A) pudiéndose usar en caso de que la 1A presente dificultades.

En nuestro caso, las probetas tipo 1A tardaban aproximadamente 12 horas en ser fabricadas, por lo que esto suponía una gran pérdida de tiempo frente a las 3 horas y media que demoraban las probetas tipo 5A. Por lo que, de forma general, se optó por dar prioridad a este último espécimen de probeta, y la 1A sería fabricada de forma puntual.

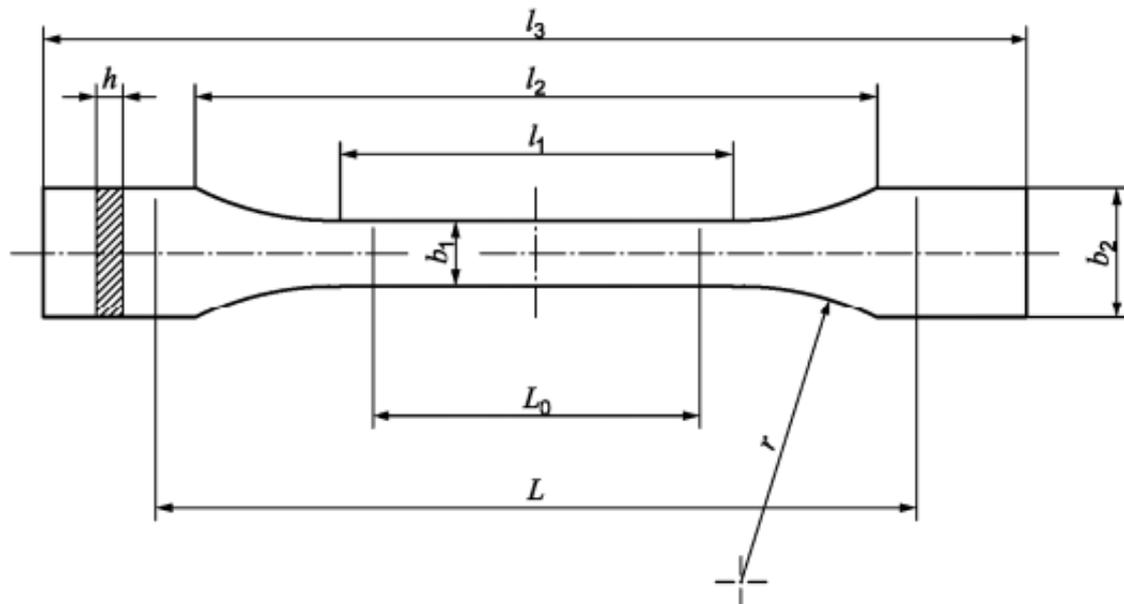


Figura 14-Probeta 1A y 1B para ensayos a tracción

Medidas en milímetros

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 ± 0,5
r radio	24 ± 1	60 ± 0,5
l_2 Distancia entre las partes anchas de caras paralelas ^b	109,3 ± 3,2	108 ± 1,6
b_2 Anchura en los extremos	20,0 ± 0,2	
b_1 Anchura de la parte estrecha	10,0 ± 0,2	
h Espesor recomendado	4,0 ± 0,2	
L_0 Longitud de referencia (recomendada) Longitud de referencia (aceptable si se requiere para el control de calidad o cuando se especifique)	75,0 ± 0,5 50,0 ± 0,5	50,0 ± 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 2-Medidas de las probetas 1A y 2B para ensayos a tracción

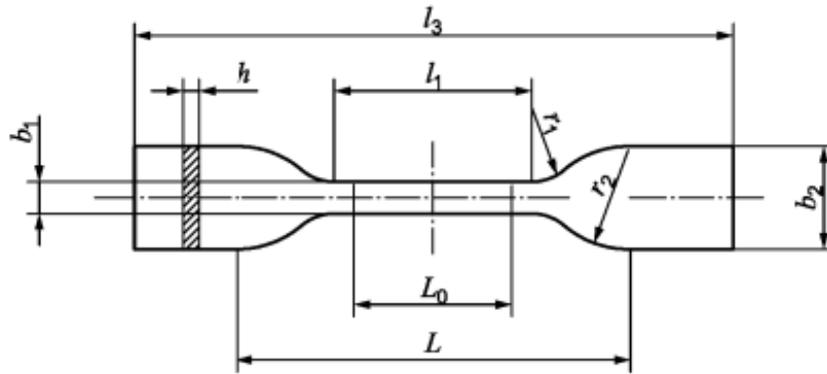


Figura 15-Probetas 5A y 5B para ensayos a tracción

Medidas en milímetros

	Tipo de probetas	5A	5B
l_3	Longitud total	≥ 75	≥ 35
b_2	Anchura en los extremos	$12,5 \pm 1$	$6 \pm 0,5$
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	25 ± 1	$12 \pm 0,5$
b_1	Anchura de la parte estrecha	$4 \pm 0,1$	$2 \pm 0,1$
r_1	Radio pequeño	$8 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$
r_2	Radio grande	$12,5 \pm 1$	$3 \pm 0,1$
L	Distancia inicial entre las mordazas	50 ± 2	20 ± 2
L_0	Longitud de referencia	$20 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
h	Espesor	$2 \pm 0,2$	$1 \pm 0,1$

NOTA Los tipos de probetas 5A y 5B son similares al tipo 5 de la Norma ISO 527-3 y representan, respectivamente, los tipos 2 y 4 de la Norma ISO 37.

Tabla 3-Medidas de las probetas 5A y 5B para ensayos a tracción

Para flexión, las dimensiones en milímetros de las probetas recomendadas, según la norma, son:

Longitud, l : 80 ± 2

Anchura, b : $10,0 \pm 0,2$

Espesor, h : $4,0 \pm 0,2$

Dichas probetas han sido modeladas empleando el programa de diseño asistido por ordenador CREO Parametric 2.0. De este programa se obtiene un fichero STL, el cual contiene el modelo 3D de la pieza. Una vez generado el fichero STL, este sería introducido en un programa slicer (en nuestro caso CURA 0.1.5) con el que podríamos ajustar los parámetros de fabricación y generar las instrucciones de impresión en un fichero GCODE. Posteriormente, dicho fichero sería introducido en la impresora y finalmente se fabricarían las muestras.

3.3. Impresión SIGMA 3D

Como punto de partida, y para tener resultados comparativos, se fijaron como parámetros de impresión los mismos que en el PFC (Relaño Pastor, Octubre 2013) [3], pues se usaba el mismo material que se utilizó en este proyecto, PLA blanco. Dichos parámetros vienen recogidos en la siguiente tabla (Tabla 4).

PARÁMETROS DE IMPRESIÓN	
Altura de capa	0.1 mm
Espesor de capa	0.4 mm
Espesor de capas inferior/superior	0.3 mm
Densidad de relleno	100 %
Velocidad de impresión	60 mm/s
Temperatura de impresión	195 °C
Temperatura de cama	55 °C

Tabla 4-Parámetros de impresión en los ensayos

Para llevar un registro de las condiciones de temperatura y humedad del laboratorio, se dispuso de un medidor de temperatura de interiores y exteriores, a la vez que de dos medidores de humedad y temperatura (CENTER 314 y PCE 313-A). El sensor para temperaturas interiores se colocó debajo de la mesa de impresión, dentro de la máquina, y ambos sensores de los medidores de humedad y temperatura se posicionaron en la parte superior de la máquina (ver Figura 16). Los valores correspondientes a estos datos se tomaron en tres momentos de la impresión: al iniciar, un punto intermedio y al finalizar. Estos valores se registraron en una hoja Excel (Tabla 6-Valores registrados de temperatura y humedad durante la fabricación de probetas en la página 69.).

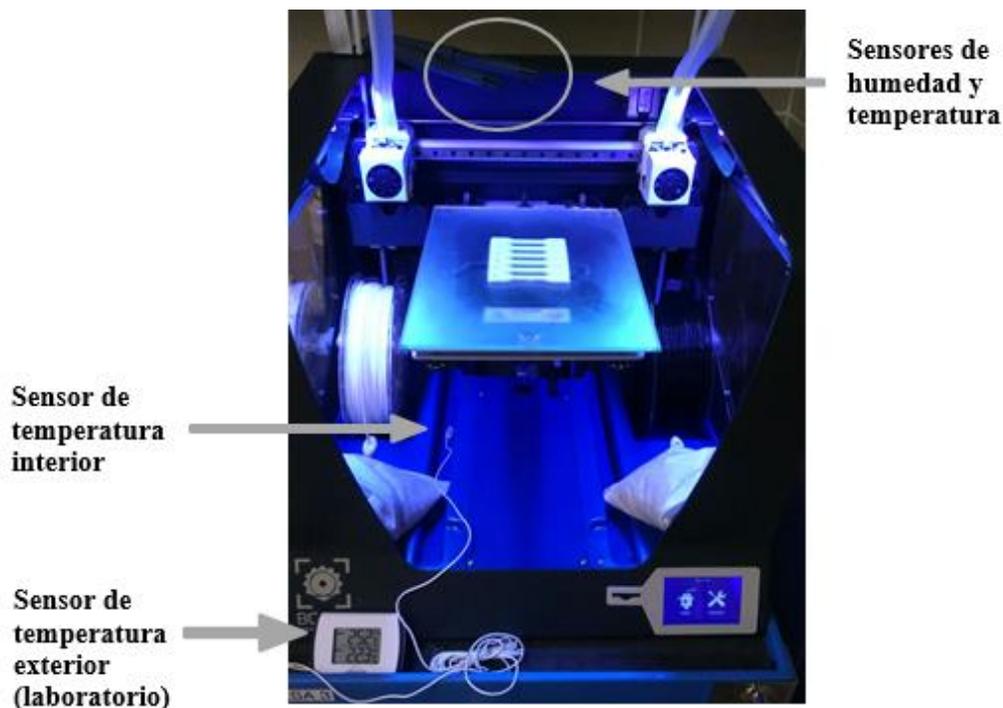


Figura 16-Distribución de aparatos de medida sobre la impresora SIGMA 3D

3.4. Parámetros a estudiar

A continuación, se listan los parámetros que se fueron alternando.

- **Geometría:** Se varió entre los tamaños A1 (probeta grande) y 5A (probeta pequeña) que están dentro de la norma, vistos en el apartado Diseño de probetas. Con este ensayo se pretende observar si hay algún tipo de cambio al variar las dimensiones de las probetas.
- **Escalado:** Se hacen modificaciones de las dimensiones normalizadas de las probetas, aplicando factores de escala para obtener dimensiones de interés (ver en apartado *Dimensiones de probetas con factor de escala*, página 69), las cuales serían dimensiones que fueran suficientemente grandes para ensayarlas con comodidad a tracción y suficientemente pequeñas para que el tiempo de fabricación no fuese demasiado prolongado. El objetivo de estos ensayos era el mismo que el del parámetro anterior (Geometría).
- **Curado:** Se aplicó un curado como post-tratamiento térmico, calentando las probetas en el horno y dejándolas enfriar lentamente dentro de este, pudiendo aplicar vacío o no. El objetivo era reblandecer el PLA tras haber sido fragilizado por la humedad, buscando restablecer sus propiedades iniciales.



Figura 17-Horno empleado para el curado de las probetas (instalaciones del IAC)

- **Control ambiental:** Se controlan las condiciones ambientales de humedad y temperatura del laboratorio con la ayuda de un deshumidificador en la zona donde se ubicaba la impresora. El objetivo era observar si, al controlar las condiciones ambientales a la hora de fabricar las piezas, ayudaba a mejorar sus propiedades mecánicas.
- **Patrón de relleno:** como referencia, se emplearon rellenos de tipo rectangular (alternando capas de filamento a 45°, Figura 18), y se varió al de tipo concéntrico (en forma de capas que siguen el contorno de la pieza, Figura 19), de esta forma se reorientarían los filamentos y se podría evaluar la importancia de los efectos de las anisotropías. Algunos programas slicer permiten fijar estos tipos de relleno de forma predeterminada. En nuestro caso, para conseguir el relleno concéntrico, se tuvo que aumentar el espesor de perímetro hasta que ocupara la totalidad del volumen de la probeta, ya que nuestro software slicer (CURA) no tiene por defecto esta opción. Únicamente nos permitía el relleno rectangular por defecto.

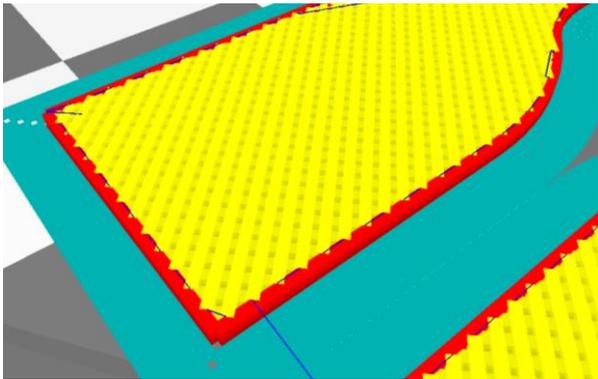


Figura 18-Relleno rectangular

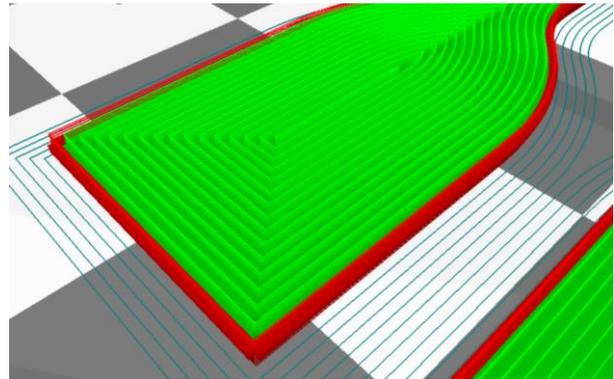


Figura 19-Relleno concéntrico

- **Posición de impresión:** dependiendo de la posición en la que las piezas sean impresas, la orientación de sus capas cambiará, ya que la impresora añade las capas siempre de la misma forma (de abajo hacia arriba). Como referencia, las probetas son impresas en posición horizontal (Figura 20), sobre su ancho, y de forma puntual se han impreso en posición de canto (Figura 21), sobre su espesor. Igual que en el punto anterior (Tipo de relleno) se pretendía estudiar los efectos de las anisotropías.

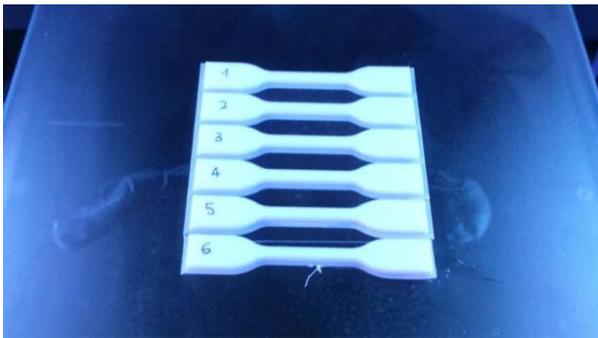


Figura 20-Probetas fabricadas en posición horizontal

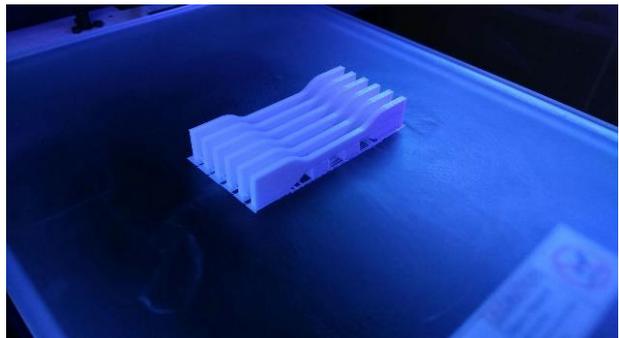


Figura 21-Probetas fabricadas en posición de canto

- **Material:** el material empleado durante todo el proyecto fue PLA blanco. Este es el tipo de PLA más empleado y caracterizado. Se comenzó utilizando la bobina de este material que ya se encontraba instalado en la impresora al inicio del proyecto. Dicha bobina había estado expuesta a un largo periodo de humedad dentro del laboratorio, por lo que se cambió esta por una bobina nueva del mismo material. El material ha sido provisto por la empresa 3D Invasión. Con este parámetro podríamos comparar los efectos de la fragilización debido a la propiedad higroscópica del PLA, es decir, de absorber humedad.

3.5. Probetas

La norma UNE 116005 estipula que se deben de ensayar 5 probetas por serie. Sin embargo, para respaldar cada conjunto de probetas, en caso de que algún ensayo se ejecutara erróneamente, se han fabricado y ensayado 6 probetas por serie. En total, se fabricaron 14 series, de las cuales 9 fueron destinadas para ensayarlas a tracción y 5 para flexión.



Figura 22-Totalidad de las probetas fabricadas y ensayadas

Se utilizó el siguiente código para ubicar los datos registrados de cada probeta.

DDMMAA-X

DD – Día de impresión

MM – Mes de impresión

AA – Año de impresión

X – Se emplea para diferenciar series de probetas que fueron impresas el mismo día, por orden de impresión.

En la siguiente tabla (Tabla 5) se recogen cada una de las series de probetas fabricadas y ensayadas en orden cronológico de fabricación, indicando las modificaciones de parámetros correspondientes que se le aplicó a cada una, así como los parámetros iniciales de partida de las series de probeta con la designación “Referencia”. Los parámetros cambiados se hacen siempre con respecto a las probetas de “Referencia” de los ensayos de tracción y flexión.

CÓDIGO	ENSAYO	DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN / PARÁMETROS
140217	Tracción	Referencia	<ul style="list-style-type: none"> • Geometría de probeta tipo 5A • Relleno rectangular • Fabricado en posición horizontal • PLA al inicio del proyecto • Sin control ambiental • Sin post-tratamiento
150217	Tracción	Geometría 1A	<ul style="list-style-type: none"> • Se cambia la probeta tipo 5A por la tipo 1A (Medidas en la Tabla 2)
160217	Tracción	Curado (55°C, 3 horas)	<ul style="list-style-type: none"> • Curado como post-tratamiento: 55°C durante 3 horas. Enfriamiento dentro del horno (24 horas). Sin vacío <p>Gráfica 10-Ciclo térmico para "Curado 55°C y 3 horas" (ver página 70)</p>
200217	Tracción	Control ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Control ambiental: HR a 36.85 % y temperatura ambiental: 21.3 °C <p>Tabla 6-Valores registrados de temperatura y humedad durante la fabricación de probetas (ver página 69)</p>
210217-1	Tracción	Relleno concéntrico	<ul style="list-style-type: none"> • Se cambió el relleno rectangular por relleno concéntrico
210217-2	Tracción	Escalado 17/10	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones de la probeta tipo 5A, aplicando factor de escala 17/10 (ampliación)
010317	Tracción	Escalado 5/8	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones de la probeta tipo 1A, aplicando factor de escala 5/8 (reducción)
030317	Tracción	Posición de canto	<ul style="list-style-type: none"> • Cambió de fabricación en posición horizontal a posición de canto
070317	Flexión	Referencia	<ul style="list-style-type: none"> • Relleno rectangular. • Fabricado en posición horizontal. • PLA al inicio del proyecto. • Sin control ambiental. • Sin post-tratamiento.
080317	Flexión	Curado (60°, 5 horas)	<ul style="list-style-type: none"> • Curado como post-tratamiento: 60°C durante 5 horas. Enfriamiento dentro del horno (48 horas). Se aplicó vacío <p>Gráfica 11-Ciclo térmico para "Curado 60°C y 5 horas" (página 70)</p>
090317-1	Flexión	Material nuevo	<ul style="list-style-type: none"> • Se cambió a una bobina de PLA nueva
090317-2	Tracción	Material nuevo	<ul style="list-style-type: none"> • Se cambió a una bobina de PLA nueva
100317-1	Flexión	Material nuevo y relleno concéntrico	<ul style="list-style-type: none"> • Se cambió a una bobina de PLA nueva • Se cambió el relleno rectangular por relleno concéntrico
100317-2	Flexión	Material nuevo y posición de canto	<ul style="list-style-type: none"> • Se cambió a una bobina de PLA nueva • Cambió de fabricación en posición horizontal a posición de canto

Tabla 5-Listado de probetas fabricadas y ensayadas

En el caso de las dos últimas series de flexión: “100317-1_Flexion: Material nuevo y relleno concéntrico” y “100317-2_Flexion: Material nuevo y posición de canto”, se han aplicado dos cambios de parámetros simultáneamente y deben compararse con respecto a la serie “090317-1_Flexion: Material nuevo”. Esta complicación se debió, a que, en las últimas etapas de fabricación de probetas, no se pudo volver a disponer de la bobina de PLA original que se empleó en un principio.

4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

4.1. Tracción

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta a un esfuerzo axial creciente hasta que se produce la rotura de la misma. Se ha llevado a cabo consultando la norma ISO 527-1:2012 e ISO 527-2:2012 para la determinación de las propiedades en tracción.

Las partes anchas de la probeta se fijan en las mordazas. En nuestro caso, la mordaza inferior es fija mientras que la superior es móvil y será la que aplique la carga en sentido ascendente. Para el ensayo se fija una velocidad, que se mide en mm/min, y será a la cual, la mordaza superior se desplazará. Siguiendo las normas antes mencionadas, para probetas pequeñas se fija una velocidad de 0.5 mm/min y 1 mm/min para probetas grandes (“Geometría 1A” y “Escalado 17/10”).

Como los desplazamientos registrados por el bastidor de la máquina son imprecisos, pues esta también recoge desplazamientos de segundo orden (como deslizamientos dentro de la mordaza), se emplea un extensómetro que recogerá las medidas con mayor precisión.

Previamente han de introducirse los valores calibrados de espesor y anchura de las probetas dentro del programa de la máquina, por lo que esta dibujará una gráfica Tensión/Deformación como es propio en un ensayo a tracción.

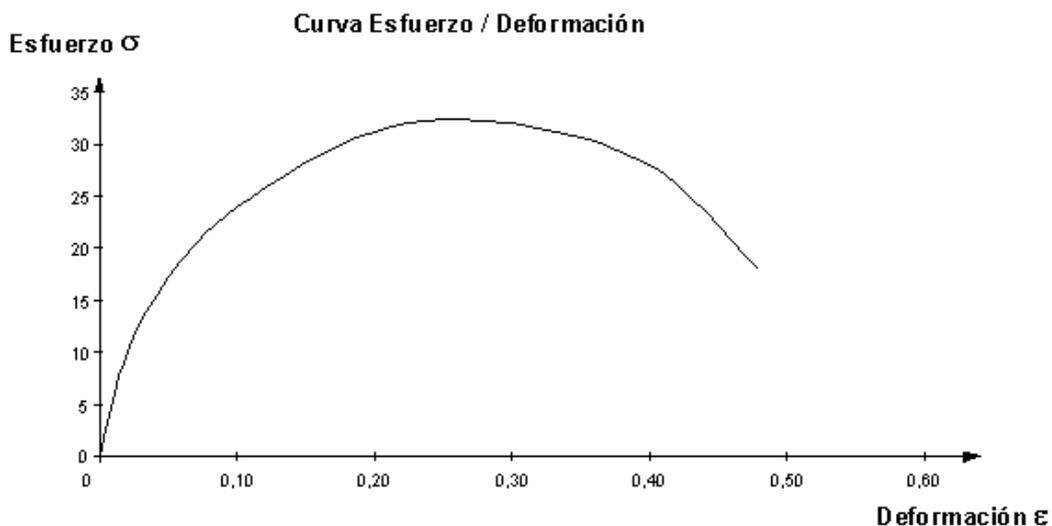


Figura 23-Curva Tensión/Deformación (o Esfuerzo/Deformación) característica de ensayos a tracción



Figura 24-Montaje para ensayos de tracción

Como se puede ver en la *Figura 24-Montaje para ensayos de tracción*, los extremos de nuestro extensómetro no sujetan la probeta por la zona delgada de esta, sino por la parte ancha. Esto ocasionará que se obtengan deformaciones no lineales y por tanto los resultados de estos ensayos no serán exactos (se excluyen de este caso las series “*Geometría 1A*”, “*Escalado 17/10*” y “*Escalado 5/8*” al ser suficientemente grandes como para que el extensómetro si pueda sujetarlo por la zona delgada). No obstante, los valores obtenidos seguirán siendo válidos para realizar comparaciones cuantitativas entre las probetas ensayadas en el presente estudio.

Los resultados obtenidos en este ensayo serán:

- **El módulo elástico (o módulo de Young).** Se obtiene de la parte lineal de la curva Tensión/Deformación o zona elástico, que cumple la Ley de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

Donde:

“ σ ” es la tensión axial que sufre la probeta. Se calcula con el cociente de la carga entre la sección de la probeta. [MPa]

“E” es el módulo elástico del material. [MPa]

“ ϵ ” es la deformación, en este caso, axial que se obtiene del cociente del alargamiento en cada punto entre la longitud inicial medida (siendo siempre de 50 mm, dado el rango del extensómetro). Se expresa como valor adimensional o en porcentaje [%].

Para obtener el módulo, se han representado en Excel las curvas Tensión/Deformación y se ha ilustrado la recta de tendencia lineal en la zona elástica de dicha curva, es decir, se obtiene la pendiente de la zona elástica. La recta de tendencia tendrá la forma [$y=ax-b$], siendo “a” el valor directo del módulo elástico “E”.

- **La tensión máxima.** Es la tensión más alta alcanzada por la probeta, es decir, es el valor más grande registrado en el eje de ordenadas.
- **La deformación máxima o a rotura.** Es la deformación más alta alcanzada que se obtiene en el punto en el que la probeta rompe, es decir, el último valor registrado en el eje de abscisas.

4.2. Simulación de ensayo a tracción por MEF

Con el fin de obtener un modelo para comparaciones cualitativas del ensayo a tracción, y evaluar donde se producen las mayores tensiones, se realizó una simulación por Método de Elementos Finitos (MEF). Se empleó como plataforma el software ANSYS Workbench.

El tipo de estudio era un análisis estructural estático de un elemento sólido. Consistía en simular el ensayo a tracción de la probeta “Referencia”, considerándose que se trataba de un material continuo e isotrópico.

Dada la geometría del estudio, se aplicó simetría en los 3 planos ortogonales, ubicando el origen de coordenadas en el centro de masas de la probeta. Como resultado, se llevó a cabo el análisis de un octavo de la probeta en cuestión, ahorrando así gran cantidad de recursos informáticos.

Se empleó una carga de 1000 N en dirección X, aplicado sobre el espesor de la parte ancha de la probeta, en la cara normal a la dirección X.

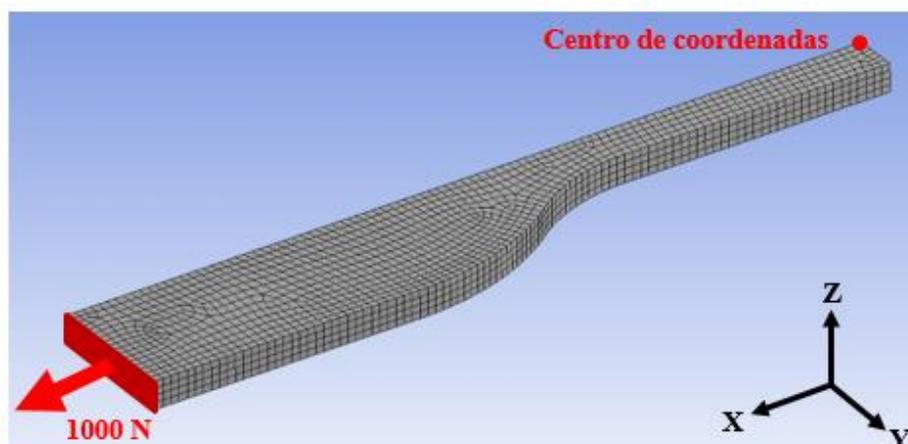


Figura 25-Modelo y mallado empleado en la simulación en ANSYS

Para la comparación de cálculos analíticos, se empleó la definición de presión como fuerza sobre una superficie:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{1000 \text{ N}}{1.3 \text{ mm} * 2 \text{ mm}} = 384.62 \text{ MPa} \quad (2)$$

Donde:

“ σ ” es la tensión [MPa].

“F” es la carga aplicada [N]

“A” es la sección de la parte estrecha [mm²] (por simetría, solo la 4^a parte de la sección)

Además de esto, es de esperarse que se produzca una concentración de tensiones en el radio antes de la parte estrecha.

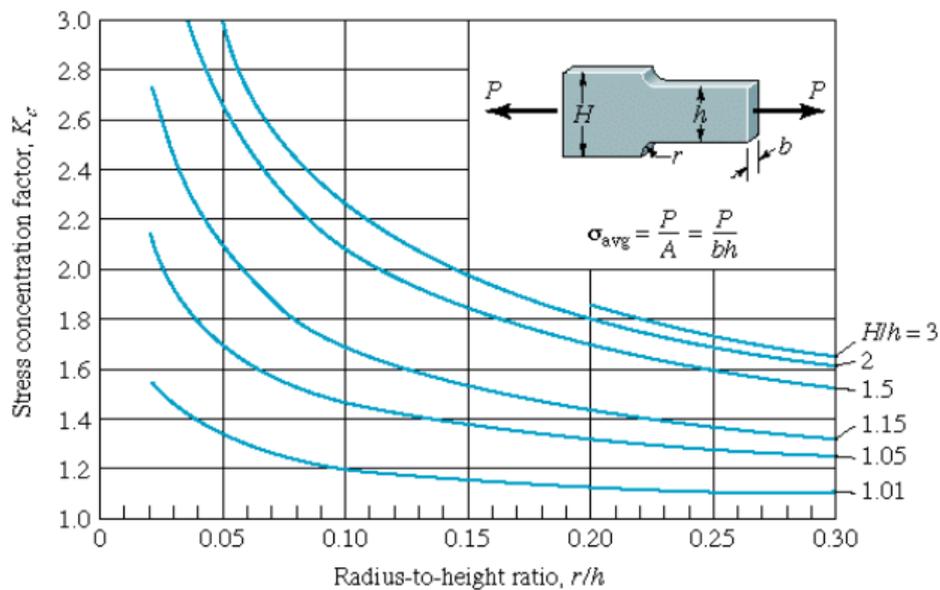


Figura 26-Factor "Kc" de concentración de tensiones para placa rectangular con entalla. Carga axial

En nuestro caso:

$$H=12.5 \text{ mm}$$

$$h=4 \text{ mm}$$

$$r=8 \text{ mm}$$

Por lo que nuestros valores serian:

$$\frac{H}{h} = \frac{12.5 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 3.125 \quad (3)$$

$$\frac{r}{h} = \frac{8 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 2 \quad (4)$$

El valor de $H/h=3.125$ podemos aproximarlo a la curva de valor 3. Dado que, en la gráfica solo se ha representado hasta el valor de 0.30 el dato de r/h en el eje de abscisas, no podemos obtener el

valor exacto, pero podríamos intuir que al seguir el comportamiento asintótico que presenta la curva, que el factor de concentración de tensiones “Kc” estará por debajo de 1.6.

4.3. Flexión

El ensayo de flexión se ha llevado a cabo según la norma ISO 178:2010 para la determinación de las propiedades en flexión. Consiste en aplicar a una barra, soportada libremente, una carga transversal sobre la sección media de esta (ensayo con carga en tres puntos). Se ha optado por el Método A propuesto en la norma, es decir, se empleará la misma velocidad de deformación a lo largo del ensayo; 2 mm/min para la probeta en cuestión.

Al igual que en el ensayo de tracción, se han de introducir los valores calibrados de espesor y anchura de cada probeta en el programa de la máquina antes de iniciar el ensayo.

En este caso, no se requiere de un extensómetro para registrar los desplazamientos y como es propio de un ensayo de flexión, se mostrará por pantalla la gráfica de Carga/Flecha.

El ensayo se detiene hasta que la probeta rompa o se alcance una flecha de 15 mm.

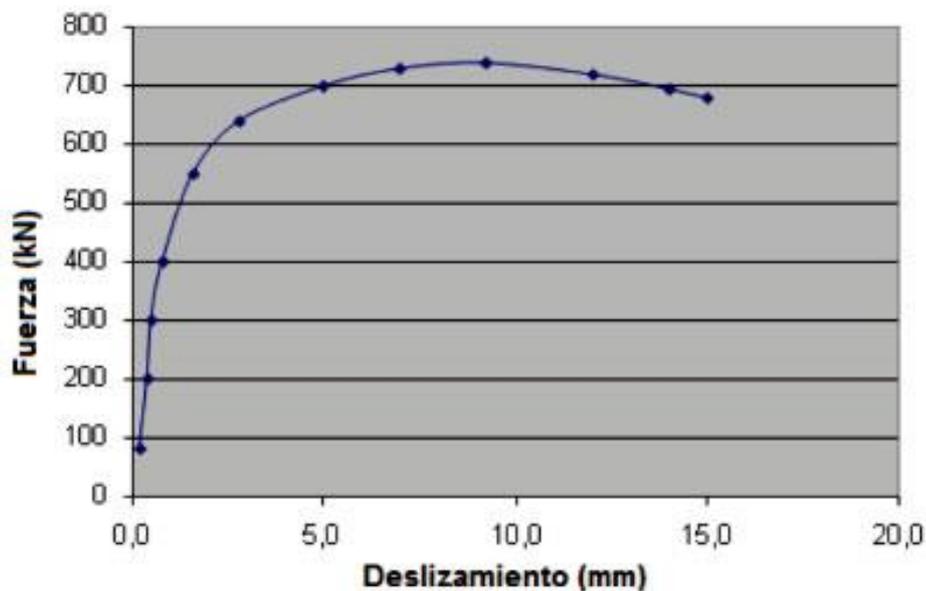


Figura 27-Curva Carga/Flecha (o Fuerza/Deslizamiento) característica de ensayos a flexión

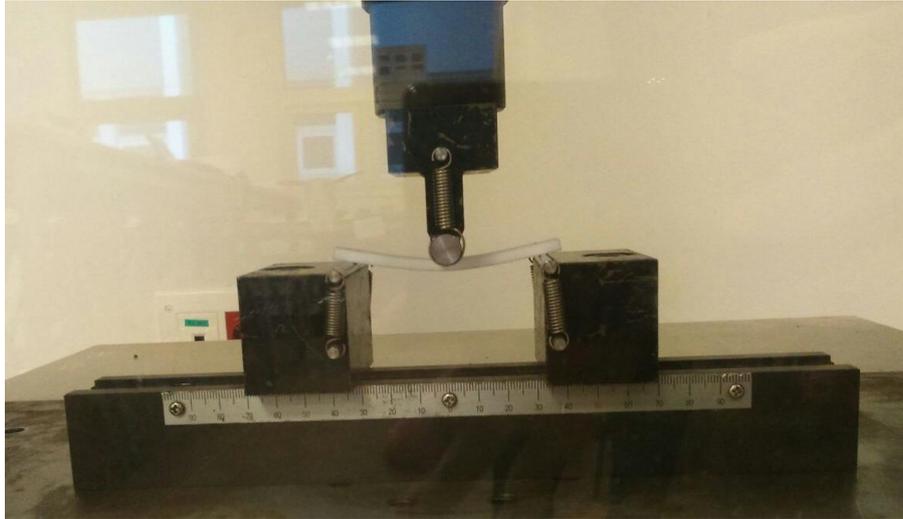


Figura 28-Montaje para ensayos de flexión

Para este ensayo, los resultados que se obtienen son:

- **Módulo de flexión.** Se obtiene a partir de la pendiente, m , de la curva Carga/Flecha en la región elástica. Dicha pendiente se obtuvo en Excel al representar la recta de regresión en la zona elástica de la curva Carga/Flecha. El módulo se define como:

$$E_{fl} = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (5)$$

Donde:

“ E_{fl} ” es el módulo de flexión. [MPa]

“ L ” es la distancia entre soportes. [64 mm en todos los casos según la norma]

“ b ” es el ancho de la probeta. [mm]

“ h ” es el espesor de la probeta. [mm]

- **Tensión máxima.** Es el esfuerzo flector máximo que sufre la probeta durante el ensayo. Se obtiene con la siguiente expresión, a partir de la carga “ F ” más alta registrada.

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (6)$$

Donde:

“ σ ” Es la tensión máxima a flexión [MPa]

“ F ” es la fuerza máxima alcanzada durante el ensayo. [N]

- **Deformación máxima a rotura.** Es la deformación de flexión más alta alcanzada antes de romper o sufrir la primera fractura. En algunos casos las probetas llegaron a los 15 mm de flecha máxima sin romper.

$$\varepsilon_{fl} = \frac{6sh}{L^2} \quad (7)$$

Donde:

“ ε_{fl} ” es la deformación máxima a rotura [%].

“s” es la flecha máxima alcanzada por la probeta, se puede tomar como el desplazamiento del travesaño de la máquina de ensayos [mm].

4.4. Dureza Vickers

El ensayo consiste en hacer, sobre la superficie de una probeta, una huella con un penetrador en forma de pirámide recta de base cuadrada con determinado ángulo (136°) y medir las diagonales “D₁” y “D₂” de dicha huella después de quitar la carga “P”, tras un tiempo de aplicación “t”, y realizando la media (ecuación 8) de las diagonales “D”. Posteriormente se calcula el valor de la dureza “HV” (ecuación 9).

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (8)$$

$$HV = \frac{1.854 * P}{D^2} \quad (9)$$

Donde:

“D” es la media de las diagonales de la huella [mm].

“D₁” y “D₂” son las diagonales de la huella [mm].

“P” es la carga aplicada. [kg]

No obstante, gracias al utillaje empleado, no hubo necesidad de realizar ninguna operación matemática. Solo se requería medir las longitudes de las diagonales de la huella “D₁” y “D₂”, con la ayuda del microscopio del microdurómetro, para obtener directamente el valor de la dureza “HV”.

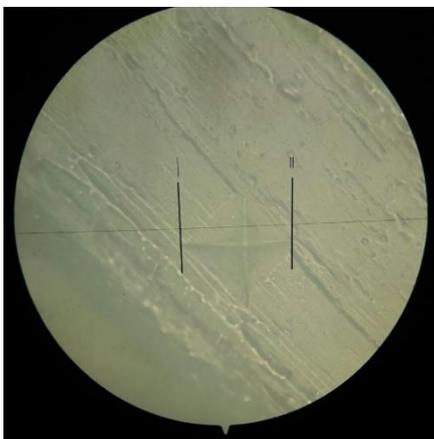


Figura 29-Toma de valor "D₁"

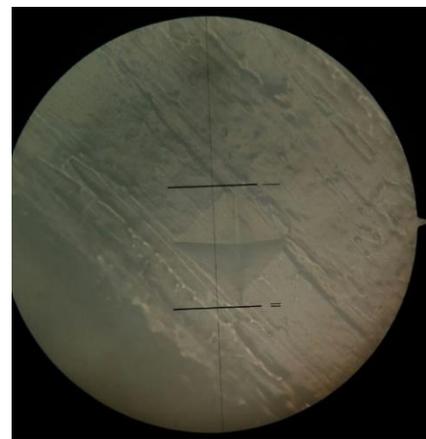


Figura 30-Toma de valor "D₂"

En este caso no se ha encontrado una norma para realizar ensayos de dureza Vickers sobre muestras de materiales plásticos fabricados por métodos de fabricación aditiva. Por lo tanto, preliminarmente se fueron probando distintos valores de carga hasta acotar uno en el que se pudieran visualizar y medir con comodidad las huellas en la máquina.

Los valores fueron:

$$P = 0.2 \text{ kg}$$

$$t = 5 \text{ segundos}$$

Se tomó la dureza en 8 puntos, longitudinalmente, de cada probeta ensayada, con una separación entre puntos de 3 mm.

4.5. Análisis termogavimétrico

En un análisis termogavimétrico (TGA) se registra, de manera continua, la masa de una muestra colocada en una atmósfera controlada, o bien en función de la temperatura (experimento dinámico), o bien en función del tiempo (experimento isoterma).

De este estudio se podrá saber qué cambios físicos experimenta el material con la temperatura, es decir si, presenta una temperatura de fusión o cuando ocurre la transición vítrea, T_g . Esto es muy importante para el diseño del proceso de fabricación, ya que por debajo de estas temperaturas el material se comportará como un sólido y por encima como un material viscoelástico con capacidad de fluir bajo la acción de una fuerza. Además, nos interesa saber cómo de estable es nuestro material térmicamente para saber que temperatura máxima de trabajo se puede utilizar sin degradar sus propiedades o hasta que temperatura va a resistir el producto final.

Para este trabajo, se le envió al Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI) las muestras a estudiar para realizar dicho análisis. Las muestras enviadas fueron:

- Filamento del material: para saber cómo se comporta el material antes de ser extruido por la impresora.
- 140217_Traccion: Referencia: para saber cómo se comporta el material una vez procesado por FDM.
- 080317_Flexion: Curado (60°C, 5 horas): observar si el curado influye de alguna manera en su comportamiento térmico posterior.
- 090317-2_Traccion: Material nuevo: analizar como el estado del material genera cambios en el comportamiento térmico.

4.6. Realización de microfotografías

El análisis visual de las probetas ensayadas se hizo con la ayuda de microfotografías (disponibles en ANEXO IV: MICROFOTOGRAFÍAS, página 75) realizadas con Dino-Lite Digital Microscope a 60 aumentos. Se les hizo las microfotografías a las dos probetas más representativas de cada serie, en la zona en la que estas rompían.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación, se exponen en graficas comparativas, los resultados de módulo elástico, tensión máxima y deformación máxima obtenidos de los ensayos de tracción y flexión. Estos datos se han calculado como la media aritmética de los valores obtenidos en cada serie (constando cada serie de 6 probetas), también se han representado los valores de las desviaciones estándar.

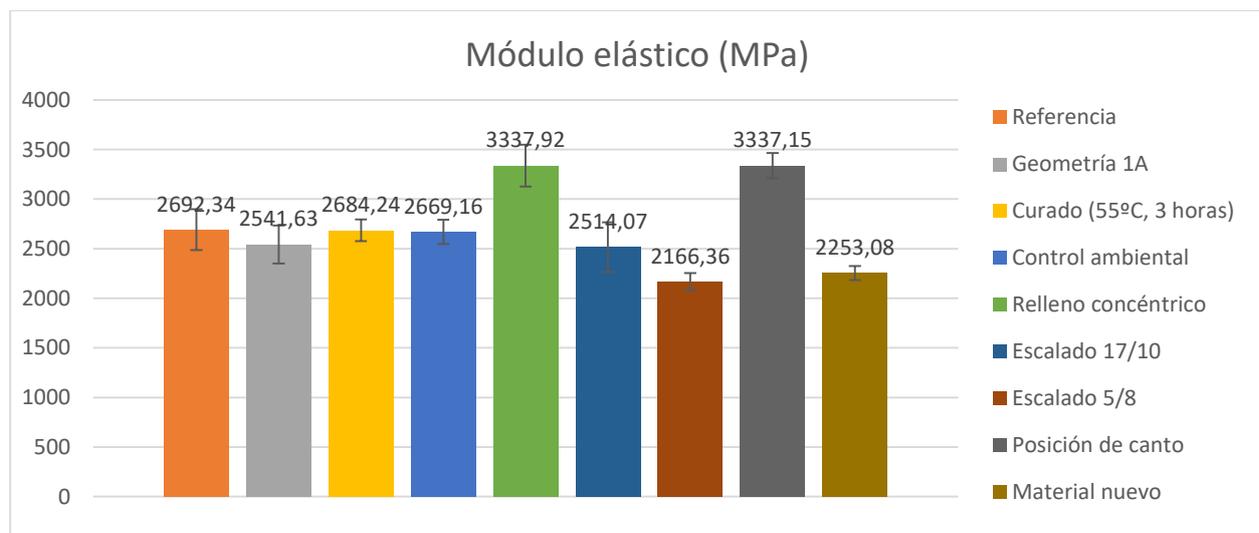
Además de estos valores, también se muestran las imágenes de todas las series de probetas tras haber sido ensayadas. 14 series de probetas, de las cuales 9 fueron destinadas a tracción y 5 a flexión.

Así mismo, para los ensayos de dureza Vickers, se tomaron 8 puntos, separados cada 3 mm en cada probeta. Se ensayaron 2 probetas representativas de cada una de las series de tracción, siendo un total de 18 probetas muestreadas para este caso.

Por último, se realizará un análisis de cada uno de los cambios de parámetro que se fueron aplicando, juntando simultáneamente las observaciones de tracción y flexión.

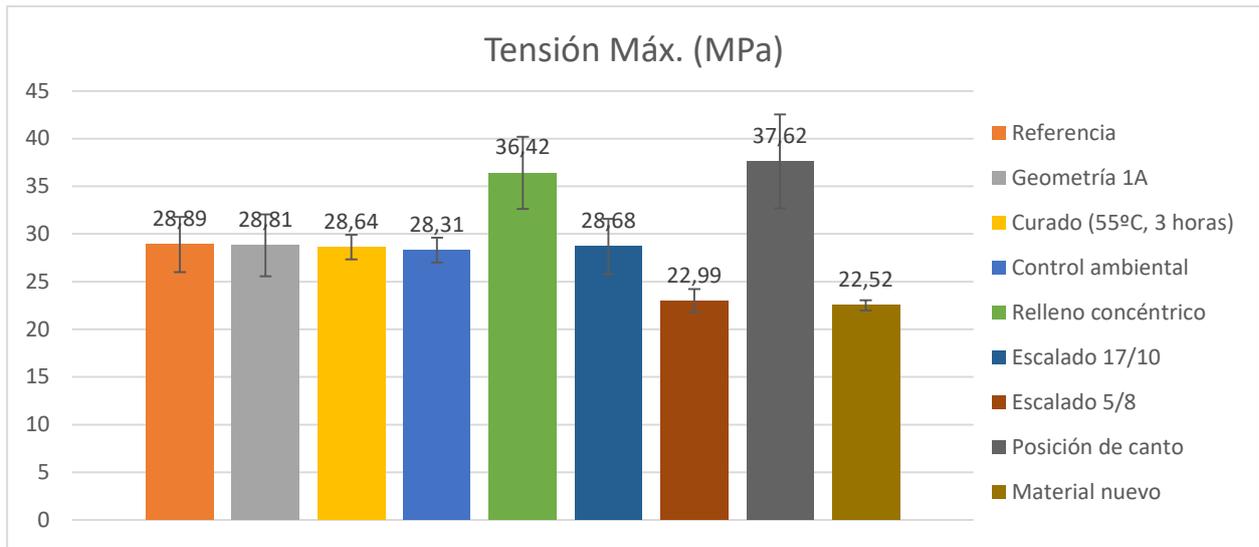
En cuanto al análisis termogavimétrico, el SEGAI no llegó a enviar los resultados.

5.1. Resultados de tracción



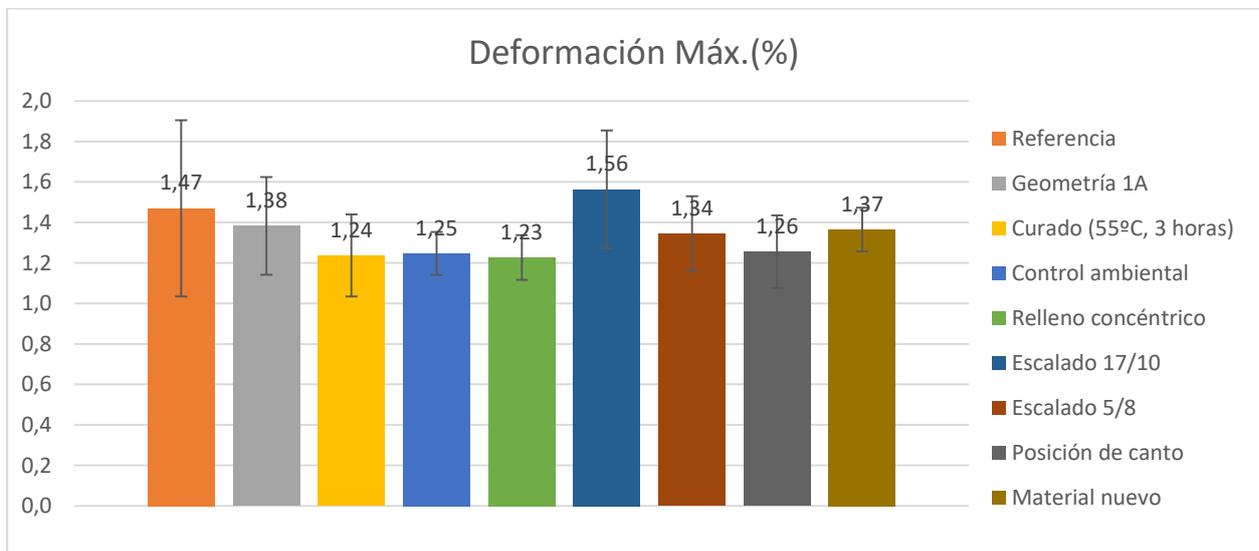
Gráfica 1-Módulo elástico_ Ensayos de tracción

En un estudio (Tymrak, Kreiger, & Pearce, 2014) [11] se consiguió un valor medio de módulo elástico de 3368 MPa (se consideraron 66 probetas a tracción en este estudio, estos datos no son del todo comparables ya que se emplearon distintos tipos de PLA y diversos parámetros de impresión pero seguirán siendo útiles para tener una referencia), y según los valores bibliográficos recogidos en la Tabla 1-Propiedades del PLA [16] (página 20) el módulo del PLA, sin ser procesado por métodos de fabricación aditiva, está comprendido en el rango de 3.45-3.83 GPa. Estos últimos dos valores se corresponden más con los resultados obtenidos en los ensayos de “Relleno concéntrico” y “Posición de canto”. Por otra parte, el resto de series no han conseguido resultados tan óptimos.



Gráfica 2-Tensión máxima_ Ensayos de tracción

Las tensiones máximas siguen las mismas tendencias y proporciones que los resultados de los módulos elásticos. Para volver a comparar, las tensiones máximas de las referencias antes mencionadas son 56.6 MPa [11] y 48-60 MPa [16]. Aquí podemos ver una diferencia muy apreciable con respecto a nuestros resultados (en torno al 50% con respecto a nuestro valor más alto de 37.62 MPa).



Gráfica 3-Deformación a rotura_ Ensayos de tracción

En cuanto a la deformación a rotura, el valor medio más bajo dista del valor medio más alto 3 décimas, esto sumado al hecho de las altas desviaciones presentadas, hace que estos resultados no sean datos representativos de los que obtener conclusiones. Esto mismo les ha ocurrido a otros autores al analizar las deformaciones [1] [5]. En el artículo de Tymrak, Kreiger, & Pearce, 2014 [11] se indica que la elongación no es un resultado adecuado para realizar conclusiones en este tipo de ensayos.

Volviendo a las referencias, se tienen valores del 1.93 % [11], siendo este un valor próximo a los nuestro, y 5-7 % [16] que se aleja más de nuestros resultados. Cabe volver a mencionar que este último rango de valores, corresponden con las propiedades del material sólido, es decir, sin ser procesado por técnicas aditivas. Se piensa entonces, que las muestras hechas por FDM verán disminuidas sus capacidades para deformarse en comparación con las otras propiedades.

5.2. Análisis visual de probetas ensayadas a tracción

Como podemos ver en la serie de “Referencia” (Figura 35)¹, y como se puede ver en el resto de series, las probetas tienden a romper justo al empezar la curva que deriva en la zona estrecha, de forma frágil. De este comportamiento solo se excluyen las probetas de la serie “Material nuevo” (Figura 43), las cuales tendieron a romper un poco más alejadas de dicha zona, presentando un comportamiento plástico.

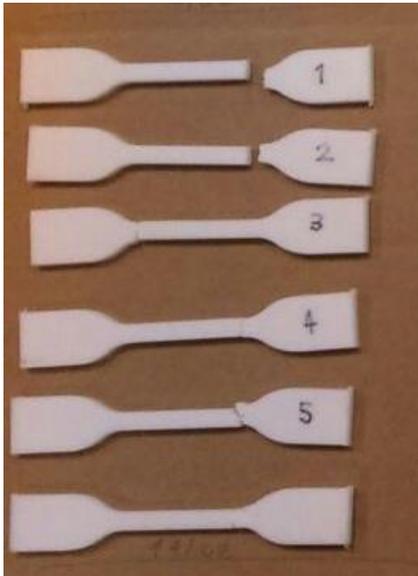


Figura 35-Probetas tracción: Referencia

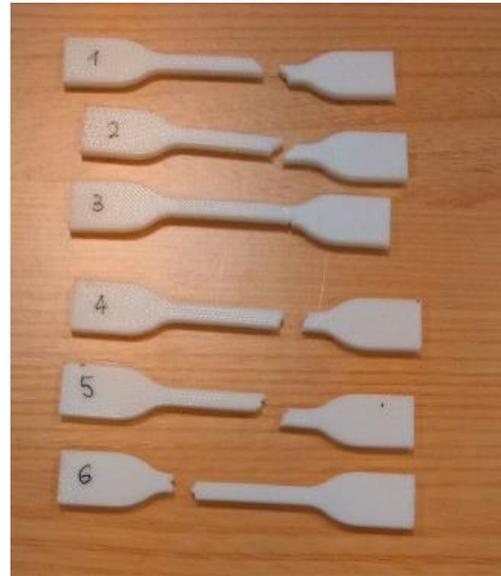


Figura 43-Probetas tracción: Material nuevo

Este es un problema generalizado que le ha ocurrido a prácticamente la totalidad de autores [1] [3] [4] [5] [11] [17] [18]. Para resolver esto, Alfonso Pablos [4], por ejemplo, modificó la geometría de la probeta, aumentando el radio y la longitud de la zona de las mordazas. Otros autores han solucionado este problema utilizando probetas rectangulares.

¹ Todas las fotos de las probetas ensayadas a tracción y sus respectivas microfotografías, están disponibles en los apartados de los correspondientes anexos:

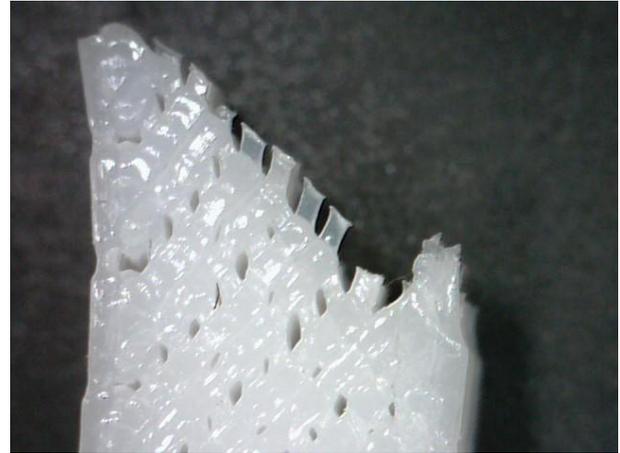
ANEXO III: Fotos de probetas de tracción (página 71)

ANEXO IV: Microfotografías de tracción (página 75)

Si atendemos a las microfotografías de ambas series, podremos ver mejor como las probetas frágiles (Microfotografía tracción 1) rompen de forma contundente, siendo un corte casi perfectamente transversal a la sección de la probeta. Por otra parte, en la probeta de “Material nuevo” (Microfotografía tracción 17), los filamentos del interior sufren un alargamiento apreciable, provocando que el corte tienda a ser más oblicuo e irregular a la sección de la probeta.

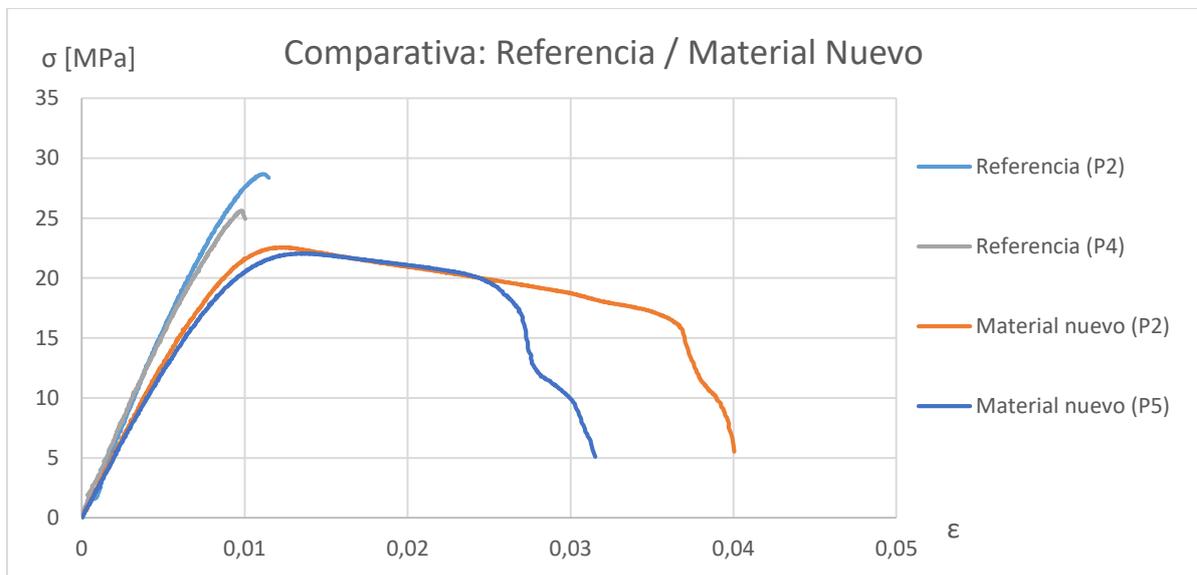


Microfotografía tracción 1: Referencia (P2)



Microfotografía tracción 17: Material nuevo (P2)

Esta diferencia de comportamientos también se puede ver en la siguiente gráfica comparativa. En la que se ve como las probetas “Referencia” rompen sin atravesar antes un régimen plástico.



Gráfica 4-Comparativa de curvas Tensión/Deformación de las series "Referencia" y "Material nuevo"

Hasta este punto seguimos viendo que las probetas siguen con la misma tendencia de romper en el mismo punto, con la diferencia de que en las probetas n° 5 y 6 del tipo “Relleno concéntrico” (Figura 39) no presentan una rotura transversal como el resto de probetas, sino que el corte presenta un aspecto longitudinal siguiendo la dirección de los filamentos de impresión.



Figura 39-Probetas tracción: Relleno concéntrico

En las probetas “Posición de canto” (Figura 42), llaman en especial la atención las n° 1 y 2, pues solo vieron rota media sección y de forma principalmente longitudinal paralelo al plano de la mesa.

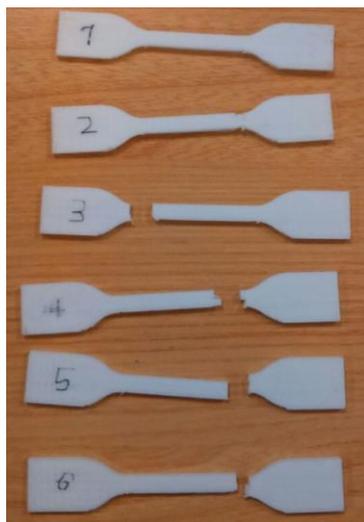


Figura 42-Probetas tracción: Posición de canto

De esta última serie de probetas, hay que destacar que el acabado superficial de estas, en la parte inferior, era relevantemente de peor calidad, presentando rebabas por el goteo de los filamentos calientes. Esto fue debido a que dicha zona no estaba apoyada sobre la mesa de la impresora durante la fabricación. Previendo esto, a la hora de fabricar esta serie, se indicó como parámetro de impresión que se añadiera relleno para apoyar las áreas de las piezas que estuvieran en esta situación. Pese a esto, no se consiguió un buen acabado superficial y hubo que limar las probetas.

5.3. Resultados de simulación de tracción por MEF

Como se había mencionado en el apartado 4.2, se produce un efecto de concentración de tensiones en la curva antes de la zona delgada (Figura 31) lo cual justifica que sea en ese punto en donde se produzca la tensión máxima y sea por tanto la zona en la que las probetas tiendan a romper.

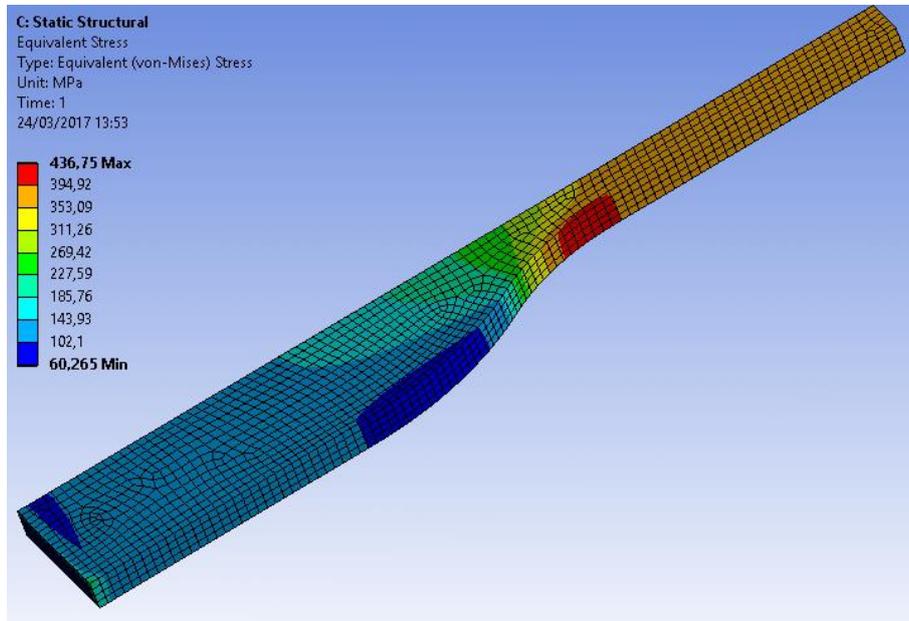


Figura 31-Distribución de tensiones Von-Mises

Si tenemos en cuenta solo el esfuerzo axial, es decir, la tensión normal en el eje x (Figura 33), el valor de la tensión máxima según el estudio realizado es de 385.22 MPa, lo cual coincide con el cálculo analítico realizado en el apartado 4.2.

Por otra parte, si analizamos la tensión máxima de Von-Mises (Figura 32) se obtiene un valor de 436.75 MPa debido al efecto del factor de concentración de tensiones. Si analizamos la parte de la fibra neutra en la zona donde se produce la concentración de tensiones (Figura 33), obtenemos un valor de 345.23 MPa. Al dividir estos dos valores obtendremos el valor experimental del factor de concentración de tensiones K_c .

$$K_c = \frac{\sigma_{T.max}}{\sigma_{avg}} = \frac{436.75 \text{ MPa}}{345.23 \text{ MPa}} = 1.27$$

Como habíamos predicho, el valor real de K_c debía ser menor a 1.6.

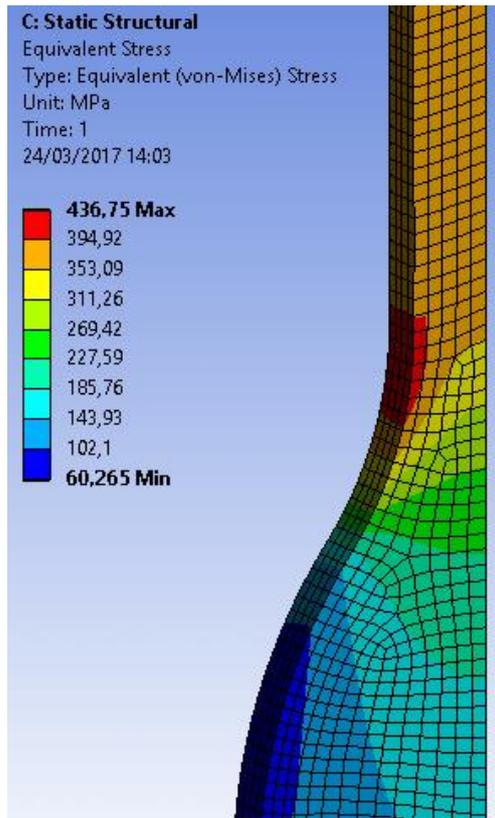


Figura 32-Distribución de tensiones Von-Mises (zona de tensión máx.)

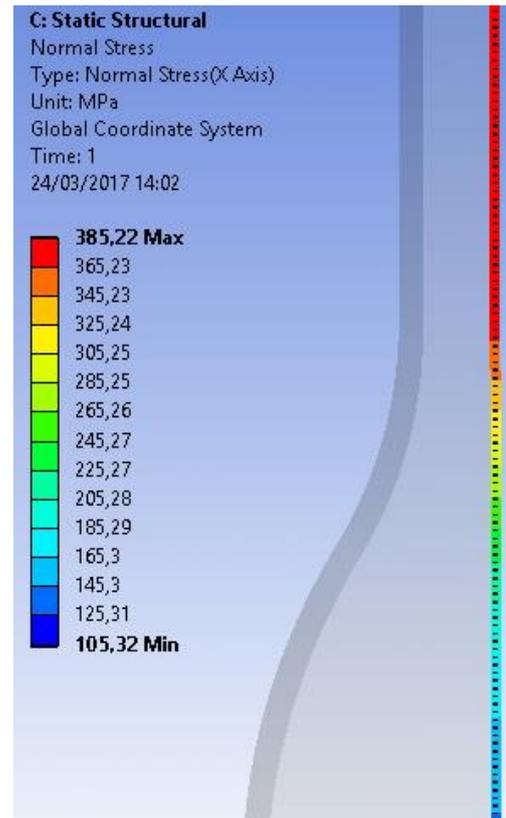
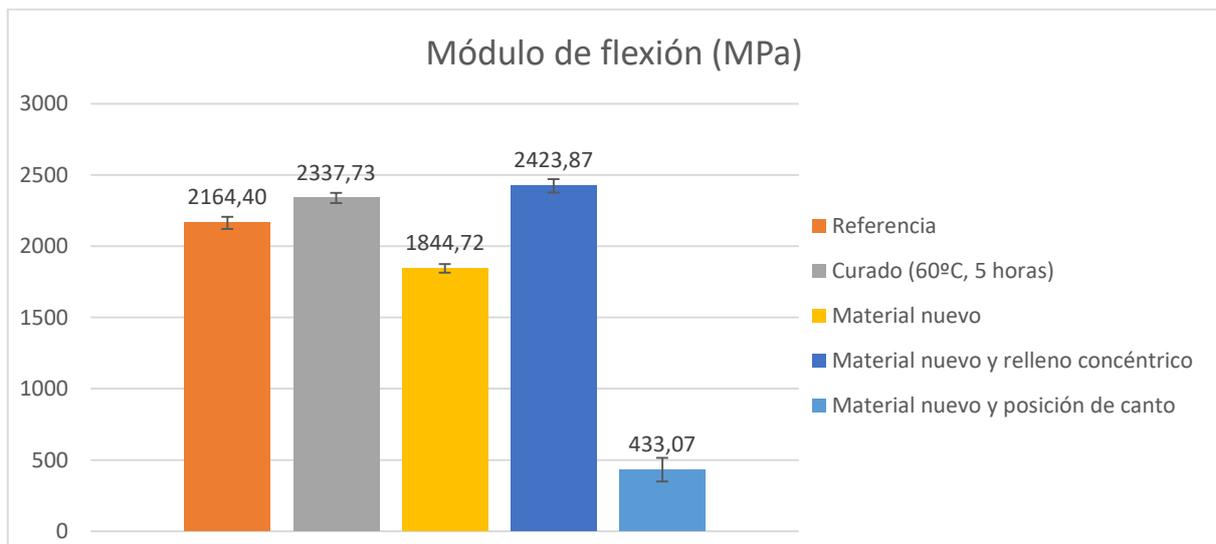


Figura 33-Tensiones normales (eje x) en fibra nutra

5.4. Resultados de flexión

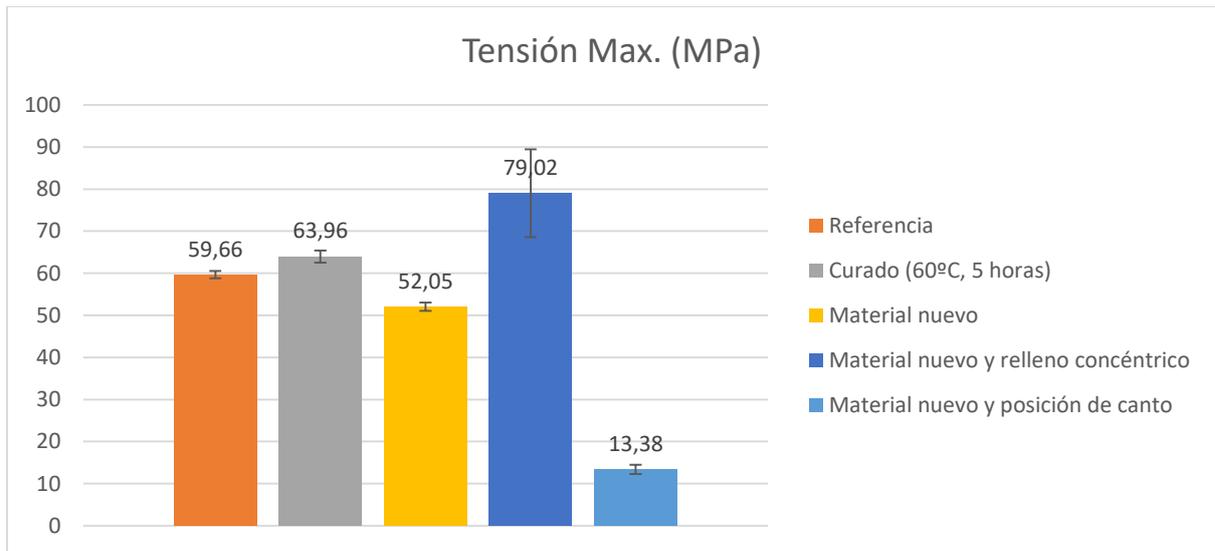


Gráfica 5-Módulo elástico_Ensayo de flexión

En este ensayo se consiguieron resultados mucho menos dispersos que en los ensayos de tracción como se puede apreciar en las barras de desviación. Se observa una gran diferencia del módulo de las probetas “Material nuevo y posición de canto” con respecto a las demás. Esta caída se debió a

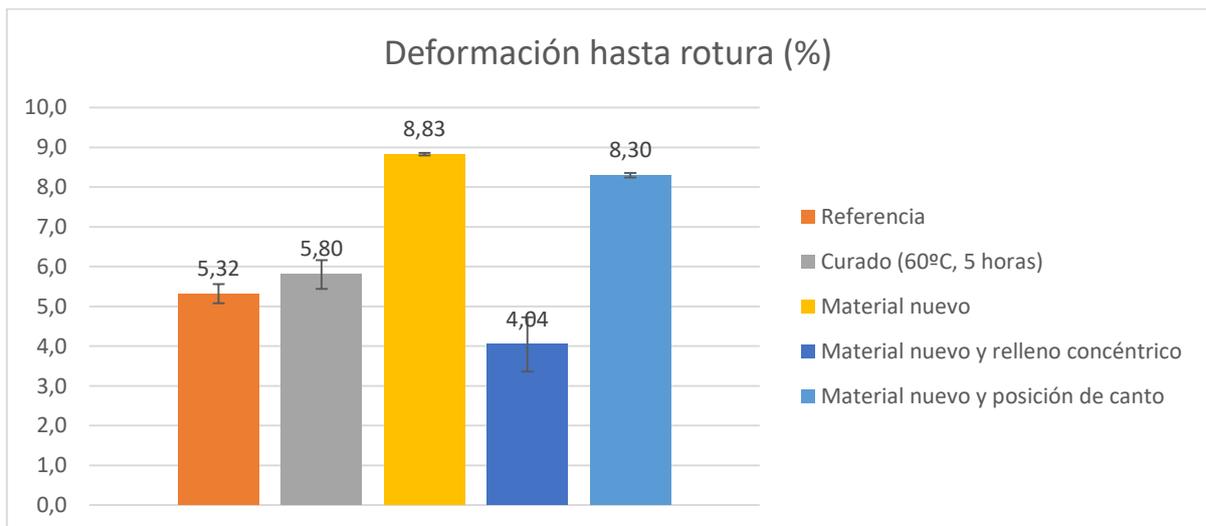
una delaminación que sufrieron las probetas durante el ensayo en cuestión (este tema será tratado en mayor profundidad en el próximo apartado “Análisis visual de probetas ensayadas a flexión”).

Son pocos los estudios hechos sobre fabricación aditiva que realizan ensayos a flexión. En este caso, para tener una referencia comparativa, solo contamos con la información del PLA, sin pasar por procesos de FDM, en la Tabla 1-Propiedades del PLA [16] (página 20), con el rango de 2.3-4.9 GPa para el módulo de flexión. En este caso, nuestros valores se aproximan al valor mínimo de dicho intervalo. No obstante, que sea la serie de “Material nuevo” el que más se aleje de los valores bibliográficos no resulta algo positivo, ya que debería ser el material menos degradado.



Gráfica 6-Tensión máxima_ Ensayo de flexión

Al igual que en los ensayos de tracción, las tensiones máximas siguen siendo directamente proporcionales a el módulo de elasticidad.



Gráfica 7-Deformación a rotura_ Ensayo de flexión

Aquí se puede apreciar que las series “Material nuevo” y “Material nuevo y posición de canto” han llegado a valores muy altos debido a que estos no rompieron y llegaron a completar los 15 mm

máximos para los que había sido programado el ensayo. Esos valores de deformación son por tanto los valores máximos que se podrían haber alcanzado para este ensayo, y las pequeñas desviaciones que puedan haber, se deben a las variaciones dimensionales de ancho y espesor que presentaban las probetas al ser fabricadas.

5.5. Análisis visual de probetas ensayadas a flexión

Seguimos apreciando un comportamiento frágil en la rotura de estas dos series de probetas, a excepción de la probeta n°2 en la serie “Referencia” (Figura 44) y la n°6 en la serie “Curado (60°C, 5 horas)” (Figura 45) las cuales sufrieron fisuras muy apreciables por la zona sometida a tracción (la parte inferior), llegando a romper al menos media sección de la probeta.

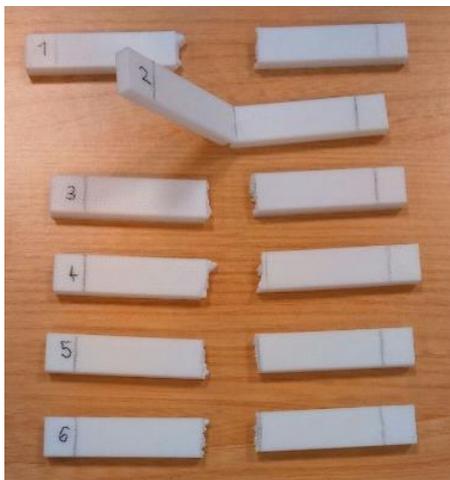


Figura 44-Probetas flexión: Referencia

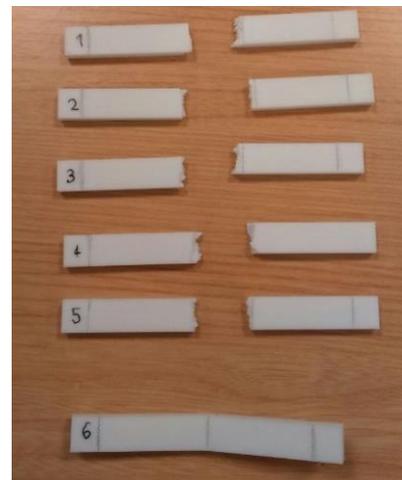


Figura 45-Probetas flexión: Curado (60°C, 5 horas)

Para el caso de “Material nuevo” (Figura 46Figura 43), vemos que el PLA mostró un comportamiento plástico al deformarse sin llegar a romperse. Repitiendo el mismo comportamiento que en los ensayos de tracción vistos anteriormente.

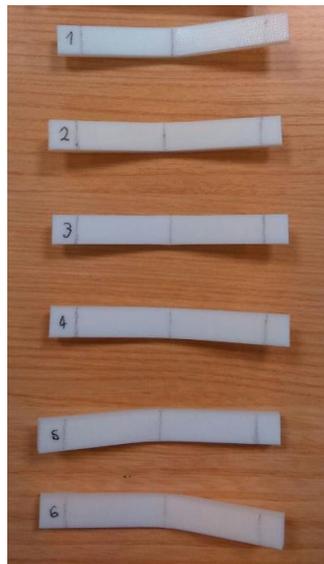


Figura 46-Probetas flexión: Material nuevoFigura 43-Probetas tracción: Material nuevo

Las muestras tan solo presentaron unas leves fisuras en la zona sometida a tracción, es decir, la parte inferior de la probeta, como se puede ver en las microfotografías de esta serie (Microfotografía flexión 5 y Microfotografía flexión 6)².



Microfotografía flexión 5: Material nuevo (P1)



Microfotografía flexión 6: Material nuevo (P2)

En cuantos, a los dos últimos ensayos de flexión, ambas series sufrieron una delaminación entre sus capas, aunque de forma diferente.

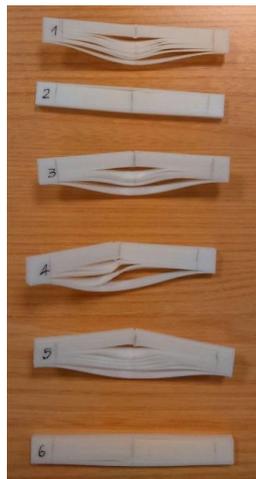


Figura 47-Probetas flexión: Material nuevo y relleno concéntrico

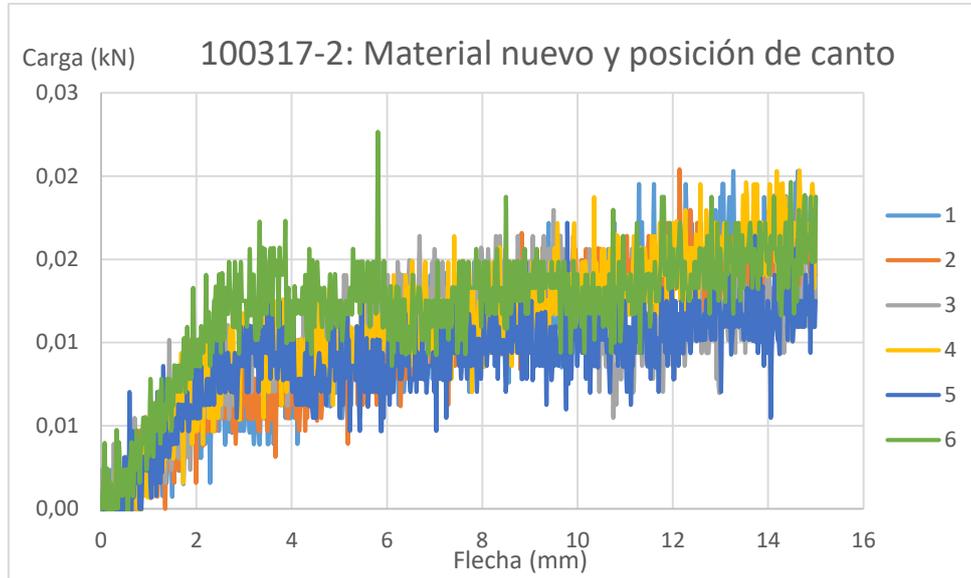


Figura 48-Probetas flexión: Material nuevo y posición de canto

En el caso de “Material nuevo y relleno concéntrico” (Figura 47) las probetas se fisuraron en la mitad de la sección y la otra mitad sufrió la delaminación. Este extraño fenómeno no fue percibido por las probetas nº 2 y 6. Se cree que esto no ocurrió en estas dos probetas por haber sido correctamente puestas en los apoyos previamente al realizar el ensayo.

² Todas las microfotografías de las probetas ensayadas a flexión están disponibles en el apartado correspondientes de los anexos:
ANEXO IV: Microfotografías de flexión (página 72)

Por otra parte, visualmente pareciera que la serie “Material nuevo y posición de canto” (Figura 48) no hubiese sido ensayada. Durante esta última prueba, las probetas fueron sufriendo pequeñas fisuras que no eran lo suficientemente fuertes para que el ensayo se detuviera, dando lugar a unas curvas Carga/Flecha altamente dispersas (ver Gráfica Carga/Flecha Flexión 5).



Gráfica Carga/Flecha Flexión 5-Material nuevo y posición de canto

Dichas fisuras eran las capas longitudinales de la muestra despegándose en planos paralelos al ancho de la probeta, tal y como se puede apreciar en la Figura 34 a continuación. Al retirarse la carga ejercida sobre estas, las probetas volvían a su estado inicial presentando a simple vista pocas deformaciones plásticas.

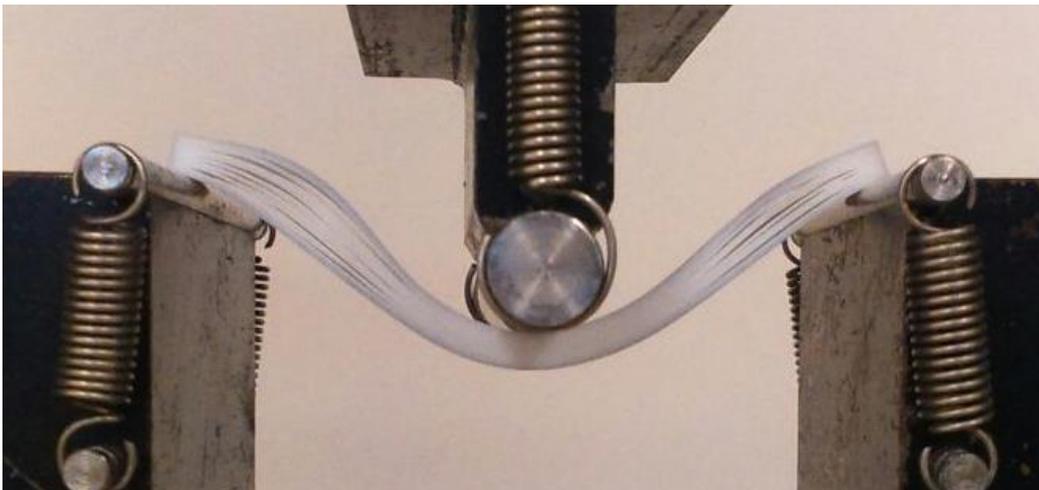
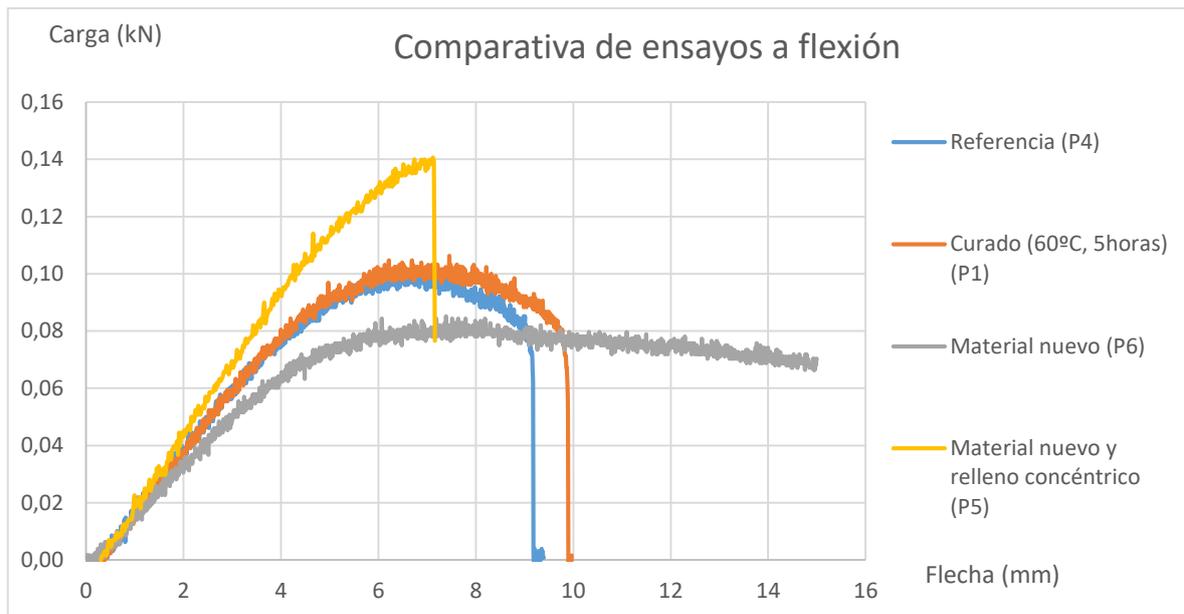


Figura 34-Ensayo a flexión de las probetas "Material nuevo y posición de canto". Se aprecia el efecto de la delaminación.

En ambos casos, se cree que la delaminación es producida por el mismo factor; una temperatura insuficiente durante la fabricación, provocando que las capas contiguas no se soldaran adecuadamente entre ellas.

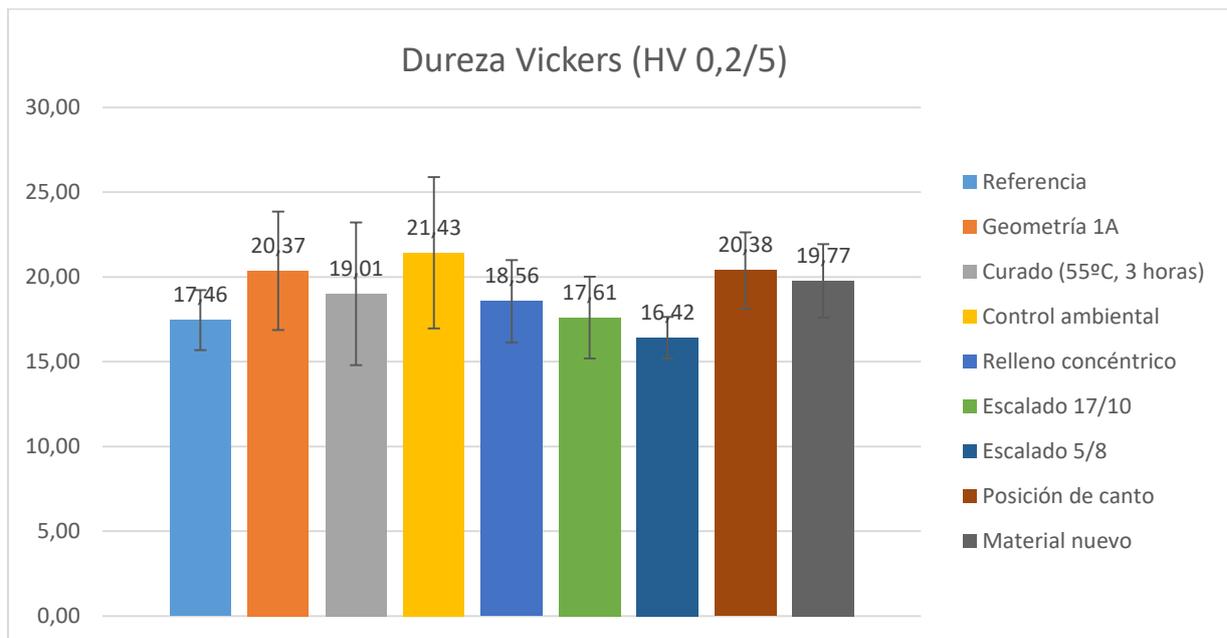


Gráfica 8-Comparativa de curvas Carga/Flecha de ensayos a flexión

Finalmente, en esta grafica comparativa (Gráfica 8) se han representado las probetas más representativas de cada serie. Se puede apreciar cómo; el curado ha mejorado todas las propiedades en general, aunque sutilmente; el material sin fragilizar nunca se fractura; y como el relleno concéntrico ha conseguido tener los valores considerablemente superiores al resto.

5.6. Resultados de dureza Vickers

Según la fuente bibliográfica (Ashby, 2009) [16], el PLA presenta una dureza Vickers en el rango de [14 HV – 18 HV].



Gráfica 9-Resultados de ensayo de dureza Vickers

Como podemos ver en la gráfica, nuestros valores medios de dureza se mueven en el rango de [16.42 HV – 21.43 HV], siendo este muy próximo a los valores bibliográficos e incluso coincidente en varios puntos.

No obstante, más allá de que los valores de dureza obtenidos se asemejan con los valores bibliográficos del PLA, sin ser extruido por métodos de fabricación aditiva, no podemos sacar conclusiones claras de como mejoran la dureza los distintos cambios de parámetros implantados en cada serie, dada las relevantes desviaciones y que la diferencia de dichos promedios no son significativos.

5.7. Análisis de los cambios geométricos y dimensionales

En primera estancia, las probetas “Geometria1A” y “Escalado 17/10”, presentan resultados idénticos a la probeta de referencia, por lo que podríamos afirmar, como bien dice la teoría, que como los datos obtenidos (modulo elástico, tensión máxima y deformación máxima) son características intrínsecas del material, estas no dependen de las dimensiones que tengan las probetas. Sin embargo, las probetas “Escalado 5/8” si han presentado una diferencia significativa. Esto podría deberse a una mala manipulación o almacenamiento de las probetas antes de ensayarlas, por lo que habría que mantenerlo como un resultado no concluyente y repetir el ensayo.

5.8. Análisis de los efectos de curado

Tanto en el caso del ensayo de tracción como de flexión, los ciclos térmicos que se utilizaron en el post-tratamiento de curado, consisten en modificaciones de tiempo y temperatura (ver página 70). En el caso de las probetas sometidas a tracción, con un curado a 55°C durante 3 horas, no presentaron un cambio significativo en comparación con las probetas de referencia. Con la intención de comprobar si dicho tratamiento había sido a una temperatura muy baja, para el curado que se empleó a las probetas destinadas a flexión se decidió subir la temperatura a 60°C y la duración a 5 horas. En este caso, dicho tratamiento térmico si presentó un cambio apreciable en los tres resultados comparados (modulo elástico, tensión máxima y deformación máxima), incrementando dichos valores, no de forma concluyente, pero sí de forma que proporciona interés para aplicar curados de aun mayor temperatura y duración en futuros trabajos.

Miguel Alfonso de Pablos, investigador muy involucrado en el campo de la fabricación aditiva [4] de la Universidad de Oviedo y con quien se ha tenido la posibilidad de contactar directamente, ha considerado de gran interés el realizar curados tras fabricar piezas con FDM, asegurando que podría reducir los efectos de la anisotropía.

5.9. Análisis del control ambiental

En un principio, se consideró que una de las razones principales por la que las probetas presentaban mucha fragilidad, era por las altas condiciones de humedad en las que eran impresas dentro del laboratorio. No obstante, esta consideración fue descartada al ver que los resultados obtenidos, de las probetas que fueron impresas dentro de un ambiente controlado, no presentaron ningún tipo de cambio significativo pese a haber reducido la humedad relativa del laboratorio desde un 55,5% a un 36,85% (ver Tabla 6-Valores registrados de temperatura y humedad durante la fabricación de probetas, página 69).

5.10. Análisis del relleno concéntrico y fabricación en posición de canto

En cuanto a las probetas para tracción “Relleno concéntrico” y “Posición de canto”, estas presentaron los resultados más significativos, incrementando los valores de módulo elástico y tensión máxima, respecto a la referencia, un 24% y 27.7% de media respectivamente. Este aumento se debe a que las propiedades de las piezas, fabricadas por FDM, presentan características de anisotropía, que varía según la dirección de los filamentos extruidos. En estos casos, los filamentos seguían la dirección longitudinal de la pieza, que era la misma dirección de la carga aplicada en el ensayo. Por ello, las probetas deben elegirse y fabricarse de forma que el esfuerzo se aplique en la misma dirección, o en una similar a la que estarán sujetos los productos durante su uso.

Por las mismas razones anteriormente dichas, las probetas tipo “Relleno concéntrico”, en los ensayos a flexión, también presentaron un aumento notorio en sus propiedades. Por otra parte, estas probetas rompieron solo por media sección, y la otra mitad sufrió una delaminación. Lo mismo ocurrió de forma más agravada en las probetas “Posición de canto” al ser ensayadas. Este efecto pudo haberse dado por no emplear una temperatura de impresión y temperatura de cama suficientemente alta, ocasionando que durante la impresión las capas se enfriaran muy rápido y no puedan solidificar adecuadamente con las capas sucesivas. Por lo que para futuros trabajos se propondría un aumento de estos parámetros y comprobar sus efectos, es decir, aumentar las temperaturas de impresión y de cama.

5.11. Análisis del estado del material

Por último, la bobina de PLA que había estado almacenada en condiciones bajas de humedad, obtuvo resultados inferiores de modulo elástico y tensión máxima, por otra parte, presentó mejor comportamiento plástico. En el caso de los ensayos a tracción, no rompió de forma frágil, sino que se deformó plásticamente hasta romper, y en el ensayo a flexión tan solo llegó a presentar grietas casi inapreciables. Se concluye, como bien es sabido, que la humedad afecta de forma significativa a las propiedades higroscópicas del PLA, fragilizándolo; aumentando ligeramente su resistencia y disminuyendo su tenacidad significativamente.

En este apartado, se quiere puntualizar una conclusión a la que llegó el autor del PFC (Relaño Pastor, Octubre 2013). En dicho trabajo, el autor mantiene en agua destilada, durante 48 horas, una serie de probetas de PLA destinadas a ser ensayadas a tracción. A continuación, se cita textualmente una conclusión a la que llegó Relaño Pastor tras no obtener variación en los resultados obtenidos con respecto a las probetas que no habían sido sumergidas en agua.

“En el caso del PLA, donde la absorción de humedad es prácticamente nula, las propiedades mecánicas no se ven modificadas tampoco. De hecho, los valores son muy semejantes para la tensión. Por ello podemos afirmar que la absorción de humedad no tiene ningún efecto en las propiedades mecánicas del material”. (página 100)

Como podemos ver, esta conclusión va en contra de lo dicho anteriormente al inicio de este apartado. Sin embargo, son varios los autores que nos advierten de las propiedades higroscópicas del PLA, es decir, de su tendencia a absorber humedad y de cómo este factor puede ser crucial para las propiedades del mismo, perjudicándolas negativamente [1] [5] [17]. Por lo que, en el presente estudio, se desea reiterar el cuidado necesario para el almacenaje de las bobinas de PLA, para que estas no absorban humedad.

En cuanto a las conclusiones del trabajo referido, se induce que el PLA con el que el autor empezó a trabajar se encontraba ya muy humedecido y por tanto en mal estado, justificándose así que no encontrara cambios con sus probetas sumergidas en agua. Justificando así también sus resultados de módulo elástico tan inferiores con respecto a otros estudios y bibliografías (más del doble de diferencia).

6. CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE FUTUROS TRABAJOS

- **Cambios geométricos y de escala:** No influye en los resultados pues estos son características intrínsecas del material. En el caso de las probetas tipo 1A con factor de escala 17:10 presentaron resultados no concluyentes. Se propone repetir este ensayo.
- **Aplicación de curado como post-tratamiento:** Produce cambios apreciables solo al aplicar tratamientos térmicos a temperatura superior a la de transición vítrea (58°C-60°C). Se propone aplicar curados de mayor temperatura ya que podría ser tanto una alternativa para recuperar parte de las propiedades del material degradado por la humedad u otros factores, como una opción para homogeneizar las piezas fabricadas y así reducir las complicaciones que suponen las anisotropías en productos de geometrías complejas.
- **Aplicación de controles ambientales durante la fabricación:** No tenemos constancia de que produzcan efecto apreciable sobre la calidad de las piezas.
- **Relleno concéntrico y fabricación en posición de canto:** Debido a que producen la reorientación de los filamentos, mejoran considerablemente las propiedades mecánicas en la dirección de los filamentos. En ensayos a flexión se produce delaminación entre las capas de las probetas, pudiendo ser este un indicador de temperatura de fabricación insuficiente. Para futuros trabajos se propone aumentar la temperatura de cama y de impresión, y determinar si se reduce este efecto.
- **Cambio de material:** Se corrobora que la humedad durante largos periodos de tiempo fragiliza al PLA, aunque aumenta ligeramente su resistencia y disminuye significativamente su plasticidad. Se recomienda mantenerlo en las condiciones de humedad y temperatura indicado por el fabricante, como ejemplo, manteniéndolo guardado en un armario en bolsas selladas al vacío con perlas de gel de sílice.
- A fin de realizar un estudio comparativo de parámetros que influyen sobre las propiedades mecánicas de las piezas de PLA, fabricadas por FDM, se recomienda realizar y priorizar ensayos a flexión sobre ensayos a tracción, por la facilidad que supone tanto en la fabricación de probetas como a la hora de ensayarlas. De ambos ensayos se pueden sacar las mismas conclusiones, siendo los ensayos a flexión, recomendados para materiales frágiles como lo es el PLA.

CONCLUSIONS AND PROPOSAL FOR FUTURE WORKS

- **Geometric and scale changes:** They do not influence in the results since they are intrinsic characteristics of the material. In the case of the type 1A test specimens with 17:10 scale factor, they presented inconclusive results. It is proposed to repeat this test.
- **Application of curing as post-treatment:** It produces appreciable changes only when is applied thermal treatments at a superior glass transition temperature (58°C-60°C). It is proposed to apply higher temperature for curing treatment as it could be an alternative to recover part of the properties of the material degraded by moisture, or as an option to homogenize the manufactured parts and thus reduce complications of anisotropies in products of complex geometries.
- **Application of environmental controls during manufacture:** We have no evidence that they have an appreciable effect on the quality of the parts.
- **Concentric infill and manufacture in edge position:** They produce the reorientation of the filaments so the mechanical properties in the direction of the filaments are considerably improved. In flexural tests, delamination occurs between the layers of the specimens, which may be an indicator of insufficient manufacturing temperature. For future work it is proposed to increase bed and print temperature, and determine if this effect is reduced.
- **Material change:** It is corroborated that the humidity for long periods of time weakens the PLA, although it increases its resistance slightly and significantly reduces its plasticity. It is recommended to keep it in the humidity and temperature conditions indicated by the manufacturer, as an example, by keeping it stored in a cabinet in vacuum-sealed bags with silica gel beads.
- In order to perform a comparative study of parameters that influence the mechanical properties of PLA parts, manufactured by FDM, it is recommended to perform and prioritize flexural tests on tensile tests, due to the ease involved in the manufacture of specimens and the testing process. From both tests, the same conclusions can be drawn, with flexural tests being recommended for fragile materials as is PLA.

7. BIBLIOGRAFÍA

7.1. Normas consultadas

- ISO 178:2010 Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión
- ISO 527-1:2012 Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales
- ISO 527-2:2012 Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión
- UNE 116005 Fabricación por adición de capas en materiales plásticos. Fabricación aditiva. Preparación de probetas.

7.2. Softwares empleados

- Programa de diseño asistido por ordenador (CAD): CREO Parametric 2.0. Modelado en 3D de las probetas destinadas a ser ensayadas a tracción y flexión. Obtención de ficheros STL.
- Programa de ingeniería asistida por ordenador (CAE): Ansys Workbench. Simulación por método de elementos finitos de ensayo a tracción.
- Programa Slicer: CURA 0.1.5. Configuración de parámetros y órdenes para ser leídas por la máquina SIGMA 3D para la fabricación de las probetas. Obtención de fichero Gcode.
- Programa de hoja de cálculo: Microsoft Excel 2016. Análisis de los datos obtenidos de los ensayos a tracción y flexión. Creación y presentación de gráficas para la exposición de resultados.

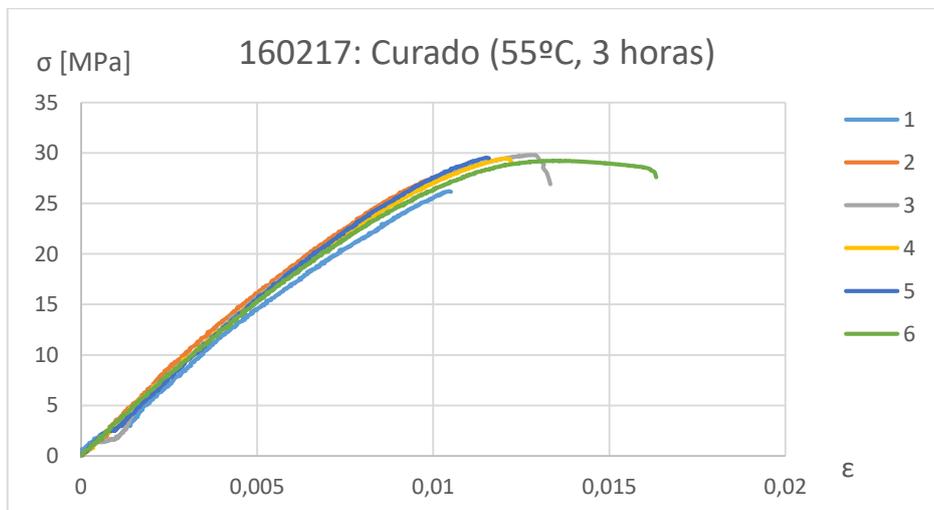
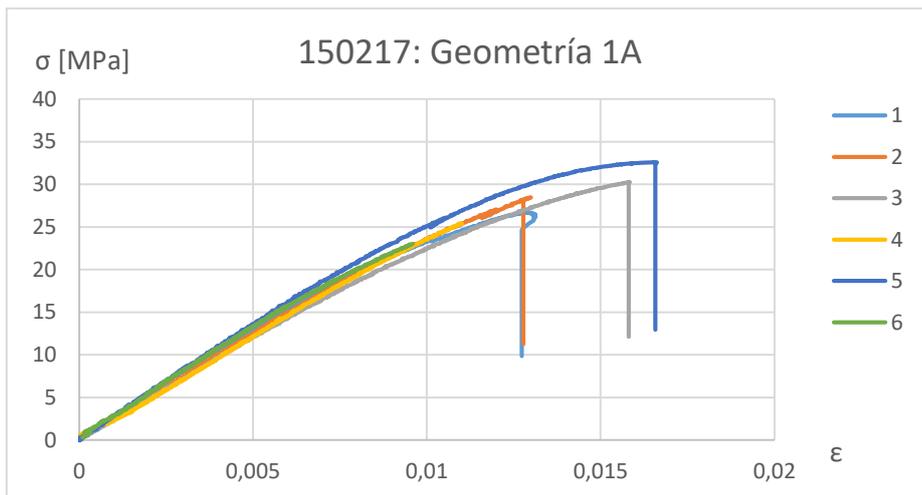
7.3. Lista de referencia

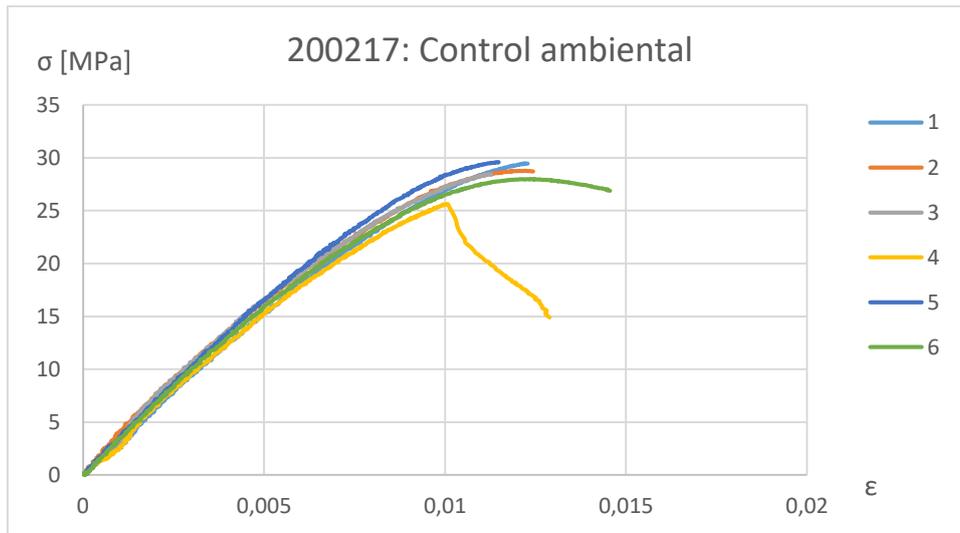
- [1]Juan Alburquerque, A. (Septiembre 2014). *Trabajo Fin de Grado: Optimización y caracterización de piezas de PLA fabricadas mediante técnicas aditivas*. Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid.
- [2]Sánchez Jiménez, F., Fernández de la Puente, A., & Llorente Geniz, J. (s.f.). *Técnicas de prototipado rápido*. España: Escuela Universitaria Politécnica, Universidad de Sevilla.
- [3]Relaño Pastor, A. A. (Octubre 2013). *Proyecto Fin de Carrera: Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida*. Escuela Polotécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid.
- [4]Alfonso Pablos, M., & Viña Olay, J. (Noviembre 2016). *Trabajo Fin de Máster: Optimización de las propiedades mecánicas de piezas Impresas con tecnología FFF mediante el estudio de la influencia de los parámetros de impresión*. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Oviedo.

- [5] Arribas Subiñas, P. J. (Julio 2016). *Trabajo Fin de Grado: Procedimiento y caracterización de probetas de plástico faricadas mediante la impresión 3D*. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos.
- [6] Rodriguez, J., Thomas, J., & Renaud, J. (2003). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 219-203.
- [7] Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 248-257.
- [8] Tian-Ming, W., Jun-Tong, X., & Ye, J. (2007). A model research for prototype warp deformation. *Int J Adv Manuf Technol*, 1087-1096.
- [9] Sun, Q., Rizvi, G., C.T., B., & Gu, P. (2008). Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer. *Rapid Prototyping Journal*, 72-80.
- [10] Li, L., Sun, Q., & Bellehumeur, C. (2002). Composite Modeling and Analysis of FDM Prototypes for Design and. *J. Manuf. Process*, 129-141.
- [11] Tymrak, B., Kreiger, M., & Pearce, J. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials and Design* 58, 242-246.
- [12] Guamantario, W. C. (s.f.). *Influencia de los parámetros de relleno en el comportamiento mecánico a la flexión de piezas fabricadas en impresoras 3D de bajo coste*. Escuela Superior de Ingeniería y del Diseño, Universidad Politécnica de Valencia.
- [13] 3D Matter. (30 de Junio de 2017). Obtenido de What is the influence of infill %, laer height and infill pattern on my 3D prints?: <http://my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/>
- [14] Danzing, S. (30 de Junio de 2017). *EnginnerDog*. Obtenido de 3D Printing a 3D Honeycomb Infill concept.:<https://engineerdog.com/2015/03/08/3d-printing-a-3d-honeycomb-infill-concept/>
- [15] UL. (27 de Junio de 2017). *Prospector*. Obtenido de <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/34/c/t/acido-polilactico-pla-properties-processing>
- [16] Ashby, M. F. (2009). *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [17] Arteaga Medina, L. (Julio 2015). *Trabajo Fin de Grado: Fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados*. Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología, Universidad de La Laguna.
- [18] Hedo Garcés, D. (Noviembre 2015). *Trabajo Fin de Grado: Herramienta para la definición de diferentes estrategias de impresión en tecnología FDM. Ensayos mecánicos*. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza.

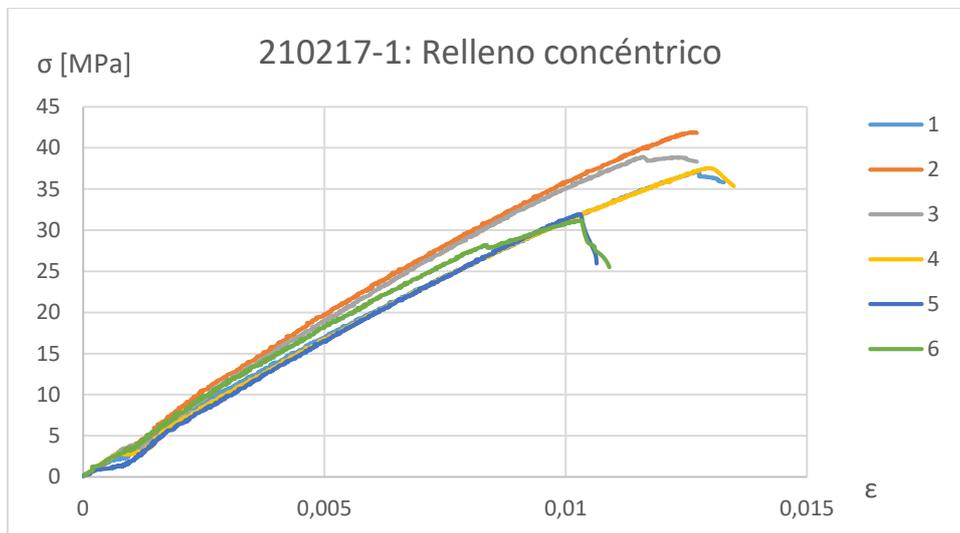
8. ANEXO I: RESULTADOS DE ENSAYOS

8.1. Gráficas Tensión/Deformación de ensayos a tracción

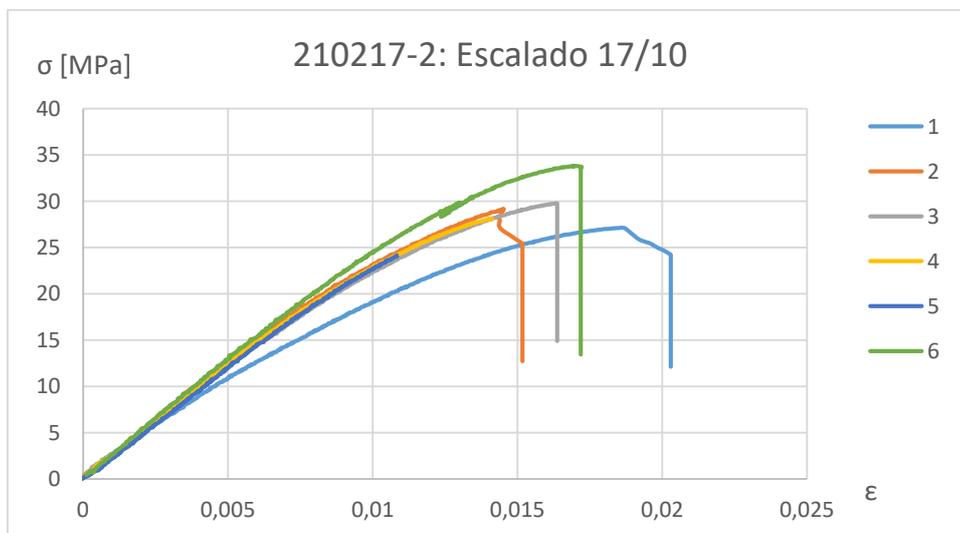




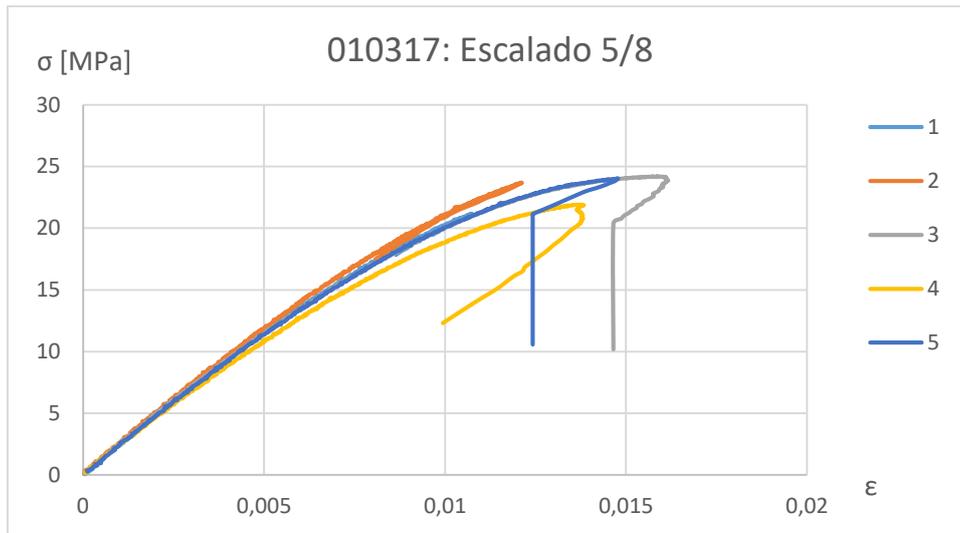
Gráfica Tensión/Deformación Tracción 4-Control ambiental



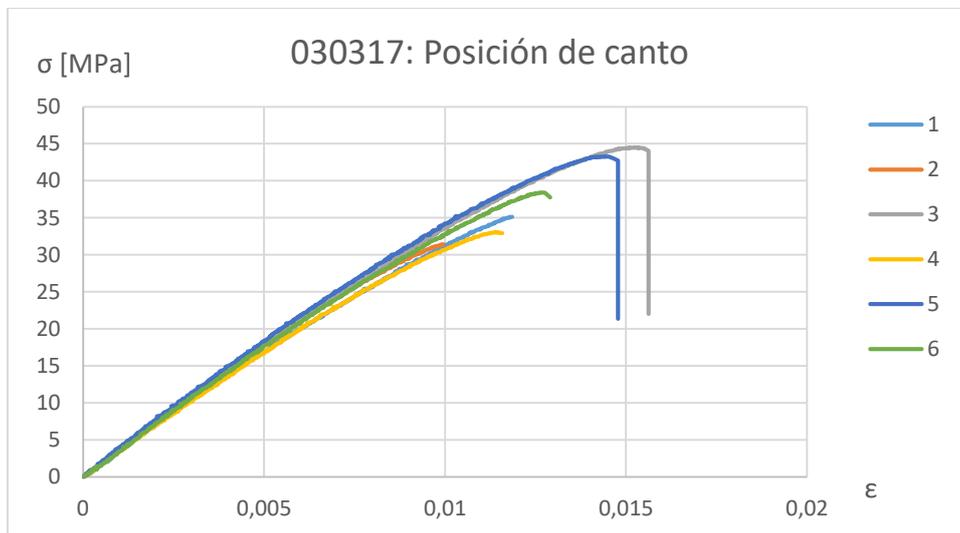
Gráfica Tensión/Deformación Tracción 5-Relleno concéntrico



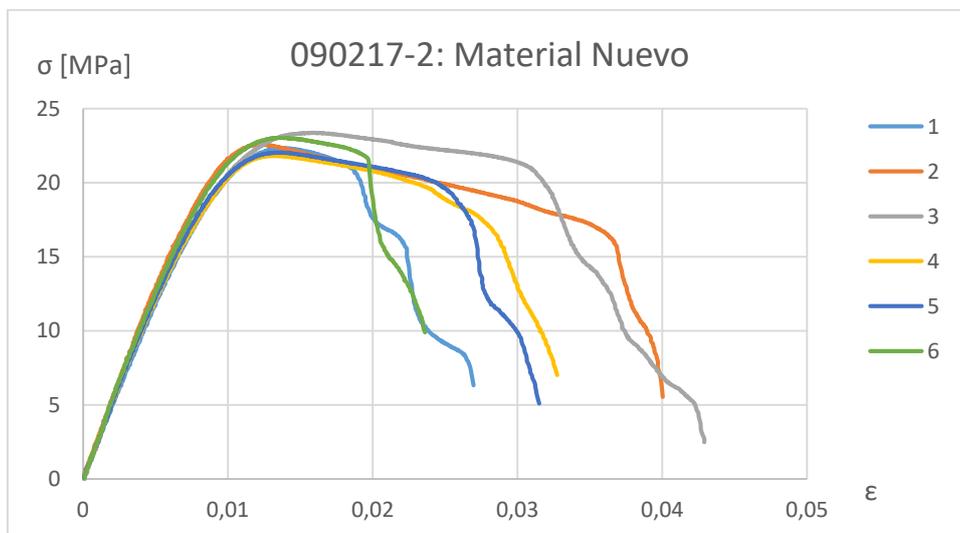
Gráfica Tensión/Deformación Tracción 6-Escalado 17/10



Gráfica Tensión/Deformación Tracción 7-Escalado 5/8

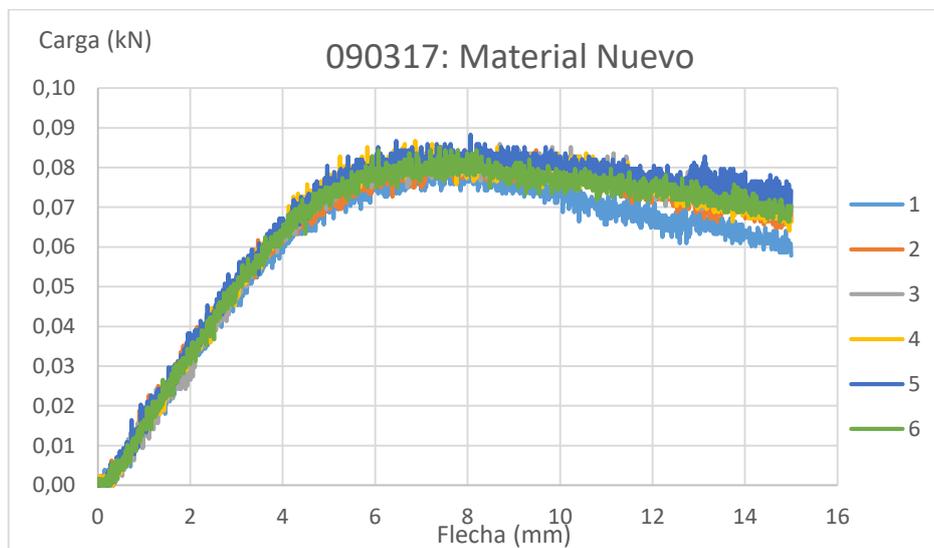
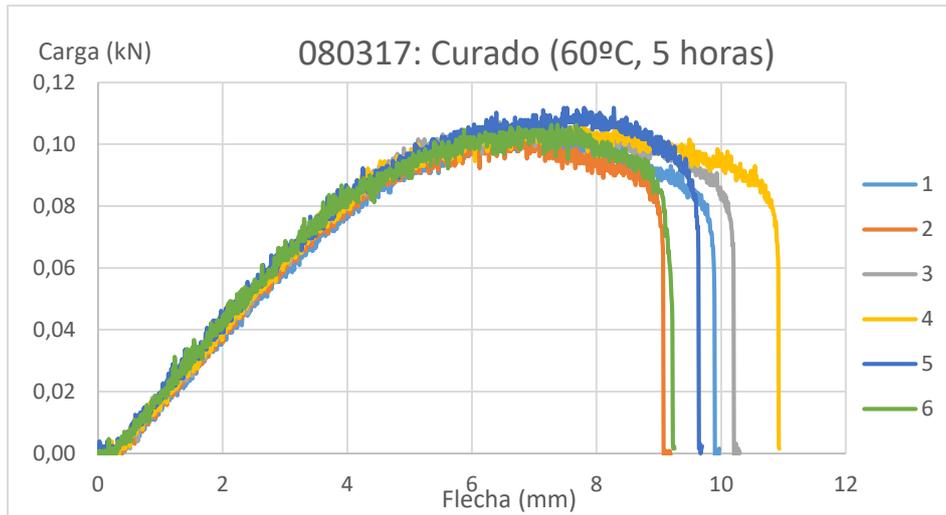
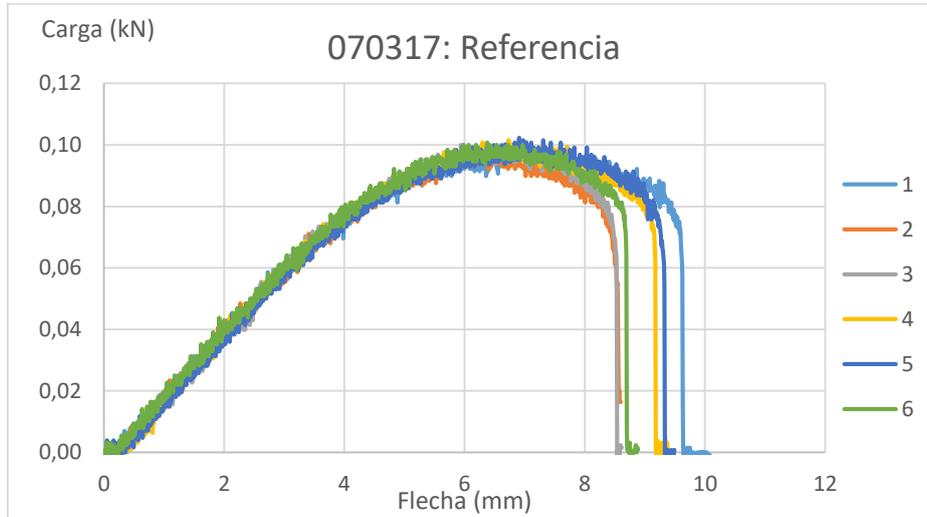


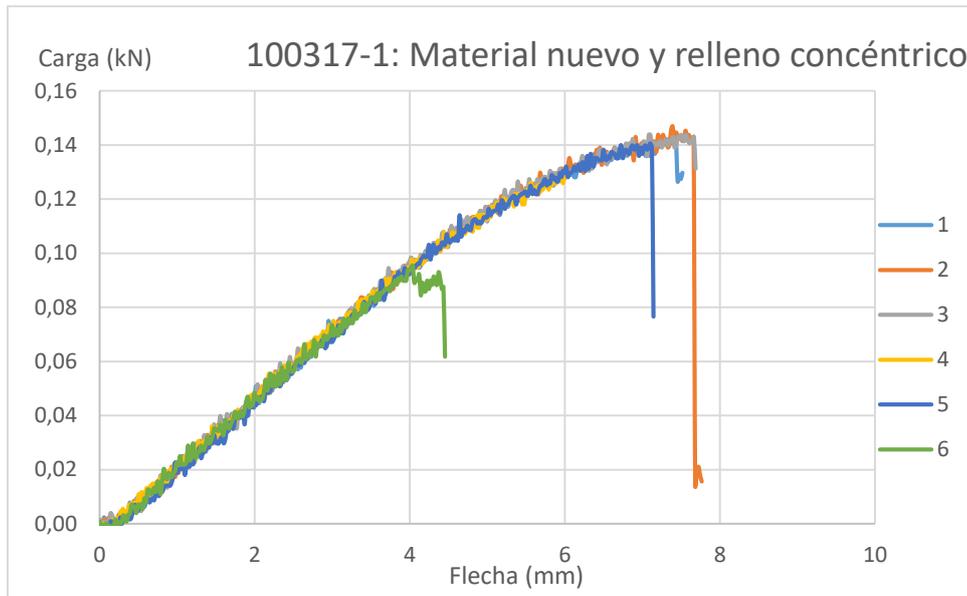
Gráfica Tensión/Deformación Tracción 8-Posición de canto



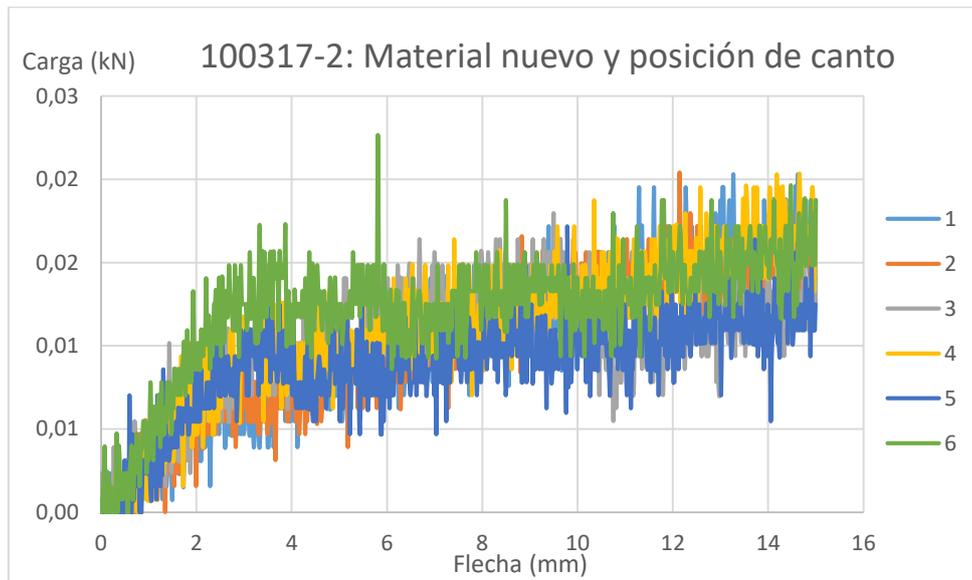
Gráfica Tensión/Deformación Tracción 9-Material nuevo

8.2. Gráficas Carga/Flecha de ensayos a flexión





Gráfica Carga/Flecha Flexión 4-Material nuevo y relleno concéntrico



Gráfica Carga/Flecha Flexión 5-Material nuevo y posición de canto

9. ANEXO II: DATOS DE PARÁMETROS

9.1. Registro de humedad y temperatura para control ambiental

Fecha	Ensayo	Designación	Temp Exterior (°C)			Temp Inferior (°C)			Temp Superior (°C)			Humedad Superior (%)		
			Inicial	Intermedio	Final	Inicial	Intermedio	Final	Inicial	Intermedio	Final	Inicial	Intermedio	Final
14/02/2017	Tracción	Referencia	18,3	20,5	19,7	24,1	27,2	22,8	20,2	24,4	18,8	55,5	43,4	61,3
15/02/2017	Tracción	Geometría 1A	18,9	21,1	19	24,5	27,8	21,6	21,4	25,2	18,1	58,1	52	73,3
16/02/2017	Tracción	Curado (55°C, 3 horas)	19,4	20,7	20,6	25,1	27,5	24,6	21,4	25,1	20,2	61,15	50,2	60,6
20/02/2017	Tracción	Control ambiental	21,3	21,7		28,4	29,2		25,4	27,75		36,85	31,8	
21/02/2017	Tracción	Relleno concéntrico	21,5		21,5	27,9		27,2	25,1		22,9	38		44,7
21/02/2017	Tracción	Escalado 17/10	22,3			28			19,8			59,35		
01/03/2017	Tracción	Escalado 5/8	20,1	20,8	21,2	25,6	28,3	26,9	22,3	25,5	22	48,05	41	50,85
03/03/2017	Tracción	Posición de canto	20	21,2	21,4	26,2	28,8	28,1	21,3	26,3	24,6	54	40,5	43,7
07/03/2017	Flexión	Referencia	21,6	21,8		25,5	27,7		23,6	26,8		55,5	48	
08/03/2017	Flexión	Curado (60°C, 5 horas)	21,5	22,7	23,2	25,8	27,6	27,6	23,7	27,4	24,8	29,5	24	29
09/03/2017	Flexión	Material nuevo	23,4	23,6	24	24	24,5	24,8	27,7	28,2	28,5	25	24	21
09/03/2017	Tracción	Material nuevo	24,1	24,6	24,8	29,4	31,5	31,7	25,6	29,6	29,4	24	20	20,2
10/03/2017	Flexión	Material nuevo y relleno concéntrico	22,7	23,9	24,6	28,2	30,8	30,9	23,4	28,9	26,8	31	23,3	23
10/03/2017	Flexión	Material nuevo y posición de canto	24,7	24,9	25,1	30,6	31,6	31,7	28,1	29,9	29	20,4	19	20

Tabla 6-Valores registrados de temperatura y humedad durante la fabricación de probetas

9.2. Dimensiones de probetas con factor de escala

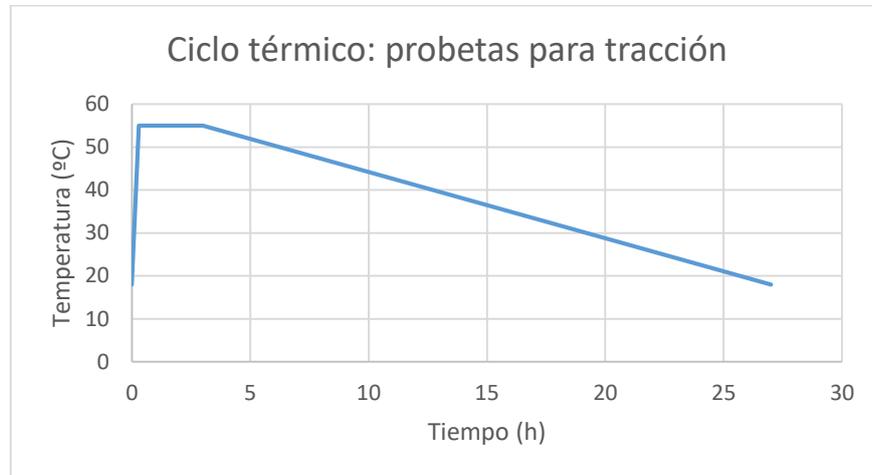
	Tipo de probeta	1A
l_3	Longitud total	93,8
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	50
r	Radio	15,6
l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas	68,31
b_2	Anchura en los extremos	12,5
b_1	Anchura de la parte estrecha	6,25
h	Espesor	3
L_0	Longitud de referencia	31,25
L	Distancia inicial entre las mordazas	72
Medidas en milímetros. Factor de escala 5/8		

Tabla 7-Dimensiones de probeta 1A con factor de escala 5/8

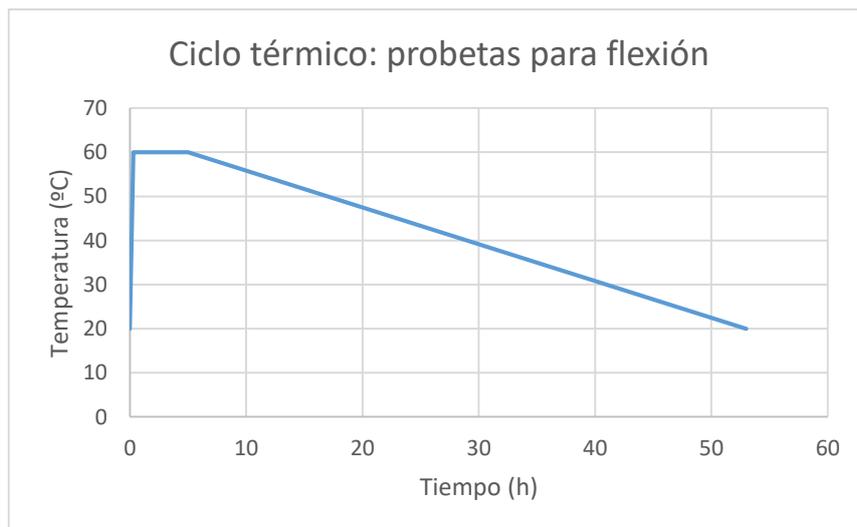
	Tipo de probeta	5A
l_3	Longitud total	127,5
b_2	Anchura en los extremos	21,25
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	42,5
b_1	Anchura de la parte estrecha	6,8
r_1	Radio pequeño	13,6
r_2	Radio grande	21,25
L	Distancia inicial entre las mordazas	85
L_0	Longitud de referencia	34
h	Espesor	4,42
Medidas en milímetros. Factor de escala 17/10		

Tabla 8-Dimensiones de probeta 5A con factor de escala 17/10

9.3. Ciclo térmico de curados



Gráfica 10-Ciclo térmico para "Curado 55°C y 3 horas"



Gráfica 11-Ciclo térmico para "Curado 60°C y 5 horas"

10. ANEXO III: FOTOS DE PROBETAS TRAS ENSAYO

10.1. Fotos de probetas de tracción

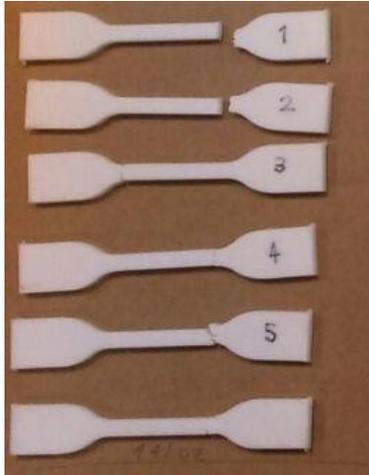


Figura 35-Probetas tracción: Referencia³

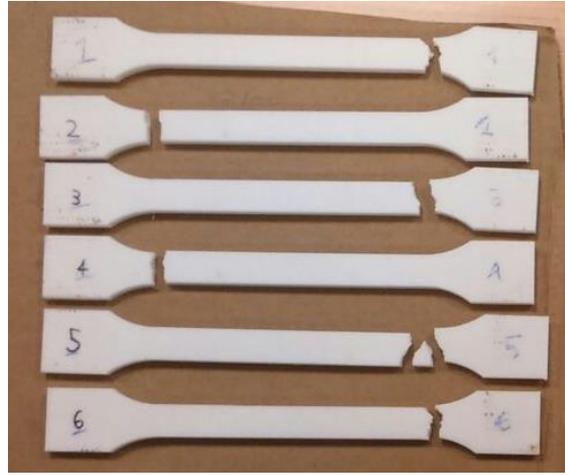


Figura 36-Probetas tracción: Geometría IA



Figura 37-Probetas tracción: Curado (55°C, 3 horas)

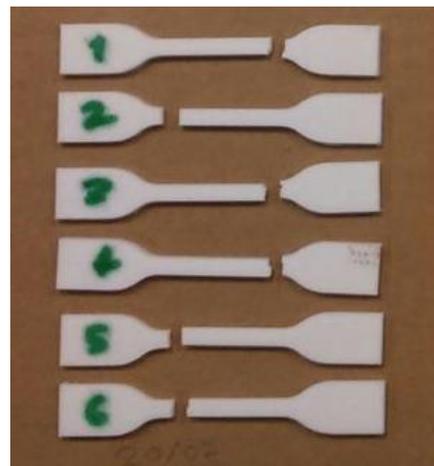


Figura 38-Probetas tracción: Control ambiental

³ Por error, la probeta n°6 no está numerada. Se identifica por ser la única probeta no numerada.

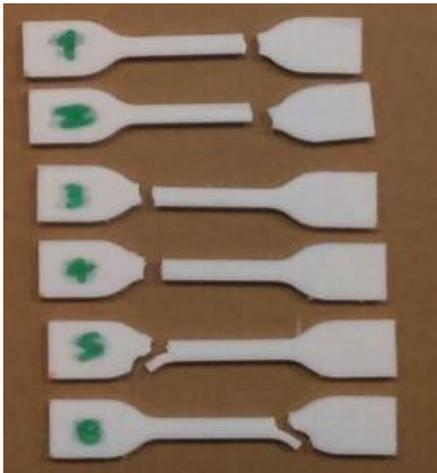


Figura 39-Probetas tracción: Relleno concéntrico



Figura 40-Probetas tracción: Escalado 17/10

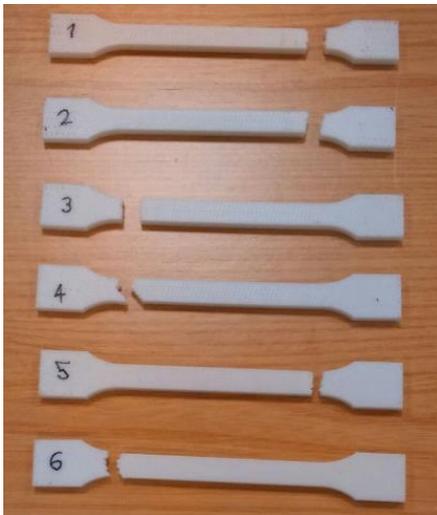


Figura 41-Probetas tracción: Escalado 5/8

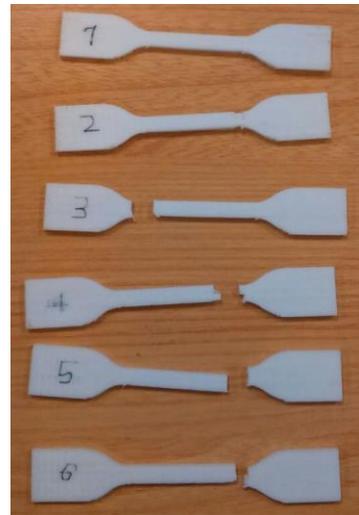


Figura 42-Probetas tracción: Posición de canto

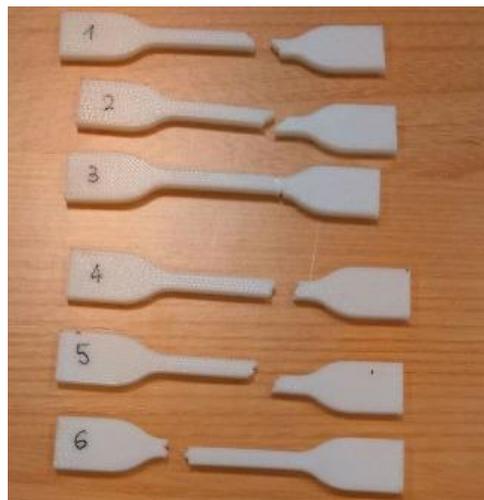


Figura 43-Probetas tracción: Material nuevo

10.2. Fotos de probetas de flexión



Figura 44-Probetas flexión: Referencia



Figura 45-Probetas flexión: Curado (60°C, 5 horas)

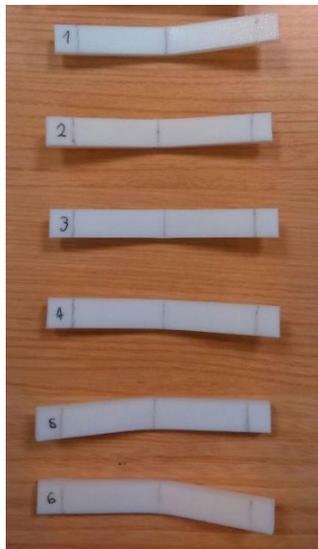


Figura 46-Probetas flexión: Material nuevo



Figura 47-Probetas flexión: Material nuevo y relleno concéntrico

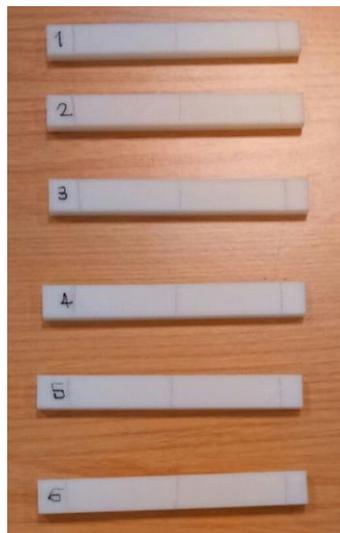


Figura 48-Probetas flexión: Material nuevo y posición de canto

11. ANEXO IV: MICROFOTOGRAFÍAS

A continuación, se exponen las microfotografías de todas las series de probetas tras ser ensayadas. Entre paréntesis se indica a que probeta, dentro de la serie, se le realizó la microfotografía.

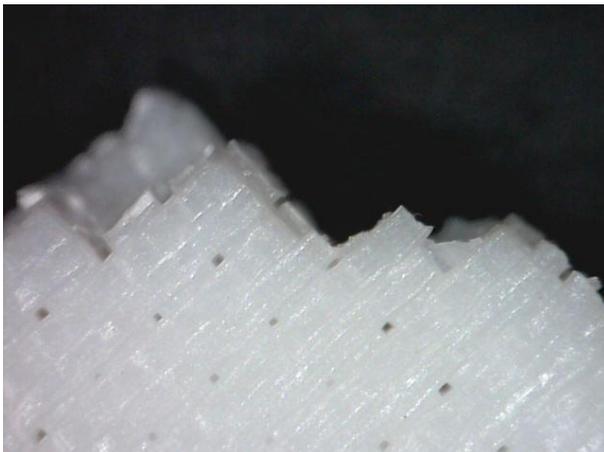
11.1. Microfotografías de tracción



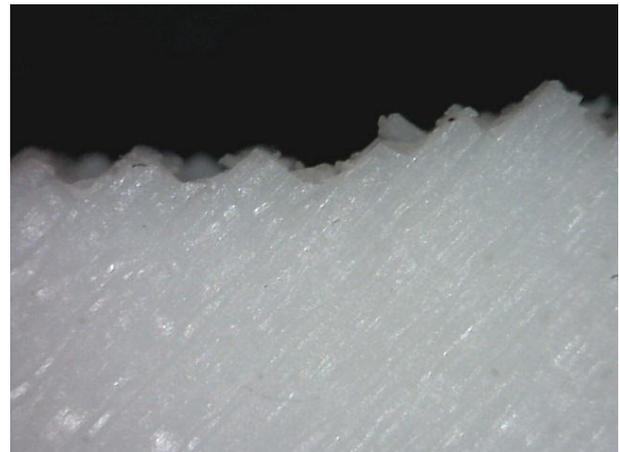
Microfotografía tracción 1: Referencia (P2)



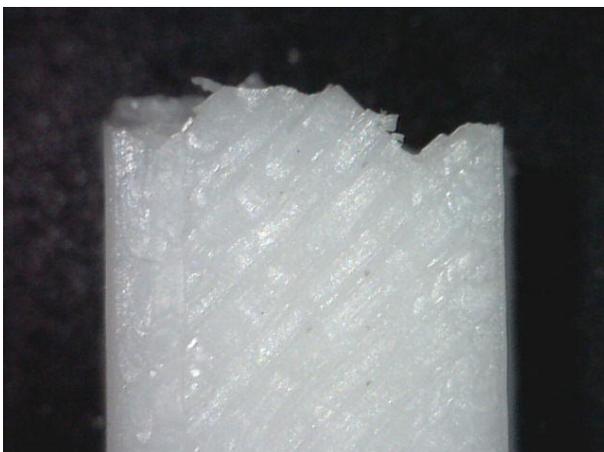
Microfotografía tracción 2: Referencia (P4)



Microfotografía tracción 3: Geometría 1A (P1)



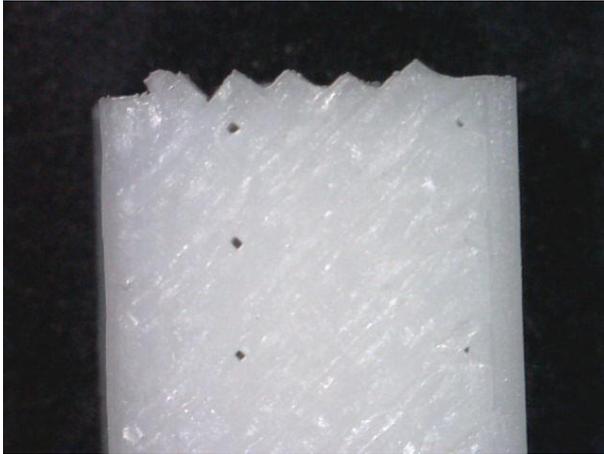
Microfotografía tracción 4: Geometría 1A (P4)



Microfotografía tracción 5: Curado (55°C, 3 horas) (P1)



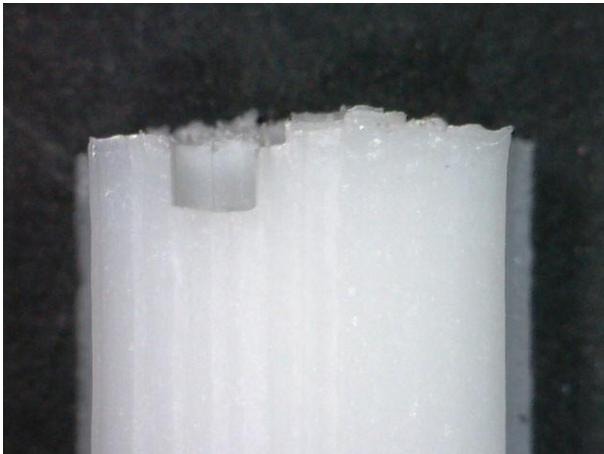
Microfotografía tracción 6: Curado (55°C, 3 horas) (P3)



Microfotografía tracción 7: Control ambiental (P2)



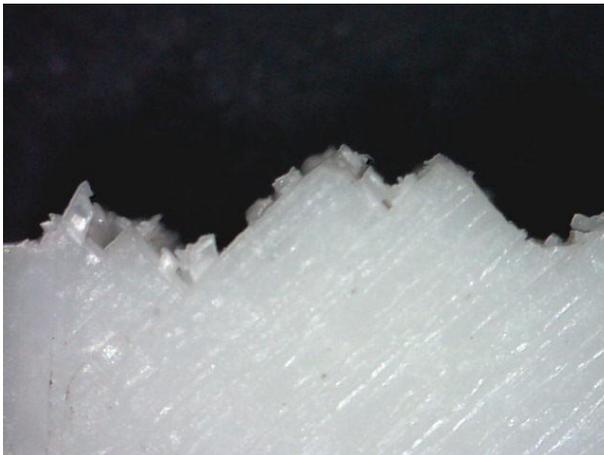
Microfotografía tracción 8: Control ambiental (P4)



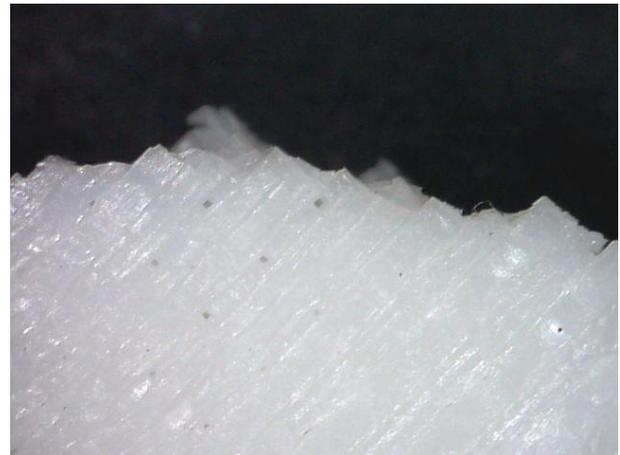
Microfotografía tracción 9: Relleno concéntrico (P4)



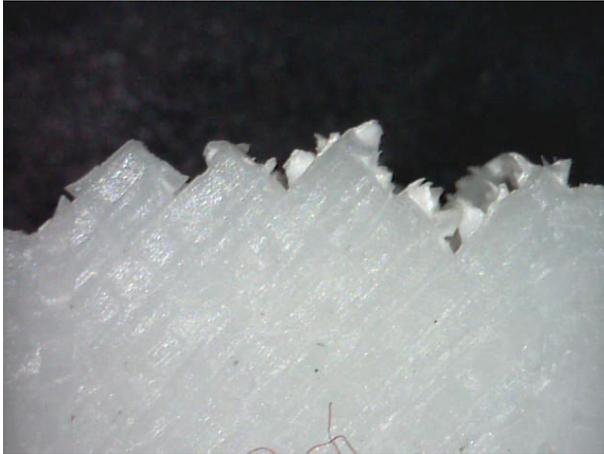
Microfotografía tracción 10: Relleno concéntrico (P5)



Microfotografía tracción 11: Escalado 17/10 (P2)



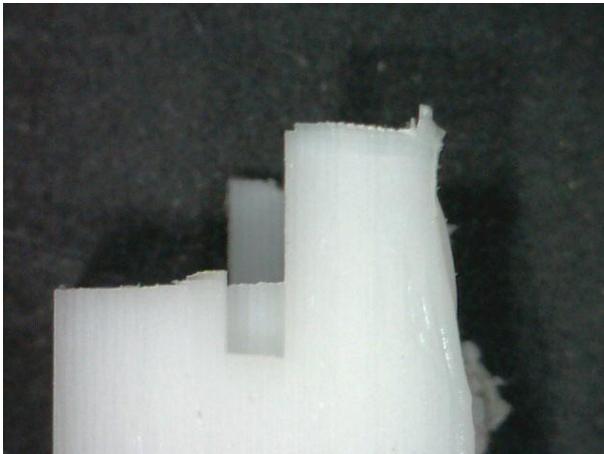
Microfotografía tracción 12: Escalado 17/10 (P4)



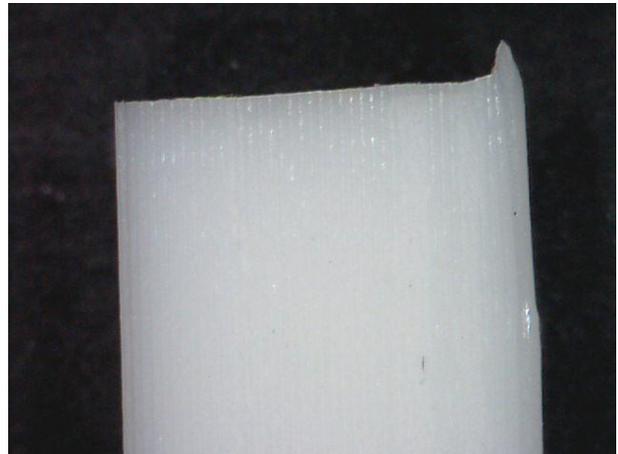
Microfotografía tracción 13: Escalado 5/8 (P1)



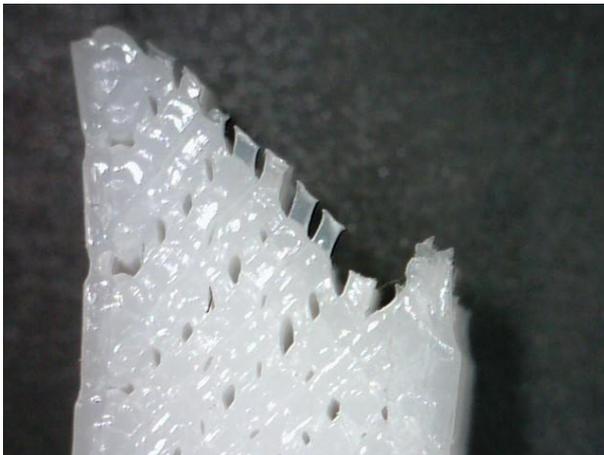
Microfotografía tracción 14: Escalado 5/8 (P6)



Microfotografía tracción 15: Posición de canto (P4)



Microfotografía tracción 16: Posición de canto (P5)

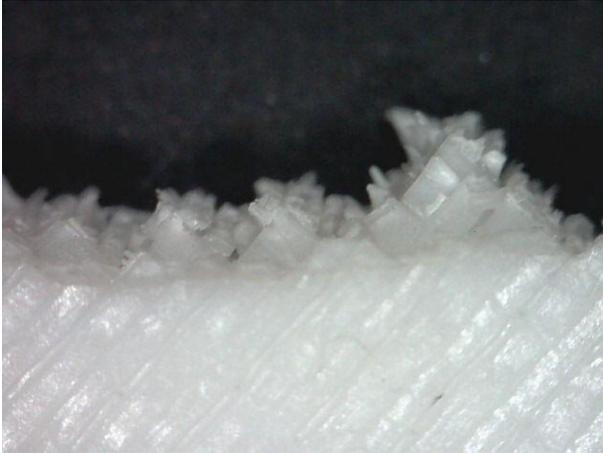


Microfotografía tracción 17: Material nuevo (P2)

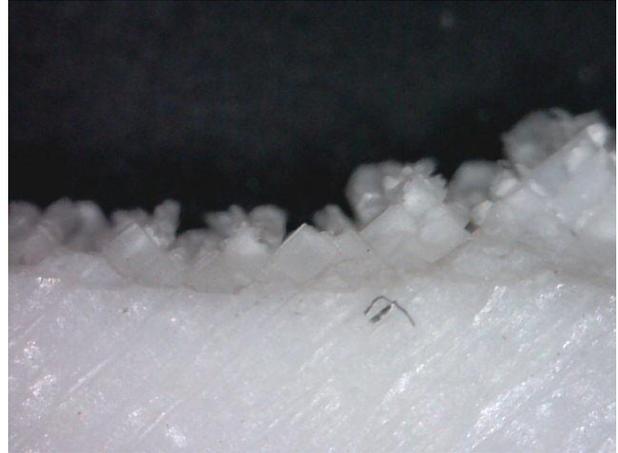


Microfotografía tracción 18: Material nuevo (P5)

11.2. Microfotografías de flexión



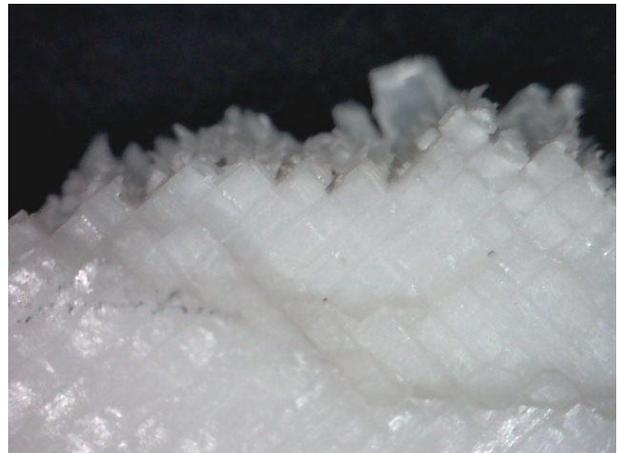
Microfotografía flexión 1: Referencia (P1)



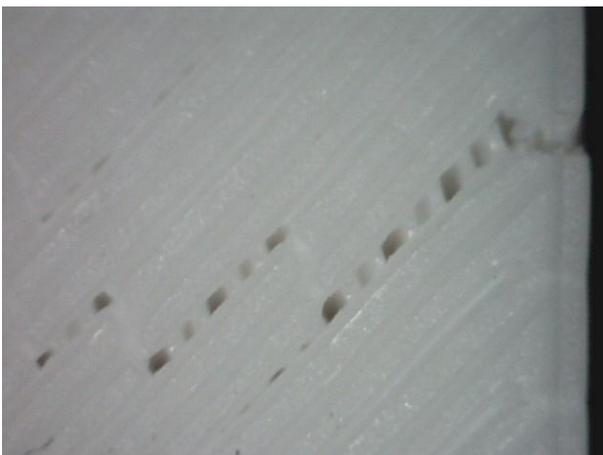
Microfotografía flexión 2: Referencia (P6)



Microfotografía flexión 3: Curado (60°C, 5 horas) (P2)



Microfotografía flexión 4: Curado (60°C, 5 horas) (P4)



Microfotografía flexión 5: Material nuevo (P1)



Microfotografía flexión 6: Material nuevo (P2)



Microfotografía flexión 7: Material nuevo y relleno concéntrico (P1)⁴



Microfotografía flexión 8: Material nuevo y relleno concéntrico (P2)



Microfotografía flexión 9: Material nuevo y posición de canto (P1)



Microfotografía flexión 10: Material nuevo y posición de canto (P2)

⁴ Las microfotografías realizadas a las dos últimas series (“Material nuevo y relleno concéntrico” y “Material nuevo y posición de canto”) fueron hechas sobre el espesor de las probetas y no sobre el ancho, como se hizo con el resto de probetas anteriormente, debido a que era sobre el espesor donde se encontraba el interés visual de las series antes dichas.